



經濟部工業局 111 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 111 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.....	12
2.3 面臨問題及未來發展方向.....	24
三、爐渣高值化及資源循環技術案例.....	31
3.1 爐渣有價物質回收案例.....	32
3.2 高溫重構、碳酸化處理等對鋼渣安定化案例.....	33
3.3 改質轉爐石技術案例.....	34
3.4 創新固碳技術.....	36
3.5 鋼渣肥料應用技術(日本爐石協會).....	41
3.6 爐渣高值化及資源循環技術評析彙整.....	45
四、廢風機葉片回收及資源循環技術案例.....	49
4.1 機械處理技術案例.....	58
4.2 熱處理技術案例.....	63
4.3 化學處理技術案例.....	69
4.4 其他創新技術案例.....	71
4.5 廢風機葉片回收及資源循環技術案例評析彙整.....	73
五、關鍵物料(矽鋁鈷)回收及資源循環技術案例.....	77
5.1 含矽廢料資源化技術案例.....	80
5.2 含鋁廢料資源化技術案例.....	84
5.3 含鋁廢料資源化技術案例.....	90
5.4 關鍵物料(矽鋁鈷)純化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 循環經濟系統圖 .....	2
圖 2.1-1 鋼鐵業產業鏈結構圖 .....	8
圖 2.1-2 風力發電業產業鏈結構圖 .....	10
圖 2.1-3 半導體產業鏈結構圖 .....	11
圖 2.1-4 太陽能產業鏈結構圖 .....	11
圖 2.1-5 能源元件產業鏈結構圖 .....	12
圖 2.2-1 台鋼資源公司還原渣製程流程圖 .....	16
圖 2.2-2 2030 年前臺灣退役風機葉片廢棄量預估圖 .....	17
圖 2.2-3 上緯公司可回收再重複利用的環氧樹脂循環圖 .....	19
圖 2.2-4 光宇應材矽循環多效再生系統流程 .....	21
圖 2.2-5 美琪瑪國際鈷錳系廢觸媒資源化流程 .....	22
圖 2.2-6 資源再生循環中心 .....	24
圖 2.3-1 110 年公告再利用之各類工業廢棄物再利用情形 .....	25
圖 2.3-2 110 年許可再利用之各類工業廢棄物再利用情形 .....	26
圖 2.3-3 110 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形 .....	26
圖 3.1-1 德國 Stein Injection Technology GmbH -硫酸浸提法回收金屬流程 .....	33
圖 3.2-1 日本愛知製鋼還原渣資源化技術 .....	34
圖 3.3-1 改質轉爐渣處理法示意圖 .....	35
圖 3.3-2 轉爐石蒸汽養生法作業流程流程圖 .....	36
圖 3.4-1 日本製鐵海藻復育肥料包「Beverly Unit bag」 .....	37
圖 3.4-2 不同生態環境的減碳比例 .....	38
圖 3.4-3 JFE 鋼鐵和太平洋水泥共同開發二氧化碳的碳酸鹽固定技術 .....	39
圖 3.4-4 NIPPON STEEL 海藻的多角化製鐵利用技術 .....	40
圖 3.5-1 鋼渣產生的肥料製造流程 .....	30
圖 3.5-2 應用智慧科技技術於水稻栽培 .....	44
圖 3.5-3 高度持久的 pH 值校正效果 .....	45
圖 3.5-4 煉鋼爐渣肥料為田間提供鐵鎂錳等礦物質 .....	45
圖 4-1 風力機葉片結構與材料示意圖 .....	49
圖 4-2 機械研磨示意圖 .....	51
圖 4-3 水泥窯共同處理示意圖 .....	52

圖 4-4 熱裂解示意圖 .....	52
圖 4-5 氣化技術示意圖 .....	53
圖 4-6 溶劑分解示意圖 .....	53
圖 4-7 高壓脈衝碎裂示意圖 .....	54
圖 4-8 技術成熟度與投資分布圖 .....	54
圖 4-9 複合材料回收技術估計相對成本和價值 .....	55
圖 4-10 碳纖複材廢棄物處理途徑的經濟評估結果 .....	56
圖 4-11 碳纖複材廢棄物處理途徑的環境影響評估 .....	57
圖 4-12 各技術投入產出彙整表 .....	58
圖 4.1-1 機械回收法處理流程 .....	59
圖 4.1-2 風機葉片切碎後狀態 .....	60
圖 4.1-3 日本富士田之 FRP 廢料回收流程圖 .....	62
圖 4.1-4 富士田商事株式會社廢 FRP 製品處理現況 .....	62
圖 4.2-1 歐盟 FibreEU 計畫玻璃纖維和碳纖維回收處理流程 .....	64
圖 4.2-2 英國 ELG CF 熱裂解回收流程圖 .....	65
圖 4.2-3 ELG Carbon Fibre 公司分析回收碳纖維對環境的影響 .....	66
圖 4.2-4 R3Fiber 技術流程圖 .....	67
圖 4.2-5 日本高砂工業之過熱蒸汽處理流程 .....	68
圖 4.2-6 再生碳纖維製程與應用 .....	69
圖 4.3-1 葉片中環氧樹脂循環再利用之流程 .....	70
圖 4.3-2 西門子歌美颯葉片回收流程 .....	71
圖 4.4-1 DecomBlades 計畫對葉片回收之參與者與研究流程 .....	72
圖 5-1 關鍵物料－矽的主要應用範圍 .....	78
圖 5-2 關鍵物料－鈷的主要應用範圍 .....	79
圖 5-3 關鍵物料－銻的主要應用範圍 .....	79
圖 5.1-1 矽物料流布概況 .....	81
圖 5.1-2 日本新菱公司熱裂解處理法流程圖 .....	82
圖 5.1-3 德國 Esk Sic 以低碳排分離技術回收碳化矽 .....	83
圖 5.1-4 俄羅斯 Skolkovo 科技學院將太陽能電池以水熱合成氧化矽流程 .....	84
圖 5.2-1 鈷物料流布概況 .....	85
圖 5.2-2 Umicore 濕法及火法組合流程示意圖 .....	86

圖 5.2-3 Umicore 合金精煉流程示意圖 .....	87
圖 5.2-4 ACC 在法國 Nersac 電池回收服務的試點工廠 .....	87
圖 5.2-5 格林美公司以溶媒萃取回收鎳鈷錳的方法流程圖 .....	89
圖 5.3-1 銻物料流布概況 .....	90
圖 5.3-2 CreaSolv®溶劑溶解回收氧化銻與塑膠顆粒流程 .....	92
圖 5.3-3 從廢棄鹵磷酸鈣螢光粉中回收銻再生技術流程圖 .....	94
圖 5.3-4 以 Vinyloop 程序在分離器(傾析器)中回收 ATO 與 PVC 顆粒 .....	95
圖 5.3-5 Campine 生產三氧化二銻阻燃母粒產品 .....	96

# 表 目 錄

表 2.1-1 鋼爐碴、廢風機葉片及關鍵物料之產業發展現況 .....	6
表 2.2-1 國內鋼爐碴再利用現況 .....	14
表 2.2-2 國內爐石相關碳足跡盤查彙整 .....	16
表 2.2-3 國內廢玻璃纖維處理方式現況 .....	18
表 2.2-4 國內關鍵物料(矽鈹銻)處理方式現況.....	20
表 2.2-5 資源再生循環中心循環經濟項目 .....	23
表 2.3-1 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(爐碴).....	27
表 2.3-2 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(廢風機葉片).....	28
表 2.3-3 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(關鍵物料-矽鈹銻) .....	28
表 3-1 鋼爐碴的應用領域與資源循環技術 .....	31
表 3.6-1 爐碴高值化及資源循環技術彙整 .....	46
表 4-1 葉片回收技術比較 .....	50
表 4.5-1 廢風機葉片回收及資源循環技術彙整 .....	74
表 5-1 優先管理之 10 項關鍵物料篩選 .....	77
表 5-2 關鍵物料(矽、鈹、銻)的廢棄物產出形式與資源循環技術.....	80
表 5.3-1 CreaSolv®溶劑溶解回收氧化銻與塑膠顆粒步驟說明 .....	91
表 5.3-2 HALO 螢光粉的組成以 wt%和 mol%表示 .....	93
表 5.3-3 從廢棄鹵磷酸鈣螢光粉中回收銻步驟說明 .....	94
表 5.4-1 關鍵物料(矽、鈹、銻)資源循環技術彙整.....	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。

本評估報告針對爐渣高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈹鎢)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。

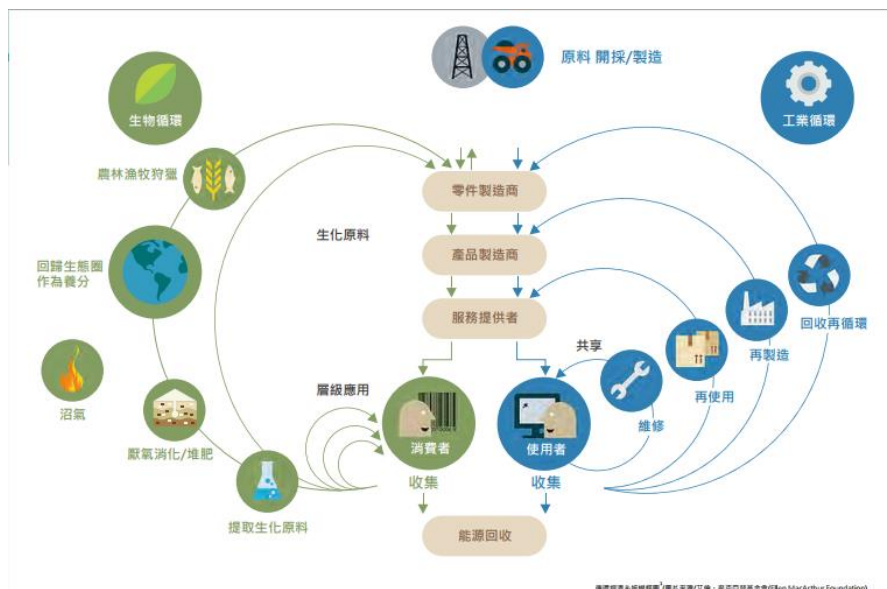
### 1.1 循環經濟的定義

「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：<https://green.pidc.org.tw/detail.php?lang=tw&type=2&id=65>

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，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。

目前國內對於爐渣高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈷銻)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 111 年 4 月 8 日辦理專家諮詢會議，選定爐碴高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈹銻)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

有關爐碴高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈹銻)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 鋼爐碴、廢風機葉片及關鍵物料之產業發展現況

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
鋼爐碴		鋼鐵業	一貫作業煉鋼廠中產生之高爐及轉爐石(碴)、電弧爐氧化期產生之氧化碴、精煉爐還原期產生之還原碴。	<ul style="list-style-type: none"> <li>較適合使用前端熱渣改質技術，技術符合 CNS 要求；蒸氣養生法，處理量大低成本。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>常壓蒸氣養生法、高壓蒸氣養生法、滾筒法、悶罐法、水淬法、熱渣改質法。</li> </ul>
廢風機葉片		發電產業 (設備製造業、整合服務業、風力發電業)	風力發電設備所產生之葉片	<ul style="list-style-type: none"> <li>製程廢料有限</li> <li>找不到專門處理單位</li> <li>難吸引業者投入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械處理技術</li> <li>熱處理技術</li> <li>化學處理技術</li> </ul>
關鍵物料矽	<ul style="list-style-type: none"> <li>矽晶圓廢料</li> <li>研磨矽污泥</li> <li>切削矽泥</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>矽晶圓</li> <li>半導體材料</li> </ul>	半導體矽晶圓(上中下游) 太陽能矽晶圓(上中下游)	<ul style="list-style-type: none"> <li>半導體矽晶圓純度與規格要求高，現有技術難以使其廢料回到原製程使用。</li> <li>太陽能矽晶圓切削矽泥採火冶金技術，能源消耗大。</li> <li>低純度含矽廢料回收成本高。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>將晶圓破片先以酸液浸泡，以溶液沖洗，再放入高溫爐擴散程序後，製成太陽能矽晶圓片。</li> <li>廢砂漿前處理後，合成反應生成矽酸鈉，再經酸化，生成氧化矽(光字應材)。</li> <li>切削矽泥採火冶金技術，製成矽錠(成亞資源)。</li> <li>浮選法回收高純度碳化矽。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>玻璃廢料</li> </ul>	TFT-LCD	玻璃基板	<ul style="list-style-type: none"> <li>TFT-LCD 為無鹼硼矽玻璃，膨脹係數與傳統素玻璃不同，故無法以傳統模式回收。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>前處理、混料、製胚、乾燥、燒結為建材。</li> </ul>
關鍵物料鈷	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢含鈷靶材</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>化學材料</li> <li>電子產業</li> <li>能源元件產業</li> </ul>	鈷靶材 鈷錳觸媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>僅鈷錳觸媒原料供應與製造商回收再用於觸媒產品。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鈷錳觸媒進行酸溶、沉澱、過濾、調配，製成再生鈷錳觸媒。原料供應商進行回收再利用，以作為觸媒生產製程原料。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>廢鈷錳觸媒</li> </ul>		鈷化學品	<ul style="list-style-type: none"> <li>鈷化學品除可逆</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>逆向回收</li> </ul>

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
				向回收外，多採焚化掩埋處理。	
關鍵物料 鈷	▪ 電池材料		鋰鈷電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 濕法冶金需使用大量藥劑。</li> <li>▪ 火法冶金需耗用大量能源。</li> </ul>	▪ 濕式冶金法與火法冶金法回收鋰、鈷金屬。
關鍵物料 鎢	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 鉛酸電池</li> <li>▪ 太陽能電池</li> <li>▪ 合金材料</li> <li>▪ 鎢化合物</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 能源元件產業</li> <li>▪ 電子產業</li> <li>▪ 紡織產業</li> </ul>	金屬合金電池材料	▪ 火法冶金需耗用大量能源。	▪ 破碎、焙燒、精煉，製成合金。
			電子材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 濕法冶金需使用大量藥劑。</li> <li>▪ 含鎢廢料中鎢含量低，回收價值低，多以焚化或熱處理。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 濺鍍靶材酸溶浸漬、pH 調整、萃取、電解回收金屬。</li> </ul>

資料來源：本計畫彙整。

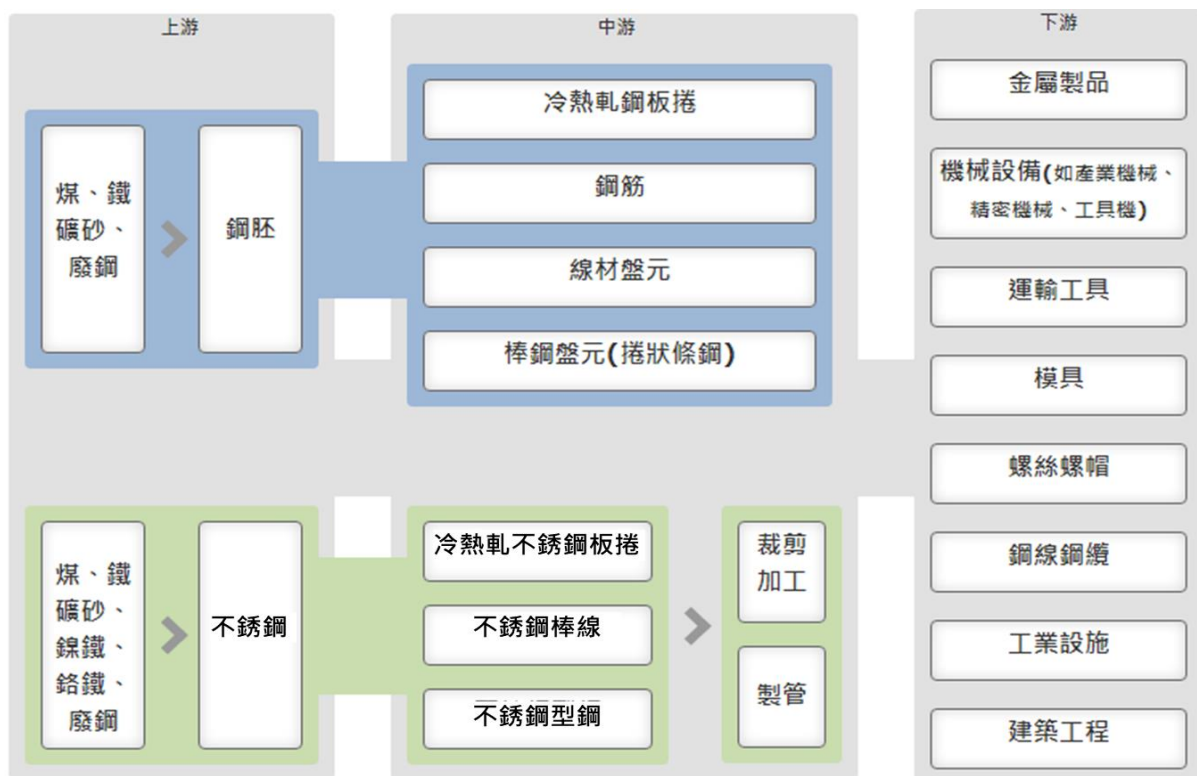
## 1. 鋼鐵業

鋼鐵依材質可分為「碳鋼」及「不銹鋼與合金鋼」兩大類。碳鋼產業鏈上游為冶金煤、鐵礦砂或廢鋼為主要原料，經高爐或電爐煉製而成的大鋼胚、小鋼胚、扁鋼胚、鋼錠等。不銹鋼產業鏈結構與碳鋼產業鏈相近，惟衍生出中游的裁剪加工及製管業，但下游則與碳鋼相同。

鋼鐵業的上游原料有鋼胚與不銹鋼胚，其需要透過煉鋼的程序來製造。煉鋼方式可以分為高爐煉鋼與電弧爐煉鋼，高爐煉鋼的主要原料為鐵礦砂與冶金煤，98%的鐵礦砂用於鋼鐵原料，鋼鐵廠將鐵礦砂、冶金煤及石灰石等原料，經過高爐生產出粗鋼，再依不同使用方式製造出各式鋼材。不銹鋼屬於鋼品產業的特殊鋼材，不銹鋼係指鉻含量超過 12% 的鐵合金，因不銹鋼具備抗氧化與耐侵蝕的特性，故廣泛運用在廚具、汽車材料、建築材料、醫療用材到 3C 電子業等。

鋼鐵業中游產品屬碳鋼類方面，產品有冷熱軋鋼板捲、鋼筋、線材盤元、棒鋼盤元；以不銹鋼類而言，則有冷熱軋不銹鋼板捲、不銹鋼棒線、不銹鋼型鋼，以及其後段之裁剪加工與製管業。不銹鋼類方面，扁鋼胚經加熱後，經粗軋機及精軋機軋延，並噴水冷卻，即成熱軋鋼捲，主要用途為冷軋鋼捲的原料，亦可供製鋼管、貨櫃、容器等製管產品；熱軋鋼捲經酸洗、軋延、退火、精整後即成冷軋鋼捲，主要市場為製管、自行車及零件、汽機車及零件、鍍面產品等。

下游應用產品包羅萬象，包括各類金屬製品、機械設備、運輸工具、模具、螺絲螺帽、鋼線鋼纜及工業設施及建築工程上所需之各種鋼材，如不銹鋼管配件、微接頭元件、建築五金零件、鎖類製品等。



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

圖 2.1-1 鋼鐵業產業鏈結構圖

## 2.發電產業：

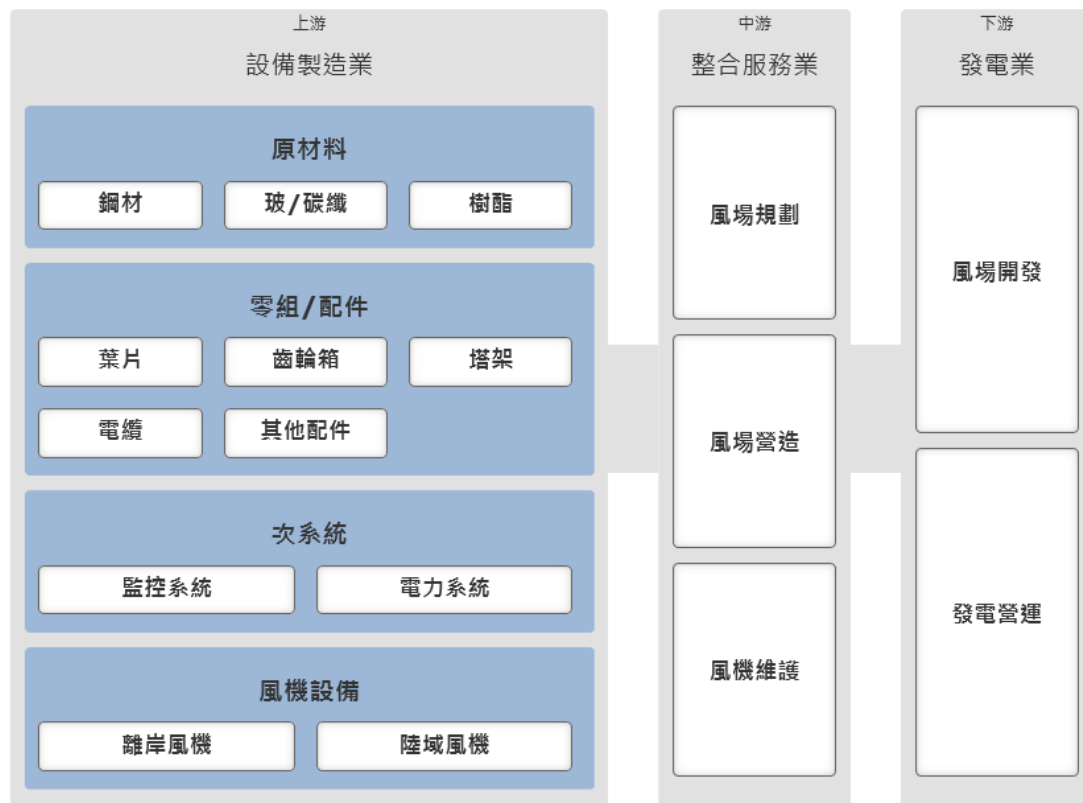
風力發電產業可以區分為設備製造業、整合服務業以及風力發電業三部分，另根據風力發電機裝設位置，可區分為安裝在陸地上的陸域型風機，以及裝設在海上的離岸型風機兩類，當前以陸域型風機技術較為成熟，而離岸型風機仍處於發展階段，尚存在不少技術困難。

設備製造業包括風力發電機之原材料、零組件及配件、次系統之供應與風機設備系統組裝，其中風機原材料供應涵蓋鋼材、玻璃纖維、碳纖維及樹脂，零組件與配件則涵蓋風機系統相關之葉片、齒輪箱、塔架、電纜及其他配件，次系統則包括監控系統與電力系統兩部分，風機設備系統則有陸域型與離岸型；整合服務業包括風場規劃、風場營造以及風機維護等廠商；風力發電業則包括風場開發業者及發電營運業者。

風力發電產業的上游主要是設備製造供應商，最主要的關鍵便是風力機系統。風力機系統主要由葉片、塔架、機艙與其他次系統所組成，機艙內由齒輪箱、發電機、軸承等其他零配件組成機組核心，再輔以監控與電力系統，構建成完整的風力機組設施。

風力發電產業鏈的中游為整合服務業，有風場規劃、風場營造及風機維護等業者。風場規劃是業者在預選定的發展區域，根據基本環境資料(諸如海象、漂沙及底床質、水深、地質、生態、社會人文等)，所進行之風力廠場址選擇、風能規模與發電量評估、採用機組評估與佈置方案、電源線路規劃及後續施工規劃等業務。風場營造則是根據施工規劃，在場址進行整地、基礎結構、建築設備安裝及土木工程之興建、改建等活動。風機維護業者則是在風力發電廠完成相關硬體設施並營運後，由風機設備供應商或協力廠商業者提供設備之後續保固、檢測與維修替換服務。

風力發電產業的下游包括風力發電的綜合開發業者及發電營運業者，綜合開發業者亦多為能源服務供應商，針對預開發之風場進行包括風場潛能、技術、工程、財務等進行可行性分析，統籌風場規劃、營造乃至於營運活動等顧問諮詢服務。



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

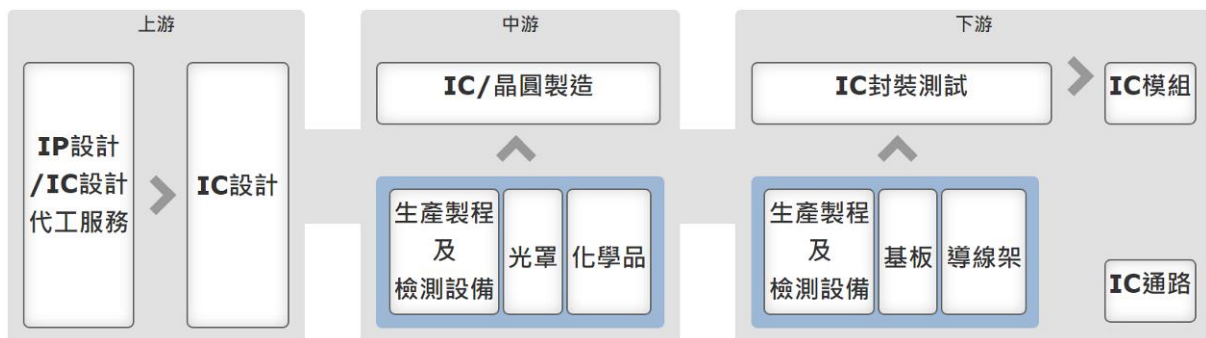
圖 2.1-2 風力發電產業鏈結構圖

### 3. 矽晶圓產業：

矽晶圓主要可分為半導體用矽晶圓及太陽能矽晶圓二大類，其中半導體矽晶圓部分，其上游產業鏈為矽智財(Semiconductor intellectual property, IP)設計及積體電路(Integrated Circuit, 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、化學品等產業，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。



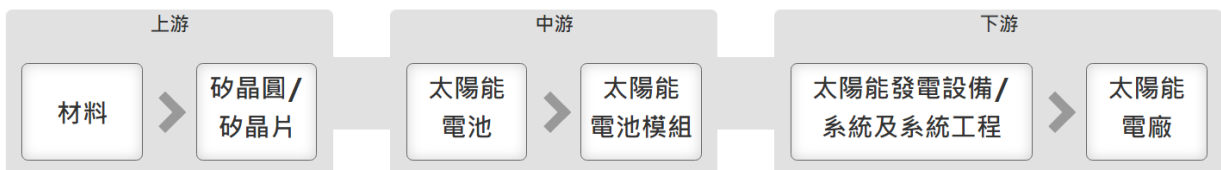
台灣擁有全球最完整的半導體產業聚落及專業分工，IC 設計公司在產品設計完成後，委由專業晶圓代工廠或 IDM 廠(整合型半導體廠，從 IC 設計、製造、封裝、測試到最終銷售都一手包辦)製作成晶圓半成品，經由前段測試，再轉給專業封裝廠進行切割及封裝，最後由專業測試廠進行後段測試，測試後之成品則經由銷售管道售予系統廠商裝配生產成為系統產品。其半導體產業結構如圖 2.1-3 所示。



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

圖 2.1-3 半導體產業鏈結構圖

太陽能矽晶圓部分，其上游產業鏈為多晶矽材、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，其太陽能產業結構如圖 2.1-4 所示。



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

圖 2.1-4 太陽能產業鏈結構圖

矽晶圓產業製程所產生之廢棄物包含廢矽晶圓、廢砂漿、切削矽泥等。

#### 4. 能源元件產業

能源元件產業係指電池製造之上中下游關聯產業，電池主要由三個元件組成，分別是電池芯、機殼與電源控制板。能源元件上游主要為電池原材料廠商，包括電極、電解液、隔離膜、罐體等原材料供應商；中游為電池芯；下游為電池模組廠商。目前熟知的電池種類有鉛酸電池、鎳鎘電池、鎳氫電池、鋰電池、磷酸鋰鐵電池，其能源元件產業結構如圖 2.1-5 所示。



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

**圖 2.1-5 能源元件產業鏈結構圖**

能源元件產業製程所產生之廢棄物包含鈷錳觸媒及鈷錳塵灰、製造氧化銻所產生之集塵灰、底渣及其中間產物廢棄物、含鈹、銻、碲、鉍金屬廢料等。

## 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。相關關鍵技術經查目前環保署尚無適用之方法學，以提供業者進行申請碳權。目前國內對於爐碴高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈷銻)回收及資源循環技術，列舉回收爐碴廠商案例概述如下：

### 1.鋼爐碴

鋼爐碴回收再利用是減少對自然資源之開採、資源循環使用零廢棄為目前世界各國之環保趨勢，亦為行政院與環保署既定政策。『經濟部事業廢棄物再利用管理辦法』對再利用管理的型態主要區分為三類型，分別是：個案再利用、通案再利用以及公告再利用。管理模式則分別為：若屬個案以及通案再利用，皆須要申請再利用許可；若事業廢棄物之性質安定且再利用技術成熟者，其種類及管理方式經經濟部公告後，事業及再利用機構得逕依該管理方式進行再利用，即是所謂的公告再利用。電弧爐煉鋼爐碴(石)屬『經濟部事業廢棄物再利用管理辦法』公告再利用種類編號第八項，內容明訂氧化碴(石)與還原碴(石)須分類儲存，公告再利用

用途包含：水泥原料、水泥製品原料、瀝青混凝土粒料原料、瀝青混凝土原料、非結構性混凝土粒料原料、非結構性混凝土原料或鋪面工程（機場、道路、人行道、貨櫃場或停車場）之基層或底層級配粒料原料。另外目前業界常見鋼爐碴回收處理技術主要可分為還原碴高壓蒸釜安定化、氧化碴、還原碴取代水泥原料之應用，有關國內鋼爐碴再利用狀況，彙整如表 2.2-1 所示。以下介紹國內循環經濟廠商-台鋼資源股份有限公司還原碴再利用狀況。

表 2.2-1 國內鋼爐碴再利用現況

廢棄物來源	廢棄物代碼	應用方式	廠商
鋼鐵基本工業在煉鐵高爐製程產生之水淬高爐石（碴）	水淬高爐石（碴）(G-1201)	水淬高爐爐碴粉、水淬高爐碴水泥	中聯資源、永觀工業
基本金屬製造業及金屬製品製造業在感應電爐熔煉鋼鐵製程所產生之爐碴（石）	感應電爐爐碴（石）(R-1204)	混凝土（地）磚原料、控制性低強度回填材料、用粒料原料、混凝土粒料原料、瀝青混凝土粒料原料、紐澤西護欄原料、預拌混凝土原料、道路工程粒料原料、空心磚原料、	李連資源、立順興、長信環保、上順水泥、頭份混凝土、岳林開發等約 20 家
基本金屬製造業及金屬製品製造業在化鐵爐熔煉鋼鐵製程所產生之爐碴（石）	化鐵爐爐碴（石）(R-1205)	混凝土（地）磚原料、控制性低強度回填材料、用粒料原料、混凝土粒料原料、瀝青混凝土粒料原料、紐澤西護欄原料、預拌混凝土原料、道路工程粒料原料、水泥生料	幸福水泥、明威開發、鴻石碎石、榮星事業、樺勝環保、立順興等約 14 家
其他非金屬礦物製品製造業採熱處理方式再利用煉鋼集塵灰時於旋轉窯製程所產	旋轉窯爐碴（石）(R-1207)	混凝土（地）磚原料、非結構性混凝土粒料原料、鋪面工程之基層、底層級配粒料原料、預拌混凝土原料、瀝青混凝土粒料原料	台鋼資源、鴻磐興業、長信環保、立順興、頭份混凝土等約 7 家

生之爐渣 (石)			
基本金屬製造業在電弧爐煉鋼製程所產生之氧化渣(石)	電弧爐煉鋼氧化渣(石)(R-1209)	紐澤西護欄原料、控制性低強度回填材料用粒料原料、鋪面工程(道路、人行道、貨櫃場或停車場)之基層或底層級配粒料原料、瀝青混凝土粒料原料、經高壓蒸氣處理後作為非構造物用預拌混凝土粒料原料	皓勝工業、立順興、台鋼資源、總茂環保、聯成預拌、中聯資源等約 37 家
基本金屬製造業在電弧爐煉鋼製程所產生之還原渣(石)	電弧爐煉鋼還原渣(石)(R-1210)	還原渣粒料取代水泥原料應用於 CLSM 粒料、非構造物混凝土粒料、水泥製品粒料、瀝青混凝土填充用細粉料等	台鋼資源、潤泰精密材料、台泥、亞泥、總茂環保等約 9 家

資料來源：本計畫彙整

以台鋼資源公司為例，將廢棄電弧爐煉鋼還原渣(石)，透過高壓蒸釜安定化技術，將還原渣經過 3 道破碎、3 道磁選、2 次篩分，把粒徑破碎至 5mm 以下後，採輸送帶送至蒸壓釜並進行安定化，其製程流程如圖 2.2-1 所示。還原渣安定化之條件為壓力 21 Kg/cm<sup>2</sup>(溫度約 215℃)之高壓蒸氣，蒸壓時間 3hr 以上產製還原渣粒料，以應用於取代水泥原料、控制性低強度回填材料 (CLSM)、非構造物混凝土等產品。其還原渣(石)循環模式如圖 2.2-1，還原渣粒料產品符合 CNS 1240、CNS 15311 之浸水膨脹率<0.5%之相關規定，以及熱壓膨脹試驗等可符合再利用管理辦法規定。還原渣受水合作用之潛在膨脹率，以及非構造用預拌混凝土製品之熱壓膨脹率均符合要求，顯示還原渣之安定性與適用性。將煉鋼還原渣轉變成穩定且高品質之營建再生材料，導入於合適的非結構性營建用途，不僅可有效發揮其適用性與價值性，同時具有兼顧工程品質、節省工程經費用、減少廢棄物等三重效益，達成營建材料循環與永續經濟的政策目標。有關國內爐渣碳足跡盤查彙整如表 2.2-2。



資料來源：電爐還原渣高壓蒸釜安定化技術循環經濟案例，鋼爐渣循環經濟技術交流媒合會簡報，2022 年 9 月。

圖 2.2-1 台鋼資源公司還原渣製程流程圖

表 2.2-2 國內爐石相關碳足跡盤查彙整

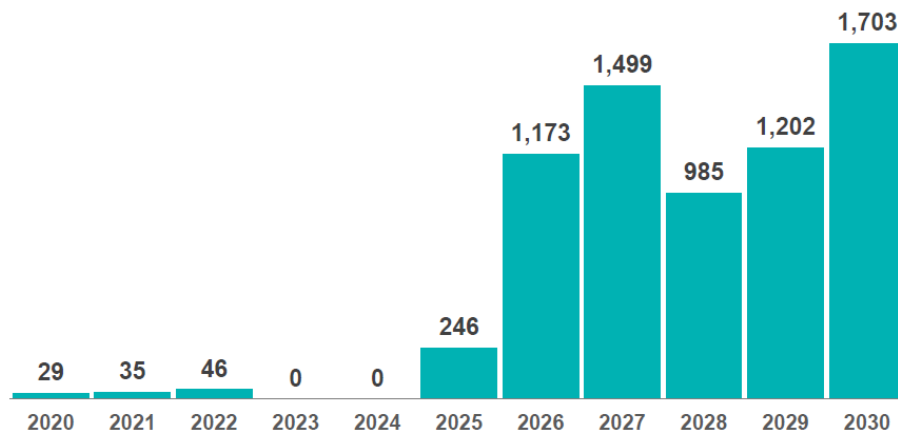
公司名稱	爐石來源	標的名稱	碳足跡
皓勝工業股份有限公司	電弧爐煉鋼爐氧化渣(石)	電弧爐煉鋼爐氧化渣(石)處理	5.85 kgCO <sub>2</sub> e/公噸
		控制性低強度回填材料 (CLSM) 抗壓強度 (20-90 kgf/cm <sup>2</sup> )	120.00kg CO <sub>2</sub> e/每立方公尺 CLSM(20-90 kgf/cm <sup>2</sup> )
台鋼資源股份有限公司	電弧爐煉鋼氧化渣(石)、電弧爐煉鋼還原渣(石)、旋轉窯爐渣(石)	控制性低強度回填材料 (CLSM) 抗壓強度 (20-90 kgf/cm <sup>2</sup> )	盤查中，預計 2023 年進行外部查證
立順興資源科技股份有限公司	電弧爐煉鋼爐氧化渣(石)、感應電爐爐渣	控制性低強度回填材料 (管溝鋪面用 CLSM) 抗壓強度 (20-90 kgf/cm <sub>2</sub> )	盤查中，預計 2023 年進行外部查證

資料來源：本計畫調查彙整

## 2. 廢風機葉片回收

臺灣從 2000 年來開始建設風力發電裝置，預計到 2030 年前將有高達 249 座風機陸續退役，廢棄量預估如圖 2.2-2 所示，且臺灣離岸風電推動計畫，也預計在 2035 年前以平均每年 1GW 容量的速度增設風力發電裝

置。由於廢風機葉片係屬於玻纖複合材料，此複材焚化後底渣會降低焚化爐效能，因此國內目前複材事業廢棄物主要的處理方式為掩埋，然而風機葉片尺寸大且臺灣地狹人稠，需要更好的解決方案。



資料來源：半導體產業之廢酸動靜脈整合分析、臺灣風機葉片複合材料動靜脈整合分析之期末成果報告簡報，2021 年 12 月。

圖 2.2-2 2030 年前臺灣退役風機葉片廢棄量預估圖

台灣水泥公司於 2020 年依促參法提出「花蓮縣水泥業(窯)協同處理廢棄物民間自提 BOO 案」，在台泥和平廠 DAKA 園區，利用水泥旋窯、氣化爐處理生活垃圾及宜花東 3 縣事業廢棄物，經 2020 年底通過環差分析審查，並已於 2021 年 8 月動工，預計 2023 年完工。日處理量 200 公噸，包括花蓮縣一般垃圾 120 公噸、以及宜蘭、花蓮、台東的各類事業廢棄物 80 公噸，核准的廢棄物內容包括廢塑膠混合物、廢橡膠、廢紙、廢木材、廢布、廢纖維或其他棉布混合物、有機污泥等。未來可作為廢風機葉片回收處理參考依循。

依據環保署 2021 年「各事業廢棄物代碼申報流向統計年報」統計，廢玻璃纖維經處理後，作為控制性低強度回填材料原料或取代水泥原料，彙整如表 2.2-3。



表 2.2-3 國內廢玻璃纖維處理方式現況

廢棄物來源	廢棄物代碼	處理方式	廠商
銅箔基板製程、含金屬之印刷電路板廢料及其粉屑(E-0221)銅回收處理製程、玻璃纖維布製程	廢玻璃纖維(D-2410)	控制性低強度回填材料原料或取代水泥原料	定益企業、立順興
		微波裂解處理	安能聚綠能、永虹先進材料
公告可直接再利用：印刷電路板製造業在銅箔基板製程中所產生之含樹脂玻璃纖維布廢料。	含樹脂玻璃纖維布廢料(R-0409)	玻璃纖維板原料	優美祿實業、鴻泰絕緣材料
事業產生之廢玻璃（用品、容器、碎片或屑、CRT 面板玻璃、玻璃纖維或未注入液晶之面板玻璃、醫療機構產出經滅菌處理後之廢玻璃）。	廢玻璃(R-0401)	玻璃纖維板原料（限玻璃纖維）	優美祿實業、台寶玻璃、春池玻璃、宜興玻璃
		水泥板原料、空心磚原料、混凝土粒料原料、玻璃原料	優美祿實業、春池玻璃、路亨企業、福和窯業、尚發窯業等 72 家

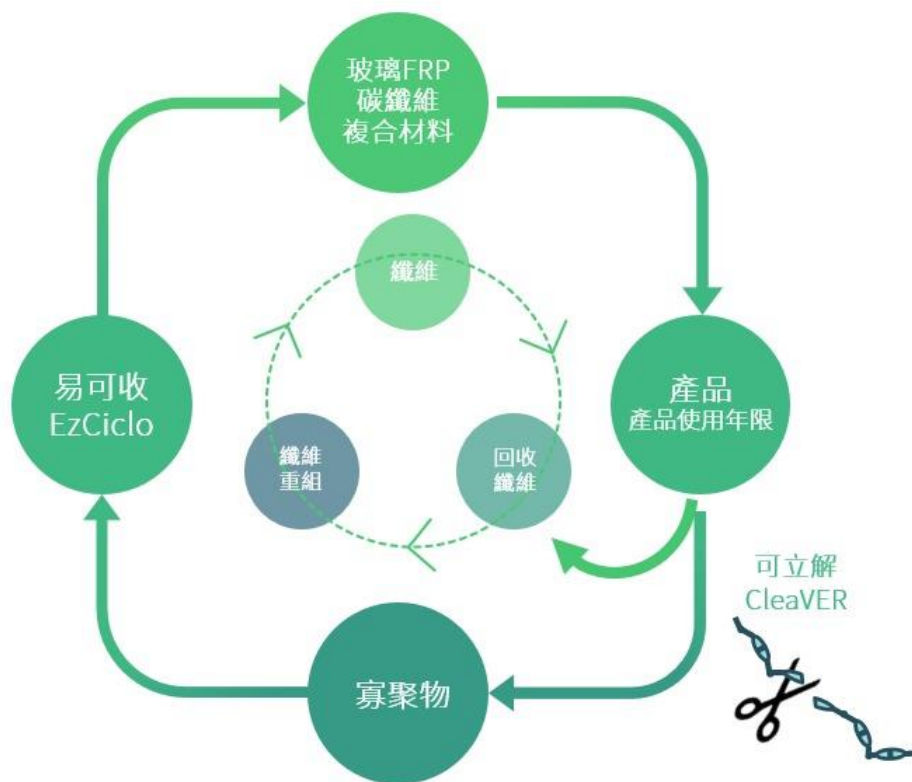
資料來源：本計畫彙整

以上緯國際公司為例，於今年度研發推出「EzCiclo 易可收」、「CleaVER 可立解」兩項全新產品，使用「EzCiclo 易可收」作成的玻璃纖維強化塑膠(Fiber-Reinforced Plastic, FRP)及碳纖維複合材料作成風電葉片，到使用年限可回收降解，經過「CleaVER 可立解」技術將原本要成為廢棄物的「垃圾」，搖身一變成為回收纖維及低聚物，經整理後再利用，再次製成玻璃纖維強化塑膠(GFRP)及碳纖維複合材料(CFRP)原料，是一項可重複迴圈之系統，如圖 2.2-3 所示。

上緯的「EzCiclo 易可收」、「CleaVER 可立解」系統有以下優點：



- 客戶無需改變現今葉片生產工藝與設備。
- 回收復材可無須先粉碎，操作方便。
- 樹脂可回收再利用，且裂解回收過程無廢水、廢酸、廢鹼產生，無二次污染。
- 碳足跡低。



資料來源：上緯公司網站

圖 2.2-3 上緯公司可回收再重複利用的環氧樹脂循環圖

### 3.關鍵物料(矽、鈷、銻)

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。矽晶體不具有金屬性質，而具半導體性質特性，被廣泛用於合金(高機能性合金)與及高科技產業(矽晶圓與碳化矽)；鈷具有磁性、與合金可製造超合金，鈷化學品應用相當廣泛，且

鈷是製造半導體芯片的重要關鍵材料，含鈷材料多應用於聚酯纖維、高科技產業、金屬加工具、電池材料等；銻是類金屬可與鉛、錫製作合金，銻銻、鎳銻是良好的半導體，三氧化二銻催化劑適用於 PET 聚酯聚合製程。國內關鍵物料處理方式現況如表 2.2-4 所示。以下介紹國內循環經濟廠商-光宇應用材料股份有限公司廢矽砂漿與美琪瑪鈷錳系廢觸媒資源循環再利用狀況。

表 2.2-4 國內關鍵物料(矽鈷銻)處理方式現況

廢棄物來源	廢棄物代碼	處理方式	廠商
電子零組件製造業在晶片製程、晶圓製程或太陽能電池製程產生之廢矽晶(塊、柱、圓或片)或廢矽晶坩堝料	廢矽晶(R-2411)	表面氣乾式處理機	環球優士湖口廠
		脫模蝕刻機、烘箱、測阻值、長晶爐	綠能科技觀音廠
		噴砂機、研磨機	台晶再第一廠
化學原材料製造業在純對苯二甲酸(PTA)及間苯二甲酸(IPA)製造之氧化反應製程所產生鈷錳廢液經化學沉澱產生之鈷錳(Co/Mn)化合沉澱物，且其鈷重金屬含量在百分之十以上者。	鈷錳化合沉澱物(G-1401)	酸溶、沉澱、過濾、調製為再製鈷錳觸媒原料	美琪瑪國際桃園廠、康普材料、福誼企業造橋廠、虹京資源
基本化學材料製造業在純對苯二甲酸(PTA)製造之廢水於廢水生物處理設備所產生之污泥，其經焚化爐焚化後產生之含鈷錳(Co/Mn)飛灰或底灰。	鈷錳塵灰(R-1103)	酸溶、沉澱、過濾、調製為再製鈷錳觸媒原料	美琪瑪國際桃園廠、康普材料、展用、虹京資源
廢觸媒及其相關廢棄物	1.製造氧化銻所產生之集塵灰、底渣及其	化學處理	弘馳、金益鼎南港廠



以美琪瑪國際股份有限公司處理廢鈷錳溴觸媒為例，廢鈷錳溴觸媒之粗對苯二甲酸(Crude Terephthalic Acid, CTA)殘渣漿料中，約含有0.3~0.4%鈷與錳等有價金屬，以醋酸或氫溴酸將可溶性雜質溶出後，於沈澱槽中加入沉澱劑將不純物沉澱，並添加助濾劑於過濾設施中將不純物質過濾去除，而濾液經添加氫溴酸、醋酸鈷、氫氧化鈉溶液等化學藥劑及純水，即可調配製成再生鈷錳觸媒(醋酸鈷錳溴觸媒溶液)。從廢觸媒中萃取鈷金屬原料再利用，回收後再生產品可作為對苯二甲酸製程之氧化觸媒，節省鈷錳觸媒原料成本。簡要流程如圖 2.2-5 所示。

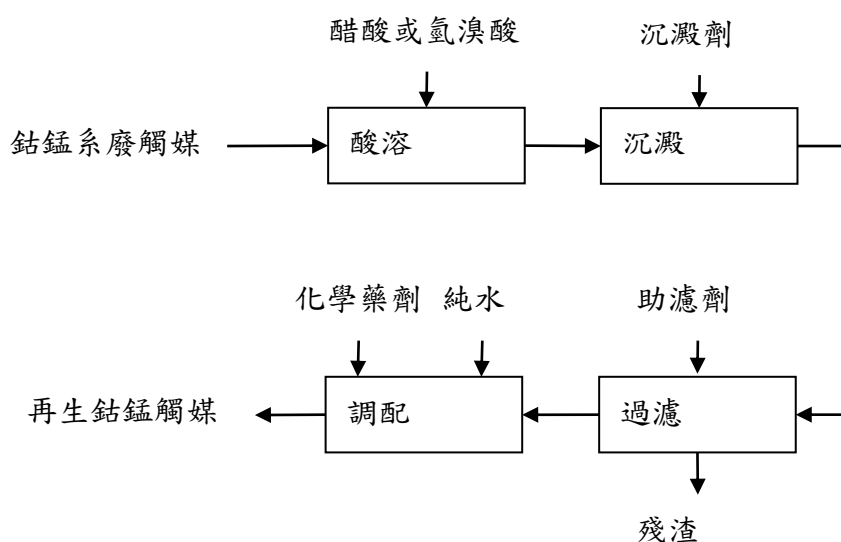


圖 2.2-5 美琪瑪國際鈷錳系廢觸媒資源化流程

#### 4. 半導體資源再生循環中心

鑒於台灣高科技產業快速成長，伴隨衍生廢棄資源亦大幅增加，後端處理量能與再利用通路已面臨瓶頸，為善盡企業社會責任，呼應社會及環保團體期待，產源自行設置事業廢棄物處理設施。以台灣積體電路製造股份有限公司與中科管理局提案打造科學園區內首座零廢製造中心，作為循環經濟示範專區推動台灣產業朝永續循環零廢棄邁進。資源再生循環中心其循環經濟項目如表 2.2-5 所示，預計針對廢硫酸、廢硫酸

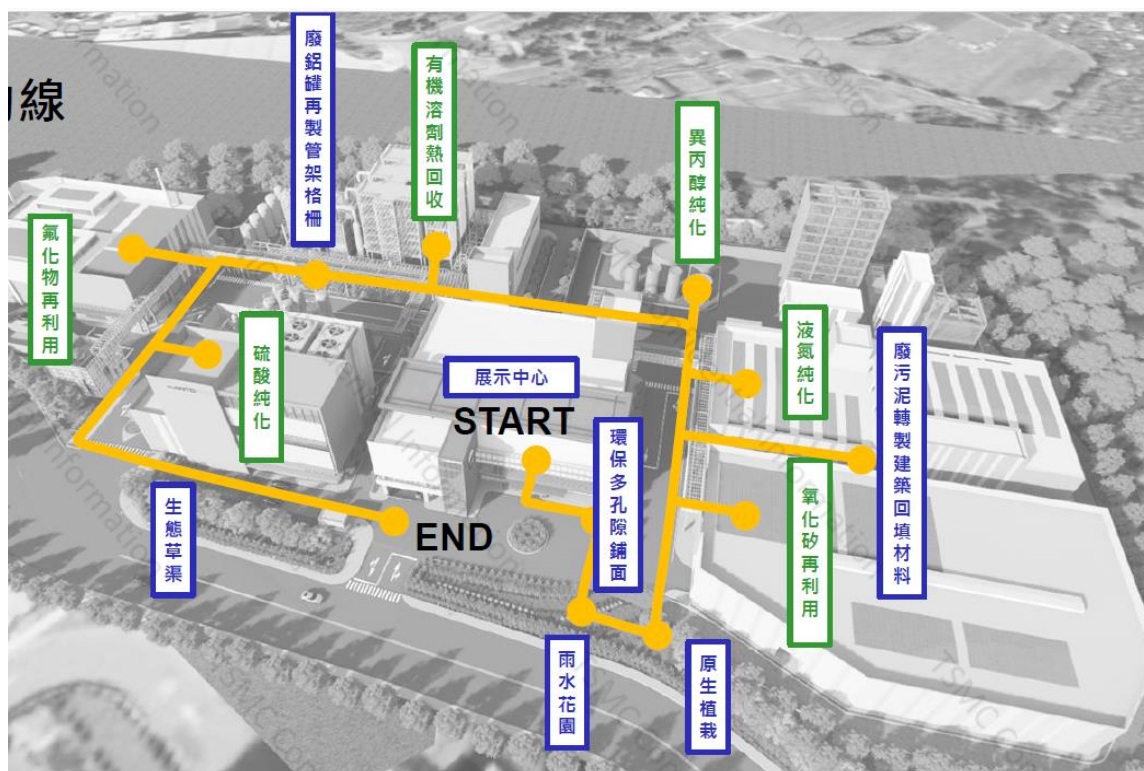
銨、廢異丙醇、混合有機廢液、氟化鈣污泥及氧化矽污泥等 6 項廢棄物，透過回收再利用技術，回收後再回製程或產業進行應用，降低環境之衝擊與處理成本，資源再生循環中心平面規劃如圖 2.2-6 所示。

表 2.2-5 資源再生循環中心循環經濟項目

種類	預估回收量 (公噸/月)	成份與特性		可能回收 方法	成品	入選 項目	進駐 廠商
		主成份 濃度	不純物 狀況				
硫酸	5,000~6,000	40~60%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1~5%	負壓分餾	電子級 硫酸	○	待確認
硫酸銨	4,000~5,000	20~30%	pH > 2	脫氨&冷 凝純化	電子級 液氨	○	環創源 (尚未確 認)
異丙醇	2,000~3,000	>10%	微量金 屬	負壓分餾	電子級 異丙醇	○	長春 石化
顯影劑 (TMAX)	1,000~2,000	10~20%	微量金 屬	濃縮純化 &電透析	電子級 顯影劑	X (經濟 規模考 量)	-
混合有機 廢液	1,000~2,000	30~40% 醇醚混合物		熱值回收	-	○	泰興工程
氟化鈣污 泥	1,000~2,000	> 75%	水份 <50%	乾燥&造 錠	螢石	○	立盈環保
氧化矽污 泥	500~1,000	> 70%	水份 <65%	萃取&表 面改質	陶瓷/塑 膠填充 材	○	成信實業

資料來源：循環經濟概念與規劃原則經驗分享，廢棄物零廢中心規劃與資源再生(利用)技術探討宣導說明會，2022 年 6 月 23 日。

5.



資料來源：循環經濟概念與規劃原則經驗分享，廢棄物零廢中心規劃與資源再生(利用)技術探討宣導說明會，2022 年 6 月 23 日。

圖 2.2-6 資源再生循環中心

## 2.3 循環經濟產業面臨問題及未來發展方向

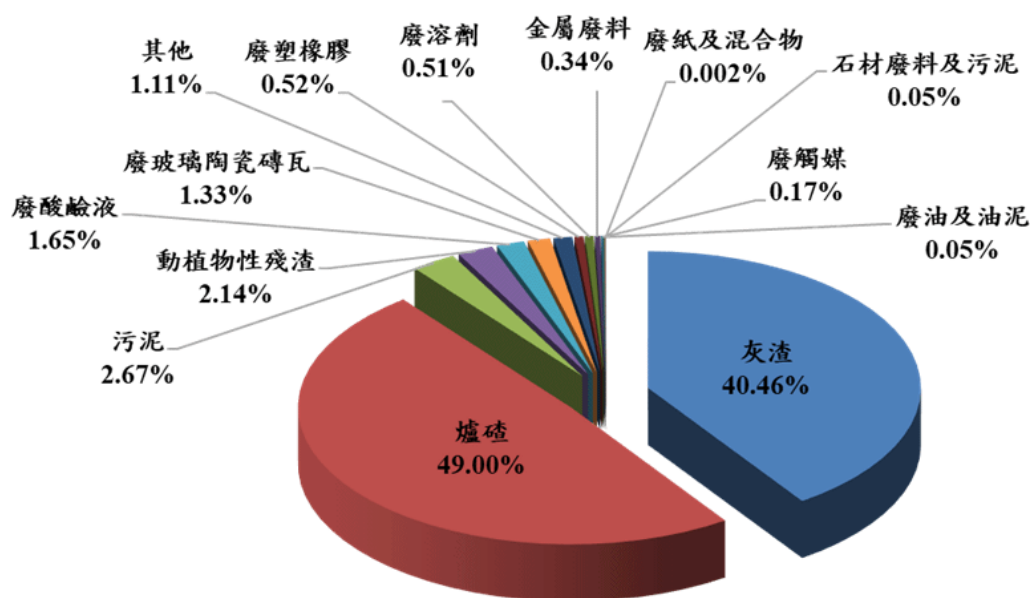
依據經濟部工業局「工業廢棄物清理與資源化資訊網」，分析環保署 IWR&MS 下載之資料，統計公告再利用廠共計 1,455 家，並依其 110 年 1~8 月之實際再利用申報資料，推估 110 年各類工業廢棄物屬許可再利用之再利用情形(如圖 2.3-1 所示)。

依前述資料，許可再利用廠共計 135 家，並依其 110 年 1~8 月之實際再利用申報資料，推估 110 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「廢溶劑」、「污泥」、「廢酸鹼液」及「灰渣」。其中「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



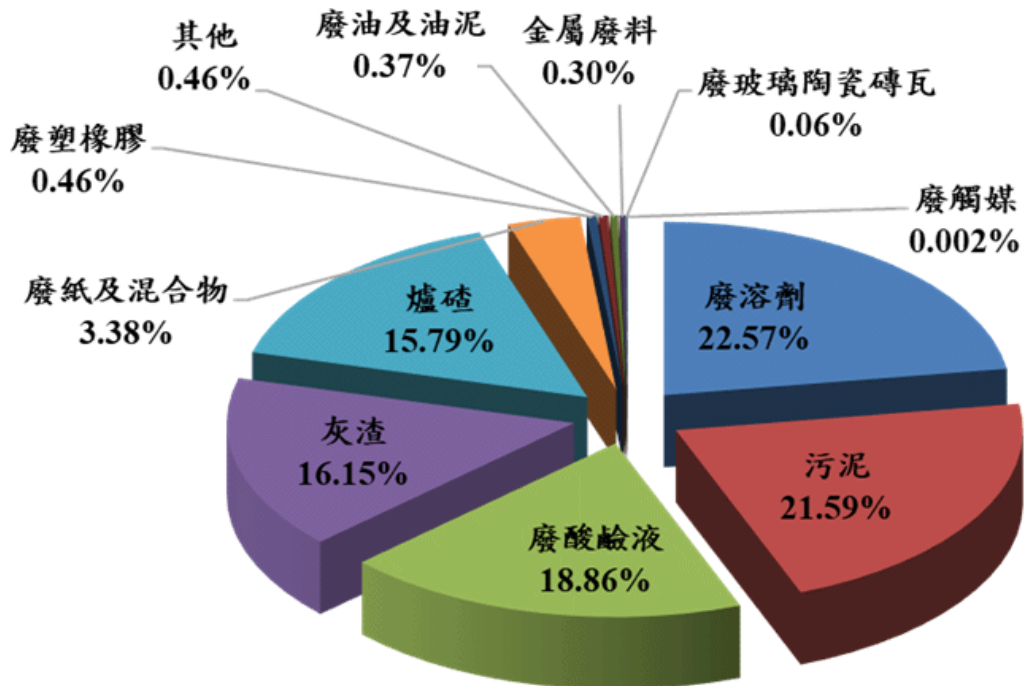
作為工業用硫酸銨；「污泥」類以「無機性污泥」之再利用量最大，主要再利用作為 CLSM 及紅磚；「廢酸鹼液」類則以「廢液 pH 值小(等)於 2.0」之再利用量最大，包括廢硫酸及廢氫氟酸等，再利用用途主要以化學反應製備化工原料(如硫酸、氟化鈣、氟矽酸鈉、磷酸鈉等)；「灰渣」類則以「電爐製鋼過程污染控制之集塵灰或污泥」之再利用量最大，主要再利用方式為熱處理產製氧化鋅。

屬公民營處(清)理機構中採資源化方式處理廢棄物者共計 164 家，並依其 110 年 1~8 月之實際申報資料，推估 110 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。



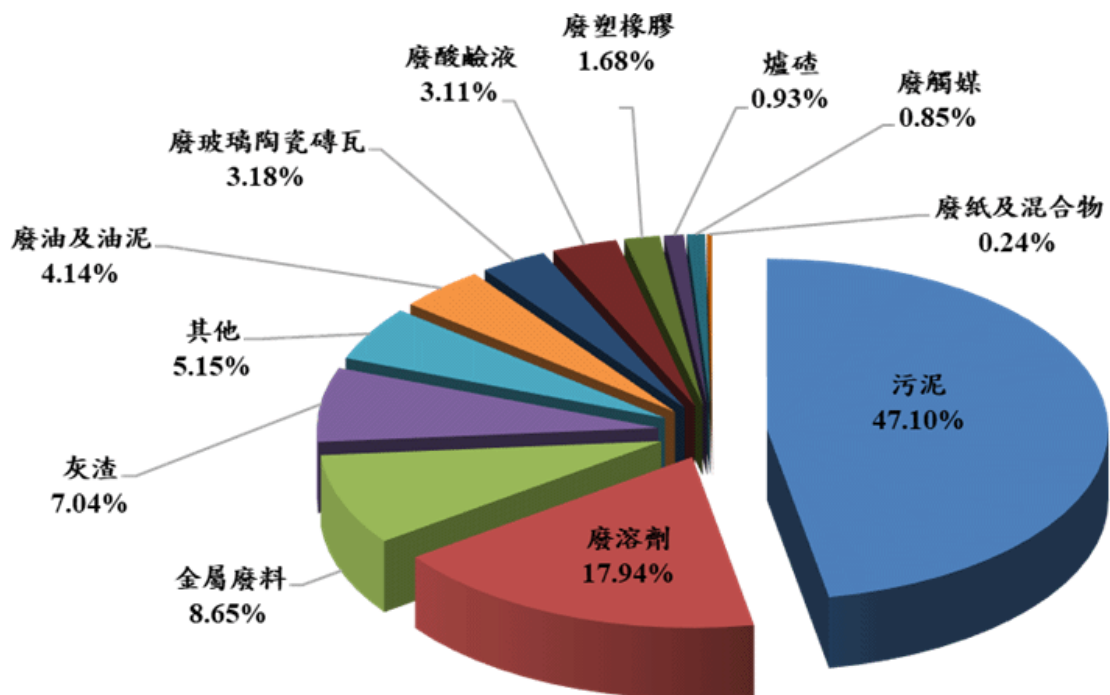
資料來源：經濟部工業局，110 年資源再生產業推動及審查管理計畫。

圖 2.3-1 110 年公告再利用之各類工業廢棄物再利用情形



資料來源：經濟部工業局，110 年資源再生產業推動及審查管理計畫。

圖 2.3-2 110 年許可再利用之各類工業廢棄物再利用情形



資料來源：經濟部工業局，110 年資源再生產業推動及審查管理計畫。

圖 2.3-3 110 年公營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形



目前國內爐渣高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈹鎢)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量及產生量(爐渣)

單位：公噸

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用	自行處理	委託或共同處理	境外處理	貯存異動量 <sup>1</sup>	產生量
G-1201	水淬高爐石(渣)	108	3,044,900	-	-	-	-	3,044,900
		109	2,684,588	-	-	-	-	2,684,588
		110	2,945,361	-	-	-	-	2,945,361
R-1204	感應電爐爐渣(石)	108	15,644	-	-	-	488	16,132
		109	15,015	-	-	-	704	15,719
		110	19,715	-	-	-	-411	19,304
R-1205	化鐵爐爐渣(石)	108	2,036	-	-	-	44	2,080
		109	1,649	-	-	-	-122	1,527
		110	1,844	-	-	-	71	1,915
R-1207 註 <sup>2</sup>	旋轉窯爐渣(石)	108	567	-	-	-	138,247	138,814
		109	100,121	-	-	-	37,459	137,580
		110	110,396	-	-	-	6,493	116,889
R-1209	電弧爐煉鋼爐氧化渣(石)	108	1,123,634	-	-	-	-124,374	999,260
		109	1,323,317	-	-	-	-271,768	1,051,549
		110	1,272,191	-	-	-	-138,892	1,133,299
R-1210	電弧爐煉鋼	108	138,853	-	-	-	160,799	299,652

	爐還原碴	109	261,627	-	-	-	-9,739	251,888
	(石)	110	270,508	-	-	-	-47,341	223,168

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

上表中“-”表無資料

註<sup>1</sup>：貯存異動量為前一年貯存量扣除當年貯存量而得。

註<sup>2</sup>：R-1207 旋轉窯爐碴產生量以台灣鋼聯申報量為主、再利用量以台鋼資源申報量為主。

**表 2.3-2 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(廢風機葉片)**

單位：公噸

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用	自行處理	委託或共同處理	境外處理	貯存異動量註 <sup>1</sup>	產生量
R-0401	廢玻璃	108	136,051	-	-	-	-284	135,767
		109	124,714	-	-	-	29	124,742
		110	141,977	-	-	-	423	142,399
R-0409	含樹脂玻璃纖維布廢料	108	45	-	-	-	2	47
		109	25	-	-	-	3	27
		110	30	-	-	-	2	32
D-2410	廢玻璃纖維	108	1,865	-	898	-	-302	2,461
		109	1,292	-	909	-	11	2,212
		110	823	-	1,028	-	1,252	3,103

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

上表中“-”表無資料

註<sup>1</sup>：貯存異動量為前一年貯存量扣除當年貯存量而得。

**表 2.3-3 廢棄物類別之全國再利用量及產生量(關鍵物料-矽鈹鎢)**

單位：公噸

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用	自行處理	委託或共同處理	境外處理	貯存異動量註 <sup>1</sup>	產生量
R-2411	廢矽晶	108	107	-	-	-	5	112
		109	140	-	-	-	-22	118
		110	136	-	-	-	33	169
D-0902	無機性污泥(含矽污泥)	108	658,186	93,454	345,485	57	-39,413	1,057,768
		109	700,454	68,912	287,066	36	-24,782	1,031,685
		110	664,048	78,869	291,749	200	35,402	1,070,269
R-1401	廢鈷錳觸媒	108	2,024	-	-	-	4	2,028

		109	1,860	-	-	-	14	1,874
		110	1,599	-	-	-	52	1,574
R-1103	鈷錳塵灰	108	31	-	-	-	3	34
		109	26	-	-	-	7	19
		110	16	-	-	-	2	18
A-3501	製造氧化銻所產生之集塵灰、底渣及其中間產物廢棄物	108	-	-	-	-	-	-
		109	-	-	-	-	-	-
		110	-	-	-	-	-	-
E-0228	含鈹、銻、碲、鉍金屬廢料	108	-	-	-	-	-	-
		109	-	-	-	-	-	-
		110	-	-	-	-	-	-

資料來源：環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

上表中“-”表無資料

註<sup>1</sup>：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。

隨未來我國 2040 年全面電動車化發展下，將產生大量電動車廢電池，其鈷金屬為鋰電池主要正極材料。美國特斯拉(Tesla, Inc.)2021 年 8 月發表企業衝擊報告中說明，已開始建立廢鋰電池回收設施超級工廠，2020 年特斯拉總計回收了 80 噸鈷。在全球對電動車的需求下，Statista(統計資料庫)預測全球鋰電池在 2019~2030 年間，鎳需求增加 14 倍；縱使高鎳化，鈷需求仍將增加 3 倍。國外先進技術廠商優美科與格林美公司皆從鋰電池廢料中回收關鍵物料，並再應用於電極材料，且技術整備度已達到成熟商業化。惟應用於我國實廠尚有法規規範與市場規模小等門檻，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、爐渣高值化及資源循環技術案例

本計畫所蒐集之爐渣泛指鋼鐵廠冶煉過程中所產生之廢棄物，在一貫作業煉鋼廠中產生之爐渣包括水淬高爐渣(石)、氣冷高爐渣(石)、轉爐渣(石)及脫硫渣(石)為主；使用電弧爐煉鋼，以回收廢鋼重新冶煉成鋼，於電弧爐氧化期產生之爐渣為氧化渣，於精煉爐還原期產生之爐渣為還原渣，氧化渣與還原渣則統稱為電弧爐煉鋼爐渣。鋼鐵冶煉在生產時耗用的原料及能源甚為龐大，因此生產過程產生的廢棄物數量亦甚為龐大。鋼爐渣的應用領域極廣，視資源循環技術方向而產生不同之再生產品，彙整如表 3-1 所示。國外爐渣高值化及資源循環技術，摘要說明如下：

表 3-1 鋼爐渣的應用領域與資源循環技術

廢棄物來源	資源循環	資源技術應用
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 水淬高爐渣(石)</li> <li>■ 高爐爐渣(石)</li> <li>■ 轉爐爐渣(石)</li> <li>■ 脫硫渣(石)</li> <li>■ 電弧爐煉鋼爐渣(石)</li> <li>■ 旋轉窯爐渣(石)</li> <li>■ 感應電爐爐渣(石)</li> <li>■ 化鐵爐爐渣(石)</li> </ul>	■ 遠紅外線原料 	■ 遠紅外線飾品、塗料與釉料  
	■ 高熔點原料 	■ 建材磁磚、耐火材料  
	■ 碳酸鈣 	■ 造紙、橡膠填料  
	■ 骨材 	■ 鋪面磚、瀝青混凝土  

資料來源：彙整自材料世界網「金屬煉製產業爐渣材料多元應用發展」，2020 年 12 月。

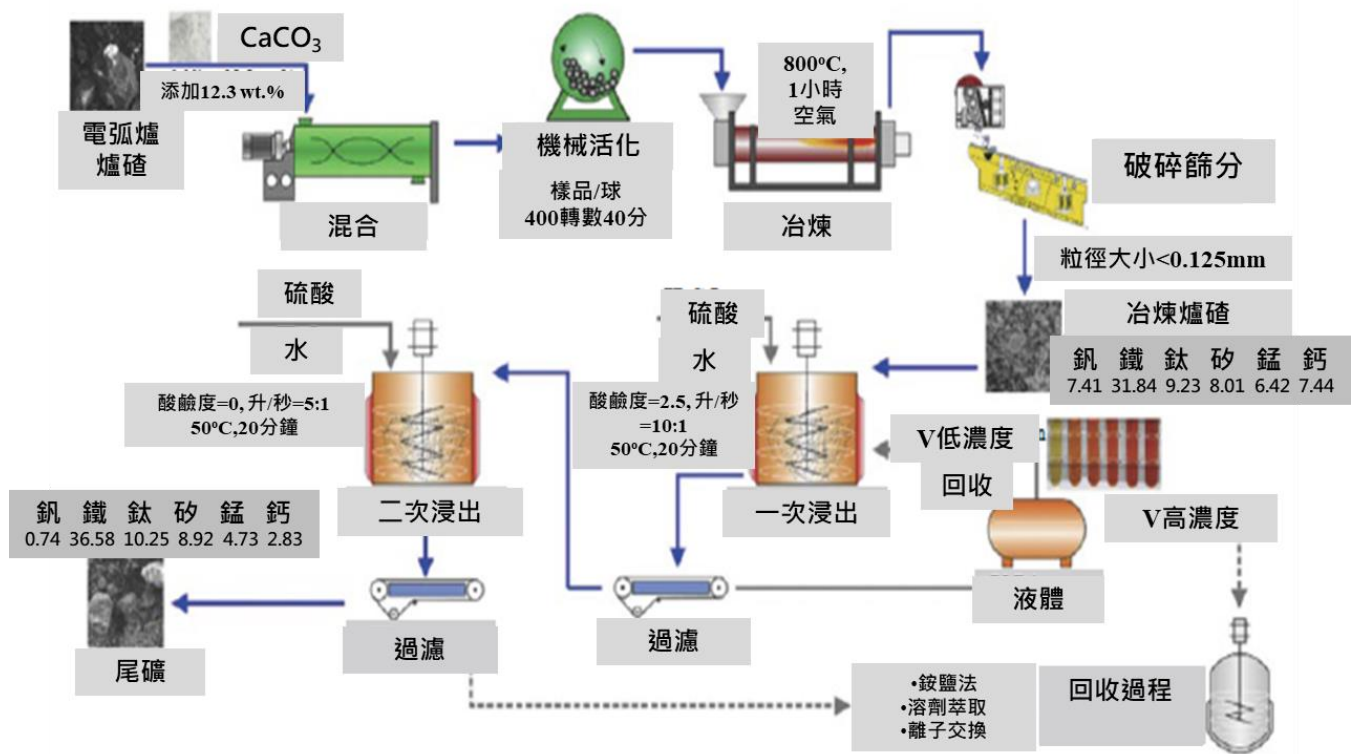
### 3.1 爐渣有價物質回收案例

回收爐渣中的鐵和石灰作為鋼鐵冶煉業原料，可降低該產業的原料與處置成本，有助於鋼鐵產業內循環。除 Fe、Ca 和 Mg 外，如電弧爐煉鋼爐渣含有大量的 Cr、Pb、Mn 和 Zn 等金屬。這些金屬具有高價值，從而吸引學者投入，研究出以浮選、浸出、沉澱和加熱等技術，有效分離這些金屬的方法。在所有的金屬回收方法中，浸出是最為廣泛利用的方法。

以下就硫酸浸提法回收金屬回收技術案例說明如下：

#### 1. 硫酸浸提法回收金屬(德國 Stein Injection Technology GmbH)

德國 Stein Injection Technology GmbH 開發一種可將金屬與石灰回收的方法，程序包括冷卻、初篩、金屬分離與二次篩分，磁選後獲得金屬與再生石灰，可回用於鋼鐵工業。同時利用電弧爐煉鋼爐渣與硫酸進行反應，浸漬出可以回收之金屬物質。由於各種成分在不同 pH 值下的溶解度不同，因此可藉由調整 pH 值，控制各成分的溶出順序，予以浸漬分離。處理流程如圖 3.1-1 所示。



資料來源：鋼鐵副產物之循環經濟前景，工業材料雜誌 420 期，2021 年 12 月。

圖 3.1-1 德國 Stein Injection Technology GmbH -硫酸浸提法回收金屬流程

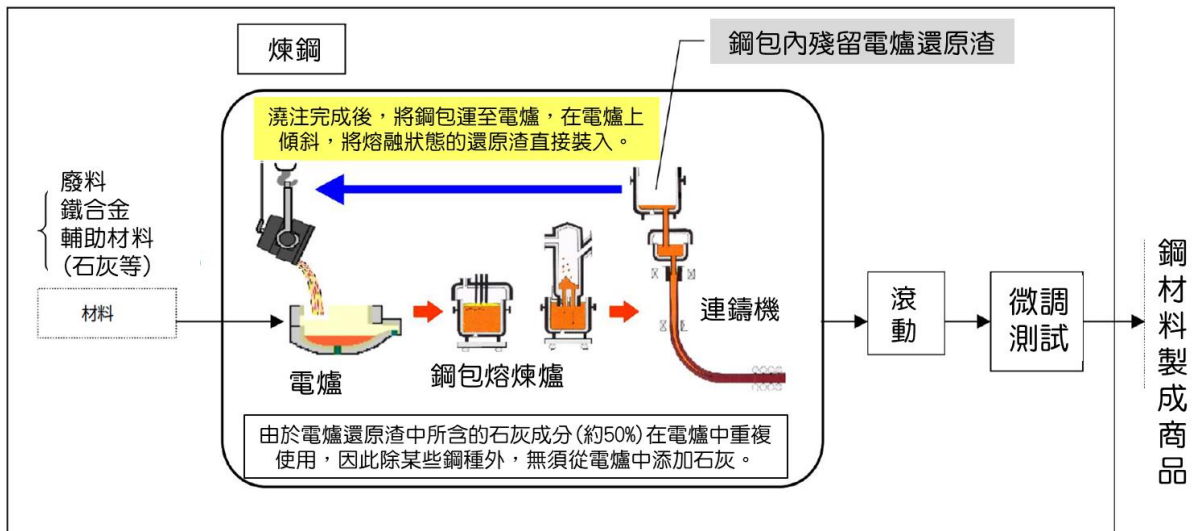
### 3.2 高溫重構、碳酸化處理等對鋼渣安定化案例

高溫重構和碳酸化處理是近年來鋼渣安定化及活性提高的一些新方向與方法，利用鋼渣預處理方法來改善其安定性。

#### 1. 還原渣資源化技術(日本愛知製鋼株式會社)

電弧爐煉鋼產生之還原渣具易粉化、不便搬運、易吸收空氣中的水分之特性，易造成環境污染，故過去大多以掩埋方式處置。日本愛知製鋼為有效活用礦物資源並減少廢棄物產生，開發出還原渣資源化技術「愛知新熱渣回收技術(Aichi New Hot Slag Recycling Process, ANRP)」。此技術係利用精煉爐裡殘留的電弧爐還原渣，其中約含 50% 未反應之石灰成分及約 20% 未反應之螢石(造渣劑)，於熔融狀態直接回送電弧爐中，以節

省石灰添加的技術。這種方法需要設置從精煉爐搬運至電弧爐上方投入還原渣的吊車，由於設備投資金額龐大且需要空間，需評估現場是否可行，該技術可擴大電爐還原渣的回收利用，如圖 3.2-1 所示。



資料來源：日本愛知製鋼官網，<https://www.aichi-steel.co.jp/>

圖 3.2-1 日本愛知製鋼還原渣資源化技術

### 3.3 改質轉爐石技術案例

轉爐石具有諸多優點，但再利用作為各種工程材料時，偶而會發生「體積膨脹」的問題，影響其資源再利用之應用性。經深入研究後發現造成轉爐石體積膨脹現象，係因其含氧化鈣、氧化鎂固熔體發生水化作用所致。

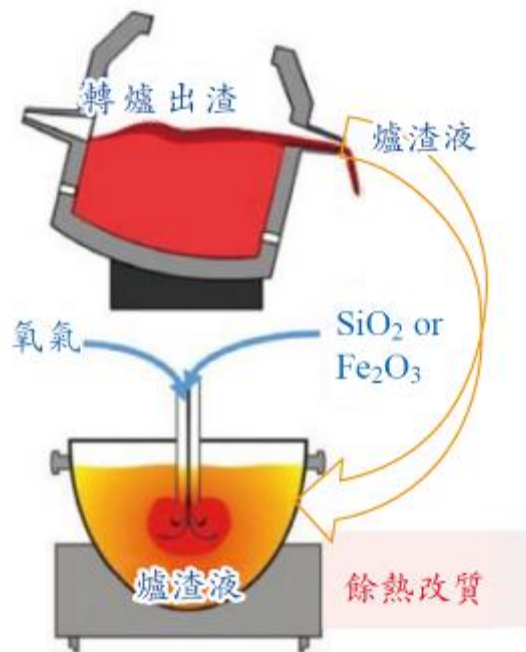
轉爐渣的去化與資源化處理方法，分為前端熱爐渣永久安定化改質方法與後端表面安定化處理方法兩種，摘述如下。

#### 1. 轉爐渣前端安定化處理-熱爐渣改質法(德國 ThyssenKrupp AG)

德國 ThyssenKrupp AG 與歐洲建築材料研究所(Institut für Baustoff-Forschung)共同開發改質轉爐渣技術，是屬於爐渣安定化處理流程。其原理係將氧氣及改質劑(如矽砂)吹入 1,400°C 之熱爐渣中，利用氧



氣將爐渣中的  $\text{FeO}$  氧化成為  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，而其產生熱能使改質劑(如矽砂)與游離石灰/氧化鎂熔融形成穩定之矽酸鹽及鐵酸鹽等穩定化合物，即可將遇水膨脹的游離石灰、氧化鎂有效轉化並安定化。其製程操作程序包含轉爐渣運送及溫度控管、改質劑添加、改質吹煉、熱爐渣取樣、線上快速檢測等，改質後的轉爐渣，經試驗膨脹率可降至 0.5% 以下，故可有效消除轉爐渣遇水膨脹的問題。目前此技術已由德國 ThyssenKrupp 公司及比利時 ArcelorMittal 公司根特廠(Ghent)所採用，同時德國已將改質法產製之轉爐渣廣泛應用於道路及水利工程材料，如圖 3.3-1 所示。



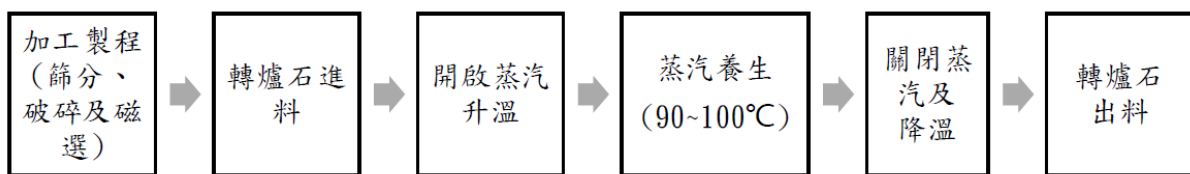
資料來源：鋼鐵煉製廢渣－轉爐石之高值化應用與機會，工業材料雜誌 393 期，2019 年 9 月。

圖 3.3-1 改質轉爐渣處理法示意圖

## 2. 轉爐渣安定化處理技術-蒸汽養生法(日本住友金屬工業公司)

日本住友金屬工業公司 (Sumitomo Metal Industries, SMI) 利用高壓或是常壓之水蒸氣通入堆積爐渣之桶槽體中，使水蒸氣與爐渣反應，適

用於各種鋼鐵爐碴，其安定後產品可用於道路級配與 AC 骨材。主要通入常壓蒸汽或高壓蒸汽使轉爐石與蒸汽充分接觸，藉由蒸汽中之水分與游離氧化鈣、游離氧化鎂反應達到體積安定化之目的。高壓法若以每月 12,000 公噸之處理量，約需 550 m<sup>2</sup> 用地面積，設備成本約為 9,000 萬元(經費以文獻資料 2019 年新台幣值估算，以下同)，處理成本每公噸約為 103 元；常壓法每月處理量 30,000 公噸，所需占地面積約 3,800 m<sup>2</sup>，設備成本約 5,400 萬元，處理成本每噸約 240 元。蒸汽養生法如圖 3.3-2 所示。



資料來源：鋼鐵煉製廢渣－轉爐石之高值化應用與機會，工業材料雜誌 393 期，2019 年 9 月。

圖 3.3-2 轉爐石蒸汽養生法作業流程流程圖

### 3.4 創新固碳技術

海藻的存在對於海洋生態系的平衡與穩定、海洋漁業資源保育等具有舉足輕重的影響力，藻場對於二氧化碳的吸收、固定，緩解溫室效應方面也扮演極為重要的角色。日本各地共約有 5,000 公里的海岸有藻類大量死亡造成岩礁岸剝蝕的狀態，主要是因為水溫上升、海膽攝食海藻，以及鐵元素等養分不足所造成。以下針對創新固碳技術說明：

#### 1. 爐碴推動藻場再生擴大二氧化碳削減技術(日本製鐵株式會社)

日本製鐵為加速推動在北海道的藻場復育再生計畫。此項計畫係利用供應鐵元素的鋼鐵爐碴製品，設置於岩礁岸剝蝕的海域以讓藻場再生，已於 2020 年獲得實證，確認海藻有復甦再生的狀況。

日本製鐵將煉鋼過程中的廢棄物-鋼鐵爐碴與腐植土的混合物置入

椰子纖維栽培袋中，製作成可長時間持續供應海藻養份的鋼鐵爐碴製品「Beverly Unit」(如圖 3.4-1 所示)，並與北海道的泊村役場、古宇郡漁業協同組合在 2019 年秋天將 3 公噸左右的「Beverly Unit」埋設在 2 處海岸線。研究團隊調查該地的海藻繁殖狀況，確認埋設「Beverly Unit」位置周邊的海底有多種類海藻再生。鋼鐵爐碴製品的應用將有助於推動回復海洋生態系，擴大二氧化碳吸收量之「藍碳」技術的開發。

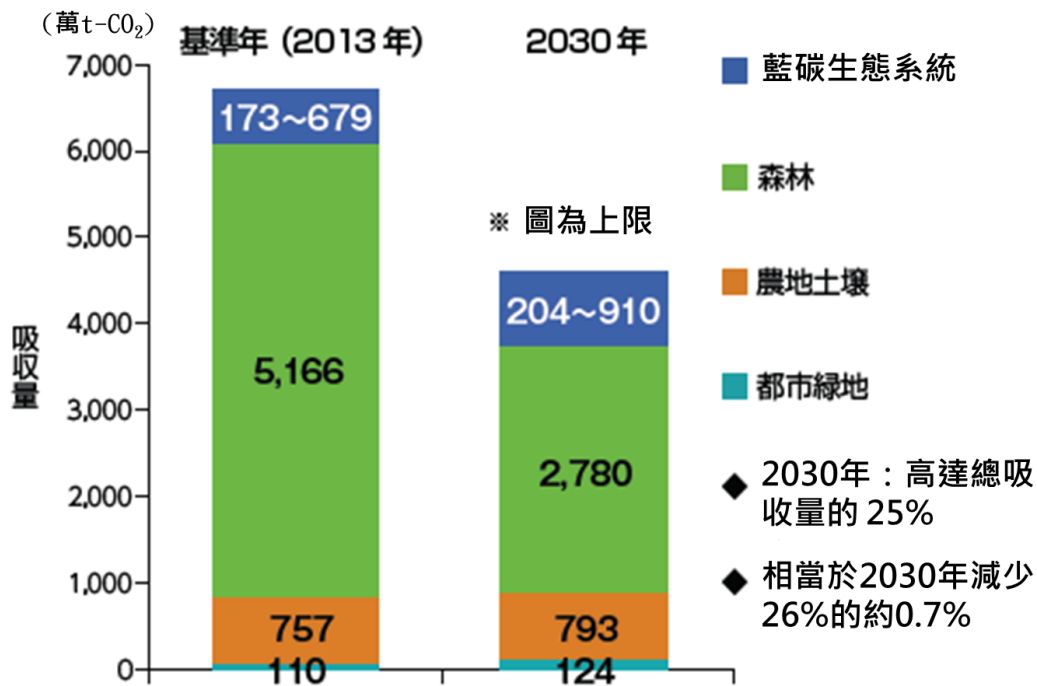
日本製鐵開發藍碳 Blue Carbon 項目，為改進對鋼爐碴的再利用，日本製鐵開始針對藍碳於海洋生態系統中的二氧化碳吸收和固定研究，收集關於通過使用鋼爐碴和創造淺底、潮灘和海藻床可以固定多少二氧化碳的基本數據，並利用日本製鐵自身的大型水箱-海洋實驗室，開發研究利用鋼碴創造灘塗、淺底、海藻床等的方法，改善沿海地區的環境。有基本數據的彙總，就瞭解可以固定多少二氧化碳(初步研究成果如圖 3.4-2 所示)。截至 2022 年日本製鐵已在日本 38 處開展利用鋼爐碴的海洋森林再生所示)技術項目調查。



資料來源：日本製鐵產品介紹，

[https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/L005.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/L005.pdf)

圖 3.4-1 日本製鐵海藻復育肥料包「Beverly Unit bag」



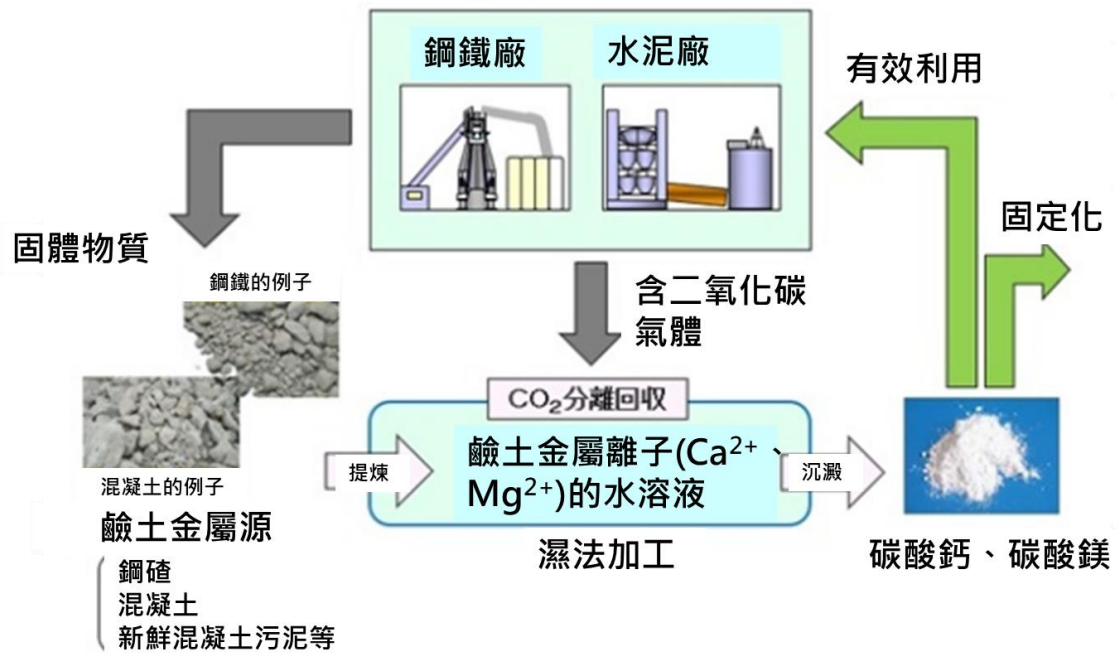
資料來源：日本製鐵藍碳介紹，

[https://www.nipponsteel.com/company/publications/quarterly-nssmc/pdf/2018\\_24\\_01.pdf](https://www.nipponsteel.com/company/publications/quarterly-nssmc/pdf/2018_24_01.pdf)

圖 3.4-2 不同生態環境的減碳比例

## 2. 二氧化碳的碳酸鹽固定技術(日本 JEF 鋼鐵公司)

JEF 鋼鐵公司和太平洋水泥、地球環境產業技術研究機構共同開發二氧化碳的碳酸鹽固定技術。以鋼鐵渣、廢混凝土、新混凝土、煤灰等為原料，用濕法抽出鹼土金屬並與工廠排放的二氧化碳反應，生成穩定化合物碳酸鹽，並研發碳酸鹽的使用技術，示意如圖 3.4-3 所示。



資料來源：JFE Steel 公司網站，<https://www.jfe-steel.co.jp/en/release/2022/220620-2.html>

圖 3.4-3 JFE 鋼鐵和太平洋水泥共同開發二氧化碳的碳酸鹽固定技術

### 3. 海洋生物質海藻的多角化製鐵利用技術(日本日鐵化學材料公司)

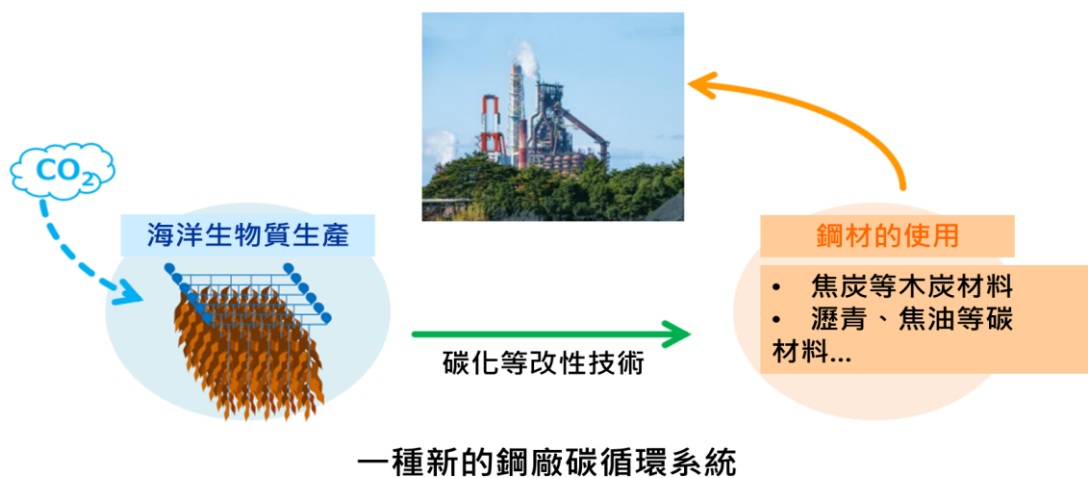
日鐵化學材料公司(NIPPON STEEL Chemical & Material)發表，獲遴選參與新能源產業技術總合開發機構(NEDO)管轄下的「建構藍碳(Blue Carbon)供應鏈相關之技術開發」計畫，並展開海洋生物質(海藻)的多角化製鐵利用技術開發。

日本製鐵研究開發項目包括利用製鐵產生的爐渣應用於海洋生物質的穩定、大量生產技術開發(生命週期控制、基改技術導入)。這項將海洋生物質應用作為碳中和材料的研究亦為世界首例。

日本在 2020 年 12 月內閣決議通過「2050 年實現淨零碳排放之目標」，並提出加速推動創新技術實用化之研究開發施行方針。節能減排已成為全球共識，主要大國及經濟體也已啟動零碳轉型競賽，世界進入碳中和(Carbon Neutrality)時代。具體執行戰略方面，在經濟產業省提出的「革新環境創新戰略」中，即明訂「發展海洋藍碳」的策略方向。



藍碳是指海洋及沿岸生態系所提供的碳封存與儲存服務，日本自古以來海藻養殖業興盛，擁有世界級的技術與智慧，且日本海岸線長，因此藍碳相關技術開發對於地球暖化因應、產業育成，都將會是有效的技術。在此背景之下，「建構藍碳供應鏈相關之技術開發」之事業將利用臨海地區製鐵廠的地利之便，生產有助於執行碳中和的生物質(海藻)，再將海藻利用於製鐵製程中，據以建構「生物質自產自銷」的新循環供應鏈，示意如圖 3.4-4 所示。



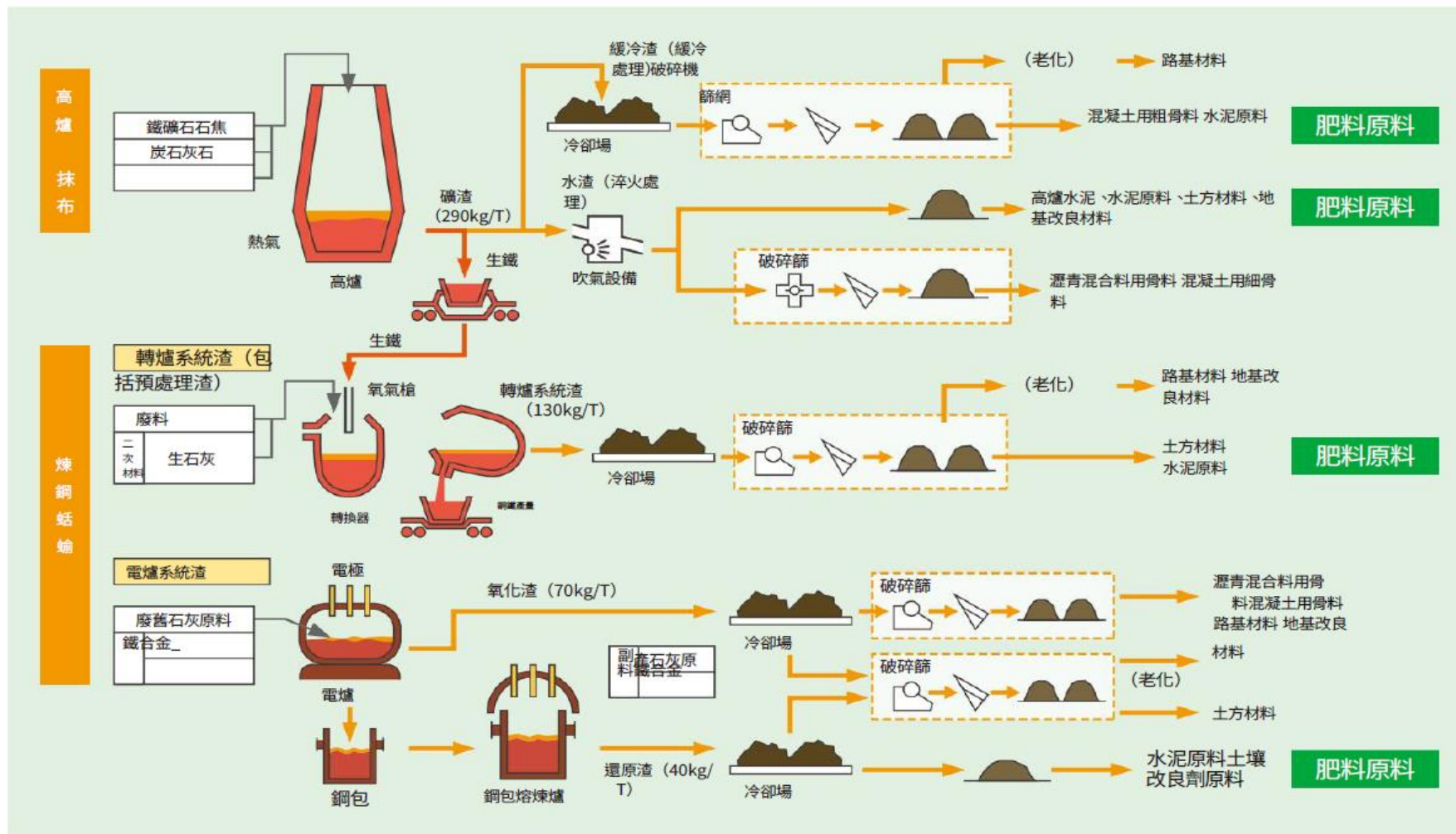
資料來源：NIPPON STEEL 公司網站，  
<https://www.nscm.nipponsteel.com/news/pdf/210525.pdf>

圖 3.4-4 NIPPON STEEL 海藻的多角化製鐵利用技術

### 3.5 鋼渣肥料應用技術(日本爐石協會)

隨著全球化對化學肥料需求的增長，更有效的可以採購到工業廢棄物製作而成的新型肥料原料，可用於低成本改良土壤和資源循環利用，用鋼渣製成的肥料是在日本有其規範，包括：礦用矽酸肥、副產石灰肥、礦渣磷肥、副產肥、含鐵材料等標準。鋼渣中的高爐渣、轉爐渣及安山岩，成分由氧化鈣、二氧化矽、氧化鎂、二氧化錳、磷酸等成分所製成，使用高爐渣製成的肥料主要用於水稻種植和旱作牧場。

利用有機物和鋼鐵廢棄物的肥料優點為：原材料成本低、可在國內採購，較不受國際市場航行影響、除含有機質外，尚有多種微量元素養分，有助於土壤改良、並有利於有效利用當地資源和環境保護；鋼渣肥料中含有大量農產品所需的肥料成分，鋼渣原料在日本大量生產，有望成為支持未來日本農業的肥料，其回收流程圖如 3.5-1 所示。



資料來源：日本爐石協會網站，<https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>

圖 3.5-1 鋼渣產生的肥料製造流程



## 1. 水稻種植

日本爐石協會支持採用智慧化的下一代水稻栽培農業技術研究，經日本 Farm Frontier 公司與山形大學農學部客座教授 Hiroshi Fujii 的研究證實，透過使用鋼渣肥料製造土壤，實現耐受氣候變化的水稻種植、引入智慧化農業技術，以訊息可視化和水稻種植技術的傳承，節省勞動力和提高效率。智慧農業照片如圖 3.5-2 所示。分為四個步驟：

- (1) 透過問卷或農民意識瞭解其土地的產量、質量、蟲害、品種、減量發生狀況、整地歷史等、土壤分析其 pH 值等。
- (2) 經過上述步驟後瞭解其背景原因及對策，領域位置以及如何制定對應措施。
- (3) 根據各田地的土壤狀況和工作情況採取措施，以達到最小成本化及最大化效果。
- (4) 將需改善的稻田實施改善因應對策，例如提高土壤肥沃力(使用堆肥、稻草、綠肥)、提高矽酸土壤肥力(施用鋼渣肥料)、開發使用排水措施、運用石灰氮、酶元素的物料使稻草催熟。

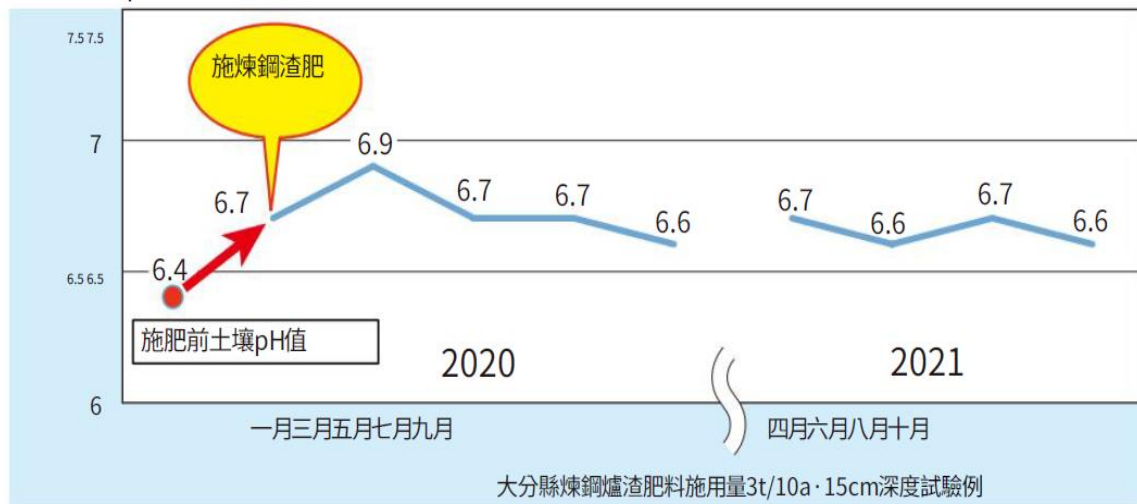


資料來源：日本爐石協會網站，<https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>

圖 3.5-2 應用智慧科技技術於水稻栽培

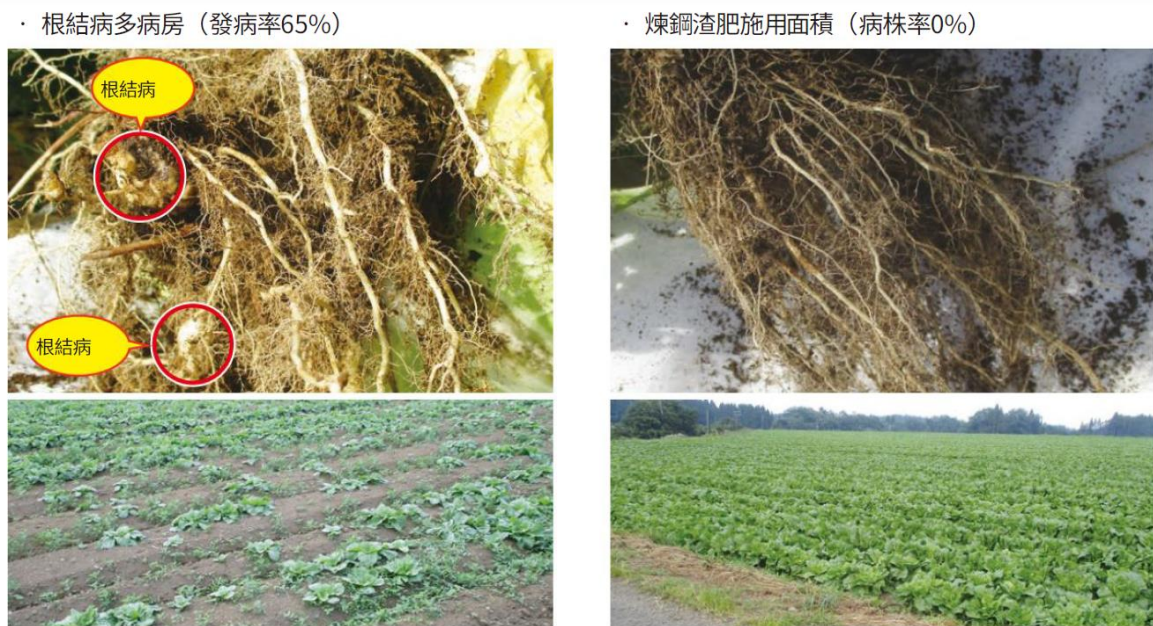
## 2. 旱作牧場

煉鋼渣肥對於旱作的影響，根丘病、根腐病、鐮刀菌等是典型的土壤病害，土壤中的病原菌侵入根部，病原體適應於酸性土壤，而煉鋼渣肥可施作於土壤將 pH 值提高至 7.0~7.5 以控制病害發作。如 pH 值太高，而使鐵之氫氧化物溶解度降低，造成養分有效性下滑，更容易發生錳、硼等微量元素缺乏產生影響。鋼渣肥料包括鐵、鎂、錳等，以及可以改善和維持土壤 pH 值的鹼性成分，含有原材料礦物質及使作物健康的成分。東京農業大學教授後藤對於煉鋼渣肥料適用於十字花科蔬菜，包括白菜、西蘭花等，且針對根結病等土壤病害的防治效果也確認有效。其施作煉鋼渣肥料對 pH 值校正效果如圖 3.5-3 所示，另將煉鋼渣肥料施作於 pH 5.7 的田間，可調節其 pH 值至 7.5，以煉鋼渣肥料對大白菜為例，其影響如圖 3.5-4 所示。



資料來源：日本爐石協會網站，<https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>

圖 3.5-3 高度持久的 pH 值校正效果



資料來源：日本爐石協會網站，<https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>

圖 3.5-4 煉鋼爐渣肥料為田間提供鐵鎂錳等礦物質

### 3.6 爐渣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爐渣高值化及資源循環技術，其相關技術評析彙整如表 3.6-1 所示。

表 3.6-1 爐渣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)	相關網站/ 資料來源
有價物質回收	硫酸浸提法回收金屬	金屬與石灰回收的方法，程序包括冷卻、初篩、金屬分離與二次篩分，磁選。	獲得金屬與再生石灰，可回用於鋼鐵工業，適用於電弧爐製程產生之鋼渣。	德國 Stein Injection Technology GmbH	8	Stein Injection 公司網站 <a href="https://www.sit-gmbh.net/en/products.html">https://www.sit-gmbh.net/en/products.html</a>
安定化	爐渣資源化技術	利用精煉爐裡殘留的還原渣，其中約含 50% 未反應之石灰成分及約 20% 未反應之螢石(造渣劑)，以熔融狀態直接回送電弧爐中。	節省石灰添加的數量。	日本愛知製鋼株式會社	8	日本愛知製鋼公司網站 <a href="https://www.aichi-steel.co.jp/">https://www.aichi-steel.co.jp/</a>
改質	轉爐渣前端安定化處理-熱爐渣改質法	將氧氣及改質劑吹入 1,400℃ 之熱爐渣中，利用氧氣使爐渣中的 FeO 氧化成為 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ，而利用改質劑與游離石灰/氧化鎂熔融形成穩定之矽酸鹽等穩定化合物。	改質後的轉爐石如遇水的膨脹率可降至 0.5% 以下，故可有效消除轉爐石遇水膨脹的問題，適用於轉爐製程產生之鋼渣。	德國 ThyssenKrupp AG	9	ThyssenKrupp 公司網站 <a href="https://www.thyssenkrupp.com/">https://www.thyssenkrupp.com/</a>
	轉爐石安	常壓之水蒸氣通	藉由蒸汽中之水分	日本住友金	9	住友金屬公司網站

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)	相關網站/ 資料來源
	定化處理技術-蒸汽養生法	入堆積爐渣之桶槽體中，使水蒸氣與爐渣反應，適用於各種鋼鐵爐渣。	與游離氧化鈣、游離氧化鎂反應達到體積安定化之目的，適用於轉爐製程產生之鋼渣。 處理效能：高壓法 12,000 公噸/月；常壓法 30,000 公噸/月。	屬工業公司 SMI		<a href="https://www.sumitomocorp.com/zhtw/easia">https://www.sumitomocorp.com/zhtw/easia</a>
創新固碳	爐渣推動藻場再生擴大二氧化碳削減技術	鋼鐵爐渣與腐植土的混合物置入椰纖栽培袋中，製作成可長時間持續供應海藻腐植酸鐵的鋼鐵爐渣製品「Beverly Unit」。	鋼鐵爐渣製品的應用將有助於推動回復海洋生態系，擴大二氧化碳吸收量之「藍碳」技術的開發。 ※如未來國內將爐渣作為海事工程的粒料，須符合相關管理辦法，始能進行再利用。	日本製鐵株式會社	7	日本製鐵公司網站 <a href="https://www.nipponsteel.com">https://www.nipponsteel.com</a>
	二氧化碳的碳酸鹽固定技術	用濕法抽出鹼土金屬並與工廠排放的二氧化碳反應，生成穩定化合物碳酸鹽。	二氧化碳的碳酸鹽固定	日本 JFE 鋼鐵公司	7	JFE Steel 公司網站 <a href="https://www.jfe-steel.co.jp">https://www.jfe-steel.co.jp</a>
	海洋生物	製鐵產生的爐渣	海洋生物質應用作	日本日鐵化	5	日本製鐵公司網站

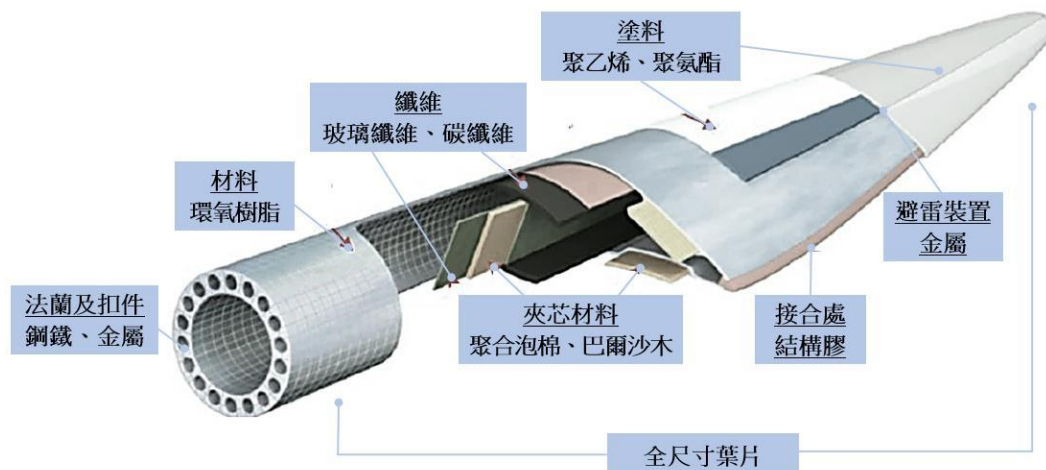
技術類別	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	技術來源	技術整備度(TRL)	相關網站/ 資料來源
	質海藻的多角化製鐵利用技術	應用於海洋生物質的穩定、大量生產技術開發(生命週期控制、基改技術導入)。	為碳中和材料。	學材料公司		<a href="https://www.nscm.nipponsteel.com">https://www.nscm.nipponsteel.com</a>
肥料應用	水稻種植	透過使用鋼碴肥料製造土壤，實現耐受氣候變化的水稻種植。	以訊息可視化和水稻種植技術的傳承，節省勞動力和提高效率，適用於高爐製程產生之鋼碴。	日本爐石協會	8	日本爐石協會網站 <a href="https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html">https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html</a>
	旱作牧場	鋼碴肥可施作於土壤將 pH 值提高至 7.0~7.5 以控制病害發作。	煉鋼碴肥料包括鐵、鎂、錳等，以及可以改善和維持土壤 pH 值的鹼性成分，適用於高爐製程產生之鋼碴。 ※目前國內肥料相關法規尚未開放爐碴做為肥料原料使用，未來需透過跨部會通溝協調，突破相關法規的限制，始能應用。	日本爐石協會	8	日本爐石協會網站 <a href="https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html">https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html</a>



#### 四、廢風機葉片回收及資源循環技術案例

過往葉片的主要材料為玻璃纖維(Fiber glass)，由樹脂及纖維矩陣組成，鑒於碳纖維的成本較高，有些葉片製造商不以碳纖維取代玻璃纖維，而是採用部分碳纖維置於葉片負載最重之處藉以強化葉片剛性，玻璃纖維與碳纖維的組成會比全玻璃纖維葉片約減輕兩成重量。葉片內部芯材，則是以巴爾沙木(Ochroma Pyramidale)與聚合物泡棉結構(Polyvinyl Chloride)增強葉片局部剛性，重量均會比使用樹脂及玻璃纖維輕；有些葉片製造前，是先於模具內上塗料，待葉片脫模後，再以聚氨酯(Polyurethane)噴塗，以達到抗紫外線、抗濕度與抗磨損的功能。

大部分的葉片非一體成形，而是分為兩半製造，先將各半的玻璃纖維或碳纖維及樹脂混合的材料於葉片模型中灌模，待冷卻成形，再覆蓋上千片的玻璃纖維或碳纖維，最後再以結構膠將兩半接合，由於葉片處於整座風力機的最高處，大部分葉片均有不銹鋼或鎢合金的避雷裝置以防止雷擊（如圖 4-1）。



資料來源：離岸風力機的雙臂一葉片技術簡述，能源資訊平台。

圖 4-1 風力機葉片結構與材料示意圖

碳纖維複合材料多採用熱固性聚合物(環氧樹脂、不飽和聚酯樹脂、酚醛樹脂等)作為基體樹脂，其固化成型後形成三維交聯網狀結構，無法重複使用、自然分解以及回收處理，目前回收方式大多以掩埋或焚燒處理，但卻造成這些高值材料的浪費。因此，目前有許多文獻及技術專刊，發表將熱固碳纖維廢棄物回收，從中分離出高性能碳纖維，並對回收後碳纖維進行純化、界面處理以及針對樹脂調整，預期能與再生碳纖維彼此之間能夠有較好的相容效果，進一步地能夠容易應用於後段塑膠加工製程。

目前廢棄的葉片主要能透過機械處理、熱處理或化學處理三種方式進行回收再利用，葉片回收技術比較如表 4-1 所示。將廢棄的葉片作為製程原料、工程材料或替代燃料。然而目前仍多採傳統掩埋或焚燒的處理方式，不僅占用土地資源更造成二次污染。有鑑於此，歐洲風能協會(Wind Europe)提出 3R 的承諾，表示將重複使用(reuse)、回收(recycle)、再生(recover)所有退役的風力機葉片，並呼籲至 2025 年應禁止在歐洲掩埋葉片，同時也禁止將其運往其他非歐洲國家丟棄，目前奧地利、芬蘭、德國以及荷蘭皆已正式實施相關掩埋禁令。

表 4-1 葉片回收技術比較

回收技術		技術準備度 (TRL)		成本	規模	終端產品與用途	創新挑戰
		GFRP	CFRP				
機械處理	機械研磨	9	6	低	大	GFRP 粉作為填充材	塑膠與粉塵
	水泥窯共同處理	9	-	低	大	能源回收與水泥窯	具有潛在污染與粒子
熱處理	熱裂解	5	9	高	小	GF 低品質、CF 高品質(90%)	能源密集度
	流體化床	4	5	高	小	好品質且乾淨 CF(70-80%)	能源密集度
	微波熱裂解	-	4	高	非常小	好品質 CF(75%)	低能源密集度
	蒸汽熱裂解	-	4	高	非常小	高品質 CF(>90%)	能源密集度

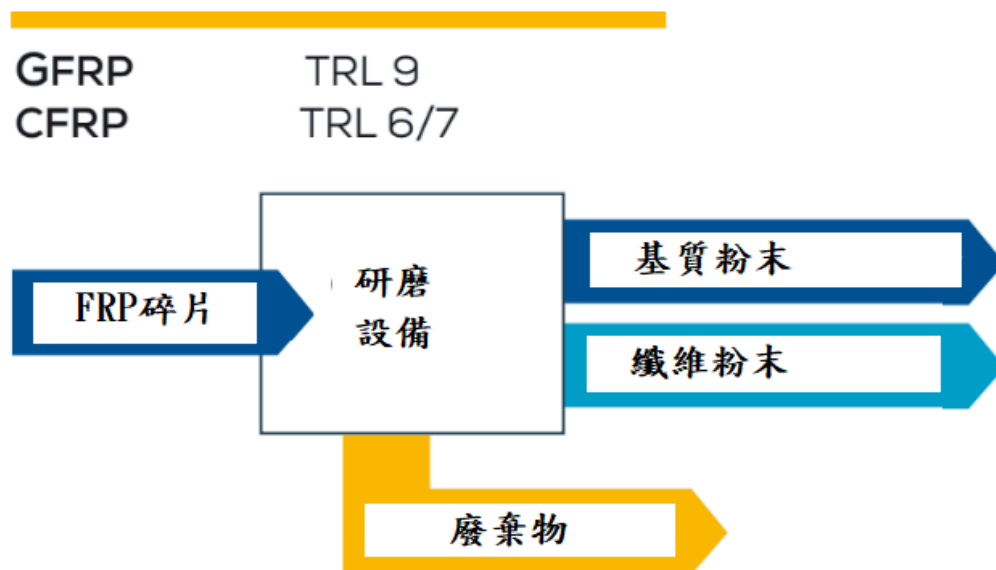


化學處理	溶劑分解	5	6	高	小	好品質 GF(70%) 高品質 CF(90%)	需要乾淨製程、能源密集度
	高溫及壓力溶劑分解	4	4	高	非常小	好品質且乾淨 CF	高能源密集度、腐蝕性、高壓力
	低溫及壓力溶劑分解	4	4	高	非常小	好品質且乾淨 CF、樹脂單體	低能源密集度、廢酸難以處理
	電化學	4	4	非常高	非常小	合理的 GF	高能源密集度

註：CFRP 指碳纖維強化塑膠(Carbon Fiber Reinforced Plastics)；GFRP 指玻璃纖維增強塑膠(Glass Fiber Reinforced Plastics)。

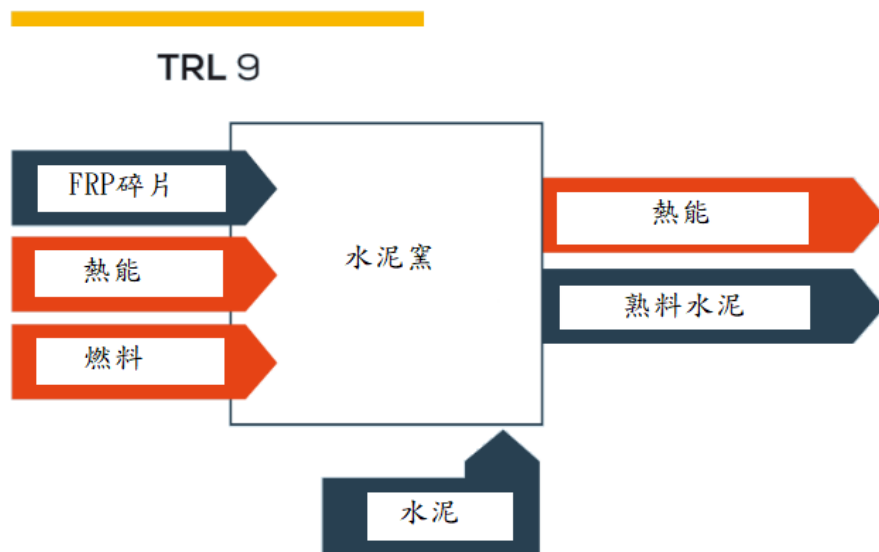
資料來源：Thomas Telsnig, Mapping and analysis of current circular economy approaches in the windenergy sector,2022.02.

機械處理主要有研磨及共同處理，其示意圖如圖 4-2~4-3 所示。



資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020，本計畫繪製。

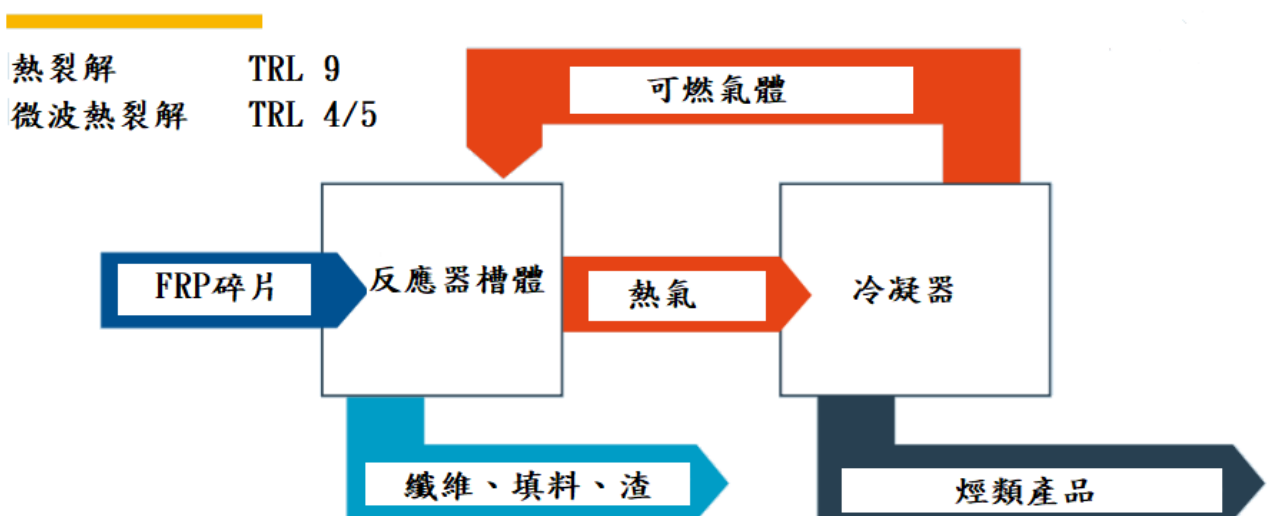
圖 4-2 機械研磨示意圖



資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020，本計畫繪製。

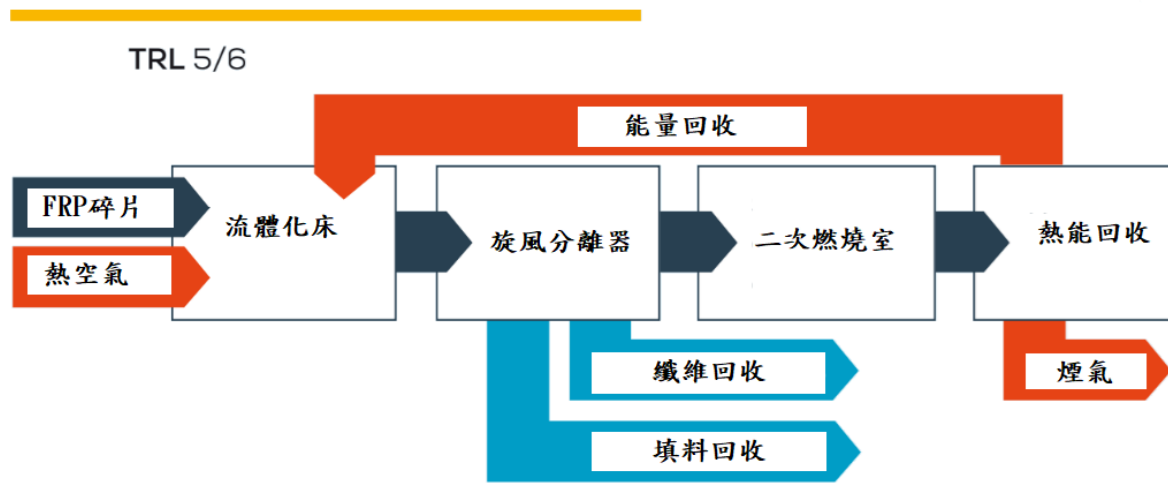
圖 4-3 水泥窯共同處理示意圖

熱處理主要有熱裂解及氣化技術，其示意圖如圖 4-4~4-5 所示。



資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020，本計畫繪製。

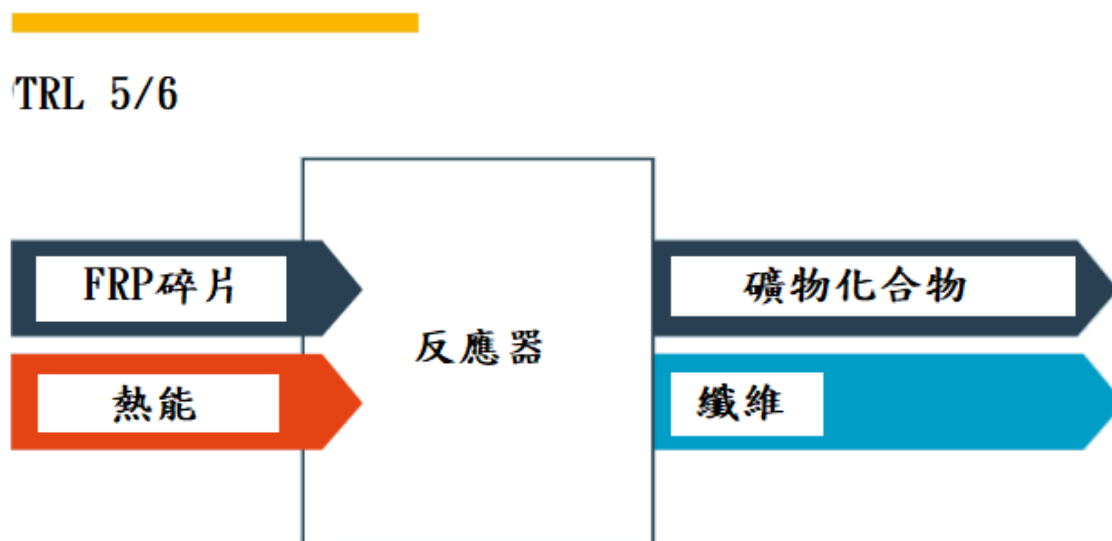
圖 4-4 熱裂解示意圖



資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020，本計畫繪製。

圖 4-5 氣化技術示意圖

化學處理主要有溶劑分解及高壓脈衝碎，其示意圖如圖 4-6~4-7 所示。



資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020，本計畫繪製。

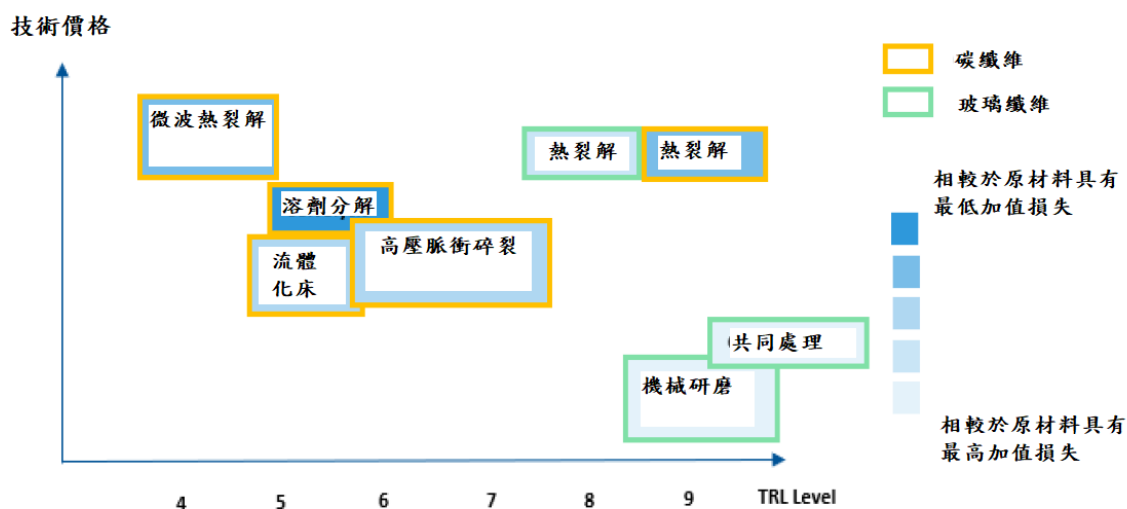
圖 4-6 溶劑分解示意圖



資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020，本計畫繪製。

圖 4-7 高壓脈衝碎裂示意圖

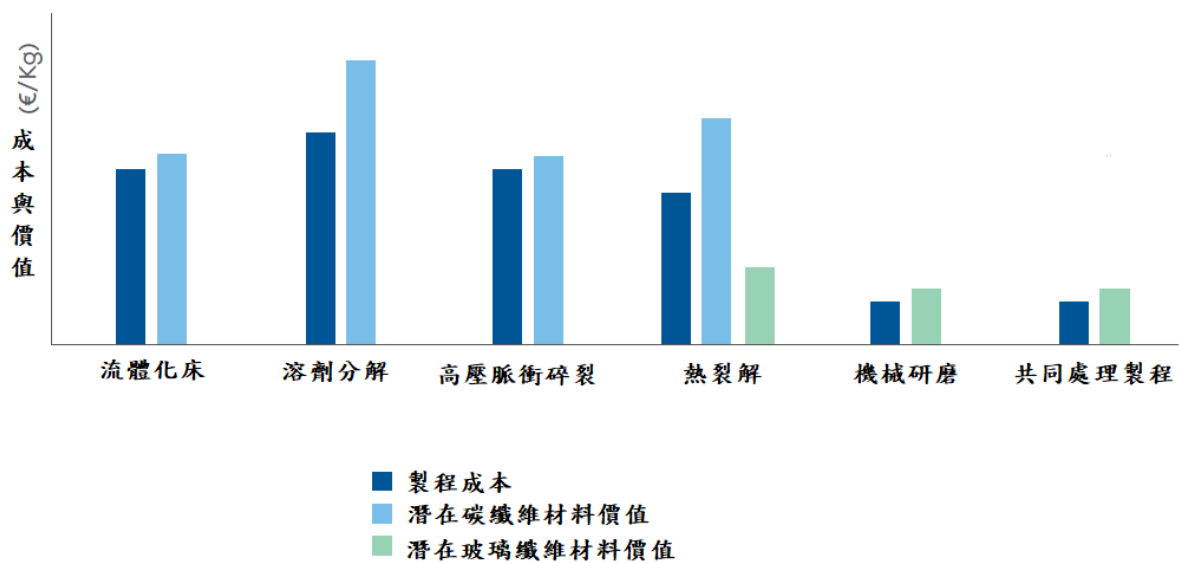
歐洲風能技術與創新平台(The European Technology & Innovation Platform on Wind Energy, ETIPWind)將現有主要碳纖維及玻璃纖維回收技術進行技術價格與技術準備度(Technology Readiness Level, TRL)進行彙整，其分佈如圖 4-8 所示，目前以玻璃纖維共同處理及機械研磨 TRL 在 8 以上，處理成本也較低。而在碳纖維微波熱裂解技術目前正處於 TRL4~5 間，處理成本亦較高，顯示其距離商業化仍有一段空間。



資料來源：ETIPWind Advisory Group,2020.

圖 4-8 技術成熟度與投資分布圖

歐洲風能技術與創新平台(ETIPWind)於 2020 年 10 月發布加速風力渦輪機葉片循環報告指出，雖然存在各種技術從風力渦輪機中回收玻璃纖維和碳纖維刀片，但這些解決方案尚未廣泛應用於具有產業規模和成本競爭力。在很多情況下，再生材料無法與原始材料的價格競爭，例如原生玻璃纖維的價格(1-2 歐元/公斤)並不會使纖維回收的產品具有經濟競爭力。然而，未來整個複合材料的回收係將材料轉化為化學構件是一種可行的途徑。這是因為熱解油的回收以及通過氣化所獲得的化學物質，已經發生在其他大宗行業和價值鏈中(如塑料回收)。ETIPWind 彙整複合材料回收技術與估計相對成本和價值結果如圖 4-9 所示，顯示碳纖維回收成本與價格較玻璃纖維高。

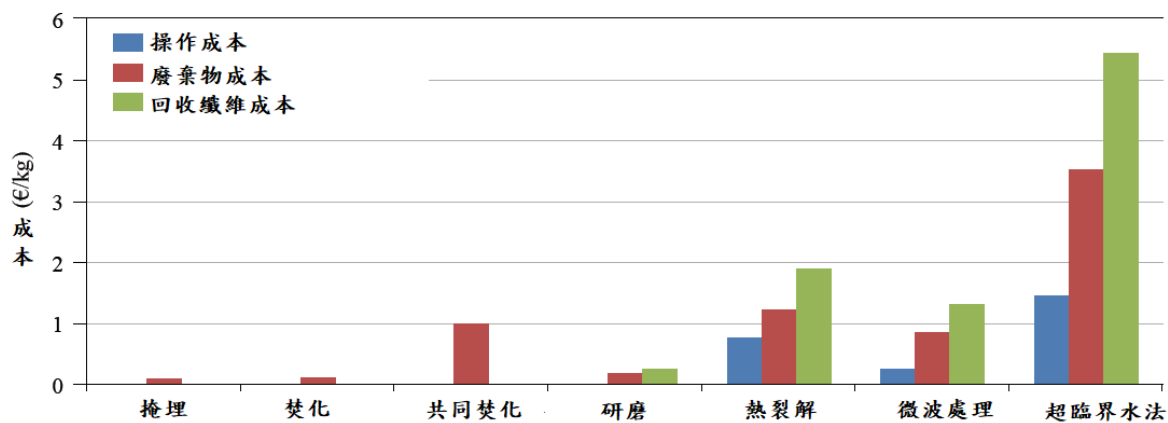


資料來源：Accelerating Wind Turbine Blade Circularity, 2020.05

圖 4-9 複合材料回收技術估計相對成本和價值

依據工研院材料與化工研究所於 2020 年 5 月發表「複材產業淨零技術的今生與來世」文獻，彙整碳纖複材廢棄物處理途徑的經濟評估結果如圖 4-10，顯示研磨法回收纖維的成本(評估為 0.248 歐元/公斤)與回收玻璃纖維的價格非常相似。熱裂解法的回收纖維價值高於原生碳纖維的最低價格(1

歐元/公斤)，但仍低於一般應用的碳纖維之最低價格(即 4.5 歐元/公斤)。該文獻估計，超臨界水法的回收纖維價格為 5.43 歐元/公斤，這是回收途徑中成本最高的，超過碳纖維價格 4.5 歐元/公斤的門檻。機械法回收的纖維成本最低，但碳纖維不能從基材中被乾淨地分離出來，故回收的產品通常價值較低。另外超臨界水回收的纖維成本最高，但通過該技術回收的纖維具有略接近原始纖維的拉伸強度，因此這項技術還需要改進以降低投資成本，並且需要擴大產能，以使該技術比其他回收技術(如熱裂解或微波)更具競爭力。



資料來源：複材產業淨零技術的今生與來世，工業材料雜誌 425 期，2022 年 5 月。

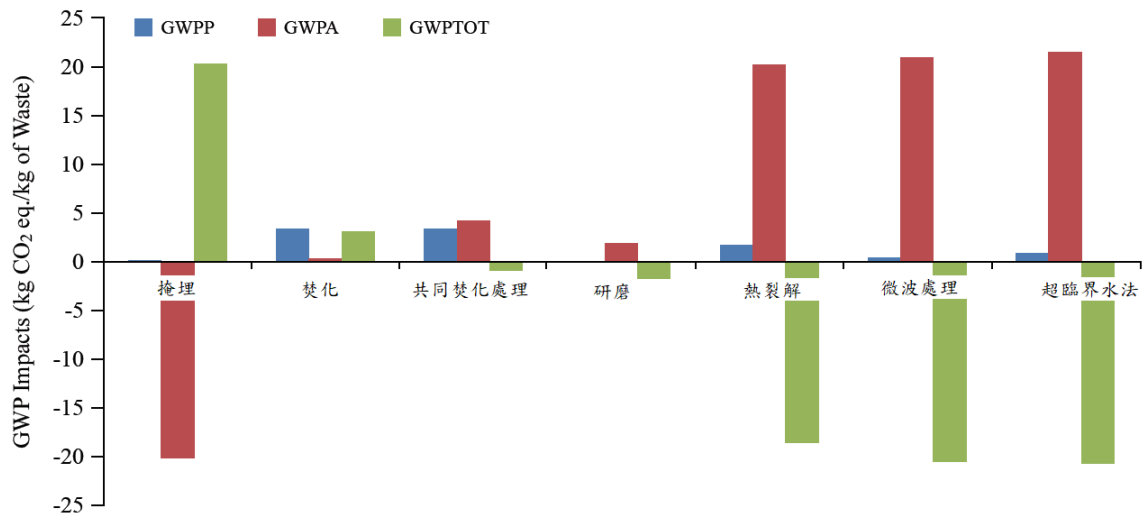
圖 4-10 碳纖複材廢棄物處理途徑的經濟評估結果

碳纖複材廢棄物處理途徑的環境影響評估中，Vo Dong 團隊使用三個評估全球暖化潛勢(GWP)影響的指標：GWPP (GWPImpact of Process)、GWPA (GWP Impact of Substituted Products) 和 GWPTOT(GWP Total of the System)。其中 GWP 為全球暖化潛勢，GWPP 包括廢棄物管理的所有活動，GWPA 包括利用回收產品替代原始材料對 GWP 的影響。因此，一定數量回收產品的 GWPA 等於生產相

同數量的原始產品（即被回收產品替代）的 GWP 影響，GWPTOT 考慮活動和替代效應的影響， $GWPTOT = GWPP - GWPA$ ，評估得到的結果

如圖 4-11 所示。

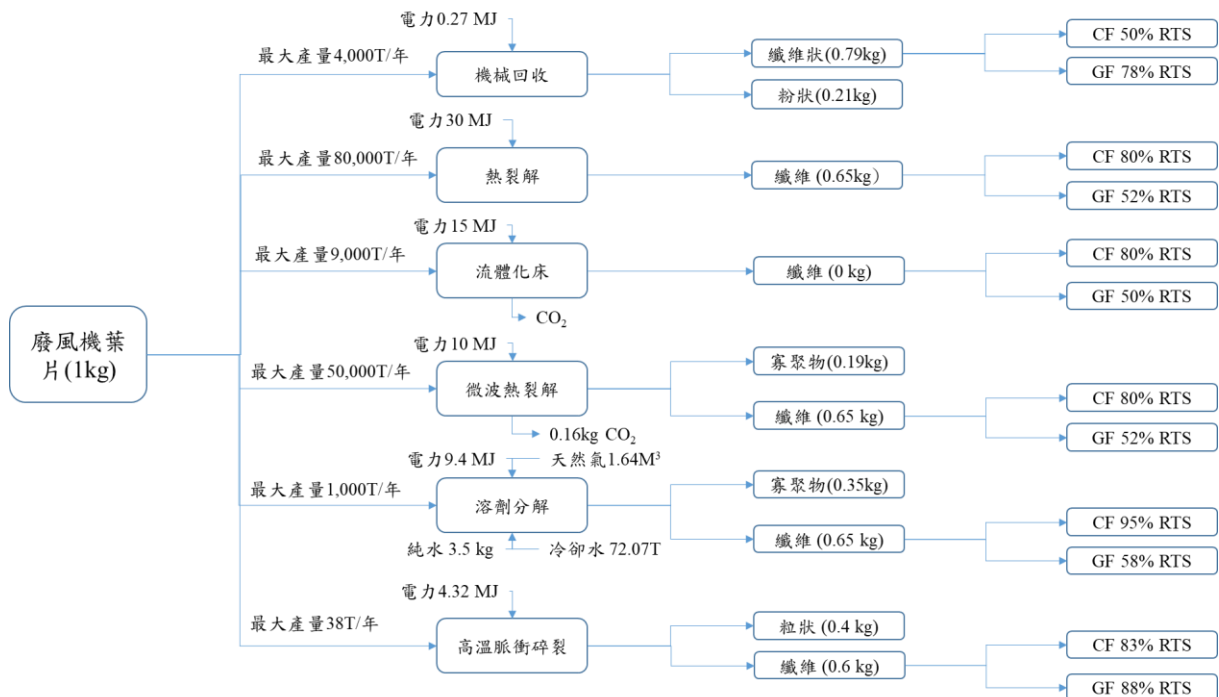
這些回收程序的 GWPP 影響可以按升序排列，即機械回收、垃圾掩埋、微波、SCW。雖然微波和熱裂解屬於熱法回收，與熱裂解相比，微波法中有從基材中回收低聚物而避免整個基材的燃燒，減少對 GWP 的影響。



資料來源：複材產業淨零技術的今生與來世，工業材料雜誌 425 期，2022 年 5 月。

**圖 4-11 碳纖複材廢棄物處理途徑的環境影響評估**

Daniel Martinez-Marquez et al.於 2022 年 8 月發表 State-of-the-art review of product stewardship strategies for large composite wind turbine blades 論文，彙整各技術最大產能及投入產出，詳如 4-12 所示。



資料來源：State-of-the-art review of product stewardship strategies for large composite wind turbine blades, Resources, Conservation & Recycling Advances, 2022.

註：RTS = retained tensile strength(保留拉伸強度)

圖 4-12 各技術投入產出彙整表

已蒐集國外較成熟與新創之廢風機葉片回收及資源循環技術案例，摘要說明如下：

#### 4.1 機械處理技術案例

物理分離法是對 CFRP 廢料進行清潔、除雜後再將其粉碎、篩分，得到粉末狀樹脂產品和纖維狀碳纖維。該方法優點是製程單純、不需要專用設備、技術門檻低、成本小。缺點是分離效果相對較差，基體中的碳纖維在回收過程大幅度損傷而無法得到長纖維，對高價值的 CFRP 廢料使用此方法進行回收會造成極大浪費。

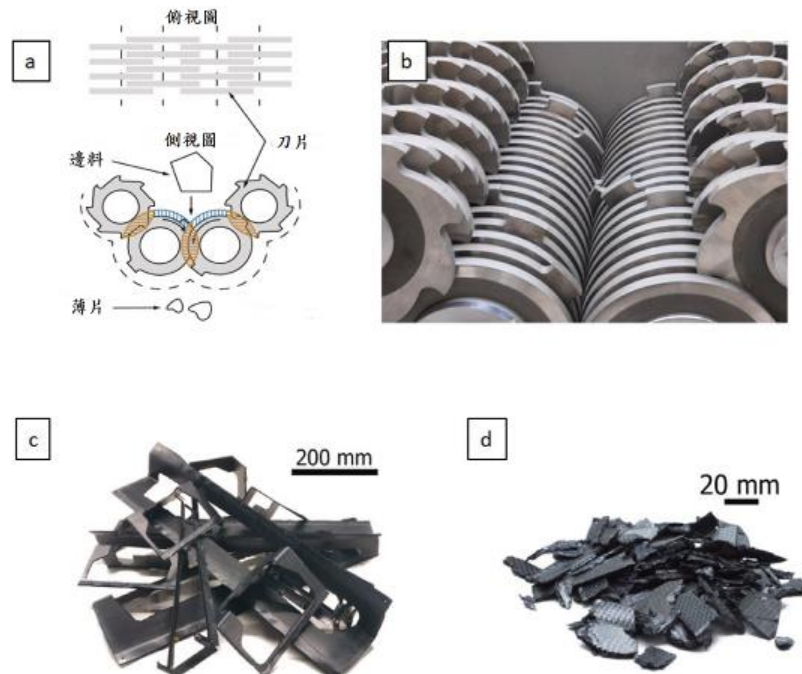
物理分離法得到的回收纖維產品，可作為低附加值複合材料的添加物或增強組分，在基礎建設領域中的混凝土、合成板、煉鐵還原劑、瀝



青等材料中廣泛應用。

#### A.機械回收法

複合材料的機械加工是管理越來越多的碳纖維廢料的實用技術。該方法主要是將複合材料部分切碎、粉碎、研磨和研磨成更小的碎片，然後再進一步研磨成粉末。為此，使用多軸切碎機和切割機等設備，流程如圖 4.1-1。軸切碎機會產生大而均勻的碎片，這些碎片由刀片之間的距離、刀片下方的篩網尺寸及其旋轉速度控制在生產複合材料薄片並去除任何金屬部件後，切碎的部件可以研磨成粉末，然後再製造成複合材料。例如，從切碎獲得薄片之熱塑性複合材料，因含碳纖維可增強聚苯硫醚（Polyphenylene sulfide, PPS）在低剪切混合器中與新填料混合後重新利用，然後使用壓縮成型機重新成型。在受控加熱下進行低剪切混合以製備成團狀材料，並避免纖維斷裂，有助於保持再製造零件的機械性能。



資料來源：Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes, 2021.

圖 4.1-1 機械回收法處理流程

## B.水泥窯共同處理法(GE 可再生能源公司&Veolia)

GE 可再生能源公司於 2020 年 12 月宣布，與 Veolia 簽署一項多年協議，以回收位於美國的陸上風力發電渦輪機上拆下的葉片。Veolia 將利用水泥窯協同處理技術對葉片進行加工，作為水泥的原料。從渦輪機上拆下的葉片將在 Veolia 位於美國密蘇里州的工廠進行切碎，按重量計算，近 90% 的葉片材料將作為水泥生產。葉片切碎後如圖 4.1-2 所示。

透過水泥窯協同處理回收葉片在所有回收項目中都具正面的效益，與傳統的水泥製造相比，以葉片回收來作為水泥製造之替代原料，可使水泥生產中的二氧化碳排放量減少 27%，用水量減少 13%。此外，透過該技術回收的一片重 6.3 公噸的風力渦輪機葉片，可使水泥窯減少近 5 公噸煤、2.7 公噸二氧化矽、1.9 公噸石灰石和近 1 公噸礦物原材料。此種方式進行葉片回收，對人類健康、生態系統質量和資源消耗等方面也產生極正面的環境效益。



資料來源：

<https://wteinternational.com/news/ge-and-veolia-team-up-to-provide-wind-turbine-blade-recycling/>

圖 4.1-2 風機葉片切碎後狀態

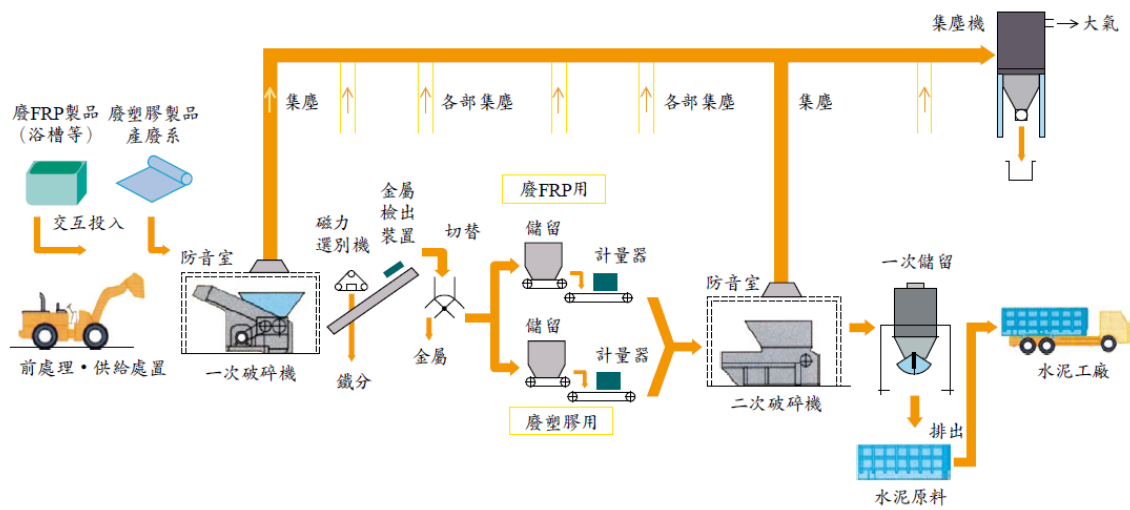
### C. FRP 廢料再資源化技術(日本富士田商事株式會社)

在響應日本政府資源回收再利用的政策下，富士田商事株式會社參與上述國家型的專案計畫，並進行 FRP 廢棄物再資源化事業的營運，長期以來其運作正常，且已完全達到商業化之目標。

富士田商事株式會社主要設施包括破碎機、磁力選別機、金屬挑除機、熱量調整設備及袋濾式集塵裝置等，其一次破碎機處理能力為 32 公噸/日，二次破碎機處理能力為 20 公噸/日，每天運轉 8 小時，每年處理廢 FRP/塑膠之能量約 8,000~8,500 公噸。先將解體後的廢 FRP 製品經過第一次破碎(長度約 10 cm)，以磁力選別機及金屬檢出裝置將鐵與金屬物質去除後，再與經處理過的 PP、PS 等塑膠廢料混合，經過熱量計算調整，再將摻合後的此兩種廢料再進行二次破碎，達到符合要求的回收料。回收料的要求條件包括：熱量為 5,000 kcal/kg 以上，氯含量在 500 ppm 以下，長度在 20 mm 以下，可全數提供給水泥廠當燃料使用，燃燒後剩下的渣則當填充料使用。

一次破碎機處理能力為 32 公噸/日，二次破碎機處理能力為 20 公噸/日，每天 8 小時的運轉，廢 FRP 及產業廢塑膠類為進料，以磁力選別機及金屬檢出裝置進行異物篩選，皮帶式計量機作為熱量調整設備，供廢 FRP 與塑膠個別使用，集塵設備則為袋濾式集塵裝置(袋式過濾器)。

其富士田商事株式會社廢料回收流程如圖 4.1-3 及圖 4.1-4 所示。



資料來源：臺灣風機葉片複合材料動靜脈整合分析，工研院簡報，2021 年 11 月。

圖 4.1-3 日本富士田之 FRP 廢料回收流程圖



資料來源：複合材料廢棄物是千年不爛的垃圾？還是有用的資源？，工業材料雜誌，2018 年 2 月。

圖 4.1-4 富士田商事株式會社廢 FRP 製品處理現況

## 4.2 熱處理技術案例

熱處理又可以再細分為熱裂解(pyrolysis)、流體化床熱裂解(fluidized bed pyrolysis)、微波熱裂解(microwave pyrolysis)、蒸汽熱裂解(steam pyrolysis)等，而目前最常見且技術最純熟的為熱裂解。熱裂解對於碳纖維的回收極具效益，通常可維持 90% 的強度，但因回收過程需在 350~700°C 下進行，對於耐熱性較差的玻璃纖維則不具回收效益。另外，在熱裂解過程中所產生的碳，附著於纖維表面時將會影響其後續與其他材料的結合能力，故此回收方式通常需再進行後熱裂解處理。以下就熱處理技術進行案例說明如下：

### A. 熱裂解技術(歐盟 FibreEUse 計畫)

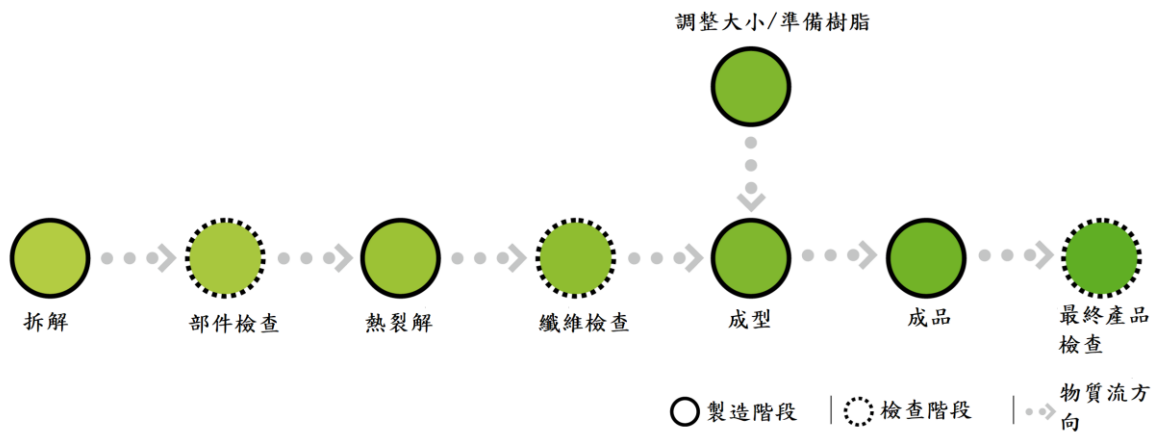
熱裂解法是將 CFRP 廢料的粉碎片置於惰性氣體中加熱至 700~800°C，使基體樹脂在裂解器中裂解成多種小分子化合物，再注入適量氧氣通過氧化反應除去小分子化合物，獲得比原始長度短、力學性能損失小、表面光滑潔淨的回收碳纖維。該方法使用的主要設備包括原料處理和餵料系統、高溫反應分解系統、提純和清洗系統、控制系統和出料系統等。該方法的技術原理涉及 CFRP 熱分解動力學，研究人員發現在空氣條件下 CFRP 加熱至 300~460°C 時，環氧樹脂分解產物較多，有明顯品質損失；升溫至 460~580°C 時，環氧樹脂繼續氧化分解生成大量不穩定產物，部分被氧化生成水和二氧化碳，此階段品質損失約 15%；升溫至 600~750°C 時，環氧樹脂分解留在表面的殘炭被氧化，此階段品質損失最高約為 58%。

熱裂解案例將以 FibreEUse 熱裂解技術進行介紹。歐盟 FiberEUse 計畫於 2017~2021 年進行研發，主要以創新方式進行技術整合，以提高複合材料回收利用和價值再利用為目的。此計畫以熱回收方式回收



長纖維(玻璃纖維和碳纖維)，回收之產品可應用於高科技、高電阻應用中。FibreEUse 計畫處理流程如圖 4.2-1 所示。

由合作夥伴 Tecnalia 研發低溫無氧熱解技術(<400°C)，從風能和航太領域的廢棄物中回收玻璃纖維和碳纖維，並能夠部分保留玻璃纖維和碳纖維的強度和柔韌性。再生玻璃纖維增強塑膠(recycled Glass Fiber Reinforced Plastics, rGFRP)和再生碳纖維增強塑膠(recycled Carbon Fibre Reinforced Plastics, rCFRP)是可重複使用的材料。使用該技術進行回收將至少取代 20% 的原始玻璃纖維或碳纖維，應用於汽車行業或建築行業的產品製造。



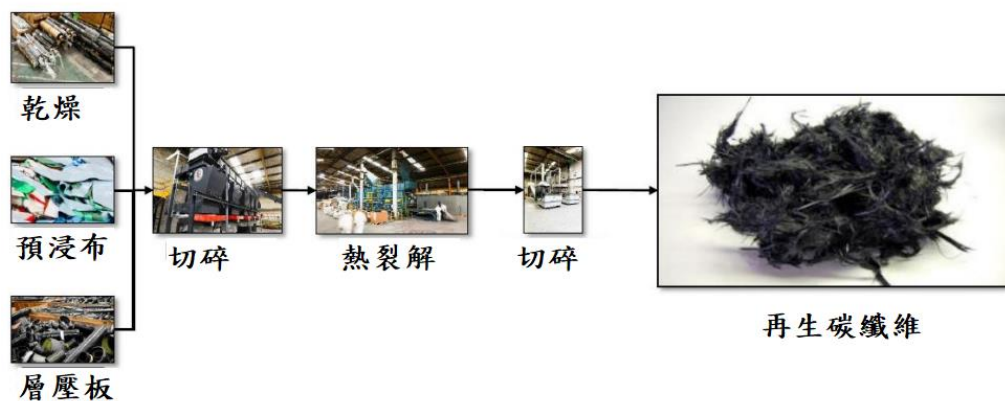
資料來源：<http://www.fibereuse.eu/index.php/detail/for-thermal-recycling>

**圖 4.2-1 歐盟 FibreEUse 計畫玻璃纖維和碳纖維回收處理流程**

#### B. 熱裂解回收技術(英國 ELG Carbon Fibre)

英國廠商 ELG Carbon Fibre Ltd.(簡稱為 ELG CF)，位於英國科克利，是碳纖維回收再生商業化最成功的標竿廠商，該公司熱裂解回收碳纖維設備年產能達 2 千公噸。ELG CF 使用熱裂解回收法(製程流程如圖 4.2-2)，以間接加熱的旋轉加熱管狀爐進行碳纖維廢棄物熱裂解，在常壓下運用加熱氣體的配置調控，減少碳纖維在回收過程中與氧氣接觸造成的氧化損耗、提升加熱效率。常用的碳纖維複材以環氧樹脂基材為主，需要 500°C 以上溫度使環氧樹脂氣化，取得回收碳纖維

進行再生應用；而氣化樹脂高溫處理後約 30% 具有能源應用潛力。



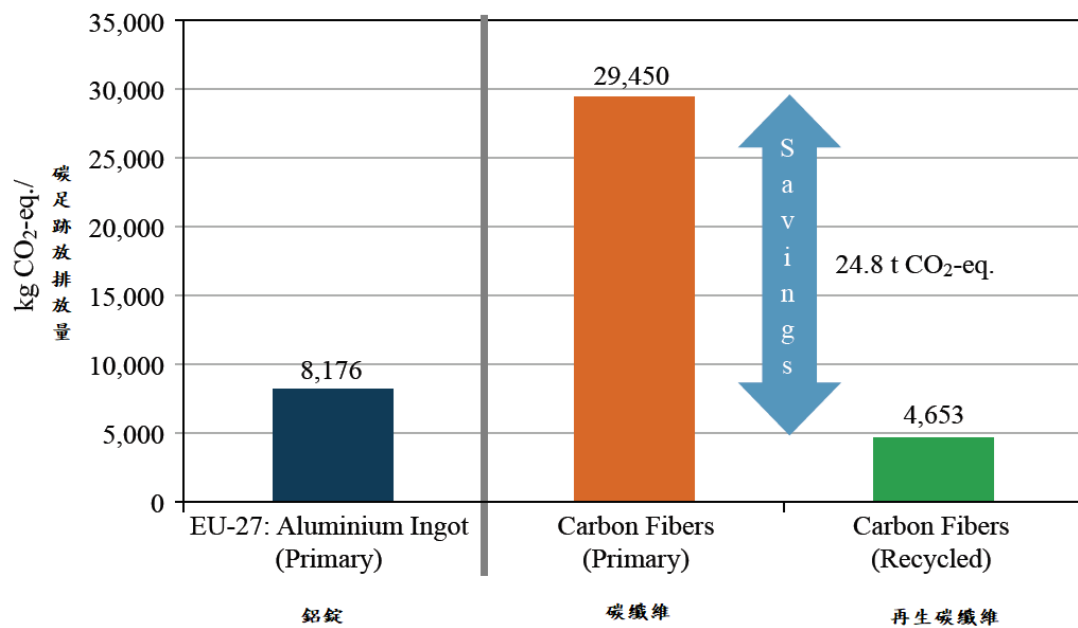
資料來源：Recycled Carbon Fibre: A New Approach to Cost Effective Lightweighting

圖 4.2-2 英國 ELG CF 熱裂解回收流程圖

飛機製造公司波音於 2016 年與 ELG CF 公司合作，在為期 18 個月的碳纖複材回收計畫中成功回收 127 公噸碳纖維，並應用於再生複合成抗靜電材料、非結構複材等應用於電子、運輸領域中。2018 年 12 月波音公司宣布擴大與 ELG CF 的合作，將每年回收再生碳纖維回收量提升至 450 公噸，減少 20% 的廢棄物生產量。

ELG CF 有限公司於 2021 年 5 月將其短纖維業務出售給再生纖維公司 Procotex Corp. SA(比利時)。ELG CF 的管理層還推出一個新的增長平台「Gen 2 Carbon」，該平台將繼續發展公司的再生長碳纖維業務，主要服務碳纖維和熱塑性的複合材料行業。

2017 年 ELG CF 與 Fraunhofer UMSICHT 合作，分析碳纖維之碳足跡結果如圖 4.2-3 所示。原生碳纖維的溫室氣體總排放量為 29,450 公噸 CO<sub>2</sub>e，採用熱裂解製程回收的再生(Recycle)碳纖維只有 4,653 公噸 CO<sub>2</sub>e，因此回收碳纖維對環境的衝擊較小。



資料來源：複材產業淨零技術的今生與來世，工業材料雜誌 425 期，2022 年 5 月。

圖 4.2-3 ELG Carbon Fibre 公司分析回收碳纖維對環境的影響

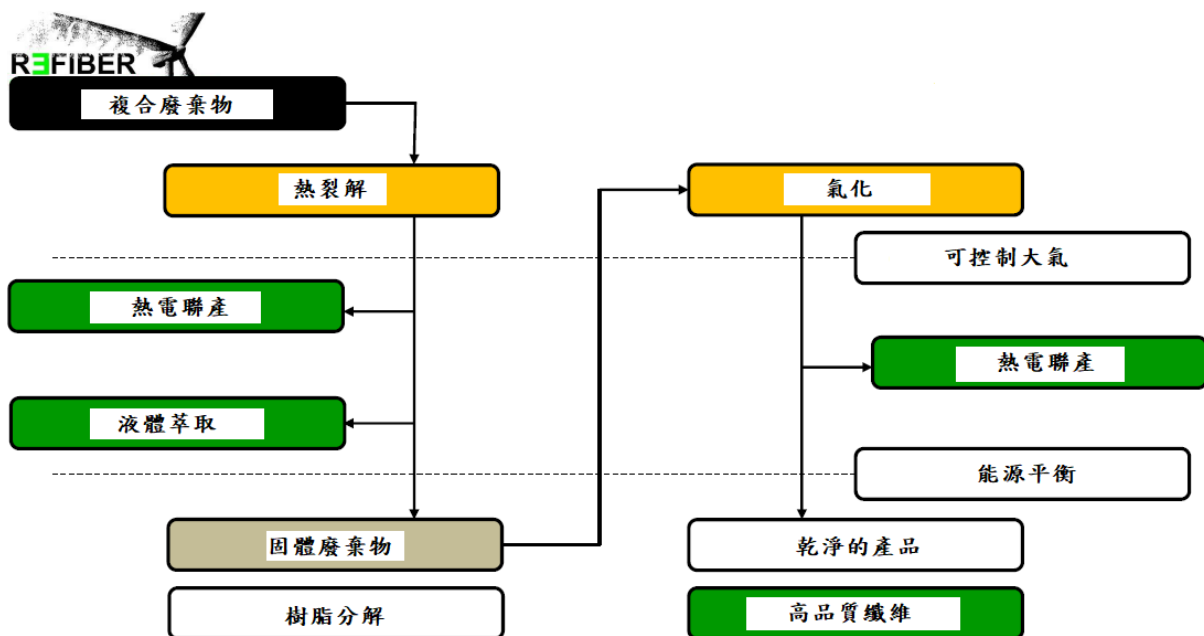
### C. 流體化床回收技術

流體化床法是一種高溫回收技術，通入高溫、富氧的空氣氣流將樹脂燃燒，回收剩餘的碳纖維。該方法可以回收被污染的 CFRP 廢料，將 CFRP 廢料破碎成約 2~3cm<sup>2</sup> 的碎片連續加入流化床反應器，500~600℃ 的富氧高溫氣流通過流化床時，樹脂燃燒產生的能量被系統加以利用，碳纖維發生氧化、直徑減小；引風機將分解產物送至旋風分離器分離獲得填料顆粒與回收纖維，回收纖維通過氣流送至纖維儲罐，而較重的、難以燃燒的金屬等雜質保留在流化床上。其中，樹脂基體燃燒的主要產物為水和二氧化碳，經過氣體吸附等常規環保處理後可以直接排放到大氣中。流化床氧化法回收得到的碳纖維品質穩定、彈性模量基本不變，但拉伸強度降低 25% 左右，影響其再應用範圍，限制該方法工業化推廣。



## D. R3Fiber 回收技術-西班牙 BCIRCULAR 公司

BCIRCULAR 公司是由西班牙科學研究高級委員會(CSIC)的衍生公司，專注於工業化和商業化複合材料回收技術開發，從而在零殘留過程中實現質量、能源和材料的完全增值。R3Fiber 技術在試驗工廠得到驗證，將風力渦輪機葉片和其他複合材料回收成可重複使用的玻璃纖維和碳纖維、熱量和能源。BCIRCULAR 主要使用組合的熱裂解和氣化技術，使得在材料性能方面與原始纖維具有可比性，其製造流程示意如圖 4.2-4 所示。



資料來源：Thomas Telsnig, Mapping and analysis of current circular economy approaches in the windenergy sector, 2022.02.

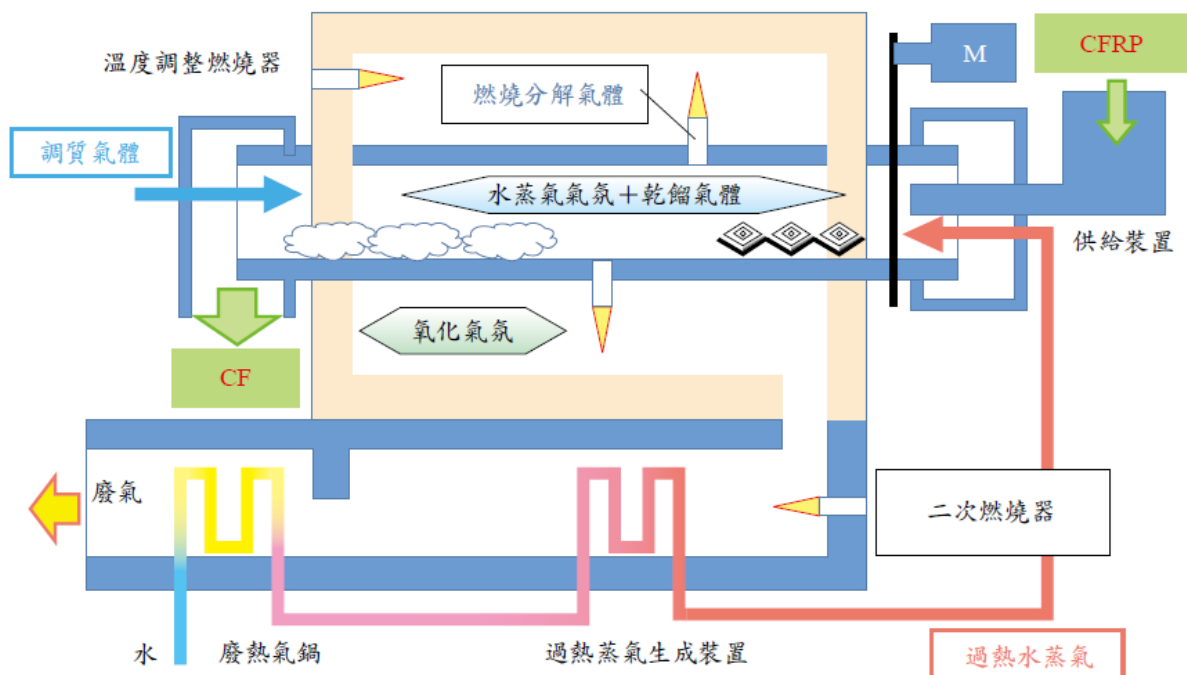
圖 4.2-4 R3Fiber 技術流程圖

## E. 過熱蒸汽處理技術(日本高砂工業公司)

日本高砂工業株式會社於執行日本政府的「基盤技術高度化支援事業專案計畫」，獲得 6,000 萬日圓經費補助，投入碳纖維增強塑膠(CFRP)回收處理設備的研發工作。碳纖維再生利用技術的構想是將樹脂燃料化，利用燃燒樹脂產生的熱能，來提供低成本且再利用的技

術，在過熱蒸汽裡添加氣體以提升再生纖維和樹脂的緊密性。系統設計是採用過熱蒸汽法達到碳纖維的再生利用，相關程序係於 700°C 裂解溫度下將 CFRP 中的環氧樹脂氣化，並注入氮氣增強碳纖維之界面強度，期間燃燒分解之氣體可循環重覆使用，未完全燃燒氣體作二次燃燒，將過熱蒸汽送入進行氣化環氧樹脂，獲得殘留之碳纖維。

高砂工業技術之關鍵性在於藉助過熱蒸汽中添加氣體來提升再生碳纖維與樹脂之聚密性，並利用燃燒樹脂產生的熱能提供降低成本的效益。高砂工業之過熱蒸汽處理流程如圖 4.2-5 所示。



資料來源：複合材料廢棄物是千年不爛的垃圾？還是有用的資源？，工業材料雜誌，2018 年 2 月。

圖 4.2-5 日本高砂工業之過熱蒸汽處理流程

高砂工業株式會社目前可提供的過熱蒸汽處理迴轉窯規格如下（約 7,000~8,000 萬日圓）：①處理能力：CFRP 20 kg/h；②處理溫度：450~850°C；③蒸汽生成能力：70kg/h；④熱蒸汽生成能力：10 kg/h；⑤周邊裝置：過熱蒸汽生成裝置、廢氣鍋爐、吸塵裝置；⑥碳纖維回

收所需的能源總量為 10MJ/kg。

高砂公司再生碳纖維目標售價為商品的 1/10，約 300 日圓/kg，其應用流程如圖 4.2-6 所示。



資料來源：複合材料廢棄物是千年不爛的垃圾？還是有用的資源？，工業材料雜誌，2018年2月。

圖 4.2-6 再生碳纖維製程與應用

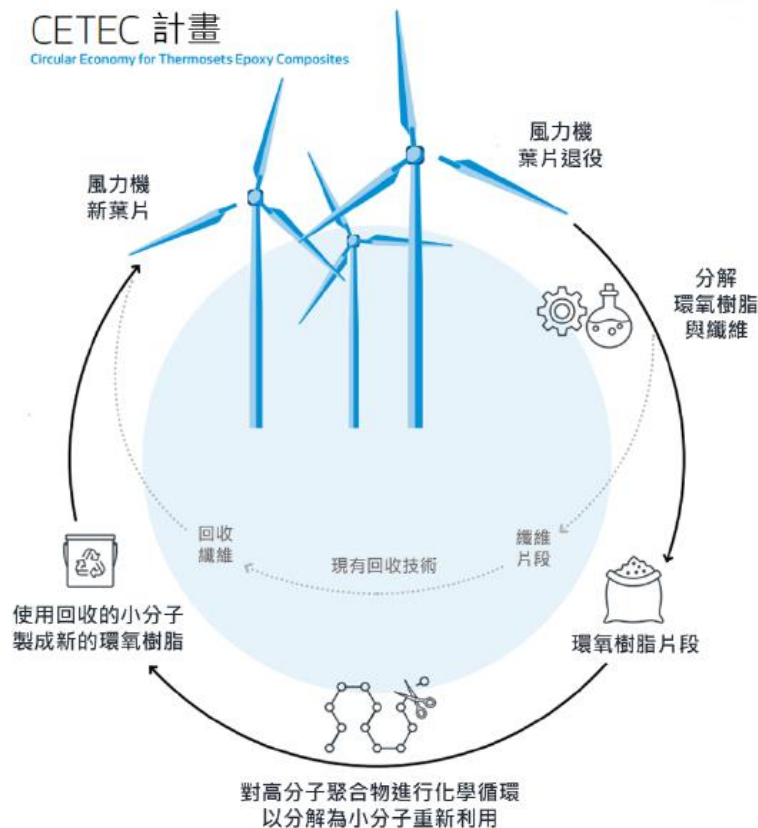
### 4.3 化學處理技術案例

使用化學處理進行葉片回收主要是透過溶劑分解(solvolysis)的方式，其可回收強度約為原材料 90%的碳纖維以及 70%的玻璃纖維。與熱處理相比，溶劑分解可在較低溫的環境下進行，也使其能進一步回收葉片中的樹脂。而在溶劑分解的過程中雖然不會產生碳，但將會一併去除纖維表面的漿料，影響回收纖維與其他材料的結合能力，為此回收方

式的主要缺點。以下就化學處理技術進行案例說明如下：

#### A.CETEC 計畫

2021 年 5 月，丹麥創新基金(Innovation Fund Denmark, IFD)的資助，Vestas 與美國環氧樹脂生產商 Olin、丹麥技術研究所(DTI)和奧胡斯大學(Aarhus University)共同推動 CETEC(Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites)研究計畫，希望能在 2024 年前將新型的材料循環技術推至風能產業，並達成商業化。該團隊首先透過將熱固性複合材料分解成纖維和環氧樹脂，接著再藉由一種新的化學材料，將環氧樹脂進一步分解成單體，最後便能將這些單體重新製成環氧樹脂，可再次投入風力機葉片的生產中，完成葉片材料的循環再利用，整體循環模式如下圖 4.3-1 所示。



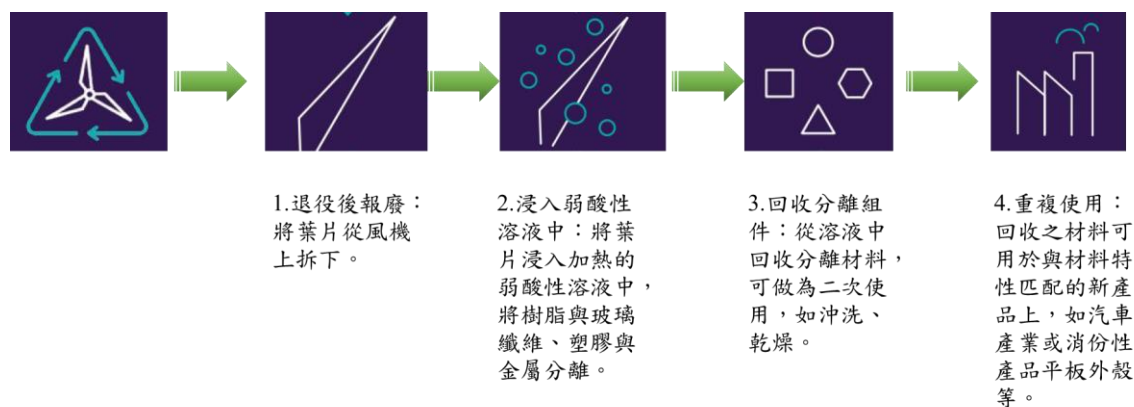
資料來源：陳靜樺，風力機葉片回收發展動態研析，2021 年 11 月。

圖 4.3-1 葉片中環氧樹脂循環再利用之流程

## B. SiemensGamesa RecycleBlades 計畫(SiemensGamesa)

西門子歌美颯(Siemens Gamesa, SGRE)使用溶劑分解法，將回收之葉片浸入加熱之弱酸性溶液內，以回收樹脂及纖維等物質，其執行流程如圖 4.3-2 所示。同時於 2021 年 9 年，在丹麥奧爾堡的西門子歌美颯葉片製造廠，生產六個 81 米長的可回收葉片，這些葉片由多種增強材料製成，結合一種新型樹脂，該樹脂可在葉片使用壽命結束後，重新溶解後再回收使用。這種技術和樹脂可以保護葉片增強材料的性能，並允許它們在與樹脂分離後重複使用或回收到新的應用中。

西門子歌美颯正在與 RWE(德國再生能源廠商 Kaskasi 風場)合作，將於 2022 年底完成建置安裝，成為全球第一座導入可回收葉片的海上風力發電廠。



資料來源：RecyclableBlade，本計畫繪製。

圖 4.3-2 西門子歌美颯葉片回收流程

## 4.4 其他創新技術案例

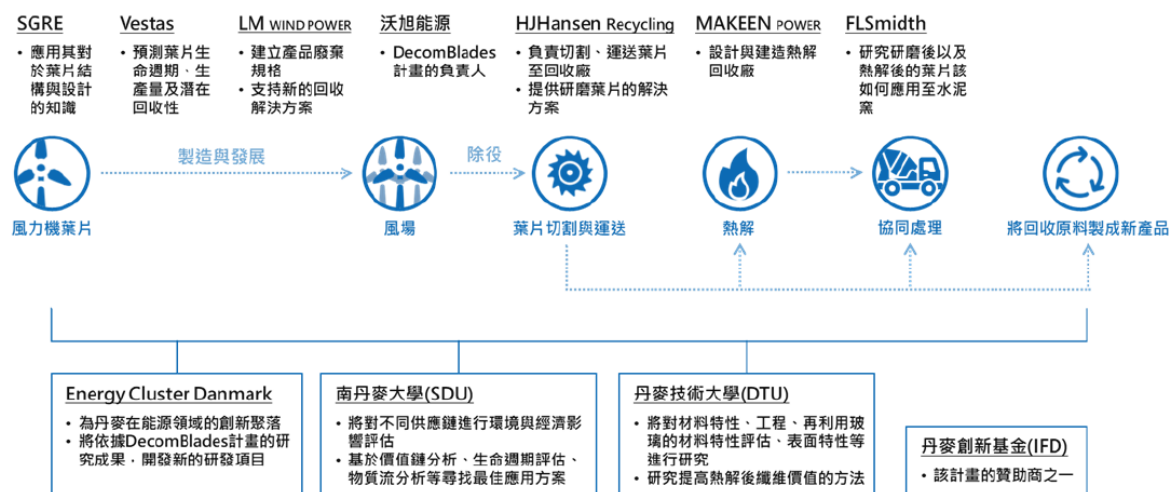
除機械處理、熱處理及化學處理技術之外，還蒐集到透過材料研發及製程優化之創新研發計畫，其他創新技術案例說明如下：

### A. DecomBlades 計畫



DecomBlades 計畫由 SGRE 與 Vestas、GE 旗下葉片品牌 LM Wind Power、開發商沃旭能源(Ørsted)、丹麥技術大學(DTU)等十個不同的單位，合作組成，計畫分工如圖 4.4-1，預計於 2021~2024 年間，針對「將葉片碎屑重複使用並添加至不同產品」、「在水泥中添加葉片碎屑」以及「專門用於葉片的熱解方法」等三項議題進行研究，欲建立風力機葉片回收的解決方案，其中 SGRE 主要負責進行葉片結構與設計的分析。

除從回收方法進行改變外，SGRE 亦投入材料的研發，欲透過改變樹脂的特性，使得回收變得更容易。2021 年 9 月，該公司即表示已在丹麥奧爾堡(Aalborg)生產首批可完全回收的離岸風力機葉片，長度達 81 公尺，規劃 2022 年即可安裝於德國 Kaskasi 風場(342 MW)，為可回收葉片的商業化向前邁進一大步。



資料來源：陳靜樺，風力機葉片回收發展動態研析，2021 年 11 月。

圖 4.4-1 DecomBlades 計畫對葉片回收之參與者與研究流程

#### B.斑馬計畫(ZEBRA)

2020 年 9 月，LM 與法國化工公司阿科瑪(Arkema)、能源公司(ENGIE)、美國玻纖複材製造商歐文斯康寧(Owens Corning)等，參與

由法國研究中心 IRT Jules Verne 推動的斑馬計畫(Zero waste Blade ReseArch, ZEBRA)，希望設計和製造首支 100%可回收的風力機葉片，計畫在三年半內生產 60~80 公尺長的葉片原型。該葉片將在 LM 位於法國瑟堡(Cherbourg)的工廠進行設計與製造，將使用合作夥伴 Arkema 開發的熱塑性樹脂 Elum®。而 ZEBRA 計畫中的其他合作夥伴將專注於透過自動化來開發並優化製造程序，以減少生產過程中的能源浪費；同時將研究如何把 LM 生產的葉片原型回收再利用，並將這些回收材料用於新產品中；最後評估在未來的風力機葉片中使用熱塑性材料的環境與經濟可行性。

#### 4.5 廢風機葉片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風機葉片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 廢風機葉片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	機械回收法	將複合材料部分切碎、粉碎、研磨和研磨成更小的碎片，然後再進一步研磨成粉末。	透過操作條件控制，可避免纖維斷裂及能保持機械性能。	技術成熟	9	Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes, 2021.
	水泥窯共同處理法	對葉片進行加工，用作水泥的原材料。	與傳統的水泥製造相比，二氧化碳排放量減少 27%，用水量減少 13%。 國內已有台泥協同處理廢棄物興建水泥窯，預計 2023 年完工。	GE 可再生能源公司 & Veolia	9	GE 可再生能源公司網站 <a href="https://www.ge.com/">https://www.ge.com/</a> Veolia 公司網站 <a href="https://www.veolia.com/en">https://www.veolia.com/en</a>
	FRP 廢料再資源化技術	參與國家型的專案計畫，並進行 FRP 廢棄物再資源化事業的營運。	回收料全數提供給水泥廠當燃料使用，剩下的渣則當填充料使用。	日本富士田商事株式會社	9	富士田公司網站 <a href="http://www.fujita-rc.co.jp/index.php">http://www.fujita-rc.co.jp/index.php</a>
熱處理	熱裂解回收技術	將惰性氣體中加熱至 700~800℃，使基體樹脂在裂解器中裂解成多種小分子，再注入氧氣，以獲得比原始長度短、力學性能損失小、表面光滑潔淨的回收碳纖維。	以創新方式進行技術整合，以提高複合材料回收利用和價值再利用為目的。	歐盟 FibreEUse 計畫	8	FibreEUse 計畫網站 <a href="http://www.fibereuse.eu/index.php/detail/for-thermal-recycling">http://www.fibereuse.eu/index.php/detail/for-thermal-recycling</a>
		以間接加熱進行廢碳纖複材裂解，在常壓下運用加熱氣體的配置調控，減少碳纖維在回收	提升加熱效率、約 30% 具有能源應用潛力	英國 ELG Carbon Fibre	9	ELG 公司網站 <a href="https://www.elg.de/en-de/">https://www.elg.de/en-de/</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
		過程中與氧化損耗。				
	流體化床回收技術	是一種高溫回收技術，通入高溫、富氧的空氣氣流將樹脂燃燒，回收剩餘的碳纖維。	品質穩定、彈性模量基本不變。	-	5	-
	R3Fiber 回收技術	將風力渦輪機葉片和其他復合材料回收成可重複使用的玻璃纖維和碳纖維、熱量和能源。	主要使用組合的熱裂解和氣化技術，使得在材料性能方面與原始纖維具有可比性。	西班牙 BCIRCULAR	7	BCIRCULAR 公司網站 <a href="https://www.bcirculard.com/r3fiber/">https://www.bcirculard.com/r3fiber/</a>
	過熱蒸汽處理技術	採用過熱蒸汽法達到碳纖維的再生利用，於 700°C 裂解溫度下將 CFRP 中的環氧樹脂氣化，並注入氮氣增強碳纖維之界面強度。	以過熱蒸汽中添加氣體來提升再生碳纖維與樹脂之聚密性，並回收熱能以降低製造成本。	日本高砂工業公司	8	高砂工業公司網站 <a href="http://www.takasago-inc.co.jp/">http://www.takasago-inc.co.jp/</a>
化學處理	溶劑分解法	將熱固性複合材料分解成纖維和環氧樹脂，接著再藉由一種新的化學循環，將環氧樹脂進一步分解成單體分子，最後便能將這些單體分子重新製成環氧樹脂。	重新製成環氧樹脂，再次投入風力機葉片的生產中，完成葉片材料的循環再利用。	CETEC 計畫 (Vestas、Olin、DTI 及奧胡斯大學)	5	CETEC 計畫介紹說明 <a href="https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/new-coalition-of-industry-and-academia-to-commercialise-c3347473#!NewsView">https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/new-coalition-of-industry-and-academia-to-commercialise-c3347473#!NewsView</a>
		使用溶劑分解法，將回收之葉片浸入加熱之弱酸性溶液內，以回收樹脂及纖維等物質	技術和樹脂可以保護葉片增強材料的性能，並在與樹脂分離後重複重新應用。	Siemens Gamesa	5	Siemens Gamesa 公司網站 <a href="https://www.siemensgamesa.com/en-int">https://www.siemensgamesa.com/en-int</a>
其他	DecomBlade	主要朝「將葉片碎屑重複使用	改變樹脂的特性，使得	SGRE 與	5	DecomBlades 計畫說

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
創新技術	s 計畫	並添加至不同產品」、「在水泥中添加葉片碎屑」以及「專門用於葉片的熱解方法」等三項議題進行研究。	回收變得更容易。	Vestas、LM Wind Power、沃旭等單位		明網站 <a href="https://innovationsfond.en.dk/da/nyhed/decomblades-consortium-awarded-funding">https://innovationsfond.en.dk/da/nyhed/decomblades-consortium-awarded-funding</a>
	斑馬計畫 (ZEBRA)	將設計和製造首支 100% 可回收的風力機葉片，計畫在三年半內生產 60~80 公尺長的葉片原型。	技術分工明確，針對製程優化、葉片原型回收及熱塑性樹脂開分進行研發。	LM、Arkema、ENGIE、Corning	5	ZEBRA 計畫說明網站 <a href="https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-launched">https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/zebra-project-launched</a>

## 五、關鍵物料(矽銻鈷)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。

根據世界半導體貿易統計(World Semiconductor Trade Statistics, WSTS)，2021 年全球半導體市場成長 26.2%，並預估 2022 年成長率為 10.4%，市場規模將突破 6,000 億美元，預計未來十年的半導體成長將主要由三個產業推動，分別為汽車電子、運算和數據儲存以及無線通訊。半導體市場成長促使半導體材料需求與技術提升，矽、碳化矽、銻化合物與鈷皆廣泛用於半導體材料。

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	<u>矽</u>	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	<u>銻</u>	18	3	15
7	<u>鈷</u>	7	15	29
8	稀土元素	3	1	39
9	銦	2	11	41
10	鍺	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，矽、銻、鈷在「關鍵物料篩選原則」被列為優先管理之關

鍵物料項目，且為半導體的主流材料，因此將矽、銻、鈷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，為蒐集國外技術資料之方向。矽是極為常見且資源豐富的一種元素，據估算當前之蘊藏量，足以滿足世界需求數十年之久，矽具有一定導電性，但矽晶體不具有金屬性質，而具半導體性質特性，被廣泛用於合金(高機能性合金)與及高科技產業(矽晶圓與碳化矽)；鈷具有磁性、與合金可製造超合金，鈷化學品應用相當廣泛，且鈷是製造半導體芯片的重要關鍵材料，含鈷材料多應用於聚酯纖維、高科技產業、金屬加工具、電池材料等；銻是類金屬可與鉛、錫製作合金，銻銻、銻銻是良好的半導體，三氧化二銻催化劑適用於 PET 聚酯聚合製程，關鍵物料(矽、鈷、銻)的應用領域整理如圖 5-1~5-3 所示，廢棄物產出形式與資源循環技術整理如表 5-2 所示。

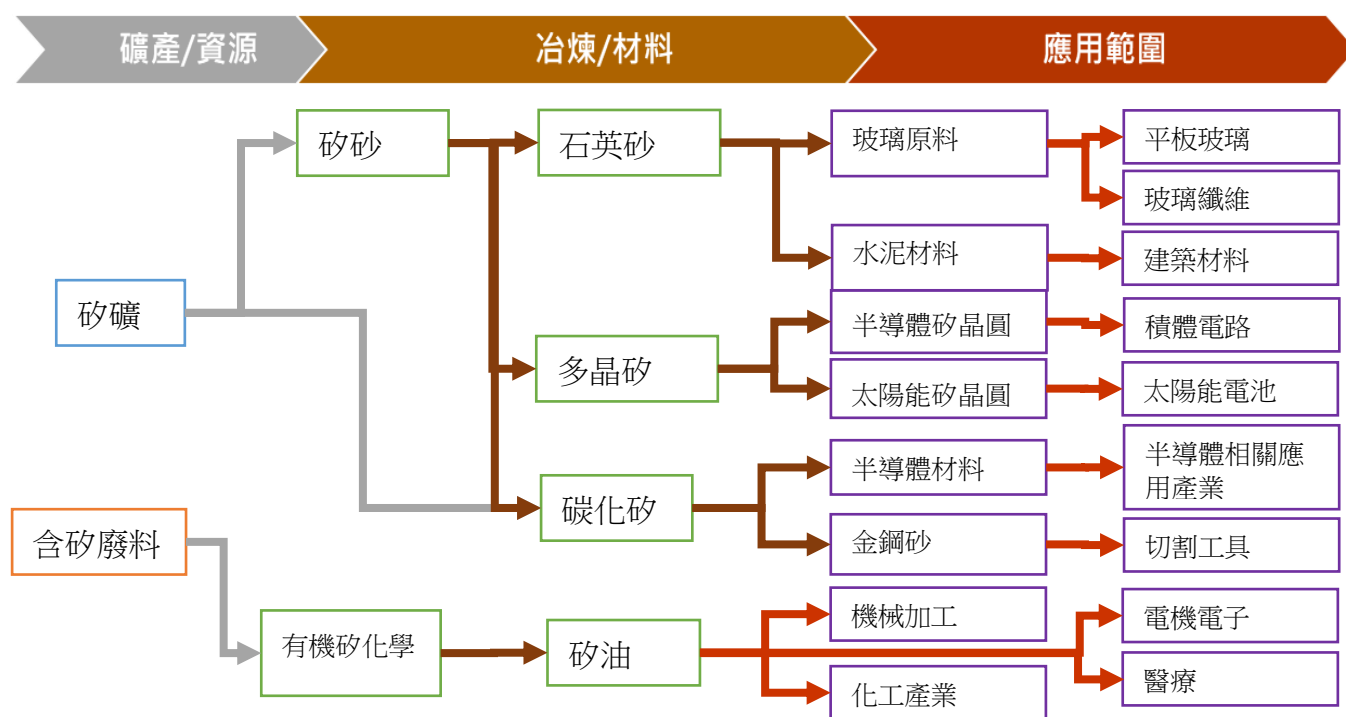


圖 5-1 關鍵物料 - 矽的主要應用範圍

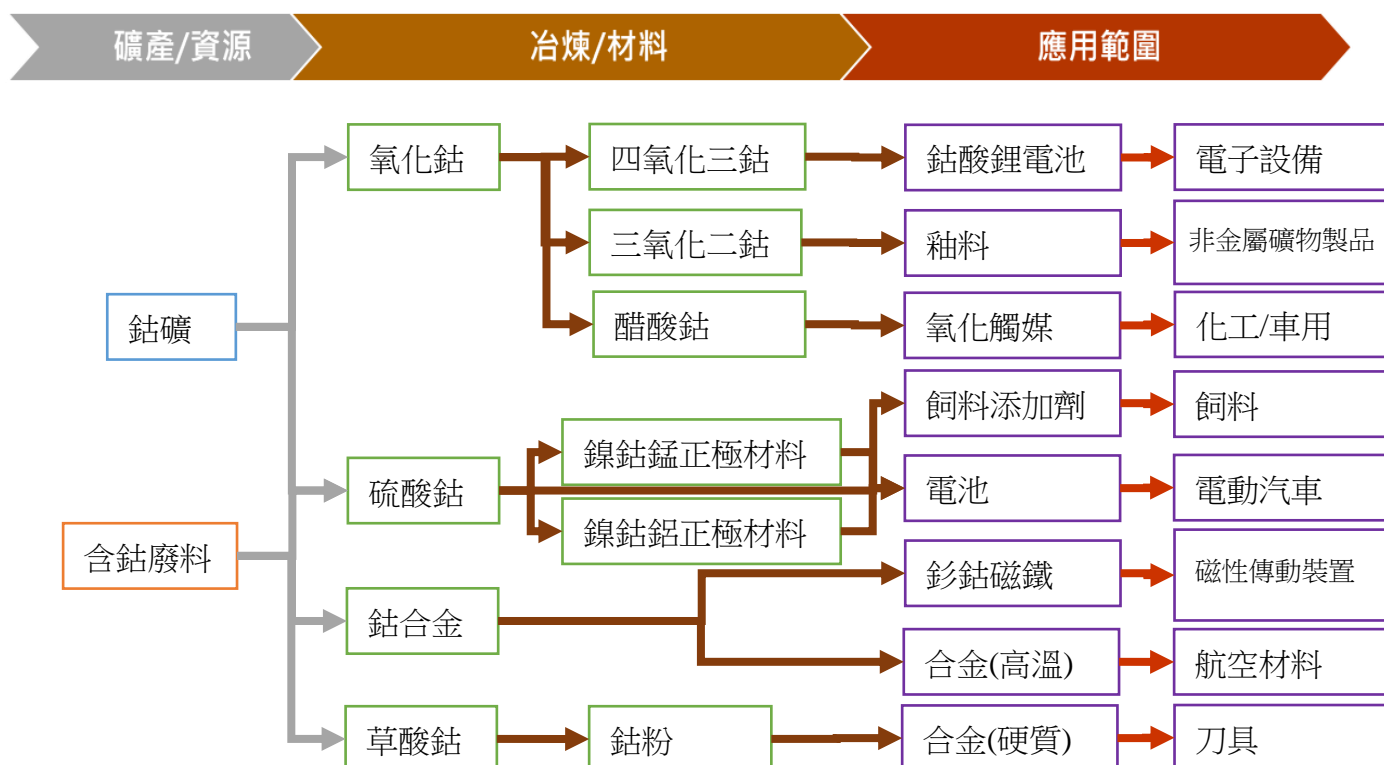


圖 5-2 關鍵物料 - 鈷的主要應用範圍

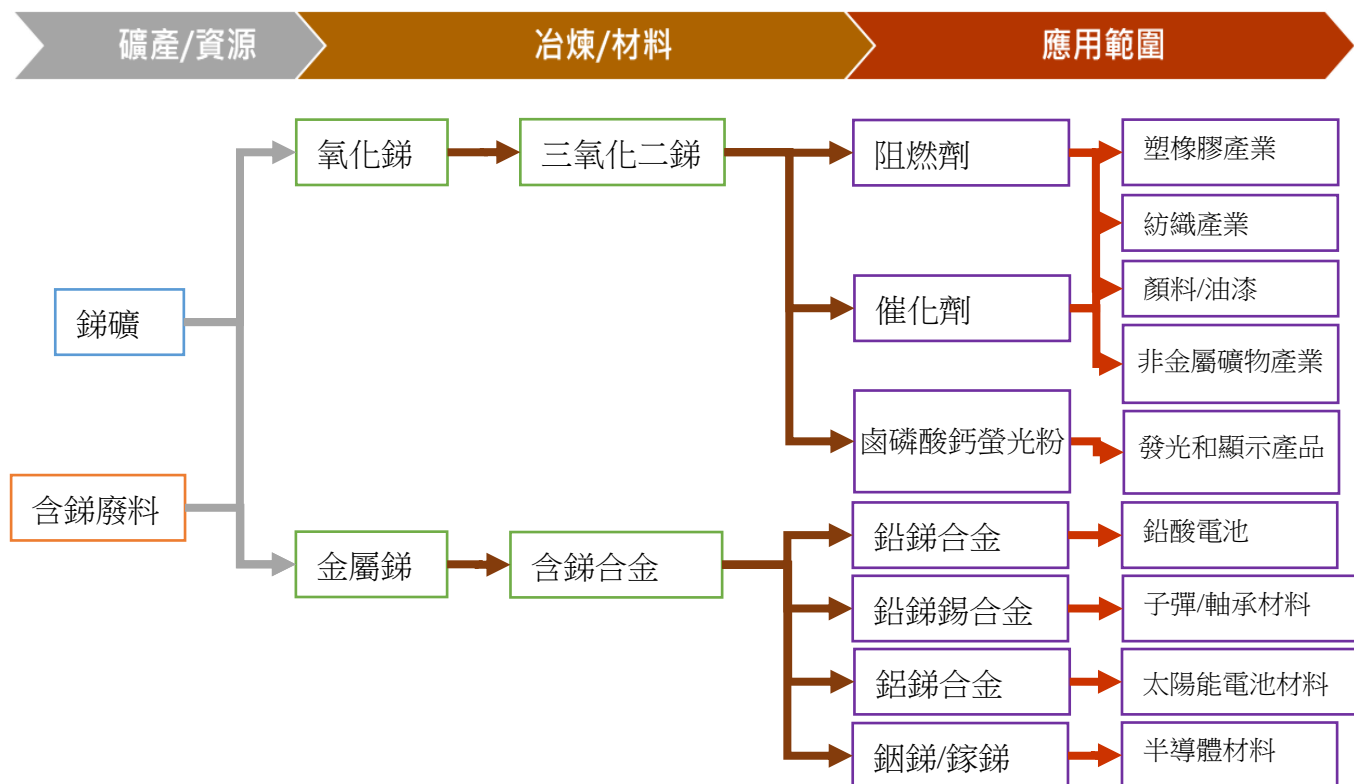


圖 5-3 關鍵物料 - 鈮的主要應用範圍

表 5-2 關鍵物料(矽、鈷、銻)的廢棄物產出形式與資源循環技術

關鍵物料	廢棄物產出形式	可行資源循環技術
矽	廢矽晶(邊角料)	清洗→粉碎→研磨→酸溶劑純化→清洗，回收高純度矽粉。
	廢太陽能模組	拆除→加熱→熱裂解→分離，回收矽片。
	含矽廢料	以酸/鹼液進行前處理，再進行水熱反應長晶，合成沸石。
	碳化矽廢料	熱處理→冷卻→機械處理→物理處理，回收高純度碳化矽粉末。
鈷	廢鋰離子二次電池	物理分選→濕式冶金/乾式冶金，依不同純提方式，回收鈷氧化物或鈷鎳銅合金。
銻	廢鉛酸電池	粉碎設備、反射爐→精煉，回收合金。
	廢阻燃塑膠	溶劑溶解、清洗、分離、沉澱、乾燥、溶劑回收，回收氧化銻、聚合物與溶劑。
	鹵磷酸鈣螢光粉	酸溶→萃取→反萃取，回收三氧化二銻。

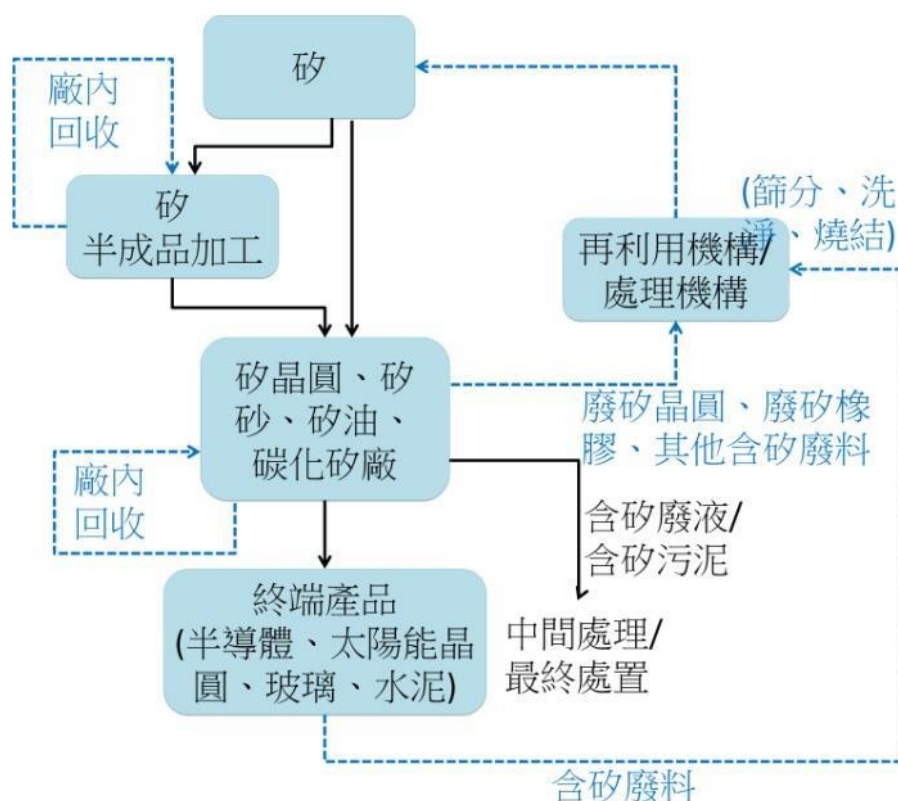
本計畫彙整：

- 1.「矽-關鍵物料調查報告」行政院環境保護署，2017 年 12 月
- 2.「鈷-關鍵物料調查報告」行政院環境保護署，2017 年 12 月
- 3.「銻-關鍵物料調查報告」行政院環境保護署，2017 年 12 月
- 4.鋰離子電池高值化循環利用技術，張添晉、洪毅翔，環境工程會刊 107 年第 4 期。
- 5.循環經濟下，淺談沸石合成技術，蔡振章，工業材料雜誌 4221 期，2022 年 1 月。
- 6.弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所 [www.ivv.fraunhofer.de/](http://www.ivv.fraunhofer.de/)

## 5.1 含矽廢料資源化技術案例

高純度單晶矽乃重要之半導體基礎材料，主要應用於微晶片及積體電路。若於單晶矽中摻入微量的ⅢA 族元素，則可形成 P 型矽半導體；摻入微量的ⅤA 族元素，則可形成 N 型矽半導體；將 P 型和 N 型半導體結合，則可形成太陽能電池。全球矽資源豐富，依主要產品可分為四大類，包括矽晶圓、矽砂、有機矽及碳化矽，矽物料流布概況如圖 5.1-1，主要回收途徑為產品製造及廢棄物回收，回收類別主要有廢矽晶圓、廢矽橡膠、太陽能電池及其他含矽廢料等。





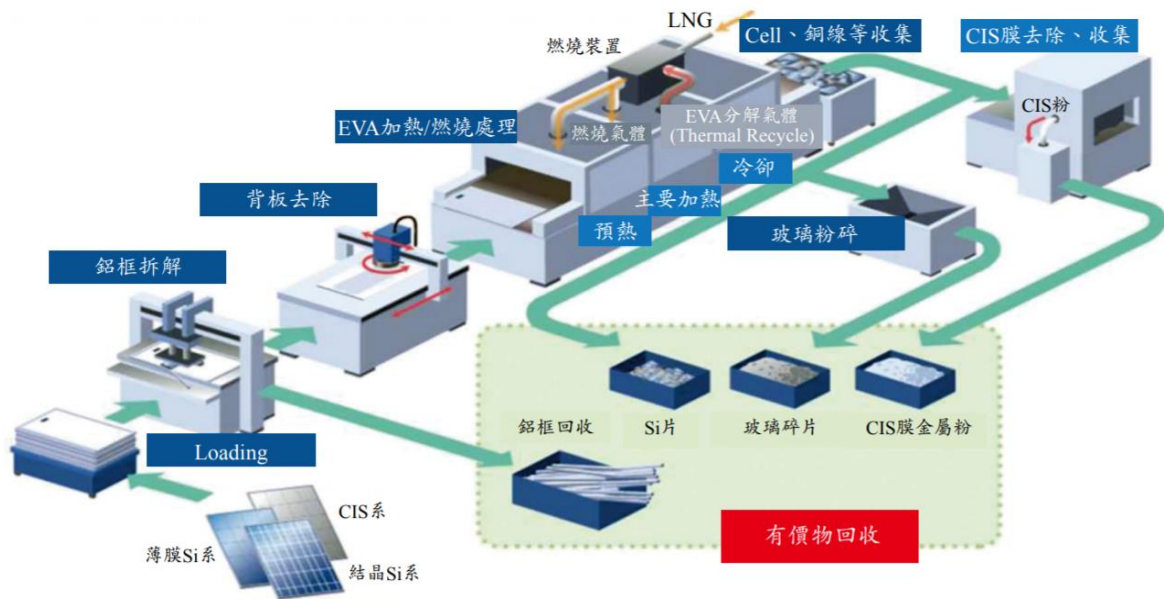
資料來源：矽-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。

圖 5.1-1 矽物料流布概況

### 1. 以熱裂解技術從太陽能模組回收矽(日本新菱株式會社)

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5.1-2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℃，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，工業材料雜誌 381 期，2018 年 9 月。

圖 5.1-2 日本新菱公司熱裂解處理法流程圖

## 2. 分離雜質技術從廢碳化矽回收碳化矽(德國 Esk Sic 公司)

德國 Esk Sic 與 Fraunhofer IKTS 開發碳化矽回收程序，以近乎 100% 回收 ACHESON 製程中產生的副產物與廢棄物生產純度 98% 的 RECOSIC<sup>®</sup>。且 RECOSIC<sup>®</sup> 程序的每噸碳化矽溫室氣體排放量為 0.75 噸 CO<sub>2</sub>e，較 ACHESON 程序的碳化矽減少 80% 排放量，如圖 5.1-3。Esk Sic 說明在 2021 年申請專利(專利文件號碼 DE10 2020 102 512.2)，預計 2023 年底可開始提供 RECOSIC<sup>®</sup> 碳化矽。分離雜質技術是回收至少有 50% 碳化矽含量之廢棄物，其粉末尺寸在 0.5-1000 微米，先在真空或微氧狀態以 1,400-2,600°C 熱處理 10-300 分鐘，處理時間取決於碳化矽的粒徑和處理溫度，接著以 10 至 1000K/min 冷卻速度到室溫，以脈衝、研磨、渦流或超音波等機械方法處理碳化矽粉末，機械處理每公斤碳化矽需投入 0.1-5MJ 能量，再以物理方式分離碳化矽，如篩分或旋風分選方式(顆粒形狀與粒度)、浮選與旋流方式(密度)，通過電場(表面特性)，可得純度 98% 以上的碳化矽材料。



資料來源：Esk Sic 官網，<https://www.esk-sic.de/en/#start>.

圖 5.1-3 德國 Esk Sic 以低碳排分離技術回收碳化矽

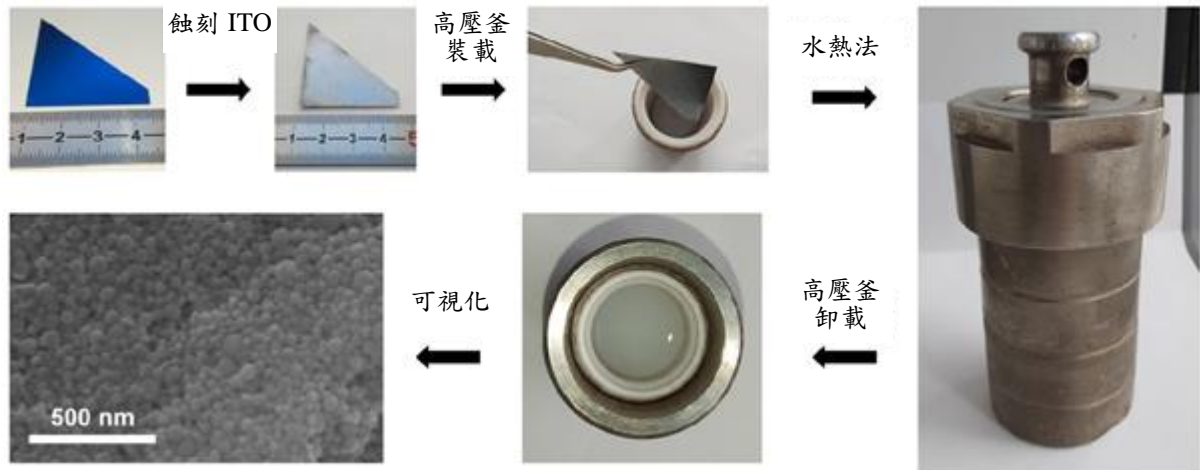
### 3.無毒環保技術將廢矽料轉化為奈米級氧化矽粒子(Skolkovo 科學技術學院與俄羅斯莫斯科大学)

俄羅斯 Skolkovo 學院(Skolkovo Institute of Science and Technology, Skoltech)與莫斯科大学研究發現一種不使用有毒物質，將矽晶片在水性環境中通過水熱合成轉化為 8 到 50 奈米級氧化矽粒子。

實驗中使用了三種類型的矽晶片，分別為 HR(高電阻率)、N 型(摻氮)和 P 型(摻磷)。將矽添加到 60 ml 濃度從 0.53M 到 13.16M 不等的氨水，溶液移到鐵氟龍內襯高壓釜中，在 297.15K 至 453.15K 的不同的溫度下，在自增壓反應 2 至 96 小時後，自然冷卻至室溫，得到白色固體產物，實驗流程如圖 5-1.4 所示。

研究發現即使不使用氨作為催化劑，也能在 HR 的表面形成 Si-H 鍵，還可以通過使用添加劑(例如磷和硼摻雜劑)來加速反應。而溫度和水解時

間是影響粒徑分佈的合成關鍵參數。溶液中 pH 值的增加對顆粒形成速率有很大的影響，故使用氨水使其水性介質中的反應更快。



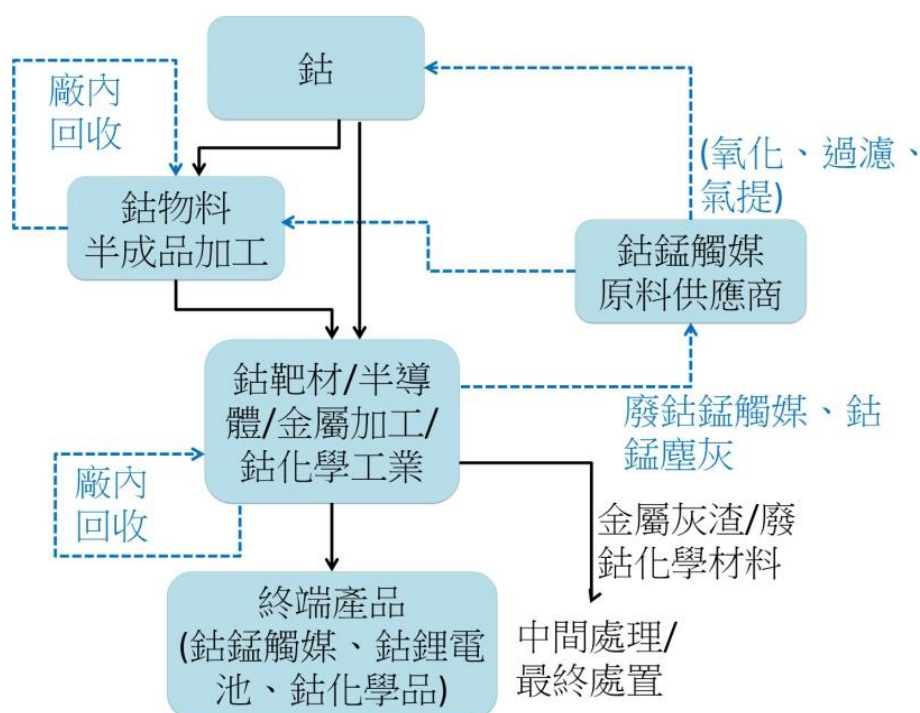
資料來源：Environmentally Friendly Method of Silicon Recycling: Synthesis of Silica Nanoparticles in an Aqueous Solution, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Sep 1, 2020.

圖 5.1-4 俄羅斯 Skolkovo 科技學院將太陽能電池以水熱合成氧化矽流程

## 5.2 含鈷廢料資源化技術案例

金屬鈷主要用於生產合金、電池及觸媒等，其中鈷合金被應用於刀具鋼、飛機之發動機或汽輪機等，鈷亦為目前鋰電池正極材料(鈷酸鋰與三元材料)，鈷也應用於目前工業及車輛等常用之觸媒原料。鈷金屬主要用於製造各種化合物並使用於化工、電子產業(約占 75~80%)，其餘約 20~25%用於製造合金，鈷物料流布概況如圖 5.2-1，鈷依應用特性有不同回收途徑，鈷化學品使用後可逆向回收為產品製造及廢棄物回收，無法回收採焚化或掩埋方式處理，廢鈷錳觸媒由觸媒原料供應商進行回收再利用。





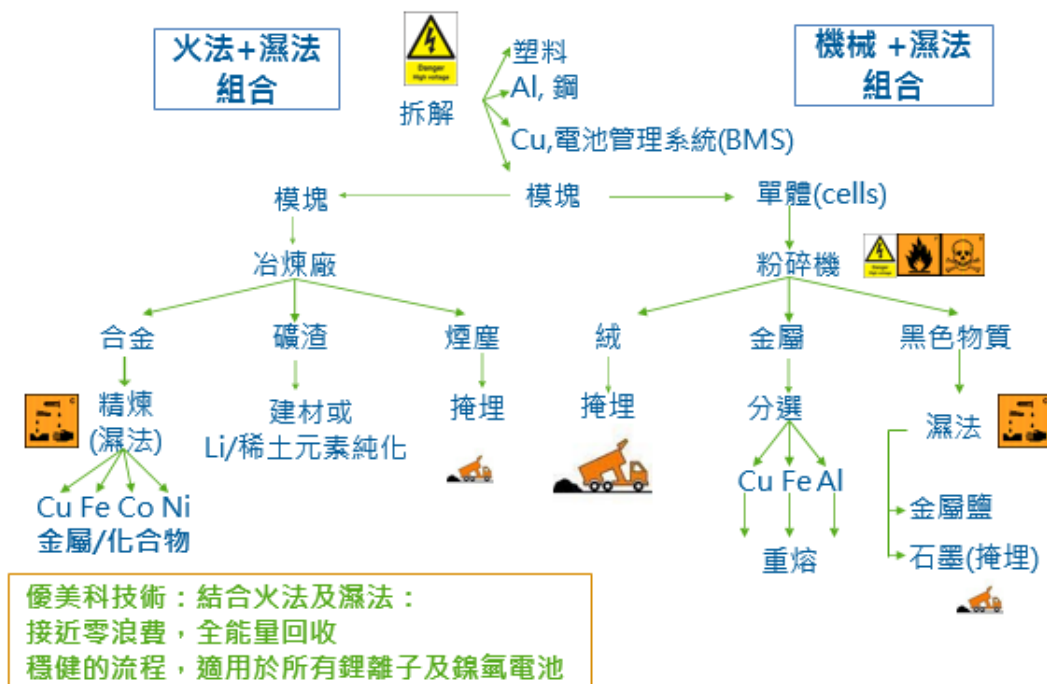
資料來源：鈷-關鍵物料調查報告，行政院環境保護署，2017 年 12 月。

圖 5.2-1 鈷物料流布概況

### 1. 以火法冶金及濕法冶金從鋰電池回收鈷(比利時優美科公司)

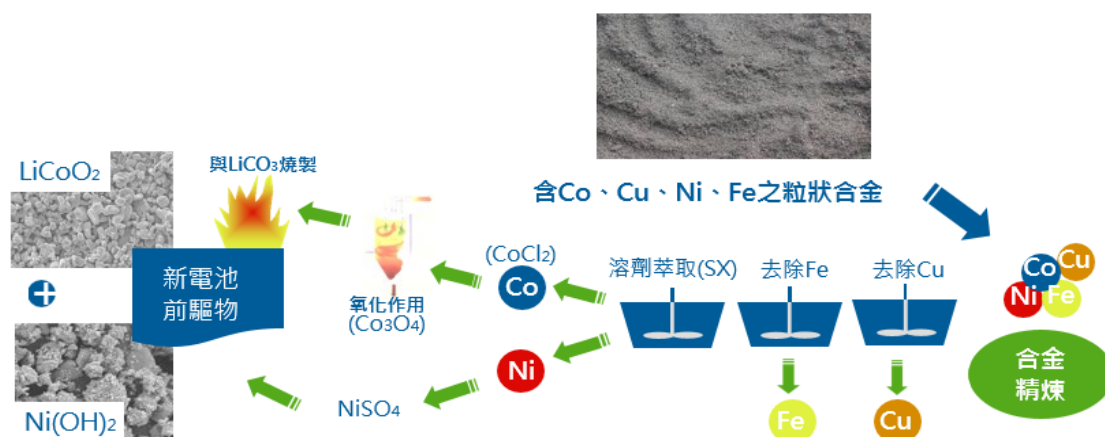
比利時優美科公司(Umicore)是透過結合火法冶金處理和濕法冶金，以可持續的方式回收**所有類型和所有尺寸的鋰離子(Li-ion)和鎳氫電池(NiMH)**。Umicore 火法冶金的 UHT 技術(Ultra High Temperature Technology)應用在銅或其他金屬精煉及廢棄鋰電池處理，經由火法冶金技術分別產出合金及礦渣。合金以濕法冶金繼續提純至個別元素如鈷、鎳、銅，並再重製為正極材料，礦渣可用於建築材料或進一步與外部夥伴(Solvay S.A.)合作回收金屬鋰。另外經過 UHT 技術的氣體淨化系統，保證有機化合物完全分解，不會產生戴奧辛或揮發性有機化合物(VOC)，且氟被安全地捕獲在煙塵中。該公司在比利時霍博肯(Hoboken)的 UHT 熔爐處理容量為每年 7,000 公噸，其中有 2.5 億個手機電池、2 百萬個電動自行車電池與 3.5 萬個電動車電池。

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 5.2-2 及圖 5.2-3 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  $\text{Ni(OH)}_2$ 。



資料來源：Umicore 公司官網。

圖 5.2-2 Umicore 濕法及火法組合流程示意圖



資料來源：Umicore 公司官網。

圖 5.2-3 Umicore 合金精煉流程示意圖

2022 年 Umicore 與電動汽車電池製造商 Automotive Cells Company (ACC)合作電池回收服務，並在其法國 Nersac 設立試點工廠，如圖 5.2-4 所示，Umicore 說明新一代的專有回收技術，提高了鈷、鎳和銅的提取效率，超過 95%，以自動化優先設置回收流程，回收的金屬是可應用在新鋰電池的循環技術，實踐優美科的整體閉環理念。



資料來源：Automotive Cells Company 官網,

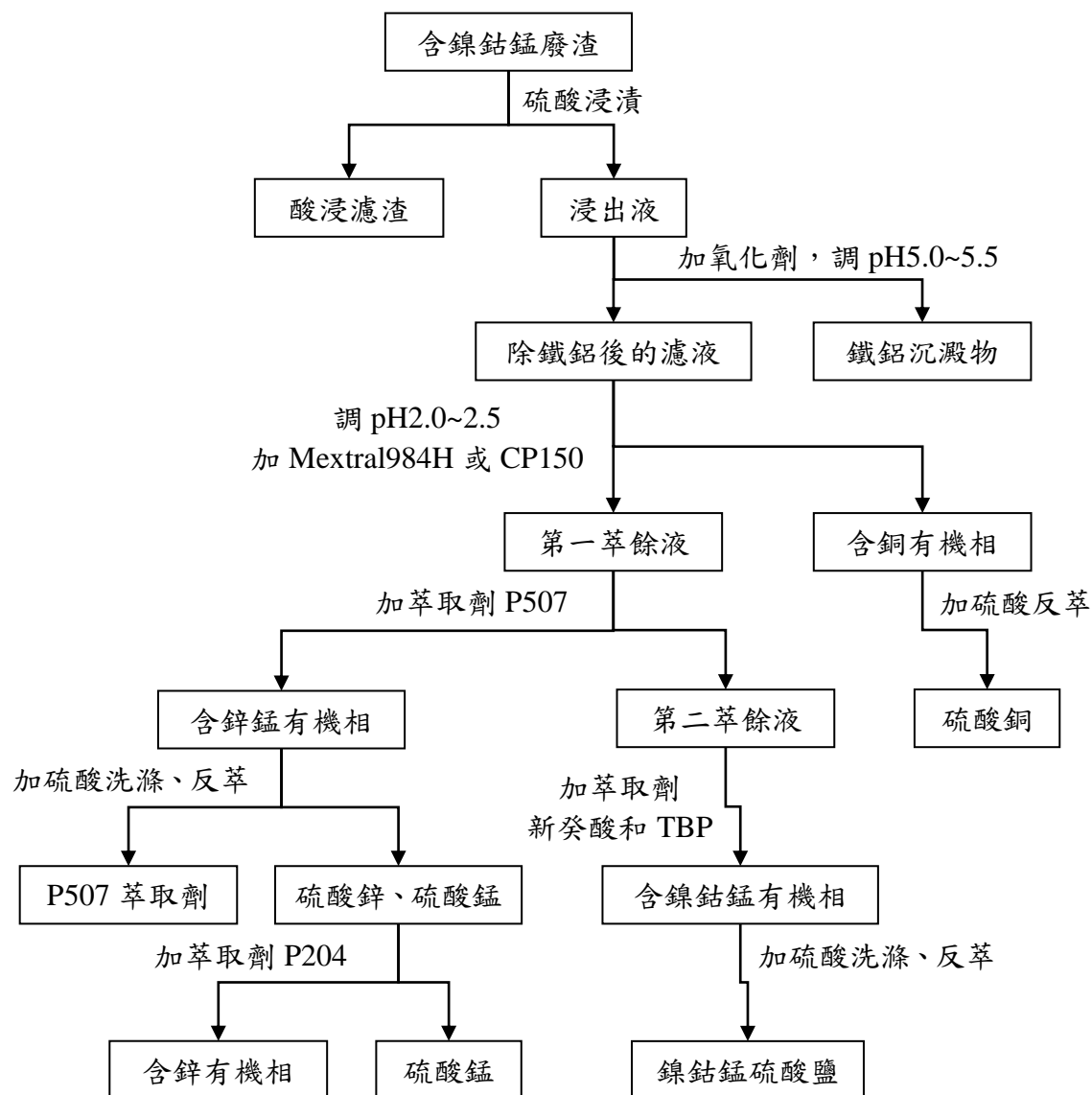
<https://www.acc-emotion.com/stories/automotive-cells-company-inaugurates-its-industrial-center-excellence-nersac-angouleme>

圖 5.2-4 ACC 在法國 Nersac 電池回收服務的試點工廠



## 2.以濕法冶金溶媒萃取從鎳鈷錳廢渣同步回收鎳鈷錳(中國格林美公司)

格林美股份有限公司主要業務為新能源材料製造業務、動力電池回收業務、報廢汽車回收業務、鎳鈷錳資源回收業務與電子廢棄物循環利用業務，其鎳鈷錳資源回收業務在2021年回收鈷資源達4,000噸。格林美採用濕式冶金溶媒萃取法(中國專利申請號201610737450.8)，專利名稱為一種從含鎳鈷錳廢渣中同步回收鎳鈷錳的方法，技術流程如圖5.2-5，說明如下：(1)關鍵物料浸出：將鎳鈷錳廢渣以硫酸浸漬，過濾收集浸出液；(2)除鐵鋁元素：於浸出液中加入氧化劑(如：次氯酸鹽、氯酸鹽、硝酸)，將pH值調整至5.0~5.5，鐵鋁元素沉澱，獲過濾後濾液；(3)萃取銅：調整濾液pH值至2.0~2.5，再加入Mextral984H或CP150與稀釋劑，形成第一有機萃取劑，經萃取得到含銅有機相和第一萃餘液；(4)萃取鋅：取第一萃餘液調整pH值至2.0~2.3，加入皂化的P507和煤油混合形成第二有機萃取劑，經萃取得到含鋅與少量錳有機相和第二萃餘液，將有機相用稀硫酸洗滌，再用硫酸反萃，得到含鋅、錳硫酸鹽，接著以P204進行萃取分離，得到硫酸鋅和硫酸錳；(5)同步萃取鎳鈷錳：調整第二萃餘液pH值至1.7~2.3，加入磷酸三正丁酯(TBP)和皂化的新癸酸與稀釋劑，經逆流萃取得到含鎳鈷錳的有機相，再以稀硫酸進行洗滌，除去鈣鎂雜質，最後用硫酸進行逆流反萃，得到鎳鈷錳的硫酸鹽。該技術降低分別回收鎳鈷錳的分離成本，也降低了製備鎳鈷錳鹽三元電池材料的成本。

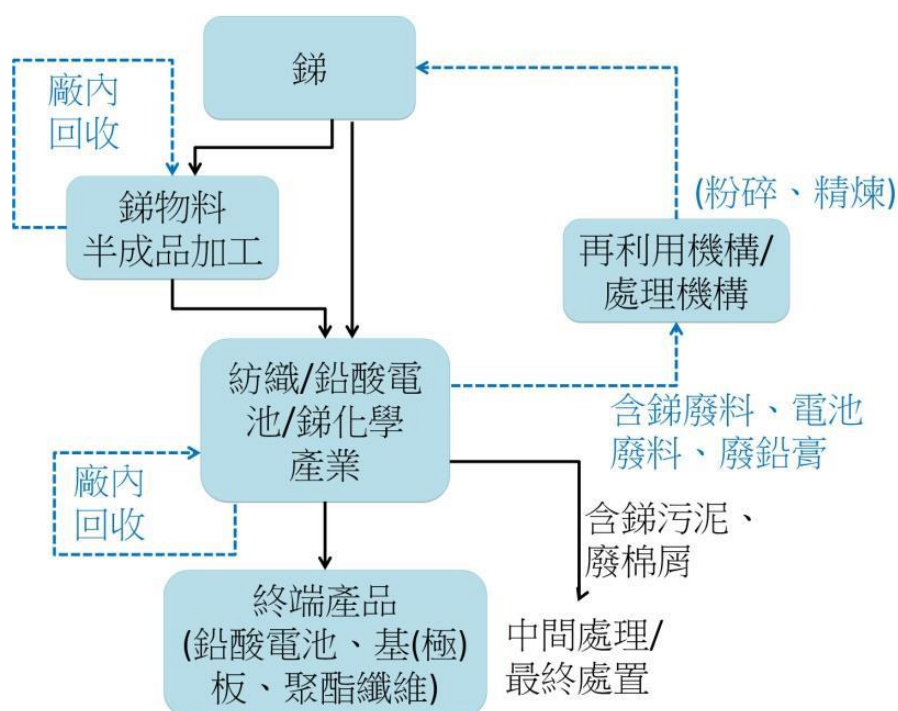


資料來源：一種從含鎳鈷錳廢渣中同步回收鎳鈷錳的方法，專利公開號 106319228A，荊門市格林美新材料有限公司。

圖 5.2-5 格林美公司以溶媒萃取回收鎳鈷錳的方法流程圖

### 5.3 含銻廢料資源化技術案例

以近年銻消費市場統計，30%的銻用於製作合金，可製造電池中的合金材料、滑動軸承和焊接劑，銻銻、鉬銻和鎳銻是良好的半導體，鋁銻可用於太陽能電池材料，34%的銻用於生產阻燃劑，銻化合物是含氯及含溴阻燃劑的重要添加劑，36%則用於陶瓷、玻璃和橡膠等領域，銻物料流布概況如圖 5.3-1，主要回收途徑為產品製造及廢棄物回收，產品製造過程之回收主要從濺鍍靶材經浸漬、萃取與電解回收銻金屬，含銻廢料之回收主要從鉛酸電池中經粉碎、精煉產出鉛銻合金，含銻廢料多為有害事業廢棄物多以焚化或熱處理。



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 5.3-1 銻物料流布概況

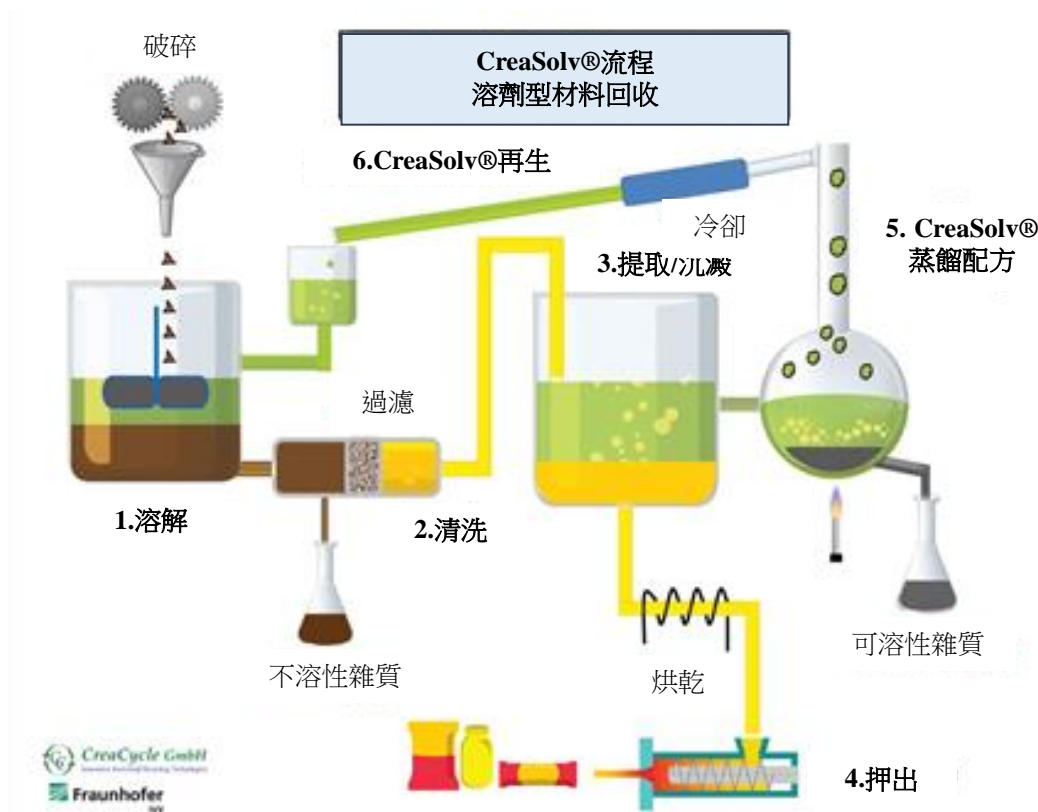
1.以溶劑溶解分離法，得到氧化銻與塑膠顆粒(德國弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所)

弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所應用 CreaSolv®溶劑（CreaSolv®是 CreaCycle, GmbH, Grevenbroich 的註冊商標）可處理含鹵素和 PBDE 的廢塑膠，其是以選擇性溶劑溶解特定聚合物(ABS 和 PS)，再過濾未溶解的顆粒，並通過離心機分離 90%以上的  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ，移除  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  後，溶解的物質經清洗、沉澱與乾燥，ABS 和 PS 溶液與溴化阻燃劑 (BFR)分離，回收獲得 98%以上的聚合物，另溶劑曾經蒸餾、純化、乾燥等步驟回收，回收步驟如表 5.3-1 所示，CreaSolv®流程如圖 5.3-2 所示。

表 5.3-1 CreaSolv®溶劑溶解回收氧化銻與塑膠顆粒步驟說明

步驟順序	步驟項目	步驟說明
1	溶解	廢塑膠按聚合物類型分類後，被切碎並溶解在裝有 CreaSolv® 配方的容器中。目標聚合物和某些雜質溶解。
2	清洗	分離不溶性雜質以產生澄清溶液。不溶性雜質含 90%以上的 $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ，將再進行後續處理或回收。
3	提取/沉澱	藉由改變溶液的溶解性，只有聚合物會沉澱並可以重新獲得。
4	押出	將乾燥的回收聚合物押出成具有與原始材料相似特性的新聚合物顆粒，從而使其可用於原始應用。
5	蒸餾(純化)	收集並蒸餾溶液，以回收 CreaSolv® 配方。如果剩餘的不溶性雜質含有有價值的物質，將再進行後續處理或回收。
6	再生	回收的 CreaSolv® 配方再次用於廢塑膠的溶解。

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



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

**圖 5.3-2 CreaSolv®溶劑溶解回收氧化銻與塑膠顆粒流程**

## 2.以溶媒萃取方式從鹵磷酸鈣螢光粉中回收銻(比利時魯汶大學化學系)

1990 年代以來三波長(紅.藍.綠)螢光粉已在很大程度上取代了 HALO 螢光粉，隨著螢光燈達到使用壽命，近年來已經生產了大量的 HALO 螢光粉廢棄物。HALO 螢光粉的組成如表 5.3-2 所示。

表 5.3-2 HALO 螢光粉的組成以 wt%和 mol%表示

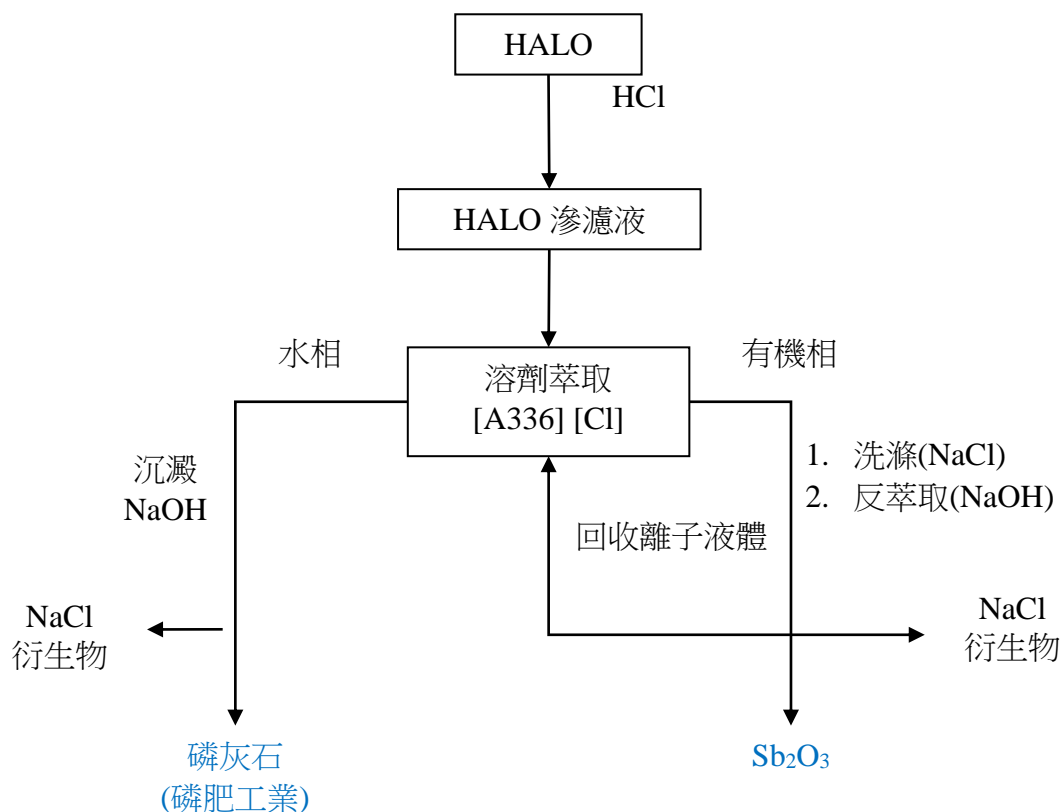
元素	濃度(wt%)	濃度(mol%)
PO <sub>4</sub>	55.71	33.32
Ca	38.06	53.95
F	3.33	9.94
Sb	1.05	0.49
Mn	1.06	1.10
Cl	0.73	1.16
Sr	0.06	0.04
Total	100%	100%

資料來源：David Duponta and Koen Binnemans, Antimony recovery from the halophosphate fraction in lamp phosphor waste: a zero-waste approach, Green Chemistry 雜誌，Issue 1, 2016.

鹵磷酸鈣螢光粉容易在稀酸條件下溶解，首先在室溫下溶解在稀 HCl 中，然後用離子液體 Aliquat® 336 選擇性萃取銻，Aliquat® 336 是鹼性萃取劑，其含氯化物可與銻結合成 SbCl<sub>4</sub>，利用氫氧化鈉水溶液反萃取可得 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 與 NaCl。剩餘的滲濾液作為磷灰石進行增值，磷灰石是磷酸鹽和化肥工業的原料。所得產物是純 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是銻的主要商業應用形式，磷灰石殘渣是磷肥工業的主要原料，該研究建議的回收流程如圖 5.3-3。該回收技術僅消耗 HCl 與 NaOH，衍生物為 NaCl，且離子液體 Aliquat® 336 可重複使用不揮發。另研究提到衍生物 NaCl 可再透過電解，產生該技術需要的物料 HCl 與 NaOH，形成完全閉環的循環過程。研究步驟說明如表 5.3-3。

表 5.3-3 從廢棄鹵磷酸鈣螢光粉中回收銻步驟說明

步驟順序	步驟項目	步驟說明
1	溶解	廢棄鹵磷酸鈣螢光粉以 1M 鹽酸溶解，實驗條件固液比 $25\text{mg.g}^{-1}$ ，溫度 $25^{\circ}\text{C}$ ，以 2000rpm 振盪後，再用離心機分離不溶性固體與滲濾液。
2	溶劑萃取	滲濾液與 Aliquat® 336 放入萃取瓶，在 2000rpm 與溫度 $25^{\circ}\text{C}$ 振搖 30 分鐘，使兩相良好混合。
3	洗滌與反萃取	以 1M 氯化鈉溶液洗滌，可去除 99.9% 以上的鈣、鎂離子，將銻保留在離子液體中。再以氫氧化鈉鹼性水相進行反萃取，銻離子可水解並以 $\text{SbOCl}$ 或 $\text{Sb}_2\text{O}_3$ 形式沉澱。
4	沉澱	萃取後的水相，添加氫氧化鈉調整 pH，再經離心沉澱，可得磷酸鈣沉澱物，可用於磷酸鹽和化肥工業。



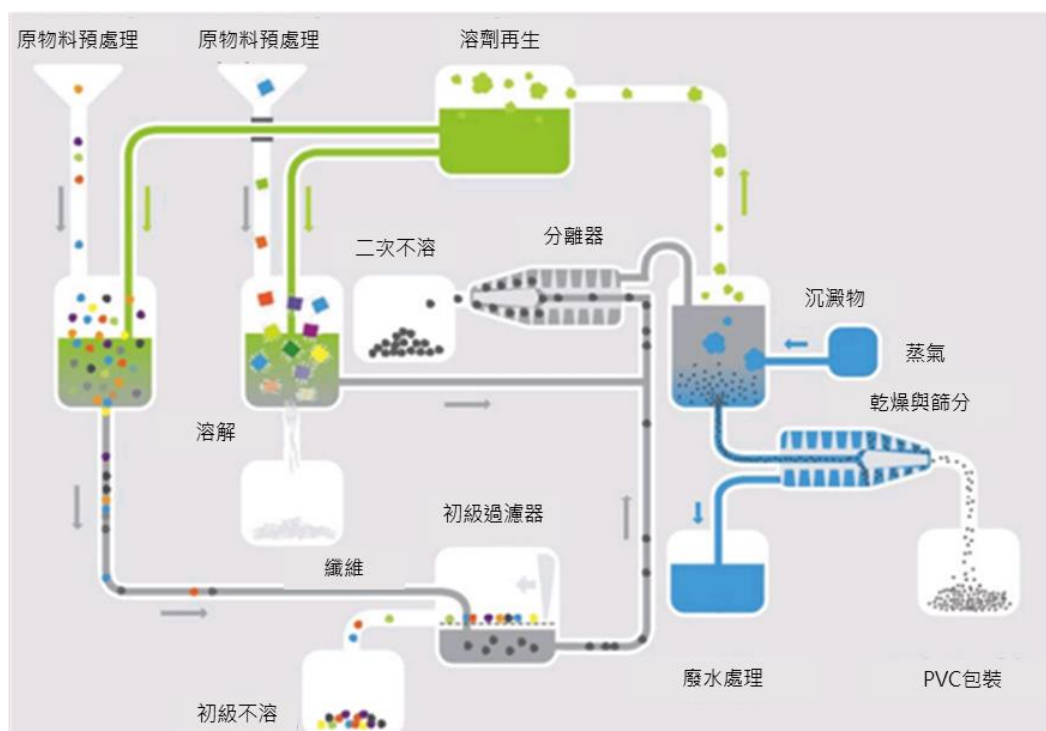
資料來源：David Duponta and Koen Binnemans, Antimony recovery from the halophosphate fraction in lamp phosphor waste: a zero-waste approach, Green Chemistry 雜誌，Issue 1, 2016.

圖 5.3-3 從廢棄鹵磷酸鈣螢光粉中回收銻再生技術流程圖



### 3.從鉛酸電池中提取銻，並轉化為三氧化二銻(比利時坎平公司)

比利時坎平公眾有限公司(Campine Naamloze Vennootschap)主要業務為回收汽車電池中的鉛和生產化學添加劑三氧化二銻，其金屬回收業務在2018年開始從廢棄物中提煉銻(並將產品命名ReGen™)，與PVC混合的含銻廢料可採VinyLoop回收程序，將PVC與其他物質分開，流程如圖5.3-4所示，另有以傳統的火法冶金回收三氧化二銻。Campine公司的新製程可以回收多餘的銻並將其直接轉化為三氧化二銻(ATO)，產品照片如圖5.3-5所示，應用塑料生產供應鏈，預計從廢棄物提取方式可以滿足至少20%銻市場需求，Campine公司在銻回收製程約投資490萬歐元，獲比利時佛蘭德政府100萬歐元補助，是目前世界上唯一一家將鉛和銻的回收利用與三氧化二銻生產相結合的公司。金屬回收業務在2020年銷售6.26萬噸，銻和塑料業務銷售13,350噸。



資料來源：1st Stakeholder Consultation, Questionnaire for diantimony trioxide, Responses submitted by Campine, June 2018.

圖 5.3-4 以 Vinyloop 程序在分離器(傾析器)中回收 ATO 與 PVC 顆粒



資料來源：Campine Naamloze Vennootschap 官網，

<https://www.campine.com/en/specialty-chemicals/flame-retardant-solutions/>

圖 5.3-5 Campine 生產三氧化二銻阻燃母粒產品

## 5.4 關鍵物料(矽鈷銻)純化及資源循環技術評析彙整

本章節所蒐集彙整之國外矽、鈷、銻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(矽、鈷、銻)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
熱裂解技術	從太陽能模組回收矽	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 太陽能板經熱裂解處理裝置去除 EVA，熱裂解後產出矽片、玻璃與金屬粉。</li> <li>2. EVA 熱裂解為分解氣體供燃燒熱能使用。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 無衍生溶劑與化學藥劑廢棄物。</li> <li>2. 可取得較高比例有價物質。</li> <li>3. 需具一定規模廢棄量，才有處理效益。</li> </ol>	日本新菱之子公司 Recycle Tech 公司	9 (已商業化)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 新菱株式會社公司網站 <a href="https://ce3r.shinryo-gr.com/recycle-tech">https://ce3r.shinryo-gr.com/recycle-tech</a></li> <li>2. 日本太陽能光電模組回收技術解析，工業材料雜誌 381 期，2018 年 9 月。</li> </ol>
物理處理分離雜質技術	RECOSIC® 技術從廢碳化矽回收生產高純度碳化矽	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 碳化矽先在真空或微氧環境中熱處理再冷卻到室溫。</li> <li>2. 以脈衝、研磨、渦流或超音波等機械方法處理。</li> <li>3. 以物理方式分離碳化矽，如篩分或旋風分選、浮選與旋流，通過電場，可得純度 98% 以上的碳化矽。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可得高純度 98% 碳化矽材料。</li> <li>2. 較傳統 ACHESON 製程減少 80% 溫室氣體排放。</li> <li>3. 廢碳化矽含量需 50% 以上，才具處理效益。</li> </ol>	德國 Esk Sic 公司	9 (2023 年商業化)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 德國專利商標檔案號 10 2020 102 512.2</li> </ol>
水熱合成技術	從廢矽片合成奈米級氧化矽粒子	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 廢矽晶片置於氨水溶液，利用高壓釜並升溫 297.15K 到 453.15K，增壓時間 2-96 小時後，冷卻到室溫。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 無需使用有毒物質。</li> <li>2. 可得 8-50 奈米級氧化矽。</li> </ol>	俄羅斯	2020 實驗研究	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Environmentally Friendly Method of Silicon Recycling: Synthesis of Silica Nanoparticles in an Aqueous Solution, ACS Sustainable Chemistry &amp; Engineering.</li> </ol>

表 5.4-1 關鍵物料(矽、鈷、鎘)資源循環技術彙整(續)

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
火法冶金技術及濕法冶金技術組合	UHT 技術 (Ultra High Temperature Technology)	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。 2.增設電池回收，採自動化優先回收。	1.鈷、鎳和銅的提取效率，超過 95%。 2.可再利用於生產新電池的正極材料。 3.需挹注大量資金，投資 1 億歐元，並得到地方和國家當局以及 FEDER 基金的支持。	1.比利時優美科公司 2.Automotive Cells Company	9 (已試點商轉)	1.優美科公司公司網站 <a href="https://eom.umicore.com/en/germanium-solutions/services/recycling-services/">https://eom.umicore.com/en/germanium-solutions/services/recycling-services/</a> 2. Automotive Cells Company 官網， <a href="https://www.acc-emotion.com/stories/">https://www.acc-emotion.com/stories/</a>
溶媒萃取技術	從鎳鈷錳廢料回收鎳鈷錳	將鎳鈷錳廢料先以硫酸浸漬，再進行 pH 值調整與多段萃取，得到鎳鈷錳硫酸鹽(三元電池材料)。	1.降低分別回收鎳鈷錳的分離成本。 2.降低了製備三元電池材料的成本。 3.需挹注大量資金，格林美新材料有限公司資本額 68.95 億元人民幣。	中國格林美股份有限公司	9 (已商轉)	荊門市格林美新材料有限公司，專利申請公開號 CN106319228A。
溶劑分離提取技術	從含鎘塑料回收三氧化二鎘	以 CreaSolv®溶劑溶解特定聚合物(ABS 和 PS)，再過濾未溶解的顆粒，並通過離心機分離 90%以上的 $Sb_2O_3$ ，溶解的物質經清洗、沉澱與乾燥，ABS 和 PS 溶液與溴化阻燃劑 (BFR)分離，回收獲得 98%以上的聚合物。	1.可得 90%三氧化二鎘與 98%ABS 和 PS 顆粒。	1. 弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所 2. CreaCycle GmbH	2	1.弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所， <a href="http://www.ivv.fraunhofer.de/">www.ivv.fraunhofer.de/</a> 。 2.CreaCycle GmbH 公司網站 <a href="https://www.creacycle.de/en/the-process.html">https://www.creacycle.de/en/the-process.html</a>

表 5.4-1 關鍵物料(矽、鈷、銻)資源循環技術彙整(續)

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
溶媒萃取技術	從含銻廢塑料回收再製 ATO	VinyLoop 回收程序，第一階段使用特定溶劑在閉環中溶解 PVC 廢料，第二階段通過過濾、離心和傾析，分離含銻物料與 PVC，第三階段注入蒸氣以蒸發溶劑使 PVC 沉澱並回收溶劑。	1.可得含銻物料與 PVC 顆粒。 2.新製程製備高純度三氧化二銻 (ATO)。 3.在既有回收汽車電池的金屬回收業務中，新增再製 ATO 製程，才具處理效益。	比利時 Campine	9 (已商轉)	campine Naamloze Vennootschap 官網 <a href="https://www.campine.com/en/specialty-chemicals/flame-retardant-solutions/">https://www.campine.com/en/specialty-chemicals/flame-retardant-solutions/</a>
溶媒萃取技術	從鹵磷酸鈣螢光粉中回收銻	以 HCl 溶解鹵磷酸鈣螢光粉，使用 Aliquat® 336 萃取，再 NaOH 水溶液反萃取得 Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 與 NaCl	1.產物為 Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 與磷灰石 2.僅消耗 HCl 與 NaOH，衍生物為 NaCl，且離子液體 Aliquat® 336 可重複使用	比利時魯汶大學化學系	2	David Duponta and Koen Binnemans, Antimony recovery from the halophosphate fraction in lamp phosphor waste: a zero-waste approach ,Green Chemistry 雜誌，Issue 1, 2016.

## 六、結語

本評估報告針對爐渣高值化及資源循環技術、廢風機葉片回收及資源循環技術、關鍵物料(矽鈷鎢)回收及資源循環技術進行評析，相關評析結果彙整如下：

### 1. 爐渣高值化及資源循環技術包括如下：

- (1)有價物質回收：硫酸浸提法回收金屬(德國 Stein Injection)，其特點獲得金屬與再生石灰，可回用於鋼鐵工業。
- (2)安定化：還原渣資源化技術(日本愛知製鋼株式會社)，以熔融狀態直接回送電弧爐中，節省石灰添加的數量。
- (3)改質：A.轉爐渣前端安定化處理-熱爐渣改質法(德國 ThyssenKrupp AG)、B.轉爐石安定化處理技術-蒸汽養生法(日本住友金屬工業公司)，經改質後的轉爐石如遇水可達到安定化。
- (4)創新固碳技術：A.爐渣推動藻場再生擴大二氧化碳削減技術(日本製鐵株式會社)、二氧化碳的碳酸鹽固定技術(日本 JEF 鋼鐵公司)、海洋生物質海藻的多角化製鐵利用技術(日本日鐵化學材料公司)。其共通性的特點均將爐渣應用於海洋或製成穩定化合物碳酸鹽類，作為海洋復育碳中和原料。
- (5)肥料應用：應用於水稻種植及早作牧場(日本爐石協會)，可作為土壤改質劑。

### 2. 廢風機葉片回收及資源循環技術包括如下：

- (1)機械處理技術：A.水泥窯共同處理法(GE 可再生能源公司&Veolia)；  
B. FRP 廢料再資源化技術(日本富士田商事株式會社)。其技術共同優勢



是技術成熟，可 100% 進行回收，並將物料提供水泥廠進行原物料替代添加，降低天然物料使用。

(2)熱處理技術：A.熱裂解回收技術(FibreEUse 計畫、英國 ELG Carbon Fibre)；B.R3Fiber 回收技術(西班牙 BCIRCULAR 公司)；C.過熱蒸汽處理技術。其技術係經高溫裂解後可回收玻璃纖維或碳纖維與能量回收，可降低生產成本。

(3)化學處理技術：A.溶劑分解法(CETEC 計畫、SiemensGamesa)，其最大優勢為將回收後之樹脂及纖維，再回製程製成風機葉片。

(4)其他創新技術技術：A. DecomBlades 計畫(SGRE 與 Vestas、LM Wind Power、沃旭等單位)；B.斑馬計畫(ZEBRA)(LM、Arkema 等單位)，主要針對葉片製程優化、研發熱塑性樹脂等方向研究，以製造 100% 可回收之風機葉片。

### 3.關鍵物料(矽鈹鎢)回收及資源循環技術包括如下：

(1)熱裂解技術：從太陽能模組回收矽(日本新菱子公司 Recycle Tech)，其技術已達商業化規模。

(2)物理處理分離雜質技術：RECOSIC©技術從廢碳化矽回收生產高純度碳化矽(德國 Esk Sic 公司)，其技術預計於 2023 年商業化。

(3)水熱合成技術：從廢矽片合成奈米級氧化矽粒子(俄羅斯)，尚在實驗室研究階段。

(4)火法冶金技術及濕法冶金技術組合：UHT 技術(比利時優美科公司、Automotive Cells Company)，其共通點為已商業化技術。

(5)溶媒萃取技術：A.從鎳鈷錳廢料回收鎳鈷錳(中國格林美股份有限公司)；B.從含錫廢塑料回收再製 ATO(比利時 Campine)；C.從鹵磷酸鈣螢



光粉中回收銻(比利時魯汶大學化學系)。目前除中國格林美技術係已商業化外，其餘兩項均仍在研發中。

(6)溶劑分離提取技術：從含銻廢塑料回收三氧化二銻(弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所、CreaCycle GmbH)，可回收 90% 三氧化二銻與 98%ABS 和 PS 顆粒。

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. Impact Report 2020, Tesla, Inc., 2021.8.
2. Thomas Telsnig , Mapping and analysis of current circular economy approaches in the windenergy sector,2022.02.
3. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,2020
4. ETIPWind Advisory Group,2020.
5. State-of-the-art review of product stewardship strategies for large
6. composite wind turbine blades, Resources, Conservation & Recycling Advances,2022.
7. Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes, 2021.
8. <https://wteinternational.com/news/ge-and-veolia-team-up-to-provide-wind-turbine-blade-recycling/>
9. <http://www.fibereuse.eu/index.php/detail/for-thermal-recycling>
10. Recycled Carbon Fibre: A New Approach to Cost Effective Lightweighting
11. Thomas Telsnig , Mapping and analysis of current circular economy approaches in the windenergy sector,2022.02.
12. Environmentally Friendly Method of Silicon Recycling: Synthesis of Silica Nanoparticles in an Aqueous Solution, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Sep 1, 2020.
13. Automotive Cells Company 官網,

- <https://www.acc-emotion.com/stories/automotive-cells-company-inaugurates-its-industrial-center-excellence-nersac-angouleme>.
- 14.Esk Sic 官網，<https://www.esk-sic.de/en/#start>.
- 15.CreaCycle GmbH 網站，<https://www.creacycle.de/en/the-process.html>。
- 16.David Duponta and Koen Binnemans, Antimony recovery from the halophosphate fraction in lamp phosphor waste: a zero-waste approach, Green Chemistry 雜誌，Issue 1, 2016.
- 17.1st Stakeholder Consultation, Questionnaire for diantimony trioxide, Responses submitted by Campine, June 2018.
- 18.Campine Naamloze Vennootschap 官網，  
<https://www.campine.com/en/specialty-chemicals/flame-retardant-solutions/>
- 19.循環台灣基金會網站，<https://circular-taiwan.org/>
- 20.產業價值鏈資訊平台，<https://ic.tpex.org.tw/>
- 21.電爐還原渣高壓蒸釜安定化技術循環經濟案例，鋼爐渣循環經濟技術交流媒合會簡報，2022 年 9 月。
- 22.半導體產業之廢酸動靜脈整合分析、臺灣風機葉片複合材料動靜脈整合分析之期末成果報告簡報，2021 年 12 月。
- 23.上緯公司網站，<https://www.swancor.com/>
- 24.「矽-關鍵物料調查報告」行政院環境保護署，2017 年 12 月。
- 25.「鈷-關鍵物料調查報告」行政院環境保護署，2017 年 12 月。
- 26.「銻-關鍵物料調查報告」行政院環境保護署，2017 年 12 月。
- 27.行政院環保署資源再利用管理系統，<https://rms.epa.gov.tw/RMS/>。

- 28.行政院環保署事業廢棄物申報及管理資訊系統，  
<https://waste.epa.gov.tw/RWD/>。
- 29.光宇應材官方網站，<https://www.semisils.com/>。
- 30.美琪瑪國際股份有限公司，2019 年企業社會責任報告書，2020 年 6 月。
- 31.循環經濟概念與規劃原則經驗分享，廢棄物零廢中心規劃與資源再生(利用)技術探討宣導說明會，2022 年 6 月 23 日。
- 32.經濟部工業局，110 年資源再生產業推動及審查管理計畫。
- 33.環保署各事業廢棄物代碼申報流向統計年報，  
<https://waste.epa.gov.tw/RWD>。
- 34.金屬煉製產業爐渣材料多元應用發展，材料世界網，2020 年 12 月。
- 35.鋼鐵副產物之循環經濟前景，工業材料雜誌 420 期，2021 年 12 月。
- 36.日本愛知製鋼官網，<https://www.aichi-steel.co.jp/>
- 37.鋼鐵煉製廢渣－轉爐石之高值化應用與機會，工業材料雜誌 393 期，2019 年 9 月。
- 38.日本製鐵產品介紹，  
[https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/L005.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/L005.pdf)
- 39.日本製鐵藍碳介紹，  
[https://www.nipponsteel.com/company/publications/quarterly-nssmc/pdf/2018\\_24\\_01.pdf](https://www.nipponsteel.com/company/publications/quarterly-nssmc/pdf/2018_24_01.pdf)
- 40.JFE Steel 公司網站，  
<https://www.jfe-steel.co.jp/en/release/2022/220620-2.html>
- 41.nipponsteel 公司網站，

<https://www.nscm.nipponsteel.com/news/pdf/210525.pdf>

42. 日本爐石協會網站，<https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>
43. 離岸風力機的雙臂－葉片技術簡述，能源資訊平台。
44. 複材產業淨零技術的今生與來世，工業材料雜誌 425 期，2022 年 5 月。
45. 臺灣風機葉片複合材料動靜脈整合分析，工研院簡報，2021 年 11 月。
46. 複合材料廢棄物是千年不爛的垃圾？還是有用的資源？，工業材料雜誌，2018 年 2 月。
47. 陳靜樺，風力機葉片回收發展動態研析，2021 年 11 月。
48. 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。
49. 鋰離子電池高值化循環利用技術，張添晉、洪毅翔，環境工程會刊 107 年第 4 期。
50. 循環經濟下，淺談沸石合成技術，蔡振章，工業材料雜誌 4221 期，2022 年 1 月。
51. 弗勞恩霍夫工藝技術和包裝研究所網站，[www.ivv.fraunhofer.de/](http://www.ivv.fraunhofer.de/)。
52. 新菱株式會社，工業材料雜誌 381 期，2018 年 9 月。
53. 一種從含鎳鈷錳廢渣中同步回收鎳鈷錳的方法，專利公開號 106319228A，荊門市格林美新材料有限公司。