

112年度
產業循環經濟推動輔導計畫

國外資源循環經濟 關鍵技術評估報告

(廢溶劑及廢酸鹼液篇)



經濟部產業發展署

Industrial Development Administration
Ministry of Economic Affairs

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、可能產生廢溶劑及廢酸鹼液之產業現況.....	5
2.1 產業簡介及製程特性.....	5
2.2 國內主要應用案例.....	15
2.3 資源循環網絡模式.....	23
2.4 面臨問題及未來發展方向.....	28
三、廢溶劑回收及資源循環技術案例.....	30
3.1 多效蒸餾(Multi-Effect Distillation, MED)純化技術案例.....	31
3.2 機械式蒸汽再壓縮(Mechanical Vapor Recompression, MVR)技術案例.....	38
3.3 廢溶劑蒸餾回收裝置案例.....	46
3.4 滲透蒸發和滲透氣化技術案例.....	52
3.5 電透析技術案例.....	65
3.6 化學品租賃案例.....	68
四、廢酸鹼液回收及資源循環技術案例.....	72
4.1 廢硫酸回收技術案例.....	72
4.2 廢磷酸回收技術案例.....	87
4.3 廢氟酸回收技術案例.....	92
4.4 廢醋酸回收技術案例-萃取法回收醋酸技術(法國 De Dietrich 公司).....	98
4.5 廢鹽酸回收技術案例-蒸餾萃取技術(日本月島環境公司).....	100
4.6 鹼性廢液處理案例.....	102
五、結語.....	114
六、參考文獻.....	125
七、附錄.....	130

圖 目 錄

圖 2.1-1 半導體製造業鏈結構圖	7
圖 2.1-2 平面顯示器產業鏈結構圖	8
圖 2.1-3 觸控面板產業鏈結構圖	9
圖 2.1-4 發光二極體製造業鏈結構圖	10
圖 2.1-5 太陽能電池製造業鏈結構圖	11
圖 2.1-6 電腦及其週邊設備產業結構圖	11
圖 2.1-7 電動車製造結構圖	12
圖 2.2-1 長春石化公司之 IPA 循環經濟商業模式	17
圖 2.2-2 三福化工公司之 TMAH 顯影液回收再利用流程	18
圖 2.2-3 強方科技廢硫酸製成電子級硫酸之製造流程	20
圖 2.2-4 強方科技「全循環硫酸」之循環經濟的商業模式	20
圖 2.2-5 秀霖環科公司製程流程圖	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	32
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)	33
圖 3.1-3 以色列 IDE 公司多效蒸餾技術應用實例(中國天津)	34
圖 3.1-4 德國 GEA 韋根公司多效蒸餾技術應用實例	36
圖 3.1-5 印度科塔夫(KETAV)顧問公司多效蒸餾技術應用實例	38
圖 3.2-1 機械式蒸汽再壓縮系統運作流程示意圖	39
圖 3.2-2 單效再壓縮蒸發器的簡化流程示意圖	40
圖 3.2-3 加拿大 Whiting 公司機械式蒸汽再壓縮技術實廠圖片	42
圖 3.2-4 德國 GEA 公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實例	43
圖 3.2-5 德國 GEA 公司 MVR 應用於 NMP 蒸餾回收流程	44
圖 3.2-6 義大利 3V Tech 集團公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實廠圖片	46
圖 3.3-1 洗邊光阻廢液再生系統	47
圖 3.3-2 光阻剝離液回收系統(Stripper Recycle System; SRS)	49
圖 3.3-3 低濃度 NMP 廢液回收系統	50
圖 3.3-4 日本瑞環控股株式會社之 SOLPICO 設備	51
圖 3.4-1 薄膜程序之應用領域	53
圖 3.4-2 滲透蒸發與蒸氣滲透示意圖	54

圖 3.4-3 滲透氣化技術	55
圖 3.4-4 德國 GKSS 公司高性能蒸氣滲透有機膜之應用流程實例	57
圖 3.4-5 三菱化學薄膜滲透蒸發技術應用案例	59
圖 3.4-6 中國江蘇久吾高科技公司的膜分離成套設備系統實例	61
圖 3.4-7 加拿大 PETRO SEP 公司滲透蒸發模組	62
圖 3.4-8 加拿大 PETRO SEP 公司 PV 溶劑回收流程圖	63
圖 3.4-9 三菱化學公司沸石膜應用於 IPA 純化案例	64
圖 3.5-1 典型的顯影廢液處理與 SACHEM Mobius System™之比較	67
圖 3.5-2 SACHEM Mobius System™ TMAH 回收流程圖	67
圖 3.5-3 TMAH 廢液回收前後比較圖	68
圖 3.6-1 化學品租賃概念	69
圖 3.6-2 化學品採租賃模式前後工作溫度(塞爾維亞)	70
圖 3.6-3 環境部規劃之化學品租賃示範範疇	71
圖 4.1-1 乾法再生製程流程圖	73
圖 4.1-2 濕法再生製程流程圖	73
圖 4.1-3 杜邦公司 MECS SAR 廢酸再生製程流程	74
圖 4.1-4 托普索 WSA 廢硫酸再生製程流程	76
圖 4.1-5 Haldor Topsoe SmartSAR™廢硫酸回收流程圖	77
圖 4.1-6 P&P WSA 製程流程圖	79
圖 4.1-7 P&P WSA 濕法硫酸再生工廠	79
圖 4.1-8 杜邦 SULFOXTM 濕法製酸技術流程圖	82
圖 4.1-9 ERSATM 高效廢酸再生技術流程圖	84
圖 4.2-1 三和油化工業公司混酸廢液化學處理技術程序	88
圖 4.2-2 再生磷酸製成磷酸鹽肥料	89
圖 4.2-3 廢磷酸製成磷酸鈉製造流程	90
圖 4.3-1 ORGANO 公司流體化床結晶處理技術	93
圖 4.3-2 ORGANO 公司含氟廢水之處理反應器	93
圖 4.3-3 ORGANO 公司商業模式示意圖	94
圖 4.3-4 三菱化工公司氫氟酸回收系統流程圖	95
圖 4.3-5 佐倉公司氫氟酸回收系統流程圖	96
圖 4.3-6 Beta 混酸回收流程圖	98

圖 4.4-1 De Dietrich 萃取回收醋酸流程圖	99
圖 4.5-1 月島環境公司鹽酸回收濃縮流程圖	101
圖 4.5-2 日本月島環境公司蒸餾萃取設備	101
圖 4.6-1 電滲析原理圖	102
圖 4.6-2 電滲析裝置流程圖	103
圖 4.6-3 日本亞斯通公司電滲析產品外觀	104
圖 4.6-4 各種氨氮廢液處理技術適用之氨氮範圍	106
圖 4.6-5 薄膜蒸餾處理氨氮廢水示意圖	107
圖 4.6-6 氨混燒流程示意圖	108
圖 4.6-7 產氫原理示意圖	110
圖 4.6-8 旭化成公司位於福島縣水電解法製造氫的設備	111
圖 4.6-9 硝化/脫硝反應與亞硝化/厭氧氨氧化反應之比較	112
圖 4.6-10 ANAMMOX®技術操作說明	112
圖 4.6-11 利用廢酸回收處理過氧化氫的方法	113

表 目 錄

表 2.1-1 廢溶劑及廢酸鹼液之主要來源及產業現況	6
表 2.1-2 廢溶劑再利用量及產生量統計	13
表 2.1-3 廢酸鹼液再利用量及產生量統計	14
表 2.2-1 國內廢溶劑再利用現況	15
表 2.2-2 電子化學品再利用實績	16
表 2.2-3 電子化學品(IPA)規格	16
表 2.2-4 國內廢酸再利用現況	19
表 2.2-5 國內鹼性廢液再利用現況	22
表 2.3-1 資源循環模式廢清書填報注意事項(1/5)	24
表 2.3-2 資源循環模式廢清書填報注意事項(2/5)	25
表 2.3-3 資源循環模式廢清書填報注意事項(3/5)	26
表 2.3-4 資源循環模式廢清書填報注意事項(4/5)	27
表 2.3-5 資源循環模式廢清書填報注意事項(5/5)	28
表 3.1-1 多效蒸發器(MEE)蒸氣經濟統計數據	37
表 3.2-1 每公噸碳酸鈉水合物之實際耗能案例	41
表 3.3-1 日本瑞環公司 SRS 的不同的處理型式及模組	49
表 3.3-2 廢溶劑提高純度方法摘要	52
表 3.4-1 滲透蒸發(PV) 與蒸氣滲透(VP) 比較表.....	56
表 3.4-2 陶瓷膜的種類	60
表 3.5-1 離子交換膜的分類表	65
表 3.6-1 黏合劑租賃計價方式	70
表 4.1-1 生產 1 萬公噸/年之乾法硫酸技術與濕法硫酸技術的比較	80
表 4.5-1 典型技術與 QVF®技術回收比較	100
表 4.6-1 日本亞斯通公司電滲析產品系列	104
表 4.6-2 半導體製程廢液經電滲析後濃度比較	104
表 4.6-3 氨氮廢液處理技術之簡介	105
表 4.6-4 電解產氫技術比較表	109
表 5.1-1 廢溶劑回收及資源循環技術評析	115
表 5.2-1 廢酸鹼液純化及資源循環技術評析	120

附表 1 C-0301 合格再利用機構列表.....	130
附表 2 D-1504 合格再利用機構列表	133
附表 3 C-0202 合格再利用機構列表.....	134
附表 4 D-0902 合格再利用機構列表	139

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-廢溶劑回收及資源循環技術、廢電子化學品-廢酸鹼液回收及資源循環技術進行技術及案例評估。期協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值，藉由國外關鍵循環經濟技術之資料蒐集及國外先進技術引進，推動國內潛力廠商技術升級。

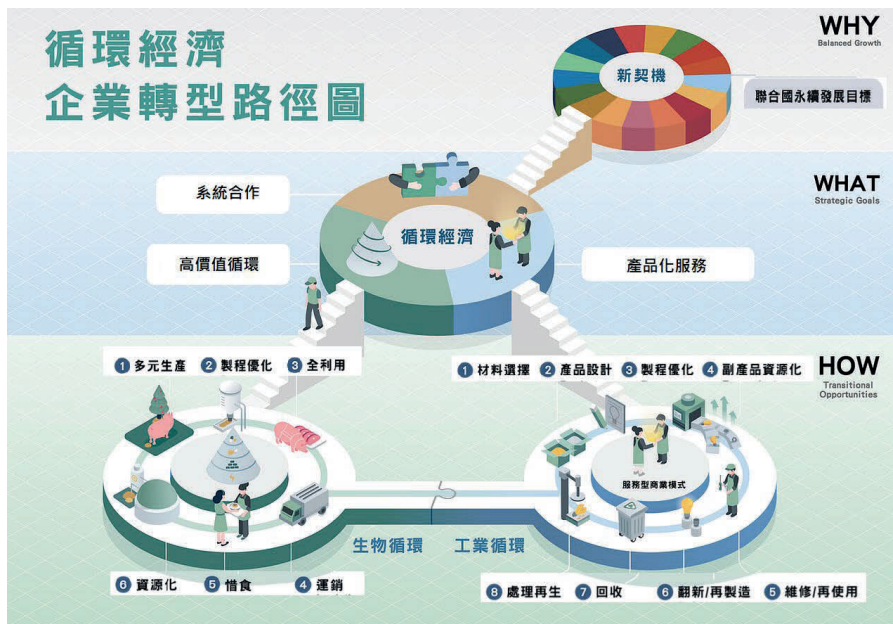
1.1 循環經濟的定義

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

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

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

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(如圖 1.1-1)。



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

圖 1.1-1 企業轉型循環經濟路徑圖

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

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

1.2 循環經濟對廢棄物處理及資源化之重要性

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

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，可提

供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，瞭解海外市場機會，進而從中發掘商機。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-廢溶劑及廢電子化學品-廢酸鹼液等資源循環處理之資源循環產業多為中小企業，對於組成複雜、需要高技術層次的有價資源常僅止於中低層級的純化回收，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、可能產生廢溶劑及廢酸鹼液之產業現況

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影響。一般而言，資源廢棄物回收後大部分成為替代原料，而替代原料的價格往往較易受到市場影響，端賴資源循環方式而定。

本評估報告旨在協助資源循環產業提升競爭力及創造新價值，期藉由國外關鍵技術之資料蒐集或國外先進技術引進，未來透過技術媒合方式，協助國內潛力廠商進行技術升級。

2.1 產業簡介及製程特性

有關廢溶劑回收及資源循環技術、廢酸鹼液回收及資源循環技術中的廢棄物之來源以電子產業為大宗，且我國政府過去在電子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。茲針對我國上述二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：

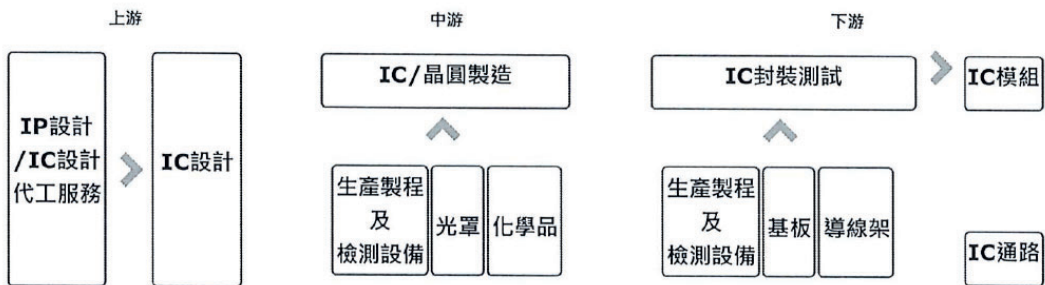
表 2.1-1 廢溶劑及廢酸鹼液之主要來源及產業現況

廢棄物來源類別	產業別	產業範圍	循環經濟困境	既有循環經濟方案
廢溶劑	半導體製造業	<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。 	<ul style="list-style-type: none"> 產生大量有機廢液(包含廢光阻液、異丙醇等)。 	<ul style="list-style-type: none"> 異丙醇純化再利用 光阻廢液純化再利用 稀釋劑廢液純化再利用
	電腦及其週邊設備製造業	<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
	光電材料及元件製造業	<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"> 異丙醇純化再利用 光阻廢液純化再利用 稀釋劑廢液純化再利用
	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。 	<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"> 廢酸鹼液回收 光阻廢液純化再利用
廢酸鹼液	光電材料及元件製造業	<ul style="list-style-type: none"> 事業在蝕刻製程產生之酸性及鹼性蝕刻液。 	<ul style="list-style-type: none"> 透過資源化後，將其轉成一定比例的工業級硫酸或更高階的電子級硫酸，目前以工業級硫酸居多。 	<ul style="list-style-type: none"> 工業用途或作為廢水水質處理藥劑使用。 廢硫酸再利用 廢磷酸再利用
	半導體製造業、光電材料及元件製造業與太陽能電池製造業	<ul style="list-style-type: none"> 在製程中利用高純度氫氟酸或氫氟酸混酸進行 IC、TFT-LCD 面板與太陽能矽晶片濕式蝕刻或進行表面清洗，透過清洗水或洗滌塔洗下排入廢酸收集系統，產生含氟廢水及氮氮廢水。 	<ul style="list-style-type: none"> 氫氟酸廢液導入廠內廢水處理設施，大幅增加污泥產量。 含氟污泥應用於水泥添加時，對於既有水泥窯傳統設計有負荷不足的隱憂。 氟化鈣污泥去化受阻，廢氫氟酸委託處理量增加。 	<ul style="list-style-type: none"> 氟化鈣污泥再利用為水泥原料、人造螢石。 添加鋁酸鈉的方式製作成六氟鋁酸鈉。

資料來源：本計畫彙整。

1. 半導體製造業：

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



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

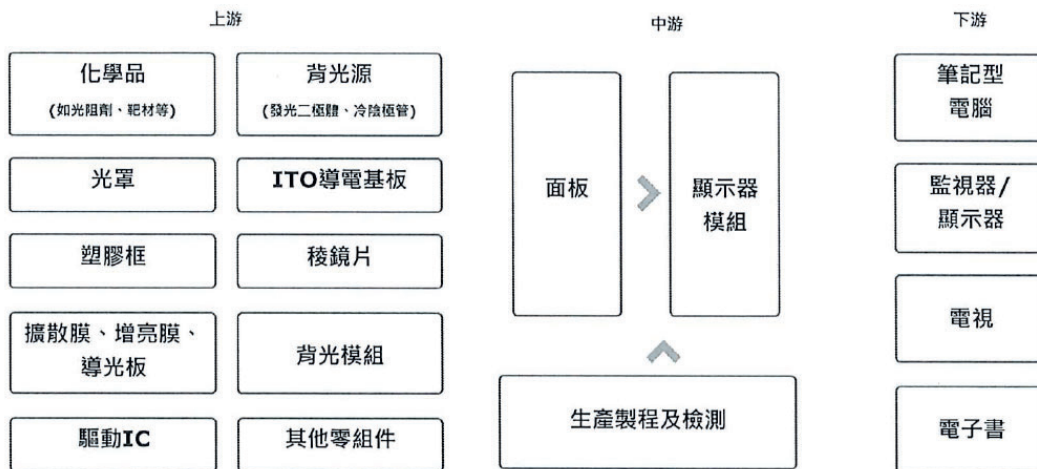
圖 2.1-1 半導體製造業鏈結構圖

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

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

2.光電材料及元件製造業

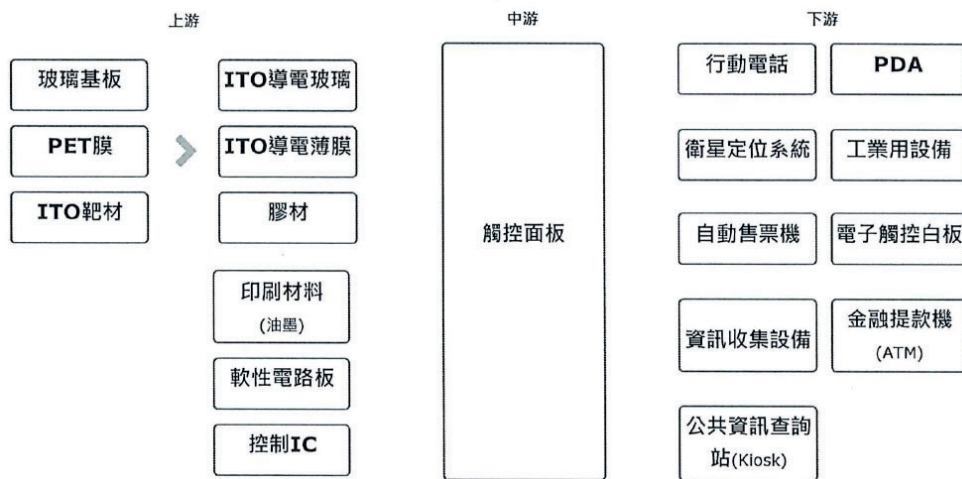
光電材料及元件製造業中液晶面板及其組件製造，是我國平面顯示器產業之重要行業，發展主流顯示技術為薄膜電晶體液晶顯示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)。液晶顯示器產業鏈之上游包括化學品材料、背光源、光罩、ITO 導電基板、塑膠框、稜鏡片、擴散膜、增亮膜、導光板、背光模組、及驅動 IC 等零組件之供應商；中游則為液晶面板、顯示器模組組裝及相關生產製程與檢測設備之供應商；下游為平面顯示器各類應用產品如筆記型電腦、液晶監視器與液晶電視、智慧型手機等供應商。其光電材料及元件製造業鏈結構如圖 2.1-2 所示。主要廢棄物有廢酸(硝酸、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



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

圖 2.1-2 平面顯示器產業鏈結構圖

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



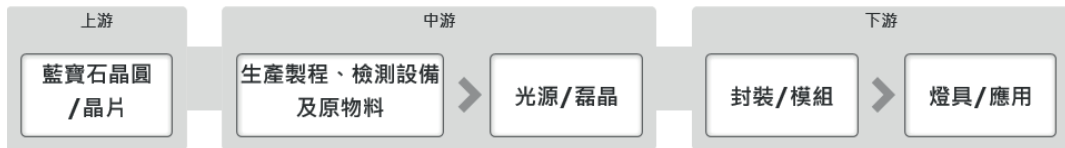
資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-3 觸控面板產業鏈結構圖

3.發光二極體製造業

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

之供應商，下游為 LED 封裝、模組及 LED 燈具之供應商。其產業鏈結構如圖 2.1-4 所示。主要廢棄物有廢酸液、廢溶劑(IPA、三乙二醇、丙酮等)、電子廢料、拋光研磨粉、螢光粉、切削液及含矽污泥等。



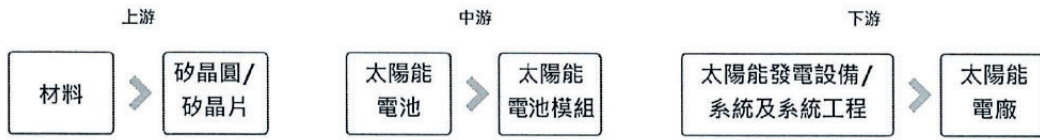
資料來源：產業價值鏈資訊平台(<https://ic.tpex.org.tw/>)。

圖 2.1-4 發光二極體製造業鏈結構圖

4. 太陽能電池製造業

太陽能電池製造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)、銅銦鎵硒(CIGS)、染料敏化、有機薄膜以及新興的鈣鈦礦等型太陽能電池，因轉換效率仍較低，但具有美觀、可撓且弱光環境可發電、未來成本可快速下降之潛力等特性，約占一成以下之利基市場。

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



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

圖 2.1-5 太陽能電池製造業鏈結構圖

5.電腦及其週邊設備產業

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



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

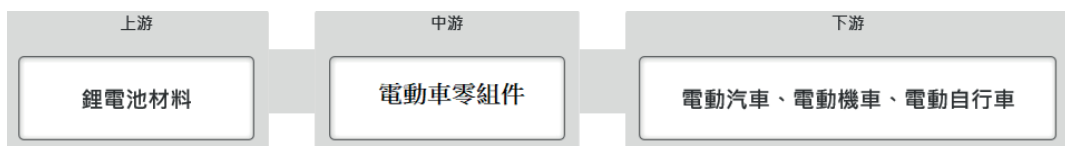
圖 2.1-6 電腦及其週邊設備產業結構圖

6. 電動車製造

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

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

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



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

圖 2.1-7 電動車製造結構圖

7.廢溶劑及廢酸鹼液再利用統計

目前國內廢溶劑及廢酸鹼液再利用量及產生量，依據環境部資源循環署「各事業廢棄物代碼申報流向統計年報」統計資料，顯示廢溶劑及廢酸鹼液仍有資源再利用之空間(彙整如如表 2.1-2~2.1-3 所示)，囿於循環經濟大勢所趨下，仍有利於思考未來回收再利用之可行性。

表 2.1-2 廢溶劑再利用量及產生量統計

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用量 (公噸)	自行處理 (公噸)	產生量 (公噸)	再利用率 (%)
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)	109	114,830	8,858	282,371	43.8%
		110	138,532	10,540	317,618	46.9%
		111	163,146	11,669	342,425	51.1%
C-0399	其他易燃性事業廢 棄物混合物	109	5	26	3,436	0.9%
		110	6	52	4,028	1.4%
		111	6	1,354	6,363	21.4%
R-1501	廢光阻剝離液	109	3,318	-	3,285	101.0%
		110	4,242	-	4,238	100.1%
		111	3,449	-	3,459	99.7%
R-2503	二甲基甲醯胺 (DMF) 粗液	109	54,266	-	54,451	99.7%
		110	67,770	-	67,597	100.3%
		111	62,497	-	62,297	100.3%
R-2506	有害混合廢溶劑	109	-	-	-	-
		110	-	-	-	-
		111	-	-	-	-
D-1504	非有害有機廢液或 廢溶劑	109	49,221	65,575	181,739	63.2%
		110	56,470	77,437	202,048	66.3%
		111	52,145	68,388	190,712	63.2%

註 1：產生量=再利用量+貯存異動量，因此造成部分年度產率超過 100%。

註 2：再利用率=(再利用量+自行處理)÷ 產生量

資料來源：環境部資源循環署-各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

表 2.1-3 廢酸鹼液再利用量及產生量統計

廢棄物代碼	廢棄物名稱	年度	再利用量 (公噸)	自行處理 (公噸)	產生量 (公噸)	再利用率 (%)
A-7201	鋼鐵工業鋼材加工 或浸置之廢酸液	109	16,194	47,804	64,290	99.5%
		110	12,838	53,322	65,872	100.4%
		111	7,162	48,457	55,206	100.7%
A-9001	電鍍廢棄之氟化物 電鍍液	109	88	-	1,363	6.5%
		110	82	95	1,502	11.8%
		111	69	15	1,426	5.9%
A-9201	使用氟化物之電鍍 程序清洗及汽提廢 液	109	2,642	-	2,648	99.8%
		110	1,665	-	1,669	99.8%
		111	1,999	-	2,014	99.3%
D-0902	無機性污泥	109	700,454	68,912	1,031,685	74.6%
		110	664,048	78,869	1,070,269	69.4%
		111	705,939	71,744	1,069,997	72.7%
C-0202	廢液 pH 值小(等)於 2.0	109	241,050	10,727	274,180	91.8%
		110	268,972	11,691	301,428	93.1%
		111	281,051	18,327	321,419	93.1%
R-0910	氟化鈣污泥	109	34,084	-	33,980	100.3%
		110	36,407	-	36,493	99.8%
		111	35,552	-	35,487	100.2%
R-2501	廢酸性蝕刻液	109	92,800	-	92,750	100.1%
		110	98,187	-	98,243	99.9%
		111	80,852	-	80,779	100.1%
R-2502	廢酸洗液	109	130,460	-	130,695	99.8%
		110	160,271	-	160,459	99.9%
		111	139,674	-	139,310	100.3%

註 1：產生量=再利用量+貯存異動量，因此造成部分年度產率超過 100%。

註 2：再利用率=(再利用量+自行處理)÷ 產生量

資料來源：環境部資源循環署-各事業廢棄物代碼申報流向統計年報

2.2 國內主要應用案例

目前對於廢溶劑、廢酸鹼液回收及資源循環技術等，國內主要的應用案例概述如下：

1. 廢溶劑

國內電子業的廢溶劑回收，大部分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、再利用等商業模式來運作，例如異丙醇(IPA)包括李長榮、長春石化等均提供此服務。有關國內廢溶劑再利用現況，彙整如表 2.2-1 所示，並以長春石化股份有限公司(IPA)及三福化工股份有限公司(TMAH)為案例摘述如下。

表 2.2-1 國內廢溶劑再利用現況

再生產品	廢棄物來源	用途	廠商
IPA 再生溶劑	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) (C-0301)	工業級溶劑	世全塗料、久資化工、萬洲化學、李長榮林園廠、台肥苗栗廠、長春苗栗廠、純聚、三合化學、耀鼎、樂利得實業
		電子級溶劑	萬洲化學、純聚、長春石化、李長榮化工、台灣瑞環、三福化工
		燃料	台灣三資科技、永源金屬、佶鼎、純聚
TMAH 再生溶劑	非有害有機廢液或廢溶劑(D-1504)	工業級溶劑	台肥苗栗廠、漢泰先進材料、純聚
		電子級溶劑	純聚、台灣瑞環
		燃料	台灣三資科技、佶鼎

資料來源：本計畫彙整

(1)長春石化股份有限公司(IPA)

長春石化股份有限公司廢溶劑回收之實績及規格分別如表2.2-2

及表2.2-3所示。其中針對異丙醇(IPA)的回收再利用，目前已配合台灣積體電路公司至中科零廢中心設廠，將廢異丙醇純化至電子級異丙醇再回送至台灣積體電路公司使用，實現逆向循環之循環經濟商業模式。而異丙醇用於半導體製程清潔，使用後成為廢異丙醇溶液，其中水占約85%以上。若採傳統直接焚化燃燒，熱值低且有VOC問題，因此長春集團開發IPA再循環製程，將廢IPA純化至工業級與電子級，除可減少原物料浪費，大幅降低製程廢棄物之生成，對環境友善外，且更進一步可以達到回用之水準，以臻循環經濟之成效。

表 2.2-2 電子化學品再利用實績

再利用項目	再利用產品	再利用起始時間
顯影劑	電子級顯影劑(TMAH25%)	2012
稀釋劑	電子級PGME；電子級PGMEA	2002
異丙醇	工業級IPA；電子級IPA	2019

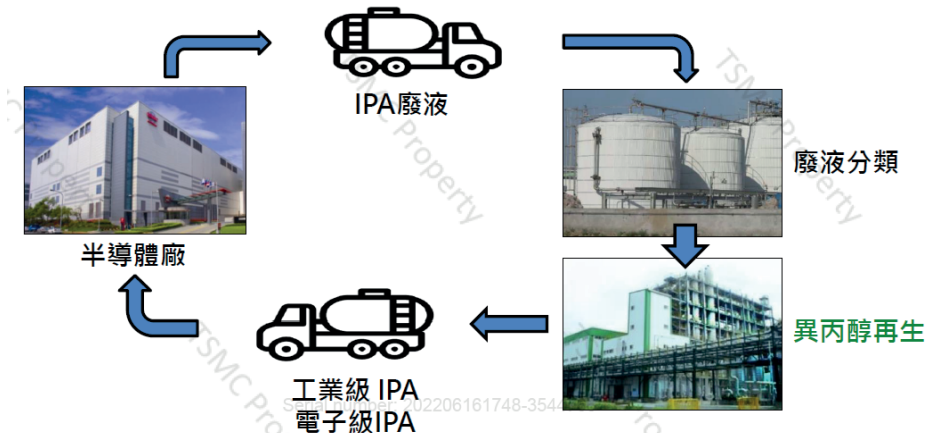
資料來源：洪士博，「中科零廢中心循環經濟分享-電子級異丙醇純化技術介紹」，2022.6.23。

表 2.2-3 電子化學品(IPA)規格

類別	純度 (%)	水分 (wt%)	酸度 (as CH ₃ COOH) (wt%)	Metal (ppb)	陰離子 (ppb)	Particle (> 0.5μm) (pcs/ml)
工業級異丙醇	> 99	< 0.1	< 0.001	無限制	無限制	無限制
工業級異丙醇	> 99.9	< 0.01	< 0.0005	< 0.1	< 50	< 50

資料來源：洪士博，「中科零廢中心循環經濟分享-電子級異丙醇純化技術介紹」，2022.6.23。

工業級異丙醇可用作塗裝溶劑、防凍劑或工業用溶劑；電子級異丙醇則可作為半導體製程中清洗晶圓用。電子級IPA於台灣市場需求約20,000MT/年，估計2025年將成長至80,000MT/年。而回收再利用之IPA品質與新品相當，工業級IPA回收品與新品價差約10%，電子級IPA與新品價差則約30%以上。長春集團於零廢製造中心建置「異丙醇再生計畫(IPA Regeneration Plan)」，目的將異丙醇廢液純化至電子級品質以上並回用至原製程，廢IPA處理量每月約2,300公噸，可產出電子級IPA近320公噸/月。其使用之技術為自行設計之蒸餾塔及挾帶劑以破除共沸限制，其循環經濟商業模式如圖2.2-1所示。



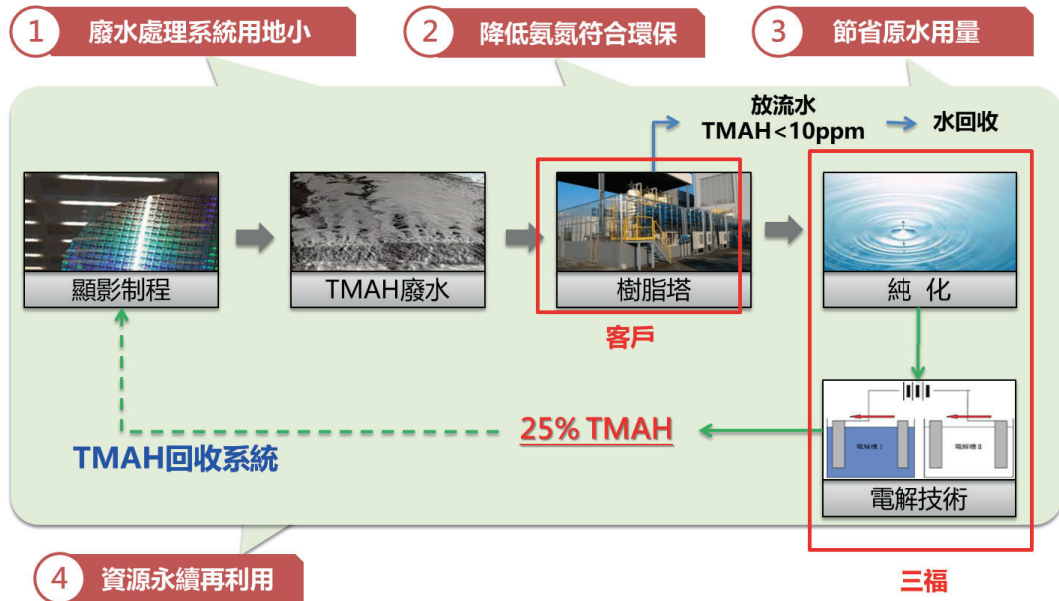
資料來源：洪士博，「中科零廢中心循環經濟分享-電子級異丙醇純化技術介紹」，2022.6.23。

圖 2.2-1 長春石化公司之 IPA 循環經濟商業模式

(2)三福化工股份有限公司(TMAH)

三福化工從事化學品工業六十餘年，除了化學品的銷售更致力於開創新的循環經濟商業模式。氫氧化四甲基銨(TMAH)是電子業微影製程必須使用的顯影液，因具生物極毒性，若無妥善處理，對生態環境將造成重大衝擊。因此，三福化工自行研發技術將客戶使用後的

TMAH廢液回收再使用，透過樹脂回收、純化與電透析，再製成TMAH重新提供客戶循環使用，截至2022年TMAH回收液已超過12萬公噸，每年節水更達1,350,000立方公尺。其製造流程如圖2.2-2所示。



資料來源：黃誌銘，「TMAH 顯影液回收再利用」，廢溶劑循環經濟關鍵技術媒合講習會，2023.9.8。

圖 2.2-2 三福化工公司之 TMAH 顯影液回收再利用流程

2. 廢酸資源化

依據環境部資源循環署「資源再利用管理資訊系統」統計廢硫酸、廢磷酸及廢氟酸之再利用狀況，彙整如表 2.2-4 所示。

表 2.2-4 國內廢酸再利用現況

類別	再生產品	廢棄物來源	用途	廠商
廢硫酸	再生硫酸	積體電路製造程序之硫酸廢水(C-0202 廢硫酸)	工業級硫酸	立光、普森環保、鴻成、達穎應材、宏鎰、盈昌、揚達、淨寶、恆誼、生揚
			電子級硫酸	強方
廢磷酸	再生磷酸	積體電路製造程序之磷酸廢水(C-0202 磷酸廢液)	工業級磷酸	立光、惠豐、台肥
廢氟酸	人造螢石	電子零組件製造、太陽能電池等行業之氟化鈣污泥(D-0902 氟化鈣污泥)	煉鋼製程中的助熔劑	皓勝、台螢、立盈環保、中聯資源
	氟化鈣	半導體製造業或光電材料及元件製造業在廢水處理過程產生之氟化鈣污泥(R-0910 氟化鈣污泥)	水泥原料	台灣水泥、信大水泥、幸福水泥
	氟矽酸鈉、氟化鈉、氟鋁酸鈉	太陽能電池製造程序、積體電路製造程序及發光二極體製造程序之氫氟酸廢液(C-0202 氫氟酸廢液)	電解鋁工業之助熔劑、玻璃陶瓷製造之助熔劑	廣銘、達穎應材、惠豐、綠升國際、雙慶、伯特利、秀霖環科

註：產業廢鹼液用於廢水處理或酸鹼中和用。

資料來源：本計畫彙整

以下介紹國內循環經濟廠商-強方科技股份有限公司(廢硫酸)及秀霖環境科技股份有限公司(廢氫氟酸)之案例：

(1) 強方科技股份有限公司(廢硫酸)

強方科技致力於廢硫酸再製的技術開發，與台灣杜邦公司合作並結合自有專利技術將半導體廢硫酸再製成符合客戶規格的硫酸。於台南科技工業區建立全球第一間以廢硫酸再製成為半導體級硫酸的工

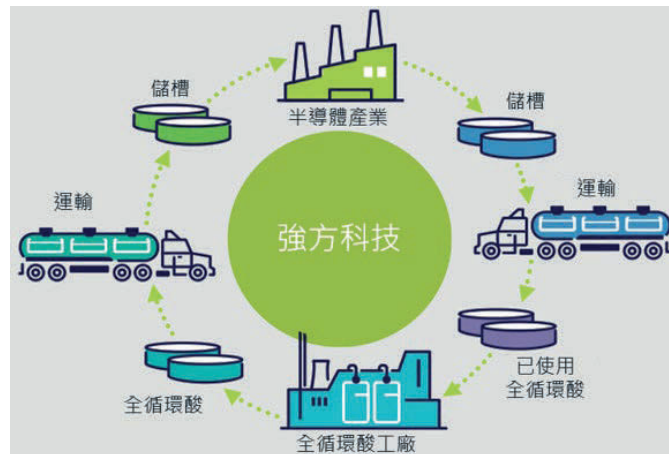
廠。其以專利製程達成電子級硫酸全循環，推動半導體產業落實電子級硫酸之全循環利用，其製造流程如圖 2.2-3 所示。



資料來源：強方科技公司網站，<https://www.sarecovery.com/index.php?page=16>。

圖 2.2-3 強方科技廢硫酸製成電子級硫酸之製造流程

強方科技以突破的技術為化學品賦予全新的面貌，導入循環經濟的概念，創造出世界首見的「全循環硫酸」，客戶將大幅降低其製造、處理或清潔過程中對於化學品的用量及減少化學品危害。其循環經濟的商業模式如圖 2.2-4 所示。

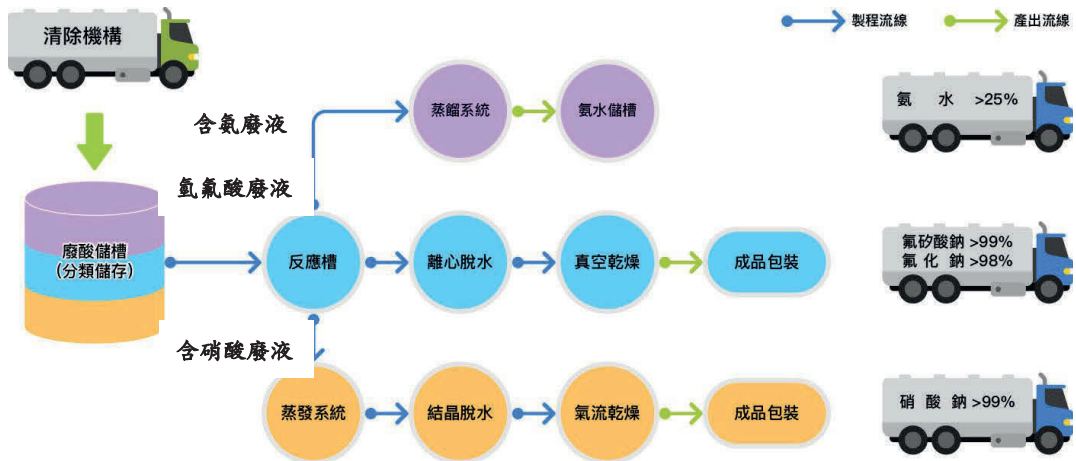


資料來源：強方科技公司網站，<https://www.sarecovery.com/index.php?page=16>。

圖 2.2-4 強方科技「全循環硫酸」之循環經濟的商業模式

(2) 秀霖環境科技股份有限公司(廢氫氟酸)

秀霖環境科技股份有限公司於 2000 年成立，於 2011 年成功開發「處理含氫氟酸廢液並回收高純度氟鹽」的技術，2012 年申請及建置廢棄物處理機構，並於 2014 年取得公民營甲級廢棄物處理機構營運許可。其主要製程如圖 2.2-5 所示，先將收受廢棄物進行分類貯存於反應槽內，依廢液種類進行處理，含氮廢液經蒸餾產生氨水(純度>25%)；氫氟酸廢液則以化學處理後，經離心脫水、真空乾燥後，產生氟矽酸鈉(純度>99%)及氟化鈉(純度>98%)；含硝酸廢液以蒸發提濃、結晶分離、乾燥後，產生硝酸鈉(純度>99%)。



資料來源：秀霖環境科技股份有限公司官方網站

圖 2.2-5 秀霖環科公司製程流程圖

3. 廢鹼資源化

高科技產業廢水氨氮來源主要來自製程使用之顯影劑氫氧化四甲基銨 (Tetramethylammonium Hydroxide; TMAH)、去光阻劑乙醇胺 (Methyl Ethyl Amide; MEA) 及 N-甲基吡咯烷酮 (N-methyl-2-pyrrolidone; NMP)、清洗劑氨水、蝕刻液氟化銨等含氮化學品；另光電業之發光二極體 (LED)

製造業磊晶製程會產生氨氣，若以洗滌塔處理廢氨氣即會產生氨氮廢水。高科技產業為減少氨氮進入廢水之負荷，優先採取源頭製程改善、化學品減量和回收再利用、化學品替代(如將清洗劑氨水改為丙酮)、TMAH 等含氮廢水分流處理、含氮廢氣以電能熱解或氣提處理等改善方式，並同步增設或調整廢水處理設施，以削減廢水中氨氮濃度。高科技廠依廠內含氮物質來源及特性，各自評估採行適切之削減方案，目前各類含氮物質處理或資源化再利用技術均已有顯著改善成效。

依據環境部資源循環署「資源再利用管理資訊系統」統計鹼性廢液之再利用狀況，彙整如表 2.2-5 所示。

表 2.2-5 國內鹼性廢液再利用現況

再生產品	廢棄物來源	用途	廠商
氨水	廢液 pH 值大(等)於 12.5(C-0201)	作為鍋爐空氣污染防制脫硝使用	欣台
		工業用硫酸銨、工業用氨水	貝民香山廠

資料來源：本計畫彙整

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

2.3 資源循環網絡模式

環境部為推動循環經濟的創新機制，允許企業和中下游的廢棄物再利用機構、加工廠組隊，打造出一個個「資源循環網絡」。藉由 111 年 11 月 8 日公布之「資源循環網絡廢棄物清理計畫審查作業要點」，開放業者整合循環鏈上中下游業者，一併打包申請資源循環網絡專案。有意申請的公司只要向環境部提出「資源循環網絡廢棄物清理計畫書」，列入上中下游廠商基本資料、循環網絡圖、廢棄物種類、清除、處理及再利用計畫等。資源循環網絡計畫書採聯席審查，由環境部召集目的事業主管機關(如工業局、科學園區管理局等)、上下游廠商所在地的環保局、專家學者、公協會代表等，在 45 天內共同完成計畫審查(最多可再延長 45 天)，也連帶檢視變更後的廢清書。讓整條「循環鏈」從廢棄物的產生、純化、再利用、加工，能同時被所有相關單位共同檢視，即可以省下行政單位的冗長溝通作業。相關審查模式可參考「事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引(第 6 次修訂版)(112/1)」，摘要說明如下：

依產源事業所產出之廢棄物或製程產出物，其後端歸納出廠內與廠外共 10 種資源循環利用模式及廢清書填報注意事項，彙整如下表 2.3-1~表 2.3-5。

表 2.3-1 資源循環模式廢清書填報注意事項(1/5)

種類	循環模式名稱	資源循環模式與廢清書填報說明
廠內	1.物料製程內未排出，逕自循環使用	 <p>建議廢清書中敘明該資源循環方式，如於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中，加入循環資源利用之流向箭頭，並輔以文字備註說明。</p>
	2.廢棄物於製程排出後，廠內回原製程作原料使用	 <ol style="list-style-type: none"> 建議廢清書中敘明該資源循環方式，如「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中，加入循環資源利用之流向箭頭，並輔以文字備註說明。 再利用之廢棄物應於「四之一、事業廢棄物之清理方式」之「再利用方式管理方式」欄位填寫「廠內再利用」文字，且清理方式屬無須清除，清運頻率應為「1個月清運0次」，於「四之三、事業廢棄物自行再利用」免填。 於廢清書「三、原、物料及產品資料」將再利用之廢棄物填報為原料，並得於其他原料說明備註再利用檢核量與廠內再利用量。
	3.廢棄物於製程排出後，經廠內其他製程或設備處理、加工，可製成再生料、其他產品、原物料，再提供廠內製程使用	 <ol style="list-style-type: none"> 廢清書中「三、原、物料及產品資料」、「四、事業廢棄物之清理方式(含自行處理及再利用)」審核時應注意其處理方式、再利用管理方式。 若為自行處理，「四之一、事業廢棄物之清理方式」處理方式應填報為「自行處理」，並說明中間處理方式，且應填報「四之二、事業廢棄物自行處理」。 若為自行再利用，「四之一、事業廢棄物之清理方式」再利用管理方式填報為「廠內再利用」，並應填報「四之三、事業廢棄物自行再利用」。 如該廠內廢棄物於廠內處理設施進行再利用或處理，清理方式屬無須清除，清運頻率應為「1個月清運0次」。
廠外	1.委託不同法人處理及再利用，做出資源化原料、材料、產品	 <p>如廢棄物為自行清除，應依「事業自行清除處理事業廢棄物許可管理辦法」第3條規定，檢視該事業是否有核可清除身份，或以租用合法運輸業之營業車輛，並由攜帶該事業員工證明文件之人員，隨車押運其所產生事業廢棄物之行為。</p>

表 2.3-2 資源循環模式廢清書填報注意事項(2/5)

種類	循環模式名稱	資源循環模式與廢清書填報說明
廠外 (續)	2.送至同一法人 不同廠區處理 及再利用	<div style="text-align: center;"> <pre> graph LR A["A公司a1、a2各廠 製程產出物"] --> B["經A公司a3廠 設備純化、再生"] B -.-> C["其他公司 製程原料使用"] C -.-> D["回各廠原製程作原料使用"] D --> A </pre> </div> <p>依其製程產出物在資源循環過程之定性，可再區分為「廢棄物之自行再利用或自行處理」、「非屬廢棄物之原物原用」2種模式。</p> <p><u>如認定為廢棄物</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1.收受廠應於「三之一、主要原料及添加物之種類及用量」「其它原料說明」文字註明物品名稱、來源廠及最大量，並應填報「四之二、事業廢棄物自行處理」或「四之三、事業廢棄物自行再利用」。 2.應於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中註明流向與數量。 3.因認定為廢棄物，故屬於自行再利用或自行處理行為，仍應依「從事事業廢棄物廠(場)內自行再利用及自行處理認定原則」判定。 4.如為自行處理，其自行處理方式是否符合「事業自行清除處理事業廢棄物許可管理辦法」第4條，進行是否應申請許可之判定。 5.如該事業採「自行清除」，需確認該事業是否核備清除者身分，或檢附相關租用合法運輸業之營業車輛資料，且由攜帶該事業員工證明文件之人員，隨車押運其所產生事業廢棄物進行廢棄物清除作業。 6.此種循環模式，需考量該處理設備歲修時，事業就該廢棄物其他清運方式與流向是否妥善。 <p><u>如認定為非廢棄物</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1.收受廠應於「三之一、主要原料及添加物之種類及用量」「其它原料說明」文字註明物品名稱、來源廠及最大量。 2.應於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中註明流向與數量。 3.針對「製程產出物(如一次液)在種類、成分、規格、型態、顏色、用途、流向及技術上均說明屬合理可行且流向無虞」，向廢清書審核機關提出下列佐證資料(視個案情形檢附)： <ol style="list-style-type: none"> (1)有價說明：包含再生前製程產出物(一次液)與再生後產物二者價格與循環經濟效益。 (2)成分分析檢測報告：說明製程產出物、再生後產物之成分、規格、型態等。 (3)現場實照：包含製程產出物之外觀、顏色等。 (4)循環模式鏈結說明：該物質各廠間流向封閉循環說明、原物原用鏈結圖示等。 (5)流向自我管控：例如一次液之物料流向放行紀錄單。 (6)再生技術佐證：需提供技術可行且可實務操作說明，如國內外循環實廠實績。 (7)替代率說明：例如再生液可替代原生新液之比例說明。 (8)其他文件：其他經審核機關指定者。

表 2.3-3 資源循環模式廢清書填報注意事項(3/5)

種類	循環模式名稱	資源循環模式與廢清書填報說明
廠外 (續)	3.物料送回原供應商調整成分與濃度，且再返回原廠原製程循環使用(跨廠區)	 <ol style="list-style-type: none"> 1.如為溶劑(如半導體廠於製程使用後之研磨液)，可依100年2月25日環署廢字第1000012048號函，送回原供應商調整成分與濃度後，再返回循環使用，非屬廢棄物清除處理範疇，其往返運送無須於廢清書「四、事業廢棄物之清理方式(含自行處理及再利用)」填報，僅需於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中載明即可。 2.如送回原供應商調整成分與濃度後，非送回原廠進行回收處理而送他處，則涉及廢棄物清除行為，應依「廢棄物清理法」規定辦理。 3.應留意原供應商應具有調整成分與濃度之相關設備與能力，避免僅為貿易商。
	4.原料購入使用後，送至其他公司純化(再製)、調整成分與濃度，再返回原廠原製程循環使用	 <ol style="list-style-type: none"> 1.如原料購自供應商，但使用後送往具實質自主管理能力之其他公司純化(再製)調整成分與濃度後，再返回循環使用，非屬廢棄物清除處理範疇。 2.應於「三之一、主要原料及添加物之種類及用量」「其它原料說明」文字註明物品名稱、來源廠及最大量。 3.其往返運送無須於廢清書「四、事業廢棄物之清理方式(含自行處理及再利用)」填報，僅需於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中載明即可。 4.如送至收受端調整成分與濃度後，非送回原廠進行回收處理而送他處，或循環數次至無法純化(再製)而有廢棄物排出，仍應於產源端廢清書「四之一、事業廢棄物之清理方式」填報相對應廢棄物。 5.如因送至收受端純化(再製)而有其衍生製程產出物時，應連同再生品全數送回產源。 6.需提供再生技術佐證，包含技術可行且可實務操作說明，如國內外循環實廠實績。 7.如產出物送往非原供應商進行再生，須由產源事業應負產源責任，提出產源與收受兩端之「循環運作管理方式計畫」予審核機關，項目包含但不限於下列各項： <ol style="list-style-type: none"> (1)新品用量紀錄：說明產源事業記錄原物料使用數量、記錄頻率、形式(紙本或系統電子報表等)、內容等。 (2)廢液貯存紀錄：說明產源事業記錄廢液貯存量記錄方式，並應每月5日前完成廢棄物貯存量申報作業。 (3)運送紀錄：說明委外或自行清運時機、頻率、記錄備查，並應完成每車次清運遞送聯單申報作業。

表 2.3-4 資源循環模式廢清書填報注意事項(4/5)

種類	循環模式名稱	資源循環模式與廢清書填報說明
廠外 (續)	4.原料購入使用後，送至其他公司純化(再製)、調整成分與濃度，再返回原廠原製程循環使用(續)	<p>(4)收受檢驗：說明收受檢驗作業流程與允收標準，以及如不符允收標準退運機制說明。</p> <p>(5)收料紀錄：說明記錄收料之數量、記錄頻率、形式(紙本或系統電子報表等)、內容等。</p> <p>(6)再生品出廠檢驗：說明再生品檢驗結果或提供再生品檢測報告。</p> <p>(7)廢棄處理：說明產源端與再生端再生物質之後端廢棄處理方式。</p> <p>(8)運作管理流程圖：繪製產源端與再生端自製程產出物產出、再生、送回原廠原製程之流程。</p>
	5.送至同一法人前處理，再送至原供應商調整成分與濃度，且再返回原廠原製程循環使用	<div data-bbox="639 642 1058 799" style="text-align: center;"> <pre> graph TD C[C 供應商] -- 販售製程原料 --> A[A公司a1、a2各廠製程產出物] A -- 回各廠原製程使用 --> C A -- 送至C再次加工 --> C A --> B[經A公司a3廠設備前處理] </pre> </div> <p>1.本模式為先送至同一法人前處理，具同一產源責任，再送回原供應商調整成分與濃度後，再返回循環使用，得視為非屬廢棄物清除處理範疇。</p> <p>2.收受廠(含同一法人之其他分廠與供應商)應於「三之一、主要原料及添加物之種類及用量」「其它原料說明」文字註明物品名稱、來源廠及最大量。</p> <p>3.應於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中註明流向與數量。</p> <p>4.針對「製程產出物(如一次液)在種類、成分、規格、型態、顏色、用途、流向及技術上均說明屬合理可行且流向無虞」，向廢清書審核機關提出下列佐證資料(視個案情形檢附)：</p> <p>(1)有價說明：包含再生前製程產出物(一次液)與再生後產物二者價格與循環經濟效益。</p> <p>(2)成分分析檢測報告：說明製程產出物、再生後產物之成分、規格、型態等。</p> <p>(3)現場實照：包含製程產出物之外觀、顏色等。</p> <p>(4)循環模式鏈結說明：該物質各廠間流向封閉循環說明、原物原用鏈結圖示等。</p> <p>(5)流向自我管控：例如一次液之物料流向放行紀錄單。</p> <p>(6)再生技術佐證：需提供技術可行且可實務操作說明，如國內外循環實廠實績。</p> <p>(7)替代率說明：例如再生液可替代原生新液之比例說明。</p> <p>(8)其他文件：其他經審核機關指定者。</p> <p>5.如送回原供應商調整成分與濃度後，非送回原廠進行回收處理而送往他處，則涉及廢棄物清除行為，應依「廢棄物清理法」規定辦理。</p> <p>6.應留意原供應商應具有調整成分與濃度之相關設備與能力，避免僅為貿易商。</p>

表 2.3-5 資源循環模式廢清書填報注意事項(5/5)

種類	循環模式名稱	資源循環模式與廢清書填報說明
廠外 (續)	6.送至同一法人前處理，再送至其他公司純化(再製)、調整成分與濃度，再返回原廠使用	<div style="text-align: center;"> </div> <ol style="list-style-type: none"> 1.如先送至同一法人其他廠區前處理後，送往不具經營權之其他公司，應視為廢棄物，則收受之其他公司應具有處理或再利用機構身分。 2.同一法人收受廠應於「三之一、主要原料及添加物之種類及用量」「其它原料說明」文字註明物品名稱、來源廠及最大量，並應填報「四之二、事業廢棄物自行處理」或「四之三、事業廢棄物自行再利用」。 3.應於「附件一、製程資料-質量平衡流程圖」中註明流向與數量。 4.因認定為廢棄物，故屬於自行再利用或自行處理行為，仍應依「從事事業廢棄物廠(場)內自行再利用及自行處理認定原則」判定。 5.如為自行處理，其自行處理方式是否符合「事業自行清除處理事業廢棄物許可管理辦法」第4條，進行是否應申請許可之判定。 6.如該事業採「自行清除」，需確認該事業是否核備清除者身分，或檢附相關租用合法運輸業之營業車輛資料，且由攜帶該事業員工證明文件之人員，隨車押運其所產生事業廢棄物進行廢棄物清除作業。 7.需考量同一法人收受廠處理設備歲修時，事業就該廢棄物其他清運方式與流向是否妥善。
	7.原料購入使用後，送至其他公司前處理，再送回供應商調整、再製造，並返回原廠使用	<div style="text-align: center;"> </div> <ol style="list-style-type: none"> 1. 棄物，則收受之其他公司應具有處理或再利用機構身分。 2. 可比照廠外循環模式1，依現行廢棄物清理法相關規定進行清除、處理及再利用。 3. 產源端應於廢清書「四之一、事業廢棄物之清理方式」填報相對應廢棄物。 4. 收受端應於廢清書「三、原、物料及產品資料」將處理/再利用之廢棄物填報為原料，並得於其他原料說明備註處理許可/再利用檢核量。

2.4 面臨問題及未來發展方向

由於國內資源循環廠商多為中小企業，對於組成複雜、需要高技術層次的有價資源常僅止於中低等級的純化回收，無法進行更高的精煉以創造價值。因此目前台灣資源循環業者在設備或技術方面，與歐美日等國比較，尚有需向先進國家學習之處。鑑於上述背景，乃針對國外資源循環關鍵技

術或設備進行蒐集評估，期望藉由本評估報告提供資源循環廠商引進或選用合適之國外先進技術或設備，協助國內潛力廠商技術升級，使得廢棄物資源回收與再生利用得以永續，並協助循環經濟產業提升競爭力及創造新價值。

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

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

有鑑於此，循環經濟的推動，則是解決此一問題的方法。國內產業目前於循環經濟的推動，在法規、經濟、市場等各方面尚面臨許多考驗與挑戰，需與跨部會合作及產官學研資源整合共同努力予以突破。建議政府應審視台灣在循環經濟上欲達到的目標與願景，規劃優先產業發展方向；另需加強法規規範，以及研議獎勵配套，吸引資金進駐等。學研單位也須強化循環經濟原物料的開發、設計、生產再製，並導入新興商業模式，以帶動業界投入，衍生多元商業模式。企業也應善盡社會責任，集眾人之力面對挑戰與機會，創造出新興產業，讓循環經濟成為下一個新藍海。未來政府也應整合產業循環經濟專家、知識、技術等資訊，積極促進循環經濟產業技術合作、拓展商機，使資源有效利用創造資源最大價值。

三、廢溶劑回收及資源循環技術案例

我國工業廢棄物許可再利用項目中「廢溶劑」類主要為半導體製造業及光電業產出為主。又公民營處(清)理項目中「廢溶劑」類以「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)」之處理量最大，主要以醇、烴、酮、醚、酯、胺、氮化合物等廢溶劑為主，通常以傳統蒸餾方式將廢溶劑提純回收再利用。

近年來半導體科技業的蓬勃發展，光電半導體產業所需使用之「電子特用化學品」如異丙醇(IPA)、光阻清洗液、廢顯影液及廢光阻剝離液等具有逆向回收或高值化應用技術，且再生有機化學品產值高，亦呈現大幅成長，因此本評估報告以此類溶劑為基礎進行關鍵技術蒐集。又該類廢溶劑基本上以濃度區分為兩種：(1)含高濃度廢溶劑廢液：其溶劑比例大於 20%，具回收價值，可應用技術回收；(2)含低濃度廢溶劑廢水：其溶劑比例小於 20%，多與其他無機廢水混合處理後排放。

其中 TFT-LCD 製程概分為前段電極圖案(Array)、中段面板組裝(Cell)、後段模組組裝(Module)等三部分，其中 Array 段是在玻璃基板上製作薄膜電晶體(TFT)，以製成 TFT 基板；Cell 段則是將 TFT 基板與彩色濾光片(Color Filter)基板進行配向組合，並灌入液晶與封裝，最後再貼上偏光片；Module 段則是將驅動 IC、背光模組以及液晶 Cell 進行最後整合。從整個流程來看，只有 Array 段的 TFT 圖案黃光微影製程與 Cell 段中的彩色濾光片製程會使用光阻劑，其投入種類分別為陣列正型光阻劑(酚醛樹脂基)與彩色/黑色負型光阻(壓克力樹脂基的 R、G、B 光阻以及 BM 光阻)等。以下主要針對製程所產生之廢溶劑進行再生回收技術介紹。

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 公司及印度科塔夫(KETAV)顧問公司等。

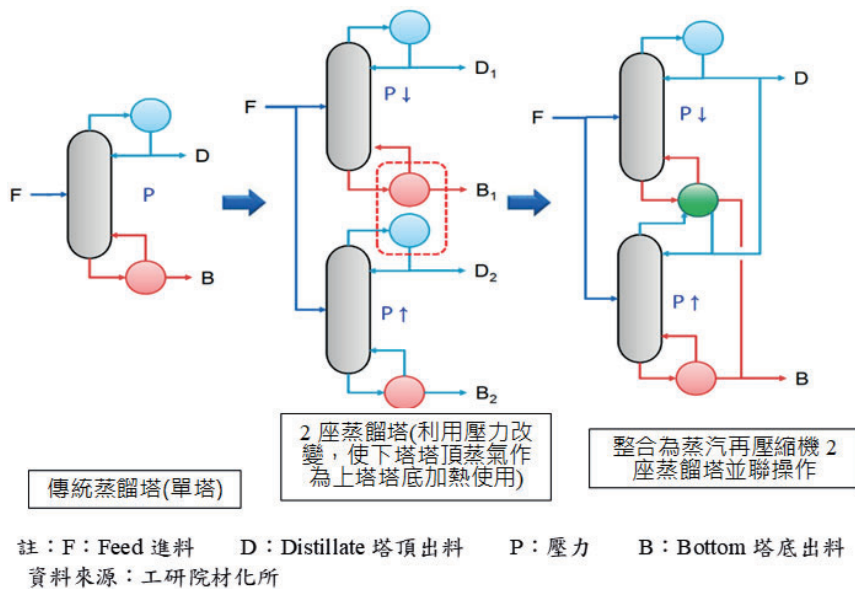


圖 3.1-1 單塔改為操作壓力不同之雙塔並聯操作示意圖

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氣相和液相。

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)德國 GEA 韋根公司

GEA 公司成立於 1881 年，是全球最大的食品、飲料、製藥和化學行業系統供應商之一，且該公司係在化學工業完整產品線和單元運營的領先供應商，其在化學領域的技術包括蒸發和結晶系統、膜過濾系統、蒸餾系統、離心機和分離技術、乾燥機和顆粒處理系統及廢氣淨化系統等，且是上述關鍵技術生產各種散裝和特種化學品的全面產品和系統組合。

圖 3.1-4 為一套 4 效的連續精餾裝置，內置降膜再沸器、下游再蒸發器和餾出物濃縮系統，多效蒸餾技術可使該系統的能源得以重複利用，能源消耗將依照效數多少逐漸降低。因再沸器中的熱量傳遞需要一定的溫差，故可使用的效數有其限制，可根據產品性質、加熱蒸汽壓力以及冷却水溫度來選定最高和最低溫度，每效的溫差越小，可用的效數則越多。

GEA 採用最高效的加熱技術和機械蒸汽再壓縮的蒸餾技術或多效蒸餾系統來處理水性混合物(如廢溶劑)。從水性混合物(如廢溶劑)中分離出來的高沸點溶劑和水，其回收和淨化是一個特殊技術。在相關的製程步驟及技術，係依其蒸氣壓高低，經分離、純化及濃縮過程。第一步是蒸發並淨化蒸餾塔中的水，其次再從剩餘的混合物在精餾塔中蒸發溶劑並純化，最後再進一步濃縮減少溶劑的損失。



資料來源：

<https://www.gea.com/de/products/distillation-fermentation/distillation/multiple-effect-distillation-plants.jsp>

圖 3.1-4 德國 GEA 韋根公司多效蒸餾技術應用實例

(4) 印度科塔夫(KETAV)顧問公司

科塔夫(KETAV)顧問公司成立於 2005 年，是印度零液體排放領域的先驅，該公司掌握了蒸發技術、先進的水和廢水處理及回收再利用技術。其溶劑回收裝置在汽提塔系統中，只能除去低沸點溶劑或沸點低於 100°C 的低揮發性溶劑。低沸點溶劑主要存在於醫藥、農藥、化工行業，有甲醇、乙醇、丙酮、MDC、乙腈、丙酮、IPA、EA 等。通過汽提塔，可以從汽提塔頂部回收廢水中的低沸點溶劑並在冷凝器中冷凝回收。如果存在高沸點溶劑，就必須搭配多效蒸發器(MEE)及攪拌式薄膜乾燥機(ATFD)進行回收及分離，達到零液體排放目標。其中 MEE 是一種單元操作，涉及從任何溶液/廢水中分階段蒸發水，以達到必要的最終濃度；ATFD 是一種通常用於在零液體排放(ZLD)工廠中實現最終

液固(鹽)分離的單元操作。

多效蒸發器是最高效、最成功的常規蒸發方法，可實現任何類型工業廢水的完全零液體排放。在開始蒸發過程之前，首先啟動冷卻水循環，並通過真空泵維持產生適當的真空，進料通過進料泵經過預熱器進入稱為排管式的管殼式換熱器，以提高進料的初始溫度，同時降低凝結水的溫度，從而減少整個系統的總能量需求。為了啟動蒸發過程，外部蒸汽被提供到排管的殼側以加熱管子。由於傳導傳熱，蒸汽將其潛熱傳遞給廢水，並且廢水中的水發生蒸發。生成的水蒸氣混合物進入稱為 VLS 的蒸氣液體分離器。在 VLS 中，蒸汽通過重力從水蒸汽混合物中分離出來，而濃縮液則通過再循環泵在排管內再循環。而為了提高蒸汽經濟性，可以添加 2 效、3 效和最多 6 效。第一效的蒸汽用作第二效的熱源，依此類推直至達到設計效果。因此蒸汽形成初期是用作進一步效果的加熱介質，故除了第一效之外，之後各階段可不需要蒸汽。保持蒸汽的適當流動隨著流程進一步移動，溫度和壓力會逐漸降低，如表 3.1-1 所示。多效蒸餾技術的優點包括最大限度的提高蒸汽經濟性、減少運行零液體排放系統的能源需求、提供高傳熱面積、可持續且成功的 ZLD 傳統方法。其實際設備案例(Grasim Ltd - Renukoot - 120 KLD MEE + ATFD)如圖 3.1-5 所示。

表 3.1-1 多效蒸發器(MEE)蒸氣經濟統計數據

類型	實際蒸氣	蒸發水量	能源消耗
單效系統	1 公斤	1 公斤	100%
二效系統	1 公斤	2 公斤	50%
三效系統	1 公斤	3 公斤	33%
四效系統	1 公斤	4 公斤	25%
五效系統	1 公斤	5 公斤	20%

資料來源：<https://ketavconsultant.com/multi-effect-evaporator-mee/>



資料來源：<https://ketavconsultant.com/multi-effect-evaporator-mec/>

圖 3.1-5 印度科塔夫(KETAV)顧問公司多效蒸餾技術應用實例

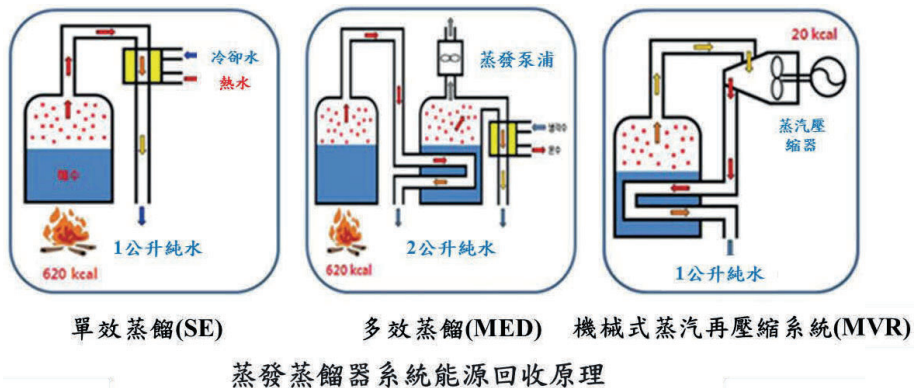
3.2 機械式蒸汽再壓縮(Mechanical Vapor Recompression, MVR)技術案例

1. 機械式蒸汽再壓縮技術原理

一般蒸發單元利用原生蒸氣進行加熱、蒸發、濃縮、結晶等作業用途，且二次蒸氣不再利用而直接送至冷凝器去除之操作程序，稱之為單效蒸發。為充分利用蒸氣熱能，多改採串連數個蒸發器，使蒸氣熱能得以多次利用，從而提高熱能利用率，稱之為多效蒸發，串聯蒸發器依序命名為效數，例如第 2 個蒸發器稱之為第 2 效。由於每一效之二次蒸氣熱能皆低於原生蒸氣，故機械蒸氣再壓縮系統 (Mechanical Vapor Recompression, MVR) 技術應運而生。上述單效、多效及機械蒸氣再壓縮

系統之蒸發及冷凝原理如圖 3.2-1 所示。機械蒸氣再壓縮系統是一種壓縮循環之工業熱泵，以系統內自身流體為冷媒加以壓縮循環，是重新利用蒸發濃縮過程產生二次蒸氣冷凝潛熱，做為系統本身的加熱源，因而減少蒸發濃縮過程對額外蒸氣的需求，如此一來，充分利用原本要廢棄的蒸氣，又提高了熱效率，其經濟性相當於多效蒸發的 10~30 效。可運用在煉油石化蒸餾系統、製程濃縮(化工、食品、造紙及藥品業)、溶劑回收再利用、純水回收再利用、廢水減量及海水淡化產生純水。

其優點包括：(1)相較於一般蒸發單元，能耗及運行費用較低；(2)占地面積小；(3)公用工程配套少，工程總投資少；(4)自動化程度及穩定度高；(5)無需原生蒸氣；(6)可在 40°C 下蒸發而無需冷凍設備。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 公司及義大利 3V Tech 集團公司等。



資料來源：IK Corporation 公司網站(<https://ikcorp.tradekorea.com/main.do>)

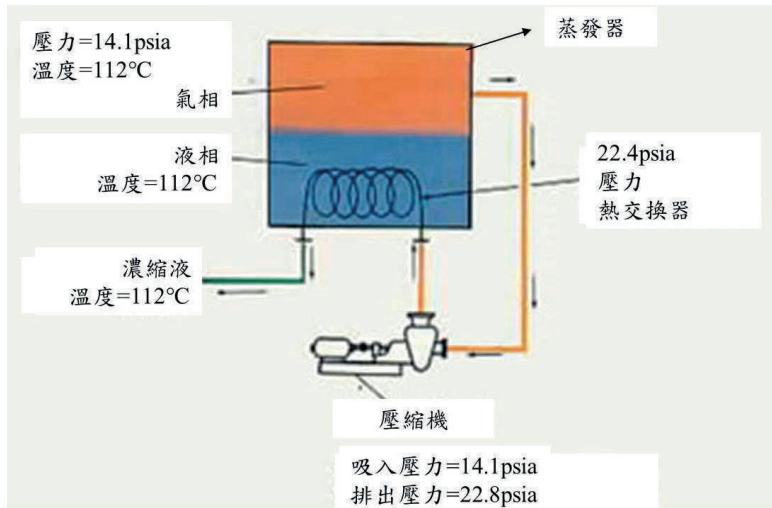
圖 3.2-1 機械式蒸汽再壓縮系統運作流程示意圖

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，則需要 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

項目 \ 技術	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，其他優點是可以降低碳足跡的環境負荷。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。

另外，德國 GEA 公司機械式蒸汽再壓縮技術(MVR)亦可應用於 NMP 蒸餾回收，尤其是應用於蒸餾濃縮高沸點溶劑。在高沸點溶劑(如 NMP 或 DMF)的回收方面，因水是低沸物質，可透過 MVR 技術將高沸點溶劑從溶解的固體(例如聚合物)或液體中通過蒸餾並分離純化，如

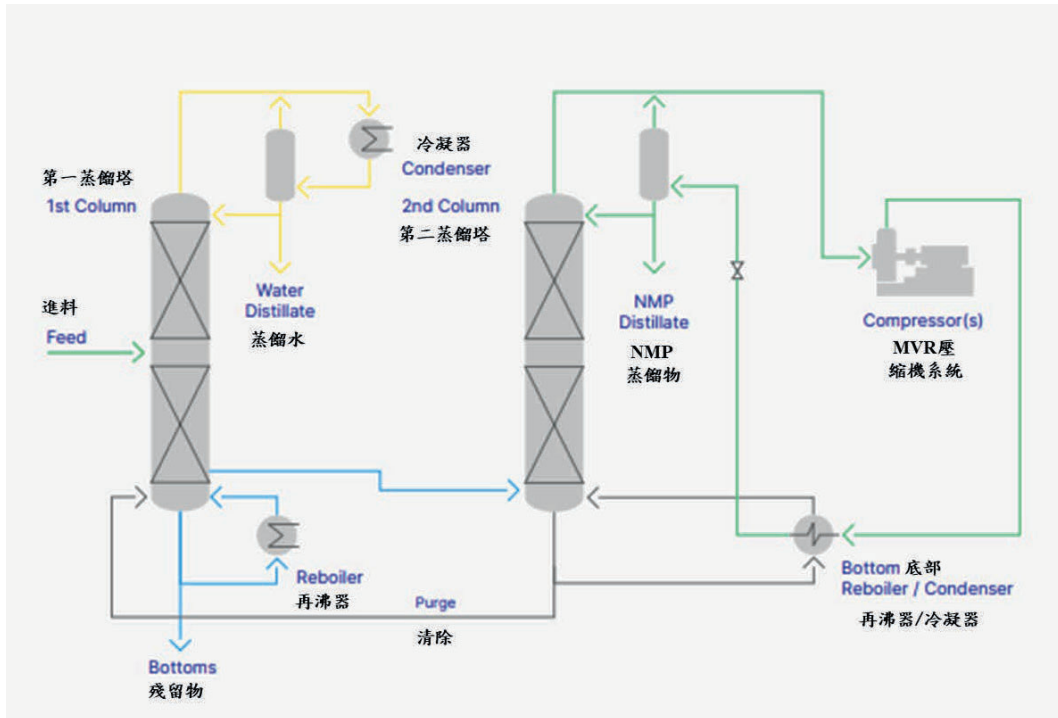
圖 3.2-5 即為 MVR 應用於 NMP 蒸餾回收流程。



資料來源：GEA 公司網站，<https://www.gea.com/en/environment/index.jsp>

圖 3.2-4 德國 GEA 公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實例

其在第一個蒸餾塔中，水從塔頂排出並經冷凝並從工廠移除，溶劑(含雜質)則在塔的下半部進行分離且以液體形式流入第二個蒸餾塔中，固體部分由底部排出。不純的溶劑送入精餾塔中，溶劑將被蒸發並由塔頂蒸餾純化分離而得，而雜質則集中在貯槽中並返回第一列的集水槽。來自第二塔的塔頂蒸氣被吸入 MVR 並壓縮到更高的壓力和溫度，再用於加熱底部的再沸器。溶劑在再沸器殼側內冷凝，再被分離出。這種設計最適合利用低含水量和高沸點溶劑的差異特性的水與溶劑的混合物。



資料來源：GEA 公司網站，<https://www.gea.com/en/environment/index.jsp>

圖 3.2-5 德國 GEA 公司 MVR 應用於 NMP 蒸餾回收流程

(3) 義大利 3V Tech 集團公司

義大利 3V Tech 集團公司成立於 1958 年，是先進製程技術解決方案和製程設備的領先供應商。3V Tech 的系統可設計用於單一用途或多用途操作，從製程或廢棄物中回收溶劑，包括蒸發、結晶、汽提、蒸餾和混合製程系統等。3V Tech 可提供設計客製化的溶劑回收裝置，這些設備裝置可以為套裝式系統或適合現場安裝的系統。公司的溶劑回收系統採用適當的合金或高質量塗層玻璃製造，可適用於高腐蝕性應用。典型應用包括從製程或廢棄物中回收溶劑、從製程或廢棄物中分離成分、溶劑分餾、節能與工場規劃等。另外亦可根據需求，3V Tech 還設計溶劑回收裝置的最佳節能規劃，以降低初設及營運成本。可選

用技術包括：多效蒸發設備(ME)、熱蒸汽再壓縮(TVR)、機械蒸汽再壓縮(MVR)、餘熱利用(如廢蒸汽、熱水等)、多種技術的結合。

由於溶劑回收裝置的最佳節能規劃在於再沸器的設置，因此 3V Tech 公司設計降膜式蒸發器及強制循環蒸發器。降膜式蒸發器是一種立式蒸發器，由頂部經過適當設計的液體分配部分、中部的管殼式排管和底部的離心或重力汽液分離器組成，是適用於濃縮含有少量懸浮固體、低中黏性流體和熱敏的成分。而列管式強制循環蒸發器由管殼式換熱器、閃蒸分離器、循環泵和循環管道組成，是適用於濃縮含有大量懸浮固體、中高黏度流體和極易結垢的成分。上述兩種再沸器特別適合作為多效(ME) 蒸發、熱蒸汽再壓縮(TVR)或機械蒸汽再壓縮(MVR)系統應用。圖 3.2-6 為義大利 3V Tech 集團公司機械式蒸汽再壓縮技術應用實例。

選用機械蒸汽再壓縮(MVR)系統的優點包括(1)加熱介質是製程蒸汽的總量，根據熱泵原理通過機械壓縮機再壓縮到更高的溫度水平。(2)新鮮蒸汽消耗量非常低，僅用於啟動和補充，使用電能(工廠輸入的能量)代替蒸汽。(3)沸點升高(BPE)增加了壓縮機實現汽化所需的壓力比。輸送壓力與吸入壓力的壓縮比越高(例如，在高 BPE 的情況下)，單位電能消耗就越高。(4)由於製程蒸汽完全再壓縮，MVR 系統的另一個優點是冷卻水消耗量可以忽略不計。



資料來源：<https://www.3v-tech.com/en/technologies-and-solutions/5/solvent-recovery>

圖 3.2-6 義大利 3V Tech 集團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。

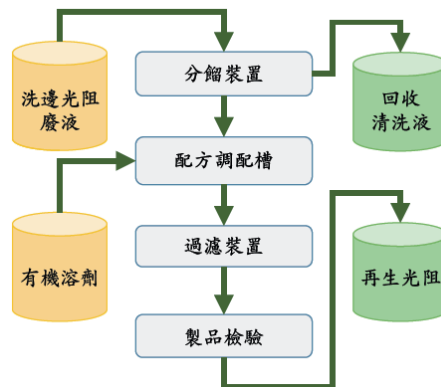
利用溶劑將固相或另一液相中之可溶性溶質溶入，達到分離或提純之操作，稱之為萃取(extraction)，萃取方式包括液體自固體中溶取溶質，稱為固液萃取(solid-liquid extraction)，也稱之為瀝濾(leaching)或滲提；液體自不互溶或部分互溶之液體中溶取溶質，稱為溶劑萃取(solvent extraction)，而以溶劑自原料中溶除溶質為目的者，稱為洗滌(washing)。

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.廢溶劑蒸餾回收技術及裝置應用實例

(1)洗邊光阻廢液再生技術

洗邊光阻廢液組成主要包含光阻樹脂(酚醛樹脂、感光劑)、有機溶劑(例如丙二醇單甲醚乙酸酯(PGMEA)，沸點 146°C)、清洗液。清洗液多是選用低於有機溶劑沸點之溶劑，例如丙二醇單甲醚(PGME) (沸點 120°C)、乙酸丁酯、甲基-3-甲氧基丙酸酯(MMP)等。由於光阻樹脂怕光、怕熱，因此再生過程中，須避免高溫加熱以及在黃光室內。日本東應化申請專利 TW I552809 揭露了一套光阻再生系統(如圖 3.3-1 所示)，利用減壓加熱分餾方式回收清洗液，並使殘留的清洗液控制在 <1%，而後再添加新鮮的有機溶劑進行配方調整，期間需要精確的控制固含量、黏度，並與新鮮光阻液特性比對，最後再經過濾、製品評估後，可製成再生光阻。



資料來源：日本東京應化工業股份有限公司，中華民國專利(TW I552809)。「再生光阻及再生光阻之製造方法」，2016 年 10 月 11 日。

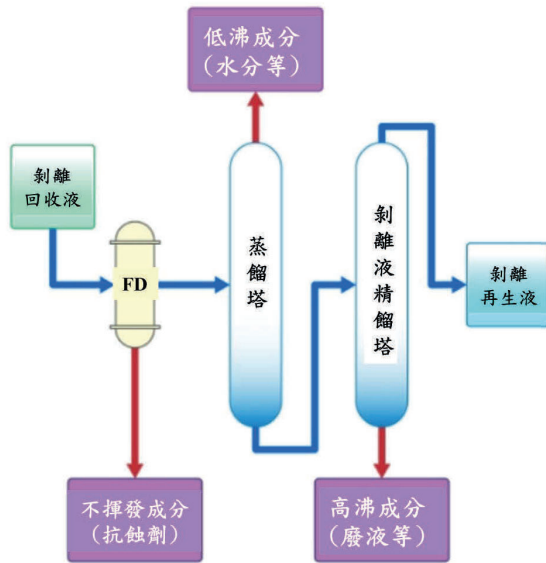
圖 3.3-1 洗邊光阻廢液再生系統

(2)光阻剝離液回收系統

在 TFT-LCD 行業中最典型的例子為廢光阻剝離液(Stripper)的回收再利用，使用後的廢光阻剝離液內除了含水分外，尚含有一些光阻劑，而這些不純物與廢光阻剝離液間的沸點差異很大，所以使用一般蒸餾即可容易分離。因蒸餾是利用不同物質有相異的蒸氣壓，也就是利用不同沸點差，以進行熱交換來達成分離的目的。

日本瑞環控股株式會社所製造之光阻剝離液回收系統(Stripper Recycle System; SRS)，可再生液晶面板製造過程中使用的剝離溶液。近年來，隨著面板基板尺寸的增大，溶劑的使用量也隨之增加。因此該 SRS 設備特色包括回收產品品質高、高回收率(90%以上)、無需使用電子級溶劑即可調整濃度、可在短時間內啟動和可自動操作性。

剝離液再生裝置原理是在液晶面板製造程序中，有一道程序稱為“抗蝕劑剝離過程”，該程序需要使用大量的剝離溶液(如二甲基亞砷(DMSO)、乙醇銨(MEA)等)。從此程序排出的剝離廢液含三種成分包括：不揮發成分(如抗蝕劑約 2%)、低沸點成分(水分約 10%等)、高沸點成分。其中非揮發性成分(抗蝕劑)在降膜濃縮器(FD)中從剝離溶液體中被分離出來，且可將抗蝕劑分離並以流體狀態濃縮，而不發生粘附。而被分離出抗蝕劑的汽提和收集液體則流入蒸餾塔中，在此蒸餾塔分離出低沸點雜質。另在剝離液精餾塔中，將汽提液組分蒸發並與剩餘的高沸點物質分離。由於剝離液精餾塔本身局具蒸發精餾作用，因此可以從汽提塔組分中精確地分離和除去重金屬，進而上層可獲得剝離再生液，下層則為高沸點物質，如圖 3.3-2 所示。



資料來源：<https://n-refine.co.jp/service/environment/srs/>。

圖 3.3-2 光阻剝離液回收系統(Stripper Recycle System; SRS)

日本瑞環控股株式會社所生產之光阻剝離液回收系統(Stripper Recycle System; SRS)有不同的處理型式及模組(如表 3.3-1 所示)，可配合廠商現況配合設置。

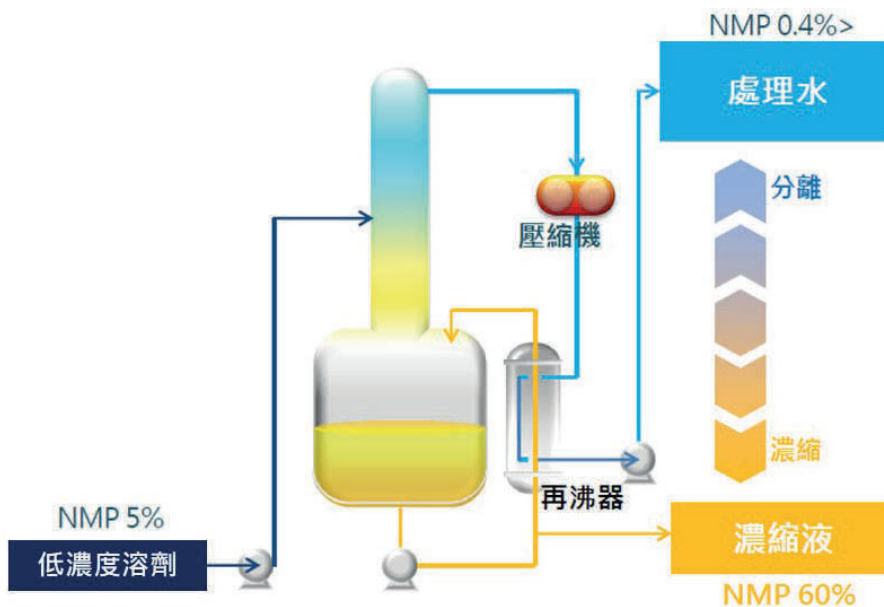
表 3.3-1 日本瑞環公司 SRS 的不同的處理型式及模組

型式	設備尺寸(公分)	處理能力
SRS-20	W4000×D1700×H2500	20L/hr
SRS-150	W6450×D2200×H7150	150L/hr
SRS-250	W6450×D2500×H7800	250L/hr
SRS-500	W11000×D3200×H10000	500L/hr
SRS-750	W11000×D3200×H10000	750L/hr
SRS-1000	W11000×D3200×H10000	1000L/hr
SRS-1300	W13000×D3200×H12800	1300L/hr

資料來源：<https://n-refine.co.jp/service/environment/srs/>。

3.低濃度 N-甲基吡咯烷酮(NMP)回收系統

NMP 在電子化學品領域可用作光阻劑剝離液、半導體及液晶顯示面板清洗劑，以及鋰離子電池生產用溶劑。NMP 廢液一般包含：NMP、胺類、水分、不純物...等，可利用物理沸點不同，將廢液、高、低不純物分離，以蒸餾方式回收 NMP 廢液予製程再利用。通常濃度高的廢光阻剝離液會利用上述 SRS 進行回收再利用。本案例係應用於低濃度的 NMP 廢水進行提純再利用之回收技術(如圖 3.3-3 所示)(由 5%廢水中提濃至 60%)，其主要特色為從濃縮排水中回收微量溶劑成分、可降低排水處理設備負荷、濃縮溶劑達到可回收效益、減少廢水排放並回收水資源、利用熱泵系統處理成本可降至 1/10。適用範圍包括 N-甲基吡咯烷酮(NMP)、二甲基乙醯胺(DMAC)、乙醇胺(MEA)、 γ -丁內酯(GBL)等廢水(沸點比水高且不與水共沸之有機溶劑的廢水)。



資料來源：日本瑞環控股集團/台灣瑞環股份有限公司簡報。

圖 3.3-3 低濃度 NMP 廢液回收系統

(4)低濃度混合溶劑純化技術

以低濃度 15~20%異丙醇(IPA)為例，可利用 2 段式蒸餾技術先將其純化 80%以上。如日本日本瑞環控股株式會社所製造之 SOLPICO 設備(如圖 3.3-4 所示)，可回收排水中低濃度有機溶劑，適用於二氯甲烷、Ammonia、IPA、丙酮、乙醇、EDC 等。



資料來源：日本瑞環控股集團/台灣瑞環股份有限公司簡報。

圖 3.3-4 日本瑞環控股株式會社之 SOLPICO 設備

若溶劑特性需提濃至 87%時(即 IPA 87 wt% /水 13wt%產生共沸(氣液相組成相同))，其受熱分解或產生化學反應，或是在共沸點下氣相與液相組成相同，形成共沸混合物，則無法再透過傳統蒸餾方式將溶劑分離純化。因此一般廢溶劑常見前端提高純度的方法為：真空蒸餾、共沸蒸餾或萃取蒸餾等技術整合。基此，可透過改變壓力使組成改變的真空蒸餾法；還可加入共沸劑，經由蒸餾將低沸點的共沸物自塔頂蒸出，分離出溶劑於塔底純化回收，為共沸蒸餾法；或加入高沸點萃取劑破壞共沸狀態，從塔頂分離出高揮發度成分，為萃取蒸餾

法，再次提高溶劑濃度達 99.5%以上。另可依廢溶劑特性整合採用蒸發滲透膜或蒸汽滲透膜技術，進一步提純濃度達 99.99%以上，可有效降低製程操作成本。目前日本、美國、德國等均是利用此技術進行 IPA 溶劑回收，其原理摘要如下表 3.3-2。

表 3.3-2 廢溶劑提高純度方法摘要

技術名稱	原理摘要說明
變壓蒸餾 (pressure swing distillation)	利用共沸點隨壓力不同而變化的物理特性，改變壓力跳過共沸點，再將靠近共沸點的混合物送入不同壓力的蒸餾塔，將共沸點降低蒸餾取出所需濃度。
共沸蒸餾	加入共沸劑與欲分離的溶劑成分混合產生沸點較低的新共沸物，經蒸餾及冷凝後，低沸點的共沸物自塔頂取出，欲分離的溶劑停留塔底以純化回收。
萃取蒸餾	加入易溶、高沸點、不易揮發的萃取劑，可提高共沸物的相對揮發度，低沸點的成份於塔頂回收，下層液再經另一組蒸餾設備進行分離，回收萃取液再使用。
滲透膜分離技術	藉物質與薄膜之親和力差異、擴散速率不同，以壓力差為驅動力，使水穿透薄膜蒸發脫附，並使欲分離的物質達到脫水目的。

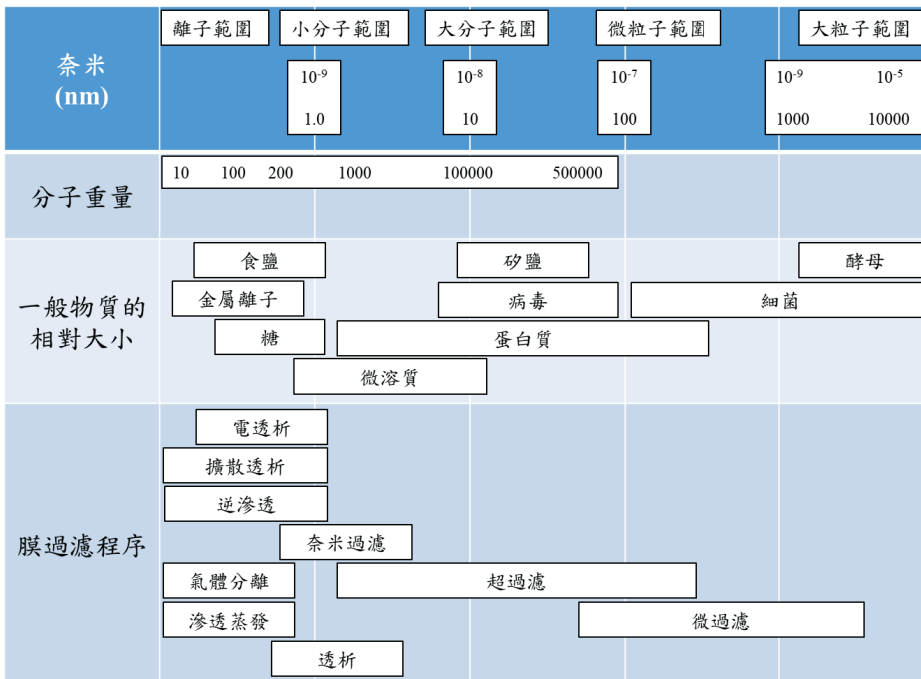
資料來源：廢溶劑回收再利用技術及案例探討簡報，耀鼎資源循環股份有限公司 (2018/9/21)

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：

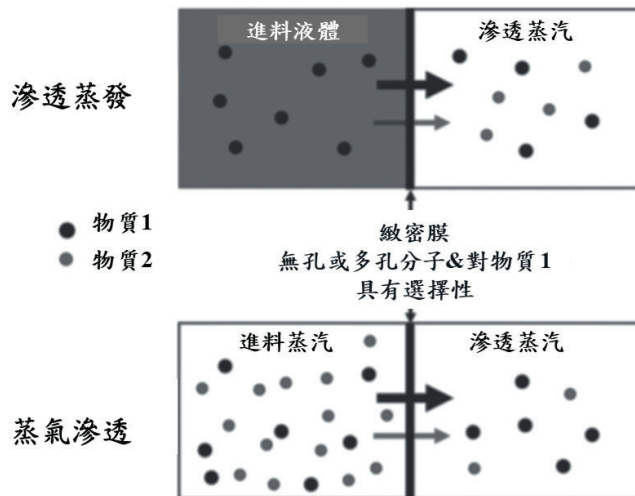


資料來源：陳孝行，「兩岸薄膜分離程序之應用」，兩岸環保服務業交流平台電子報(2014/12/15)。

圖 3.4-1 薄膜程序之應用領域

(1) 滲透蒸發程序

滲透蒸發(Pervaporation, PV)是藉由混合物中各物質對緻密具選擇性薄膜的親和性不同所造成的溶解度差異以及溶劑分子大小不同所造成的擴散速率不同，來達到分離的目的，而如果進料廢液有不揮發、溶解度低或是易沉澱之物質，則可以讓進料端為氣體再通過薄膜分離，也就是蒸氣滲透(Vapor Permeation, VP)，如圖3.4-2所示。滲透端抽真空減壓當作溶液移動的驅動力，使進料能確實通過薄膜。結合滲透蒸發與蒸氣滲透具有以下優點：(1)由於只藉由薄膜特性便能分離，故分離共沸物時不需要額外加入共沸添加劑(Entrainer)，也不會有共沸添加劑被排放出來，對環境衝擊小。(2)與傳統蒸餾塔相比，薄膜模組較為小型，操作空間小且簡便。(3)不論進料端是液體或氣體皆能處理且能同時處理多種有機溶劑混合之廢液。(4)滲透蒸發不需要加熱至沸點即可分離，操作溫度低，能降低能源成本與操作成本。

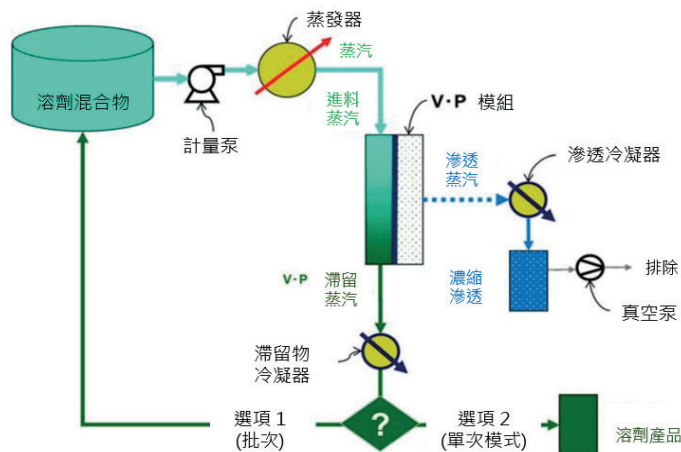


資料來源：童國倫等，「膜分離技術在化工程序強化上之新應用」，DEC 2021工程，第94卷04期，pp.27~40。

圖 3.4-2 滲透蒸發與蒸氣滲透示意圖

(2) 蒸氣滲透程序

蒸氣滲透(Vapor Permeation, VP)是分離混合蒸氣的有效技術，透過化學組成差異或活性差異產生驅動力，分離揮發性化合物。在蒸氣滲透中，進料是蒸氣，而不是滲透蒸發中的液體，因此膜上沒有相變或明顯的溫差。在蒸氣滲透膜脫水過程中，含水混合有機溶劑經預熱後進入薄膜進料側，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，在膜兩側利用水蒸汽分壓之壓差推動下透過膜，並在膜滲透側氣化為水蒸汽。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。可以選擇將脫水的截留物冷凝返回到進料源罐(再循環批次處理模式)或將截留物作為溶劑產品(單次模式)進行管理，示意圖如圖 3.4-3。



資料來源：Review of Pervaporation and Vapor Permeation Process Factors Affecting the Removal of Water from Industrial Solvents, J Chem Technol Biotechnol. (2020/3/1) U.S. EPA Public Access¹

圖 3.4-3 滲透氣化技術

¹ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7147810/pdf/nihms-1554670.pdf>

蒸氣滲透(Vapor permeation, VP)與滲透蒸發(Pervaporation, PV)皆被視為「潔淨技術(Clean technologies)」，而 VP 基於過去發展 PV 技術及工業應用所累積的經驗與知識，近 10 年來發展快速。VP 與 PV 通常被通稱為「溶液擴散」或「吸附擴散」分離，其驅動力為薄膜的進料側與滲透側間的液相濃度差或氣相分壓差，兩者最大的不同在於進料成分的相狀態、流動性質等，如表 3.4-1 所示。

表 3.4-1 滲透蒸發(PV) 與蒸氣滲透(VP) 比較表

滲透蒸發(PV)	蒸氣滲透(VP)
●進料為流體	●進料為蒸汽或蒸汽與氣體的混合物
●需要液體-蒸氣相變化，涉及汽化的焓	●不需要相變，且不需薄膜上游端與下游端的溫度差
●驅動力為薄膜兩側化學勢、濃度梯度差	●驅動力是進料中各組分的分壓
●不能透過薄膜兩側間的壓力差來增加驅動力	●可以通過壓力增加來增加驅動力
●滲透液(Permeate)必須具揮發性	●可以應用於更大的模組
●薄膜與液體直接接觸，反應過程中可能會使薄膜劣化	●因薄膜不與反應環境直接接觸，薄膜使用壽命長

資料來源：郭昱玲等，「精進廢溶劑分離純化技術以實踐再利用循環經濟」，工業污染防治第 149 期(Sep. 2020)，pp.129~147。

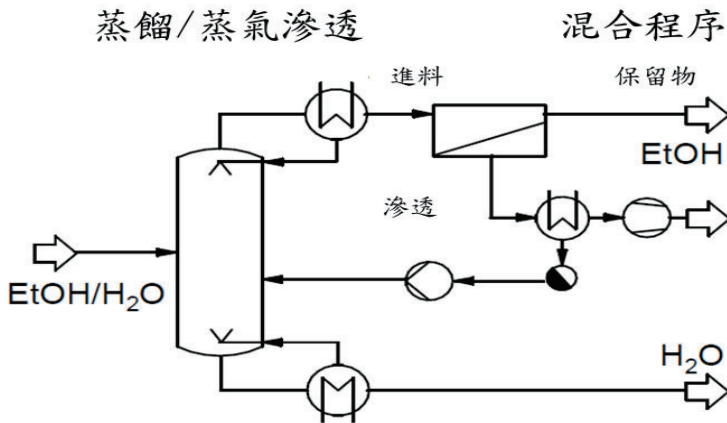
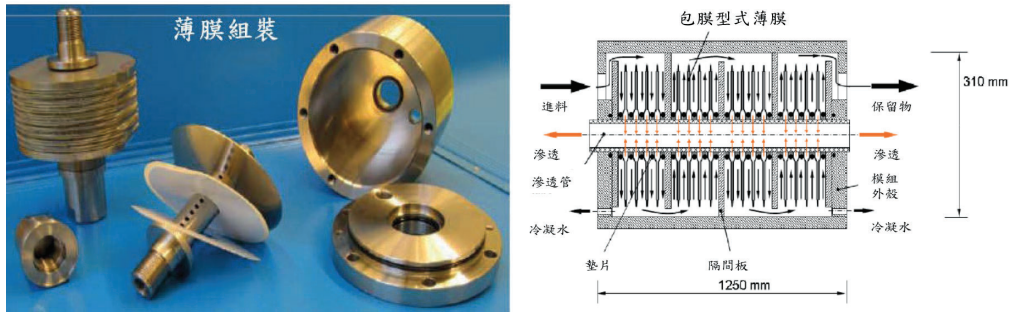
2.滲透蒸發、蒸氣滲透及電透析滲透技術應用實例

(1)德國 GKSS 公司

滲透蒸發和蒸氣滲透作為分離液體和蒸氣混合物方式，相關案例如圖 3.4-4 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；



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

圖 3.4-4 德國 GKSS 公司高性能蒸氣滲透有機膜之應用流程實例

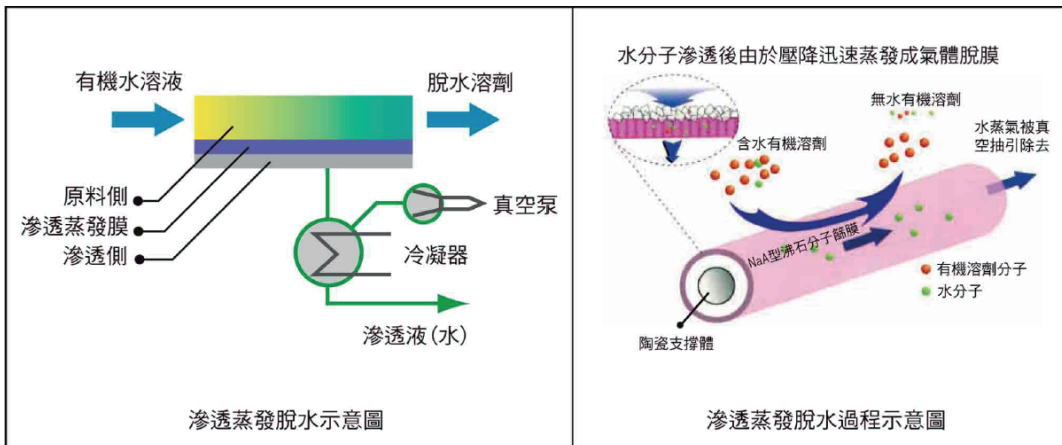
(2) 日本旭化成、三菱、日立、東麗公司

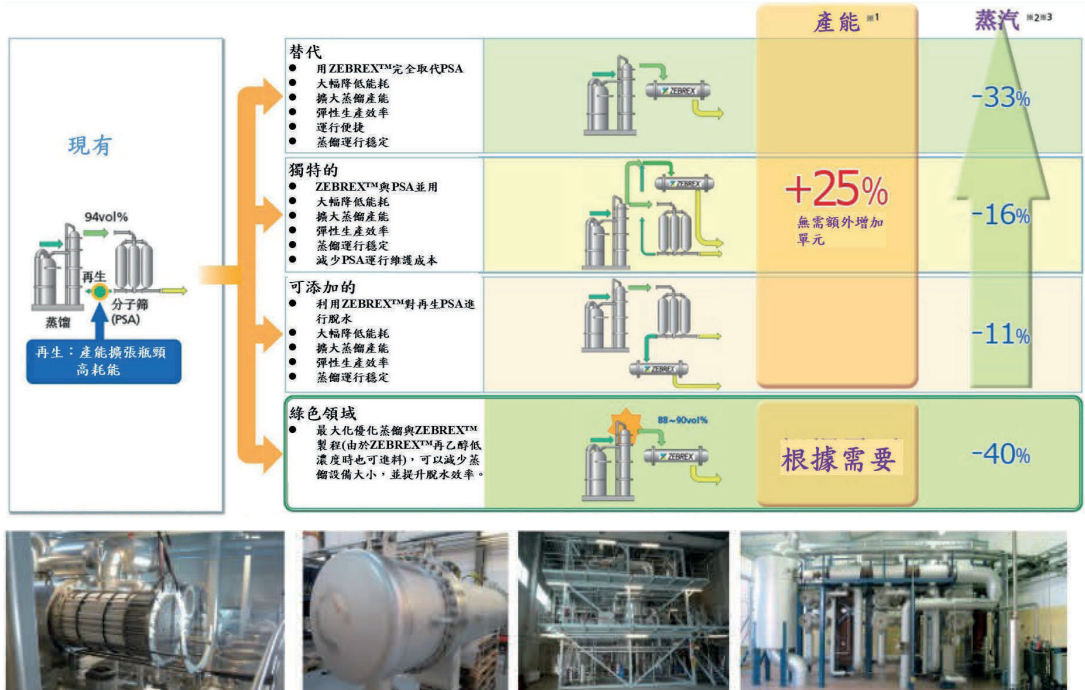
滲透蒸發技術是一種用於異體混合物分離的新型膜分離技術，與傳統分離技術比較，滲透氣化具有分離效率高、能耗低、操作方便等優點。與其他膜相比，沸石分子篩膜由於其具有化學穩定性、熱穩定

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。日本三菱化學相關 PV 技術案例應用，如圖 3.4-5 所示。

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。





資料來源：

https://www.m-chemical.co.jp/cn/products/departments/mcc/ion/product/1202348_8785.html

圖 3.4-5 三菱化學薄膜滲透蒸發技術應用案例

(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

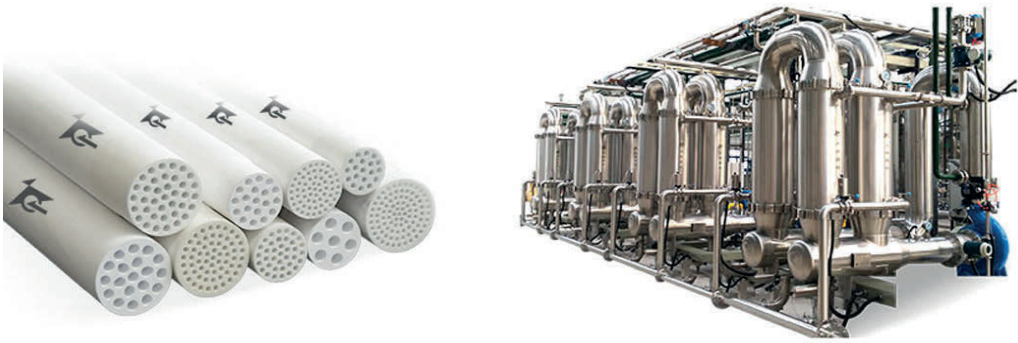
陶瓷膜作為無機膜的一種，是由氧化鋁(Al₂O₃)、氧化鋯(ZrO₂)和二氧化鈦(TiO₂)等粉體原料，經特殊技術製備而成的具有特殊選擇性分離功能的高性能膜材料，以其分離效率和分離精度高、化學穩定性好、耐酸鹼、耐高溫、耐有機溶劑、機械強度高等優異性能，在高溫、溶劑和反應體系等苛刻環境下的過程，工業分離和強腐蝕性、高溫、高鹽、含油、高懸浮物等特種水處理領域體現了良好的適用性。按孔徑分，陶瓷膜分為微濾膜、超濾膜和奈濾膜，如表 3.4-2 所示。

表 3.4-2 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 μ 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	0.01~0.1 μ 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 μ 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 3.4-6 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：<https://www.jiuwumembrane.com/ceramic-membranes/>

圖 3.4-6 中國江蘇久吾高科技公司的膜分離成套設備系統實例

(4)加拿大 PETRO SEP 公司

一般來說，薄膜的工藝分為兩種類型：壓力驅動膜分離工藝，例如微濾(MF)、超濾(UF)、奈米濾(NF)和逆滲透(RO)系統等傳統薄膜過濾系統。另一種類型是熱驅動膜分離過程，例如薄膜蒸餾(MD)、滲透蒸發(PV)和蒸氣滲透(VP)解決方案。而熱驅動膜解決方案是傳統熱蒸餾的絕佳替代品，因為它們可以在較低溫度下實現更高的分離效率，而熱蒸餾由於共沸物而無法在許多應用中實現所需的分離效率。加拿大 PETRO SEP 公司專精於膜的製造及解決方案的提供，因膜的製程是綠色工業流體分離的未來，具有低營運成本和高品質的最終產品。圖 3.4-7 為其滲透蒸發模組。

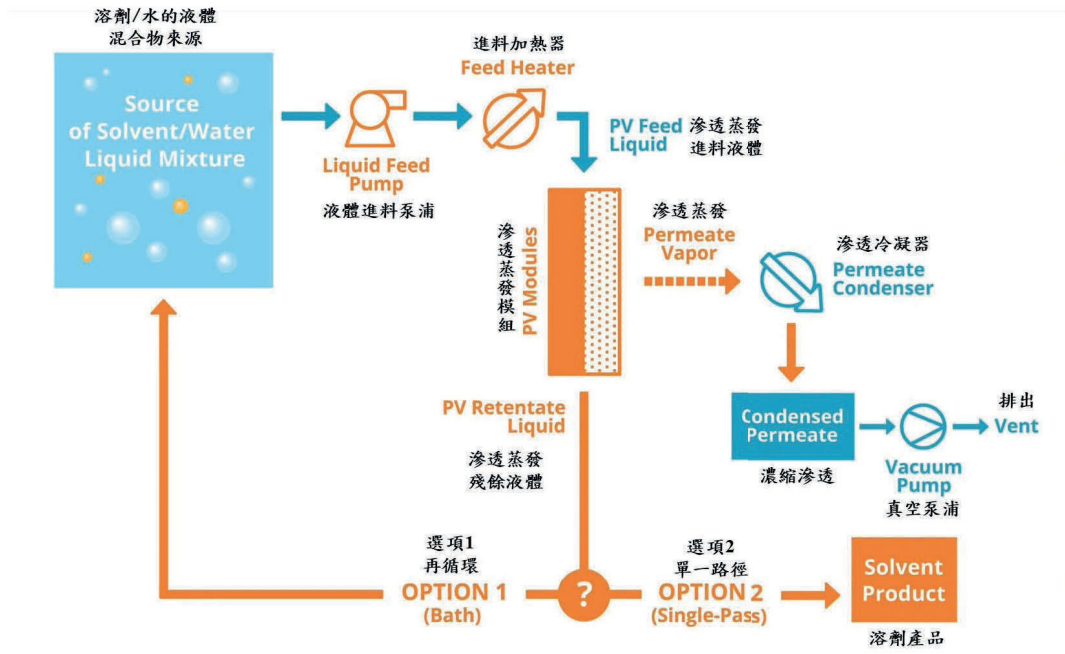
在 PV 過程中(如圖 3.4-8 所示)，原料溶液保持在特定的溫度和壓力下，以確保操作過程中呈液相(即溫度低於原料的沸點，壓力高於原料的泡點)。需要緻密的無孔膜來執行從混合物中選擇性分離特定化合物的過程，從而控制 PV 過程的效率。滲透透過無孔選擇性滲透膜的組成物在膜內部的某處蒸發，直到到達另一側，即滲透側。滲透側常保持真空狀態，確保較大的驅動力。已滲透的組分(「滲透物」)被冷凝並再次以液相收集。未滲透過膜的液流稱為“滯留物”，並且集中在滲透性較差的物質中。

PETRO SEP 公司開發 VOC-SEP™和 AZEO-SEP™的親水無孔膜，適用於溶劑脫水應用，可製成片材或中空纖維，主要利用 PV 或 VP 進行分離。其應用領域包括溶劑脫水(如乙醇、異丙醇、叔丁醇等醇類的脫水)、親有機分離(從水性工業流中回收微量有機化合物)、有機/有機分離(從工業製程流中回收某些增值有機化合物)、少量雜質的回收和平衡反應等。其優點包括能耗低、可使用廢熱能源、不需要再生、不宜在高壓下工作、易於操作、控制和維護、資金成本低及佔地面積小。



資料來源：加拿大 PETRO SEP 公司網站。(https://petrosep.com/)

圖 3.4-7 加拿大 PETRO SEP 公司滲透蒸發模組



資料來源：加拿大 PETRO SEP 公司網站。(https://petrosep.com/)

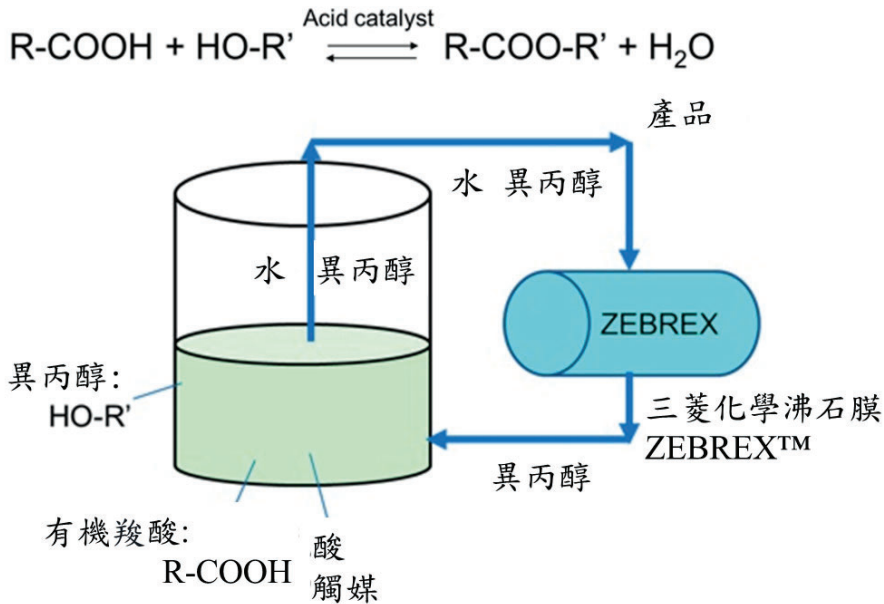
圖 3.4-8 加拿大 PETRO SEP 公司 PV 溶劑回收流程圖

(5)低濃度 IPA 純化技術

Zuo 等人的研究顯示透過 PV 或 VP 的方式進行異丙醇的除水，可以發現以 VP 的方式會更適合將異丙醇脫水(Zuo, J., Hua, D., Maricar, V., Ong, Y. K. and Chung, T. S., 2017)。因此高科技產業廢溶劑——低濃度異丙醇，其主要組成水及異丙醇，成分較為單純，透過傳統的蒸餾分離技術初步提純異丙醇濃度，不需透過添加大量的萃取劑或是使用薄膜分離的方式，便可有效將低濃度異丙醇提純至 85% 以上之工業級異丙醇。但為了進一步將異丙醇濃度由 85% 提純至 99.5%，則需導入破共沸技術，除可透過傳統的共沸蒸餾或萃取蒸餾方式處理，加入低沸點的共沸劑提純異丙醇，或添加高廢點的萃取劑，達到分離效果。然而，在選用PV或VP方式需視廢溶劑特性進行評估(如濃度、pH、含水率等)，使用PV/VP技術不須加入第三成分，即能將物質提純至高濃度，此外，

其具有低能耗、處理效率高、設備佔地面積小、建構容易、可全自動操作、維護簡便等優點。

為提升溶劑的濃度，增加用途並使價值最大化外，亦考量對環境友善與效能最優化之技術，經各項技術評估分析後，在低濃度異丙醇提純製程中，前端採用蒸餾分離將低濃度異丙醇初步提純，大量降低溶劑裡的水分含量，後端則採用無機PV/VP設備，將異丙醇濃度提純至99.5%。透過整合蒸餾分離及無機蒸發滲透膜技術，能有效降低製程操作成本。圖3.4-7即為三菱化學沸石膜應用於IPA純化案例。



資料來源：

https://www.m-chemical.co.jp/cn/products/departments/mcc/ion/product/1202348_8785.html

圖 3.4-9 三菱化學公司沸石膜應用於 IPA 純化案例

3.5 電透析技術案例

1. 電透析滲透技術原理

電透析(Electro dialysis ; ED)技術是利用電場驅動的薄膜分離技術，可用來做為脫鹽、濃縮與純化等不同用途。其原理係在陰極與陽極之間，放置著若干交替排列的陽膜與陰膜，讓水通過兩膜及兩膜與兩極之間所形成的隔室，在兩端電極接通直通電源後，水中陰、陽離子分別向陽極、陰極方向遷移，由於陽膜、陰膜的選擇透過性，就形成了交替排列的離子濃度減少的淡室和離子濃度增加的濃室。與此同時，在兩電極上也發生著氧化還原反應，即電極反應，其結果是使陰極室因溶液呈鹼性而結垢，陽極室因溶液呈酸性而腐蝕。因此，在電滲析過程中，電能的消耗主要用來克服電流通過溶液、膜時所受到的阻力及電極反應。

電透析系統是讓水流經交替排列之陰、陽離子交換膜間，在直流電場作用下驅動離子通過滲透選擇性離子交換膜，如此離子可被去除或濃縮在另一水道。由於不是藉由壓力讓水通過薄膜，因此電透析系統相較於其他薄膜技術之操作壓力較低，對有機結垢之容忍度也較高。其中離子交換膜為含有活性離子交換官能基之高分子薄膜，結構上可分為「基膜」與「官能基」兩大部份，活性離子交換官能基是由具交換作用之陽(陰)離子以及與基膜相連之陰(陽)離子所組成，而離子交換膜的分類表，如表 3.5-1 所示。

表 3.5-1 離子交換膜的分類表

分類依據	種類及說明
膜中官能基之種類	(1)陽離子交換膜：含酸性官能基，如強酸性磺酸型。 (2)陰離子交換膜：含鹼性官能基，如強鹼性季銨型。
膜體結構	(1)異相膜：直接用磨細的離子交換樹脂，通過黏合劑混合

	<p>加工成型的膜。因含有離子交換官能基部份與形成膜狀結構部份具有不同之化學組成，故稱異相膜。</p> <p>(2)均相膜：不含黏合劑之離子交換膜，通常為高分子基膜直接上官能基而得，或用含官能基之高分子樹脂溶液直接製得。</p> <p>(3)半均相膜：將離子交換樹脂和黏合劑同溶於溶劑中再成膜。</p>
--	---

資料來源：邱裕閔，「倒極式電透析脫鹽技術與實廠案例介紹」，產基會。

2.電透析回收技術應用實例

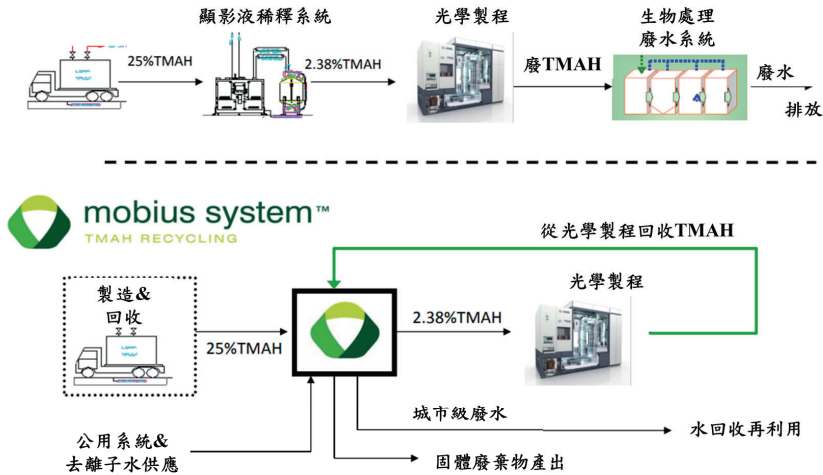
(1)美國 SACHEM 化學公司顯影光阻廢液電透析回收技術

氫氧化四甲基銨(TMAH； $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$)為有機強鹼、無色之水溶液，為原本半導體製程中之正光阻(positive photoresist)的顯影液。在光電半導體製程技術中，TMAH 溶劑被大量使用於半導體或液晶顯示器中薄膜轉換器的生產過程。多數的製程反應中所使用的 TMAH 濃度約於 1~3%左右，其功用為清洗和剝離劑之用途，主要用來溶解覆蓋於矽晶圓表面經紫外線照射後的正光阻，或是用來增加去除微粒子效率。在生產線前端蝕刻和生產線後端晶圓剝離或清洗中擴大 TMAH 的使用，會產生大量的 TMAH 廢液。而目前離子交換法最常應用於 TMAH 之回收，利用鹽酸或硫酸再生陽離子交換樹脂，將 TMA^+ (陽離子)轉換成氯化四甲基銨鹽(TMACl)或四甲基銨硫酸鹽(TMAX)，再由回收商處理，以電解或陰離子交換樹脂方式製成 TMAH。

圖 3.5-1 為典型的顯影廢液處理系統與 SACHEM Mobius System™之比較，以往顯影廢液之處理均係排放於廢水處理場處理之模式進行。美國 SACHEM 化學公司所開發的 Mobius System™系統具有高捕集及回收率達 99.5%以上之 TMAH、降低成本、並可增強廢水處理的容量、以及水回收再利用。SACHEM Mobius System™的 TMAH 回收

處理流程，主要係利用陽離子交換樹脂進行濃縮，再利用電透析技術進行純化為電子級 TMAH，如圖 3.5-2 所示，另其 TMAH 廢液回收前後比較，如圖 3.5-3 所示。

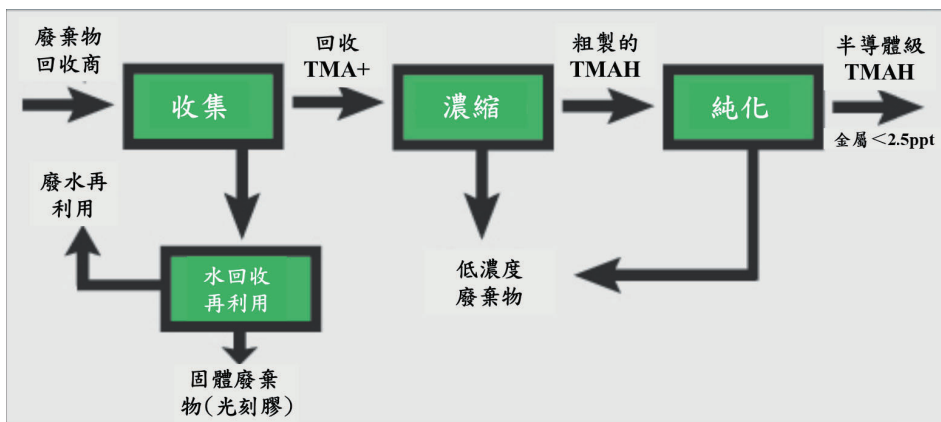
Typical – Photo Process Developer System



資料來源：

https://www.researchgate.net/publication/274310119_Strategies_for_Tetramethylammonium_Hydroxide_TMAH_Recovery_and_Recycling

圖 3.5-1 典型的顯影廢液處理與 SACHEM Mobius System™之比較



資料來源：

<https://cmcfabs.org/wp-content/uploads/2017/05/CMC-Presentation-SACHEM-CMC-051017.pdf>

圖 3.5-2 SACHEM Mobius System™ TMAH 回收流程圖



資料來源：

<https://cmcfabs.org/wp-content/uploads/2017/05/CMC-Presentation-SACHEM-CMC-051017.pdf>

圖 3.5-3 TMAH 廢液回收前後比較圖

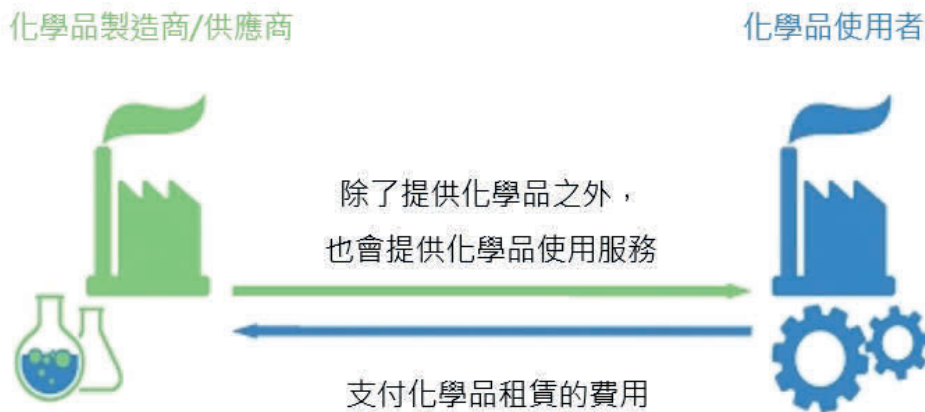
美國 SACHEM 化學公司與日本長瀨產業株式會社於 2008 年 1 月合資成立合資森恩科技有限公司(SN Tech)，並聯合推廣的 Mobius System™ TMAH 回收設施，且於 2009 年 10 月於日本大阪 Sharp G10 設立第一家商業規模的工廠。其技術內容領先國內且與三福化工雷同，均能應用於半導體級的 TMAH。

3.6 化學品租賃案例

隨著全球工業化發展，過去採用的線性消費模式，造成許多環境問題，且化學品供應商為了銷售量以獲得最大利益，常常造成化學品生產過剩或使用者未能於使用期間內使用完畢等問題，而浪費資源。因此，為協助產業落實化學品循環利用，衍伸出化學品租賃(Chemical leasing)的商業模式(如圖 3.6-1 所示)，其定義是在無買賣行為或是所有權轉移的情況下，製造商或供應商提供客戶使用化學品，並收取費用，再行回收或處理的商業行

為。

另外，聯合國工業發展組織(United Nations Industrial Development Organization, UNIDO)、聯合國環境署(United Nations Environment Programme, UNEP)、國際清潔生產中心(National Cleaner Production Centres, NCPC)進行合作，於塞爾維亞、祕魯、斯里蘭卡、烏干達等開發中的國家推動化學品租賃計畫，以達成綠色經濟商業模式，其商業模式的優點除了製造商或供應商擁有較專業的技術可提供客戶最佳的化學品使用方式，進而提高化學品的使用效率及效益外，化學品製造商或供應商為了得到更好的利潤，會設計更具永續性和可回收性的產品或製造流程，確保化學品容易回收再利用，發揮生產者延伸責任(Extended Producer Responsibility，簡稱EPR)。化學品租賃可應用於許多行業及製程，以下主要介紹包裝黏合劑租賃模式案例，供業界參考。



資料來源：聯合國工業發展組織，GLOBAL PROMOTION AND IMPLEMENTATION OF CHEMICAL LEASING BUSINESS MODELS IN INDUSTRY，2016。

圖 3.6-1 化學品租賃概念

有關包裝黏合劑租賃模式概述如下：黏合劑常使用於產品包裝中，包括包裝紙、包裝袋、封蓋膜及標籤黏貼上。塞爾維亞最大的糖果製造公

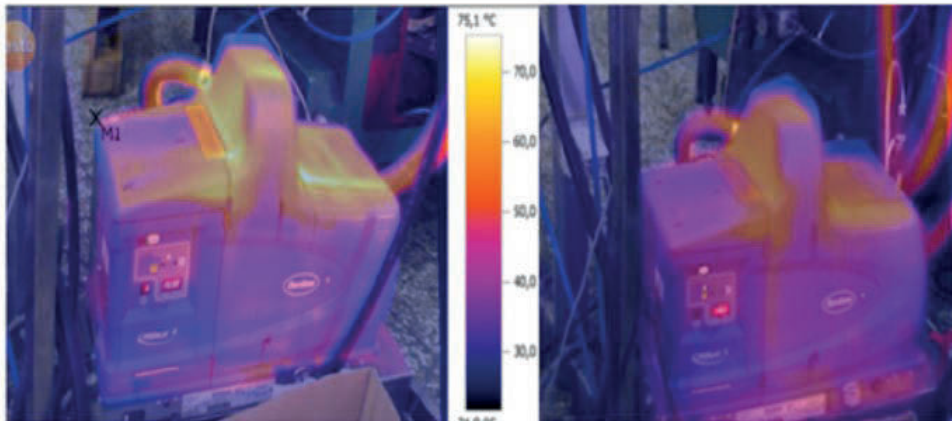
司—Bambi Banat，採用德商 Henkel 所提出的新型黏合劑租賃服務，在其包裝流程中，使用新型黏合劑去黏合 20 多種不同類型的包裝盒，並適當的調整生產線操作參數，大幅提高生產效益。

實施化學品租賃模式後(如表 3.6-1)，黏合劑的消耗量減少超過 30%，每年約減少 4,000 歐元的成本，且因優化生產線的操作，使得工作環境的溫度及壓力下降(如圖 3.6-2 所示)，能源的使用降低，且設備維護成本每年約減少 10,000 歐元。且採用之新型黏合劑無味，改善工作環境，此項化學品租賃商業模式同時實現環境、經濟及社會效益。

表 3.6-1 黏合劑租賃計價方式

租賃模式	計價方式
實施化學品租賃模式前	每公斤的黏合劑
實施化學品租賃模式後	每個盒子(不同種類的包裝盒有不一樣價格)

資料來源：聯合國工業發展組織 <https://chemicalleasing.com/success-stories/>



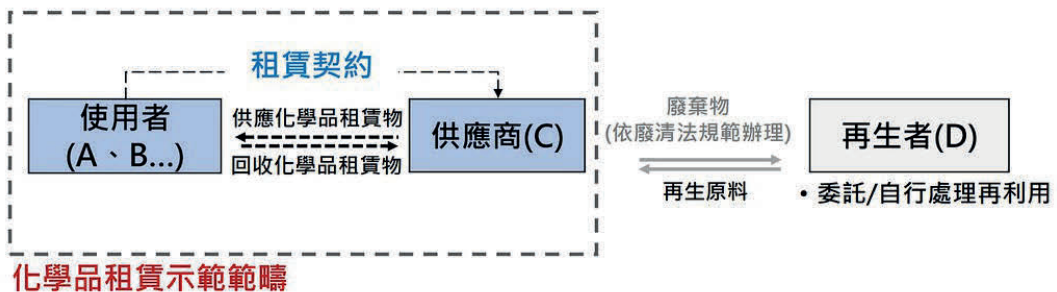
資料來源：聯合國工業發展組織 <https://chemicalleasing.com/success-stories/>

圖 3.6-2 化學品採租賃模式前後工作溫度(塞爾維亞)

另由於廠商大量採購化學品，可能導致囤積、浪費，甚至流出造成污染。國外行之有年的「化學品租賃」(Chemical Leasing)近年移植台灣，由化學品供應商負責出租及回收，達到資源循環減量。環境部於

2023 年 7 月表示，即日起將輔導產業試辦以租代買，採分階段輔導，初期以固態物優先。環境部將輔導產業建立「租賃」模式，由供應商負責化學品的租借及回收，供應商也不必依《廢棄物清理法》成為再利用機構，就能回收租出的化學品，而再利用許可則以較簡便的第三方驗證取代。

「化學品租賃」狹義而言是由供應商出租化學品，再自行回收並處理，接著重新出租，歷經多次循環，化學品才降階使用、或成為廢棄物。「化學品租賃」的最大特點，就是化學品被視為「商品」，在供應商及使用者之間循環，不算廢棄物，責任業者則從「使用者」移轉到「供應商」(如圖 3.6-4 所示)。而環境部推化學品租賃模式，由供應商推動循環減量。舉例來說，吸附雜質的活性碳、清洗晶圓的溶劑化學品，使用後都必須依《廢棄物清理法》送合格機構處理，才能回到製程使用。相較之下，「化學品租賃」為供需雙方簽訂租賃契約，化學物料只租不賣，供應商視情況估算出貨量，能達到源頭減量，也確保供應商有收回物料的驅力及義務，讓物質流向更清楚。環境部化學品租賃採分階段輔導，初期以固態物優先。常見物質為用來吸附空氣、廢水雜質的「活性碳」及「離子交換樹脂」。



資料來源：<https://green.sme.gov.tw/detail.php?type=1&id=2826&lang=tw>

圖 3.6-3 環境部規劃之化學品租賃示範範疇

四、廢酸鹼液回收及資源循環技術案例

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

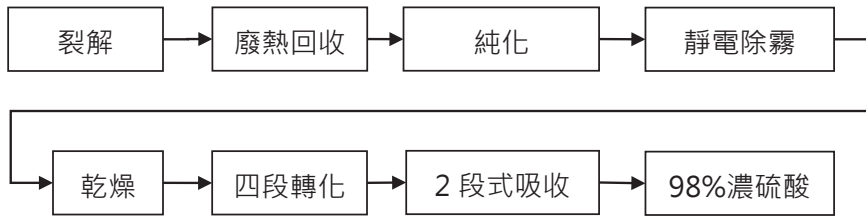
隨著技術之革新，半導體製造時所使用之酸鹼溶液、有機溶劑、特殊化學品之種類及數量均在增加之中，如何減少各廢類水排放成為主管機關與各工廠需要面臨之主要問題，目前國內已有資源循環廠商進行電子級硫酸循環利用，期望將國內半導體產業的廢硫酸回收後再製，減少廢酸排放。因此本報告進行國外廢酸鹼液回收與資源化技術蒐集與彙整，期望能提供國內產業參考。

4.1 廢硫酸回收技術案例

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

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

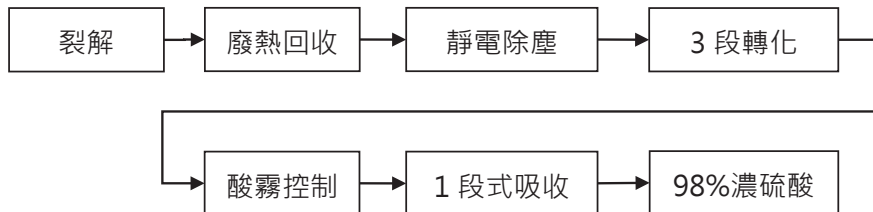
故會產生少量含 SO₂ 的廢水。乾法再生製程流程如圖 4.1-1 所示。



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

圖 4.1-1 乾法再生製程流程圖

濕法再生係指酸氣不經過乾燥，在有水狀態下進入轉化器內轉化。因此濕法再生製程係將燃燒爐之製程氣，先經廢熱鍋爐回收餘熱後，再進行靜電除塵，靜電除塵後的 SO₂ 氣體在轉化器內經過 3 段催化劑填充床層轉化為 SO₃。然後再進入酸霧控制系統，在酸冷凝器內進行冷凝吸收 SO₃，進而生成 98%濃硫酸。濕法再生製程流程圖如圖 4.1-2 所示。



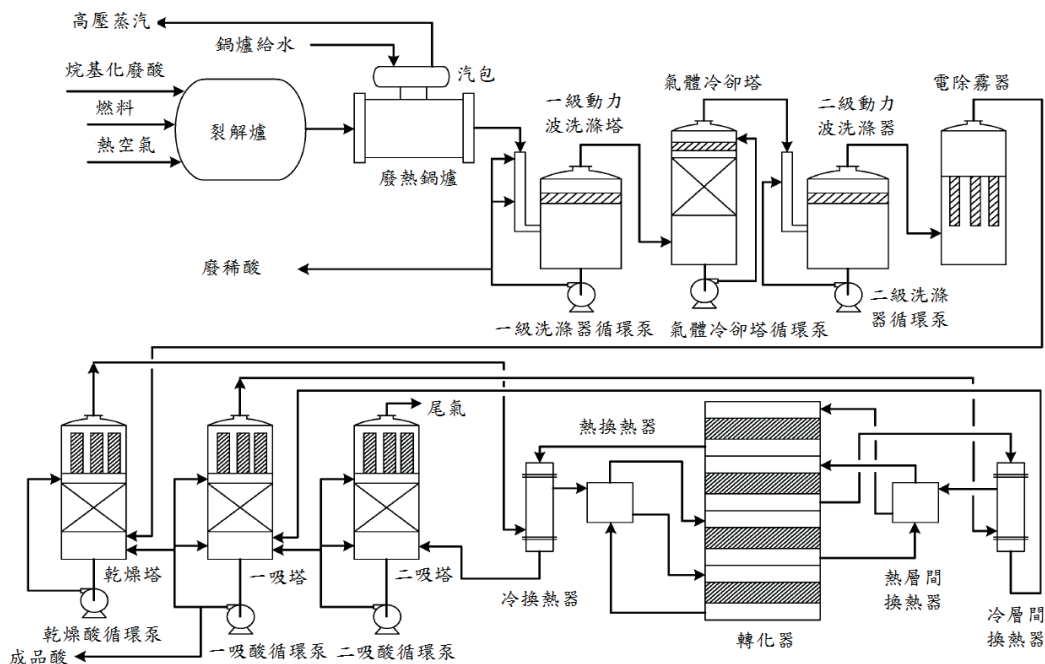
資料來源：申鳳玉，烷基化廢硫酸再生工藝技術對比，當代化工，2016 年 11 月。

圖 4.1-2 濕法再生製程流程圖

1. MECS SAR 乾法技術(美國杜邦公司)

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

產之濃硫酸最高濃度可達99.2%，亦可依業主要求生產93.5~98.5%的濃硫酸。中國石油公司與杜邦公司技術雷同，可副產蒸汽，但能耗較大。杜邦公司MECS SAR製程流程，如圖4.1-3所示。



資料來源：鄧明，烷基化廢酸再生工藝簡述，硫酸工業，2016年12月。

圖 4.1-3 杜邦公司 MECS SAR 廢酸再生製程流程

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

熱裂解部分由一個裝配有燃料燃燒機和廢酸霧化器的裂解爐所組成，廢硫酸在接近1,000°C的高溫下被蒸發並分解成SO₂、H₂O和O₂，為有效提高SO₂產率，需針對燃料和空氣加以控制。常使用以天然氣、輕燃料油或重燃料油作為燃料，另需增加空氣污染防制設施。

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

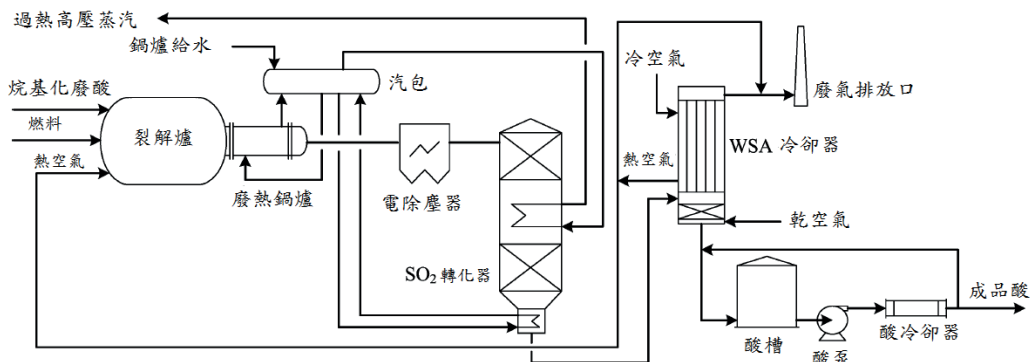
第二功能單元為煙氣冷卻單元，在此單元中，過量的水蒸氣被冷凝下來，冷卻介質為迴流冷卻水，可採用直接或間接接觸的方式。大多數工廠利用填料氣體冷卻塔進行直接接觸冷卻，迴流稀酸在板式熱交換器中被冷卻。

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

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

2. WSA 濕法再生技術(丹麥托普索公司)

托普索公司(Haldor Topsoe Company) WSA(Wet gas Sulphuric Acid, WSA)製程是一種可回收各種廢氣中的硫，並將其轉換成工業級濃硫酸的製程技術，硫回收率可達95.0%~99.7%，可生產97.5%~98%之濃硫酸產品。該製程流程較簡單，沒有化學藥品消耗和廢水排放、熱效率高，成品為高品質硫酸。托普索WSA廢酸再生製程流程如圖4.1-4所示。



資料來源：鄧明，烷基化廢酸再生工藝簡述，硫酸工業，2016年12月。

圖 4.1-4 托普索 WSA 廢硫酸再生製程流程

首先，廢酸在燃料燃燒產生的高溫下焚燒分解生成SO₂氣體，並降溫至適宜SO₂轉化的溫度，廢熱可回收副產蒸汽。由高效率除塵器除去氣體中的灰塵，然後SO₂在觸媒作用下轉化為SO₃。

轉化觸媒採用托普索公司的VK-WSA系列轉化觸媒，觸媒床層的數量取決於初始SO₂濃度和期望達到的轉化率。採用多個觸媒床層時，可以採用多種形式的床間冷卻方式，以滿足裝置的熱平衡和不同的熱量回收需求，轉化反應放熱可以高壓蒸汽的形式回收。

在轉化器出口，製程氣被冷卻至適當溫度，使得SO₃與水蒸氣反應生成氣態硫酸：



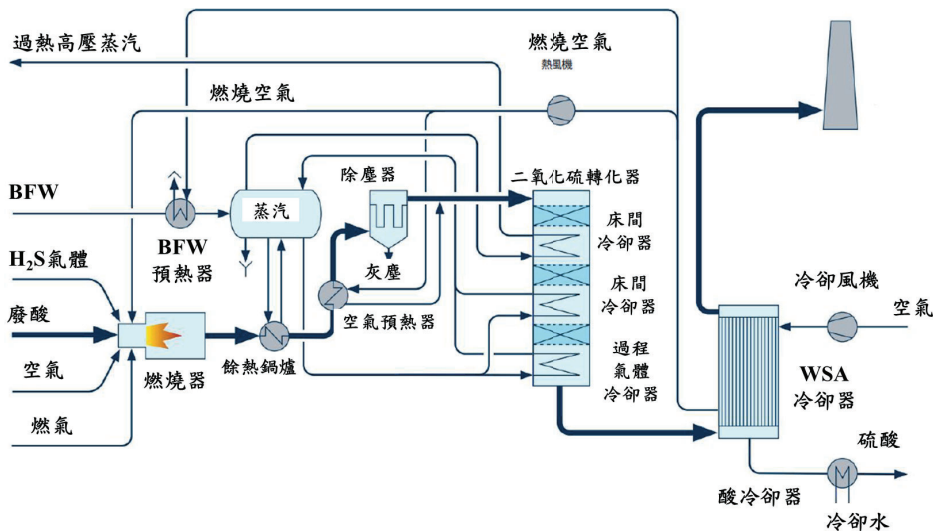
含有氣態硫酸的製程氣會在WSA冷凝器中被冷凝成液態硫酸產品。WSA冷凝器是1座立式降膜管殼式冷凝器/濃縮器，其熱交換管排列採用耐酸耐熱的硼玻璃管。製程氣自下而上走管內，被管外的空氣所冷卻，冷凝出來的硫酸順著管壁下流，與上升的製程氣逆流接觸，硫酸逐漸被濃縮至預期的濃度。

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

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

缺點包含排放尾氣中酸霧易超過排放標準；因靜電除塵效果有限，需經常將轉化器中的催化劑取出清洗；轉化器較大，催化劑用量多；轉化器內置的熱交換器不易取出，不利於檢修；廢熱鍋爐易堵塞等缺點。

此外，丹麥Haldor Topsoe公司針對WSA回收技術進行優化，研發出SmartSAR™回收技術，製程示意如圖4.1-5所示，可避免廢酸及能量的浪費。SmartSAR™技術優勢包含無需額外設置水洗及乾燥設備、可降低廢酸與廢水產生，具有操作更安全、設置場地面積小、提升能源使用效率等優勢。



資料來源：Regenerate spent acid with maximum energy recovery, Haldor Topsoe

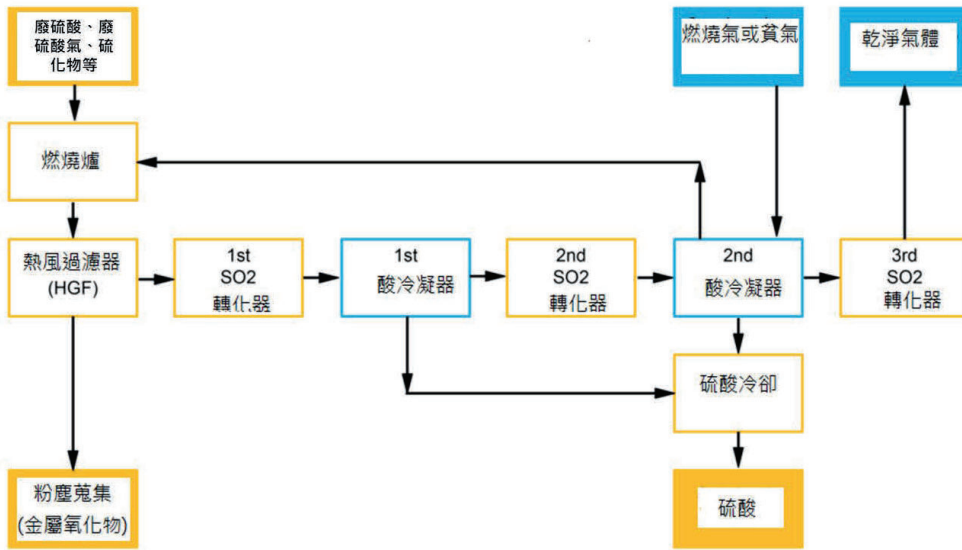
圖 4.1-5 Haldor Topsoe SmartSAR™廢硫酸回收流程圖

3. WSA 濕法技術(奧地利 P&P 公司)

奧地利P&P公司(P&P Industries AG)技術與丹麥托普索公司WSA技術類似，製程原理一樣，但奧地利P&P公司技術採用兩次轉化和兩次冷凝，轉化和冷凝效果較托普索公司WSA技術為優。奧地利P&P公司技術的顯著特點是採用熔融鹽換熱技術，轉化器內置的熱交換器等設備均使用熔融鹽來吸收熱量。製程流程如圖4.1-6及圖4.1-7所示。

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

製程中的環境空氣或貧氣(Lean Gas)經過濾(例如濾袋除塵器、洗滌塔、汞吸收器)，並通過氣密P&P玻璃管熱交換器進行預熱。為節省能源，通過傳熱鹽系統(Heat Transfer Salt System, HTS)將溫度提高到400°C以上。通過在燃燒室中較長停留時間，可以確保所有含硫成分被完全氧化為SO₂。具有無機雜質的製程氣體通過熱氣過濾器(Hot Gas Filters, HGF)進行過濾，可以回收沉積的金屬。在第一個轉化器中，P&P摻雜鉑的蜂窩狀觸媒在低壓降的作用下將70%以上的SO₂轉化為SO₃。使用與HTS結合的熱交換器，通過冷卻製程氣體並將SO₃在氣相中水合成為H₂SO₄，可以回收大量熱能。高濃度的硫酸在第一個冷凝器中的P&P玻璃管熱交換器進行冷凝。酸霧在濕式靜電除塵器中被分離，並由於重力關係酸冷凝水向下流入冷凝器。在第一個冷凝器中，製程氣體由玻璃管熱交換器預熱，在第二階段，由燃燒爐中的HTS預熱。在第二轉化器和第二冷凝器中，已經將99.9%的SO₂轉化為H₂SO₄。剩餘的SO₂在隨後的低溫活性碳觸媒(Low Temperature Carbon Catalyst, LTCC)階段被氧化，然後被送入煙囪。SO₂轉化為H₂SO₄的總轉化率超過99.999%。



資料來源：P&P Industries AG 公司網站。

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

圖 4.1-6 P&P WSA 製程流程圖



資料來源：P&P Industries AG 公司網站。

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

圖 4.1-7 P&P WSA 濕法硫酸再生工廠

乾法再生製程技術和濕法再生製程技術比較如表4.1-1所示。

表 4.1-1 生產 1 萬公噸/年之乾法硫酸技術與濕法硫酸技術的比較

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

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

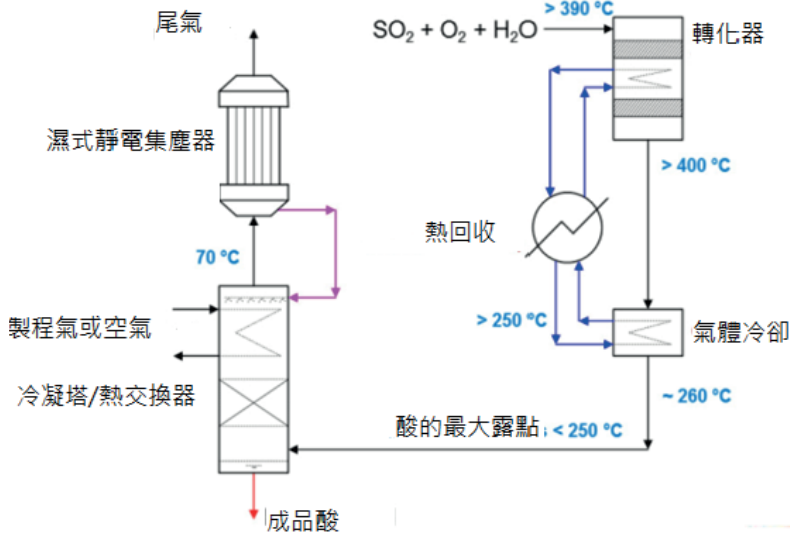
4. SULFOX™ 濕法製酸技術(美國杜邦公司)

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

當SO₂濃度介於0.2 v%至6 v%時，會因使用燃料導致操作成本增加，因此排除傳統的乾法製酸技術；因低濃度對於產酸能力低的裝置，如果使用脫硫劑也會增加操作成本，所以也排除尾氣洗滌技術。故相比之下，SULFOX™ 濕法製酸技術流程短、熱量回收效率高，是最適用於此類尾氣處理技術。

硫化合物有各種形式，如SO₂、H₂S、CS₂氣體或H₂SO₄和其他硫酸鹽液體。SULFOX™ 技術會根據供料的形式和條件的不同，設計不同的處理步驟，包括洗滌淨化、燃燒及熱回收，目的是給SULFOX™ 裝置提供乾淨的SO₂氣體，製程流程如圖4.1-8。主要有以下幾種情況：

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



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

圖 4.1-8 杜邦 SULFOX™ 濕法製酸技術流程圖

(2)如果是 H₂S 氣體，選擇 SULFOX™ 技術類型是取決於硫化氫和碳氫化合物的濃度。當 H₂S 濃度較低且烴含量較少時，採用稍加修改的 SULFOX™ NK 技術，其流程與低濃度 SO₂ 的流程圖相類似。將硫化氫氣體預熱到催化劑的操作溫度後，氣體通過鉑觸媒層，H₂S 被催化氧化生成 SO₂ 和 SO₃，此過程不需要燃燒爐。在此技術流程中，供料煙氣在單獨且帶有預熱風的分解爐中高溫燃燒。冷卻 SO₂ 氣體使之達到觸媒操作溫度，冷卻所換得的多餘熱量作為高壓蒸汽回收。轉化器的多餘熱量則提供給蒸汽系統，而冷凝器的熱量用於預熱燃燒空氣。

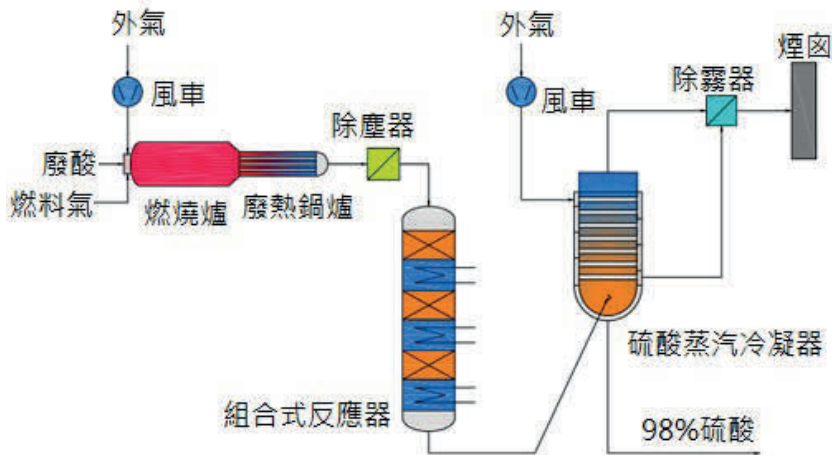
當乾淨的SO₂氣體送入SULFOX™裝置主要有以下三個步驟：

- (1)SO₂ 在裝有觸媒的轉化器內轉化成 SO₃，與傳統的乾法製酸技術的反應步驟相同。主要不同點是氣相中存在水蒸汽，利用轉化器內的熱交換器和特殊設計的防範措施，始終保持製程氣高於酸的露點。熱回收方案取決於進料的特性：熱量作為高壓蒸汽回收，或用於預熱進入的乾淨 SO₂ 製程氣。
- (2)SO₃ 與水蒸氣反應生成氣相 H₂SO_{4(g)}，作為製程氣在氣體冷卻器和冷凝器內冷卻。氣體在冷凝器內進一步冷卻濃縮成硫酸和水蒸氣排出。控制進、出口的製程氣溫度以達到 98%以上之酸濃度。在冷凝器內導入外氣除熱或用來預熱進入的製程氣。
- (3)在冷凝階段，由於使用水平管，酸在管子外側濃縮會產生大量的酸霧，酸霧在後續的濕式靜電除霧器中被除去，並返回到冷凝器作為成品酸回收。對特定的 SO₂ 或 H₂S 尾氣的處理技術進行選擇時，以費用的最小化為原則。如果以生產硫酸為目的企業，需要投入市場並進行大規模銷售時，通常選擇傳統的乾法製酸技術。然而，當尾氣被視為污染物處理時，SULFOX™ 濕法製酸則以操作成本低，並副產濃硫酸和蒸汽，具有明顯優勢的技術。通過對每種製程技術的成本效益進行分析，以篩選出最適合的技術解決方案。

5. ERSATM 高效廢酸再生技術(中國科洋環境工程有限公司)

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

此外，ERSA™技術處理單位廢酸的燃料氣消耗低，且熱回收率高，流程如圖4.1-9所示。利用ERSA™廢酸再生處理技術可使裝置的液化氣產品轉化成高品質和高附加值的汽油調和組分，達成廢棄物有效利用，提升品質和保護生態環境的多重目的。ERSA™廢酸再生處理技術技術先進、空水廢排放少、占地面積小，滿足日益嚴格的環保要求和裝置操作靈活性。同時ERSA™具裝置投資小及高性價比之特性。



資料來源：科洋環境工程（上海）有限公司公司網站，

<https://wangjiamin0309.github.io/haiyang/huanjinggongcheng/technology/technology2.html>

圖 4.1-9 ERSA™ 高效廢酸再生技術流程圖

6. 廢硫酸濃縮再利用技術(德國 GMM Pfudler 公司)

Pfudler系統集團主要在酸處理和相關服務領域，為酸濃縮裝置提供製程技術和全套工程服務。實施的裝置以最新技術知識為基礎，所有裝置都進行投資成本和裝置可操作性方面的服務。由於酸具有從低濃度到高濃度的強腐蝕性，Pfudler提供耐腐蝕材料，例如玻璃纖維、含氟聚合物內襯鋼和耐蝕金屬(鋳、鈹和鈮)，以及處理酸回收的技術。

產生大量廢酸的一個典型來源是硝化技術。在此製程中，使用硫酸和

硝酸的混合物，會產出硝酸、亞硝酸和有機化合物之廢硫酸。因此在許多情況下，這些酸可以透過脫硝，來回收溶解的硝酸和有機化合物。應用 Pfaudler HoSA®製程，回收再利用成濃縮硫酸。

若為硫酸與鹽酸或氫氟酸的混合酸溶液，則需要使用特殊材料，Pfaudler能夠提供各種耐腐蝕材料，目前已開發一種以玻璃纖維製造的 Pfaudler HTX熱交換器，耐酸溫度可高達250 °C。Pfaudler酸濃縮再利用技術，其技術流程及設備分別如圖4.1-10及圖4.1-11所示。

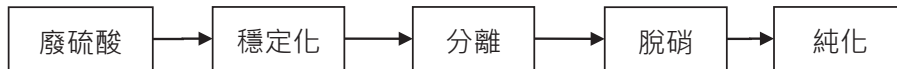


圖 4.1-10 Pfaudler 廢硫酸濃縮再利用技術流程圖

Pfaudler將熱回收系統整合到設計中，大幅節省操作成本，特點如下：

- 將重力流動整合到設計中，最大程度減少旋轉設備、操作成本和維護成本，並增加系統的線上時間。
- 高效設計可以節省資本成本，減少回收設備所需空間，最大程度減少操作的酸量，可大幅提高對人員、財產和環境的保護。
- 多系統設計包括壓力迴圈、溫差環流系統和多重節能效果。
- 當原有公用系統無法完全滿足酸濃縮系統時，尚有控制系統可提供安全及可靠的操作。



資料來源：Pfaudler ACID RECOVERY · 2022 ·

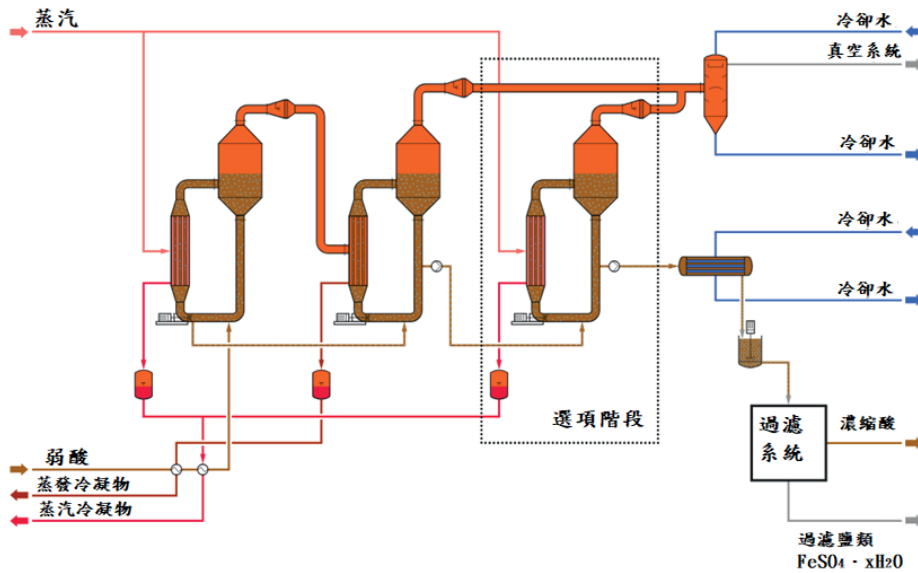
<https://www.gmmpfaudler.com/systems-processes/process-systems-packages/acid-recovery>

圖 4.1-11 Pfaudler 公司廢硫酸回收設備

7.多效蒸發技術(瑞士 SEP 公司)

若廢酸中含水量較高時，可採用多效蒸發技術 (Multiple Effect Evaporation, MEE)，可提升純化效率。第一效是蒸汽加熱，來自第一蒸發器的蒸汽加熱可提供隨後的 (第二) 效使用。第二效蒸氣加熱第三效，依此類推。透過利用 MEE 程序，使處理的單位能耗下降。蒸發罐數量可為 2~10 間，端視加熱和冷卻介質之間的溫差及投資成本與節能之間最佳值的限制。

瑞士 SEP 公司透過串聯多效蒸發技術與結晶技術，將濃縮後的硫酸與硫酸鹽進行分離，其中透過再濃縮為 $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (褐鹽) 或透過冷卻結晶作為 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (綠鹽) 兩條途徑來分離硫酸鹽。SEP 製程流程如圖 4.1-12 所示，其技術特色包含硫酸回收率高、低蒸汽和電力消耗、可考慮客戶廢酸特性進行設計。如使用 SEP 的蒸發和結晶技術，製造商可使用較少的原材(料)硫酸)並降低廢棄物，可改善整體生態足跡。



資料來源：SEP 公司網站，

<https://www.sepwin.ch/en/applications/Chemicals/Recovery-of-Waste-Sulfuric-Acid/>

圖 4.1-12 SEP 公司廢硫酸回收系統

4.2 廢磷酸回收技術案例

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

1. 日本三和油化工業公司多級逆向萃取回收技術

三和油化工業公司與學術合作開發混酸分離回收技術，利用溶劑萃取法及多級回收裝置回收高濃度酸液。當混合廢酸(大多含醋酸、硝酸及磷酸)進入萃取程序，係利用多組串聯的萃取槽，將廢液及有機萃取溶劑依不同入口導入，可將所需處理的廢液及溶劑進行逆向接觸，如此可使溶劑

助金購買磷酸鹽製造設備，以加值磷酸後續之附加價值製成磷肥產品，如圖 4.2-2。

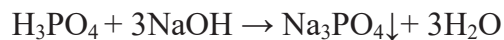


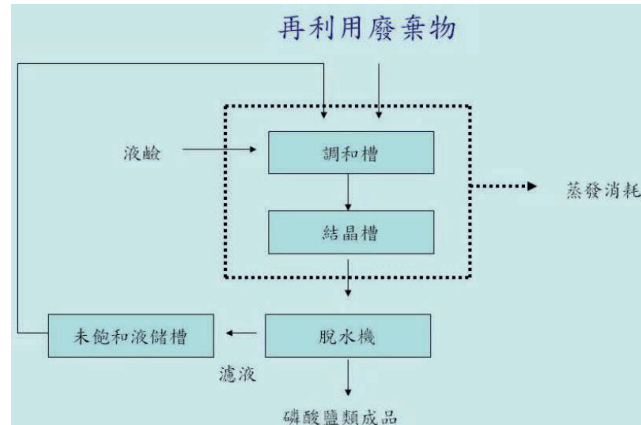
資料來源：經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月。

圖 4.2-2 再生磷酸製成磷酸鹽肥料

2.中和法

利用回收廢磷酸 (H_3PO_4) 與氫氧化鈉 (NaOH) 或氫氧化鉀 (KOH) 反應經過調和與結晶製程反應，生產工業級磷酸鹽類製品，主要用途為廢水處理營養劑、鍋爐清潔劑、重金屬整合劑、染料助劑...等，如圖 4.2-3 所示。





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

圖 4.2-3 廢磷酸製成磷酸鈉製造流程

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

(1) 磷酸銨鹽法

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

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

(2) 磷酸鈉鹽法

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

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

即為氧化鐵紅，可作為化工原料。

(3)磷酸鈣鹽法

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

(4)磷酸銨鎂法

磷酸銨鎂法又稱 MAP 沉澱法，原理是將含磷酸廢液中和至鹼性，通過引入銨根和鎂離子，使其與磷酸根結合生成難溶性的磷酸銨鎂沉澱，從而達到回收磷酸資源的目的。

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

3.蒸餾濃縮法

目前國內已有再利用機構將廢磷酸(H_3PO_4)以蒸餾濃縮方式(沸點為 158°C)進行純化回收，利用水、磷酸、硝酸及醋酸之沸點不同，經蒸發濃縮去除水分，再經第一段水洗除去硝酸，經第二段鹼洗除去醋酸，產生濃度約 85%工業級磷酸，提供予工業應用。主要工業用途為軟水劑、水垢

清洗劑；在電鍍工業中用作拋光劑；印刷工業中用作去汙劑；染料工業中用作乾燥劑；紡織印染業中用作印染媒染劑，絲綢的光澤劑；日用品化工業中用作洗滌劑助劑，用於安全火柴的製造...等。

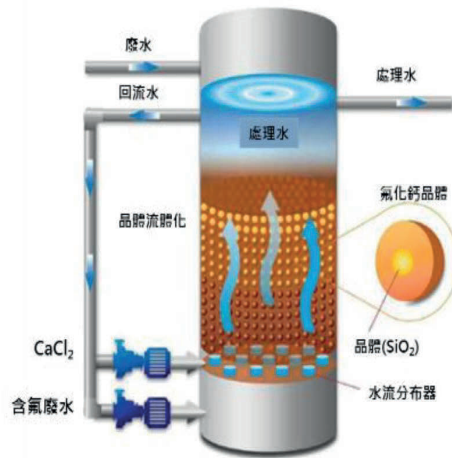
4.3 廢氟酸回收技術案例

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

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

1. 日本 ORGANO 公司流體化床結晶處理技術

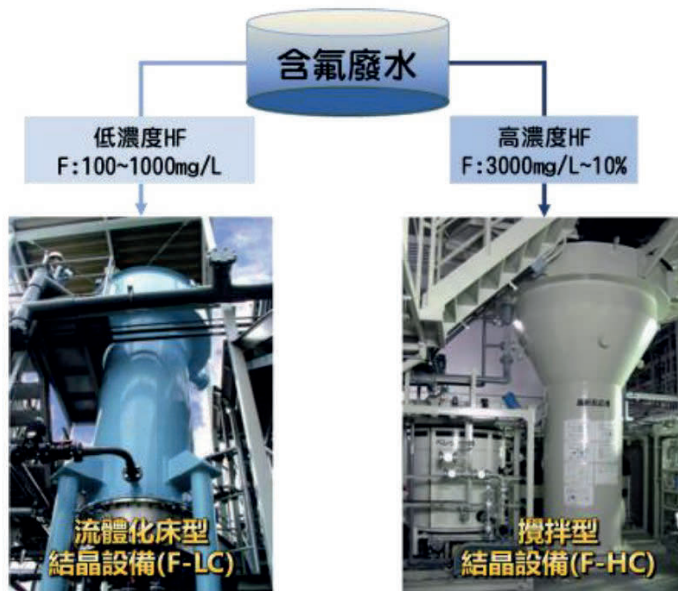
ORGANO 公司之流體化床結晶處理技術(如圖 4.3-1 所示)是利用 0.2~0.5mm 矽砂(SiO_2)載體作為結晶的核種，將廢氫氟酸加入反應器內，添加氯化鈣(CaCl_2)以增加水中鈣離子(Ca^{2+})濃度，以靜置方式乾燥不須脫水設備，含水率即可降至 10%以下，濾乾後的氟化鈣結晶可作為鋼鐵業之助溶劑原料。



資料來源：ORGANO 公司網站。

圖 4.3-1 ORGANO 公司流體化床結晶處理技術

進廠之含氟廢水依氟離子濃度(低濃度：100~1,000 mg/L、高濃度：3,000 mg/L~10%)採用不同處理方式 (如圖 4.3-2 所示)。



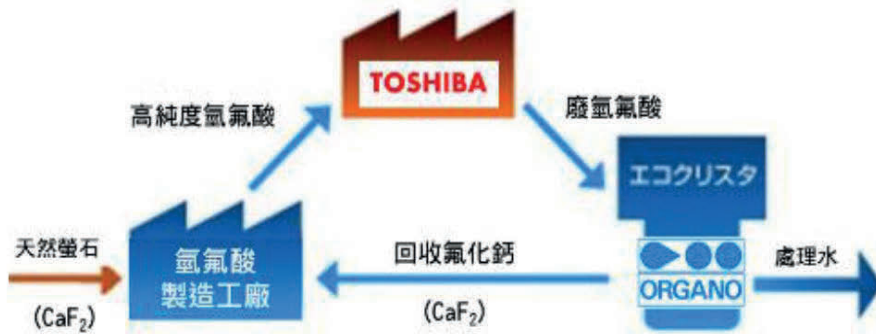
資料來源：ORGANO 公司網站。

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

圖 4.3-2 ORGANO 公司含氟廢水之處理反應器

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

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



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

圖 4.3-3 ORGANO 公司商業模式示意圖

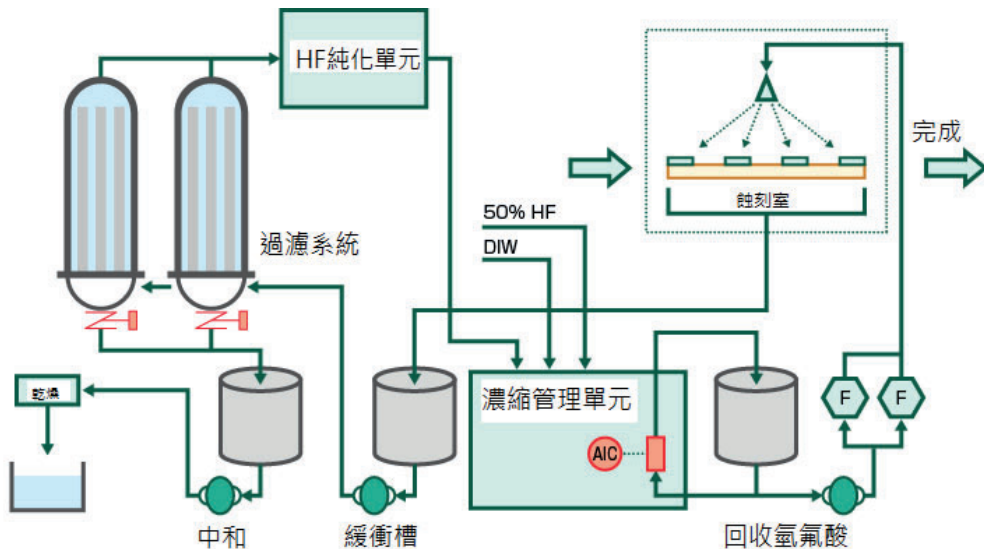
2. 氫氟酸回收系統

(1) 三菱化工公司

三菱化工公司(Mitsubishi Chemical Engineering Corporation)開發氫氟酸回收系統(HF Recycling System, HFRS)，係針對液晶面板相關生產設備廢氫氟酸進行線上回收，HF回收率可達到80%，雜質去除率可達到90%。直接回收LCD面板產生的蝕刻液，使用特殊的過濾單元，可

有效分離流體中的研磨污泥，去除廢液中不純物質，與高濃度調整系統搭配使用，可確保蝕刻速率穩定性，其製程流程如圖4.3-4所示。此設備之特色包含：

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



資料來源：三菱化工公司網站。

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

圖 4.3-4 三菱化工公司氫氟酸回收系統流程圖

(2)佐倉工程有限公司

佐倉工程有限公司(SASAKURA Engineering)利用凝結沉澱法處理高濃度氫氟酸廢液時，會產生大量含氟污泥廢棄物。且通過凝結沉澱法

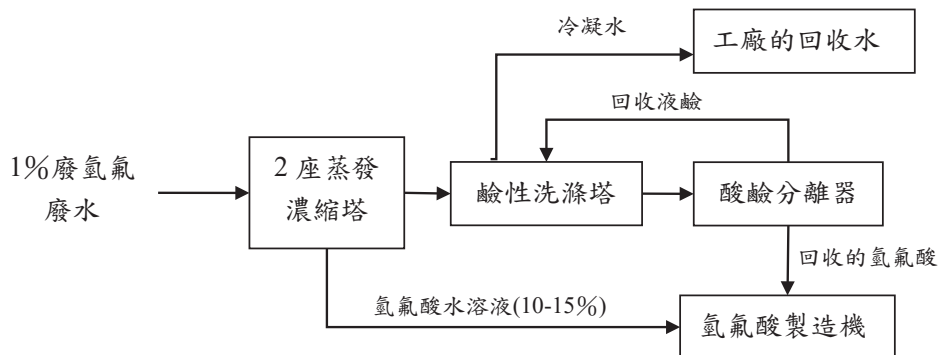
處理的廢水仍然含有30~40 ppm的氟，佐倉公司的技術即係回收此低濃度之氫氟酸廢液。佐倉公司的系統從稀釋的氫氟酸廢液中回收濃度超過10%的氫氟酸，回收率約為98%。以下針對氫氟酸回收系統流程(如圖4.3-5所示)進行說明：

A.2 座蒸發濃縮塔

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

B. 酸鹼分離器

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



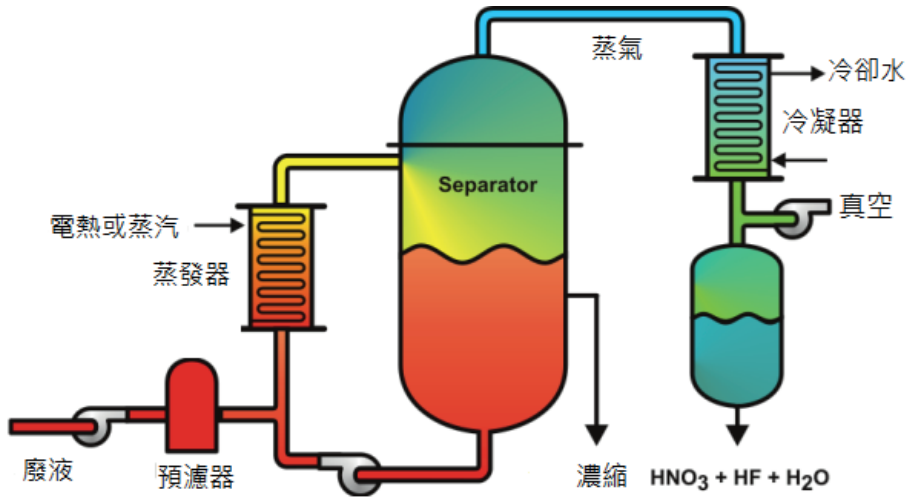
資料來源：SASAKURA 公司網站，<http://www.sasakura.co.jp/e/products/water/ex/06.html>

圖 4.3-5 佐倉公司氫氟酸回收系統流程圖

3.美國 Beta 公司混合酸回收技術

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

透過水泵將廢酸通過預濾器並進入蒸發器迴路，該迴路由蒸發器交換器和分離塔組成。廢酸溶液被加熱到酸和水的沸點以上。一旦溶液釋放到真空環境中，混合的酸和水都會在獨特的“共閃”反應器中蒸發。混合的酸和水蒸氣向上穿過液/氣分離器，進入整流器。剩餘的金屬鹽溶液（金屬+H₂O）繼續循環通過加壓沸騰迴路，直到達到特定濃度並排放到儲罐中。在整流器中，酸的濃度得到控制，以將品質良好且重新濃縮的酸返回到處理罐。除去酸液的剩餘水蒸氣繼續進入冷凝器，在冷凝器中回收冷凝水繼續再利用。該系統沒有裸露的金屬零件，並且設計成可以承受真空。工業 PLC 自動化使用專門為此應用開發的成熟軟體來控制製程。該系統需要鍋爐或外部熱源、冷卻水和電。在真空下操作的顯著優勢包括：低操作溫度（大氣壓下的沸點為 100°C，80%真空系統中的沸點為 55°C），低操作成本（所需的天然氣更少），低材料成本（需要更小的熱交換器）和更安全的操作環境（任何洩漏都將洩漏到系統中而不是洩漏到大氣中）。製程流程圖如圖 4.3-6。



資料來源：Beta Control Systems 公司網站，

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

圖 4.3-6 Beta 混酸回收流程圖

4.4 廢醋酸回收技術案例-萃取法回收醋酸技術(法國 De Dietrich 公司)

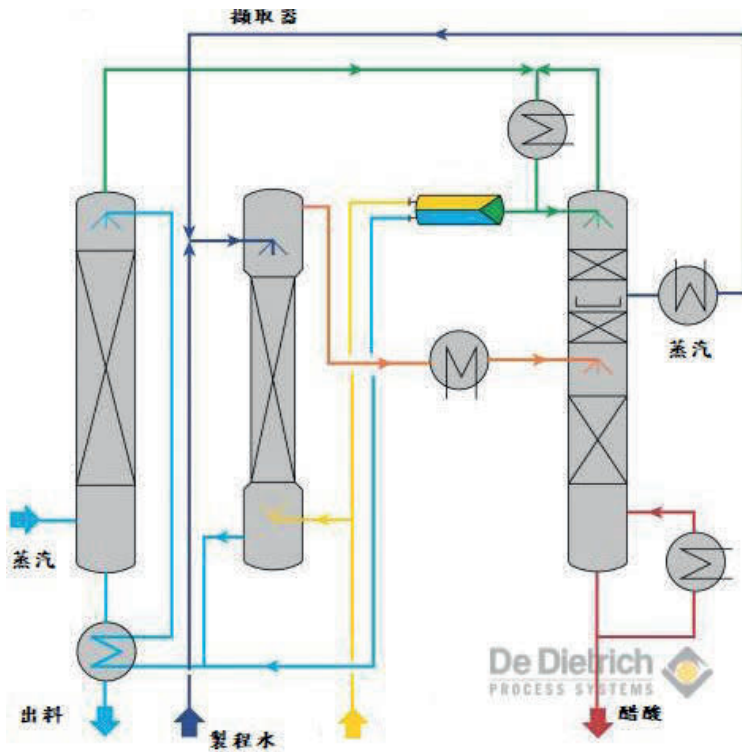
使用精餾分離醋酸和水混合物在經濟上是不可行，一般需要高精餾塔，搭配高迴流比進行操作，如此可增加能源和運營成本。無論濃度如何，如果初始混合物中的補充雜質(如鹽)在通過蒸餾直接回收過程中可能會導致問題，則必須考慮使用萃取的回收方法。De Dietrich公司透過液液萃取和共沸精餾回收醋酸。

通常會使用較多的低沸點萃取劑。在選擇時，必須考慮在水中的溶解度、吸收能力、分佈係數、價格、共沸物的可用性和成分以及環境和健康保護方面的要求等特性。

圖4.4-1為QVF®技術流程圖。與傳統方法類似，在萃取階段，以合適的萃取劑（在大多使用甲基第三丁基醚-MTBE），也可以從製程水中萃

取醋酸。然而，蒸餾塔的運行方式是在萃取序列階段實現儘可能高濃度的醋酸，同時滿足所需的殘餘物純度。在此操作過程中，萃取相含有高比例的醋酸，因此也含有水。在下游精餾階段，萃取相的分離現在發生在由萃取劑和水組成的共沸混合物中，以及所需濃度的醋酸中。

整個過程的成本由萃取劑與醋酸分離的成本決定。因此，在該技術階段的控制系統的設計和佈局方面，以醋酸乙酯或MTBE作為萃取劑的經典技術中，分離可以毫無問題地進行。在塔中設定醋酸乙酯與水的比例，在該比例下，相對於醋酸的分離因數最大。



資料來源：De Dietrich 公司網站，

<https://www.dedietrich.com/en/solutions-and-products/extraction/liquid/liquid-extraction/recovery-acetic-acid-aqueous-waste>

圖 4.4-1 De Dietrich 萃取回收醋酸流程圖

與傳統技術相比，QVF®技術的能耗降低40%。這種節能得益於低萃

取劑主流。結果，萃取出物中會產生高醋酸濃度，因此萃取出物中的水比例也高於經典技術的情況。然而，這些多餘的水作為液體側從精餾塔抽出。因此，可以在餾出物中實現共沸成分，然後只需在塔的頂端冷凝其中所含的水量。醋酸回收操作成本取決於醋酸的流入濃度、產品的徑流濃度、萃取劑的類型、方法變化的選擇和熱回收等。為進行評估，表4.5-1為每種技術給出兩個(一組)參考值。這些數位適用於MTBE的使用，並假設99%重量的液體沸騰醋酸正在精餾(塔)的底部蒸餾。

表 4.5-1 典型技術與 QVF®技術回收比較

製程別	流量(kg/h)	耗電量(kW)	醋酸重量百分濃度(%)
典型技術	280	100	10
	260	100	35
QVF®技術	260	100	10
	180	100	35

資料來源：本計畫彙整，De Dietrich 公司網站，

<https://www.dedietrich.com/en/solutions-and-products/extraction/liquid/liquid-extraction/recovery-acetic-acid-aqueous-waste>

4.5 廢鹽酸回收技術案例-蒸餾萃取技術(日本月島環境公司)

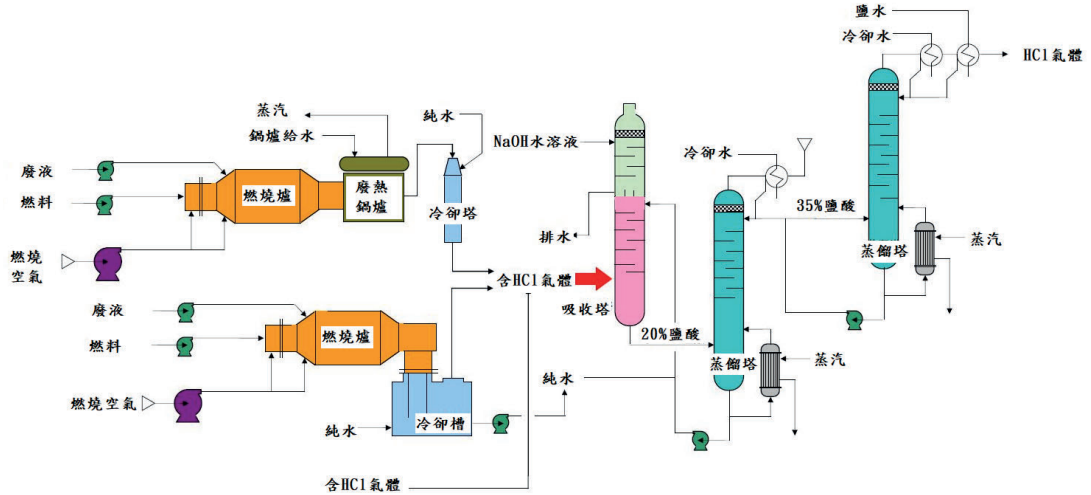
目前處理高濃度的酸需要特殊的專門技術，但日本月島環境公司開發出的萃取蒸餾法，進行處理含氯化氫氣體的廢氣時，亦可依客戶的要求從低濃度至100%的鹽酸進行回收、濃縮。

在處理廢鹽酸或有機氯化物，可在前段設置燃燒爐，燃燒後產生氯化氫氣體，透過燃燒不需要的有機物，達到鹽酸回收的目的。製程流程如圖4.5-1及圖4.5-2所示。

此系統可結合VCM、EDC、廢塑膠的燃燒系統，此套設備特色如下：

- 如有設置廢熱鍋爐，餘熱可用於蒸氣回收或發電。
- 可回收、純化各種濃度的鹽酸(包含氯化氫氣體)。

- 吸收單元和廢氣處理單元可以在一個塔內進行，節省安裝空間。
- 燃燒爐可適用於處理氣體、液體、固態等形態。



資料來源：日本月島環境工程型錄英文版，2023.04

<https://saas.actibookone.com/content/detail?param=eyJjb250ZW50TnVtJjoyOTZzNTV9&detailFlg=0&pNo=14>

圖 4.5-1 月島環境公司鹽酸回收濃縮流程圖



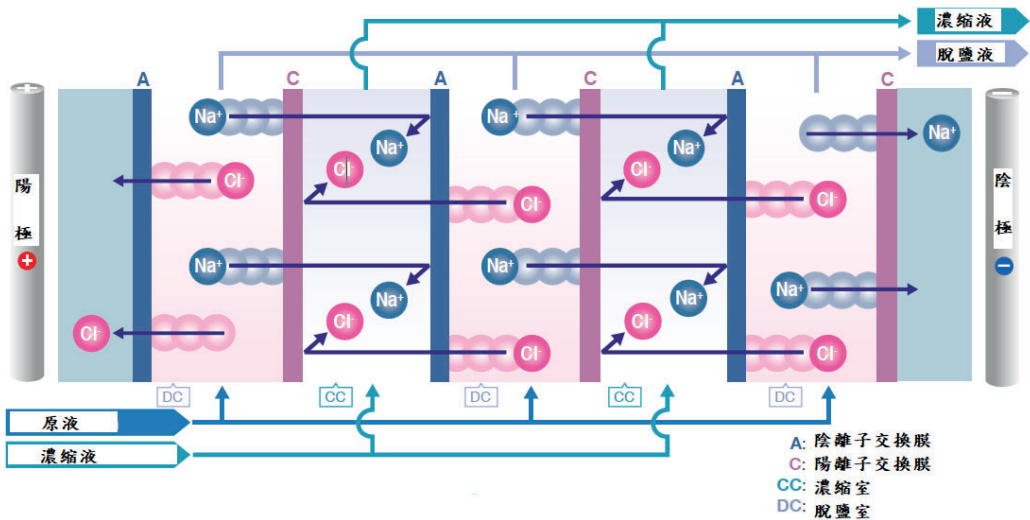
資料來源：日本月島環境公司網站。

圖 4.5-2 日本月島環境公司蒸餾萃取設備

4.6 鹼性廢液處理案例

1. 電滲析技術(日本亞斯通公司)

電滲析技術是藉由通過離子交換膜和電場作用，可以對溶液中的離子性物質進行脫鹽、濃縮、純化以及回收。電滲析原理是在一對電極間交替配置陽離子交換膜和陰離子交換膜，以構成脫鹽室和濃縮室。通過向該脫鹽室供給食鹽(NaCl)並通入直流電流，可使陽離子(Na^+)聚集到陰極一側，並透過陽離子交換膜移動至濃縮室。陰離子(Cl^-)則聚集到陽極一側，並透過陰離子交換膜移動至濃縮室。由此，在脫鹽室去除食鹽，而在濃縮室聚集食鹽(圖4.6-1)。

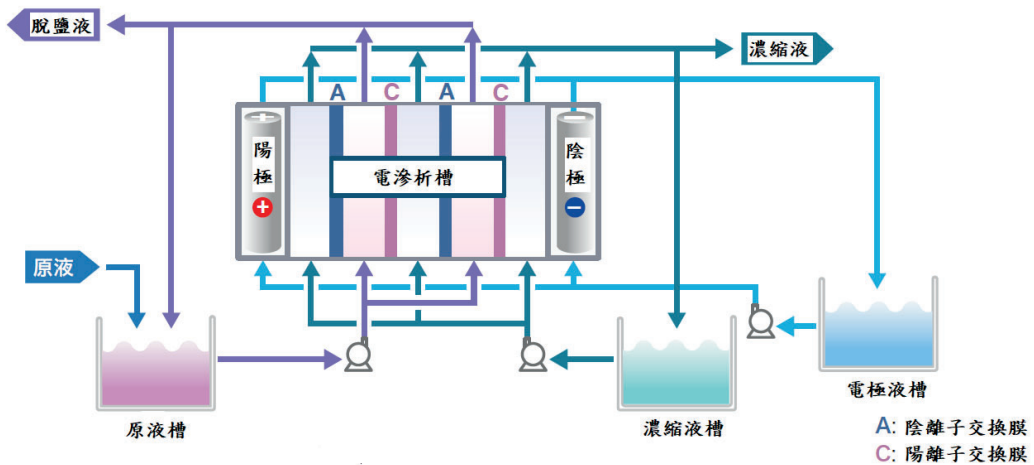


資料來源：日本亞斯通公司離子交換膜 / 電滲析裝置產品目錄(2022.10)

圖 4.6-1 電滲析原理圖

日本亞斯通公司電滲析裝置ACILYZER ED，主要可應用於從海水生產食鹽、醬油脫鹽、低聚糖脫鹽、最終處理場所浸出液的脫鹽、濃縮、製程廢液的脫鹽、濃縮、鋁板酸洗酸廢液的回收及鹼廢液的回收等方面，電滲析裝置流程如圖4.6-2所示。技術優勢特色如下：

- A.可對離子性物質進行脫鹽、濃縮、純化以及回收。
- B.可在離子性物質之間進行選擇性分離。
- C.可從非離子性有價物中去除離子性物質。
- D.不需加熱、加壓，因此不發生成分的變質。
- E.可控制脫鹽率和濃縮率。
- F.不需要再生工序，因此可長期連續運行。
- G.噪音和振動較小，裝置操作方便。



資料來源：日本亞斯通公司離子交換膜 / 電滲析裝置產品目錄(2022.10)

圖 4.6-2 電滲析裝置流程圖

日本亞斯通公司目前生產電滲析產品系列有小型、中型及大型，其適用處理量、尺寸大小及設備外觀分別如表4.6-1及圖4.6-3所示。以處理半導體製程廢水(含硫酸銨廢水)經電滲析後比較，可大幅降低廢水產生量，

比較結果如表4.6-2所示。

表 4.6-1 日本亞斯通公司電滲析產品系列

設備類型	型號	參考處理量(L/hr) ^註	標準設備尺寸
小型	AC02	10	80 (W) × 64 (D) × 142 (H) cm
中型	AC10	100	200 (W) × 130 (D) × 180 (H) cm
	AC25	1,000	350 (W) × 140 (D) × 210 (H) cm
大型	AC50	1,000以上	須依客戶需求進行客製化
	AC140	10,000以上	

註：指將6%(1N)的食鹽水脫鹽(95%脫鹽)至0.3%(0.05N)的量。

資料來源：日本亞斯通公司離子交換膜 / 電滲析裝置產品目錄(2022.10)



資料來源：日本亞斯通公司離子交換膜 / 電滲析裝置產品目錄(2022.10)

圖 4.6-3 日本亞斯通公司電滲析產品外觀

表 4.6-2 半導體製程廢液經電滲析後濃度比較

項目(單位)	原液	脫鹽水	濃縮液
(NH ₄) ₂ SO ₄ (g/L)	30.0	7.6	100.0
流量(M ³ /day)	1.10	0.84	0.26

資料來源：日本亞斯通公司離子交換膜 / 電滲析裝置產品目錄(2022.10)

2. 薄膜蒸餾或脫氣膜法(中國奧施科技公司)

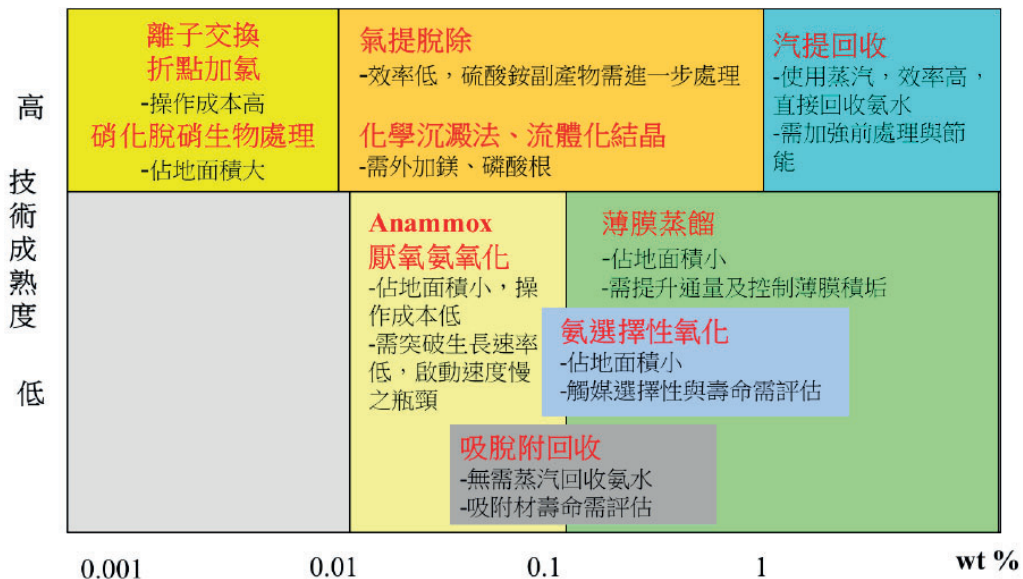
氨氮廢液處理技術主要可分為物理化學方式與生物處理方式兩類。物化處理包含氣提法、折點加氯、離子交換、化學沉澱法等；而生物處理方式則包含活性污泥法、薄膜生物反應器(Membrane Bioreactor, MBR)、厭氧氨氧化(Anaerobic Ammonia Oxidation, Anammox)等。各處理方法之優缺點比較如表4.6-3所示，其適用之氨氮濃度則如圖4.6-4所示。

表 4.6-3 氨氮廢液處理技術之簡介

處理方法		原理	氮之最終型式	適用氨氮濃度範圍	優點	缺點
折點加氯法		次氯酸與氨態氮於加氯量達折點後，會發生作用，形成氮氣	氮氣	低濃度	去除率高	<ul style="list-style-type: none"> 廢水氨氮濃度高時，加藥量大，操作成本高 可能生成有害之氯胺
離子交換法		利用選擇性陽離子交換樹脂吸附銨離子	銨離子、含氮化學品	中低濃度	<ul style="list-style-type: none"> 去除率高 設置成本低 	<ul style="list-style-type: none"> 再生廢液不易處理，處理成本高 廢棄飽和樹脂處理成本高
氣提法		提高 pH 值，將水中銨離子形成氨氣，再利用空氣加以吹除，後端通常裝設吸收設備以捕捉氨氣	<ul style="list-style-type: none"> • 氨氣 • 銨鹽或氨水 (若有裝設吸收設備) 	適用於各種濃度氨氮廢水，中高濃度者尤佳	<ul style="list-style-type: none"> • 設置成本低 • 去除效率穩定 	<ul style="list-style-type: none"> • 操作成本較高 • 氨氣可能溢散，造成二次污染 • 易吸收空氣中之 CO₂，可能造成 CaCO₃ 結垢
薄膜	蒸餾	利用薄膜構造與分子粒	氨氣、氨水	適用於各種濃度氨氮廢	去除效率穩定	<ul style="list-style-type: none"> • 能源消耗量大 • 操作成本高

		徑、電位分布等差異·使溶質及溶液分離		水·中高濃度者尤佳		•薄膜結垢問題
	分離		氨水	適用於各種濃度氨氮廢水	<ul style="list-style-type: none"> •去除效率穩定 •產水可回收再利用 	<ul style="list-style-type: none"> •操作難度較高 •操作成本高 •濃排水處理問題 •薄膜結垢問題
化學加藥沉澱法		添加 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} ·藉以形成難溶之磷酸銨鎂複合鹽類(鳥糞石)沉澱	磷酸銨鎂複合鹽類	適用於各種濃度氨氮廢水	<ul style="list-style-type: none"> •設置成本較低 •操作簡單 	<ul style="list-style-type: none"> •藥品耗用量大·操作成本較高 •產品去化問題

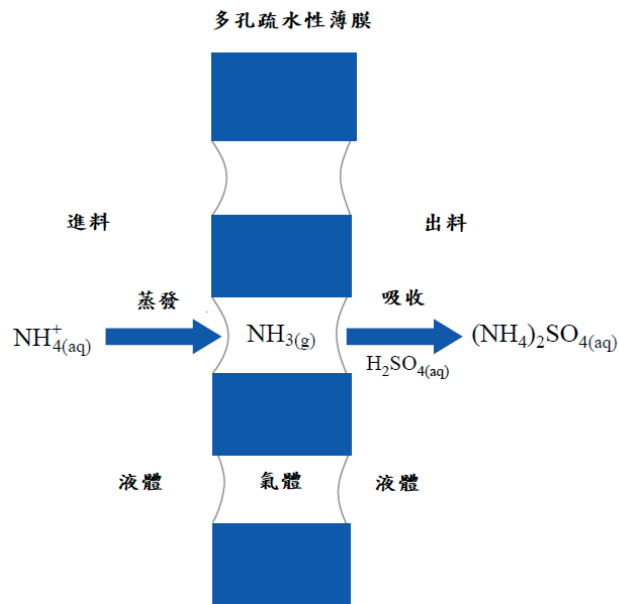
資料來源：林宜璇等·高科技產業之氨氮廢水處理技術及資源化產物再利用現況·工業材料雜誌 409 期·2021 年 1 月。



資料來源：氨氮廢水處理與回收技術及案例·張冠甫等。

圖 4.6-4 各種氨氮廢液處理技術適用之氨氮範圍

薄膜蒸餾(Membrane Distillation, MD)法係利用溫度差造成蒸汽壓差，驅動高溫側溶液以氣體分子的形式通過薄膜孔洞並於低溫處凝結，達到分離的目的。應用薄膜蒸餾法於去除氨氮之機制為添加液鹼使pH值提高，使 NH_4^+ 形成 NH_3 並自溶液中脫出，通過疏水性薄膜(Membrane De-gasifier, MD)，達到分離及濃縮效果，再使用酸類(硫酸、鹽酸、磷酸)或純水將氨氣吸收，產生銨鹽(硫酸銨、氯化銨、磷酸銨)或氨水(如圖4.6-5所示)。目前已有商業化設備商，如中國奧施科技公司(OXYMO)為專業的MBR及UF過濾膜製造商，專注於薄膜纖維技術的研發、製造和應用。



資料來源：高科技產業之氨氮廢水處理技術及資源化產物再利用現況，工業材料雜誌 409 期，2021 年 1 月。

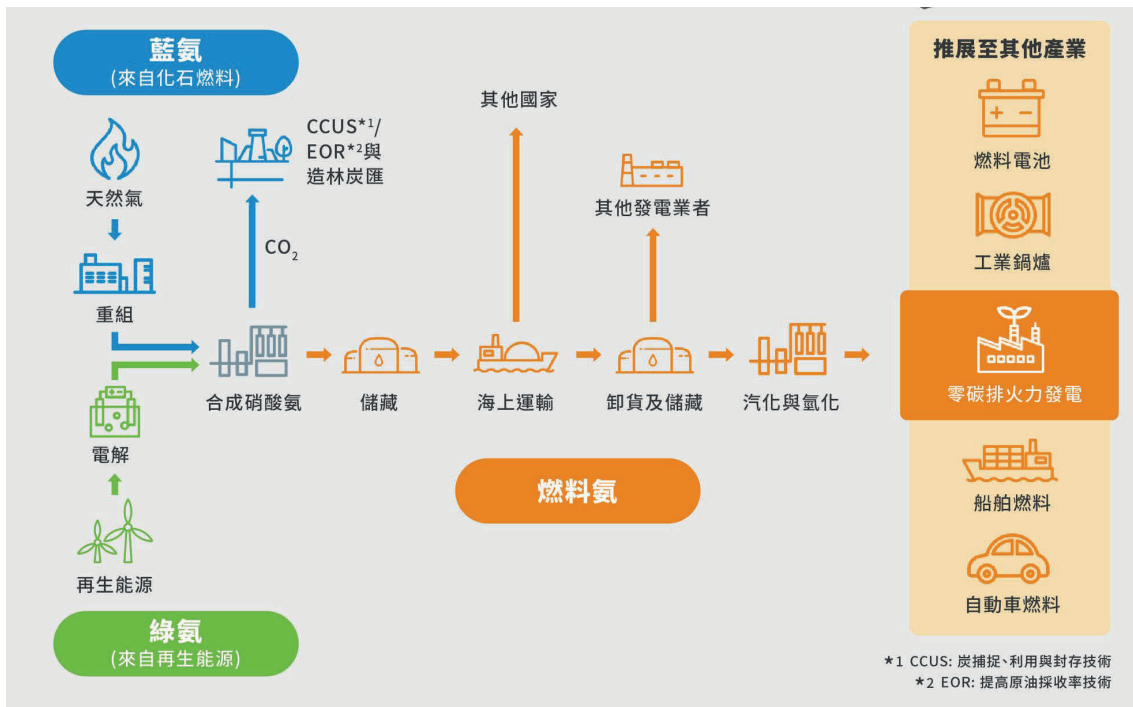
圖 4.6-5 薄膜蒸餾處理氨氮廢水示意圖

近年來因國際減碳趨勢興起，各國紛紛訂定淨零碳規劃與期程，在檢視各應用部門減碳進程之際，可取代傳統化石燃料的燃料類，例如氫氣相關燃料逐漸獲得重視。

由於氨與氫相似，經過燃燒之後沒有二氧化碳排放，氨在常壓下以

-33°C即可液化保存，不僅運儲成本相較於液氫低廉，也可利用現有肥料產業相關之基礎建設，甚至也可利用天然氣相關基礎設施，近期利用氨作為氫氣載體的呼聲遂日益增高。

2021年5月，日本經產省(NEDO)將氨納入「綠色成長戰略」的14項淨零碳發展領域之中，期望藉此達成2050年氫或氨能發電10%占比的目標，故對於氨的相關應用，除目前降低既存的肥料產業碳排放量之外，日本更欲利用氨作為燃煤火力發電以及船舶等中大型運輸載具的燃料。有關以氨混燒流程示意如圖4.6-6所示。



資料來源：JERA 台灣捷熱能源官方網站

圖 4.6-6 氨混燒流程示意圖

3.鹼性廢液電解產氫技術(日本旭化成公司)

產生氫能的選擇方式，取決於成本價格和資源，國內化石能源產氫雖

然現階段成本較低，但原料需仰賴進口，且會產生碳排放，因此電解水產氫為極具潛力之零碳排放方式，目前國際主要採用的電解水產氫技術包括鹼性電解法(Alkaline Electrolyzer, AE)、質子交換膜電解法(Proton-exchange Membrane Electrolyzer Cell, PEMEC)及固體氧化物電解法(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)。

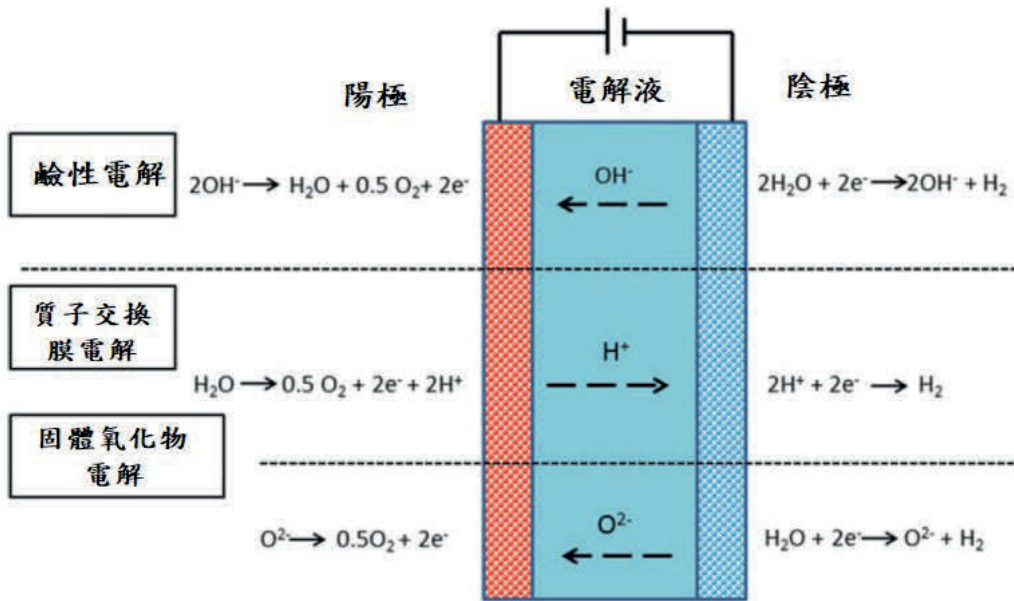
綠氫為利用再生能源電力進行水電解產出之氫氣，無碳排放問題，其技術關鍵點為電解能源效率及運轉壽命，列舉國際主要採用之電解技術鹼性電解法(AE)、質子交換膜電解法(PEM)及固體氧化物電解法(SOEC)操作條件比較如表4.4-4所示，電解效率約在60~85%之間。各電解技術依反應機制不同，其特性也有所差異，鹼性電解法(AE)、質子交換膜電解法(PEM)及固體氧化物電解法(SOEC)之產氫原理示意如圖4.6-7所示。本文並以鹼性電解法為例，說明日本旭化成公司之技術內容。

表 4.6-4 電解產氫技術比較表

電解技術	A E	P E M	S O E C
電解質	20~30%KOH	PFSA	YSZ
電荷載體	OH ⁻	H ⁺	O ₂ ⁻
溫度範圍(°C)	65~100	70~90	650~800
操作壓力(bar)	30	30	1
耐久性(khrs)	60	60	20
電解效率(%)	60	60	85

註：YSZ 為鈮安定氧化鋯(Yttria-Stabilized Zirconia, YSZ)；PFSA 多氟磺酸離子性高分子(Perfluorosulfonic Acid, PFSA)

資料來源：再生能源電解產氫之技術發展狀況，再生能源資訊網，
<https://www.re.org.tw/knowledge/more.aspx?cid=201&id=4654>



資料來源：Laura Pérez Orosa et al · Hydrogen Production by Wastewater Alkaline Electro-Oxidation · energies,2022.

圖 4.6-7 產氫原理示意圖

鹼性電解技術之實施案以日本為例，由日本新能源產業技術綜合開發機構(NEDO)、日本旭化成公司與日本石川島播磨重工業株式會社(IHI)共同合作開發之大型電極所組成的鹼性水電解設備，該設施位於日本福島縣相馬市的相馬IHI綠能中心，鹼性電解法使用氫氧化鉀做為電解液，將直流電作用於電解液，電解液中的氫氧根離子(OH⁻)經多孔傳導膜遷移至陽極，進行氧化反應釋出電子產生氧氣；水則在陰極電解成氫離子(H⁺)與氫氧根離子(OH⁻)，並接受電子而析出氫氣。該設備為利用電極面積達3平方公尺所建置之大型鹼性水電解設備，最大水電解電力達120 kW，氫氣製造能力達25 NM³/hr，設備裝置如圖4.4-8所示。未來將依據實驗結果，預計於2025年開始接受訂單，提供歐洲跟中東地區供貨。



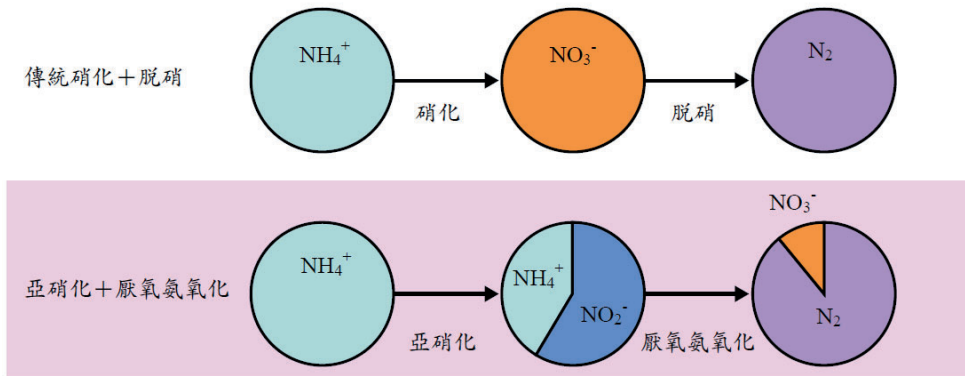
資料來源：客觀日本網站。

https://www.keguanjp.com/kgip_keji/kgip_kj_hj/pt20211206000001.html

圖 4.6-8 旭化成公司位於福島縣水電解法製造氫的設備

4. 厭氧氨氧化技術(荷蘭 PAQUES 公司)

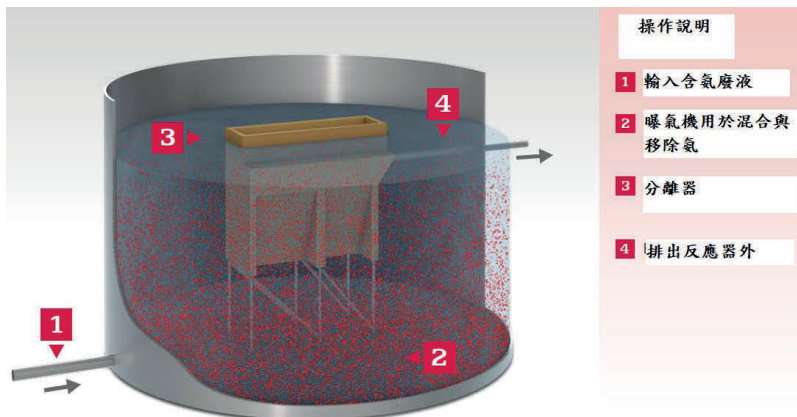
完整的厭氧氨氧化系統必須包含傳統硝化反應中的亞硝化反應，將約 60% 之氨氮氧化至亞硝酸鹽氮（因此又稱半亞硝化反應），隨後再由厭氧氨氧化反應將剩餘 40% 的氨氮與生成的亞硝酸鹽氮一起反應產生約 90% 的氮氣與 10% 的硝酸鹽氮（如圖 4.6-9 所示）。在半亞硝化/厭氧氨氧化系統中，每公斤氨氮在半亞硝化反應僅消耗約 1.8 公斤氧氣與 4.3 公斤鹼液；厭氧氨氧化反應則完全不需要任何有機碳源添加，而鹼液與 pH 在一般操作無明顯變化。但是厭氧氨氧化菌也存在一些缺點，最明顯的就是其長達兩週的倍增時間（一般細菌約數分鐘至數小時即可增殖至兩倍）；另外還有就是對於自身的基質——亞硝酸鹽與廢水中的有機碳（特別是甲醇）十分敏感，使得厭氧氨氧化技術在應用上的門檻相對高於傳統之硝化與脫硝。



資料來源：林翰璘等，從氨氮放流水管制到厭氧氨氧化技術之興起，工業材料雜誌409期，2021年1月。

圖 4.6-9 硝化/脫硝反應與亞硝化/厭氧氨氧化反應之比較

荷蘭派克(PAQUES)公司開發ANAMMOX®技術，操作流程說明如圖4.6-10所示，可以降低操作成本，能持續的從廢水中去除氨氮並從廢氣中去除氮。與傳統的硝化與脫硝技術相比，ANAMMOX®技術優勢包含脫氮率高、無須消耗甲醇用於反硝化、減少動力消耗60%、剩餘污泥產量最小化、減少二氧化碳排放90%、減少空間需求50%等。可應用行業包含半導體業、都市廢水處理、食品業、石化業等。



資料來源：PAQUES公司網站，

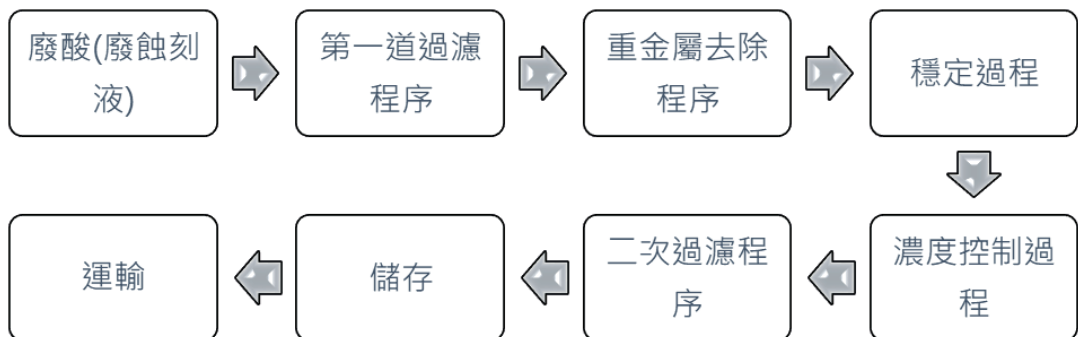
<https://en.paques.nl/products/featured/ammonia-removal-anammox>

圖 4.6-10 ANAMMOX®技術操作說明

5.利用廢酸回收處理過氧化氫

隨著工業的快速發展，特別是在半導體和顯示器製造過程中產生的廢液量大幅增加，透過與其他廢水混合處理後，即使達標排放仍伴隨環境污染問題。韓國專利發明一種利用廢酸回收過氧化氫的方法，將廢酸(廢蝕刻劑)回收利用，作為氧化劑重新用於其他工業領域。

該項發明利用顯示器製造過程中產生的廢酸，經由過濾程序，對原料儲槽中的廢酸進行第一次過濾雜質，再由重金屬去除程序，由設置在吸附裝置中的離子交換纖維吸附和去除所含的鉬和鈦金屬。再透過混合重量比例0.2~1%的磷酸來抑制在廢酸中的過氧化氫分解，此為反應裝置中的穩定化過程，將廢酸中所含的過氧化氫濃度調節至恆定17~18%。由過濾器二次過濾，再次去除廢酸中雜質，最終進行貯存和運輸，流程示意如圖4.6-11所示。處理後得到的低濃度雙氧水可回收利用，用於廢水處理設施等行業的處理過程，具有高質量並且在處理和儲存時沒有爆炸的風險，可用作其他工業領域的氧化劑重複使用，具有提高經濟效益的作用。



資料來源：The method of hydrogen peroxide recycle treatment, by using wasted acid, 韓國註冊專利 10-1328647 (2012/8/2)

圖 4.6-11 利用廢酸回收處理過氧化氫的方法

五、結語

本評估報告針對廢溶劑回收及資源循環技術、廢酸鹼液回收及資源循環技術，相關評析結果彙整如下：

1.廢溶劑回收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：德國 GEA 韋根公司、印度科塔夫 (KETAV)顧問公司等；B.蒸氣再壓縮技術：加拿大 Whiting 公司、義大利 3V Tech 集團公司等；C.日本東京應化工業股份有限公司、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 D.電透析：美國 SACHEM 化學公司。其共通性特點均強調分離效率高、操作方便及低能耗。
- (3)電透析：美國 SACHEM 化學公司。強調分離效率高、操作方便、低能耗及水回收率高。

針對廢溶劑所蒐集彙整之國外資源循環關鍵技術，其相關技術評析彙整如表 5.1-1 所示，廠商可依據相關技術及適用對象參考應用。

表 5.1-1 廢溶劑回收及資源循環技術評析

技術類型	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術整備度(TRL)	成熟及先進技術
蒸餾	多效蒸餾技術	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系統稱蒸餾。	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	醇、烴、酮、醚、酯、胺、氮化合物等廢溶劑	9 (已商業化)	瑞典 Alfa Laval 公司、以色列 IDE 海水淡化技術有限公司、德國 GEA 韋根公司、印度科塔夫(KETAV)顧問公司等。
	機械式再壓縮技術		高效能、運轉成本低，適用於蒸餾、蒸發即能縮系統		9 (已商業化)	加拿大 Whiting 公司、義大利 3V Tech 集團公司等、德國 GEA 韋根公司
	共沸蒸餾與多成分蒸餾技術		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		9 (已商業化)	日本東京應化工業股份有限公司、日本瑞環公司溶劑回收設備
薄膜分離	有機膜材料(逆滲透、奈	薄膜分離技術係藉著薄膜相形成一物理障礙，並利用	有機膜：分離液體和蒸氣混合物的最有效之方式之	醇、烴、酮、醚、酯等廢	9 (已商業化)	德國 GKSS 公司

	<p>過濾、超濾、微濾) 無機膜材料 (多孔無機膜、緻密無機膜)</p>	<p>薄膜之選擇性質，讓混合物溶液中某些成分透過，以進而阻止其他成分透過，以進行分離、濃縮與純化的方法。</p>	<p>一、較無機膜成本便宜。 分子篩膜：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。 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、優良性能，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。 無孔膜：能耗低、可使用廢熱能源、不需要再生、不宜在高壓下工作、易於操作、控制和維護、資金成本低及佔地面積小。</p>	<p>溶劑及廢混合溶劑</p>		<p>日本旭化成、三菱化學、日立、東麗公司等</p>
					<p>9 (已商業化)</p>	<p>美國頗爾(Pall)、法國諾華費、法國達美工業及中國久吾高科技公司等</p>
					<p>9 (已商業化)</p>	<p>加拿大PETRO SEP公司</p>

電 透 析	離子交換樹脂、無機膜料(多孔無機膜、緻密無機膜)及電池	利用電場驅動的薄膜分離技術，可用來做為脫鹽、濃縮與純化等不同用途。其原理係在陰極與陽極之間，放置著若干交替排列的陽膜與陰膜，讓水通過兩膜及兩膜與兩極之間所形成的隔室，在兩端電極接通直通電源後，水中陰、陽離子分別向陽極、陰極方向遷移。	電透析系統是讓水流經交替排列之陰、陽離子交換膜間，在直流電場作用下驅動離子通過滲透選擇性離子交換膜，如此離子可被去除或濃縮在另一水道。由於不是藉由壓力讓水通過薄膜，因此電透析系統相較於其他薄膜技術之操作壓力較低，對有機結垢之容忍度也較高。	醇、烴、酮、醚、酯等廢溶劑	9 (已商業化)	美國 SACHEM 化學公司
-------------	-----------------------------	--	---	---------------	-------------	----------------

2.廢酸鹼液回收及資源循環技術包括如下：

- (1)廢硫酸再生技術：A. MECS SAR 乾法再生技術：美國杜邦公司；B. WSA 濕法再生技術：丹麥托普索公司、奧地利 P&P 公司；C. SULFOXTM 濕法製酸技術：美國杜邦公司；D. ERSATM 高效廢酸再生技術：中國大陸科洋公司；E.廢硫酸濃縮再利用技術：德國 GMM Pfaudler 公司；F. 多效蒸發技術：瑞士 SEP 公司。其共通性的特點均已商業化，強調回收率高、產生大量熱能並進行回收。
- (2)廢磷酸多級逆向萃取回收技術：由日本三和油化工業進行開發，可高效率萃取回收磷酸，並同時高選擇性回收醋酸及硝酸，萃取分離步驟少、產率高，萃取溶劑更可以充分循環使用。
- (3)廢氫氟酸再生技術：A.流體化床結晶處理技術：日本 ORGANO 公司，結合廢水產出源及氫氟酸製造商進行循環回收體系的新商業模式。B. 蒸發濃縮技術：日本三菱化工公司、日本佐倉工程有限公司。其共通性的特點均強調製程流程簡單，可結合製程進行回收。
- (4)混酸回收技術：美國 Beta Control Systems 真空蒸發過濾法，使用真空蒸發來過濾污染物並濃縮混合酸，以供重複使用。期操作特點為低操作溫度、低操作成本及低材料成本。
- (5)醋酸回收技術：法國 De Dietrich 公司萃取法回收醋酸技術，透過液液萃取和共沸精餾回收醋酸。
- (6)鹽酸回收技術：日本月島環境公司蒸餾萃取技術，前段設置燃燒爐，燃燒後產生氯化氫氣體，透過燃燒不需要的有機物，達鹽酸回收的目的。
- (7)鹼性廢液回收技術：A.電滲析技術：日本亞斯通公司通過離子交換膜和電場作用，可以對溶液中的離子性物質進行脫鹽、濃縮、精製以及

回收。B. 薄膜蒸餾或脫氣膜法技術：中國奧施科技公司利用溫度差造成蒸汽壓差，驅動高溫側溶液以氣體分子的形式通過薄膜並於低溫處凝結。C. 電解產氫技術：日本旭化成公司與日商石川島播公司，使用氫氧化鉀做為電解液，通入直流電進行電並析出氫氣。D. 厭氧氨氧化技術：荷蘭派克(PAQUES)公司可分兩段式系統或單段式系統進行反應。

針對廢酸鹼液所蒐集彙整之國外資源循環關鍵技術，其相關技術評析彙整如表 5.2-1 所示，廠商可依據相關技術及適用對象參考應用。

表 5.2-1 廢酸鹼液純化及資源循環技術評析

廢酸種類	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術整備度(TRL)	成熟及技術來源
廢硫酸	MECS SAR 乾法再生技術	流程包括 4 個製程單元：熱裂解、煙氣淨化、轉化和吸收。	原料範圍廣、催化劑裝填後不用再出來清理、低電耗等。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	9	美國杜邦公司
	WSA 濕法再生技術	回收各種廢氣中的硫，並將其轉換成工業級濃硫酸的製程技術，硫回收率可達 95.0 ~ 99.7%。	沒有化學藥品消耗和廢水排放，熱效率高，成品為高品質硫酸。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	9	丹麥托普索公司 (Haldor Topsoe)
	WSA 濕法再生技術	採用兩次轉化和兩次冷凝，轉化和冷凝	採用熔融鹽換熱技術，轉化器內置的熱交換器等設備均使用熔融鹽來吸收熱量。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	9	奧地利 P&P 公司 (P&P Industries AG)
	SULFOXT TM 濕法製酸技術	用於處理含硫化化合物的廢氣和廢液生成濃硫酸	操作成本低，並副產濃硫酸和大量蒸汽。	冶煉行業和其他行業 H ₂ S 尾氣處理。	9	美國杜邦公司
	ERSA TM 高效廢酸再生技術	濕法製酸技術取消燃燒步驟，透過高效纖維除霧器物理捕集的方法達	燃料氣消耗低，且熱回收率高	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	9	中國大陸科洋公司

廢酸種類	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術整備度(TRL)	成熟及技術來源
	廢硫酸濃縮再利用技術	成對酸霧的高效處理。 使用 Pfaudler HoSA®製程，回收再利用成濃縮硫酸。	設計之熱交換器耐腐蝕，並將熱進行回收節省操作成本。	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	9	德國 GMM Pfaudler 公司
	多效蒸發技術	串聯多效蒸發技術與結晶技術，將濃縮後的硫酸與硫酸鹽，進行分離。	硫酸回收率高、低蒸汽和電力消耗	化工業及光電半導體及 TFT-LCD 業	9	瑞士 SEP 公司
廢磷酸	多級逆向萃取回收技術	利用溶劑萃取法及多級回收裝置回收高濃度酸液。	可高效率萃取回收磷酸，並高選擇性回收醋酸及硝酸，萃取分離步驟少、產率高，萃取溶劑更可充分循環使用	光電半導體及 TFT-LCD 業，適用於混酸廢液分離	9	日本三和油化工業
廢氫氟酸	流體化床結晶處理技術	利用 0.2~0.5mm 矽砂載體做結晶核種，將廢氫氟酸加入反應器內，添加氯化鈣增加水中鈣離子濃度，不須脫水設備。	濾乾後的氟化鈣結晶可作為鋼鐵業之助溶劑原料，可結合廢水產出源及氫氟酸製造商進行循環回收體系。	積體電路製造業	9	日本 ORGANO 公司
	蒸發濃縮技術	利用氫氟酸與其他液體廢點不同進行蒸發處理	製程流程簡單，可結合製程進行回收。	積體電路製造業	9	日本三菱化工公司 日本佐倉工程有限公司

廢酸種類	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術整備度(TRL)	成熟及技術來源
		分離。				司
混酸	真空蒸發過濾法	使用真空蒸發來過濾污染物並濃縮混合酸以供重複使用。	低操作溫度、低操作成本、低材料成本	電子業、鋼鐵業	9	美國 Beta Control Systems
醋酸	萃取法回收醋酸技術	透過液液萃取和共沸精餾回收醋酸。	QVF®技術較傳統降低能耗 40%。	產生醋酸之產業	9	法國 De Dietrich 公司
鹽酸	蒸餾萃取技術	前段設置燃燒爐，燃燒後產生氯化氫氣體，透過燃燒不需要的有機物，達鹽酸回收的目的。	餘熱可用於蒸氣回收或發電。可處理固液氣等樣態。	電子業、鋼鐵業	9	日本月島環境公司
	電滲析技術	通過離子交換膜和電場作用，可以對溶液中的離子性物質進行脫鹽、濃縮、精製以及回收。	經電滲析後比較，可大幅降低廢水產生量。	光電半導體及 TFT-LCD 業	9	日本亞斯通公司
鹼性廢液	薄膜蒸餾或脫氣膜法	利用溫度差造成蒸汽壓差，驅動高溫側溶液以氣體分子的形式通過薄膜並於低溫處凝結。	使用酸類(硫酸、鹽酸、磷酸)或純水將氨氣吸收，產生銨鹽(硫酸銨、氯化銨、磷酸銨)或氨水。	光電半導體及 TFT-LCD 業	9	中國奧施科技公司

廢酸種類	技術名稱	技術應用原理及特點	技術優勢	適用對象	技術整備度(TRL)	成熟及技術來源
	電解產氫技術	鹼性電解法使用氫氧化鉀做為電解液，通入直流電進行電並析出氫氣。	可產生氫氣，可大幅減少石化燃料使用及溫室氣體排放。	光電半導體及 TFT-LCD 業	6	日本旭化成公司 與日商石川島播公司
	厭氧氨氧化技術	可分兩段式系統或單段式系統進行反應。	全不需要任何有機碳源添加，而鹼液與 pH 在一般操作無明顯變化。	全行業	8~9	荷蘭派克 (PAQUES)公司

備註：TRL 是一個系統化的量尺/衡量指標，可以讓不同型態的技術有一致性的衡量標準，描述技術從萌芽狀態到成功應用於某項產品的完整流程。詳細分級說明如下：

- TRL1：基礎科學研究成果轉譯為應用研究。
- TRL2：為某項特殊技術、某項材料的特性等，找出潛在創新應用；此階段仍然是猜測或推論，並無實驗證據支持。
- TRL3：在適當的應用情境或載具下，實驗分析以驗證該技術或材料相關物理、化學、生物等特性，並證明潛在創新應用的可行性 (proof-of-concept)。
- TRL4：接續可行性研究之後，該技術元素應整合成具體元件，並以合適的驗證程序證明能達成原先設定的創新應用目標。
- TRL5：關鍵技術元件與其他支援元件整合為完整的系統/系統模組，在模擬或接近真實的場域驗證。需大幅提高技術元件驗證的可信度。
- TRL6：代表性的模型/雛形系統在真實的場域測試。展示可信度的主要階段。
- TRL7：實際系統的雛形品在真實的場域測試。驅使執行 TRL7 的目的已超越了技術研發，而是為了確認系統工程及研發管理的自信。
- TRL8：實際系統在真實的場域測試，結果符合設定之要求。代表所有技術皆已整合在此實際系統。
- TRL9：實際系統在真實場域達成目標。

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，以及溫室氣體排放、資源化效率、發展潛力、成本高低、特殊安全衛生、綠色化學發展趨勢，以及專利授權等等因素予以綜合考量，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

一、一般性文獻

1. 張啟達，循環經濟對中小企業的商機，2016年9月30日。
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. 經濟部工業局，資源再生產業推動及審查管理計畫，2018年。
4. 秀霖環境科技股份有限公司網站，<https://shioulin.com.tw/>。
5. 強方科技公司網站，<https://www.sarecovery.com/index.php?page=16>。
6. 產業價值鏈資訊平台網站，<https://ic.tpex.org.tw/>。
7. 循環台灣基金會網站，<https://circular-taiwan.org/roadmap/>。
8. 環境部資源循環署，資源再利用管理資訊系統，<https://rms.moenv.gov.tw/>。
9. 環境部資源循環署，事業廢棄物申報及管理資訊系統，
<https://waste.moenv.gov.tw/RWD/>
10. 環境部資源循環署，事業廢棄物申報及管理資訊系統，各事業廢棄物代碼申報流向統計年報。

二、廢溶劑技術相關文獻

1. 吳清茂等，廢光阻液回收再利用技術介紹，工業材料雜誌 430 期，2022 年 10 月。
2. 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。
3. 邱裕閔，倒極式電透析脫鹽技術與實廠案例介紹，產基會。
4. 洪士博，中科零廢中心循環經濟分享-電子級異丙醇純化技術介紹，2022.6.23。
5. 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)。
6. 郭昱玲等，精進廢溶劑分離純化技術以實踐再利用循環經濟，工業污染防治第 149 期(Sep. 2020)，pp.129~147。
7. 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，2023 年 9 月 8 日。
8. 黃誌銘，TMAH 顯影液回收再利用，廢溶劑循環經濟技術交流媒合會講義，2023 年 9 月 8 日。

9. 童國倫等，膜分離技術在化工程序強化上之新應用，DEC 2021 工程，第 94 卷 04 期，pp.27~40。
10. 蘇正隆，廢溶劑回收再利用技術及案例探討簡報，耀鼎資源循環股份有限公司(2018/9/21)。
11. 財團法人中興工程顧問社，我國推動化學品租賃模式的機會與挑戰，2022 年 4 月。
12. 日本東京應化工業股份有限公司，中華民國專利(TW I552809)，「再生光阻及再生光阻之製造方法」，2016 年 10 月 11 日。
13. 日本瑞環控股集團/台灣瑞環股份有限公司，公司簡介簡報。
14. 中小企業綠色環保資訊網，
<https://green.sme.gov.tw/detail.php?type=1&id=2826&lang=tw>。
15. 中國江蘇久吾高科技公司，
<https://www.jiuwumembrane.com/ceramic-membranes/>。
16. 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/>。
17. 國海證券，久吳高科(300631)深度報告，
http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201902181297798019_1.pdf。
18. 瑞典 Alfa Laval 公司，[https:// www.alfalaval.com](https://www.alfalaval.com)。
19. 以色列 IDE 海水淡化技術有限公司，
<https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E6-144-44-00.pdf>。
20. 3V Tech 集團公司，
<https://www.3v-tech.com/en/technologies-and-solutions/5/solvent-recovery>。
21. GEA 韋根公司，
<https://www.gea.com/de/products/distillation-fermentation/distillation/multiple-effect-distillation-plants.jsp>。
22. GKSS 公司，https://dc.engconfintl.org/bioenergy_ii/10/。
23. 科塔夫(KETAV)顧問公司，
<https://ketavconsultant.com/multi-effect-evaporator-mee/>。
24. IK Corporation 公司(<https://ikcorp.tradekorea.com/main.do>)
25. Whiting 公司，
<https://www.whiting.ca/evaporators-whiting-equipment-canada-inc/>。
26. 日本瑞環控股株式會社，<https://n-refine.co.jp/service/environment/srs/>。
27. 三菱化學公司，

- https://www.m-chemical.co.jp/cn/products/departments/mcc/ion/product/1202348_8785.html。
- 28.加拿大 PETRO SEP 公司網站，<https://petrosep.com/>。
- 29.SACHEM 化學公司，
https://www.researchgate.net/publication/274310119_Strategies_for_Tetramethylammonium_Hydroxide_TMAH_Recovery_and_Recycling。
- 30.聯合國工業發展組織，
<https://chemicalleasing.com/chemical-leasing-in-practice/>。
- 31.聯合國工業發展組織，<https://chemicalleasing.com/success-stories/>。
- 32.聯合國工業發展組織，
<https://www.recnnet.org/wp-content/uploads/2016/08/10-Years-Chemical-Leasing-Report.pdf>。
- 33.United Nations Industrial Development Organization · *GLOBAL PROMOTION AND IMPLEMENTATION OF CHEMICAL LEASING BUSINESS MODELS IN INDUSTRY* · 2016。
- 34.*Review of Pervaporation and Vapor Permeation Process Factors Affecting the Removal of Water from Industrial Solvents*, J Chem Technol Biotechnol. (2020/3/1) U.S. EPA Public Access.
- 35.Zuo, J., Hua, D., Maricar, V., Ong, Y. K. and Chung, T. S. (2017), *Dehydration of industrial isopropanol (IPA) waste by pervaporation and vapor permeation membranes*, Journal of Applied Polymer Science, 135(24).

三、廢酸鹼液技術相關文獻

1. 王勇等，因地制宜地實現尾氣處理最低排放---孟莫克含“硫”尾氣處理系統解決方案，第三屆全國煙氣脫硫脫硝及除塵技術年會，2015 年
2. 申鳳玉，烷基化廢硫酸再生工藝技術對比，當代化工，2016 年 11 月。
3. 林宜璇等，高科技產業之氨氮廢水處理技術及資源化產物再利用現況，工業材料雜誌 409 期，2021 年 1 月。
4. 林翰璘等，從氨氮放流水管制到厭氧氨氧化技術之興起，工業材料雜誌 409 期，2021 年 1 月。
5. 張冠甫等，氨氮廢水處理與回收技術及案例。
6. 歐陽昇弘，磷酸回收系統效益分析-以某半導體晶圓廠為例，2014 年 7 月。

7. 鄧明，烷基化廢酸再生工藝簡述，硫酸工業，2016 年 12 月。
8. 再生能源電解產氫之技術發展狀況，再生能源資訊網，
<https://www.re.org.tw/knowledge/more.aspx?cid=201&id=4654>
9. 經濟部工業局，資源再生技術暨其智慧應用赴日考察出國報告，2018 年 11 月。
10. 日本亞斯通公司離子交換膜 / 電滲析裝置產品目錄(2022.10)
11. Laura Pérez Orosa et al, Hydrogen Production by Wastewater Alkaline Electro-Oxidation, energies, 2022.
12. The method of hydrogen peroxide recycle treatment, by using wasted acid, 韓國註冊專利 10-1328647 (2012/8/2)
13. Regenerate spent acid with maximum energy recovery, Haldor Topsoe
14. Pfaudler ACID RECOVERY · 2022。
15. 客觀日本網站，
https://www.keguanjp.com/kgjp_keji/kgjp_kj_hj/pt20211206000001.html
16. 科洋環境工程 (上海) 有限公司公司網站，
<https://wangjiamin0309.github.io/haiyang/huanjinggongcheng/technology/technology2.html>
17. Beta Control Systems 公司網站，
<http://www.betacontrol.com/content/mixed-acid-hf-hcl-hf-hno3>
18. De Dietrich 公司網站，
<https://www.dedietrich.com/en/solutions-and-products/extraction/liquid/liquid-extraction/recovery-acetic-acid-aqueous-waste>
19. JERA 台灣捷熱能源網站，
<https://www.jera.com.tw/?fbclid=IwAR2yKh-9-c6WWhDIpLHkn0LJfeSmNz0XUbsVOzt5jFhmUru4LEd44744pw>
20. Mitsubishi Chemical 網站，
<https://www.mec-value.com/english/solution/slb/hydrofluoric.html>
21. ORGANO 公司網站，
https://www.organo.co.jp/wp/wp-content/uploads/2018/04/00246_ecocrystal_SIYOU.pdf。
22. P & P Industries AG 公司網站，
<https://www.pp-industries.at/en/productdetail/sulphur-oxidation-process-sop-spent-acid-regeneration-sar>

23.PAQUES 公司網站，

<https://en.paques.nl/products/featured/ammonia-removal-anammox>

24.SASAKURA 公司網站，

<http://www.sasakura.co.jp/e/products/water/ex/06.html>

25.SEP 公司網站，

<https://www.sepwin.ch/en/applications/Chemicals/Recovery-of-Waste-Sulfuric-Acid/>

26.日本月島環境工程型錄英文版，2023.04

<https://saas.actibookone.com/content/detail?param=eyJjb250ZW50TnVtIjoyOTEzNTV9&detailFlg=0&pNo=14>