

經濟部工業局 108 年度
產業循環經濟整合推動計畫

國外資源循環經濟
關鍵技術及設備評估報告

中華民國 108 年 10 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.....	14
2.3 面臨問題及未來發展方向.....	19
三、廢溶劑提濃純化及資源循環技術案例.....	27
3.1 多效蒸餾純化技術案例.....	27
3.2 機械式蒸氣再壓縮技術案例.....	33
3.3 廢溶劑蒸餾回收裝置案例.....	38
3.4 滲透蒸發和滲透氣化技術案例.....	42
3.5 超臨界水氧化技術案例.....	49
3.6 有機廢棄物碳化資源回收處理技術案例.....	52
3.7 電漿能資源回收處理技術案例.....	57
3.8 廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術評析彙整.....	59
四、含銅廢棄物高值化及資源循環技術案例.....	61
4.1 電解精煉法技術案例.....	61
4.2 熔煉法技術案例.....	66
4.3 直接冶煉法技術案例.....	68
4.4 生物技術回收金屬技術案例.....	79
4.5 含銅廢棄物高值化及資源循環技術評析彙整.....	79
五、稀有金屬廢料(如銻、鉍、鈮、銻..等)高值化及資源循環技術案例.....	82
5.1 火法冶金資源化技術案例.....	82
5.2 濕法冶金資源化技術案例.....	86
5.3 乾濕式回收技術案例.....	99
5.4 稀有金屬廢料(如銻、鉍、鈮、銻..等)高值化及資源循環技術評析彙整.....	101
六、結語.....	104
參考文獻.....	106

圖 目 錄

圖 1.1-1 循環經濟系統圖	2
圖 2.1-1 半導體產業鏈結構圖	7
圖 2.1-2 平面顯示器產業鏈結構圖	9
圖 2.1-3 觸控面板產業鏈結構圖	10
圖 2.1-4 太陽能產業鏈結構圖	11
圖 2.1-5 印刷電路板產業鏈結構圖	11
圖 2.1-6 金屬表面處理產業鏈結構圖	13
圖 2.1-7 石化及塑橡膠製造業鏈結構圖	14
圖 2.2-1 利百景環保科技公司製造流程圖	16
圖 2.2-2 昶昕實業公司製造流程圖	17
圖 2.2-3 光洋應材公司製造流程圖	19
圖 2.3-1 107 年許可再利用之各類工業廢棄物再利用情形	20
圖 2.3-2 107 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形.....	21
圖 3.1-1 單塔改為操作壓力不同之雙塔並聯操作示意圖	27
圖 3.1-2 瑞典商阿法拉伐公司多效蒸餾技術應用實例(瑞典 Akzo Nobel).....	29
圖 3.1-3 以色列 IDE 公司多效蒸餾技術應用實例(中國天津).....	30
圖 3.1-4 台化公司乙苯循環塔(C202)原本設計流程.....	31
圖 3.1-5 美國 Badger 公司多效蒸餾技術應用實例(台化海豐廠).....	32
圖 3.2-1 機械式蒸汽再壓縮系統運作流程示意圖	33
圖 3.2-2 單效再壓縮蒸發器的簡化流程示意圖	34
圖 3.2-3 加拿大 Whiting 公司機械式蒸汽再壓縮技術實廠圖片	35
圖 3.2-4 德國 GEA 公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實廠圖片	36
圖 3.3-1 日本瑞環株式會社 SOLPICO 設備圖片.....	38
圖 3.3-2 日本瑞環株式會社 SOLPICO 設備應用之實廠案例.....	39
圖 3.3-3 日本瑞環株式會社 ECOTRAP 設備圖片	40
圖 3.3-4 日本瑞環株式會社 ECOTRAP 設備應用實廠案例.....	41
圖 3.4-1 德國 GKSS 公司高性能蒸氣滲透有機膜之應用流程實例	45
圖 3.4-2 薄膜滲透蒸發技術應用案例	46
圖 3.4-3 中國江蘇久吾高科技公司的膜分離成套設備系統實例	48
圖 3.5-1 超臨界水氧化機制	49

圖 3.5-2 超臨界水氧化技術的應用途徑	49
圖 3.5-3 中國未來化學科技公司超臨界水氧化反應器	51
圖 3.6-1 200~500°C 之碳化程序	52
圖 3.6-2 TPS 公司 IGCC 程序整體流程圖	53
圖 3.6-3 裂解和氣化之相關產品圖	54
圖 3.6-4 日本巴工業株式會社碳化爐設備	55
圖 3.6-5 乾燥碳化流程	56
圖 3.7-1 PEAT International 電漿熱能廢棄物轉化能源系統	58
圖 4.1-1 傳統電解與 emew 技術示意圖	62
圖 4.1-2 emewPlate 產品設計圖示	63
圖 4.1-3 emewClean 複合技術組合示意圖	64
圖 4.1-4 應用 EMEW 電解精煉技術得到銅產品	65
圖 4.2-1 DOWA ECO SYSTEM 以冶金技術回收不同的金屬元素	67
圖 4.2-2 ECO SYSTEM KOSAKA 金屬和蒸汽回收處理流程	67
圖 4.3-1 日本三菱綜合材料直島製煉所	68
圖 4.3-2 日本三菱綜合材料連續冶煉銅技術流程	69
圖 4.3-3 Aurubis 採用 KRS 流程圖	70
圖 4.3-4 Metallo 廢棄物再生循環製程	72
圖 4.3-5 TBRC 爐的工作原理	73
圖 4.3-6 卡爾多爐富氧吹煉方法	75
圖 4.3-7 典型的 TSL 爐	77
圖 4.3-8 大陸銅陵金昌製程流程示意圖	78
圖 4.4-1 生物回收膠囊(吸附金屬前後對照圖)	79
圖 5.1-1 Umicore 廠區圖	83
圖 5.1-2 Umicore 技術流程圖	84
圖 5.1-3 DOWA 回收爐	85
圖 5.2-1 環保電解剝金技術流程圖	89
圖 5.2-2 LCD 玻璃上 ITO 回收流程圖	91
圖 5.2-3 粗鈹合金有價金屬回收流程圖	92
圖 5.2-4 高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹流程圖	93
圖 5.2-5 DOWA 濕式處理流程	94
圖 5.2-6 DOWA 貴金屬回收流程示意圖	95

圖 5.2-7 TANAKA 貴金屬回收分類示意圖	96
圖 5.2-8 TANAKA 貴金屬回收流程圖	96
圖 5.2-9 TANAKA 貴金屬回收裝置	97
圖 5.2-10 TANAKA 貴金屬回收裝置適用範圍	97
圖 5.2-11 日礦金屬鹽酸浸出現場作業圖	98
圖 5.3-1 日本住友金屬新開發製程流程圖	100
圖 5.3-2 日本住友金屬冶煉試驗工廠照片	101

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率及產生量(廢溶劑).....	22
表 2.3-2 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(含銅廢棄物).....	23
表 2.3-3 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(稀有金屬廢料).....	24
表 3.3-1 SOLPICO 可處理之溶劑類別.....	39
表 3.8-1 廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術評析.....	59
表 4.5-1 廢電子廢棄物-含銅廢棄物高值化及資源循環技術評析.....	80
表 5.4-1 稀有金屬廢料資源循環技術彙整	102

一、前言

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

本評估報告針對廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術、含銅廢棄物高值化資源循環技術及稀有金屬廢料(如銦、鈹、鈮、鉍...等)高值化資源循環技術進行技術及設備評估。期協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值，藉由國外關鍵循環經濟技術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。

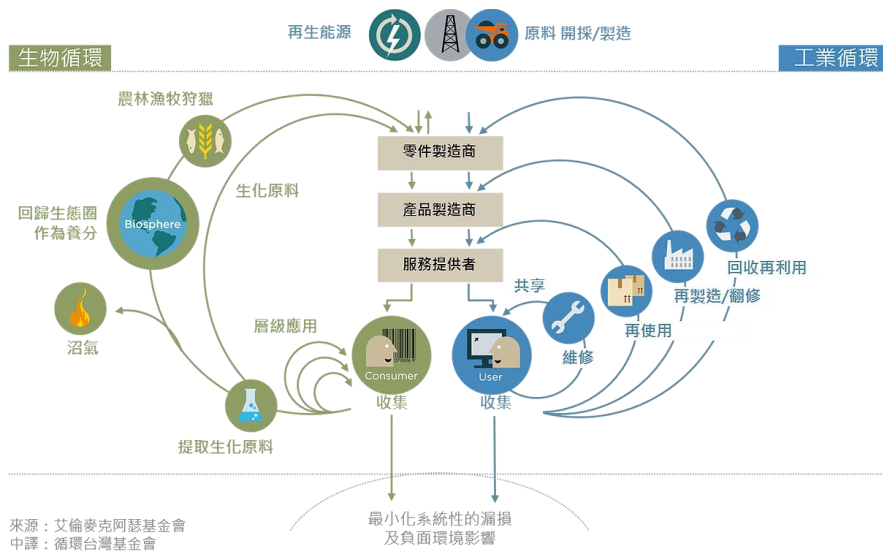
1.1 循環經濟的定義

「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做為養分。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有一定規模，由早期廢棄物管制逐步進展到產源管理，並採用使用者付費制度，推動垃圾減量、資源回收及生產者延伸責任，創造廢棄物再利用比率超過 80% 以上之成功經驗；但近年來在市場自由競爭及國內產業外移之情勢下，面臨物料來源供應不足之問題，造成部分業者產能萎縮之情形。

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

此外，資源循環產業囿於國內市場規模，反觀鄰近亞太地區新興國家

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

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

二、產業特性與發展趨勢

資源回收首要考量為經濟性，而經濟性考量可從資源廢棄物本身所含的有價物質與量，與資源化產品的市場價格兩方面來評估。就廢棄物所含的有價物質與量而言，隨著產業製程技術的進步或更新，所產生的廢棄物中所含有價物質相對地減少或替換，使得可資源回收廢棄物價值與經濟性亦隨之變動。如以往印刷電路板上所使用的貴金屬材料已有逐漸下降的趨勢；另外，如光電業衍生新興廢棄物中稀有金屬或特殊化學品，可資源回收價值也受到良性影響。一般而言，資源廢棄物回收後大部分成為替代原料，而替代原料的價格往往較易受到市場影響，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及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 108 年 4 月 29 日召開專家諮詢審查會議結論，篩選出廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術、含銅廢棄物高值化資源循環技術及稀有金屬廢料(如銻、鉍、鈮、銻...等)高值化資源循環技術等三項，作為本評估報告分析的依據。

2.1 產業簡介及主要製程特性

有關廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術、含銅廢棄物高值化資源循環技術及稀有金屬廢料(如銻、鉍、鈮、銻...等)高值化資源循環技術等三項技術中的廢棄物包括廢溶劑、含銅廢棄物及稀有金屬廢料(如銻、鉍、鈮、銻...等)之來源以電子、金屬表面處理產業、石化及塑橡膠產

業為大宗，且我國政府過去在電子、金屬表面處理產業、石化及塑橡膠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：

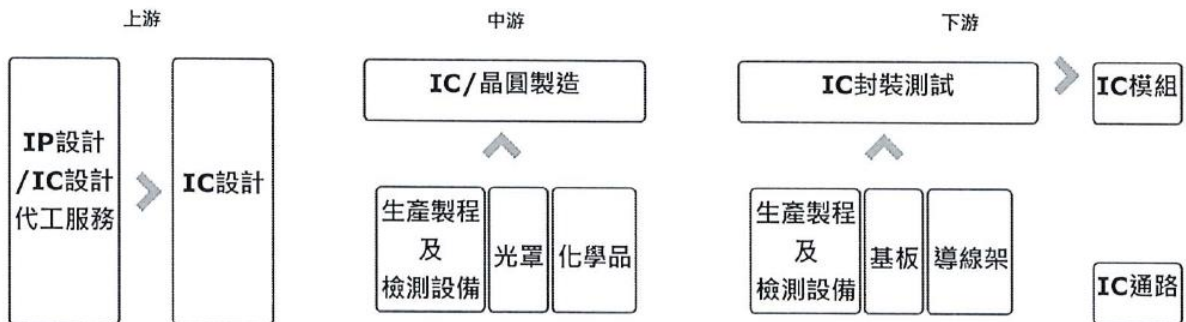
表 2.1-1 廢棄物來源之產業發展現況

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
廢電子化學品 -廢溶劑、含銅廢棄物、稀有金屬廢料(如鈾、鈹、鈾、鈳...等)	半導體業	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 範圍：晶圓材料、IC 設計、IC 製造、光罩製造；IC 封裝及測試等，廠商家數約 260 家。 ▪ 2017 年產值逾 1 兆元。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 產生大量有機廢液(包含廢光阻液、異丙醇等)，逾 1,000 公噸/月。 ▪ 產生大量酸性廢液。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 廢液貴金屬回收 ▪ 非有害污泥通案再利用 ▪ 異丙醇純化再利用
	電腦週邊設備製造業	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 範圍：筆記型電腦、桌上型電腦、主機板、CRT 螢幕、TFT-LCD 螢幕等。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 產生大量有機廢液(包含廢光阻液、異丙醇等)。 ▪ 產生大量無法回收之複合材料(如廢塑膠、廢電木等)。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 異丙醇純化再利用 ▪ 有價貴金屬回收 ▪ 二手翻新維修服務
	光電產業	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 範圍：太陽能、其它再生能源設備、LED 等。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 產生大量有機廢液(包含廢光阻液、異丙醇等)。 ▪ 廢棄太陽能模組國內尚無回收再利用之技術。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 廢液貴金屬回收 ▪ 非有害污泥通案再利用 ▪ 異丙醇純化再利用
廢電子化學品 -廢溶劑、含銅廢棄物	印刷電路板製造業	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 範圍：印刷電路板，廠商家數約 260 家。 ▪ 2017 年產值逾 2,000 億元。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 大量固體廢料需境外處理。 ▪ 產生大量含銅污泥、酸性廢液、光阻劑、顯影液等廢棄物。 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 邊料貴金屬回收 ▪ 蝕刻銅廢液回收
含銅廢棄物、稀有金屬廢料(如鈾、鈹、鈾、鈳...等)	金屬表面處理業	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 範圍：導線架、電子零組件電鍍及裝飾品電鍍 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 產生大量含銅污泥、電鍍污泥、酸性及電鍍廢液等廢棄物 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 廢液貴金屬回收
稀有金屬廢料(如鈾、鈹、鈾、鈳...等)	石化及塑橡膠製造業	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 範圍：石化業製程用之觸媒及離子交換樹脂 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 含貴金屬(金、銀、鈾、鉑、鈹、鈳、鉻、鈉)之觸媒及離子交換樹脂，未進行回收 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 一般沸石觸媒再利用於製磚或 CLSM

資料來源：本計畫彙整。

1. 半導體業：

半導體產業鏈上游為 IP 設計及 IC 設計業，中游為 IC 製造、晶圓製造、相關生產製程檢測設備、光罩、化學品等業，下游為 IC 封裝測試、相關生產製程檢測設備、零組件（如基板、導線架）、IC 模組、IC 通路等業。台灣擁有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垂直整合模廠(Integrated Design and Manufacture, IDM)（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。其半導體產業鏈結構如圖 2.1-1 所示。



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

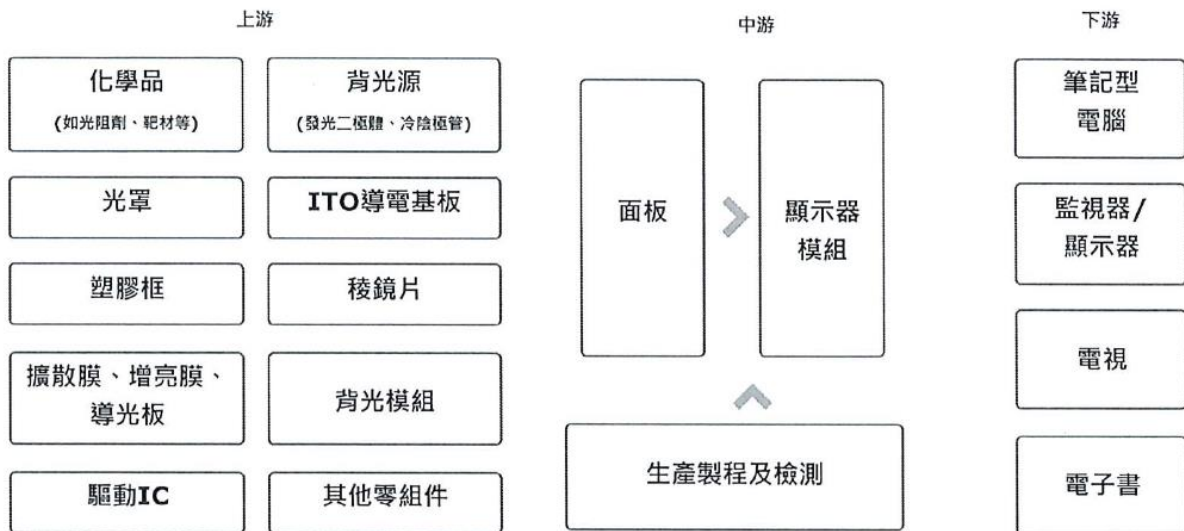
圖 2.1-1 半導體產業鏈結構圖

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

烷、三氯甲烷、三氯乙烷、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑...)、蝕刻液、廢靶材、電子廢料、電鍍廢液(鎳、錫鉛、銀、金...)、錫鉛渣、廢離子交換樹脂等。

2.平面顯示器產業

我國平面顯示器產業之發展主流顯示技術為薄膜電晶體液晶顯示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)。液晶顯示器產業鏈之上游包括化學品材料、背光源、光罩、ITO 導電基板、塑膠框、稜鏡片、擴散膜、增亮膜、導光板、背光模組、及驅動 IC 等零組件之供應商；中游則為液晶面板、顯示器模組組裝及相關生產製程與檢測設備之供應商；下游為平面顯示器各類應用產品如筆記型電腦、液晶監視器與液晶電視、智慧型手機等供應商。其平面顯示器產業鏈結構如圖 2.1-2 所示。主要廢棄物有廢酸鹼(硝酸、硫酸、氫氟酸...)、廢溶劑(IPA、三氯甲烷、丙酮、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑...)、蝕刻液、廢靶材(含鈹廢料)、電子廢料、電鍍廢液(鎳、錫鉛、銀、金...)、錫鉛渣、廢離子交換樹脂等等。

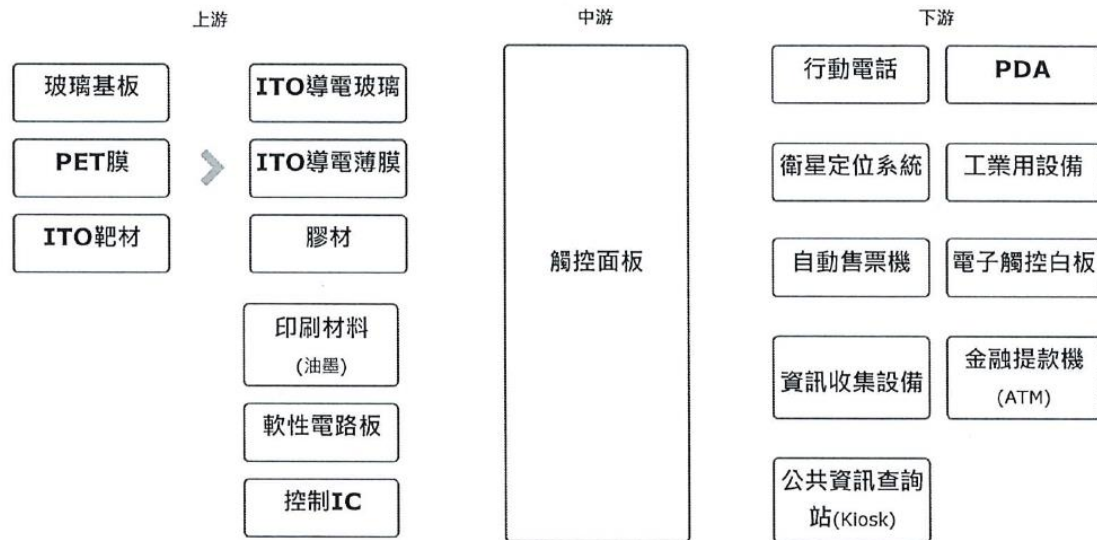


資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-2 平面顯示器產業鏈結構圖

3.觸控面板產業

觸控面板技術相當多元，依感應方式不同，可區分為電阻式、投射式電容、表面式電容、表面聲波式、紅外線式及光學式等，隨著 Apple 行動終端採用電容式觸控後，投射式電容觸控技術已廣泛被應用在智慧型手機及平板電腦，本文所述之觸控面板產業鏈以投射式電容觸控技術為主。其觸控面板產業鏈結構如圖 2.1-3 所示。主要廢棄物有廢酸鹼液(硝酸、硫酸、氫氟酸...)、廢溶劑(IPA、三氯甲烷、丙酮、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑...)、蝕刻液、廢靶材(含鈹廢料)、電子廢料、電鍍廢液(鎳、錫鉛、銀、金...)、錫鉛渣、廢離子交換樹脂等...等。



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

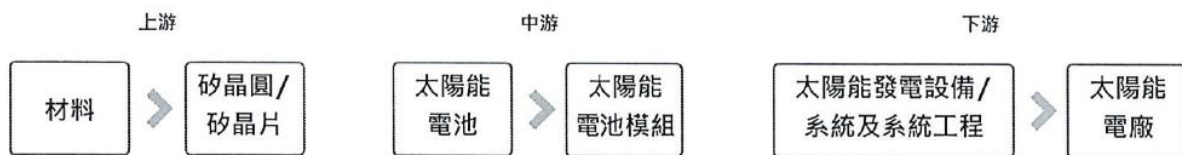
圖 2.1-3 觸控面板產業鏈結構圖

4.太陽能產業

太陽能發電產業依技術可區分為矽晶、薄膜等兩大類，目前市場主流為矽晶太陽能電池，包含單晶與多晶兩種型態，共占約近九成市場；薄膜類包含：非晶矽薄膜、碲化鎘(CdTe)、銅銦鎳硒(CIGS)、染料敏化、有機薄膜以及新興的鈣鈦礦等型太陽能電池，因轉換效率仍較低，但具有美觀、可

撓且弱光環境可發電、未來成本可快速下降之潛力等特性，約佔一成以下之利基市場。

從產業鏈的角度來看，主流矽晶太陽能電池產業可劃分為上游之多晶矽材、晶錠／矽晶圓、中游之太陽能電池片、模組，以及下游之系統建置；此外，尚有周邊材料（包括玻璃、軟性基材、氣體、靶材、漿料、染料及電極材料等）及設備等相關產業；薄膜型太陽能電池製程較為簡化，僅有中游模組與下游系統產業。其太陽能產業鏈結構如圖 2.1-4 所示。主要廢棄物有廢酸鹼(鹽酸、硝酸、硫酸、氫氟酸...)、廢溶劑(IPA、三氯甲烷、丙酮、去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑...)、蝕刻液、廢靶材、電子廢料、電鍍廢液(鎳、錫鉛、銀、金...)、錫鉛渣、廢離子交換樹脂等等。

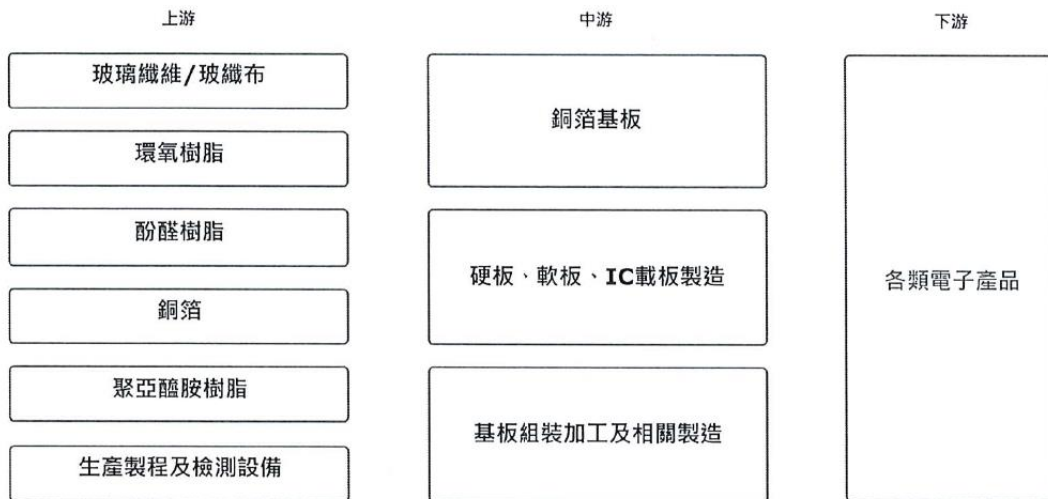


資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-4 太陽能產業鏈結構圖

5.印刷電路板製造業

印刷電路板 (Printed Circuit Board, PCB) 是由各類電子零組件組成並將其電性連結使其發揮電性功效的電木板，可謂所有電子產品不可缺的基礎零件，又稱「電子工業之母」。印刷電路板產業上游為玻纖布、銅箔、聚醯亞胺 (Polyimide, PI) 及樹脂等材料的供應商，中游為銅箔基板及印刷電路板製造業者，下游則為各類電子產品的供應商。其印刷電路板產業鏈結構如圖 2.1-2 所示。主要廢棄物有廢酸鹼(硝酸、硫酸...)、廢溶劑(去光阻劑、光阻稀釋劑、顯影液劑...)、蝕刻液、微蝕液、硝酸銅廢液、剝掛架廢液、剝錫鉛廢液、電路板廢料、電鍍廢液(鎳、錫鉛、銀、金...)、錫鉛渣、電鍍污泥、含銅污泥...等。



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

圖 2.1-5 印刷電路板產業鏈結構圖

6. 金屬表面處理業

表面處理為各種加工製造工業不可或缺的。從傳統工業到近代高科技，表面處理技術一直扮演非常重要的角色。從以前的金屬表面到現在的塑膠非金屬表面，它使材料更耐腐蝕、更耐磨耗、更耐熱，亦使材料之壽命延長，能改善材料表面之特性，增加光澤美觀等提高產品之附加價值；表面處理也常用來提升金屬材料的表面性質，例如抗蝕性、耐磨耗性、塗裝性與絕緣性。化成處理常用來提升金屬材料的抗蝕性並提升後續塗裝層的附著性；電鍍常用來提升金屬基材抗蝕性、耐磨耗性和錫鍍性。

表面處理的目的可以分四大類：(1)美觀(appearance)：提高製品之附加價值，賦予製品表面美觀，例如裝飾性電鍍。(2)防護(protection)：為了延長製品的壽命，在製品表面披覆(coating)耐腐蝕之材料。(3)特殊表面性質(special surface properties)：提高製品之導電性、焊接性、提高光線之反射性、減小接觸阻抗，例如在電子組件之金(Au)及鈀(Pd)上作電鍍。(4)機械或工程性質(mechanical or engineering properties)：提高製品之強度、潤滑性，增加硬度及耐磨性，提高製品之耐熱性、耐候性及滲碳、氮化之防止，

例如鋼鐵表面硬化時，在不要硬化部分鍍銅。

表面處理技術分類如圖2.1-6所示，又依表面形成及表面塗層分為兩大類。其主要廢棄物有廢酸鹼(鹽酸、硫酸...)、電鍍廢液(銅、鎳、錫鉛、銀、金、銻、銻...)、電鍍污泥、含銅污泥...等。



資料來源：107年度表面處理業之製造業原物料耗用通常水準調查報告

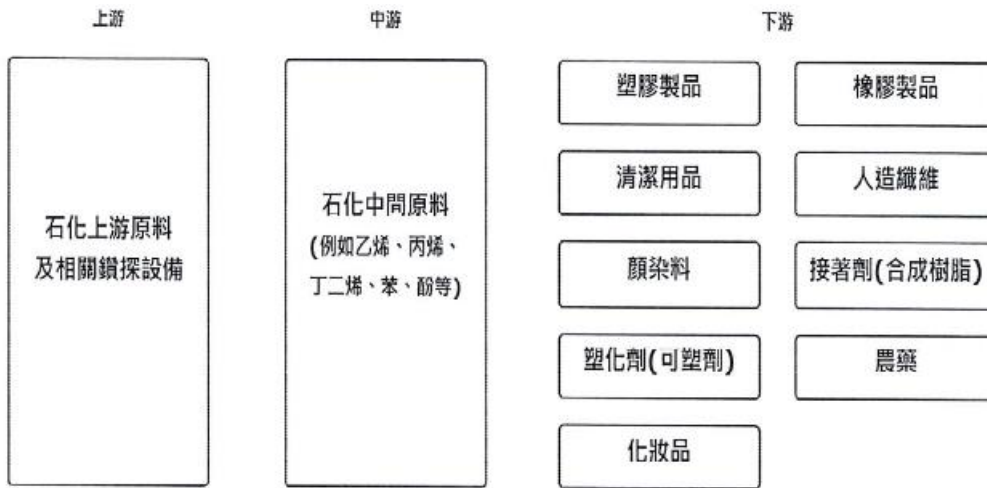
圖 2.1-6 金屬表面處理產業鏈結構圖

7.石化及塑橡膠製造業

臺灣的石化工業以逆向整合方式發展，先建立下游加工業，再由國外進口石化加工原料形成中游體系，最後興建輕油裂解廠供應石化基本原料，串成上中下游完整的石化體系，其石化及塑橡膠製造業鏈結構圖，如圖 2.1-7 所示。

石化及塑橡膠產業鏈上游為原油、由原油提煉而成之輕油、汽油、柴油、煤油、燃料油、潤滑油，以及相關開採鑽探設備；中游為上游原料經裂解產生之石化基本原料如乙烯、丙烯、丁二烯、苯、酚等，以及上述原料再經聚合、酯化、烷化等化學反應後製成之塑膠、橡膠、人造纖維等化學原料；下游為塑膠、橡膠、人造纖維等化學原料加工製成的各式食衣住行中所用之日常用品，如塑膠製品、橡膠製品、清潔劑、人造纖維、顏染料、

接著劑、塑化劑、農藥及化妝品等，應用範圍相當廣泛；我國石化產業產值占全體製造業的比重超過 1/4，台灣石化產業產值年增率將持續成長，估計 2019 年產值可上看 1.85 兆元。其廢棄物種類繁多，其中與稀有金屬廢料(如鈾、鈹、鈾、銻...等)有關之廢棄物，主要來自含貴金屬(金、銀、鈾、鉑、銻、銻、鐵、鈦)之廢觸媒及離子交換樹脂等。



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

圖 2.1-7 石化及塑橡膠製造業鏈結構圖

2.2 目前國內主要的應用案例

我國循環經濟產業之形成已具有一定規模，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，不僅可以再生業可以永續再利用，可見其對資源化再利用之重要性。

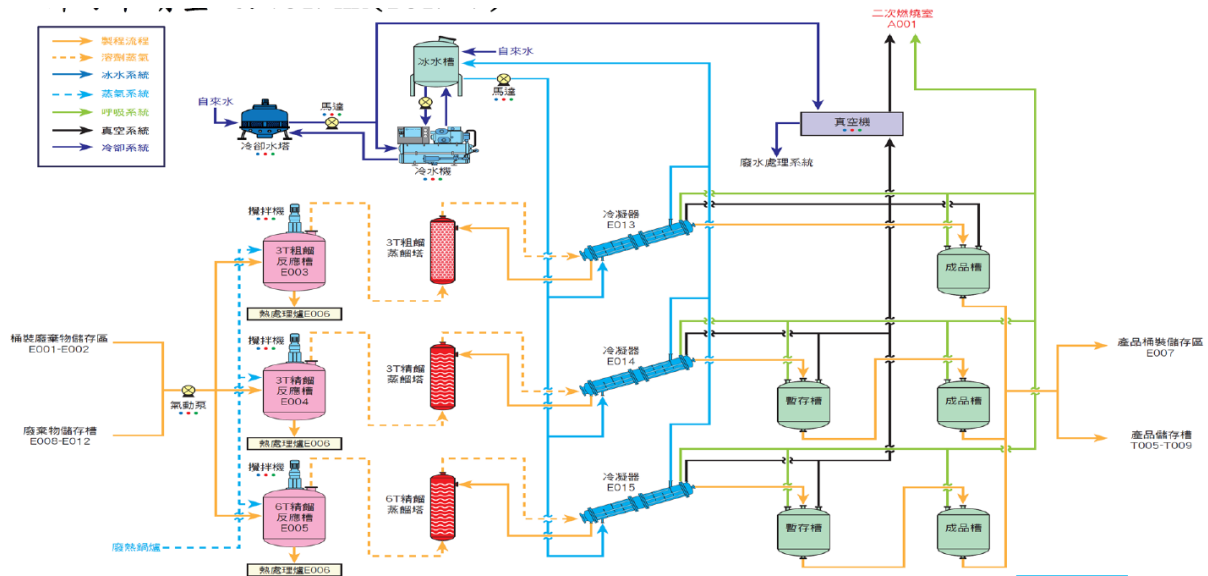
目前國內對於廢電子化學品-廢溶劑、含銅廢棄物及稀有金屬廢料(如銻、鈹、鈾、銻...等)等資源循環技術，主要的應用案例概述如下：

1.廢電子化學品-廢溶劑

國內電子業的廢電子化學品-廢溶劑回收，目前也有透過與化學劑廠間的合作來運作，由化學劑廠一手包辦從銷售、回收、再利用等商業模組來運作，例如異丙醇(IPA)包括李長榮、長春石化等均提供此服務。以下再介紹國內創櫃版循環經濟廠商-利百景環保科技股份有限公司：

利百景環保科技股份有限公司為環保署登記之甲級處理廠，主要製程為物理處理之蒸餾純化程序，許可量為 450 公噸/月及熱處理之焚化處理程序，許可量為 900 公噸/月。其係利用電子、光電、化工、化學或其他產業所產生之廢溶劑，利用物理處理製程將廢溶劑蒸餾在製而產生可循環再生之溶劑原料，再循環供應產業需求，利用焚化處理製程以廢溶劑為燃料，燃燒後之廢熱經廢熱鍋爐產生蒸汽，蒸汽可供應廠內供物理

處理所需之熱能、空氣污染防治設備熱交換所需熱能或供應鄰近工廠所需之熱能，以達區域能資源整合之願景。其製造流程如圖 2.2-1 所示。



資料來源：2019 年 7 月 24 日廢溶劑循環經濟技術交流媒合會講義。

圖 2.2-1 利百景環保科技公司製造流程圖

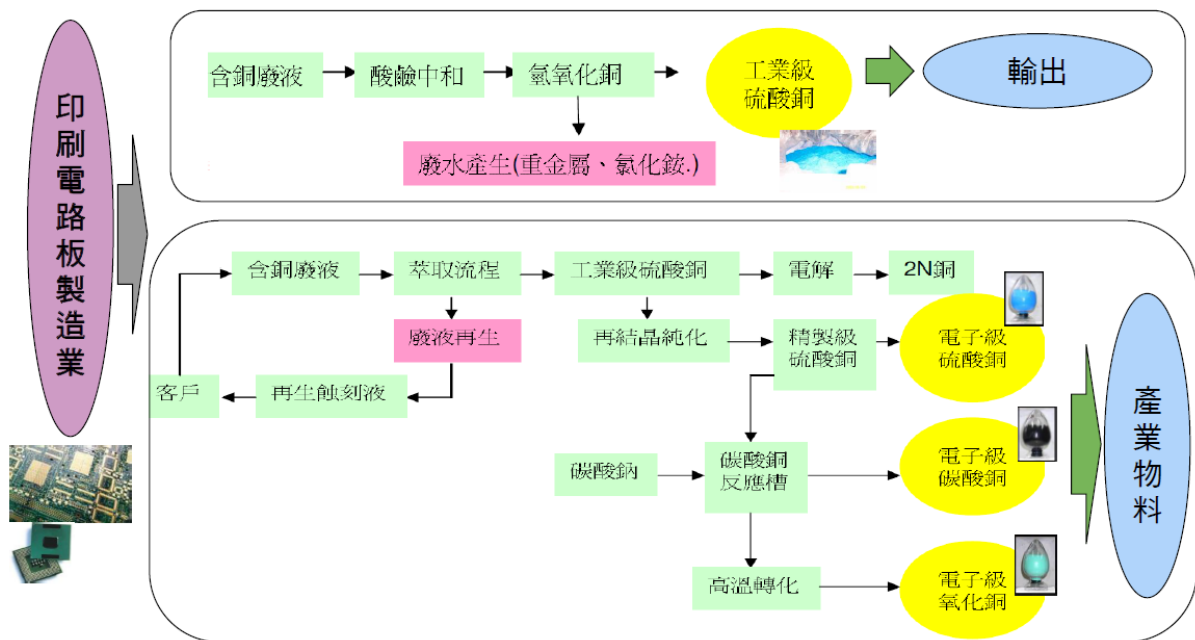
2.含銅廢棄物

國內主要處理含銅污泥的廠商以永元化工原料股份有限公司為主，其係以旋轉窯焙燒爐處理國內含銅廢棄物(A-8801 及 C-0110)，產製成氧化銅粉，再輸出國外進行銅的冶煉。另外東達工業股份有限公司則透過回收再利用處理技術，自酸性蝕刻廢液(R-2501)及硫酸銅廢液(C-0110)中置換出銅，再轉製成水處理藥劑業所需之產品：「硫酸鐵溶液(硫酸亞鐵)」。以下再介紹國內興櫃循環經濟廠商-昶昕實業股份有限公司：

昶昕實業股份有限公司(AMIA CO., LTD.)始創於西元 1974 年，昶昕實業四十年來專注於電子特用化學品及工業銅鹽產品發展，聚焦於產業知識經濟的專業經驗及技術能力，並身體力行於「工業環保生產」與「資源回收再生循環使用」理念，協助兩岸 PCB 產業發展與壯大，做到無污

染的資源回收再生循環系統，創造台灣綠色科技經濟的新奇蹟。昶昕實業是環保署認可之甲級廢棄物專業清除處理機構，本著污染預防、為環境設計、永續發展之理念，主要從事於印刷電路板特用化學品、清除處理暨回收再利用、半導體/封裝使用剝錫液、代理產品服務，清除處理回收再利用。主要收受之項目包括酸鹼廢液、廢硫酸、硫酸銅結晶、廢酸性蝕刻液、鹼性蝕銅廢液、硫酸銅廢液、含銅污泥等。

昶昕不僅提供電子業製程用化學藥水，也購入客戶使用公司產品後，所產生之含銅、錫等特用化學品廢液，回收製成電子業、礦業、染整、塗料及其他工業所需求之銅鹽產品；包括硫酸銅、碳酸銅、氧化銅等，每月產銷量約達 3,000 公噸。值得喝采的是，整個流程是採用無污染之回收再利用處理製程，以電解或化學再處理等較高層次技術工法，點石成金、化腐朽為神奇，自回收廢水中萃取出貴重金屬，達到創造價值的目標。其製造流程如圖 2.2-2 所示。



資料來源：循環經濟對中小企業的商機，張啟達，2016年9月30日。

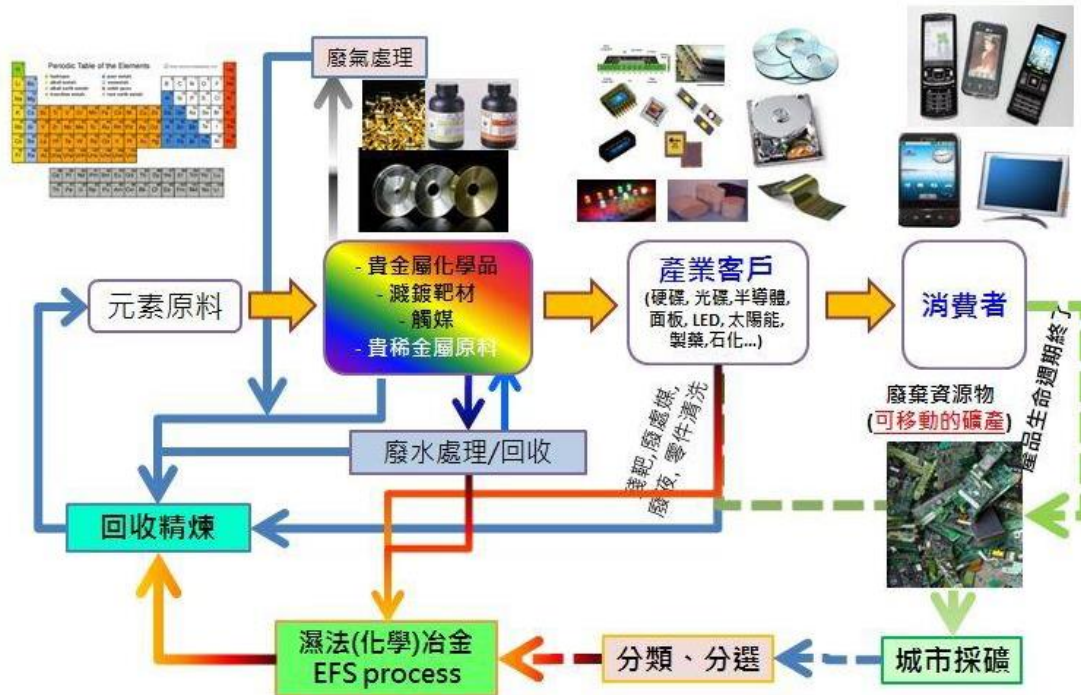
圖 2.2-2 昶昕實業公司製造流程圖

3.稀有金屬廢料(如鈹、鈹、鈹、鈹…等)

國內主要處理及回收再利用稀有金屬廢料等廠商包括弘馳公司及佳龍公司…等。弘馳公司之貴金屬廢料回收是以「粉碎」、「破壞」、「液體處理」、「焚化」等對回收物料進行適當的處理，回收率達98%以上，包括Au、Ag、Pd、Pt 純度99.95以上。佳龍公司為首家環保科技股票上市公司，其以化學處理程序及物理處理程序，處理及回收含貴金屬固體廢料、貴金屬廢液、混合電子廢料、廢資訊物品等，回收金、銀、鈹、銅等貴金屬。以下再介紹國內上櫃循環經濟廠商-光洋應材材料科技股份有限公司：

光洋應材材料科技股份有限公司自工業界回收的含貴稀金屬廢料，依廢料可燃性、均質性及所含金屬種類、含量，選用適當方法進行前處理，使用焚化或熱解法降低廢棄物可燃成分，使用粉碎法提升廢料均質性，完成前處理後，才進行樣品取樣與分析作業，以確定金屬種類與含量，繼而選擇合適的貴稀金屬回收技術，將貴稀金屬自廢料中分離、回收，並進一步將貴稀金屬精煉使純度達到電子工業原料等級。

光洋應材公司製造產品使用的貴稀金屬種類分為金(Au)、銀(Ag)、鉑(Pt)、鈳(Ru)、鈹(Pd)、銻(In)，統計 2015~2017 年金(Au)、銀(Ag)、鉑(Pt)、鈳(Ru)、鈹(Pd)、銻(In)等貴稀金屬使用量為 462.8 公噸、315.4 公噸及 255.9 公噸，而來自廢料回收的貴稀金屬量為 452.4 公噸、291 公噸及 211.6 公噸，回收貴稀金屬佔產品用量比例為 98%、92%及 83%。其製造流程如圖 2.2-3 所示。

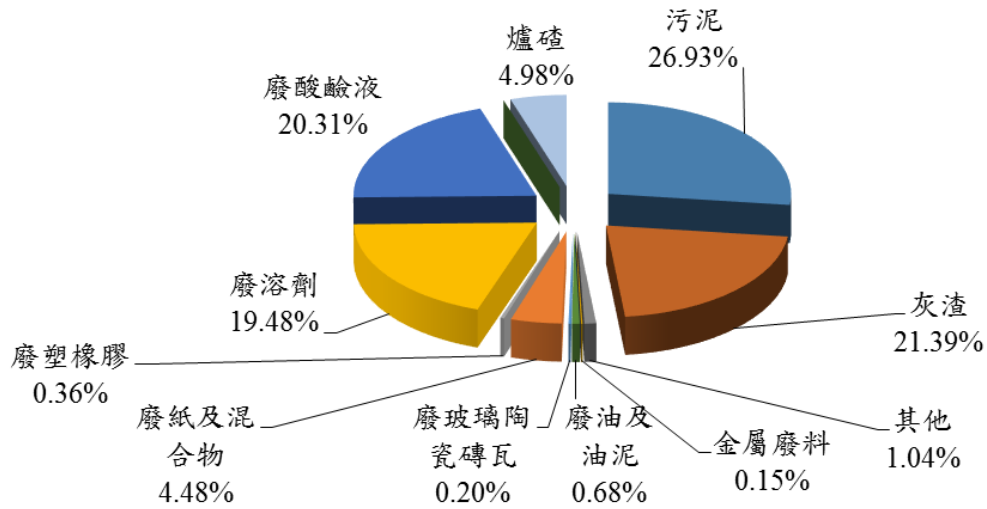


資料來源：2015~2017 年光洋應材公司企業社會責任報告書

圖 2.2-3 光洋應材公司製造流程圖

2.3 面臨問題及未來發展方向

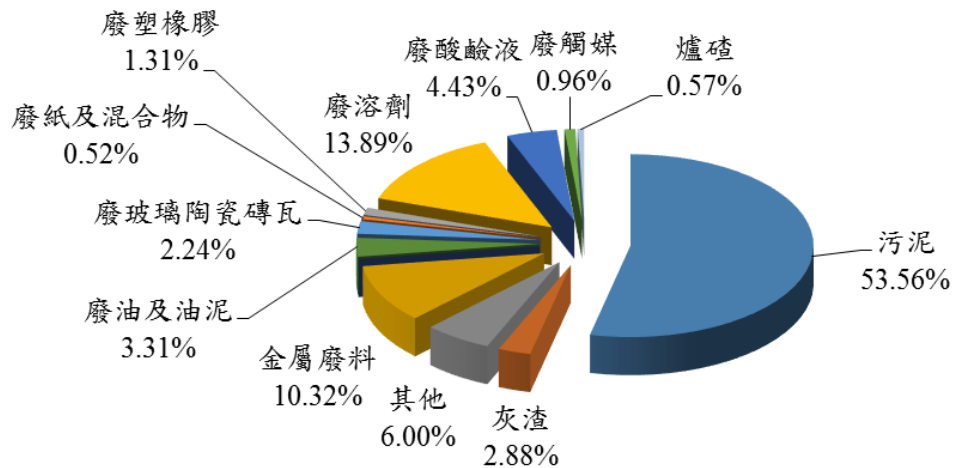
由經濟部工業局「工業廢棄物清理與資源化資訊網」，經分析自 IWR&MS 下載之資料經分析自 IWR&MS 下載之資料及統計許可再利用廠共計 126 家，並依其 107 年 1~8 月之實際再利用申報資料，推估 107 年各類工業廢棄物屬許可再利用之再利用情形(如圖 2.3-1 所示)，主要許可再利用之廢棄物種類為「污泥」、「灰渣」及「廢酸鹼液」。其中「污泥」類以「無機性污泥」之再利用量最大，主要再利用作為製磚原料及人工粒料；「灰渣」類則以「電爐製鋼過程污染控制之集塵灰或污泥」之再利用量最大，主要再利用方式為熱處理產製氧化鋅；「廢酸鹼液」類則以「廢液 pH 值小(等)於 2.0」之再利用量最大，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)。



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, 2018

圖 2.3-1 107 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 159 家，並依其 107 年 1~8 月之實際申報資料，推估 107 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形(如圖 2.3-2 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，其主要再利用為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，2018。

圖 2.3-2 107 年公民營處(清)理機構之各類工業廢棄物再利用情形

目前國內廢電子化學品-廢溶劑、含銅廢棄物及稀有金屬廢料(如鈹、鈹、鈹...等)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。

表 2.3-1 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(廢溶劑)

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用率(公噸)	產生量(公噸)
C-0301	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)	104	29,386.07	144,148.3
		105	34,997.87	159,441.4
		106	46,354.56	191,768.6
		107	61,936	204,747
C-0399	其他易燃性事業廢棄物混合物	104	242.81	2,069.69
		105	271.03	2,441.73
		106	73.3	2,167.89
		107	5	2,874
R-1501	廢光阻剝離液	104	16,207.05	16,177.96
		105	13,377.6	13,467.2
		106	12,523.27	12,487.14
		107	10,745	10,716
R-2501	廢酸性蝕刻液	104	106,205	106,287
		105	101,586	101,848
		106	101,699	101,723
		107	97,998	98,052
R-2503	二甲基甲醯胺 (DMF) 粗液	104	76,665.24	76,134.45
		105	81,701.9	81,992.8
		106	75,253.53	76,452.25
		107	77,042	75,649
R-2506	有害混合廢溶劑	104	0	0.038
		105	0	0
		106	0	0
		107	0	0
D-1504	非有害有機廢液或廢溶劑	104	38,482.33	165,111.6
		105	30,339.41	143,363.7
		106	47,185.22	189,124
		107	45,798	188,594

資料來源：環保署重點事業廢棄物之處理方式統計年報

表 2.3-2 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(含銅廢棄物)

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用率(公噸)	產生量(公噸)
A-8801	電鍍製程之廢水處理污泥，但下述製程所產生者除外：(1)鋁之硫酸電鍍(2)碳鋼鍍錫(3)碳鋼鍍鋁(4)伴隨清洗或汽提之碳鋼鍍錫、鋁(5)鋁之蝕刻及研磨。	104	43,372	114,630.9
		105	44,162	112,499.2
		106	51,428	120,812.1
		107	54,456	123,545
C-0110	銅及其化合物(總銅)(僅限廢觸媒、集塵灰、廢液、污泥、濾材、焚化飛灰或底渣)	104	6,763	24,449
		105	7,022	26,700
		106	9,764	25,086
		107	12,767	26,420
E-0221	含金屬之印刷電路板廢料及其粉屑	104	35.87	30,991.97
		105	68.71	26,201.46
		106	97.85	29,300.45
		107	171	29,920
E-0222	附零組件之廢印刷電路板	104	0	1,973.23
		105	0	2,101.30
		106	0	2,079.70
		107	0	2,503
E-0229	含銅量大於 60%之廢銅箔基板	104	0	0
		105	0	707.88
		106	0	1,501.15
		107	0	59

資料來源：環保署重點事業廢棄物之處理方式統計年報

表 2.3-3 廢棄物類別之全國再利用率及產生量(稀有金屬廢料)

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用率(公噸)	產生量(公噸)
A-8801	電鍍製程之廢水處理污泥,但下述製程所產生者除外:(1)鋁之硫酸電鍍(2)碳鋼鍍錫(3)碳鋼鍍鋁(4)伴隨清洗或汽提之碳鋼鍍錫、鋁(5)鋁之蝕刻及研磨。	104	43,384.44	114,630.9
		105	44,181.39	112,499.2
		106	51,451.53	120,812.1
		107	54,455.9	123,545
E-0217	廢電子零組件、下腳品及不良品	104	26	8,026
		105	14	8,202
		106	42	8,591
		107	54	8,990
E-0218	廢光電零組件、下腳品及不良品	104	3	665
		105	7	726
		106	6	679
		107	4	688
E-0220	廢通信器材(不含機械式)	104	0	634
		105	0	637
		106	0	892
		107	0	1,086
D-2623	含金(銀、鈮)之導線架廢料	104	0	313.69
		105	0	308.56
		106	0	338.22
		107	0	329
D-2624	含貴金屬(金、銀、鈮、鉑、銻、銻、銻、鈦)之廢觸媒	104	358.76	395.83
		105	0	606.85
		106	0	402.33
		107	753	707
D-2625	含貴金屬(金、銀、鈮、鉑、銻、銻、銻、鈦)之離子交換樹脂	104	7.17	54.46
		105	7.48	45.36
		106	10.95	42.73
		107	18	49

資料來源：環保署重點事業廢棄物之處理方式統計年報

另由於 2017 年半導體產業占台灣 GDP 達 15%，未來有許多創新技術包含 3D 封裝、人工智慧、5G、物聯網…等，預估半導體產業需求仍大幅增加，此外在政府 5+2 產業創新計劃，以及智慧物聯的帶動下，預估 2021 年突破 3 兆新台幣。因此隨著高階製程的發展，製程對於清潔的要求增加，因而純水和溶劑的使用量上升，產生的廢溶劑及其他廢棄物亦隨之成長。未來台積電 5 奈米及 3 奈米技術計畫性擴廠及其他業者擴廠需求，顯示廢棄物成長且多元。因此隨者環保意識抬頭，節能和資源循環等議題被重視，許多企業紛紛朝循環經濟方向發展，然而除了企業的投入外，亦須仰賴更多廠商的投入，以增加並提升再利用的技術及規模，促使台灣朝向「資源循環零廢棄的方向前進」。

因此我國循環經濟之靜脈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、廢溶劑提濃純化及資源循環技術案例

3.1 多效蒸餾(Multi-Effect Distillation, MED)純化技術案例

1. 多效蒸餾純化技術原理：

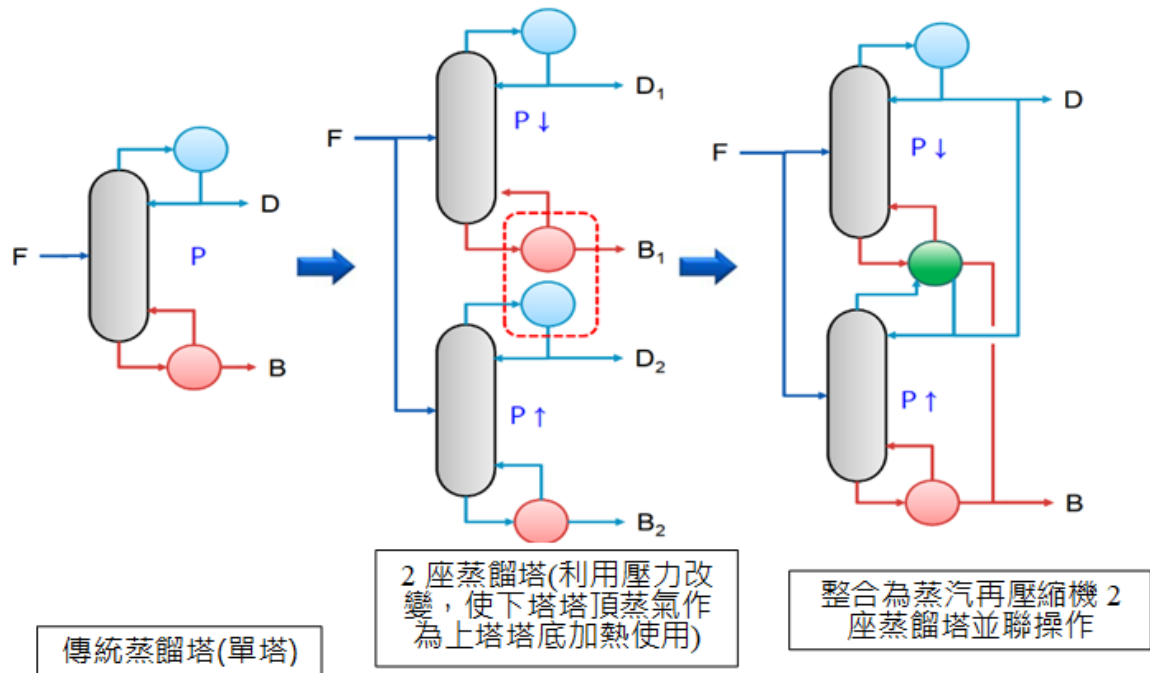
蒸餾塔是化工廠最耗能的製程設備之一，但它也是最重要的生產設備。近年來，蒸餾技術並沒有很大的突破，但從節能的角度來看，利用蒸餾塔本身的特殊設計進行熱整合的蒸餾技術，如內部熱整合蒸餾(Heat Integrated Distillation Column, HIDiC)或是隔板蒸餾(Divided Wall Column, DWC)技術，可以說是目前最具節能潛力的蒸餾技術。這類型的蒸餾技術是利用熱能整合的觀念，利用設備單元自身的熱能回收再利用，來減少額外的熱能供給。相較於傳統的蒸餾塔，其具有20~60%的節能效益。若是再搭配蒸餾廠區的熱交換器熱整合技術，將會對整體製程能源效率提升有很大的助益。

HIDiC的主要原理主要是利用蒸餾塔的汽提段(stripping section)與精餾段(rectifying section)進行熱轉移，將精餾段所移出的熱，來供給汽提段加熱之用。理論上在傳統的蒸餾操作下，精餾段所需的溫度比汽提段低，並無法傳熱給汽提段，因此在HIDiC的設計上就必須提高精餾段的操作壓力，使整段的溫度分布高於汽提段，且其間必須裝設有蒸汽再壓縮機將汽提段的蒸汽傳送到精餾段，以完成整個蒸餾操作。

多效蒸餾純化技術即是利用 HIDiC 之設計原理，藉由操作壓力的改變，使塔頂冷凝過程熱能移作另一塔的塔底加熱使用，該熱交換器同時為冷凝器與再沸器。雙成分則由單塔切分成操作壓力不同的雙塔並聯操作(如圖 3.1-1 所示)。三成分(或多成分)則由調整某一塔壓力，使其塔頂蒸汽溫度大於另一塔的塔底液體溫度後進行熱交換。此技術適合相對揮發度小、分

離板數多、回流比高的系統。雙效蒸餾系統其理論節能率可達 50%，若是三效蒸餾系統其理論節能率達 33%，可以此類推。多效蒸餾技術在設計上主要考量壓力與溫度的變化，包括(1)熱交換溫差 $\Delta T_{\min} > 5^{\circ}\text{C}$ (注意泡點(從液相中分離出第一批氣泡的溫度的臨界點)與露點(從氣相中分離出第一批液滴的溫度的臨界點))；(2)壓力提高後，氣液平衡的變化(即相對揮發度)；(3)溫度升高對物質的影響與材質腐蝕問題。

此多效蒸餾技術之應用包括瑞典商阿法拉伐(股)公司、美國 Badger 公司、加拿大 Whiting 公司、日本 Hitachi Zosen 公司、以色列 IDE 公司、德國 GEA 公司、印度 CHEM 公司等。



註：F：Feed 進料 D：Distillate 塔頂出料 P：壓力 B：Bottom 塔底出料
資料來源：工研院材化所

圖 3.1-1 單塔改為操作壓力不同之雙塔並聯操作示意圖

2. 多效蒸餾純化技術應用實例

(1) 瑞典 Alfa Laval 公司

Alfa Laval 在以下三項技術領域是全球性的領導品牌：熱交換、分離、液體輸送與處理，這三項技術在許多產業的製程中具有舉足輕重的影響。多效蒸餾/蒸發技術用於濃縮液體產品，阿法拉伐的 AlfaVap 蒸發系統基於為蒸發器量身訂製的板框設計。AlfaVap 升膜蒸發器使用盒式概念，蒸發器板成對焊接。蒸汽在 AlfaVap 蒸發器的焊接通道中作為熱源使用，同時產品通過墊片通道。當 AlfaVap 內部發生沸騰時，蒸汽和液體的混合物上升到蒸發器的頂部。在旋風分離器容器中分離蒸汽相和液相。

在 AlfaVap 系統中施加真空以降低水的沸點，即沸騰發生在低於 100°C 的溫度下。對於某些應用，沸點低至 40~50°C，蒸發系統中的真空由真空泵產生，並且通過冷凝來自 AlfaVap 系統的最後效果的蒸汽在用於真空冷凝的冷凝器中冷凝。降低蒸發系統中蒸汽消耗的最有效方法是增加效應(effects)的數量。每種效應(effect)都可節省蒸汽並降低能源成本。為了獲得最佳的蒸汽經濟性，該系統通常由多效以及蒸汽再利用組合，如熱蒸汽再壓縮機 (TVR) 或機械蒸汽再壓縮機 (MVR)。

多效蒸餾技術之效益包括能效高、易於維護和更長的正常運行時間、靈活的容量、產品質量高、高粘度流體的理想解決方案。圖 3.1-2 為 Alfa Laval 公司多效蒸餾技術應用實例(瑞典 Akzo Nobel 公司)，其應用於液鹼(NaOH)提濃(從 32%提濃至 50%)。



資料來源：[https:// www.alfalaval.com](https://www.alfalaval.com)

圖 3.1-2 瑞典商阿法拉伐公司多效蒸餾技術應用實例(瑞典 Akzo Nobel)

(2)以色列 IDE 海水淡化技術有限公司

多效蒸餾技術來自化學工業，水或溶劑必須在化學工業中進行被移除以便將產品濃縮在溶液中。化學工業中的蒸餾/蒸發液體通常不是產品，除了對於從某種反應中回收溶劑的情況。蒸餾/蒸發過程會消耗大量的能量，因此節約能源是發展多階段過程所需且必要性基礎，意即更多的設備(投資)係為減少能源消耗的總量和成本。例如，自 1950 年以來，已用於超過一個世紀的溶液濃縮、結晶、溶液淨化等，而在多數情況下該過程涉及 2~4 個效應(effects)。目前它已被用於海水淡化，且在純水工業中它需要 2~16 個效應(effects)。IDE 公司在低溫蒸餾，尤其是海水淡化系統、工業廢水的濃縮和淨化及製冰機的研發居於世界領先地位。IDE 公司多元化地開發有關水溶液/溶劑的分離、濃縮和淨化的各種技術，如機械蒸汽壓縮蒸汽(Mechanical Vapor Compression, MVC)、低溫多效蒸餾(Low Temperature Multi-Effect Distillation, LT-MED)、熱蒸汽壓縮(Thermal Vapor Compress, TVC)、逆滲透(Reverse osmosis, RO)技術、水處理和廢熱利用。圖 3.1-3 為 IDE 公司多效蒸餾技術應用實例(中國天津)，其應用於海水淡化技術。



資料來源：<https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E6-144-44-00.pdf>

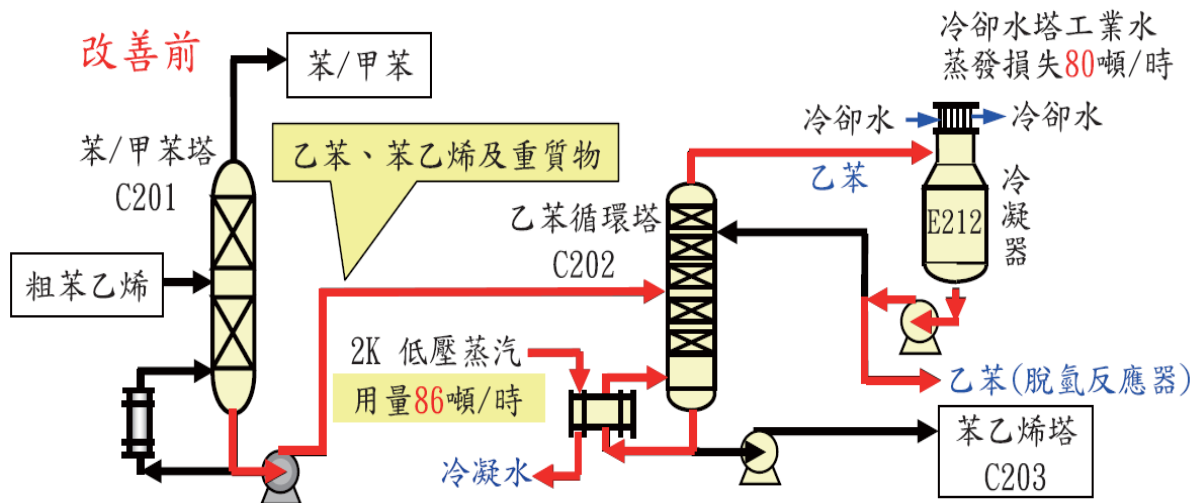
圖 3.1-3 以色列 IDE 公司多效蒸餾技術應用實例(中國天津)

(3)美國 Badger 公司多效蒸餾技術應用

本案例之多效蒸餾技術為基本設計公司(Badger)所研發之改善案(溶劑提濃純化技術)，台化公司苯乙烯廠區乙苯循環塔(C202)即應用此技術。乙苯循環塔為廠內耗用蒸氣最大之設備，約占 22%之蒸氣耗用量。因此以此蒸餾塔進行多效蒸餾技術節能改善案，並進一步降低生產成本，同時落實節能減碳，此技術若應用於廢溶劑蒸餾純化亦有相當效益。

A.原乙苯循環塔(C202)設計：

台化公司乙苯循環塔(C202)是用來分離苯/甲苯塔(C201)的塔底餾出物粗苯乙烯所含之乙苯，而乙苯循環塔(C202)塔底所形成的粗苯乙烯會經再沸器，其係利用 2K 低壓蒸汽(使用量 86 T/h)加熱後，在 C202 進行蒸餾分離出乙苯。C202 塔頂分離出的乙苯，則需要再經塔頂冷凝器以冷卻水來冷凝，此部分會造成冷卻水蒸發熱損失約 80 T/h，如圖 3.1-4 所示。



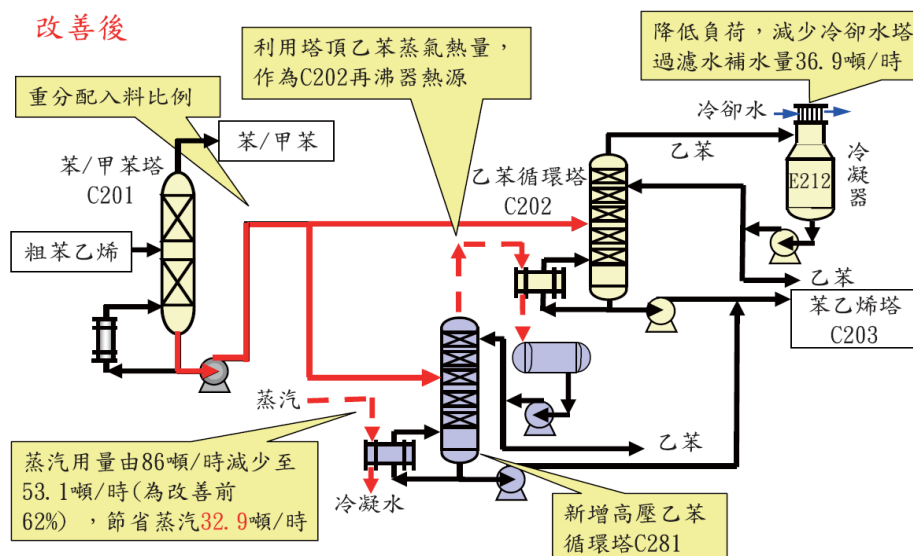
資料來源：http://www2.fpg.com.tw/html/mgz/Mgz_epaper/122/43-2p16-.pdf

圖 3.1-4 台化公司乙苯循環塔(C202)原本設計流程

B. 改善後乙苯循環塔(C202)之設計：

多效蒸餾之設計理念為將一支塔改為兩支塔的設計以回收能源，設計方式為將乙苯循環塔(C202)分成高壓塔(HP Column)及低壓塔(LP Column)並聯操作。且將苯/甲苯塔(C201)塔底餾出物以約等量的方式分成兩股流體分別進入高、低壓塔，高壓塔的再沸器使用蒸汽加熱，再利用高壓塔塔頂蒸汽作為低壓塔塔底再沸器熱源即為蒸汽多效使用。此設計方式只有高壓塔的再沸器需使用蒸汽，因單支塔的处理量已降至原本的約 50%，所以蒸汽用量可大幅降低，另高壓塔塔頂蒸汽不再需要使用冷凝器，因而減少冷卻水蒸發損失。將多效蒸餾新製程技術應用至乙苯循環塔(C202)中(如圖 3.1-5 所示)，增設高壓蒸餾塔(C281)1 座，原本乙苯循環塔(C202)作為低壓塔，高壓與低壓蒸餾塔之入料比例重新分配，而使高壓塔再沸器蒸汽用量可由原本 86 T/h 降至 53.1 T/h (約為改善前之 62%)；低壓塔(原 C202)則使用高壓塔塔頂流體作為再沸熱源。由於整體熱能輸入減少，低壓塔冷卻器負荷相對降低，冷卻水蒸發損失也因而減少，但因需增加部分泵浦，故需增加

少量泵浦運轉電力。



資料來源：http://www2.fpg.com.tw/html/mgz/Mgz_epaper/122/43-2p16-.pdf

圖 3.1-5 美國 Badger 公司多效蒸餾技術應用實例(台化海豐廠)

3.2 機械式蒸汽再壓縮(Mechanical Vapor Recompression, MVR)技術案例

1. 機械式蒸汽再壓縮技術原理

機械式蒸汽再壓縮系統(如圖 3.2-1 所示)，是一種開迴路工業熱泵(壓縮循環)，以系統內自身流體為冷媒加以壓縮循環，重新利用蒸發濃縮過程產生之二次蒸汽的冷凝潛熱，作為系統本身的加熱源，因而減少蒸發濃縮過程對外界蒸汽及冷卻資源的需求，可大幅降低能耗。

運作流程為二次蒸汽經壓縮機再壓縮後，將壓力、溫度升高，熱焓增加，送至蒸發罐作為加熱蒸汽使用而使料液汽化，而加熱蒸汽本身則冷凝成水。如此一來，原本需廢棄之蒸汽因潛熱充分利用，大幅提高加熱效率。其性能係數(Coefficient of Performance, COP)提高(一般可達 10~40)，運轉成本是傳統五效蒸發器的 14~33%。適用於蒸餾、蒸發、

濃縮系統，可運用在煉油石化蒸餾系統、製程濃縮(取代傳統多效蒸發罐)、純水回收再利用、廢水減量及海水淡化產生純水。此機械式蒸汽再壓縮技術之應用包括德國 GEA 公司、加拿大 Whiting 公司、美國 AGV Technologies 公司、奧地利 GIG Karasek 公司、瑞士 EVATHERM 公司、德國 MAN Diesel& Turbo 公司、韓國 IK 公司等。

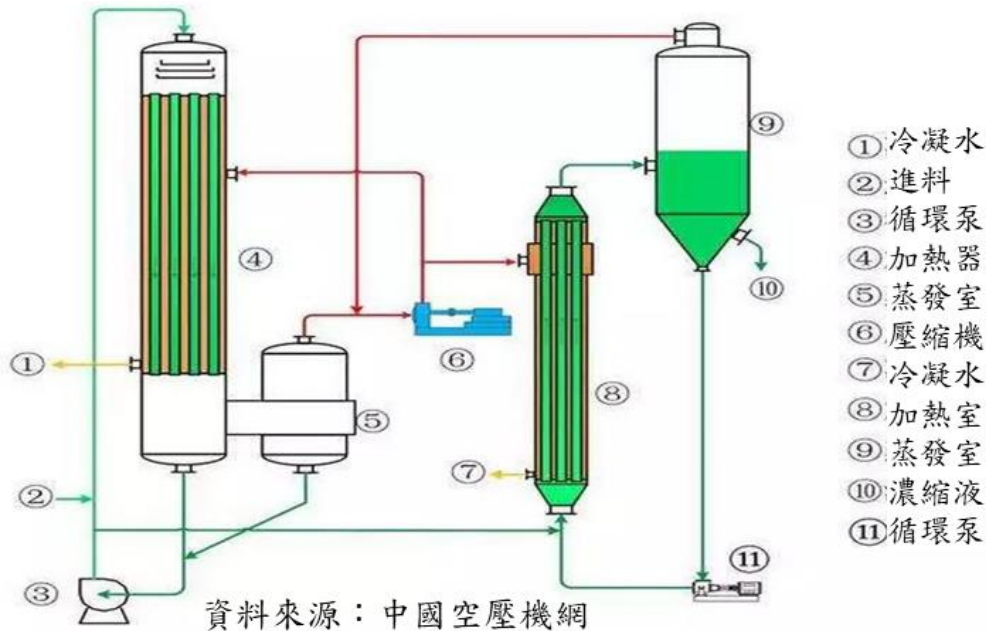


圖 3.2-1 機械式蒸汽再壓縮系統運作流程示意圖

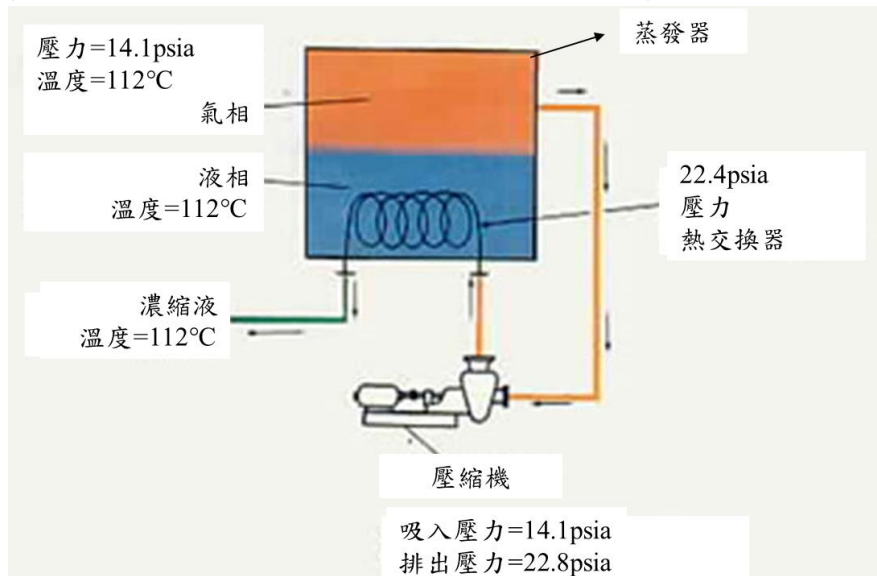
2.機械式蒸汽再壓縮技術應用實例

(1)加拿大 Whiting 公司

將蒸發器應用於從溶液中蒸發揮發性溶劑，其目的是濃縮目標物。典型的溶質包括磷酸、苛性鈉、氯化鈉、硫酸鈉、明膠、糖漿和尿素。在許多應用中，蒸發導致溶質以晶體形式沉澱，其通常通過旋風分離器、沉降器、洗滌塔、淘洗或離心機與溶液分離。

基於 75% 的等熵(絕熱，可逆)壓縮機效率和 92% 的組合電驅動馬達和齒輪減速器效率而言，將 1 公斤 112°C 蒸汽從 14.1 psia 壓縮至 22.8 psia 所需的能量僅為 12.33 Kcal。但為從 1 公斤 112°C 蒸發器冷凝水產

生等效蒸汽，则需要 249.75 Kcal，如圖 3.2-2 單效再壓縮蒸發器的簡化流程示意圖所示。因此，再壓縮蒸發器的節能與多效蒸發器的節能競爭非常激烈，且取決於所需的壓縮比、電功率和蒸汽的相對成本。



資料來源：<https://www.whiting.ca/evaporators-whiting-equipment-canada-inc/>

圖 3.2-2 單效再壓縮蒸發器的簡化流程示意圖

其所需的壓縮比係由三個部分組成：

- 沸點升高，即沸騰液的溫度減去相同壓力下的沸水溫度
- 傳熱所需的溫度差(ΔT)
- 蒸汽管進出壓縮機的壓降

因此，機械式蒸汽再壓縮對於低 ΔT (較大的熱傳區域)及低沸點，是非常有效益的。表 3.2-1 為再壓縮蒸發器與三效蒸發器應用於每噸碳酸鈉水合物之實際耗能案例的比較分析。

表 3.2-1 每公噸碳酸鈉水合物之實際耗能案例

	三效蒸餾(Triple Effect)	再壓縮蒸發器 (Recompression Evaporator)
電力(Power), kwh	—	—
壓縮機(Compressor)	0	46.7
循環泵浦(Circ. Pumps)	9.07	12.9
合計(Total)	9.07	59.6
蒸汽(Steam), kg	717.32	288.744
冷凝水(Condenser H ₂ O), gpm	75.3	0
蒸汽及電力成本 (Steam & Power cost)	\$9.93	\$6.80

註：計算基準為每度電 0.05 美金，每 1,000 公斤蒸汽 13.216 美金。

資料來源：<https://www.whiting.ca/evaporators-whiting-equipment-canada-inc/>

加拿大 Whiting 公司研發多效蒸餾純化技術，開發「多效強制循環蒸發器」，並搭配利用再壓縮蒸發器，來進行節能。顧名思義強制循環蒸發器中的液體被泵送通過蒸發管時，在蒸發期間會形成沉澱物，使其產生最小化之管結垢或鹽析。強制多效循環蒸發器配有單通道垂直換熱器、洗滌塔、旋風分離器和頂部安裝的氣壓冷凝器，對於廢溶劑蒸餾有非常好之效益，實廠照片如圖 3.2-3 所示。



資料來源：Whiting 公司網站，<https://www.whiting.ca/>

圖 3.2-3 加拿大 Whiting 公司機械式蒸汽再壓縮技術實廠圖片

(2) 德國 GEA 公司

德國 GEA 公司應用於蒸餾和蒸發技術過程節能的 TVR 和 MVR 解決方案，係將增加(壓縮)壓力的蒸汽流的冷凝焓，應用於加熱蒸發過程。然後，這些過程在較低的溫度條件下進行，從而使蒸汽消耗最小化。為操作 TVR，需要一定量的新鮮蒸汽，即所謂的動力蒸汽。因此 TVR 的一大優點是：操作簡單、無需轉動部件、無需維護、易於實施。德國 GEA 公司的 TVR 技術使新設計和現有蒸餾裝置的運行更加經濟。與 TVR 相比，其 MVR 解決方案需要更高的投資成本，但可以節省更多的能源成本。特別是對於新設計的工廠，成本效益較高。其他優點是由於低溫差導致產品緩慢蒸發。但對於每種特殊情況，必須在有效益的基礎研究上再決定是否應安裝蒸汽再壓縮系統。圖 3.2-4 為德國 GEA 公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實例。



資料來源：<https://www.gea.com/en/products/mvr-tvr-heated-distillation-plants%20.jsp>

圖 3.2-4 德國 GEA 公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實廠圖片

3.3 廢溶劑蒸餾回收裝置案例

1. 共沸蒸餾及萃取蒸餾技術原理

當溶液產生共沸現象時，於共沸點下氣液兩相之組成相同，亦即形成共沸混合物(azeotropic mixture)。共沸混合物無法利用一般蒸餾原理精餾，須利用其物性或化性，藉添加第三物質破壞共沸現象，方能達到蒸餾之目的。如果所加入的新成分能與被分離系統中的一個或幾個成分形成最低共沸物，新成分以共沸物的形式從塔頂蒸出，這種精餾操作便稱為共沸蒸餾。而多成分蒸餾則是運用萃取蒸餾及共沸蒸餾來達到純化分離之目的。

利用溶劑將固相或另一液相中之可溶性溶質溶入，達到分離或提純之操作，稱之為萃取(extraction)，萃取方式包括液體自固體中溶取溶質，稱為固液萃取(solid-liquid extraction)，也稱之為瀝濾(leaching)或滲提；液體自不互溶或部分互溶之液體中溶取溶質，稱為溶劑萃取(solvent extraction)，而以溶劑自原料中溶除溶質為目的者，稱為洗滌(washing)。與精餾比較，萃取過程的流程比較複雜，但萃取的過程本身有常溫下操作、無相變化及選擇適當溶劑可得到較高之分離係數等優點。

2. 廢溶劑蒸餾回收裝置應用實例

(1) 日本瑞環株式會社(廢水微量溶劑排除和回收裝置-SOLPICO)

日本瑞環株式會社之 SOLPICO 設備係從普通蒸餾無法分離的共沸廢液或含樹脂廢液進行回收，並利用共沸蒸餾、萃取蒸餾和真空乾燥之類的技術，將其導入該回收裝置中來實現高精度的分離。

SOLPICO 的主體結構包括一座高效的分離塔、冷凝器和一台乾燥真空泵，該系統分離並回收廢水中的微量溶劑，並利用溶劑和水之間的揮發差異將溶劑回收。塔的底部加熱生成水蒸汽，在分離中進行有

效的氣體-液體接觸。高揮發性溶劑會在塔頂濃縮，並由冷凝器以液體形式收集。該廢水微量溶劑排除和回收裝置，如圖 3.3-1 所示。其優點包括以下幾項：

- 體積小，但能夠進行大規模處理。
- 屬封閉型系統，溶劑於收集時不會洩入大氣層。
- 系統節能，長期營運成本很低。
- 操作和維護簡便。



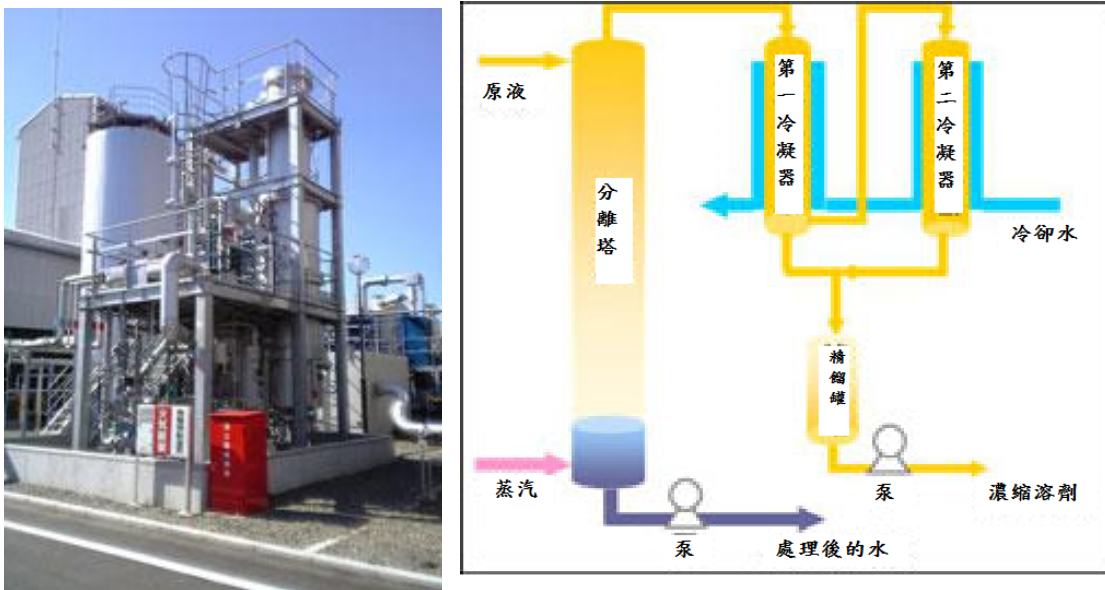
資料來源：http://www.n-refine.co.jp/index.php/chi/node_187/node_209/SOLPICO

圖 3.3-1 日本瑞環株式會社 SOLPICO 設備圖片

SOLPICO 可以處理的廢溶劑如表 3.3-1，另外其對沸點低於水的溶劑或水的共沸物也有效。應用於某半導體公司的廢水處理系統實廠案例，如圖 3.3-2 所示，塔系統 $\Phi 700/1,000$ 、塔規格 $W3,000 \times L4,500 \times H8,000$ mm、處理量=6,250 kg/hr。

表 3.3-1 SOLPICO 可處理之溶劑類別

類別	物質名稱
氯化物	二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、三氯乙烯、氯仿、四氯化碳、1,1,1-三氯乙烷、四氯乙烯、二氯溴甲烷
乙醇	甲醇、乙醇、異丙醇、丁醇
烴	正己烷、苯、甲苯、二甲苯
醚	四氫呋喃、異丙醚、1,4-二氧雜環乙烷
酯	乙酸甲酯、乙酸乙酯
酮	丙酮、MEK、MIBK
氮化合物	三甲胺、乙腈、丙烯腈



資料來源：http://www.n-refine.co.jp/index.php/chi/node_187/node_209/SOLPICO

圖 3.3-2 日本瑞環株式會社 SOLPICO 設備應用之實廠案例

(2) 日本瑞環株式會社(有機揮發性氣體回收和濃縮裝置-ECOTRAP)

ECOTRAP 是一種能從廢氣中回收利用其熱能來濃縮揮發性有機化合物 (VOC)，同時可回收水、分離和處理超過 99% 的目標成分，並

將廢氣以淨化氣體形式排入大氣的裝置，如圖 3.3-3 所示。特長包括以下幾項：

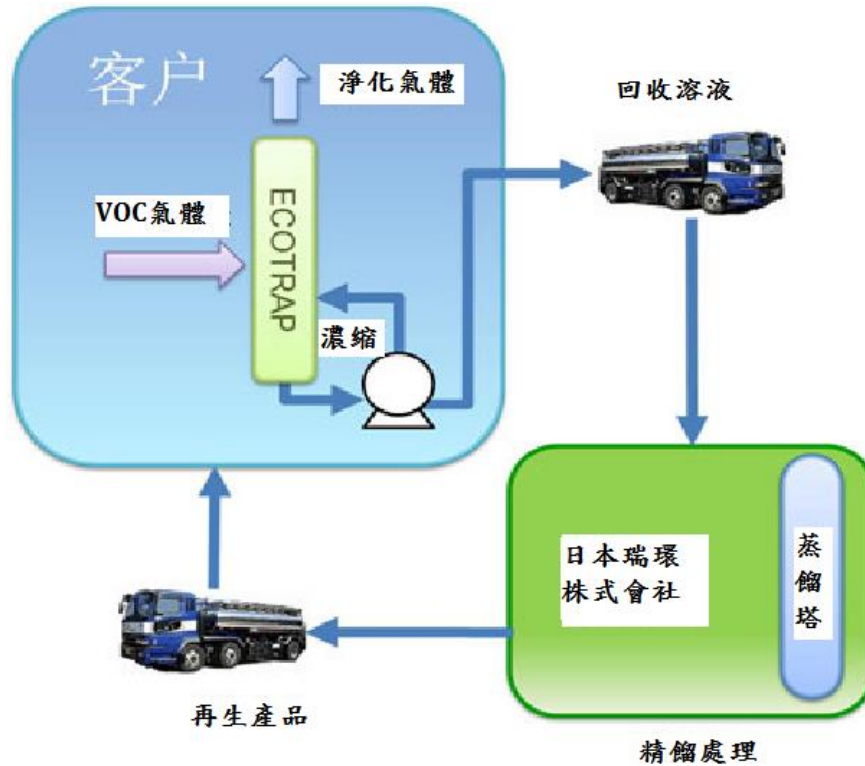
- 由於利用廢氣熱能，持續操作營運成本低。
- 用水作為媒介，具有極佳的回收和清潔性能。
- 全自動化控制，操作非常簡便。
- 塔中無加熱作業，非常安全。
- 可按客戶要求任意調整水分含量。



資料來源：http://www.n-refine.co.jp/index.php/chi/node_187/node_209/ECOTRAP

圖 3.3-3 日本瑞環株式會社 ECOTRAP 設備圖片

可以處理的廢溶劑包括 N-甲基吡咯烷酮(NMP)、N,N-二甲基乙醯胺(DMAC)、二甲基甲醯胺(DMF)、單乙醇胺(MEA)、二甲基亞砜(DMSO)，以及對沸點高於水、親水性或與水不共沸的 VOC 均有效。其實廠案例係 ECOTRAP 設備裝置於客戶廠中，並從客戶端之 VOC 回收廢溶劑，再送回廠內純化精餾後，再販售回客戶之循環經濟模式，如圖 3.3-4 所示。



資料來源：http://www.n-refine.co.jp/index.php/chi/node_187/node_209/ECOTRAP

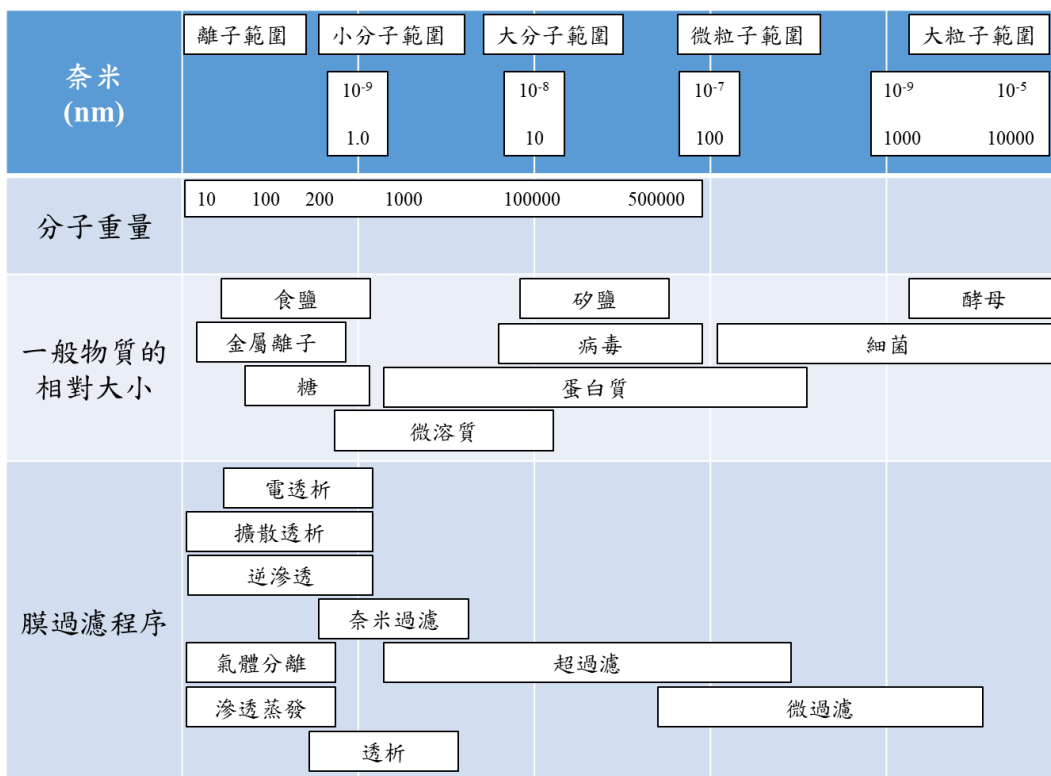
圖 3.3-4 日本瑞環株式會社 ECOTRAP 設備應用實廠案例

3.4 滲透蒸發和滲透氣化技術案例

1. 滲透蒸發和滲透氣化技術原理

薄膜分離技術係藉著薄膜相形成一物理障礙，並利用薄膜之選擇性質，讓混合物溶液中某些成分通過薄膜而阻止其他成分透過，以進行分離、濃縮與純化的方法。一般而言，分離膜的種類可依材質概分為有機膜(即高分子膜)和無機膜(即陶瓷膜)兩大類。無機膜在膜材料和膜組型式方面不如有機膜的多樣化，但它有其特殊及利基之處，兩者是截然不同的領域。常見之有機薄膜分離技術一般包括逆滲透(reverse osmosis)、奈過濾(nanofiltration, NF)、超濾(ultrafiltration, UF)及微濾(microfiltration, MF)等，而無機膜則可分為兩大類，其一為多孔無機膜(porous membrane)，其

二為緻密無機膜(dense membrane)。若依程序類別則大致可分為微過濾、超過濾、奈過濾(NF)、逆滲透(RO)、氣體滲透(GP)、透析(dialysis)、滲透蒸發(PV)、蒸氣滲透(VP)、膜蒸餾(MD)、電透析(ED)、電滲透(EO)、電泳(electrophoresis)、支撐液體膜(SLM)、氣體分離膜(分子篩薄膜、沸石薄膜或碳分子篩薄膜)等多種，其薄膜型態、分離驅動力、分離機制等特性均略有不同，也各有其不同之應用領域，如圖 3.4-1 所示。以下即針對滲透蒸發程序及滲透氣化程序進行說明：



資料來源：陳孝行，「兩岸薄膜分離程序之應用」，兩岸環保服務業交流平台電子報(2014/12/15)。

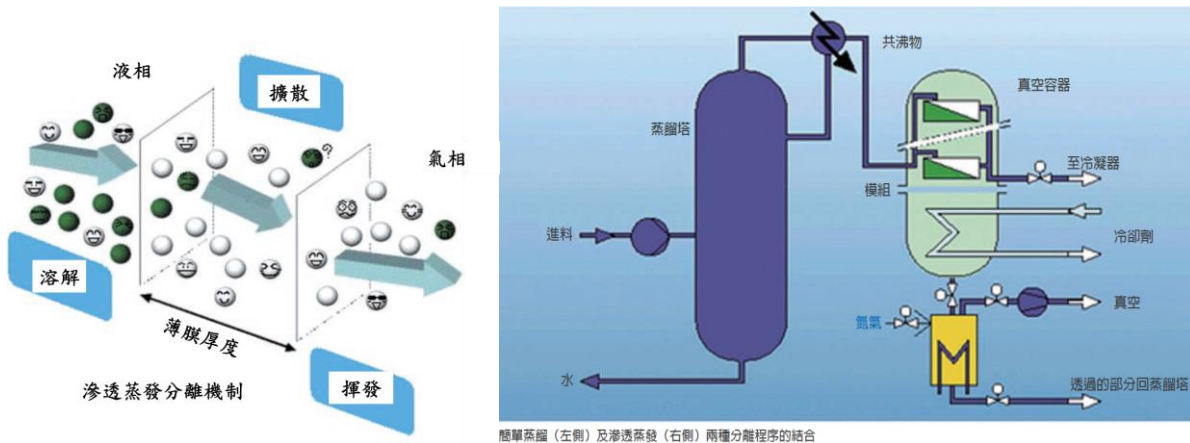
圖 3.4-1 薄膜程序之應用領域

(1)滲透蒸發程序

滲透蒸發是液體混合物在膜的一側與膜接觸，其較容易滲透成分溶解在膜上並擴散通過薄膜，在膜的另一側氣化，而達到分離。在膜的上游連續輸入經過加熱的液體，在膜的下游以真空泵抽吸造成負壓，使特定的液體成分不斷透過分離膜後形成蒸氣，再將此蒸氣冷凝成液

體。在滲透蒸發過程中，膜的上游側壓力一般維持在常壓，而膜的下游側維持低蒸氣分壓。

滲透蒸發的分離機制可分為3個步驟：混合液與薄膜表面接觸，並依進料物種的化學活性與對薄膜親和性的不同，造成進料溶解進入膜內；藉著進料分子本身的大小、形狀，以及進料和膜材特定的官能基親和性所造成擴散速率的差異，進而擴散通過薄膜；當滲透物質擴散透過膜材後，因為系統維持在低壓狀態，滲透物種會快速氣化而脫附，如圖3.4-2所示。



簡單蒸餾（左側）及滲透蒸發（右側）兩種分離程序的結合

資料來源：李魁然等，「綠金」純化技術-滲透蒸發，科學發展，2008年9月，429期。

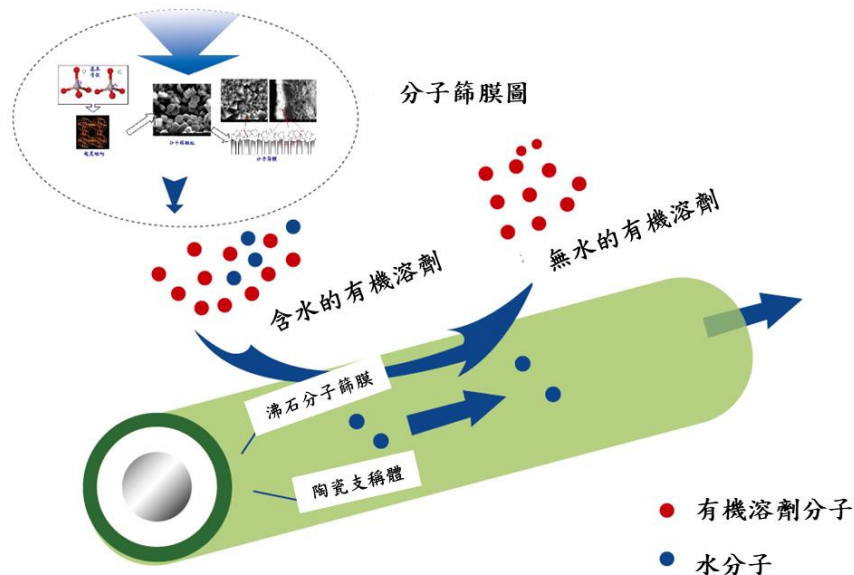
圖3.4-2 滲透蒸發技術

(2)滲透氣化程序

滲透氣化膜依材料分為滲透氣化有機膜和滲透氣化無機膜。滲透氣化無機膜採用分子篩作為膜層材料(核心分離膜層)(如圖 3.4-3 所示)，利用其規則的孔道使不同成分間的分子，依尺寸不同而被分離，A 型分子篩滲透氣化無機膜是通過 A 型分子篩，晶體在管式陶瓷多孔支持體生長形成一層緊密堆積的膜層，孔徑約為 4.1\AA ，大於水分子的動力學直徑(約 2.9\AA)，而小於大多數有機溶劑的分子直徑，對水分子表現出良好的選擇性；另一方面，分子篩骨架中矽鋁含量(Si/Al=1)使其具有極強的親水性，使得 A 分子篩滲透氣化無機膜特別適用於有機溶

劑脫水。

在滲透氣化無機膜脫水過程中，含水混合有機溶劑經預熱後進入膜組件進料側，而滲透側採用抽真空方式維持一個低壓環境(絕對壓力 2,000 pa 以內)。在進料側，水分子優先吸附於膜表面，在膜兩側利用水蒸氣分壓之壓差推動下透過膜，並在膜滲透側氣化為水蒸氣。經分離操作後，膜進料側出口得到無水的有機溶劑產品，而滲透側之組成成分經冷凝後進行廢水處理。



資料來源：武漢智宏思博環保科技股份有限公司網站
(<http://www.zhihongtec.com/a/jishufuwu/jishujianjie/>)

圖 3.4-3 滲透氣化技術

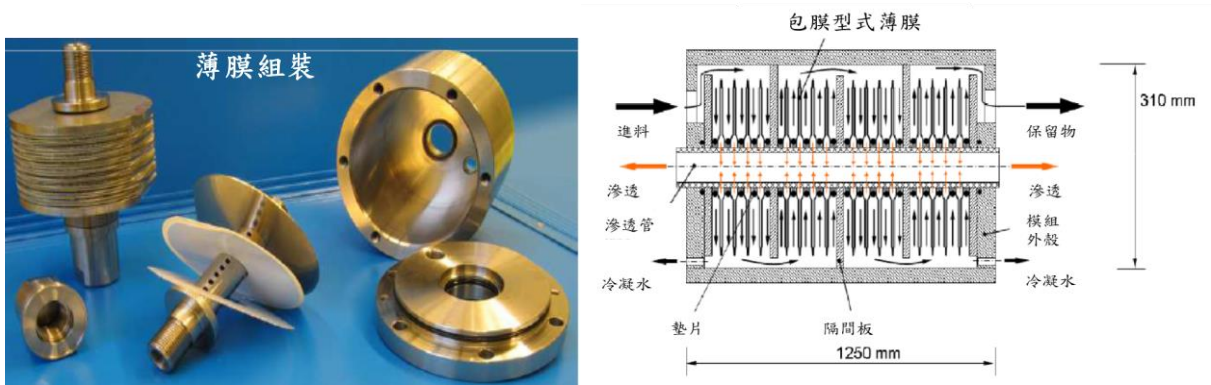
2.滲透蒸發和滲透氣化技術應用實例

(1)德國 GKSS 公司

滲透蒸發和滲透氣化作為分離液體和蒸氣混合物方式，相關案例如圖 3.4-1 所示。其允許各種可能的應用領域，包括：

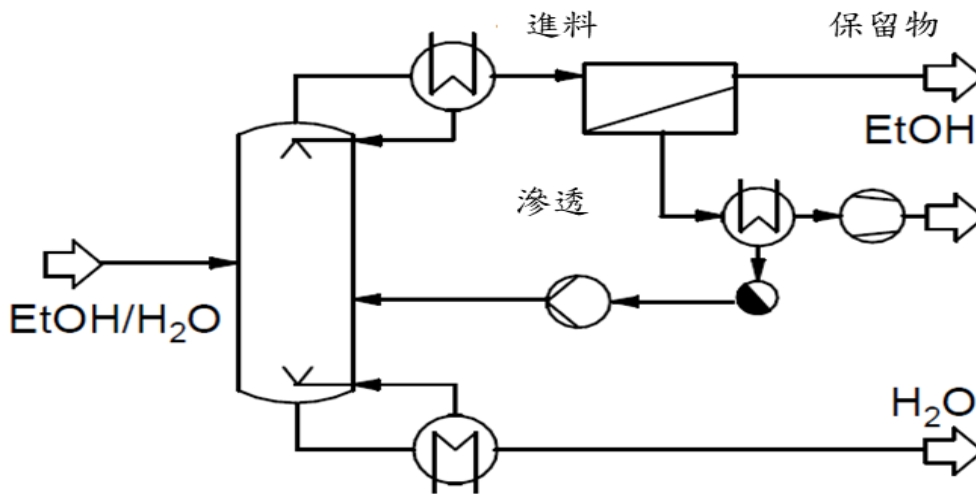
A.有機流體如醇，酮，醚等的脫水；

- B.將混合物從窄沸點(close-boiling)溫度分離到恆定(共沸)沸騰溫度；
- C.從水和空氣流中去除有機污染物；
- D.分離發酵產物；
- E.分離有機-有機液體混合物，滲透蒸發和蒸氣滲透作為分離液體和蒸氣混合物的滲透膜過程，允許各種可能的應用領域；



蒸餾/蒸氣滲透

混合程序



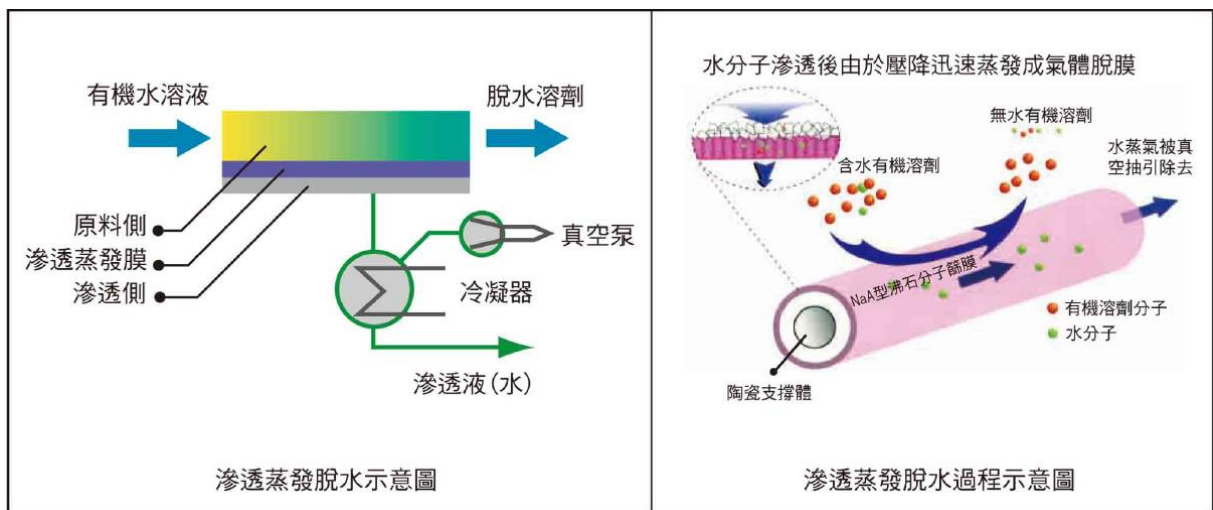
資料來源：https://dc.engconfintl.org/bioenergy_ii/10/

圖 3.4-1 德國 GKSS 公司高性能蒸氣滲透有機膜之應用流程實例

(2)日本旭化成、三菱、日立、東麗公司

滲透氣化技術是一種用於異體混合物分離的新型膜分離技術，與

傳統分離技術比較，滲透氣化具有分離效率高、能耗低、操作方便等優點。與其他膜相比，沸石分子篩膜由於其具有化學穩定性、熱穩定性、機械穩定性、孔徑均一性、通量大和分離係數高等優點，近年已於醇水分離中廣泛應用，並逐步應用於有機物間的分離。該技術應用於有機溶劑脫水，有望取代精餾、萃取及吸附等傳統的分離技術，在能源、石油化工、醫藥、環保等領域中，具有無限的應用前景。國內某家代理之相關PV技術案例應用，如圖 3.4-2 所示。



資料來源：<http://www.raye.com.tw/goods.php?pc=27&no=97>

圖 3.4-2 薄膜滲透蒸發技術應用案例

其滲透蒸發膜的技術優勢，包括：

- A. 節能成效高，與傳統的精餾、吸附方式相比可節能 50% 以上，可獲得 99% 以上的回收率；
- B. 無環保問題，將滲透蒸發技術應用於有機溶劑脫水，不須引入如共沸劑、萃取劑或吸附劑等三種成分，避免對環境或產品造成污染，可節省相當多的環保處理費；
- C. 節省空間，與傳統精餾分離設備占地相比可節省 4/5 以上。

(3) 美國頗爾(Pall)、法國諾華賽、法國達美工業及中國久吾高科公司

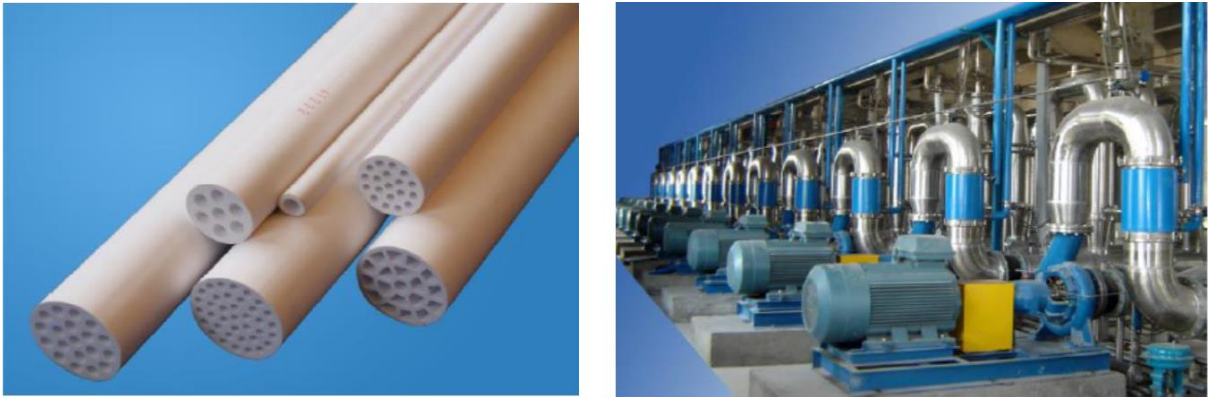
陶瓷膜作為無機膜的一種，是由氧化鋁(Al_2O_3)、氧化鋯(ZrO_2)和二氧化鈦(TiO_2)等粉體原料，經特殊技術製備而成的具有特殊選擇性分離功能的高性能膜材料，以其分離效率和分離精度高、化學穩定性好、耐酸鹼、耐高溫、耐有機溶劑、機械強度高等優異性能，在高溫、溶劑和反應體系等苛刻環境下的過程，工業分離和強腐蝕性、高溫、高鹽、含油、高懸浮物等特種水處理領域體現了良好的適用性。按孔徑分，陶瓷膜分為微濾膜、超濾膜和奈濾膜，如表 3.4-1 所示。

表 3.4-1 陶瓷膜的種類

陶瓷膜種類	孔徑範圍	過濾效果及其應用領域
微濾膜	$>0.1\mu\text{m}$	截留 0.1 微米以上的顆粒，能對懸浮固體、細菌、大分子量膠體等物質進行分離，可作為一般料液的澄清、保安過濾以及空氣除菌等，主要應用於污水、廢水處理以及工業特種分離領域。
超濾膜	$0.01\sim 0.1\mu\text{m}$	截留分子量在 1,000~300,000，能對細菌、膠體、馴服固體及大分子有機物進行分離，廣泛應用於料液的澄清、大分子有機物的分離純化、污水、廢水處理及回用、給水淨化、海水淡化預處理等領域。
奈濾膜	$<0.01\mu\text{m}$	截留分子量在 150~1,000 的範圍內，能對小分子有機物、二價離子等與水、無機鹽進行分離，可實現水的軟化、小分子有機物的濃縮等目的。

資料來源：http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201902181297798019_1.pdf

雖然無機陶瓷膜的單位面積膜價格較高，但從整個生命週期成本的角度考慮，陶瓷膜仍具競爭力，主要是因為(1)機械强度高以及耐高溫、耐酸鹼的特性，免去膜組件的高頻率更換，延長了膜的使用壽命；(2)膜通量比普通有機膜高近五倍，具備高級的處理效率。美國、日本、法國、德國及義大利已陸續出現商業化的陶瓷膜製造公司，生產陶瓷微濾膜和超濾膜在有機膜無法應用或者應用效果不理想的領域(如酸鹼、溶劑、高溫環境等)取得規模化的應用，圖 3.4-3 為中國江蘇久吾高科技公司的膜分離成套設備系統及代表型產品陶瓷膜。



資料來源：http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201902181297798019_1.pdf

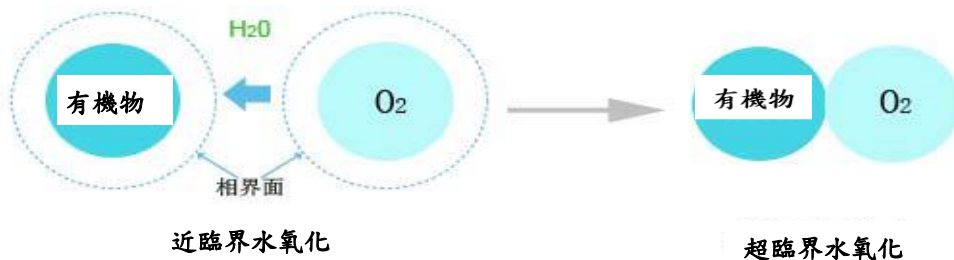
圖 3.4-3 中國江蘇久吾高科技公司的膜分離成套設備系統實例

3.5 超臨界水氧化技術案例

1. 超臨界水氧化技術原理

超臨界水氧化(Supercritical Water Oxidation, SCWO)是一項高溫高壓技術，利用水在超臨界條件下($P_c=220.55\text{ bar}$, $T_c=373.976^\circ\text{C}$)的特性，處理有機化合物、有毒廢棄物及有機反應(如選擇性氧化)。經超臨界氧化反應，C轉化為 CO_2 ，H轉化為 H_2O ，有機物中的Cl轉化為氯鹽，硝基化合物轉化為硝酸鹽，S轉化為硫酸鹽，P轉化為磷酸鹽。

超臨界水的獨特性質是超臨界水氧化技術的關鍵，包括 O₂ 和有機物質等氣體完全溶於超臨界水中。然而，無機鹽的溶解度急遽降低，有機物質溶解入超臨界水中，與 O₂ 完全混合，相界面消失，形成單一相，使有機物與氧氣能夠自由均相反應，進而提高反應速率，如圖 3.5-1 所示。



資料來源：<http://www.futurechemtech.com/data/scwo.ppt>

圖 3.5-1 超臨界水氧化機制

反應完成後，即生成包括水、氣體和固體的混合物，排放的氣體中無 NO_x、酸氣(如 HCl 或 SO_x 等)和粉塵微粒等，CO 的含量低於 10 ppm。完全符合排放水標準和氣體排放標準。另外，因超臨界水氧化反應具有極快的反應速度，所以即使以小型的設備，也可處理大量的廢水。超臨界水氧化技術的應用途徑如圖 3.5-2 所示。



Hirth, Th., et. al., 3rd international symposium on High Pressure Chemical Engineering, Zurich(Switzerland), 1996, p.163

資料來源：http://www.asia-giant.com.tw/tw_technologr_a03.html

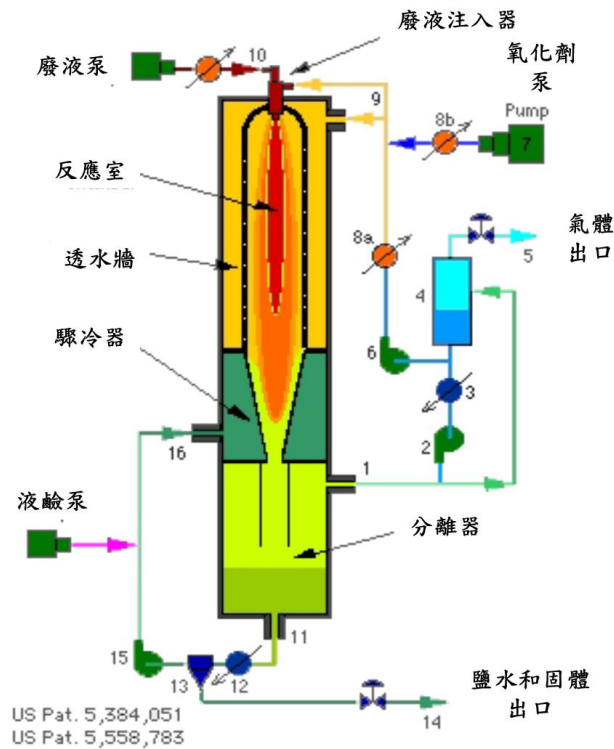
圖 3.5-2 超臨界水氧化技術的應用途徑

2.超臨界水氧化技術應用實例

目前全球廢棄物處理方式包括焚化、掩埋、再生及資源化等方式，基於資源永續經營的概念，各國政府極力尋求新技術替代前兩項處理方式，近年來許多專家學者投入超臨界水氧化技術之研究，發現其對於廢溶劑、放射性廢料、易燃的火藥及污泥中的戴奧辛或多氯聯苯之處理，均有不錯的成效。水屬於高極性的分子，在常溫常壓下具有較高的介電常數，因此對於低極性的有機分子之溶解效果不佳，而超臨界水氧化技術藉由提高溫度及壓力至超臨界狀態，降低水之介電常數，增加與低極性有機分子的溶解度，提高反應進行的速度，因此對於有害的有機分子之分解有不錯的效果。

超臨界水氧化技術在處理廢水上，能將水、氧化劑及氧氣完全溶為一相，故能提高其氧化能力，在處理有毒之事業廢棄物，能達到去毒化及礦化的效果，而破壞分解後的分子產物包括二氧化碳、水、氮氣及無機鹽等，因此減小對環境的衝擊，所以超臨界水氧化技術在處理環境污染物上亦具有相當大的潛力。目前發展 SCWO 技術的主要國家及應用包括美國、德國、法國、英國、瑞典、瑞士、西班牙、荷蘭、日本及中國大陸等，SCOW 具備之最大優勢為分解效率高：對某些難分解性有機物分解率甚至高達 99.9999% 以上、無二次污染、氧化反應速度迅速、設備小型化、高效節能等優點。

圖 3.5-3 所示即為受專利保護的新一代超臨界水氧化反應器“Transpiring-Wall SCWO Reactor”。這一超臨界水氧化反應釜最大的優點是超臨界水氧化反應物和反應釜內壁之間不再直接接觸，而是有一層採用特殊設計形成的去離子水隔離層。既能解決超臨界水氧化所帶來的嚴重腐蝕問題，又解決了無機物的沉積和工程堵塞問題。維持超臨界水氧化裝置的長時間連續安全運轉。



資料來源：<http://www.futurechemtech.com/data/scwo.pdf>

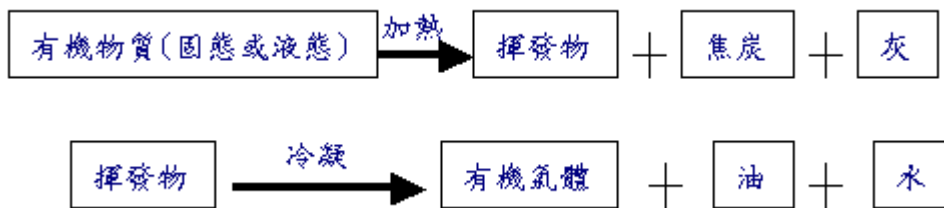
圖 3.5-3 中國未來化學科技公司超臨界水氧化反應器

3.6 有機廢棄物碳化資源回收處理技術案例

1. 有機廢棄物碳化資源回收處理技術原理

碳化反應可分為低溫與高溫兩種，在低溫帶 200~500°C 時，整個程序是以反應速率控制(圖 3.6-1)，因其在低溫狀態下碳化反應所需要的活化能很大，故其反應速率很慢。而在 800°C 溫度時，則由擴散速率控制程序之進行。碳化反應本質上屬熱裂解反應，乃將固態或液態有機物質在缺氧環境下加熱(通常在 400~600°C)，促使有機物質之化學鍵結斷裂或破壞，所產生之化學分解反應。產生斷鍵反應後，部分有機物質之分子鏈會在適當環境進行重組，形成新的有機物質。另外，部分有機物質則保持低分子形態，經過一系列的物理化學反應後，產生包括氣相之碳氫化合物、水蒸汽、以及含固定碳之焦炭與灰分之固體殘留物。若再經過適當的冷凝程序，氣

相部分產品會以液態之油與水的形態出現。



資料來源：https://www.ftis.org.tw/cpe/download/she/Issue21/tec21_2.htm

圖 3.6-1 200~500°C 之碳化程序

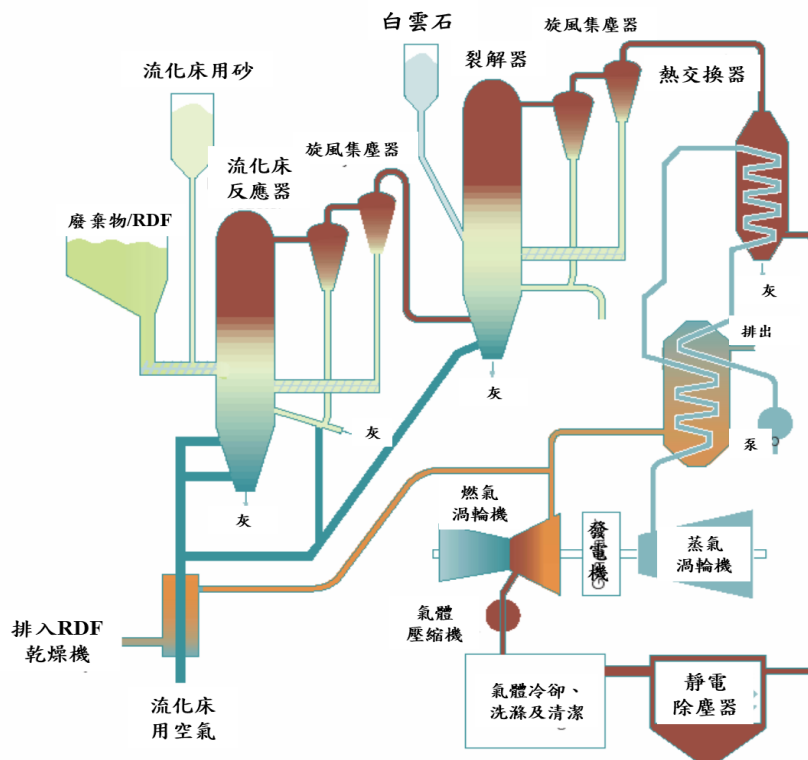
以加熱方式區分，碳化反應可分為直接與間接加熱碳化。其中直接加熱碳化反應所得之揮發性有機氣體，因被空氣中的大量氮氣稀釋，故所得之熱值較低。而以間接加熱碳化方式所得之揮發性有機氣體，因無被空氣中大量氮氣稀釋之考量，故具有較高之熱值。碳化反應產生之有機氣體若不採氧化燃燒，而將其冷凝，則可回收油、水混合物。再加以蒸餾程序處理，便可得各種油品，為資源化重要產物。由上述可知，碳化反應操作溫度之選擇，除須考量廢棄物本身之反應性外，更需視所欲得產品而定。至於揮發性氣體成分與碳化操作溫度，則較無關聯性。由於碳化反應為吸熱反應，故其反應器內之熱傳方式及效率，即為碳化反應設備選擇之首要考慮條件。其中，以間接加熱方式進行碳化操作，所得產品之品質較直接加熱方式為佳，但缺點為其熱傳效果較差，所消耗能源相對較多。故碳化反應設備之選擇，應綜合考量其產物品質及其經濟性等條件。

2. 有機廢棄物碳化資源回收處理技術應用實例

(1) 瑞典 TPS Termiska 公司

瑞典 TPS Termiska (Termiska Processer AB air gasification process) 公司氣化技術是一種熱轉化過程，會產生熱能和可燃性氣體產物。相

反地，燃燒僅產生熱能，最常見的是在鍋爐中產生蒸汽，以利用蒸汽渦輪機產生電力。而通過氣化，產生可燃氣體是其重要性的關鍵，氣體燃料利用使得往復式發動機，燃氣渦輪機和燃料電池可用於發電，從而提高電效率，因此使氣化技術應用於發電的高效配置變成可能，此技術稱為整合氣化複循環系統(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)，如圖 3.6-2 所示。此外，氣化可以促進生物質應用於產生熱和電力，因為氣體燃料可以通過來自氣化設備的管道分配，以應用於現場或其他位置。除產生熱量和功率之外，還有各種可能的氣化聯產品，這可以提高氣化項目的成本效益。產物氣體可用作原料以產生氫氣和液體烴。生物碳有幾個潛在的市場，也為氣化技術提供碳中和或減碳解決方案的潛力。燃燒和氣化產生之碳黑或飛灰，也可以在市場上銷售，如圖 3.6-3 所示。



資料來源：https://www.aec.gov.tw/webpage/policy/plans/files/plans_04_e-94_5.pdf

圖 3.6-2 TPS 公司 IGCC 程序整體流程圖



氣化內燃機



氣化產品碳黑

資料來源：<http://gasifiers.bioenergylists.org/products>

圖 3.6-3 裂解和氣化之相關產品圖

(2) 日本巴工業株式會社

日本巴工業株式會社的碳化系統係由“導熱換熱乾燥器”和“螺桿碳化爐”所組合而成(如圖 3.6-4 所示)，將污水污泥等有機污泥有效地產生成碳化物的系統。由於碳化過程是間接加熱和螺旋輸送，因此可以生產碳化物產品。而廢熱回收機制可同時乾燥污泥，同時大大降低了燃料成本和二氧化碳排放量。導熱換熱乾燥機傳熱面積大，幾乎沒有廢熱損失，且熱介質流經多管系統的加熱器，污泥在旋轉的同時被乾燥，使提高乾燥的效率。碳化物亦可在碳化爐中通過間接加熱和螺旋輸送來生產，更有效碳化乾污泥。由於此設備是一種間接加熱方法，具有良好的可操作性和螺桿輸送能力，因此可以根據產品用途生產碳化物，同時亦可將條件從高溫碳化改為低溫碳化。

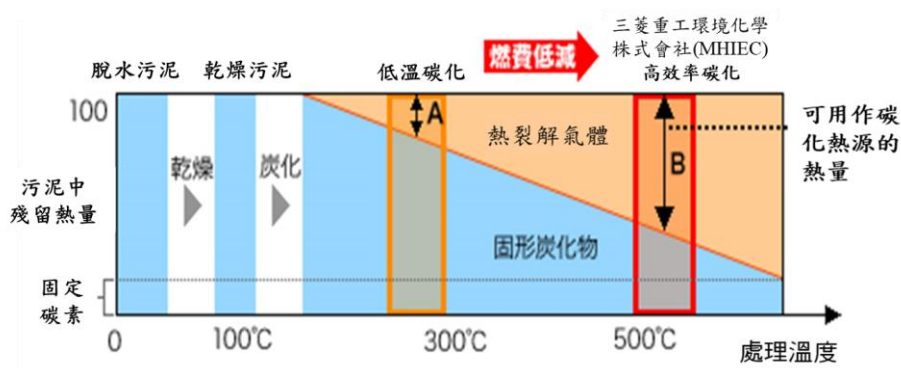


資料來源：<https://www.tomo-e.co.jp/machinery/products/item/carbonizingfurnace.html>

圖 3.6-4 日本巴工業株式會社碳化爐設備

如圖 3.6-5 所示，隨著碳化溫度的逐漸升高，熱裂解氣體生成，可用作碳化熱源的熱量增加，減少了輔助燃料的使用量和二氧化碳的排放。其優點包括：

- A.操作費用極低，熱能可回收利用；
- B.有機污泥碳化，總量減少可 90% 以上；
- C.碳化產品無害，具有廣泛的用途；
- D.操作簡單，處理時間短、占地面積小。



資料來源：http://www.mhiec.co.jp/jp/products/water/sludge/sludge_carbonization_facility.html

圖 3.6-5 乾燥碳化流程

3.7 電漿能資源回收處理技術案例

1. 電漿能資源回收處理技術原理

電漿技術是一高溫熱裂解技術，另一方面電漿將能源導入反應器中進行化學反應，其中控制物理與化學轉化的平衡反應，隨著大量的原子、離子與自由基起始鏈反應及造成特定組成之氣體。在氣體熵與交流電漿放電下高效率電能轉化與高熱能及工作氣體的激化會提升電漿化學反應的效能。因此電漿廢棄物處理技術與合成氣產生的應用是混合熱氣化技術的一環，亦是能達成能資源整合及回收的最佳處理技術之一。

電漿技術產生高熱進而將物質玻璃化或促使有機分子斷鍵，同時電漿中帶電離子經適當加速，使其具有高能量或產生高活性氣體的自由基而達到破壞去除之目的，最大特點是具有乾淨、無二次公害、低環境負荷效益及廣泛之應用性。依電漿粒子的能量及密度不同可分為「熱電漿」及「非熱電漿」兩系統，其中熱電漿系統完全離子化的溫度約 $2,000\sim 3,000^{\circ}\text{C}$ ，相較於燃燒所能達到的氣體溫度($1,000\sim 2,000^{\circ}\text{C}$)高出非常多，因此可應用於氧化或破壞氣態污染物、電漿玻璃化技術處理核廢料、電漿融熔處理廢棄物使其內含物質安定化及電漿火炬處理廢液或難分解氣體等應用。而非熱電漿系統中由於氣體溫度一般小於 $1,000^{\circ}\text{C}$ ，所以一般應用於廢氣中 NO_x 、 SO_x 控制、 VOCs 氧化、臭味氣體分解及溫室效應氣體轉化等。高溫電漿處理廢棄物過程中，因為溫度及環境(空氣、氮氣或各種惰性氣體)讓物質進行一連串之反應，有機化合物經分解、揮發、熱解或氧化最終完全轉換成 CO_2 及 H_2O ，而無機物則經熔融/玻璃化產生矽酸鹽網狀架構將重金屬封存於熔渣中，已具無害、安定化，可作為再

利用之資源。

目前電漿處理技術發展較成熟的國家包括：美國、加拿大、法國、英國、瑞士、日本及以色列等，其中美國洛克希德集團下的Retech 公司、西屋環境公司(Westinghouse Environmental Service)、皮特國際公司(PEAT International)、法國航太公司(Aerospatial Espace & Defence)、英國Tetronics 公司及以色列EER 公司等之電漿處理技術，皆已達商業化運轉的階段。

2.電漿能資源回收處理技術應用實例

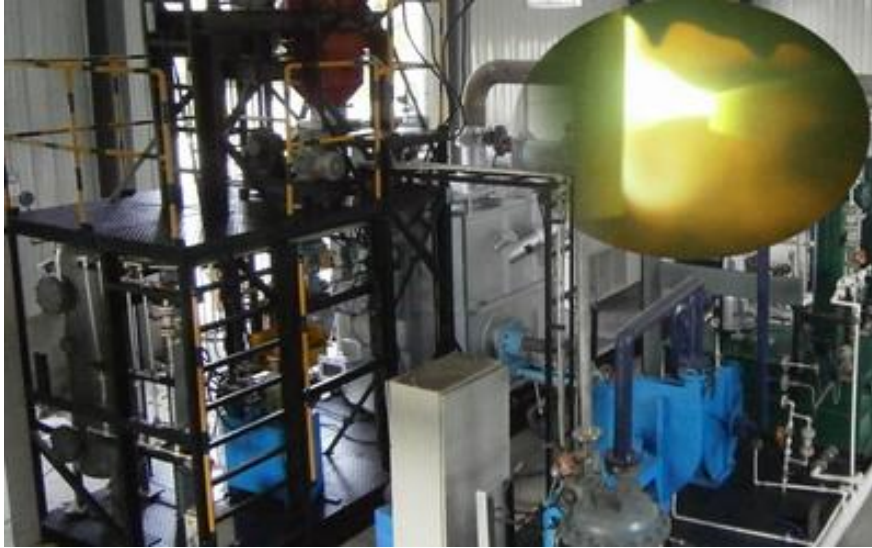
美國 PEAT International 是一家廢棄物轉化能源公司，專門從事電漿熱解還原回收(Plasma Thermal Destruction Recovery, PTDR)技術，用於處理和回收各種廢棄物，包括：工業廢棄物，有害廢棄物和醫療廢棄物。PEAT 公司的城市固體廢棄物解決方案是熱減容與轉化(Thermal Volume Reduction & Conversion, TVRC)技術：一種將熱量減少系統與其核心 PTDR 系統相結合的創新系統。PEAT 公司的核心 PTDR 技術利用其「單程式」電漿熱能處理技術，能夠在 1,500°C 下，透過該技術將有害廢棄物之分子分解轉為可回收的無毒終端產品、合成氣體與熱能(能源回收來源)、金屬和玻璃化基質，但不會產生二次污染且符合最嚴格的環境指標，這種技術經過驗證，具有成本效益，並且具有商業上可行的廢棄物處理、回收和替代資源生產解決方案。目前應用於美國、中國及台灣，在台灣的成功大學則應用於處理實驗室廢棄物等。PEAT 公司的技術設備如圖 3.7-1 所示。PTDR 技術具有下列幾項特色：

- A.領先之綠色技術，可有效安全地轉換“廢棄物”為“能源”。
- B.高溫電化學反應槽，有效率、清潔燃燒系統。
- C.產生之電力可直接供應廠內或廠外使用。
- D.可處理各種不同廢棄物。

E.配合需要可組裝成固定或移動式，減少運輸成本與責任風險。

F.進料與操作設備簡單。

G.產生之合成氣體可替代化石燃料，減少掩埋需求。



資料來源：<http://www.peat.com/shanghai-china.html>

圖 3.7-1 PEAT International 電漿熱能廢棄物轉化能源系統

3.8 廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術評析彙整

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

表 3.8-1 廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術評析

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	成熟及先進技術
蒸餾	1. 多效蒸餾技術、2. 機械式再壓縮技術、3. 共沸蒸餾與多成分蒸餾技術	當混合物中各種成分的揮發性不同，通過加入熱量(加熱)或取出熱量(冷凝)的方法，使混合物形成氣液兩相系統，輕沸物集中在氣相，重沸物集中在液相，使混合物分離或提純之操作統稱蒸餾。	1. 多效蒸餾技術：適合相對揮發度小、分離板數多、回流比高的系統，具節能潛力的蒸餾技術之一。 2. 蒸汽再壓縮技術：高效能、運轉成本低，適用於蒸餾、蒸發即能縮系統。 3. 日本瑞環公司溶劑回收設備：適用於普通蒸餾無法分離的共沸廢液或含樹脂廢液，以及沸點高於水、親水性或與水不共沸的 VOC 回收，操作及維護便利。	醇、煙、酮、醚、酯、胺、氮化合物等廢溶劑	1. 多效蒸餾技術：瑞典 Alfa Laval 公司、以色列 IDE 公司、美國 Badger 公司等。 2. 蒸汽再壓縮技術：加拿大 Whiting 公司、德國 GEA 公司等。 3. 日本瑞環公司溶劑回收設備。
超臨界萃取	超臨界水氧化技術	利用萃取溶劑對混合物中溶質的溶解度不同，將之分離的方法稱為溶劑萃取技術。	超臨界水氧化反應器：具備之最大優勢為分解效率高，對某些難分解性有機物分解率甚至高達 99.9999% 以上，以及無二次污染、氧化反應速度迅速、設備小型化、高效節能等優點。	廢溶劑及多氯聯苯溶劑等	中國未來化學科技公司超臨界水氧化反應器
薄膜分離	1. 有機膜材料(逆滲透、奈過濾、超濾、微濾)、2. 無機膜材料(多孔無機)	薄膜分離技術係藉著薄膜相形成一物理障礙，並利用薄膜之選擇性質，讓混合物溶液中某些成分通過薄膜而阻止其他成分透過，以進行分	1. 有機膜：分離液體和蒸氣混合物的最有效之方式之一，較無機膜成本便宜。 2. 分子篩膜：具有分離效率高、能耗低、操作方便等優	醇、煙、酮、醚、酯等廢溶劑及廢混合溶劑	1. 有機膜：德國 GKSS 公司。 2. 分子篩膜：日本旭化成、三菱、日立、東麗公司等。

	膜、緻密無機膜)	離、濃縮與純化的方法。	<p>點。與其他膜相比，沸石分子篩膜由於其具有化學穩定性、熱穩定性、機械穩定性、孔徑均一性、通量大和分離係數高等優點。</p> <p>3.陶瓷膜：分離效率和分離精度高、化學穩定性好、耐酸鹼、耐高溫、耐有機溶劑、機械强度高優異性能，在高溫、溶劑和反應體系等苛刻環境下的過程工業分離有良好的適用性。</p>		3.陶瓷膜：美國頗爾(Pall)、法國諾華賽、法國達美工業及中國久吾高科公司等。
碳化	1.低溫碳化技術(熱解反應)、2 高溫碳化技術(氣化反應)	<p>碳化反應本質上屬熱裂解反應，乃將固態或液態有機物質在缺氧環境下予以加熱(通常在400~600°C)，促使有機物質之化學鍵結斷裂或破壞，所產生之化學分解反應。</p>	<p>1.整合氣化複循環系統(IGCC)技術可回收蒸汽與電力，有副產物氫氣和液體烴，以及生物碳等回收效益大。</p> <p>2.採用最有效地將污泥碳化的溫度，與使用外部燃料(重油等)作為碳化熱源的其他系統相比，減少了輔助燃料的使用量和二氧化碳的排放。</p>	有機殘留物或複雜的有機溶劑及廢液	<p>1. 瑞典 TPS Termiska 公司整合氣化複循環系統(IGCC)技術。</p> <p>2.日本巴工業株式會社、荏原集團、三菱重工環境・化學工程株式會社</p>
電漿	電漿熱能轉化技術	<p>電漿熱能處理技術能夠在1,500°C下，透過分子分解將有害廢棄物轉為可回收的無毒終端產品、合成氣體與熱能(能源回收來源)、金屬和玻璃化基質。</p>	<p>電漿熱解還原回收(PTDR)技術是領先之綠色技術，可有效安全地轉換“廢棄物”為“能源”，操作簡單可處理多種廢棄物。</p>	混合溶劑、多氯聯苯溶劑等有害事業廢棄物	美國 PEAT International 公司電漿熱解還原回收(PTDR)技術。

四、含銅廢棄物高值化及資源循環技術案例

4.1 電解精煉法技術案例

1. 電解精煉技術原理：

電解精煉操作原理主要藉外加電場導入直流電，使氧化還原反應中之陽極釋放出電子，產生氧化反應，陰極則隨即獲得電子產生還原反應。

一般商業化的電解回收系統皆有一定的規格，系統設計根據的參數有陰極板之表面積、每小時可回收的貴金屬量、每電解單元所含之陰極板數等，以一般陰極表面積電解沈積銅的回收率約為 $15.8 \text{ g/hr} \cdot \text{ft}^2$ 為例，建議設計時，最好在銅回收量預估上加安全係數，以決定所需之電解系統的規格。

2. 電解精煉技術應用實例

(1) 加拿大 EMEW 公司

電解精煉技術常見於應用印刷電路板業、電鍍業之廢水處理，藉著氧化作用，可以分解廢水中的氰化物等化學物質，並減少水洗用量、廢水產生量以及廢化學品的排放。

EMEW® 原由澳洲電金屬科技公司 (Electrometals Technologies Limited Co.) 所創新發展的電解回收技術，2014 年總公司遷移至加拿大，開發可克服傳統電解回收槽的程序功能缺陷與最低可處理濃度的限制，並且可以靈活的安裝應用。傳統電解與 emew 技術示意圖如圖 4.1-1 所示。傳統的電解方式將陽極和陰極置於緩慢循環或停滯的電解液中，金屬離子最終通過擴散到陰極被鍍上。以 emew 電解技術，電解質以非

常高的流速迅速循環通過陽極和陰極，增強傳量傳遞，有效提電解效率和回收率。



資料來源：emew，<https://emew.com/emew-electrowinning/>

圖 4.1-1 傳統電解與 emew 技術示意圖

emew 管式電解還原設備為密閉式管狀電解槽，可提供電解液快速攪拌，克服低濃度離子之質傳問題，所以於高電流密度操作（可高於 300 A/m^2 ）時，可大幅度降低電極面積，並可有效回收處理至低金屬濃度（小於 200 ppm ），其陰陽極採管狀設計，電力線分佈均勻，使得電解回收金屬之均勻性較高，並置入可分離式陰極板，可使用天車直接吊取銅管，較一般平板式電解還原設備節省作業時間。emew 相關技術說明如下。

A. emewPlate

當標的金屬濃度大於 10g/L 時，emewPlate 管式電解裝置通常用於高濃度的電解質。emewPlate 管式電解裝置通常用於回收銅、鎳和錫，各種應用範圍包括採礦、精煉和回收。當需要預濃縮標的金屬時，emewPlate 管式電解裝置還可與溶劑萃取(solvent extraction, SX)和離子交換(ion exchange, IX)配對。設計圖如 4.1-2。

透過拆卸上端蓋並使用特殊設計的收割機頭和高架提昇機，可以輕鬆提取陰極生成金屬，可重複使用的不銹鋼起始板從金屬管中釋放並插回到管式電解裝置中，以進行下一個電鍍循環。每個管式電解裝置整個過程通常只需 30~60 秒。依據所用的金屬和電流密度，單個 emewPlate 管式電解裝置的生產率可高達 15 kg/d。



資料來源：emew，<https://emew.com/emew-electrowinning/>

圖 4.1-2 emewPlate 產品設計圖示

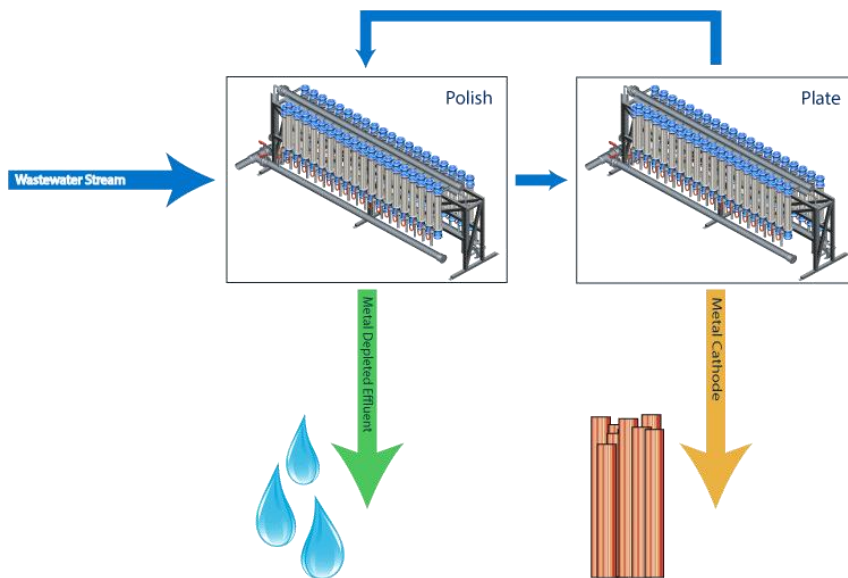
B. emewClean

emewClean 是 emew 管式電解裝置設計獨特設計，專為環保應用而設計。這種專用的混合技術利用 emew 高表面積 3D 陰極與

emewPlate 技術組合，從稀釋流體中回收金屬及生產高純度陰極。這種創新、附加性的組合方式進一步擴大 emew 的電解技術之應用。emewClean 是一種先進的金屬回收系統，能夠回收金屬濃度達 5 ppm。emewClean 其電解精煉設備示意如圖 4.1-3 所示，其電解銅產品如圖 4.1-4 所示。

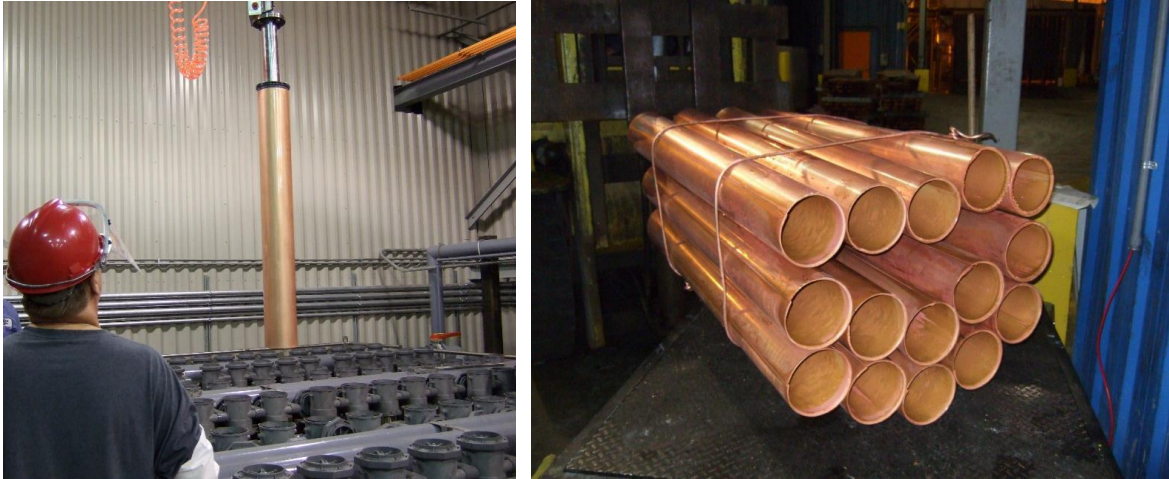
emewClean 應用包括：

- 半導體製造工廠的含銅廢棄物。
- 沖洗浴槽和從電鍍設施析出之含銅廢液。
- 不能用傳統方法處理任何過於稀釋的含銅廢水。



資料來源：emew，<https://emew.com/emew-electrowinning/>

圖 4.1-3 emewClean 複合技術組合示意圖



資料來源：emew，<https://emew.com/emew-electrowinning/>

圖 4.1-4 應用 EMEW 電解精煉技術得到銅產品

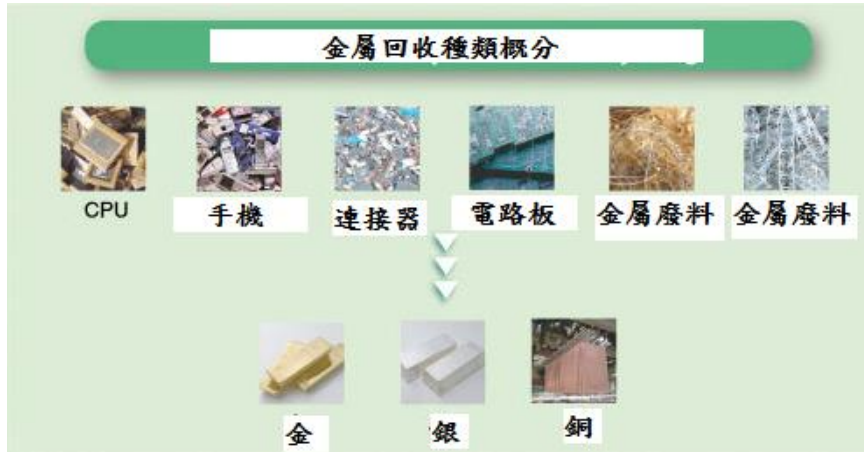
4.2 熔煉法技術案例

1. 熔煉法技術原理：

利用焚化法回收印刷電路板廢料中的金屬，含金屬之印刷電路板廢料經機械粗破碎後，送入焚化爐中焚燒，將所含約40%的樹脂分解破壞，剩餘殘渣即為裸露之金屬及玻璃纖維，經粉碎後即可送往金屬冶煉廠進行金屬回收。由於金屬與玻璃纖維已非黏結狀態，故適合以濕法或火法冶煉回收。不過因含金屬之印刷電路板廢料為有害事業廢棄物，焚化過程可能排放有害空氣污染物，故相對焚化爐及空氣污染防制設施的設置規範要求較嚴格。

2. 熔煉法技術應用實例-日本同和環保再生事業公司(DOWA ECO SYSTEM)

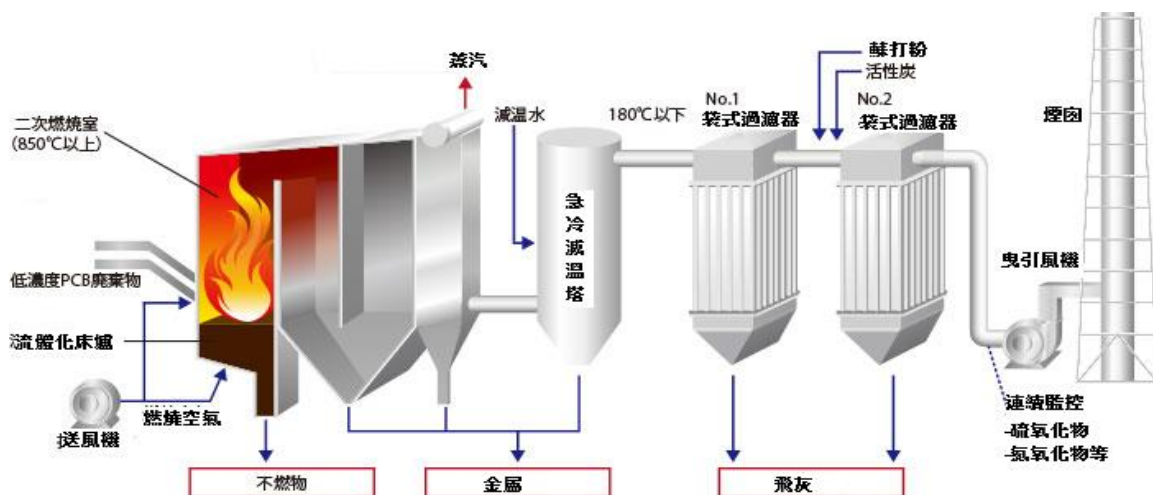
日本 DOWA 集團已整合為日本最大的冶煉及廢物回收業務，利用冶煉技術處理廢棄物。廢物處理包括電子零組件、行動電話、廢棄消費電子產品及廢汽車。子公司 DOWA ECO SYSTEM 原為 DOWA 的開採和提煉事業中提煉貴重金屬，如存在於礦石中非常低的濃度之金、銀等。目前從事各種報廢電腦、電路板、手機、消費電子產品和家電等設備有價金屬的回收。圖 4.2-1 為 DOWA 集團利用冶金技術從電子廢棄物中回收不同的金屬元素，採用先進的冶金技術回收多種不同的金屬元素。



資料來源：DOWA 官網，<https://www.dowa-eco.co.jp/>

圖 4.2-1 DOWA ECO SYSTEM 以冶金技術回收不同的金屬元素

DOWA ECO SYSTEM 公司於 2005 年於秋田縣和岡山縣兩個地點 (ECO-SYSTEM KOSAKA、ECO-SYSTEM OKAYAMA) 各設置一套可同時回收金屬和蒸汽之流體化床焚化爐。從流體化床排出底渣中回收金屬 (主要是黑色金屬和有色金屬的混合金屬)；焚化爐之廢熱產生蒸汽，回收為工廠所須之熱能，多餘之蒸汽還可提供給鄰近的工廠製程使用及發電。其處理流程如圖 4.2-2 所示。



資料來源：<https://www.dowa-eco.co.jp/EKS/facility>

圖 4.2-2 ECO SYSTEM KOSAKA 金屬和蒸汽回收處理流程

4.3 直接冶煉法技術案例

1. 直接冶煉法技術原理：

利用直接冶煉法回收印刷路板廢料中的金屬，經焚化處理後之印刷電路板廢料可供為陽極精煉或燒結之原料，而未經焚化處理之印刷電路板廢料亦可直接供為烘焙之原料，經烘焙處理後即可再送燒結製程進行處理。此類金屬冶煉廠係為綜合性廢五金再生冶煉廠，其製程繁複包括前處理、冶煉、精煉等程序，所產出之產品包括各類貴金屬與重金屬，其品質可直接供入金屬原料市場。

2. 直接冶煉法應用實例

(1) 連續製銅法—日本三菱綜合材料直島製煉所

三菱綜合材料公司的金屬事業開始於 1873 年的吉岡礦山。以銅為主的金屬材料是在各個產業中不可或缺的材料。在長達一個多世紀的時間裡，支撐了日本的產業與社會的發展。直島製煉所前身是三菱公司於 1917 年設立之中央冶煉廠，進行貴金屬的回收和再利用。(工廠外觀照片如圖 4.3-1 所示)

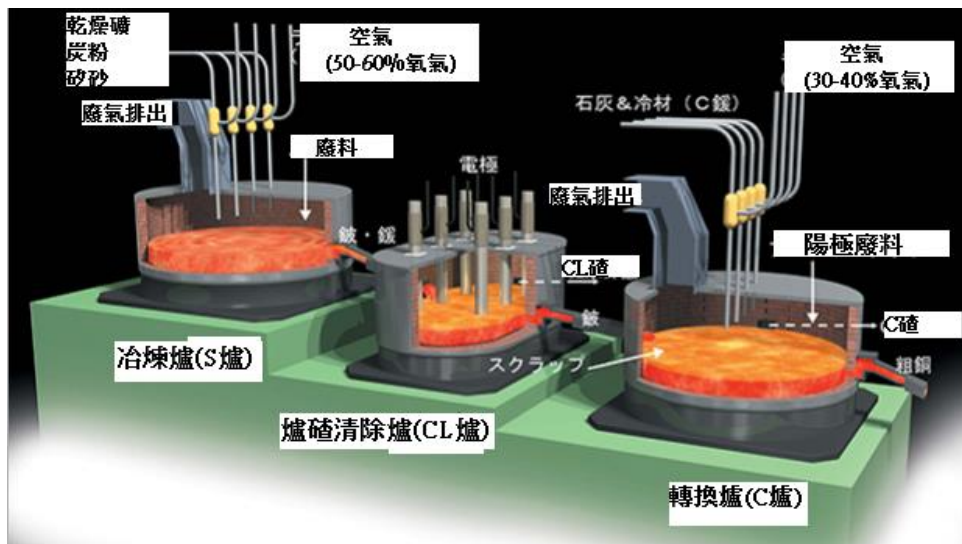


資料來源：<http://www.mmc.co.jp/corporate/zh/business/metals/>

圖 4.3-1 日本三菱綜合材料直島製煉所

三菱綜合材料開發的「三菱連續製銅法」實現高效率、無公害和穩定生產，於日本直島冶煉廠和小名濱冶煉株式會社及海外通過錦石冶煉廠(印尼銅冶煉公司)進行高品質電解銅的生產。連續製銅技術使用熔煉爐(Smelting Furnace, S 爐)、爐渣清除爐(Slag Cleaning Furnace, CL 爐)和連接在熔爐之間的轉換爐(Converting Furnace, C 爐)生產用於精煉的粗銅(純度可達 98.5%)，示意如圖 4.3-2 所示。

將乾燥礦和助熔劑材料(例如矽砂)以噴槍注入 S 爐，以富氧空氣(50~60% 氧氣)氧化，生成熔融混合物從 S 爐溢流到 CL 爐，CL 爐由兩組三角形電極(2,100 及 1,500 KVA)加熱，由於比重不同，熔融硫化物混合物與爐渣分離，爐渣溢出造粒後出售給水泥廠，而熔融硫化物混合物(Cu 含量約為 68%)則不斷地被虹吸出來轉移到 C 爐。熔融硫化物混合物和助熔劑(石灰石)與富氧空氣(30~40% 氧氣)反應形成粗銅，再利用比重差將其與爐渣分離。爐渣(Cu 含量約為 14%)再返回 S 爐，粗銅則送到陽極爐精煉。各爐產生之廢氣收集處理，不致造成空氣污染。由於設計爐子的數量低於傳統製程，可提升生產效率，連續式的操作更為節能並降低操作成本。



資料來源：本計畫標註，<http://www.mmc.co.jp/naoshima/process/mitsubishiprocess.html>

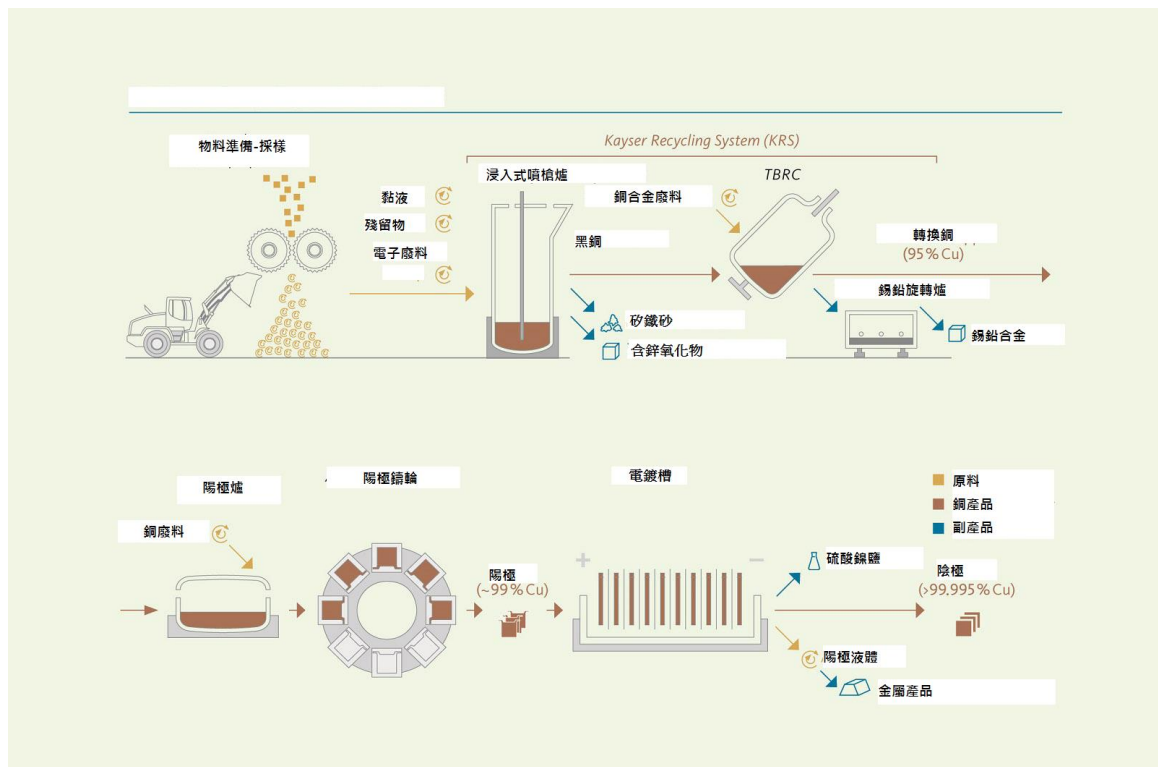
圖 4.3-2 日本三菱綜合材料連續冶煉銅技術流程

三菱連續製銅技術優點包括：

- A. 銅回收率高，廢渣中的銅含量低（0.6~0.7%）。
- B. 減少廢氣排放，可減少有害氣體排放並減少污染防制成本。
- C. 廢氣中含 SO₂ 濃度高且穩定，只要設計簡單的製酸設備可將爐廢氣中的 SO₂ 轉化為可銷售的硫酸。
- D. 操作靈活度高，可隨時調整進料量及產品純度。

(2) 凱撒回收系統(Kayser Recycling System, KRS)

北德精煉冶煉廠(Norddeutsche Affinerie AG)是目前世界上最大最先進的再生銅精煉廠，於2009年更名為 Aurubis。位於德國呂嫩鎮(Lünen)的 Aurubis 回收中心採用 KRS 適用於含銅廢棄物之再生回收，其製程流程如圖 4.3-3 所示。



資料來源：<https://www.aurubis.com/en/products/recycling/technology>

圖 4.3-3 Aurubis 採用 KRS 流程圖

KRS 以 1 台 ISA 爐 (ISASMELT furnace) 取代 3 台鼓風爐和 1 台 PS 轉換爐 (Peirce-Smith Converter)，可處理含銅 1%~80% 的殘渣和雜銅；ISA 爐以批次進行熔煉和吹煉，含銅殘渣和雜銅先在 ISA 爐中進行還原熔煉，產出黑銅和矽酸鹽爐渣，黑銅繼續吹煉，產出含銅 95% 的粗銅。

概述如下：

A. 進料處理

依據不同廢棄物(如污泥、電子廢料等)之硬度及成分，進行破碎及調配混合，以利後續處理程序。其中分離出來的鋁和塑料再出售給其他回收公司。

B. 冶煉和精煉

冶煉和精煉是 KRS 的首先步驟，設置浸入式噴槍爐(爐高約 13 米)將浸沒式燃燒噴槍，從上方浸入爐內，提供製程所須之熱源。廢棄物在浸入式噴槍爐中還原反應非常快，產生含銅混合物進入下一單元，副產物為矽鐵砂及含鋅氧化物。

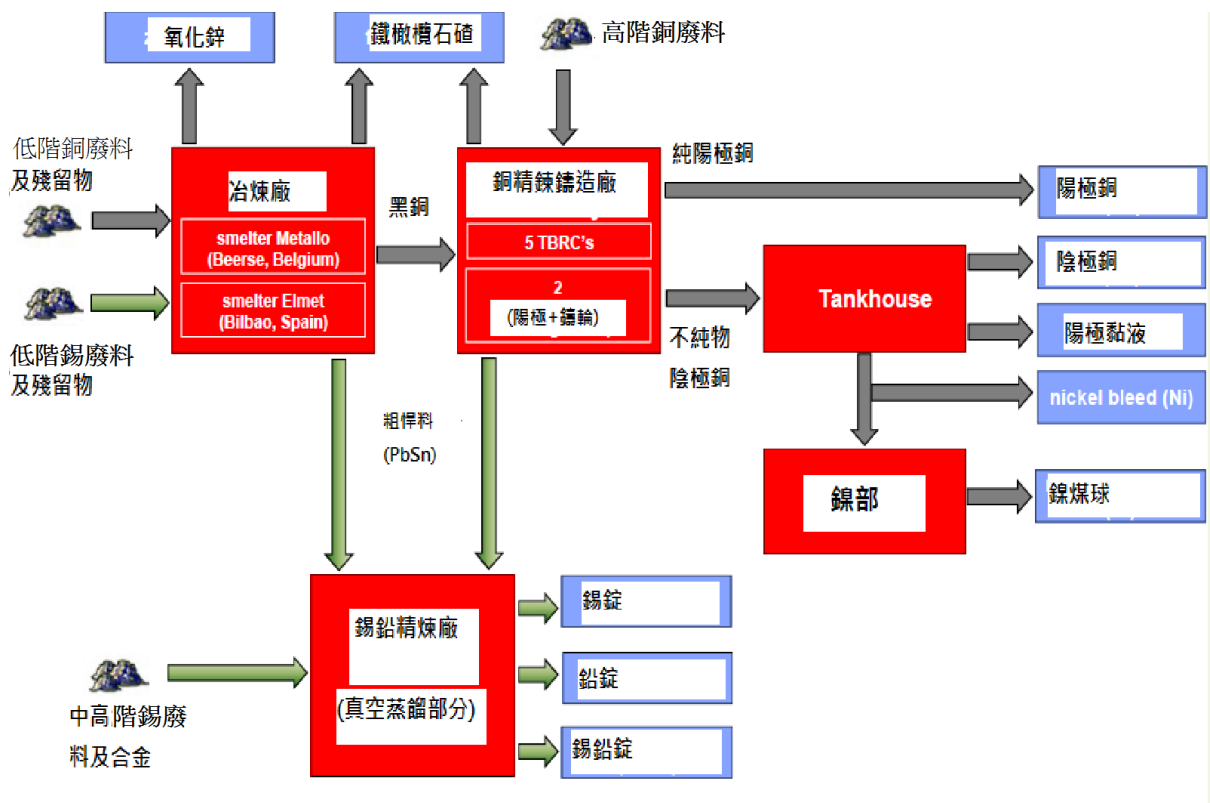
將含銅混合物送入頂吹式旋轉轉換器 (Top Blown Rotary Converter, TBRC) 中，可將銅含量進一步純化至 95%，另生成含錫鉛渣。錫鉛渣在旋爐中加工成錫鉛合金。氧化鋅則收集煙道集塵灰中。

C. 二次銅生產

將 KRS 獲得之 95% 銅，利用陽極爐中以熔融形式進一步加工，經空氣和氧氣氧化後，再以天然氣脫氧，可獲得 99% 陽極銅。再經由電解程序可製備純度 99.995% 陰極純銅。重要的副產物，包括陽極泥中金和銀，電解液中硫酸鎳。

(3) 氧氣頂吹旋轉爐 (TBRC) 冶煉技術-比利時 Metallo-Chimique

Metallo-Chimique 冶煉廠 TBRC 可處理之廢料成分的範圍較廣，尤以處理低濃度之含銅、鉛、錫廢料及合金為主。為精煉越來越複雜的廢料，而開發出複雜的流程，已不是從廢料到純金屬的直線流程，而是許多中間體在一個爐子到另一個爐子，從一個部門到另一個部門間流通，最終獲得所需的產品。圖 4.3-4 是冶金過程的簡化示意圖。



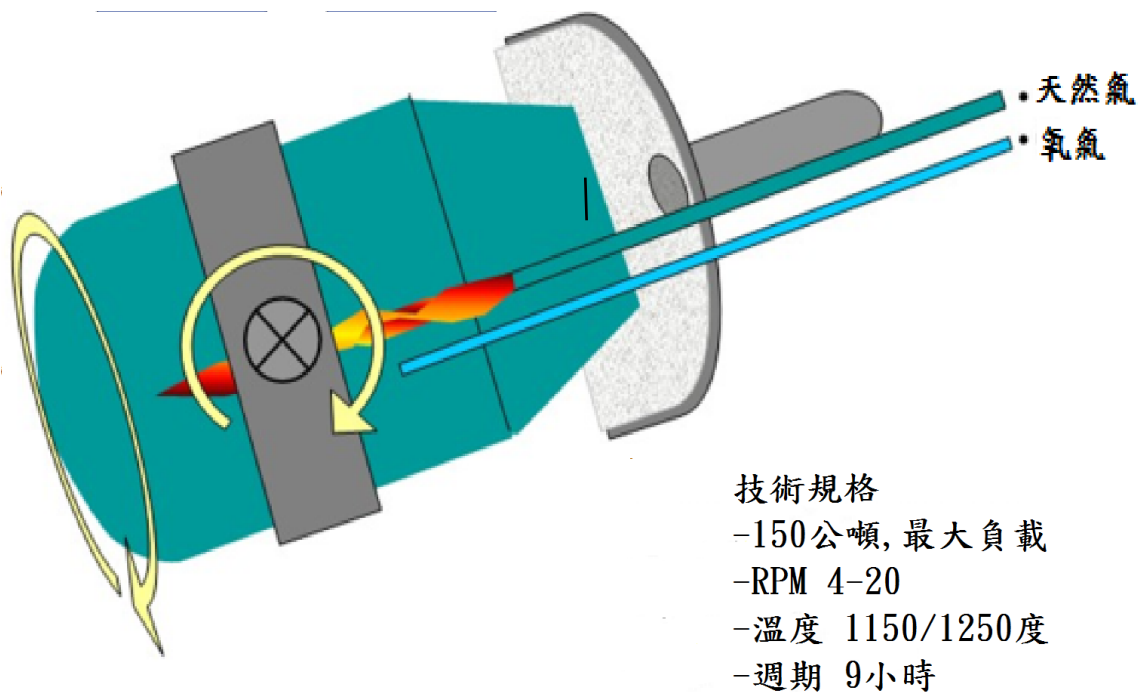
資料來源：Slag Valorisation Symposium Zero Waste, 2015

圖 4.3-4 Metallo 廢棄物再生循環製程

低階銅廢料首先在 Metallo 或 Elmet 冶煉廠進行處理，這些多功能冶煉廠可以接收多種原料，無論是粉末或塊狀、濕潤或乾燥等。熔煉過程在 1,200°C 下進行。在此溫度下，水和其他揮發性元素蒸發，而金屬和爐渣完全是熔融狀，且不相溶，分為兩層：上層爐渣，下層金屬。爐渣稱為銅冶煉渣，金屬為黑銅。黑銅是一種 80% 銅合金，含銅、鉛、錫、

鎳等元素。

Elmet 冶煉廠亦可處理低階鉛錫廢料，可生產粗焊料，此粗焊料是約 70%鉛合金，此外尚含有錫、銅等。黑色銅、高階銅廢料和低階錫廢料被送入鑄造廠。TBRC 是可傾斜的旋轉爐，設定溫度約為 1,200°C，以插入式的燃燒器提供熱量。利用旋轉方式將投入料均勻混合，可大幅減少熔渣、金屬和爐中添加劑的反應時間。TBRC 爐的工作原理如圖 4.3-5 所示。



資料來源：Slag Valorisation Symposium Zero Waste,2015

圖 4.3-5 TBRC 爐的工作原理

(4)瑞典波立登公司卡爾多爐處理低階銅廢料

低階銅廢料來源廣泛，價格低廉。如果能夠滿足環保的要求，處理這種原料生產成本很低，許多實廠證明，冶煉各種低階銅的利潤確實比處理銅精礦和高階銅高。同時，在處理廢銅過程中，還會得到很多貴金

屬，使得利潤率進一步提高。位於瑞典波立登公司的卡爾多爐（Kaldo）就是為了滿足廠家追求最大利潤，又能同時滿足嚴格的環保法規要求而研發的。

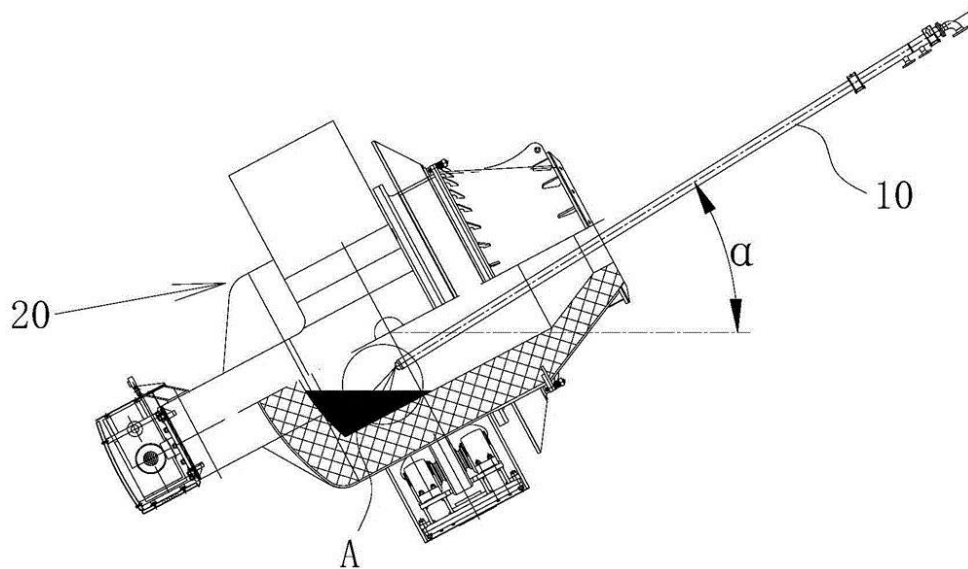
用卡爾多爐處理廢銅的主要可分成 5 個步驟，包括加料、熔煉、出渣和造粒、精煉、產出銅或銅合金。廢銅中所含的鐵可作為氧化物的還原劑，矽可作為熔劑，卡爾多爐加料方式是以翻斗車來進行，可達到良好的混合作用，故不須對進料進行預處理。進料後，氧油噴槍插入爐內進行熔煉，開始時，卡爾多爐先以慢速旋轉(轉速約為 1 rpm)，並逐漸加速，最後達到 5 rpm 左右。氧油噴槍先以中型火焰進行燃燒，如果原料中有塑膠等有機物，這時即開始燃燒。隨後自動改變噴槍的氧油化，火焰變為高氧化狀態，部分有機物揮發並與空氣一起燃燒，最終所有塑膠和有機物在直升煙道內完全燃燒。為了防止有害化合物的形成，直升煙道內的溫度維持在 800~900°C。爐內的金屬隨著爐內溫度的升高開始熔化，為了降低操作成本，爐內溫度保持在 1,250°C 以下。熔煉後爐渣中可能含有低量的銅，可以再進行水淬造粒。

熔煉後產出之黑銅再進行精煉，此階段將壓縮空氣吹入爐內，並調整以 15 rpm 的速度旋轉。在精煉過程中，先移除鐵、鋅，黑銅轉變成銅合金，再進一步精煉除去鉛和錫，以形成粗銅。精煉階段得到的富銅渣轉入下一批進料中再循環處理。

卡爾多爐處理廢銅單元主要包括加料設備、卡爾多爐、集塵系統及其它輔助設備。其處理低階廢銅之優點，主要在金屬回收率高、環境效益好等方面，可以處理含銅 15~99% 的廢銅，物料不用預處理，可以直接入爐，操作條件容易控制。加料、熔煉、除渣、吹煉、出銅各步驟在一台爐內分階段完成。再生粗銅純度可達到 96%。卡爾多爐處理廢雜銅技術是國外二段法處理廢銅的一種先進技術，中國國內大型冶煉廠，如

江西銅業也引進該方法處理廢銅。

2019 年中國金隆銅業有限公司，申請「卡爾多爐富氧吹煉方法」專利，內容包括：將帶有拉瓦爾噴嘴的吹煉噴槍插入卡爾多爐內；將純氧管道與壓縮空氣管道對接，得到富氧空氣；加入石英砂，通入富氧空氣，於 1,100~1,200°C 的溫度下反應 40~60 分鐘，排出爐渣取樣化驗鉛含量低於 5%；通入富氧空氣，於 1,100~1,200°C 的溫度下反應 120~180 分鐘，排出爐渣取樣化驗硒含量低於 2%；加入 20~80 kg 碳酸鈉，通入富氧空氣，於 1,100~1,200°C 的溫度下反應 40~60 分鐘，排出爐渣取樣化驗，硒、碲、鉛、銻、鉍含量均低於 0.01%、銅含低於 1.5%。上述方案採用管道混氧技術，壓力小、流速快、吹射面積廣，既有利於吹開熔體表面渣層；又能保證金、銀不被氧化，對爐壁的影響降至最低，提高爐壁的使用壽命。卡爾多爐富氧吹煉方法元件如圖 4.3-6 所示。



資料來源：CN110055429A_卡爾多爐富氧吹煉方法

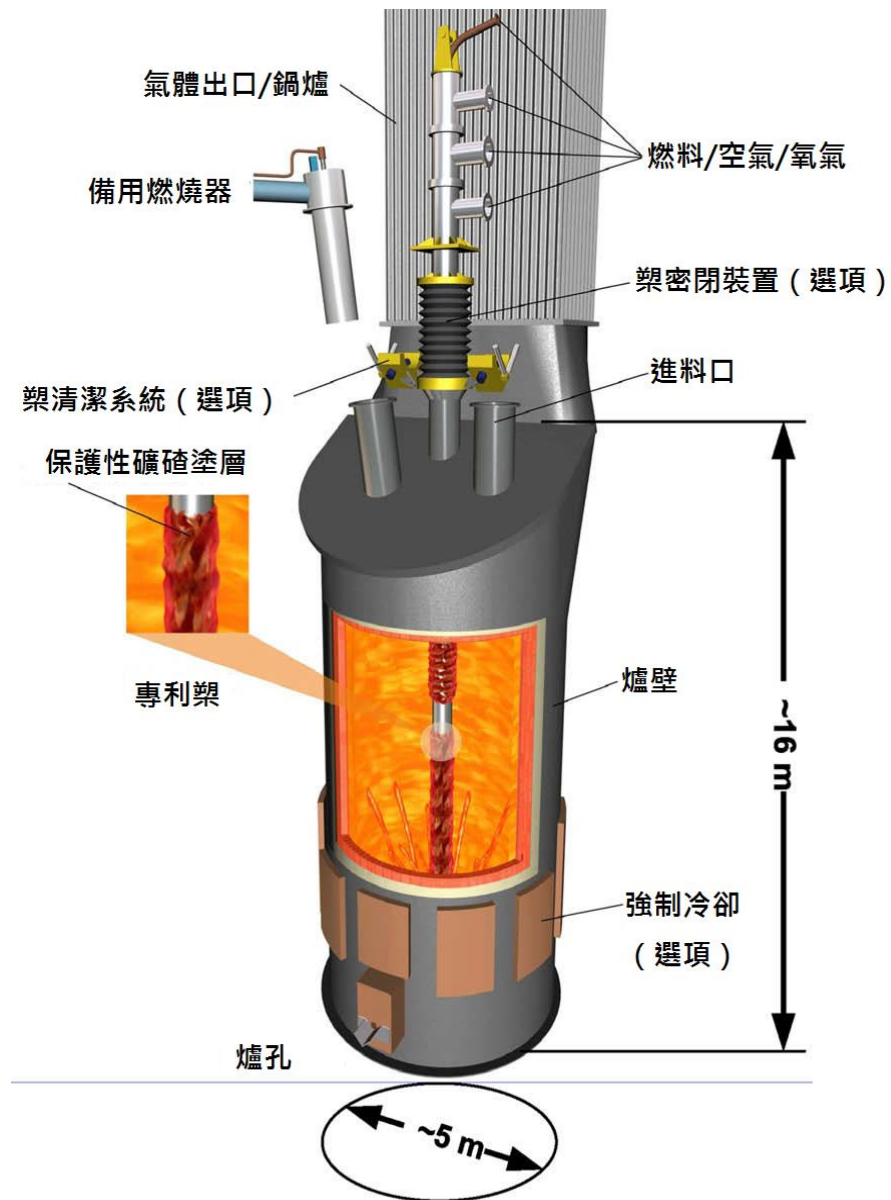
<https://www.qixin.com/patent/a3715d52-3924-42b8-bd20-f7eb82595ccc/5d4dabb8ebf551c472002951>

圖 4.3-6 卡爾多爐富氧吹煉方法

(5) 澳洲 Ausmelt-TSL 爐

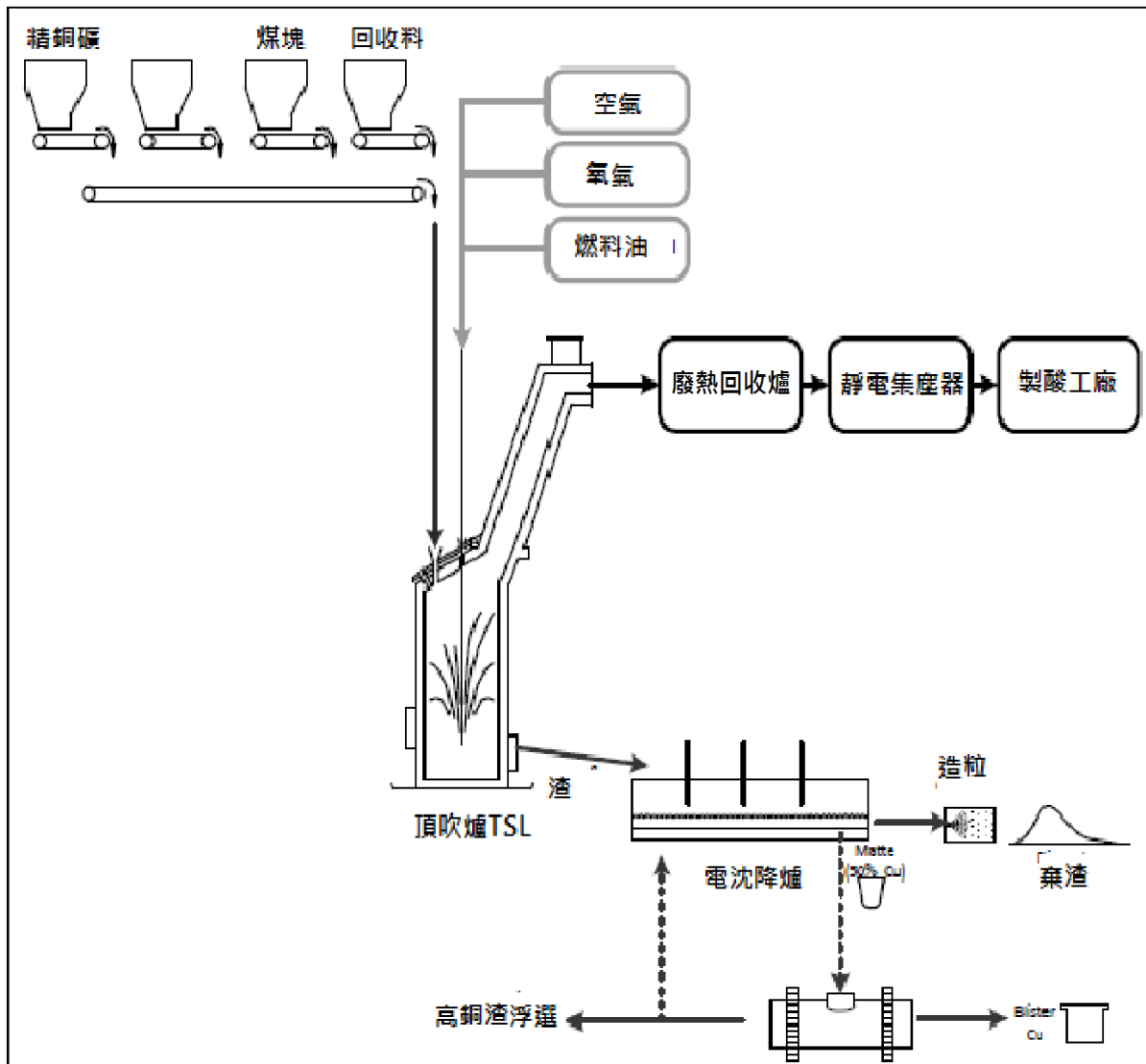
二級廢料冶煉廠主要使用頂吹式爐(Top Submerged Lance Furnace, TSL Furnace)和頂吹式轉爐(TBRC Furnace)冶煉低階銅廢料。主要的冶煉產品是熔融的黑銅(80%的銅)，再將其轉化為粗銅(96%的銅)，然後進行火煉並鑄造成陽極銅(98.5%的銅)。這些製程不能完全從銅中除去鎳和錫，因此必須對精煉爐產品進行電精煉。電精煉還可回收金、銀和鉑族金屬。二次銅電精煉與一次銅電精煉相似。但是，廢料中的雜質可能比濃縮礦中的雜質更多，因此可能需要前處理設備。TSL 技術可以處理含有銅、鋅、鉛、錫、鎳、鉑族金屬的礦石以及各種相關的微量元素，工業廢棄物和消費後電子產品。

與 TBRC 爐相比，TSL 爐投資較低。TSL 爐配有燃燒器和裝料噴槍系統，可直接或間接燃燒來自進料中(如電路板或任何含金屬廢料)的塑膠和有機物質作為燃料。TSL 製程設計及裝置如圖 4.3-7 所示，其應用流程如圖 4.3-8 所示。



資料來源：J. Hoang et al, Top submerged lance direct zinc smelting, Minerals Engineering, 2009

圖 4.3-7 典型的 TSL 爐



資料來源：R. W. Matuszewicz et al, Large Scale Copper Smelting Using AUsmelt TSL Technology at the Tongling Jinchang Smelter, 2010

圖 4.3-8 大陸銅陵金昌製程流程示意圖

4.4 生物技術回收金屬技術案例

1. 日本森下仁丹與大阪府立大學

日本知名製藥企業森下仁丹和大阪府立大學聯合開發出一種小型膠囊，利用膠囊包裹可吸附並還原稀有金屬的微生物(如圖 4.5-1 所示)，此生物膠囊為直徑為 2~10 毫米的球形，將膠囊投放到含稀有金屬廢水中，微生物就會吸附稀有金屬並加以濃縮，再由膠囊中提取出高濃度的稀有金屬。



吸附前

吸附後

資料來源：製程銅廢液回收技術與發展，ITIS，2018。

圖 4.4-1 生物回收膠囊(吸附金屬前後對照圖)

4.5 含銅廢棄物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資源循環關鍵技術為含銅廢棄物高值化及資源循環技術，其相關技術評析彙整如表 4.5-1 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 4.5-1 廢電子廢棄物-含銅廢棄物高值化及資源循環技術評析

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術開發者
物理處理	電解精煉	主要藉外加電場導入直流電，使氧化還原反應中之陽極釋放出電子，產生氧化反應，陰極則隨即獲得電子產生還原反應。	加速金屬離子提供給陰極表面的速率來實現高電流效率、消除消耗區問題、降低進料濃度並增加反應速度。	印刷電路板業及、電鍍業之含銅廢水	加拿大 EMEW 公司
化學處理	熔煉法	印刷電路板廢料經機械粗破碎後，送入焚化爐中焚燒，將所含約 40%的樹脂分解破壞，剩餘之金屬及玻璃纖維，經粉碎後即可送往金屬冶煉廠進行金屬回收。	1.回收有價值的金屬和蒸汽，產生之蒸汽供應給附近的工廠。 2.有效使用爐渣，減少產生的廢物量，並大大降低了對環境的影響。	廢印刷電路板及其邊料	日本同和公司 (DOWA)
化學處理	直接冶煉法	經焚化處理後之含金屬之印刷電路板廢料可供為陽極精煉或燒結之原料，而未經焚化處理之含金屬印刷電路板廢料亦可直接供為烘焙之原料，經烘焙處理後即可再送燒結製程進行處理。	連續製銅法：銅回收率高、減少廢氣排放、廢氣含 SO ₂ 濃度高且穩定、高效靈活的操作。	電子廢棄物	連續製銅法—日本三菱綜合材料直島製煉所
			凱撒回收再生系統：還原過程非常快、充電時間很短。	適合使用含銅量低和貴金屬含量的回收材料以	凱撒回收再生系統 (KRS) -德國北德精煉凱撒冶煉廠
			氧氣頂吹旋轉轉爐：投入料均勻混合，可大幅減少熔渣、金屬和爐中添加劑的反應時間	處理含銅、鉛、錫的低階工業殘渣和雜銅為主。	氧氣頂吹旋轉轉爐 (TBRC) 冶煉技術 -比利時 Metallo-Chimique

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術開發者
			金屬回收率高和環境效益好等方面，可以處理含銅15%-99%的廢雜銅，適應性強，物料不用預處理，可以直接入爐。	冶煉各種低階廢銅	瑞典波立登公司卡爾多爐處理低品位廢雜銅
			1.投資相對少、靈活性強、回報率高。 2.根據燃料和原料的不同設計，不同的噴槍系統。 3.與後燃燒、冷卻、淨化系統形成整體系統。 4.可同時處理多種不同金屬。	回收廢雜銅和 WEEE 電子廢棄物	澳洲 Ausmelt-TSL 爐
物理處理	生物回收金屬技術	吸附、還原稀有金屬的細菌(微生物)在存活的狀態下透過膠囊包裹起來，從工業廢水中高效率回收稀有金屬。	高效率回收稀有金屬，屬新類型處理技術，仍在開發中。	含金屬工業廢水	森下仁丹&大阪府立大學

五、稀有金屬廢料高值化及資源循環技術案例

5.1 火法冶金資源化技術案例

1. 火法冶金資源化技術原理

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。它包括焙燒（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，其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，然後得到金屬鉛；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，然後得到金屬銅。對某些金屬的冶煉，一般火法冶金和濕法冶金聯合使用。

將火法冶金技術應用於稀貴金屬廢棄物資源化領域，可降低採礦成本並回收有價金屬之方式，因此火法冶金為基礎之精煉純化技術在產業鏈中成為不可或缺之關鍵技術。

2. 火法冶金資源化技術案例應用案例

(1) 比利時的優美科公司 Umicore

從電子廢料如 PCB 中回收有價金屬，Umicore 是採用頂吹旋轉爐，將 PCB 熔煉成富含貴金屬的粗銅，然後採用橢圓形爐或反射爐進一步精煉。該廠的總投資額超過 33 億美元，雖說廢氣與廢水處理設施的建置十分完善，但焚燒方式無可避免就是會消耗大量能源並產

生大量碳排放。該廠每年約能回收超過 100 噸的黃金，規模十分龐大。

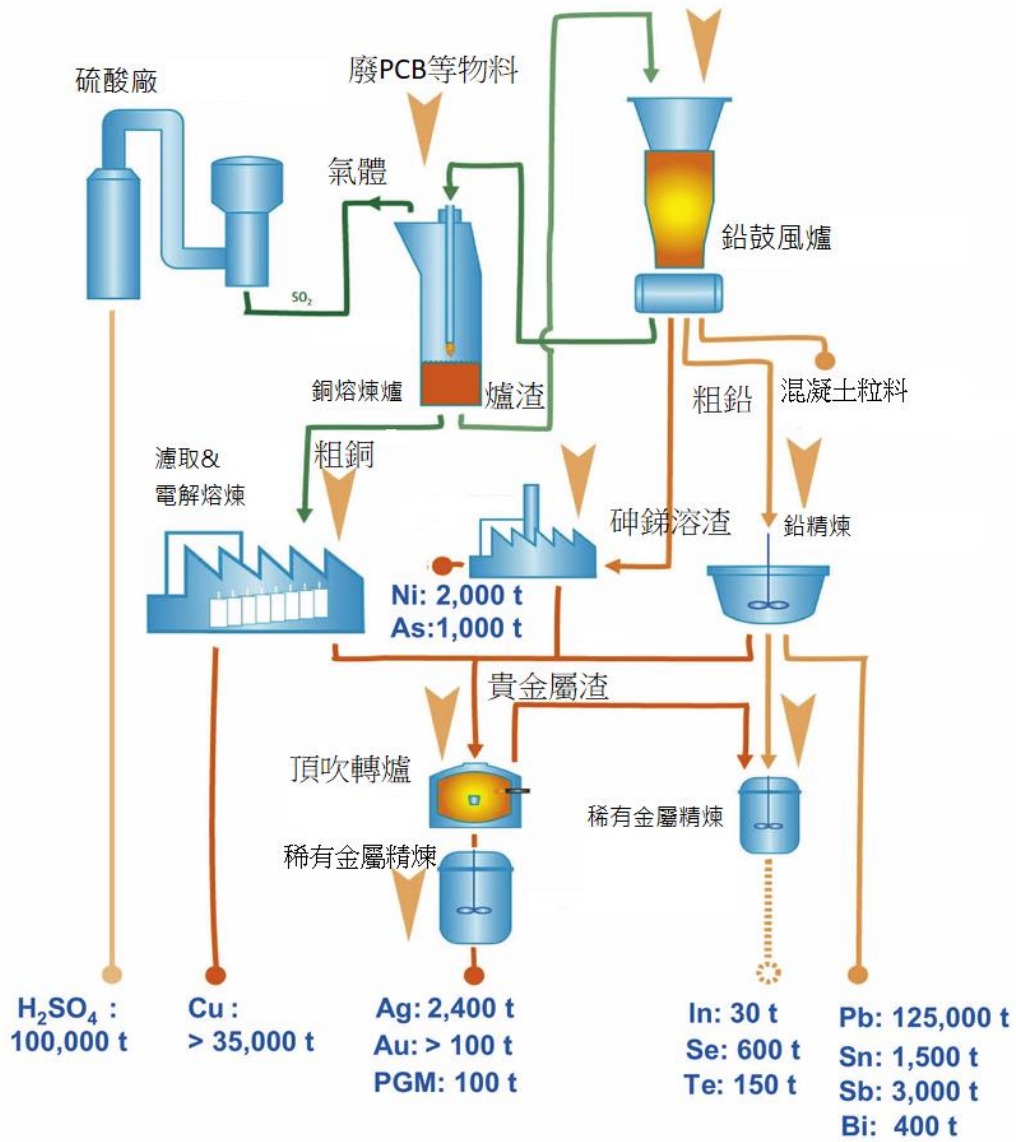
Umicore 使用焚燒處理回收各種貴金屬以及某些非金屬，如硒的精煉等。Umicore 廠區如圖 5.1-1 所示、Umicore 技術流程如圖 5.1-2 所示。



資料來源：Umicore，

https://www.researchgate.net/figure/The-new-smelter-at-the-Umicore-Hoboken-plant_fig3_293549795

圖 5.1-1 Umicore 廠區圖



資料來源：Umicore，

https://www.researchgate.net/figure/Principal-flowsheet-of-Umicores-smelter-and-refinery-at-Hoboken-Belgium_fig1_293549795

圖 5.1-2 Umicore 技術流程圖

(2) 日本同和環保再生事業公司(DOWA ECO SYSTEM)

DOWA 熔煉法，是採用焚燒冶煉方式處理 PCB 廢棄物及回收貴金屬，利用金屬和蒸汽回收焚燒爐等設備，將貴金屬從被處理廢棄物中提煉出來。

日本業者近來愈來愈積極投入電子廢棄物回收。因天然礦藏只會愈來愈稀缺，且傳統採礦成本愈來愈高，故積極於廢棄物中「挖礦」，以回收金、鉑、鈮等稀有金屬。

在秋田縣小板町的冶煉廠新建一座回收材料爐，處理和回收印刷電路板、金、銀、廢料、含有貴金屬的殘留物、廢礦石，經有效再生處理，減少廢棄物量，並大大降低了對環境的影響。

回收爐外觀如圖 5.1-3 所示，可回收多種金屬及非金屬物質，包括金、銀、鉑、銻、鈮、鈳、銅、鉛、鋅、鎳、錫、鎳、鈹、碲、碲、銻、鎳、銻、銻等。



資料來源：DOWA，

https://www.dowa-eco.co.jp/business/recycle/metal_recycle/

圖 5.1-3 DOWA 回收爐

(3) 日本日礦金屬公司

日礦金屬公司結合使用採礦技術進行物理分選，火法和濕法冶煉，開發金屬廢料和工業廢料的加工技術，並開發零排放型冶煉和精煉聯合流程。主要用於稀貴金屬再生。另外，從銅熔煉過程中回收各種中間產物，並致力於使用溶劑萃取等溶劑冶煉技術從廢電池中分離和回收鎳、鈷、錳、鋰等金屬。回收的金屬可提供給關係企業之材料業務，薄膜材料業務，提升循環經濟價值。

日礦金屬公司已發展從廢家電、廢電子設備以及工廠排出的廢金屬等中回收銅和貴金屬。將為建設全球資源循環社會做出貢獻，無產生二次廢物的“零排放”成為業務的基礎。

集團於 2010 年在台灣建立回收原料的收集基地，並於 2014 年在美國設立銷售辦事處。通過這種方式，將通過建立全球回收材料收集系統，為建立全球資源回收社會做出積極貢獻。防止全球暖化，節約資源和建立零排放社會。

5.2 濕法冶金資源化技術案例

1. 濕法冶金資源化技術原理

濕法冶金資源化技術主要是利用適當之浸漬溶劑，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，將目標金屬離子純化還原成金屬或化合物的方法。濕法冶金資源化技術通常又可分為①解離；②浸漬溶蝕；③分離純化 3 步驟。

(1) 解離

由於濕法冶金資源化技術主要是藉由浸漬溶劑將稀貴金屬予以溶解，但大多數的稀貴金屬廢棄物中之目標金屬常被其他材料所包覆，如積體電路中之稀貴金屬會被樹脂所包覆，印刷電路板中之稀貴金屬會被玻璃纖維樹脂所包覆，因此這些稀貴金屬無法直接接觸浸漬溶劑，以致無法達到溶解於浸漬溶液之最佳效果。故稀貴金屬廢棄物在進行浸漬溶蝕步驟前，常需先經「解離」步驟，以將目標金屬解離釋放出，以利後續浸漬溶蝕。常見之解離技術為破碎研磨，含稀貴金屬廢棄物經破碎研磨後，其所包覆之目標金屬即可被解離釋出。一般而言，破碎研磨愈細，其後續之浸漬溶蝕效果愈佳；但破碎研磨愈細，其操作成本愈高，故破碎研磨之程度需視稀貴金屬廢棄物之物理組成而定。

另稀貴金屬廢棄物中之目標金屬常被有機材料(如樹脂)所包覆，這些有機包覆材料，因其具有彈性與韌性，不易破碎研磨，且有機包覆材料亦有可能影響浸漬溶劑之浸漬溶蝕效果，因此在破碎研磨前，稀貴金屬廢棄物亦會先經高溫碳化，破壞去除其所含之有機物，以利後續破碎研磨與浸漬溶蝕。

(2)浸漬溶蝕

「浸漬溶蝕」可說是濕法冶金中之最核心技術。不同之稀貴金屬在不同之浸漬溶蝕條件下，會有不同之浸漬溶蝕效果。由於目標稀貴金屬通常不會單獨存在於廢棄物中，因此浸漬溶蝕過程中除了針對目標稀貴金屬，亦須考量其他非目標金屬之浸漬溶蝕效果。影響稀貴金屬浸漬溶蝕成效之因子包括：浸漬劑種類、浸漬劑濃度、固液比、時間、溫度、酸鹼度、氧化還原電位等操作條件。

(3)分離純化

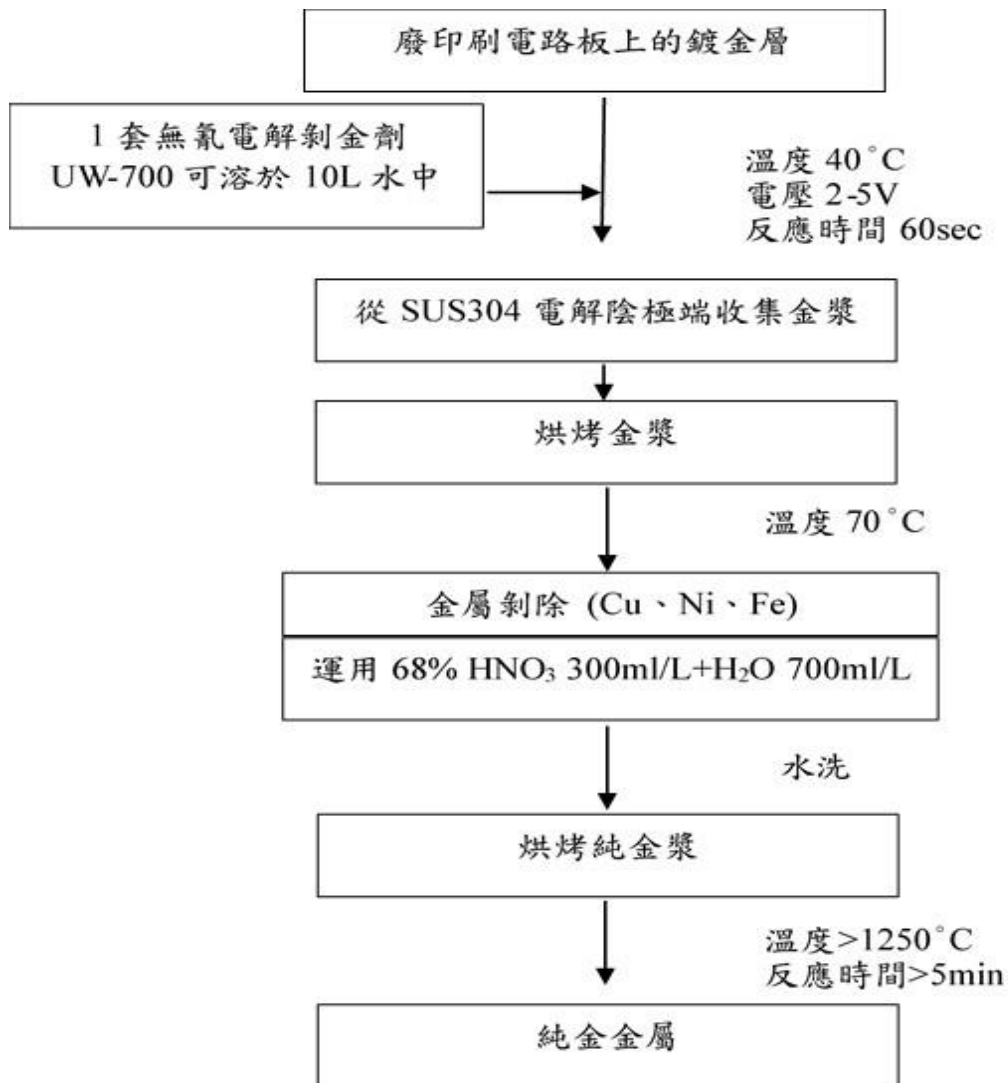
當目標稀貴金屬被浸漬溶蝕於浸漬液中，金屬大部分以陽離子狀態

存在，為回收浸漬液中之稀貴金屬，可藉由還原方式將金屬陽離子還原成元素態產物，或添加陰離子物質與目標稀貴金屬陽離子形成化合產物。常見之分離純化技術包括：pH 調整法、置換法、沉澱法、晶析法、電解法、離子交換樹脂法、溶媒萃取法等。

對於單一金屬的濕式冶金技術，包括環保電解剝金技術、銻及鈹渣資源化技術等，概述如下：

(1)環保電解剝金技術

環保電解剝金技術是將可導電之含金廢棄物(如:印刷電路板或電子零組件)置入於特製之剝金溶液中，使溶液溫度保持於一定條件下，通入低電流之電壓，反應時間由金含量厚度決定，含金廢棄物因剝金劑之作用將金泥剝離於陰極導電板上，收集陰極導電板上之金泥，再加入稀硝酸溶液去除 Cu、Ni、Fe 等微量雜質，經水清洗並烘乾後，置於 1,250°C 高溫爐中，則可獲得 99.99 % 純金，其流程如圖 5.2-1 所示。此技術可迅速達到剝金效果，同時無空氣污染物產生及廢水排放之問題。國際環保貴金屬剝除劑與整廠技術供應商優勝奈米 (UWin Nanotech.)，其專利的濕式環保剝金解決方案，在日本東京千葉縣建置了全日本第一座的全流程濕式環保處理產線，正式打入日本電子廢棄物處理市場，顯示其環保剝金技術已獲先進國家業者的認可。



資料來源：優勝奈米科技有限公司

圖 5.2-1 環保電解剝金技術流程圖

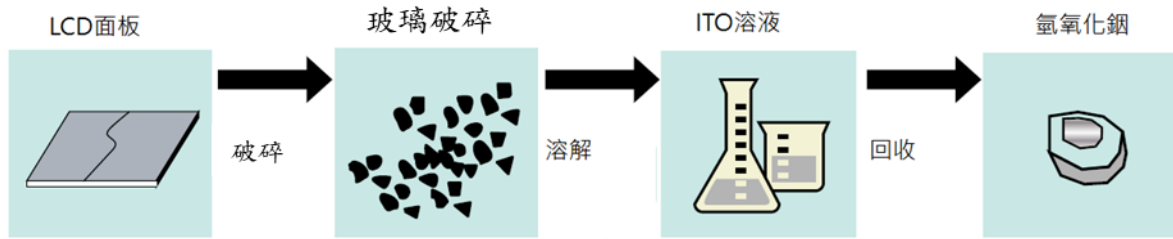
(2) 含氧化銦錫之貴金屬回收技術

氧化銦錫(Indium Tin Oxide, ITO)由於其高透光性、耐磨、化性穩定、電阻率低等優異性能，使其成為主流的透明導電膜材料。ITO 是一種將銦(Indium)製作為氧化銦(In₂O₃)，再與氧化錫(SnO₂)複合成為氧化銦錫的氧化物，泛用於各式顯示器與螢幕中的透明電極。但因銦屬單價高昂且蘊藏量少的稀貴金屬，考量取得來源受限、單價

偏高、以及廢棄物對於環境造成的衝擊等問題，銦的回收近年來一直是個重要議題。

由於 ITO 占金屬銦最大宗應用，因此，回收銦的主要來源亦即使用 ITO 的顯示器與面板產業。銦材料於 ITO 應用與回收流程如圖 5.2-2 所示，精煉後的金屬銦製作成為氧化銦粉末再進而製作為 ITO 靶材，並用於濺鍍(Sputter)製程製作 ITO 薄膜。然而，ITO 薄膜除了鍍於元件上，亦有濺鍍於設備組件上，此鍍層經清洗後可取得含銦廢液；此外，製程中的濕式製程亦溶有銦在其中，以上兩者為製程中主要產生含銦廢棄物的來源。然而廢靶材也是含銦廢棄物很大的來源，乃因為實務上靶材僅有大約 30~40% 使用率，其餘 60~70% 的靶材無法繼續使用，一般回到靶材製造商再製以供應業者繼續使用。

由於 ITO 為氧化銦與氧化錫的複合氧化物，因此針對 ITO 中銦的回收，銦與錫的分離便成為技術上的重點，現行技術中大多以濕式方法(Hydrometallurgy)進行回收。回收流程首先將廢棄 LCD 面板或靶材等含有 ITO 的組件或材料進行破碎，破碎粒徑與後續的溶出效果有直接關係，廢棄面板中銦的含量雖遠不如廢靶材高與成分單純，然而其銦含量仍然達數百 mg/kg。廢面板或廢靶材破碎後的顆粒或粉料以鹽酸或硫酸等酸液將 ITO 浸出，使固態 ITO 溶解於溶液中形成離子態，由於氧化銦與氧化錫在溶液中具有不同的溶解度，可將銦與錫進行初步分離，酸種類的選擇一般會選用強氧化酸混合強酸，選用強氧化酸的目的是為了避免 Sn^{4+} 變成 Sn^{2+} ，進而形成 SnO 而減少銦的萃取率。溶出後則以置換法、溶媒萃取、離子交換等方法進行雜質分離與去除。



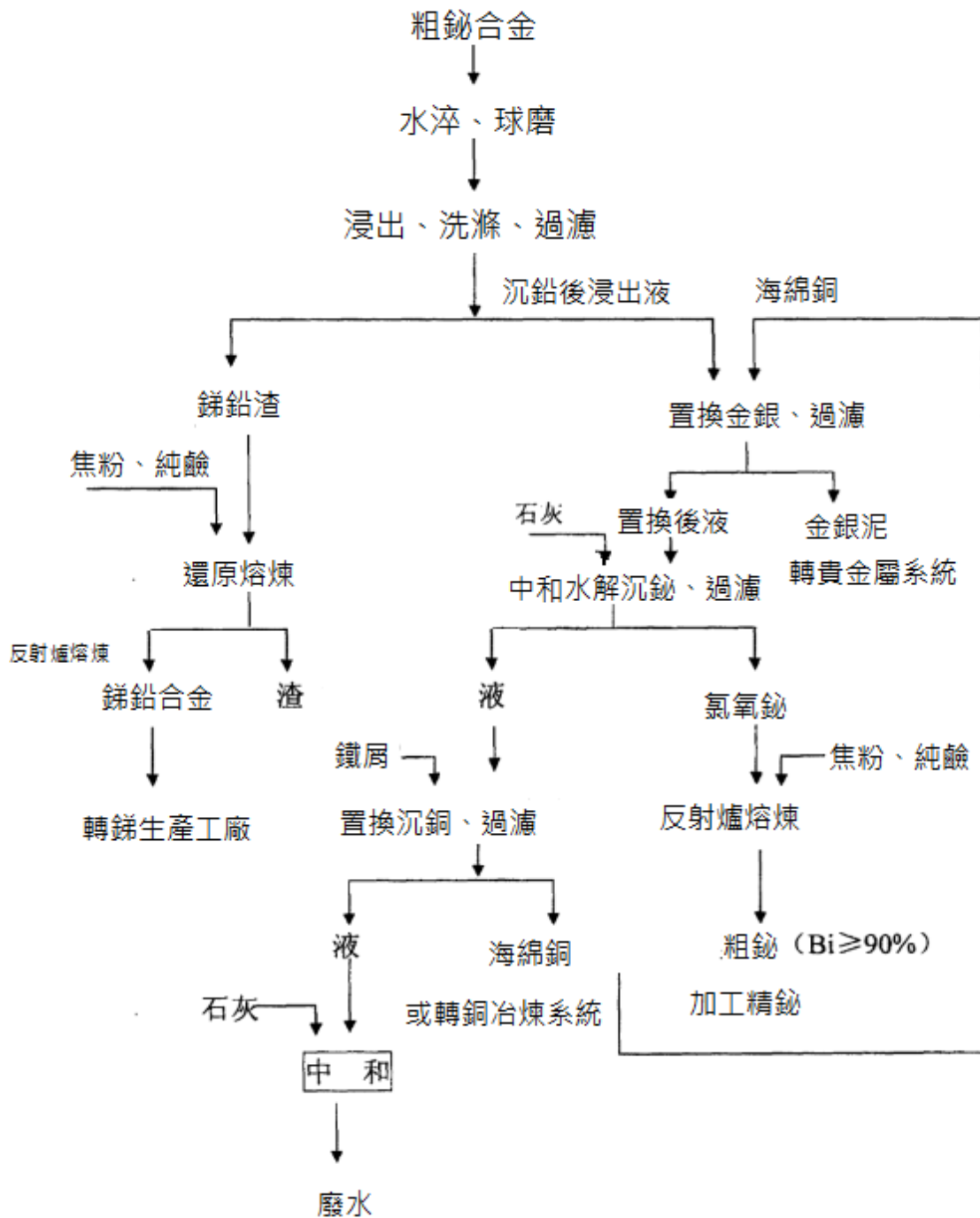
資料來源：Sharp & Aqua Tech,

<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=28641>

圖 5.2-2 LCD 玻璃上 ITO 回收流程圖

(3)粗鈹合金有價金屬回收技術

由中國河南豫光金鉛有限公司研發粗鈹合金有價金屬回收方法，採用濕法、火法進行粗鈹合金有價金屬回收。對粗鈹合金進行水淬、球磨，浸出、洗滌和過濾，得到銻鉛渣和浸出液。銻鉛渣返回火法系統回收銻後轉鉛冶煉系統。所產生浸出液用海綿銅置換其中的 Au、Ag 產出金銀泥，金銀泥返回貴金屬冶煉系統，置換金銀泥後的液體進行水解沉鈹，用石灰和水中和至 pH=3~3.5，過濾後得氯氧鈹，經還原熔煉成粗鈹再進一步精煉成精鈹，對過濾液用鐵置換 Cu，沉 Cu，產出海綿銅，沉 Cu 後的液體加入石灰進行中和，經 2~3 及沉澱後達標排放。此技術特性優勢具有原料適應性強，金屬回收率高，作業效率佳。粗鈹合金有價金屬回收流程如圖 5.2-3 所示。



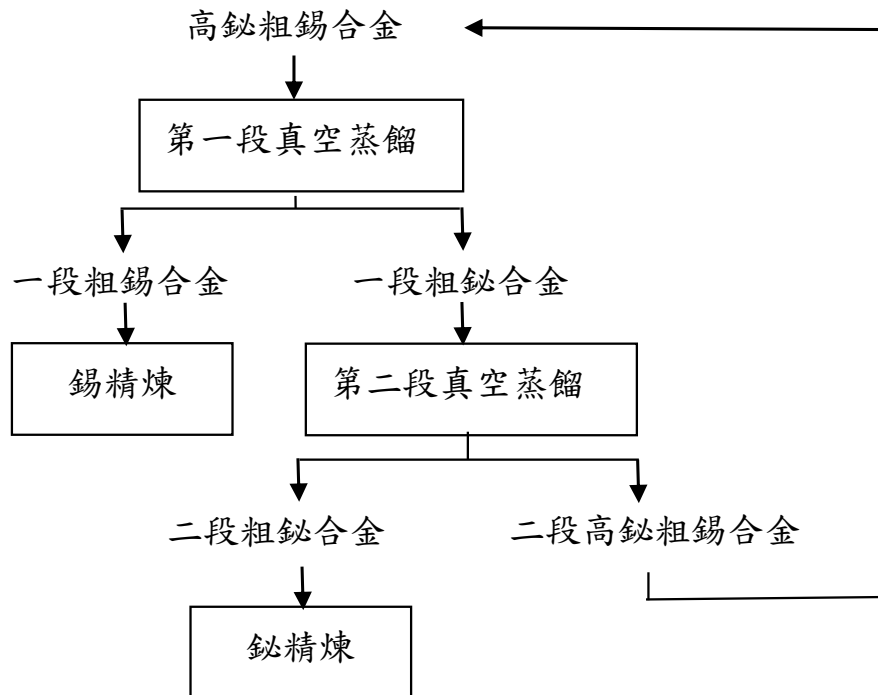
資料來源：中華人民共和國國家知識產權局發明專利 CN 100475985C，粗鈹中有價金屬回收工藝。

圖 5.2-3 粗鈹合金有價金屬回收流程圖

(4)高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹技術

由中國永興佳盛有色金屬再生利用有限責任公司，於 2016 年

研發高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹技術，以高粗鈹合金作為原料，採用兩段真空蒸餾方式進行處理。第一段將高粗鈹合金投入真空冶煉設備中，控制真空度為 0.01~0.1Pa，加熱控制溫度在 1,150~1,250°C；第二段以第一段蒸餾獲得的揮發物作為原料，控制真空度為 0.1~1Pa，加熱控制溫度在 950~1,050°C，經二段蒸餾 Sn、Bi 回收率高達 90%，每公噸物料綜合處理耗電 730~760 kWh。此技術採用環保高效的真空冶金方法處理高粗鈹合金，實現錫鈹的分離，製程流程短，經濟效益高。高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹流程如圖 5.2-4 所示。



資料來源：中華人民共和國國家知識產權局發明專利 CN 106048243，一種高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹的方法。

圖 5.2-4 高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹流程圖

2.濕法冶金資源化技術案例應用案例

(1)日本同和環保再生事業公司(DOWA ECO SYSTEM)

DOWA ECO SYSTEM 濕式處理貴金屬回收，其濕式處理流程如圖 5.2-5 及 5.2-6 所示，回收利用高品質的再生材料濕法處理貴金屬，如金、銀和鉑族。在日本埼玉縣、岡山縣和秋田縣均有設廠。

DOWA ECO SYSTEM 濕式加工的特點包括採用自動破碎設備、電解回收設備及專利技術提高回收效率；能收集處理多種金屬(如：金，銀，鉑，銻，鈮，鈦)；經濕式加工再生技術可回收高純度的金(純度達 99.995%)。



資料來源：https://www.dowa-eco.co.jp/business/recycle/metal_recycle/

圖 5.2-5 DOWA 濕式處理流程



資料來源：https://www.dowa-eco.co.jp/business/recycle/metal_recycle/

圖 5.2-6 DOWA 貴金屬回收流程示意圖

(2) 日本田中貴金屬公司(TANAKA)

日本田中貴金屬公司(TANAKA)研發回收、精製、再產品化，也就是從製造時所產生的廢料，或壽命已殆盡並已報廢的產品中回收貴金屬，再以產品方式回歸於市場的整體流程。

TANAKA 再生技術可對應固體及液體物質，包括製造時所產生的廢料及壽命已殆盡的產品之固體物質，以及含有貴金屬的電鍍廢液之液體物質等。其回收分類如圖 5.2-7，可提高廢液中的貴金屬濃度，減少運輸體積及重量，以降低運輸成本。

TANAKA 貴金屬回收流程如圖 5.2-8 所示，TANAKA 貴金屬回收裝置如圖 5.2-9 所示，包括電解裝置及離子交換樹脂、活性炭吸附回收裝置，適用於從半導體及電子零件製造之電鍍工程的廢水、回收液、清洗液中回收貴金屬（金、白金及鈳）。精密洗淨製程特性能精確評估附著於濺鍍系統、蒸鍍設備等的表面上的貴金屬，薄膜去除技術採用低污染藥液，可靠的分析技術，保證貴金屬的評估之準確性。TANAKA 貴金屬回收裝置適用範圍如圖 5.2-10 所示。

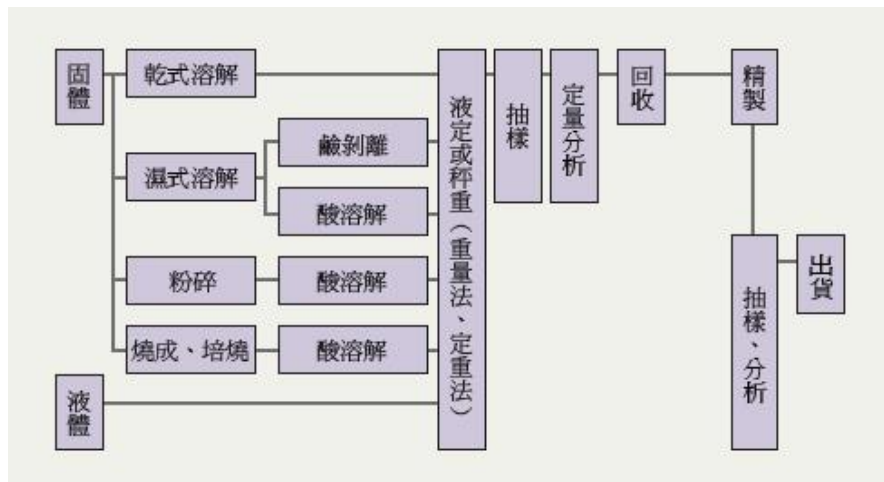
A. 電解回收裝置：特殊電極與密閉構造型管柱的高回收效率，陽極高耐久性電極，不需挑選設置場所的小型設計。

B.離子交換樹脂、活性炭吸附回收裝置：有效從稀薄濃度液體中回收，可選擇符合之陰或陽離子交換樹脂、活性炭的最佳吸附劑，並簡化離子交換樹脂之再生處理。



資料來源：https://pro.tanaka.co.jp/tc/products/Recovery_Refining.html?fm=B07

圖 5.2-7 TANAKA 貴金屬回收分類示意圖



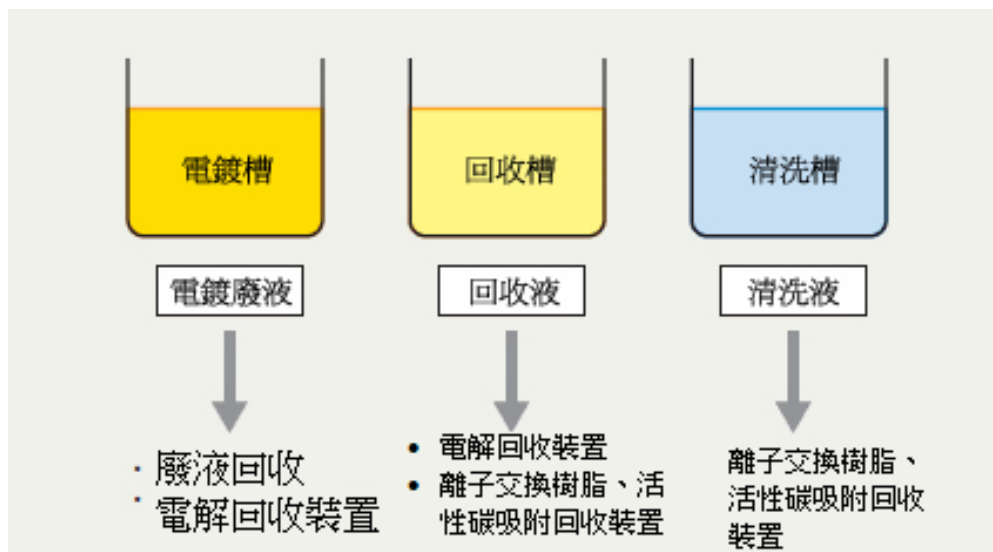
資料來源：https://pro.tanaka.co.jp/tc/products/Recovery_Refining.html?fm=B07

圖 5.2-8 TANAKA 貴金屬回收流程圖



資料來源：https://pro.tanaka.co.jp/tc/products/Recovery_SystemforPM.html?fm=B07

圖 5.2-9 TANAKA 貴金屬回收裝置



資料來源：https://pro.tanaka.co.jp/tc/products/Recovery_SystemforPM.html?fm=B07

圖 5.2-10 TANAKA 貴金屬回收裝置適用範圍

(3) 日本日礦金屬公司

一般銅冶煉以火法治煉適合大規模生產，但其需要處理礦石中硫成分經燃燒後產生的硫氧化物。因此日礦金屬公司開發節能，且不產生硫化物的濕法治金技術。

日礦金屬公司之濕法治金技術，係使用鹽酸浸出金屬，現場作業如圖 5.2-11 所示。該方法的目標是主要的硫化銅礦石，例如方鉛礦，它佔據了大部分埋藏的銅礦石，並且很難通過使用硫酸的濕法治金技術進行浸出。在澳大利亞珀斯建設一座年產量 100 公噸銅的工廠，並且已經對各種銅礦石進行驗證測試，並獲得良好的銅和金浸出結果。



資料來源：<https://www.nmm.jx-group.co.jp/industry/technology/metal.html>

圖 5.2-11 日礦金屬鹽酸浸出現場作業圖

5.3 乾濕式回收技術案例

1. 乾式處理技術原理：

乾法處理技術中所採用乾法破碎是在乾燥條件下進行破碎工作，此時物料在外力的作用下會局部產生較高的溫度，而當局部溫度超過250°C時會有相當量的非金屬開始發生熱解。

對乾法回收技術而言，廢棄電路板中金屬和非金屬的破碎解離是後續分選回收處理的基礎，而分選原理是基於破碎後物料的密度、粒度、形狀、導電性等物理性質的差異來進行的。由於金屬和非金屬的導電性差異明顯，因而電選是絕大多數乾法回收技術優先採用的分離設備。

2. 濕式處理技術原理：

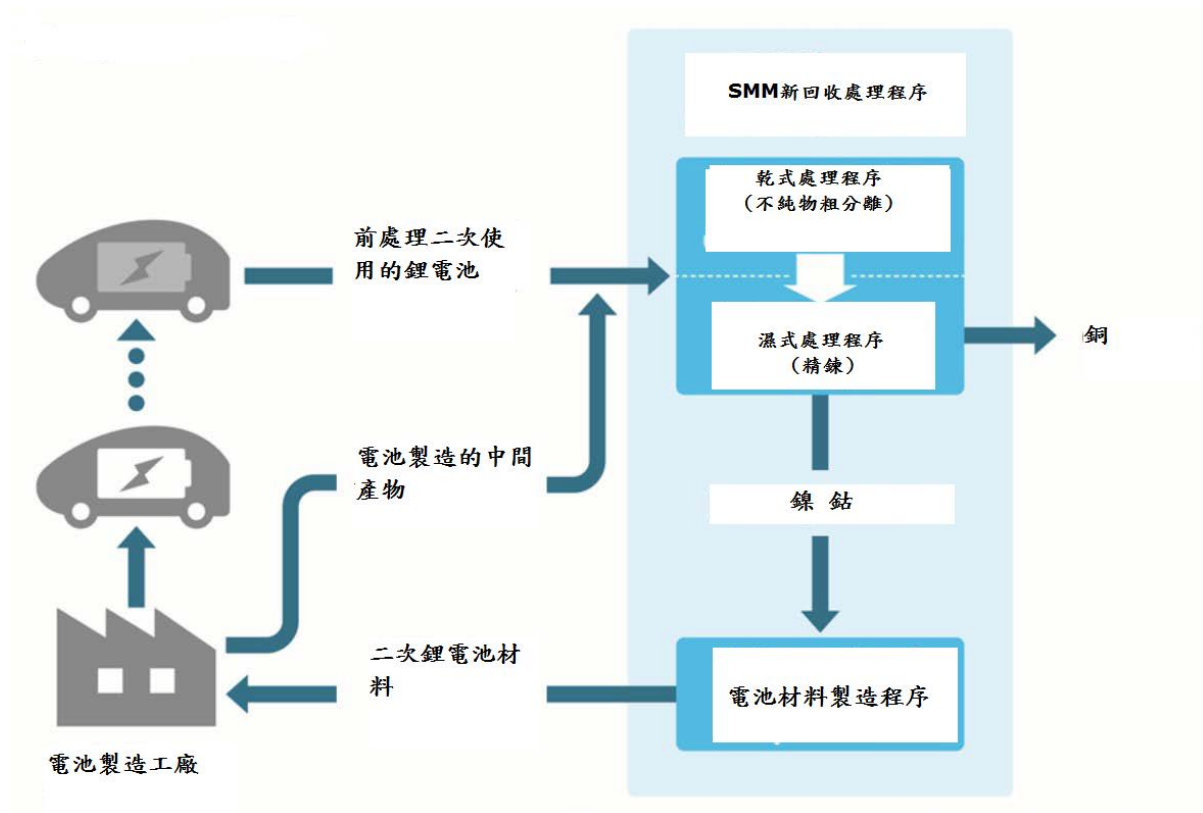
濕法回收技術是利用水力搖床與浮選相結合的方法，從廢棄印刷電路板或廢板邊料中回收金屬，是廢棄電路板以機械式回收常用的方法。首先將廢棄的電路板粉碎到粒度為0.25 mm左右，使金屬與非金屬解離，粉碎後的物料按照粒度不同，分別採用水力搖床和浮選機以分選收集金屬相與非金屬相。在金屬回收部份，將收集的金屬以鹼熔煅燒法回收錫及氨水浸漬法回收銅後，再以磁選分離法分離磁性的鐵、鎳金屬與非磁性的金、銀、鉛金屬。濕法破碎由於使用到液體，因此需要進行廢水處理，造成資源浪費和環境污染，而為達成循環使用或達排放標準，也需增加廢水回收和處理設施，這也會增加投資和運行成本。

3. 乾溼式回收技術應用實例

(1) 日本住友金屬礦業有限公司(Sumitomo Metal Mining Co., Ltd., SMM)

日本 SMM 公司經研發廢鋰電池中分離並回收鈷、銅、鎳等材料的

技術，先採用高溫冶金精煉技術，可將大部分雜質與鋰離子分離，再以濕法冶金技術浸出和精煉合金，以回收鎳和鈷(可作為生產電池之材料)，以及銅(可用於生產電解銅)。目前 SMM 已在愛媛縣新居濱市建立利用火法冶金和濕式冶金技術的試驗工廠，以評估廢鋰電池回收之的可行性。該公司已於 2019 年 3 月份開始試運營該工廠，其製程流程及試驗工廠照片如圖 5.3-1 及 5.3-2 所示。



資料來源：Development of a New Recycling Process for Lithium Ion Secondary Batteries and Operation of a Pilot Plant，2019。

圖 5.3-1 日本住友金屬新開發製程流程圖



資料來源：Development of a New Recycling Process for Lithium Ion Secondary Batteries and Operation of a Pilot Plant，2019

圖 5.3-2 日本住友金屬冶煉試驗工廠照片

5.4 稀有金屬廢料(如鈮、鈹、鈳、銻..等)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資源循環關鍵技術為稀有金屬廢料(如鈮、鈹、鈳、銻..等)高值化及資源循環技術，其相關技術評析彙整如表 5.4-1 所示，相關資源循環產業之廠商，可依據相關技術及適用對象去參考應用。

表 5.4-1 稀有金屬廢料資源循環技術彙整

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	成熟及先進技術
火法	火冶金技術	在高溫下進行的冶金過程都屬於火法冶金。它包括焙燒（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。	火法冶金技術應用於稀貴金屬廢棄物資源化領域，可降低採礦成本並回收有價金屬之方式，因此火法冶金為基礎之精煉純化技術在產業鏈中成為不可或缺之關鍵技術	電子廢料如 PCB；IC；含金、銀、銅、錫、鉛等金屬礦石及金屬廢料；其他金屬及某些非金屬(如硒)	比利時優美科 Umicore 日本 DOWA KOSAKA 日本日礦金屬
濕法	濕法冶金技術	浸漬溶解於浸漬溶液中，再經電解、置換、沉澱、晶析等一系列步驟，將目標金屬離子純化還原成金屬或化合物的方法。	濕法冶金技術設備規模則較具彈性，初設成本較低，因此較適合用來回收台灣生產之稀貴金屬廢棄物。	廢 IC、銻錫氧化物(ITO)廢料、電子業廢砷化鎵、含貴金屬廢液、ITO 蝕刻廢液、砷化鎵廢液、多層陶瓷電容器、含氧化銻錫薄膜及廢液、含銀裂解殘渣、無鉛含銀焊錫渣、電子業廢棄鎵金屬、氯鉑釘酸廢液廢靶材	日本 DOWA ECO SYSTEM 日本田中貴金屬 TANAKA 日本日礦金屬
濕法	環保電解剝金(鈦)技術	將可導電之含金廢棄物置入於特製之剝金溶液中，收集陰極導電板上之金泥，再加入稀硝酸溶液去除 Cu、Ni、Fe 等微量雜質，經水清洗並	無毒、環保、同時無空氣污染物產生及廢水排放之問題。	含金(鈦)廢棄物(如：印刷電路板或電子零組件)	優勝奈米 (UWin Nanotech.)

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	成熟及先進技術
		烘乾後，置於高溫爐中，則可獲得 99.99 % 純金			
濕法	氧化銻錫之貴金屬回收技術	廢面板或廢靶材破碎後的顆粒或粉料以鹽酸或硫酸等酸液將 ITO 浸出，再將銻與錫進行初步分離，溶出後則以置換法、溶媒萃取、離子交換等方法進行雜質分離與去除。	可將銻與錫進行初步分離，選用強氧化酸混合強酸，選用強氧化酸的目的是為了避免 Sn^{4+} 變成 Sn^{2+} ，進而形成 SnO 而減少銻的萃取率。	ITO 的顯示器與面板產業之靶材及廢液	日本 Sharp & Aqua Tech
火法與濕法併用	粗銻合金有價金屬回收技術	對粗銻合金進行水淬、球磨，浸出、洗滌和過濾，得到銻鉛渣和浸出液。銻鉛渣用火法冶金回收，浸出液用濕法冶金回收。	具有原料適應性強，金屬回收率高，作業效率佳。	粗銻合金及其廢料	中國河南豫光金鉛有限公司
火法	高銻粗錫合金真空蒸餾深度除銻技術	採用兩段真空蒸餾方式進行處理，真空蒸餾效率高。	製程流程短，經濟效益高。	高銻粗錫合金、無鉛銻錫之錫銻渣	中國永興佳盛有色金屬再生利用有限責任公司
物理處理 & 化學處理	乾濕式複合技術	1.乾式處理：進行破碎工作。 2.濕式處理：將金屬以鹼熔煅燒法回收錫，氨水浸漬法回收銅後，再以磁選分離法分離磁性與非磁性的金屬。	可選擇性地回收鎳、鈷和銅做為合金，於 2019 年建立模廠營運中。	廢鋰電池	日本住友金屬礦業有限公司(SMM)

六、結語

本評估報告針對廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術、含銅廢棄物高值化資源循環技術及稀有金屬廢料(如鈾、鈾、鈹、銻...等)高值化資源循環技術進行評析，相關評析結果彙整如下：

1.廢電子化學品-廢溶劑提濃純化及資源循環技術包括如下：

- (1)蒸餾技術及設備：A.多效蒸餾技術：瑞典 Alfa Laval 公司、以色列 IDE 公司、美國 Badger 公司等；B.蒸氣再壓縮技術：加拿大 Whiting 公司、德國 GEA 公司等；C.日本瑞環公司溶劑回收設備。其共通性的特點均強調高效能、低成本及具節能效益。
- (2)薄膜技術：A.有機膜：德國 GKSS 公司；B.分子篩膜：日本旭化成、三菱、日立、東麗公司等；C.陶瓷膜：美國頗爾(Pall)、法國諾華賽、法國達美工業及中國久吾高科公司等。其共通性特點均強調分離效率高、操作方便及低能耗。
- (3)萃取技術：超臨界水氧化技術，其最大優勢為分解效率高，且對某些難分解性有機物分解率可達 99.9999% 以上，設備小型化、高效節能。
- (4)碳化技術：A.瑞典 TPS Termiska 公司整體氣化聯合循環(IGCC)技術；B.日本巴工業株式會社、荏原集團、三菱重工環境化學工程株式會社等。其共通性的特點均強調具回收及節能效益。
- (5)電漿技術：美國 PEAT International 公司電漿熱解還原回收(PTDR)技術，其最大優勢為綠色技術，可有效安全地轉換“廢棄物”為“能源”，操作簡單可處理多種廢棄物。

2.含銅廢棄物高值化資源循環技術

- (1)電解精煉技術：加拿大 ENEW Corporation，其最大優勢是可進行線上

回收。

(2)乾溼式複合技術：日本住友金屬礦業有限公司(SMM)，其最大優勢是同時擁有火法冶金及濕法冶金技術。

(3)直接冶煉技術：日本 DOWA、連續製銅法—日本三菱綜合材料直島製煉所、凱撒回收再生系統 (KRS) -德國北德精煉凱撒冶煉廠、氧氣頂吹旋轉轉爐 (TBRC) 冶煉技術-比利時 Metallo-Chimique、瑞典波立登公司卡爾多爐處理低品位廢雜銅、澳洲 Ausmelt-TSL 爐等，其最大優勢可以提升銅的回收率，且金屬回收率高。

(4)生物回收金屬技術：森下仁丹&大阪府立大學所研發，可高效率回收稀有金屬，屬新類型處理技術，仍在開發中。

3.稀有金屬廢料(如銻、鉍、鈮、銻...等)高值化資源循環技術進行技術

(1)火法冶金技術：比利時的優美科 Umicore、日本 DOWA KOSAKA 及日本日礦金屬等，其最大優勢可回收多種稀有金屬，且比利時優美科 Umicore 的含稀有金屬廢棄物處理之代工模式值得借鏡。

(2)濕法冶金技術：日本 DOWA ECO SYSTEM、日本田中貴金屬 TANAKA 及日本日礦金屬等，其最大優勢是設備規模較具彈性，初設成本低。

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，也可以考量優美科 Umicore 的含稀有金屬廢棄物處理之代工模式，以期發揮技術優化及營運創新之境界。

參考文獻

1. 循環台灣基金會網站，<https://www.circular-taiwan.org>。
2. 經濟部工業局，廢棄物資源回收與處理設備技術手冊及案例彙編：純化技術與設備篇，2003年。
3. 產業價值鏈資訊平台網站，<https://ic.tpex.org.tw/>。
4. 財政部中區國稅局，107年度表面處理業之製造業原物料耗用通常水準調查報告。
5. 莊豐卿，“利百景環保科技股份有限公司簡介”，廢溶劑循環經濟技術交流媒合會講義，2019年7月24日。
6. 張啟達，“循環經濟對中小企業的商機”，2016年9月30日。
7. 光洋應材(股)公司網站，“2015~2017年光洋應材公司企業社會責任報告書”。
8. 經濟部工業局資源再生產業推動及審查管理計畫，2018。
9. 環保署網站，重點事業廢棄物之處理方式統計年報。
10. 張添晉，“廢電子化學品循環經濟商業模式”，廢溶劑循環經濟技術交流媒合會講義，2019年7月24日。
11. 何宗仁，“多效&先進蒸餾技術_ITRI”，廢溶劑循環經濟技術交流媒合會講義，2019年7月24日。
12. 陳孝行，「兩岸薄膜分離程序之應用」，兩岸環保服務業交流平台電子報(2014/12/15)。
13. 李魁然等，「綠金」純化技術-滲透蒸發，科學發展，2008年9月，429

期。

14. 武漢智宏思博環保科技股份有限公司網站，
<http://www.zhihongtec.com/a/jishufuwu/jishujianjie/>。
15. 工業污染防治技術服務團，印刷電路板製造業廢棄物資源化案例彙編，
經濟部工業局，1996。
16. 鄭智和，廢印刷電路板之處理技術介紹，電路板會刊，2001。
17. 工研院，經濟部 86 年度污染防制技術開發及推廣計畫總報告，1997。
18. 經濟部工業局，印刷電路板業資源化應用技術手冊(98 年版)，2009。
19. 吳俊毅等，零廢棄含銅污泥資材化回收高純度氧化銅之研究，2009 資源
與環境學術研討會，2009。
20. 陳彥仲，綠色產業用金屬材料應用研究發展計畫-節能及再生金屬材料技
術出國報告，2012。
21. 工業污染防治技術服務團，電路板業回收設備選用手冊，經濟部工業局，
1996。
22. 優勝奈米科技有限公司，<http://www.uwin-nano.com>
23. Recycling Indium from Waste LCDs,
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=28641>
24. Sharp & Aqua Tech,
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=28641>
25. 瑞典商阿法拉伐(股)公司網站，[https:// www.alfalaval.com](https://www.alfalaval.com)。
26. 以色列 IDE 公司，
<https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E6-144-44-00.pdf>。

27.美國 Badger 公司，

http://www2.fpg.com.tw/html/mgz/Mgz_epaper/122/43-2p16-.pdf。

28.加拿大 Whiting 公司，

<https://www.whiting.ca/evaporators-whiting-equipment-canada-inc/>。

29.德國 GEA 公司，

<https://www.gea.com/en/products/mvr-tvr-heated-distillation-plants%20.jsp>。

30.日本瑞環株式會社網站， <http://www.n-refine.co.jp/>。

31.德國 GKSS 公司， https://dc.engconfintl.org/bioenergy_ii/10/。

32.<http://www.raye.com.tw/goods.php?pc=27&no=97>。

33.中國江蘇久吾高科技公司，

http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201902181297798019_1.pdf。

34.中國未來化學科技公司， <http://www.futurechemtech.com/data/scwo.pdf>。

35.https://www.ftis.org.tw/cpe/download/she/Issue21/tec21_2.htm。

36.瑞典 TPS 公司，

https://www.aec.gov.tw/webpage/policy/plans/files/plans_04_e-94_5.pdf。

37.<http://gasifiers.bioenergylists.org/products>。

38.日本巴工業株式會社，

<https://www.tomo-e.co.jp/machinery/products/item/carbonizingfurnace.html>。

39.<http://www.ding-hui.com.tw/Carbonizer.htm>。

40.日本三菱工業(株)，

http://www.mhiec.co.jp/jp/products/water/sludge/sludge_carbonization_facility.html。

- 41.美國 PEAT 公司，<http://www.peat.com/shanghai-china.html>。
- 42.謝雅敏，“半導體業有機溶劑廠內循環再利用技術”，成亞資源科技股份有限公司，2017 年 9 月 26 日。
- 43.王允欣，“從 ICIM2014 看無稽薄膜材料之應用與趨勢”，材料世界網。
- 44.蘇振隆，“廢溶劑回收再利用技術案例探討”，耀鼎資源循環股份有限公司，2018 年 9 月 21 日。
- 45.蔣本基，“電漿氣化及廢棄物轉化能源之技術調查與評估”，行政院原委會計畫，94 年 11 月。
- 46.中國專利，一種陶瓷分子篩膜高滲透蒸發裝置及工藝(CN103551036A)。
- 47.中國專利，粗鈹中有價金屬回收工藝(CN 100475985C)。
- 48.中國專利，一種高鈹粗錫合金真空蒸餾深度除鈹的方法(CN 106048243)。
- 49.Anne Jonquière et al., “Industrial state-of-the-art of pervaporation and vapour permeation in the western countries”, Journal of Membrane Science 206 (2002) 87–117。
- 50.王熙大等，“奈米複合膜在膜分離領域的研究進展”，中國應用化學期刊，第31卷第2期，2014年2月。
- 51.史冬梅等，“高性能膜材料國內外發展現狀與趨勢”，《科技中国》2019 年第四期pp.4-7。
- 52.emew，<https://emew.com/emew-electrowinning/>
- 53.ECO SYSTEM KOSAKA，<https://www.dowa-eco.co.jp/business/recycle/>
- 54.ITIS，製程銅廢液回收技術與發展，2018。
- 55.Development of a New Recycling Process for Lithium Ion Secondary Batteries and Operation of a Pilot Plant，2019

- 56.被動電子元件業資源化應用技術手冊，經濟部工業局，2006。
- 57.德國北德精鍊凱撒冶煉廠，
<https://www.aurubis.com/en/products/recycling/technology>
- 58.比利時Metallo-Chimique，Slag Valorisation Symposium Zero Waste,2015
- 59.中國金隆銅業有限公司，
<https://www.tianyancha.com/patent/b707f6a0c5432be45e326182227592b6>
- 60.三菱綜合材料公司，
<http://www.mmc.co.jp/naoshima/process/mitsubishiprocess.html>
- 61.umicore，
https://www.researchgate.net/figure/The-new-smelter-at-the-Umicore-Hoboken-plant_fig3_293549795
- 62.Umicore，
https://www.researchgate.net/figure/Principal-flowsheet-of-Umicores-smelter-and-refinery-at-Hoboken-Belgium_fig1_293549795
63. DOWA，https://www.dowa-eco.co.jp/business/recycle/metal_recycle/
- 64.TANAKA，
https://pro.tanaka.co.jp/tc/products/Recovery_Refining.html?fm=B07
- 65.TANAKA，
https://pro.tanaka.co.jp/tc/products/Recovery_SystemforPM.html?fm=B07
- 66.J. Hoang et al, Top submerged lance direct zinc smelting, Minerals Engineering,2009.
- 67.R. W. Matusewicz et al, Large Scale Copper Smelting Using Ausmelt TSL Technology at the Tongling Jinchang Smelter, 2010.
- 68.日礦金屬，<https://www.nmm.jx-group.co.jp>。

69.台積電，連翊鈞，液中求銅-製程廢硫酸銅回收裝置應用。

70.Samsung Semiconductor Austin & emew Corporation ,Concentrate Copper Waste Treatment , 2015.