



廢溶劑多段回收技術，成功實現 綠色生產轉型

崑鼎綠能環保股份有限公司助理總工程師 / 陳萬原
信鼎技術服務股份有限公司工程師 / 郭昱伶
信鼎技術服務股份有限公司工程師 / 李兆奇

關鍵字：廢異丙醇回收、循環經濟、蒸餾技術應用

摘要

本文探討廢溶劑處理如何透過製程優化與技術精進整合，選用可循環且環境友善的技術，提升能資源使用效率，延長產品生命週期並強化循環再利用機制。更進一步，以工業循環中的「再利用」與「再生處理」為核心，帶動產業邁向高價值循環的發展目標。以半導體產業中的廢異丙醇（IPA）回收處理技術為例，說明崑鼎在高科技產業廢溶劑管理上的投入策略。針對低濃度異丙醇廢液，崑鼎設定回收純度目標為 99.99%，因此評估並採用多段式分離技術，以兼顧適用於多種濃度廢液來源、多純度產品輸出、低能源消耗與低碳排放等多重需求。崑鼎所規劃的多段分離程序，不僅可有效達成節能目標，亦同步

導入蒸汽滲透（Vapor Permeation）薄膜分離技術。透過技術整合與製程精進，落實綠色製造理念，並創造資源循環最大化效益，進而推動創新商業模式，實踐循環經濟的核心價值。

一、前言

循環經濟體系分為生物循環與工業循環兩個部分（參考圖 1）[1]，生物循環係指產品由生物可分解的原料製成，透過萃取生化原料、厭氧消化／堆肥、沼氣等方式，回歸至土壤提供養分。以養豬業為例，在養豬業轉型的過程中，可以透過多元生產、製程優化與全利用來發揮豬隻價值達到零廢棄。另生物質的廢棄物，如廚餘，可透過飼料化、肥料化等方式進一步處理回用到循環體系中

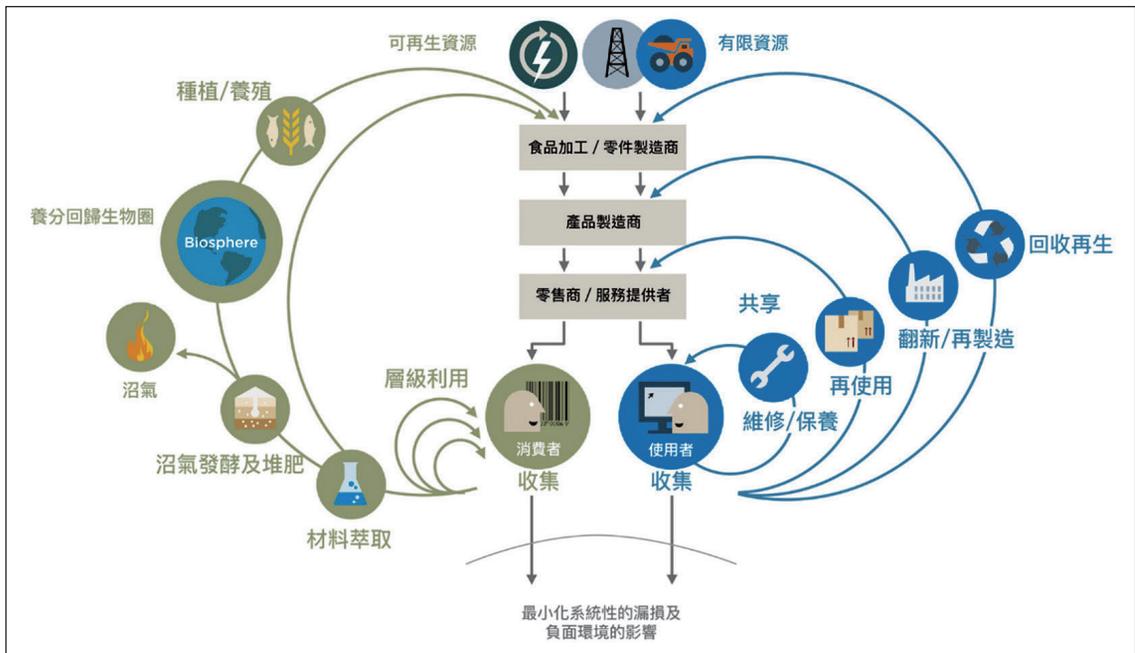


圖 1 循環經濟圖

作為另一資源再生的角色，亦可於養豬過程中產生的糞尿，透過厭氧消化產生沼氣，再以沼氣發電等方式將能源回收再利用。

而工業循環則指原料非生物可分解，而是化合物、合金等物質，透過維修、產品共享、延長壽命、再利用、翻新、回收再製造等的模式，將產品維持高價值的狀態保留在整個循環中，並使之能被更有效的被運用。透過最初材料的選擇，使用可循環、安全無毒的材料；經過產品設計，使產品便於後續的維修、回收再造等流程，再回到循環體系，目的為的是能使產品生命週期得以延長並節省能資源消耗；再透過製程優化，以製造過程中應用的能資源使用效率最大化為目標，減少對環境造成的衝擊，或是導入新興的商業模式，以租賃代替購買。

在工業循環裡以半導體產業製造晶圓的過程中所產出的廢溶劑為例，過去廢溶劑多是以焚燒的方式處理，產生蒸氣後發電，這也是屬能資源回用。現今，依廢溶劑特性透過傳統的分離技術包含蒸餾、萃取或薄膜分離的方式處理，達到節能及效率最佳化的目標，開始有突破傳統、透過製程改善或精進整合的技術開展而出，將廢溶劑經過處理後產出工業級溶劑，甚至電子級，回用到工業循環體系中，作為油漆等參配原料或回到半導體製程直接使用，因此只要有決心將資源放置在對的位置，便能達到循環經濟概念中工業生態與共生的目標。

二、廢溶劑分離技術

郭昱伶等人著作 [2] 曾詳細彙整相關廢溶劑的分離技術，其提到石化產業中，有多



種分離與純化操作技術，例如蒸餾、薄膜、結晶、吸附、吸收等分離程序 [3]。傳統的廢溶劑處理技術多採用蒸餾法進行溶劑的分離與純化，過程中無需添加額外化學藥品，即可確保最終蒸餾產物的高純度，且不含其他雜質。然而，若廢溶劑具有熱敏感性、容易熱分解或在高溫下會發生化學反應，又或其組成會形成共沸混合物時，則需採用萃取分離或共沸蒸餾等替代技術，視原料特性選擇最合適的處理方式。

為提升產業對環境的友善度，可在製程中導入高效節能技術，選用無毒或低環境風險的原料，並採用壽命較長且可重複使用的材料，皆為產業邁向永續轉型的重要策略。有關蒸餾純化技術與薄膜分離技術將逐項說明如下，並比較不同薄膜分離技術的差異性，及透過製程優化技術，提升整體廢溶劑回收與再利用的效益。

2-1 蒸餾純化技術

(廢) 溶劑提高純度採用真空蒸餾、共沸蒸餾或萃取蒸餾等技術為石化產業常用的技術，當溶液出現共沸現象時，氣相與液相在共沸點下具有相同組成，形成所謂的共沸混合物。由於此類混合物無法透過傳統蒸餾方式被有效分離，因此需以特殊技術處理。除可透過改變系統壓力、藉以改變共沸點組成的真空蒸餾外，亦可加入共沸劑，因共沸劑會與系統中至少一個成分產生沸點較低的新共沸物，如此便可透過蒸餾將低沸點共沸物自塔頂移除，另保留於塔底的溶劑則可進行純化與回收。另亦可考慮採用萃取蒸餾，其原理是加入高沸點、易溶解且不易揮發的

萃取劑，用以破壞原有的共沸關係，使高揮發度的物質從塔頂分離，而下層含有萃取劑的液體，則可經由第二道蒸餾程序將萃取劑分離純化並繼續循環利用。

上述蒸餾技術主要依賴蒸餾塔來達成分離目的。蒸餾塔雖為化工製程中最常見的分離設備之一，卻也是最耗能的單元操作。根據工研院於 2011 年發表的《能源統計月報》資料顯示，工業部門的能源消耗長年佔全國總用能的 50% 以上，其中化工業約占工業部門能耗的 48%，其中又以蒸餾單元比重最高 [4]，因此，若能有效降低蒸餾單元的能源消耗，同時提升分離效率，將對整體製程優化與永續發展具有重大意義，也因此成為眾多研究機構與產業界積極投入的研發重點。

在蒸餾技術的設計階段，可透過優化蒸餾塔結構設計（如塔高、塔徑與塔內填充物配置），或調整操作參數，以達到節能目的。此外，亦可透過蒸餾系統間的熱整合，提升整體熱能利用效率。進一步而言，改變操作壓力可突破熱傳限制，使蒸餾塔本身達成熱整合的效果。其中，多效蒸餾純化技術就是一種典型應用。

多效蒸餾純化技術在 1950 年 [5] 即提出，是一種熱整合節能蒸餾技術。該技術透過蒸餾塔本體的特殊設計，藉由調節塔內壓力以產生溫度差異，再將高壓塔頂冷凝時所釋放的熱能，作為低壓塔的加熱熱源，實現雙塔間的能量再利用。相較於傳統蒸餾系統中每座塔需分別配置冷凝器與再沸器，多效蒸餾則可使同一熱交換器同時兼具冷凝與再沸功能。例如，高壓塔頂的蒸汽可直接加熱



低壓塔底部的再沸器，藉此達到內部熱整合，提升蒸汽使用效率，進而節省能源成本並提高蒸汽經濟性。Cheng 和 Luyben [6] 和 Emtir [7] 等人的研究已探討預分餾器與多效蒸餾塔的整合應用，證明了這種安排可以大幅節省能源。此外，國際間已有許多實例被應用，如海水淡化處理。多效蒸餾技術可以分離雙成分或三成分的液體，適用於相對揮發度低、所需理論板數多或操作回流比高的系統。

2-2 薄膜分離技術

薄膜分離技術也是一種常見的分離與純化方法。其原理是藉由一層具有半透性或選擇性滲透能力的膜材，在適當的驅動力作用下，使特定分子或離子通過膜層，而阻隔其他分子，從而達成分離目的。在膜分離的過程中，進料液有一部分會穿透膜層，稱為滲透液或濾液 (Permeate)，而被膜所阻擋的成分則保留在膜的進料側，稱為濃縮液或滲餘液 (Retentate)，如圖 2 所示 [8]。而薄膜分離的驅動力可依應用類型主要分為壓力差、濃度差、電位差與溫度差，其中利用壓力差者有逆滲透 (Reverse Osmosis, RO)、奈米

過濾 (Nanofiltration, NF)、超過濾 (Ultra Filtration, UF)、微過濾 (Microfiltration, MF)；利用濃度差者包含透析 (Dialysis)、氣體分離 (Gas Separation) 及滲透蒸發 (Pervaporation, PV)；利用電位差則是電透析 (Electrodialysis, ED)；以及利用溫度差的薄膜蒸餾 (Membrane Distillation, MD) [9]。

薄膜分離技術能突破傳統分離技術的限制，尤其適用於共沸混合物、沸點接近的組分或熱敏感型混合物的分離。此技術具備多項優勢，包括：節能低耗、設備體積小、操作與維護簡便、以及模組化設計與建置彈性高，同時也易於與傳統分離設備整合與擴充，因此在多項應用中備受重視。其中，滲透蒸發 (Pervaporation, PV) 是一種近年受到高度關注的分離技術。在 PV 程序中，無需高溫操作，僅利用薄膜兩側的壓力差，使進料液相穿透薄膜、並於膜內部汽化為氣相以完成脫水分離。該氣相產物 (滲透蒸氣) 隨後再經冷凝回收 [10]，為近年來極受矚目的分離技術之一。

2-2-1 滲透蒸發 (Pervaporation, PV)

滲透蒸發 (Pervaporation, 以下簡稱 PV) 分離技術最早由 Kober 於 1917 年提出 [11]，並於 1935 年由 Farber 首次應用於分離與濃縮過程中 [12]。自 1960 年代以來，該技術已廣泛應用於有機水溶液與有機混合物的分離。

PV 分離程序係依循「溶解－擴散機制」進行，如圖 3 所示。進料液經由選擇性吸附

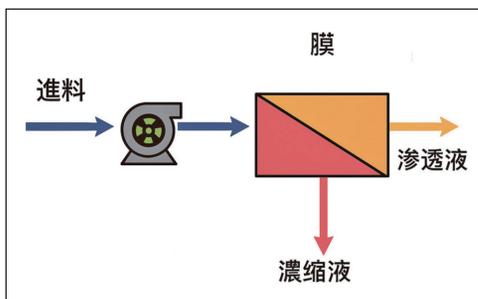


圖 2 薄膜分離過程圖

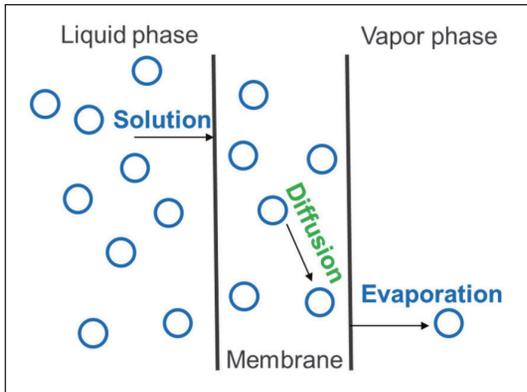


圖 3 薄膜溶解擴散模型

與擴散，透過薄膜達成分離效果。首先，進料液接觸薄膜上游端表面後，其組成物依據化學活性與分子尺寸的差異，與膜材產生不同程度的親和性，導致具有選擇性的吸附現象，進而使特定組成物進入膜內。接下來，在薄膜內部，不同組成物根據其分子形狀、尺寸以及與膜材官能基之間的親和力進行選擇性擴散，朝薄膜下游端移動。最終，當滲透物抵達薄膜下游端時，藉由真空抽氣或載氣吹掃的方式維持下游側低壓環境，使滲透物在低壓下汽化，並自膜表面脫附蒸發達到分離。因此，PV 分離效率決定於液體組成與膜間分子互相作用的關係。

相較於傳統的蒸餾、萃取等純化技術，滲透蒸發 (PV) 分離程序具備多項優勢，包括節省能源、設備構造簡單、無需高溫操作，且不需添加第三成分化學品等特點。此外，PV 技術對於同分異構物 (Isomers)、共沸混合物 (Azeotropic mixtures)、熱敏感物質 (Heat-sensitive compounds) 以及高沸點化學品的分離亦具有良好成效。PV 分離程序的主要應用領域包含 (1) 有機溶劑脫水；(2)

分離少量有機物質的水溶液；(3) 分離有機混合物 [13][14]。只要選擇合適的膜材，即可對應不同類型的溶液條件，涵蓋從低濃度至高濃度的有機物水溶液，展現出高度的操作彈性與廣泛的應用潛力。

2-2-2 蒸汽滲透技術 (Vapour Permeation, VP)

蒸汽滲透 (Vapor permeation, 以下簡稱 VP) 與滲透蒸發 (Pervaporation, PV) 皆被視為「潔淨技術 (Clean technologies)」[15]，在過去發展 PV 技術與其工業應用的基礎上，VP 在近十年間快速發展 [16]。VP 與 PV 常被統稱為「溶液－擴散」或「吸附－擴散」型分離程序，其主要驅動力為薄膜兩側的液相濃度差或氣相分壓差。兩者的最大差異在於進料成分的相態與流動性質：PV 使用液體進料，而 VP 則處理氣態進料，如圖 4 [17] 與表 1 [20] 所示。VP 與 PV 均可利用化學組成或活性差異所產生的驅動力，有效分離揮發性化合物混合物，且不受化合物間分子大小或結構相似性的限制 [17]。

VP 是分離混合蒸氣的有效技術之一。在蒸氣滲透過程中，由於薄膜僅與蒸氣相接觸，若採用有機高分子膜，可有效減少因液相溶劑造成的膨潤現象，因此 VP 不僅保留 PV 部分的優點，也克服 PV 在某些操作條件下的限制 [19]。在操作條件上，VP 系統需特別注意進料溫度，應維持在較高溫度以防止蒸氣凝結；而 PV 系統則需維持進料側適當壓力，以避免進料物質汽化，同時確保液體能穩定流經薄膜模組並完成分離程序。

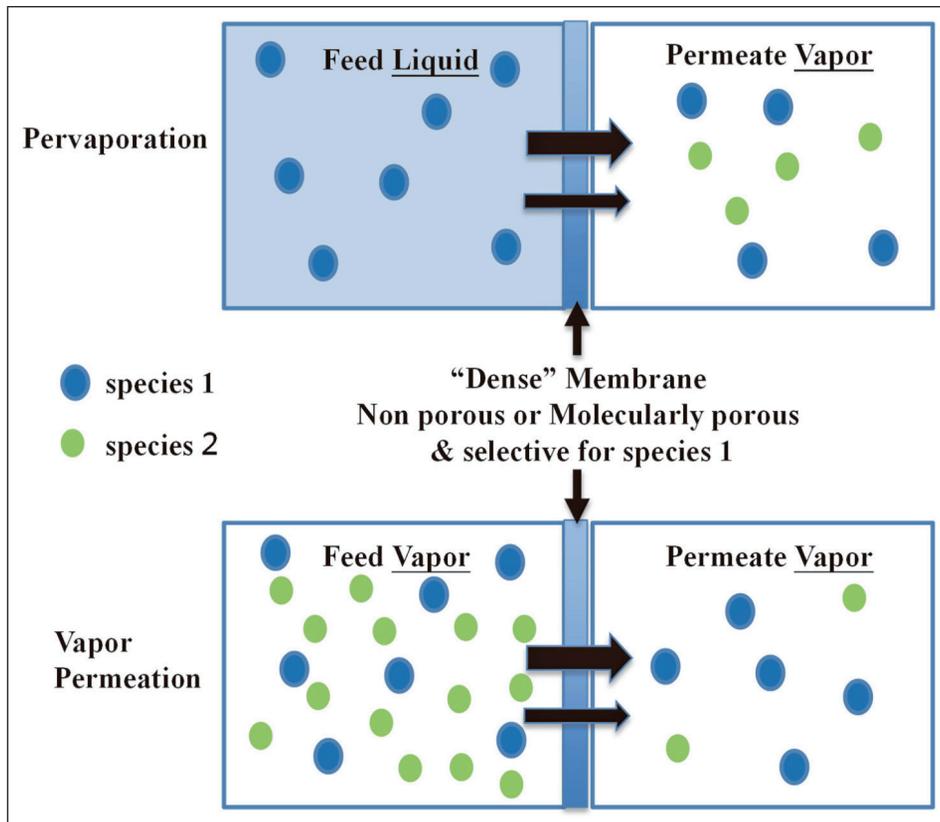


圖 4 滲透蒸發 (Pervaporation) 與蒸汽滲透 (Vapor permeation) 比較圖

表 1 滲透蒸發 (Pervaporation) 與蒸汽滲透 (Vapor permeation) 比較表

滲透蒸發 (Pervaporation, PV)	蒸汽滲透 (Vapor permeation, VP)
進料為液體	進料為蒸汽或蒸汽與氣體的混合物
需要液體-蒸汽相變化, 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

舉例而言, 若選用對乙醇具選擇性的薄膜, 可自乙醇-水混合物中選擇性移除乙醇並進一步濃縮滲透液; 反之, 若選用對水具選擇性的薄膜, 則可從相同混合物中去除水

分, 達成脫水與濃縮的目的。無論是 VP 或 PV 皆不受熱力學平衡的限制, 因此即使在共沸條件下, 亦能有效分離並除去溶劑中的水分 [20]。此外, 相較於傳統以蒸餾為主的分



離技術，若能選用具高選擇性的膜材進行 VP 或 PV 操作，僅需供應目標組成物所需的蒸發潛熱，即可實現有效分離，從而大幅降低能源消耗 [17]。

一般而言，PV/VP 薄膜材料可分為有機膜、無機膜及有機－無機混合／複合膜三大類。有機膜通常指高分子膜，具有製備與加工容易、結構多樣、應用廣泛等優勢，常見材料包括幾丁聚醣（Chitosan）、聚乙烯醇（Polyvinyl alcohol, PVA）、聚丙烯腈（Polyacrylonitrile）、聚酯（Polyester）、醋酸纖維素（Cellulose acetate）、聚磺（Polysulfone）等，但高分子具有不耐高溫及不耐高壓的先天限制，因此在某些工業程序上會降低其實用性。無機膜材則有陶瓷膜、金屬膜、分子篩膜等，具有優異的耐高溫、耐酸鹼與化學穩定性，且分離性能穩定可靠。惟其製備工藝較為複雜，成本也相對較高，但從長期穩定性與可持續應用的角度來看，無機膜依然具備發展優勢。為了兼顧有機膜與無機膜各自的優點，有機－無機混合／複合膜應運而生。此類膜材可透過將有機材料塗覆於無機支撐層上，或反之，將無機材料塗覆於有機支撐層上，以結合兩者的功能性與結構強度，是一種實用且具潛力的發展方向。

此外，也有透過技術整合以降低能源消耗的應用實例。Brüschke 與 Tusel 將滲透蒸發技術與傳統蒸餾設備結合，成功將乙醇濃度由 94% 提升至 99.85%。經操作成本比較分析，兩項技術合併使用後，相較於單獨使用蒸餾與滲透蒸發技術，操作成本分別降低約 40% 與 28% [21]。另有瑞士公司專注於無機膜材的開

發，利用其具備耐高溫、耐化學腐蝕、高通量與高選擇性等特性，導入於滲透蒸發程序中，並與傳統蒸餾技術整合應用，以進一步提升分離效率與系統穩定性 [15]。針對異丙醇脫水應用，Zuo 等人之研究顯示，無論採用 PV 或 VP 皆能有效除水，但 VP 方式在處理異丙醇時展現出更佳的脫水效果 [22]。

三、產品市場定位與服務模式

崑鼎投入廢溶劑回收產業，不僅是肩負企業使命的展現，更是經過縝密的多方評估與審慎決策。從技術可行性、市場趨勢、財務效益到風險控管，皆進行全方位的評估分析，確保投入方向與策略具備前瞻性與穩健性。本著「成為最值得信賴的永續資源循環領導者」的自我期許，崑鼎在產品定位上亦採取差異化策略，明確與市場現有產品做出區隔，且回收產品以「回歸製程使用」為核心目標，共同協助企業實現永續循環目標。

基於上述理念，崑鼎積極透過產官學合作管道投入資源，開發高純度（99.99%）廢溶劑回收技術，並同步針對具規模與成熟製程尋求產業合作機會，加速布局廢溶劑回收市場。因此，「耀鼎資源循環股份有限公司」（以下簡稱「耀鼎」）應運而生，作為崑鼎推動資源循環願景的推手。

3-1 產品生產技術評估

耀鼎標的設定為高科技產業廢溶劑一低濃度異丙醇，其主要組成為水及異丙醇，成分雖較為單純，但若須達到崑鼎設定的回收純度目標 99.99% 異丙醇，則需選用多段的分



離技術才能達成，且符合適用大範圍濃度的廢異丙醇料源、多種純度的異丙醇產品、低能源消耗與低碳排的目標。耀鼎規劃的多段分離技術說明如下：

第一段分離技術：透過傳統的蒸餾分離技術初步提濃異丙醇濃度，不需透過添加大量的萃取劑或是使用薄膜分離的方式，便可以有效將低濃度異丙醇提濃至 85% 以上之工業級異丙醇。

第二段分離技術：採用萃取精餾技術將異丙醇濃度由 85% 提濃至 99.5%，該技術則需導入破共沸技術，加入低沸點的共沸劑提濃異丙醇，或添加高沸點的萃取劑，達到分離效果。

第三段分離技術：採用薄膜分離技術，VP 技術不須加入第三成分，即能將異丙醇濃度由 85% 提濃至高濃度 99.99%。但高科技產業對於產品中的雜質微粒要求十分嚴格，管制元素多達 40 餘種，且濃度須達 ppb 等級才能符合半導體電子級規格，因此除透過 VP 提濃到 99.9% 外，還必須經過多道離子交換方式，去除異丙醇中的雜質。VP 技術其具有低能耗、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。

上述製程規劃的優點為每段的單元都能獨立操作或串聯操作，增加製程的彈性，因此可針對科技廠產出不同濃度的廢異丙醇，選用較佳的回收單元進行處理，或是依據產品端客戶的需求，產出不同純度的產品。透過整合蒸餾分離及無機蒸發滲透膜技術的彈性運用，能有效降低製程操作能源消耗及碳排。

3-2 服務模式

耀鼎致力將自身經驗與業界分享，於各大研討會與論壇，分享耀鼎建置歷程，並向企業推動一條龍服務，以自身經驗，協助企業規劃廠內自設廢溶劑處理設施。儘管在廠內自建處理設施已逐漸成為半導體產業的趨勢，但實務執行上仍面臨諸多挑戰。多數半導體廠為既有廠房，其空間配置相對受限，如何在有限空間中整合處理設備，並確保與既有廠區公用系統（如電力、冷卻水、壓縮空氣、廢氣處理等）順利銜接，是規劃設計初期的重要課題。此外，考量廢溶劑具高度易燃性，自設處理設施須嚴格遵循相關消防法規與危險物品儲運規範，亦大幅提升工程設計與施工的複雜度。

耀鼎與客戶協同合作，建置的蒸餾系統，可將低濃度廢溶劑（約 10%）經由廠內自設的提濃系統產生高濃度廢溶劑（約 85%），可將廢棄物產出量減量約 88%，在產源端將廢棄物減量高值化，再將高濃度廢溶劑送至耀鼎進行精餾提濃，產出工業級或電子級產品回到市場。

另一成功案例為協助客戶於廠內規劃與建置多功能廢溶劑處理設施，該系統具備處理多種廢溶劑的能力，並預先保留升級至電子級製程的擴充彈性。預期該系統完成設備建置後，年處理量約 9,000 噸廢溶劑採全回收，實現約 98% 的減量效益。同時可協助客戶產品去化，提高客戶投資意願，以「轉廢為資」的方式與企業共同實踐循環經濟。



四、實現綠色生產轉型

為達成再生低碳電子級異丙醇之製造目標，耀鼎積極與產業界及學術研究單位建立技術合作，致力於廢溶劑源頭減量、回收製程之精密優化、以及高效能節能減排技術的導入。在製程端更導入碳盤查系統，依據 ISO 14064 標準，全面性盤點各單元操作之碳排放量，並透過數據分析辨識高碳排熱點，進一步研擬單元操作優化、熱能回收、替代能源使用等減碳技術方案。

此外，耀鼎持續提升回收 IPA 純化後的品質穩定性，藉由自動化監控系統與先進分析儀器，確保產品穩定達成電子級（99.99%）規範，進一步提高市場回用率。最終目標為建構一個封閉式循環、零廢棄且具備碳中和潛力的再生 IPA 處理製程，實踐搖籃到搖籃的循環經濟願景。

為推動綠色製造，耀鼎依據碳盤查結果擬定多項減碳的方針，如在製程熱源選擇上，使用碳排放量相對較低的燃氣鍋爐，同時可克服台灣普遍缺電的問題；另 VP 系統在滲透液側仍會存在少量異丙醇，在珍惜資源的理念下，耀鼎仍設法將其進一步回收利用，故在製程技術整合上，思考將滲透液回送到蒸餾塔再處理，達到資源再利用最大化，並思考製程餘熱回收再利用的可行性。因此，耀鼎從 2021 開始，逐年編列預算進行製程改，如於 2021 年將鍋爐燃料自重油改為低碳的天然氣、回收鍋爐尾氣廢熱加熱燃燒空氣等；2022 年提升進料熱交換器容量，年節省 8,780 度天然氣，並透過增設廢氣引風機變頻器，年節電約 1.1 萬度，這些節能減碳作為，

使耀鼎於 2021 年及 2022 年陸續榮獲獲得臺灣循環經濟績優企業（二星獎），及第 4 屆國家企業環保獎（銅級獎）殊榮。2023 年耀鼎持續精進，找出減碳熱點，更新冷卻水塔及空壓機，年減碳約 4.7 噸，單位碳排已降低 13.2%。2024 年接續將廠內電熱鍋爐更換為貫流式蒸汽鍋爐，預期年減碳 185 噸，單位碳排可再降低 10%，這三年的努力成果更獲得台灣永續行動獎 SDG 12 金獎的肯定。

除上述製程減碳外，耀鼎亦推動廠區使用綠電，透過碳權抵換，宣告 2020 年 6 月 1 日自 2021 年 5 月 31 日達碳中和，成為全國首家取得循環經濟與碳中和雙證書的企業，耀鼎攜手客戶為 2050 年淨零碳排放做出實質貢獻，助力地球永續，打造更美好的未來，朝向「低碳永續經營」之藍圖逐步落實。

五、結論

在 ESG 壓力日益升高的今日，企業面對的不只是減碳，更是全面的綠色轉型挑戰，崑鼎秉持專業、誠信、團隊與創新的企業文化，提供高純度、具價格優勢的回收異丙醇（IPA）解決方案，並協助企業同時落實企業社會責任。

我們不僅是再利用廠商，更是企業落實 ESG 目標的策略夥伴。從客製化的廢溶劑純化系統建置，到閉環循環資源規劃，崑鼎深入客戶產線，與企業並肩合作，共同落實：

- 減廢：從源頭降低廢液產出
- 減容：提升處理效率，減少環境負荷
- 減碳：降低碳足跡，提升綠色競爭力



以實踐環保的專業，用誠信贏得信賴，崑鼎將持續與企業攜手，打造更永續的資源循環供應鏈生態系。

參考文獻

1. 循環台灣基金會。〈循環經濟企業轉型路徑圖〉(改編自 Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy Vol. 1: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition”, Ellen MacArthur Foundation, UK, 2013)。循環台灣基金會，台灣，取自 <https://www.circular-taiwan.org/ceroadmap>
2. 郭昱伶、顏欣卉、林明志、徐承澤、林佩妤，〈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，第 129–147 頁，2020 年。
3. Nishihama, Syouhei and Yoshizuka, Kazuharu, “Ion exchange adsorption of molybdenum with zeolitic adsorbent,” *Journal of Environmental Engineering & Management*, Vol. 19, No. 6, pp. 365–369, 2009.
4. 何宗仁，〈多效蒸餾技術〉，收錄於《低碳製程技術研討會—蒸汽優化技術(107年8月)》講義，主辦單位：經濟部工業技術研究院材料與化工研究所，台灣台北，2018年8月。檢自：https://ghg.tgpf.org.tw/Resources/lecture_more?id=67730f26e10642da802b2a9fc525a2dc
(圖中數據引用自：經濟部能源局，《能源統計月報—伍、能源需要》，2012年8月10日更新，https://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=M_CH&menu_id=142&sub_menu_id=678)
5. C.S. Robinson and E.R. Gilliland, “Elements of Fractional Distillation”, (4th. Ed.), McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 168-191, 1950.
6. H.C. Cheng and W. Luyben, “Heat-integrated distillation columns for ternary separations”, *Industry & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 24, No. 3, pp. 707–713, 1985.
7. M. Emtir, E. Rev and Z. Fonyo, “Rigorous simulation of energy integrated and thermally coupled distillation schemes for ternary mixture”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, Nos. 13–14, pp. 1299–1317, 2001.
8. Hua Wang and Hongyi Zhou, “Understand the Basics of Membrane Filtration”, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 109, No. 4, pp. 33-40, 2013.
9. 徐嘉婉，「薄膜分離技術應用於水處理之案例探討」，碩士論文，逢甲大學，台灣台中，2007。
10. Richard A. Kirk, Maia Putintseva, Alexey Volkov and Peter M. Budd, “The potential of polymers of intrinsic microporosity (PIMs) and PIM/graphene composites for pervaporation membranes”, *BMC Chemical Engineering*, Vol. 18, 2019.
11. P.A. Kober, “Pervaporation, perstillation and percrystallization”, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 39, pp. 944–948, 1917.
12. L. Farber, “Application of pervaporation, *Science*”, *Science*, Vol. 82, No. 2120, p. 158, 1935.
13. 賴君義，「薄膜科技概論」，台灣台北，五南圖書出版公司，2018。
14. J. G. Wijmans, R.W. Baker and A.L. Athayde, “Pervaporation: Removal of Organics from Water and Organic/Organic Separations”, *Membrane Technology and Research*, Vol. 272, pp. 283-316, 1994.
15. Anne Jonquière, et al., “Industrial state-of-the-art of pervaporation and vapour permeation in the western countries”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 206, Nos. 1–2, pp. 87-117, 2002.
16. 陳鎮、秦培勇、陳翠仙，「透汽化和蒸汽滲透技術的研究、應用現狀及發展」，《膜科學與技術》，第 04 期，2003。
17. Leland M. Vane, “Pervaporation and Vapor Permeation Tutorial: Membrane Processes for the Selective Separation of Liquid and Vapor Mixtures”, *Separation Science and Technology*, Vol. 48, No. 3, pp. 429–437, 2013.
18. Catia Cannilla, Giuseppe Bonura and Francesco Frusteri, “Potential of Pervaporation and Vapor Separation with Water Selective Membranes for an Optimized Production of Biofuels—A Review”, *Catalysts* 7 (2017): 187.
19. 王洪軍、張麗、趙莎莎、王丹，「蒸汽滲透膜分離技術的研究現狀及其應用前景」，《科技資訊》，第 36 期，2009 年。
20. Leland M. Vane, “Review of Pervaporation and Vapor Permeation Process Factors Affecting the Removal of Water from Industrial Solvents”, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 95, No. 3, 2019.
21. G. Tusel and H. Brüsckke, “Use of pervaporation systems in the chemical industry”, *Desalination*, Vol. 53, Nos. 1–3, pp.327-338, 1985.
22. Jian Zuo, Dan Hua, Verma Maricar, Yee Kang Ong, and Tai-Shung Chung, “Dehydration of industrial isopropanol (IPA) waste by pervaporation and vapor permeation membranes”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 135, No. 24, 2017.