

環境規劃與管理類

## 精進廢溶劑分離純化技術以實踐再利用循環經濟

郭昱伶\*、顏欣卉\*、林明志\*、徐承澤\*、林珮妤\*\*

### 摘 要

自工業革命以來，線性經濟的模式已逐漸造成生態破壞與資源耗盡，全球產業已開始反思線性經濟帶來的衝擊，並朝著循環經濟的商業模式發展。尤其台灣是一個能資源缺乏、仰賴進口的國家，代工模式雖使台灣在全球產業鏈中占有一席之地，但面對無法掌控原料端及缺乏後端市場支撐的情況下，必須更積極導入「循環經濟」的精神。在全球瀰漫著永續經營的氛圍，企業著手轉型，透過投入新技術開發、研究與創新，導入不同技術的整合與應用，透過系統合作、高價值循環、產品服務，展開新型商業模式。

台灣石化產業發展在國內出口貿易占有重要的比重，創造眾多就業機會，並促進國內經濟建設，為引領台灣發展的重要功臣。然而，隨著石化產業的發展，提供了高科技產業鏈所需原料，包括綠色能源、半導體、面板、鋼鐵、紡織、運輸工具等相關產業及高質化產品應用。在高產值的背後，隱藏著大量廢棄物的產出，如化學藥劑（如光阻液、顯影液及蝕刻液）及溶劑（如丙酮及異丙醇）等，衍生對環境的負荷與影響。

本文主要討論廢溶劑透過製程優化及技術精進與整合，使用可循環且環境友善的材料，採能資源使用效率最大化，延長生命週期與增加循環再利用。更希望從工業循

環中的循環再利用與處理再生等模式，帶動產業可以達到高價值循環的目標。另以半導體產業廢溶劑處理技術為例，探討傳統蒸餾技術透過製程優化，達到節能的效果，並且進一步了解滲透蒸發及蒸汽滲透的薄膜技術應用，再從精進技術整合應用，落實綠色科技，以期創造資源循環最大效益與創新的商業模式，實踐循環經濟。

【關鍵字】循環經濟、搖籃到搖籃、精進技術整合、滲透蒸發、蒸汽滲透

---

\* 暉鼎資源管理股份有限公司                      工程師

\*\* 暉鼎資源管理股份有限公司                      經理

## 一、前言

在工業革命以前，農業社會本著大自然經濟的模式，從人類的生產模式、生活型態與生態維護，維持著與大自然和諧的共生。直至十八世紀的工業革命，透過開採、不斷加工製成產品，及產品使用後被丟棄的「線性經濟」消費模式成為全球發展主軸，而「線性經濟」是以「開採、製造、使用、廢棄」的模式進行，能資源開採的同時會產生大量廢棄物，不只造成生態破壞，也可能使能資源耗盡。隨著人口增長、都市化、供應鏈全球化的發展，原料與能源需求與日俱增、開採資源成本提高，根據經濟合作暨發展組織(OECD)2018 年 10 月 22 日最新報告指出，2060 年隨著全球人口與收入的增加，全球 GDP 將會成長 4 倍，物質使用則是成長 2 倍(OECD, 2018)，「線性經濟」這「壽終正寢」的能資源使用概念與商業模式，已無法持續下去。

在 2012 年 Elle MacArthur Foundation 所提出的「循環經濟」(Circular Economy)概念後，開啟全球對永續循環的重視。打破過去線性經濟模式的發展，「循環經濟」具可回復性與再生性，其特性是透過用新的設計，從一個完整價值鏈的系統，檢討各式各樣的經濟活動，建立資源循環圖。而「循環經濟」是經濟活動且兼顧在地就業提供、環境生態與能源自主模式的發展，實踐循環與再生經濟的發展，以使用取代擁有的「消費文化」，以製造及維修延伸到服務的「產業文化」，以「相互依存」取代「獨善其身」的「合作文化」，有利於公司體質的改變，提升競爭力(黃育徵, 2017)。

另，在全球永續循環的重視下，企業著手轉型，投入新技術開發研究與創新，導入不同技術的整合與應用，透過系統合作、高價值循環、產品服務，展開新型商業模式。此外，聯合國為因應全球氣候變遷、環境污染、資源耗竭等議題，更提出了 17 項永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)，透過提出 SDGs 期望促使國家、企業面對「永續經營」的發展趨勢，使已開發國家或開發中國家對於未開發國家在生活基礎與社會資源上能有更平等的對待，也希望對於環境資源尋求更永續的發展，並且使全球在推動永續循環有共同的語言(孫彬訓, 2018)。

然而台灣是一個能資源缺乏、原物料短缺，依賴進口的國家，一直以來以代工的商業模式嶄露頭角，在全球產業供應鏈佔有不可或缺的角色。這樣代工的模式，使台

灣一直面臨無法掌握原料端與缺乏後端消費市場支撐的情境。為了「翻轉」台灣，需積極將「循環經濟」的精神導入國家與企業體，雖台灣非聯合國成員，但 SDGs 為全世界的共同目標，為了與國際接軌，行政院永續發展委員在 108 年 7 月更研議「台灣永續發展目標」，針對各個目標提出對應指標，以期共同創造二十一世紀的永續台灣。本文主要討論廢溶劑透過製程優化及技術精進與整合，使用可循環且環境友善的材料，採能資源使用效率最大化，延長生命週期與增加循環再利用。更希望從工業循環中的循環再利用與處理再生等模式，帶動產業可以達到高價值循環的目標。另以半導體產業廢溶劑處理技術為例，探討傳統蒸餾技術透過製程優化，達到節能的效果，並且進一步了解滲透蒸發及蒸汽滲透的薄膜技術應用，再從精進技術整合應用，落實綠色科技，以期創造資源循環最大效益與創新的商業模式，實踐循環經濟。

## 二、循環經濟與永續發展目標

### 2.1 循環經濟

循環經濟來自許多學派，在 1976 年由 Walter Stahel 與 Genevieve Reday 提出的「用人力替代能源的可能性」研究報告中，勾勒出「循環經濟」的願景，並描述循環經濟對就業機會的創造、經濟競爭力、資源節約及廢棄物預防的影響。其中，主要的目標是「產品生命延伸」、「長生命週期產品」、「維修活動」及「廢物預防」，更提出生產過程中「封閉式迴路」的概念，強調出售服務的重要性，被稱為「功能服務經濟」，也更廣泛的被歸納為「績效經濟」，這是「循環經濟」的概念起點。此外，德國化學家 Michael Braungart 與美國建築師 Bill McDonough 提出「Cradle to Cradle (搖籃到搖籃)」的理念，利用「養分管理」的概念出發，將其與工業及商業過程中所涉及的材料分類為生物與非生物，並強調產品的設計，及一種「從搖籃到搖籃」的循環發展模式(Ellen MacArthur Foundation, 2017)。基於以上思維，建構出「循環經濟」的概念。循環經濟概念請參照圖 1，除了以上提到的搖籃到搖籃、績效經濟外，更包含了其它面向，如工業生態與共生、藍色經濟、再生設計、自然資本及仿生學等。

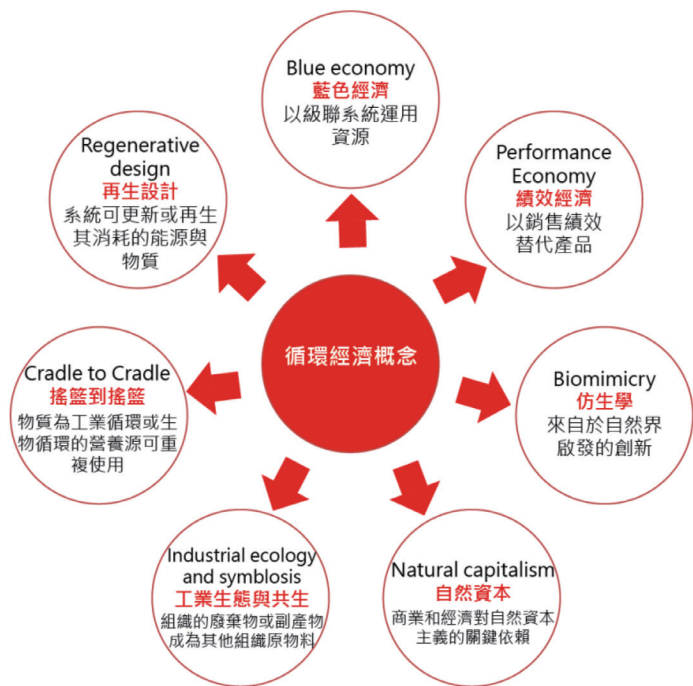


圖 1 循環經濟概念圖 (資料來源：BSI)

## 2.2 生物循環

循環經濟體系分為生物循環與工業循環兩個部分，參考圖 2，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。

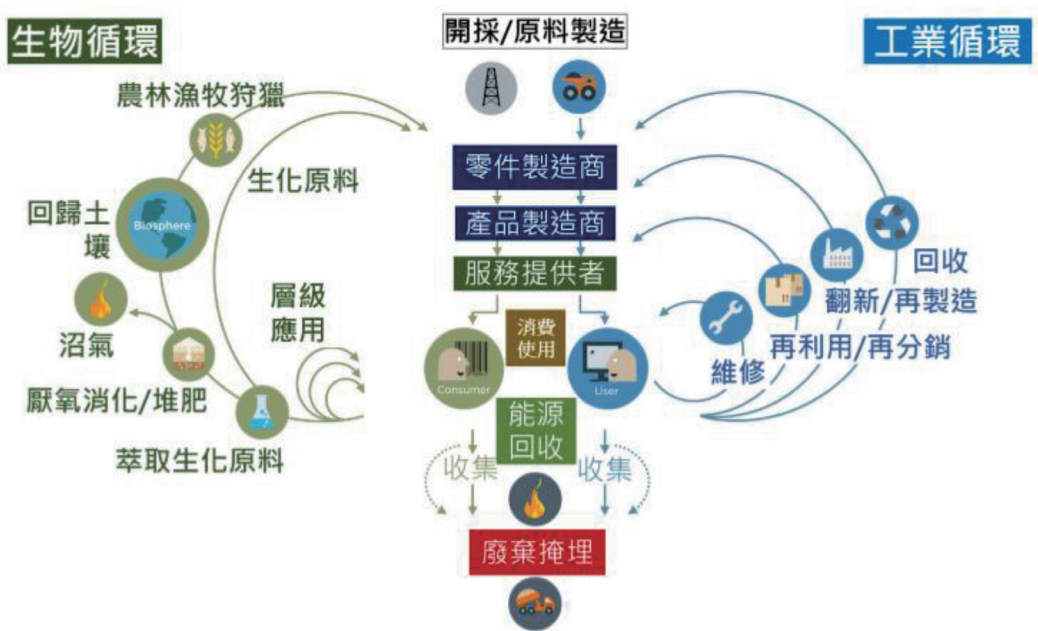


圖 2 循環經濟圖 (資料來源：循環台灣基金會)

2.3 工業循環

在圖 2 所示之循環經濟的右邊是工業循環，工業循環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，回用到工業循環體系中，作為油漆等摻配原料，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。

### 三、廢溶劑再利用技術

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(Nishihama, S. and Yoshizuka, K., 2009)。傳統的廢溶劑處理技術是透過蒸餾的方式將溶劑分離純化，不需要添加額外的化學藥品，即可以確保最終蒸餾出的產物不會含有其他雜質。而若是溶劑的特性是有熱敏感型混合物、易受熱分解或產生化學反應，或是混合物中的組成會形成共沸物，則可以透過萃取分離或共沸蒸餾的方式將物質分離，端看原料的性質選擇最適用的處理技術。為了朝向循環經濟零廢棄的目標，在製程上精進達到節能，減少使用有毒物質或易造成環境生態受影響的原料，甚至是使用壽命較長的材料搭配於製程使用，都是產業朝向轉型的方式。以下將介紹蒸餾純化技術與薄膜分離技術，並比較薄膜分離技術的差異性，及透過製程整合應用產生的節能效果，優化資源循環效能。

#### 3.1 蒸餾純化技術

石化產業發展常見(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整合應用，當溶液產生共沸現象時，在共沸點下氣相與液相組成相同，即會形成共沸混合物。共沸混合物無法透過傳統的蒸餾方式處理，除透過改變壓力，使組成改變的真空蒸餾方法外，還可透過加入第三物質—共沸劑，使其與欲分離的溶劑系統至少一個成分混合，產生沸點較低的新共沸物，經由蒸餾將低沸點的共沸物從塔頂蒸出，而欲分離的溶劑則會停留在塔底得以純化回收。而萃取蒸餾則是透過加入易溶、高沸點、不易揮發的萃取劑，藉以破壞共沸狀態，可從塔頂分離出高揮發度的組成；下層液再經另一組蒸餾設備進行萃取劑純化，即可回收萃取劑循環再使用。

以上的廢溶劑處理技術主要透過蒸餾塔進行，蒸餾塔是化工製程中最基本的處理技術，但其也是最耗能的設備。根據工研院發表 2011 年能源統計月報可以得知，工業部門歷年的能源消耗約為全國的 50% 以上，其中化工業能源耗用約占整體工業部

門 48%，又以蒸餾單元比重最高(何宗仁, 2018)，相信在蒸餾單元做節能，使分離效率提升、節能，是許多研究單位及公司展開發展以實踐循環經濟的共同目標。

蒸餾技術在設計階段可思考適切的蒸餾塔設計，如塔高、塔徑、塔內填充物或透過操作參數調整的方式達到節能的效果。亦或是透過蒸餾系統間的單元進行熱整合，甚至也可以透過改變操作壓力，來突破熱傳導限制，達到蒸餾塔自身熱整合的結果。其中，多效蒸餾純化技術就是透過改變壓力來達到熱整合的概念。

多效蒸餾純化技術在 1950 年，Robinson 及 Gilliland(Robinson, C.S. and Gilliland, E.R., 1950)即提出，是一種熱整合的節能蒸餾技術。透過蒸餾塔本身的特殊設計，調節塔的壓力，造成溫度差異，再透過雙塔的串接，使高壓塔頂冷卻過程產生的熱，提供給低壓塔作為熱源，有別於傳統蒸餾塔必須分別具有冷凝器及再沸器，讓同一個熱交換器同時運作冷凝器與再沸器的功能，透過內部熱整合的技術，可以使蒸餾塔頂蒸汽加熱另一支蒸餾塔塔底的再沸器，透過設備利用自身的熱回收再利用，達到最佳的蒸汽經濟性，節省蒸汽也降低能源成本。Cheng 和 Luyben (Cheng, H.C. and Luyben, W., 1985)和 Emtir(Emtir, M., Rev, E., Fonyo, Z., 2001)等人的著作已經考慮了預分餾器的多效集成，證明了這種安排可以節省大量能源。此外，在國外已有許多實例被應用在海水淡化處理，多效蒸餾技術可以分離雙成分或三成分的液體，適用於相對揮發度小、所需理論板數多或蒸餾塔操作回流比高的系統，較能達到節能效益。

### 3.2 薄膜分離技術

除了蒸餾技術的精進可以以節能的條件將有機溶劑分離外，薄膜分離技術也是一種分離純化的程序之一。薄膜分離技術中，薄膜是透過一種半透性或選擇性可滲透的屏障，在適當的驅動力下，可以使某些分子或離子穿過它，同時阻止其他分子或離子通過，達到分離的效果。在膜分離的過程中，進料液體一部分會穿過膜材，稱為滲透液或濾液(Permeate)，而其他成分則被膜排斥或分離，保留在濃縮液或滲餘液(Retentate)中，如圖 3 所示(Wang, H. and Zhou, H., 2013)。而薄膜分離的驅動力包含壓力差、濃度差及溫度差等，例如：利用壓力差為驅動力的逆滲透(Reverse Osmosis, RO)、奈米過濾(Nanofiltration, NF)、超過濾(Ultra Filtration, UF)、微過濾



(Microfiltration, MF)；利用濃度差為驅動的透析(Dialysis)、氣體分離(Gas Separation)及滲透蒸發(Pervaporation, PV)；利用電位差為驅動的電透析(Electrodialysis, ED)；以及利用溫度差為驅動的薄膜蒸餾(Membrane Distillation, MD)(徐嘉婉, 2007)。

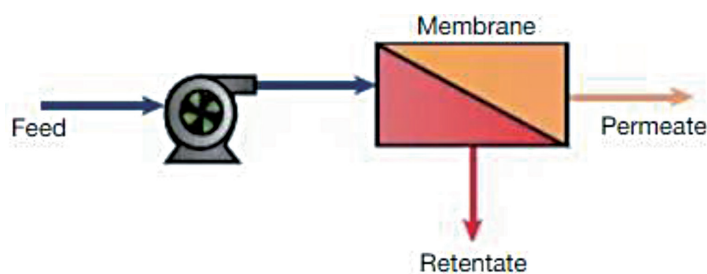


圖 3 薄膜分離過程圖 (Wang, H. and Zhou, H., 2013)

薄膜科技可以打破傳統的分離技術瓶頸，進行共沸物、沸點相近或熱敏感型混合物等分離，且具有節省能耗、設備所需空間小、操作與維護簡便、模組化設計與建構容易的特色，此外，亦有容易與傳統分離設備結合與擴充等優勢。其中滲透蒸發(Pervaporation, PV)分離程序中不需高溫，只利用薄膜兩側壓力差使液相進入薄膜內後汽化成氣體而完成脫水分離，滲透蒸氣隨後再被冷凝(Kirk, R. A., Putintseva, M., Volkov, A. and Budd, P. M., 2019)，為近年來極受矚目的分離技術之一。

### 3.2.1 滲透蒸發(Pervaporation, PV)

滲透蒸發分離程序最早在 1917 年由 Kober 提出(Kober, P. A., 1917)，1935 年 Farber 將該分離技術應用於分離與濃縮後(Farber, L., 1935)，自 1960 年代開始在有機水溶液與有機混合物分離方面有諸多應用。

PV 分離程序是遵循溶解-擴散模式，如圖 4 表示，進料液以吸附溶解與擴散的程序透過薄膜，達到分離的效果。進料液是經過第一步驟的吸附選擇性，使進料液於薄膜上游端與薄膜表面接觸而吸附，因進料液的組成化學活性與分子尺寸不同，使薄膜的親和性產生差異，造成進料液組成物有選擇性，由薄膜上游端進入薄膜內。接著，在薄膜內部，藉由進料液組成物的形狀與尺寸，以及其與膜材特定官能基親和性擴散至薄膜下游端。最後，當滲透物擴散到薄膜下游端時，藉由抽真空減壓或載氣吹掃的

方式，使薄膜下游端保持低壓進而使滲透物因處於低壓狀態下而汽化，並由薄膜下游端脫附蒸發離開薄膜。因此，PV 分離程序決定因素在於液體組成與膜間分子互相作用的關係。

PV 分離程序相較傳統的蒸餾、萃取等其他純化技術，具節省能源、設備簡單、不需高溫及添加第三成分化學品等優點，可有效分離同分異構物(Isomer)、共沸組成混合物(Azeotropic mixture)、熱敏感物質(Heat-sensitive mixture)與高沸點化學品。PV分離程序的主要應用特性包含(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(賴君義, 2018)( Wijmans, J. G., Baker R.W. and Athayde A.L., 1994)。只要選擇適當的膜材，就可以適用於不同條件的溶液，其中包括低濃度有機物質的水溶液，及高濃度有機物質水溶液等。

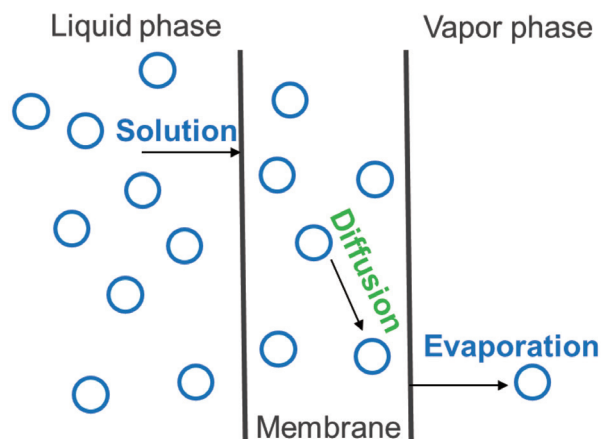


圖 4 薄膜溶解擴散模型 (賴君義, 2018)

3.2.2 蒸汽滲透技術(Vapour Permeation, VP)

蒸汽滲透(Vapor permeation, VP)與滲透蒸發(Pervaporation, PV)皆被視為「潔淨技術(Clean technologies)」(Jonquière, A., Clément, R., Lochon, P., Néel, J., Dresch, M., and Chrétien, B., 2002)，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(陳鎮、秦培勇、陳翠仙, 2003)。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：VP 中的蒸汽，與 PV 中的液體，如圖 5 及表 1 所示。透過化學組成差異或活性差異所產生的驅動力，可以使 VP 與 PV 能夠分離揮發性化合物的混合物，不須擔心化合物間分子大小或相似(Vane, L. M., 2013)。

VP 是分離混合蒸汽的一種有效技術之一，在蒸汽滲透的過程中，由於薄膜只會與蒸汽接觸，若使用有機薄膜因溶劑所引起的膨潤就會減弱，因此它保留了 PV 的一些優點，同時也克服了 PV 的一些缺點(王洪軍、張麗、趙莎莎、王丹, 2009)。VP 需注意進料時溫度越高越好，目的是防止蒸氣凝結；PV 則是需注意進料端所需的壓力高，且須防止進料物質蒸發，並迫使進料液體可以流過薄膜模組。

舉例來說，透過選用具乙醇選擇性的膜，可將乙醇從乙醇-水混合物中移除，並再將滲透液濃縮；或是透過選用對水具選擇性膜，可以從相同的乙醇-水混合物中除去水，並且將滲透液濃縮。不管是 VP 或是 PV 皆不受熱力學平衡的限制，因此可以分離複雜的混合物，如在共沸條件下也能將溶劑除水(Vane, L. M., 2019)。此外，相較傳統分離技術的蒸餾而言，透過選用具具有高選擇性的蒸發膜材，則只需要蒸發該化合物的熱量即可，從而可節省大量能源(Vane, L. M., 2013)。

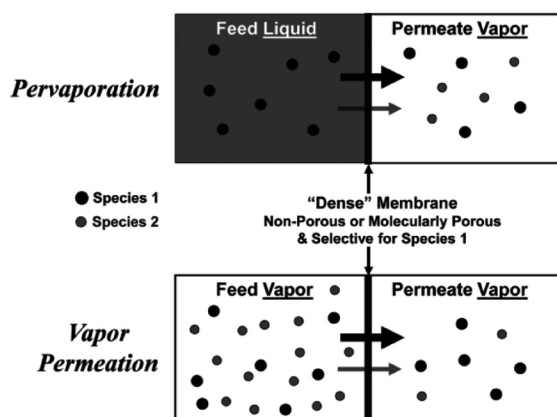


圖 5 滲透蒸發 (PV) 與蒸汽滲透 (VP) 比較圖  
(Vane, L. M., 2013)

表 1 滲透蒸發 (PV) 與蒸汽滲透 (VP) 比較表  
(Cannilla, C., Bonura, G. and Frusteri, F., 2017)

滲透蒸發(PV)	蒸汽滲透(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

一般而言，PV/VP 膜材可分為有機、無機及有機-無機混合/複合膜3大類。有機膜通常指高分子膜，高分子有機膜製備與加工容易，結構多元，應用層面也很廣，常見的有幾丁聚醣(Chitosan)、聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)、聚丙烯腈(Polyacrylonitrile)、聚酯(Polyester)、醋酸纖維素(Cellulose acetate)、聚砜(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，其特性包含耐高溫、耐酸鹼、化學性能與分離效果穩定，但其製造程序複雜、成本較高，但以長期發展來說，無機膜仍具有優勢。另外，因有機膜與無機膜各有優缺點，為兼顧兩者的優點，有機-無機混合/複合膜是很實用的考量，會將有機材料塗覆於無機支撐層上，或將無機材料塗覆於有機支撐層上。

3.2 PV/VP分離技術應用

本文主要探討 PV/VP 在產業上的應用，德國已將 PV 技術應用於乙醇及異丙

醇破共沸脫水提純。另德國亦有公司利用共沸蒸餾與滲透蒸發分離技術分別對乙醇進行為期一年的脫水研究，其中所使用的滲透蒸發膜材為 Polyvinyl alcohol、Polyacrylonitrile 及 Polyester 所製成的有機高分子膜，將乙醇濃度 94 wt% 提濃至 99.8 wt%，結果指出滲透蒸發的操作成本相對於共沸蒸餾節省了約 66%，而最主要原因是節省提供低壓蒸汽及無須添加第三物質的成本(Sander, U. and Soukup, P., 1988)(Lipnizki, F., Field, R.W. and Ten, P.K., 1999)。此外，也有將不同技術整合達到減少能源消耗的例子，Brüschke 與 Tusel 將滲透蒸發與蒸餾設備合併使用，從而使濃度 94% 乙醇提純至濃度 99.85%，比較其操作成本，將2種技術合併使用之操作成本較單一技術分別減少了 40% 與 28%(Tusel, G. and Brüschke, H., 1985)。Binning 與 James 第一個提出將蒸餾與 PV 技術整合，處理異丙醇，在蒸餾塔中處理異丙醇-乙醇-水混合物的三元混合物，透過使用親水性 PV 膜材進行脫水，產出含水量低於 0.5% 的產品。比較蒸餾-PV 整合的流程，與添加共沸劑的2支共沸蒸餾塔處理流程，蒸餾 -PV 整合的流程投資成本降低了 31%，包含膜材更換的操作成本降低了約 15%(Lipnizki, F., Field, R.W. and Ten, P.K., 1999)。瑞士有公司更致力發展使用無機膜材的特性，如耐熱、化學性以及高通量、高選擇性的優勢，將滲透蒸發技術之膜材採用無機膜，並且將傳統蒸餾與無機滲透蒸發膜技術整合應用(Jonquière, A., Clément, R., Lochon, P., Néel, J., Dresch, M., and Chrétien, B., 2002)。基於以上分析，可以發現許多國家在很早就透過多種技術整合的應用，探討在製程上是否能夠再使能源節約或降低成本，朝著循環經濟的方向前進。

除此之外，Tgarguifa, A. 等人更以乙醇純化技術比較共沸蒸餾、真空蒸餾、吸附法、滲透蒸發、蒸餾-滲透蒸發(Distillation-pervaporation)對環境影響、節能、操作維護和成本做比較，如表 2。與共沸蒸餾，真空蒸餾和吸附法相比，滲透蒸發和蒸餾-滲透蒸發在節能方面效果很好。與滲透蒸發相比，共沸蒸餾和吸附方法的操作成本相對昂貴。就操作成本、能耗、環境影響和維護而言，蒸餾-滲透蒸發是最有吸引力的。Tgarguifa, A. 等人更進一步比較傳統蒸餾(Industrial distillation process)與混合蒸餾-滲透蒸發(Hybrid distillation pervaporation process)的操作成本，如圖 6 所示，混合蒸餾-滲透蒸發的操作成本在再沸器、冷凝器和蒸汽皆分別降低約 59.2%、64.8%

和 82.4%，總操作成本降低了約 64.5%。(Tgarguifa, A., Abderafi, S., Bounahmidi, T.,2018)

表 2 乙醇純化技術各種分離方法比較  
(Tgarguifa, A., Abderafi, S., Bounahmidi, T.,2018)

	共沸蒸餾 Azotropic distillation	滲透蒸發 Pervaporation	吸附法 Adsorption	真空蒸餾 Vacuum distillation	蒸餾-滲透蒸發 Distillation- pervaporation
操作成本 (US\$/ton)	31.9 - 45.6	12.6 - 16.6	36.3	-	-
操作能耗 (MJ/kg)	15.49	4.61	6.4	11.72	5.02
環境 友善度	低	高	高	高	高
操作維護	困難	非常簡單	簡單	困難	簡單
乙醇濃度 (wt%)	94 - 99.9	94 - 99.9	94 - 99.7	98	99.8

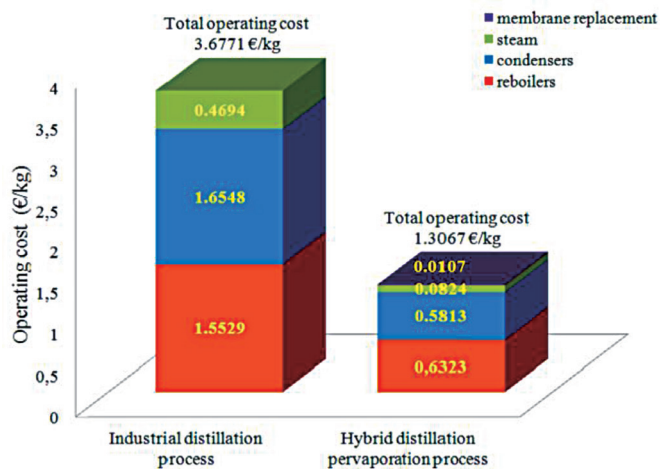


圖 6 傳統蒸餾與混合蒸餾 - 滲透蒸發操作成本  
(Tgarguifa, A., Abderafi, S., Bounahmidi, T.,2018)



除比較共沸蒸餾與 PV 分離技術的節省能源或降低成本外，更有學者專家探討針對原料特性，選擇適合的薄膜分離方式。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)。

綜上，本文標的為高科技產業廢溶劑—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。

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，或添加高沸點的萃取劑，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。

## 四、結論

石化產業應用廣泛，從塑膠原料、橡膠原料、石油化學品等，皆與生活息息相關。隨著我國石化產業高值化發展的推動，發展高性能材料/特化品應用在國內高科技產業已為主要發展方向。以我國近年來最重要且最具國際競爭力的出口產業為電子、電子零組件、電腦、電子產品及光學製品製造業，其中電子零組件製造業 GDP 的比例高達三成左右，其製程中會使用到化學藥劑(如光阻液、顯影液及蝕刻液)及溶劑(如

丙酮及異丙醇)等，為達到延長產品生命週期、減少廢棄物、回收再製造之循環經濟的目標，許多單位已著手優化蒸餾技術，透過製程改善使蒸餾單元可以達到節能效果，使廢溶劑得以透過高價質循環模式回到循環體系的技術。

選擇技術將視廢溶劑處理標的與產品目標為考量，廢溶劑回收透過具有效益且穩定技術，可使廢溶劑純化後回到市場，除解決事業單位廢棄物議題，又將可用資源回到市場，減少能資源損耗。此外，因各項技術處理視廢溶劑濃度與條件不同，可採取不同流程規劃，以本文舉例之廢異丙醇，由低濃度提純至 99.5%，則須考量每段製程能耗、產品品質與市場需求及價格等，如 99.5% 與 99.7% 於市場上皆屬同一價格，價格高低還需考量含水率多寡。

除了以廢溶劑特性、產品市場價格與需求選擇技術外，操作成本及操作能耗也是其中一重要條件。若以單一處理技術共沸蒸餾、滲透蒸發及吸附法比較，滲透蒸發的操作成本及操作能耗相較最低，主要是因為節省提供低壓蒸汽的操作能耗，且不須添加第三物質的成本。而透過技術整合，以異丙醇-乙醇-水混合物為例，蒸餾 -PV 整合的流程，與添加共沸劑的兩支共沸蒸餾塔處理流程，蒸餾 -PV 整合的流程投資成本降低了 31%，包含膜材更換的操作成本降低了約 15%。另外，以乙醇純化為例，混合蒸餾-滲透蒸發的處理流程較傳統蒸餾的操作可減少總操作成本降低了約 64.5%。綜上，除了市場需求、成本考量外，原料的特性皆需納入綜合考量。

藉由精進技術整合傳統蒸餾、精餾及 PV/VP 技術，透過重新設計分離純化製程，可導入綠色技術，降低製程上能源消耗，創造綠色技術價值，從而落實綠色科技，促成資源零廢棄、物質全循環，並且持續秉持「珍惜每一分資源(Every Resource Counts)」的作業模式與思考準則，以搖籃到搖籃的目標努力。

## 參考文獻

- 王洪軍、張麗、趙莎莎、王丹(2009)，「蒸汽渗透膜分离技术的研究现状及其应用前景」，科技資訊 36 期。
- 何宗仁(2018)，「多效蒸餾技術」，工研院材料及化工所，<https://www.youtube.com/watch?v=GjGiak5JlhY>。
- 徐嘉婉(2007)，「薄膜分離技術應用於水處理之案例探討」，逢甲大學。
- 孫彬訓(2018)，「企業朝向循環經濟—最後一哩路」，<https://csrone.com/news/5249>。
- 陳鎮、秦培勇、陳翠仙(2003)，「透汽化和蒸汽渗透技术的研究、应用现状及发展」，膜科學與技術 04 期。
- 黃育徵(2017)，「循環經濟」。
- 循環台灣基金會，「循環經濟企業轉型路徑圖」，<https://www.circular-taiwan.org/ceroadmap>。
- 鄭仲凱(2017)，「BS 8001 循環經濟標準助企業轉型創商機」。
- 賴君義(2018)，「薄膜科技概論」，五南圖書出版公司。
- Blume I., Wijmans, J.G. and Baker, R.W. (1990), The separation of dissolved organics from water by pervaporation, *Journal of Membrane Science*, 49(3): p. 253-286.
- Cannilla, C., Bonura, G. and Frusteri, F. (2017), Potential of Pervaporation and Vapor Separation with Water Selective Membranes for an Optimized Production of Biofuels-A Review, 187(7).
- Robinson, C.S. and Gilliland, E.R. (1950), *Elements of Fractional Distillation* (4th. Ed.), McGraw-Hill Book Co., p. 168-191.
- Ellen MacArthur Foundation (2017)，什麼是循環經濟 <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/cn/%E5%BE%AA%E7%8E%AF%E7%BB%8F%E6%>

B5%8E/%E5%8F%91%E5%B1%95%E5%8E%86%E5%8F%B2%E5%8F%8A%E6%80%9D%E6%83%B3%E6%B5%81%E6%B4%BE。

EOLSS Publications (2010), MEMBRANE PROCESSES-Volume II-Pervaporation, International Editorial Board.

Farber, L. (1935), Application of pervaporation, Science, 82(2120): p. 158.

Lipnizki, F., Field, R.W. and Ten, P.K. (1999), Pervaporation-based hybrid process: a review of process design, applications and economics, Journal of Membrane Science, 153: p. 183-210.

Tusel, G. and Brüscke, H. (1985), Use of pervaporation systems in the chemical industry, Desalination, 53(1-3): p327-338 (contribution of GFT).

Cheng, H.C. and Luyben, W. (1985), Heat-integrated distillation columns for ternary separations, Industry & Engineering Chemistry Process Design and Development, 24(3): p. 707-713.

Wang, H. and Zhou, H. (2013), Understand the Basics of Membrane Filtration, Chemical Engineering Progress, 109(4): p. 33-40.

Wijmans, J. G., Baker R.W. and Athayde A.L. (1994), Pervaporation: Removal of Organics from Water and Organic/Organic Separations, Membrane Technology and Research, 272: p. 283-316.

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).

Tgarguifa, A., Abderafi, S., Bounahmidi, T. (2018), Energy efficiency improvement of a bioethanol distillery, by replacing a rectifying column with a pervaporation unit, Renewable Energy, 122: p. 239-250.

Jonquière, A., Clément, R., Lochon, P., Néel, J., Dresch, M., and Chrétien, B. (2002),

- Industrial state-of-the-art of pervaporation and vapour permeation in the western countries, *Journal of Membrane Science*, 206(1-2): p. 87-117.
- Kober, P. A. (1917), Pervaporation, perstillation and percrystallization, *Journal of the American Chemical Society*, 39: p. 944-948.
- Vane, L. M. (2013), Pervaporation and Vapor Permeation Tutorial: Membrane Processes for the Selective Separation of Liquid and Vapor Mixtures, *Separation Science and Technology*, 48(3): p. 429-437.
- Vane, L. M. (2019), Review of Pervaporation and Vapor Permeation Process Factors Affecting the Removal of Water from Industrial Solvents, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(3).
- Emtir, M., Rev, E., Fonyo, Z. (2001), Rigorous simulation of energy integrated and thermally coupled distillation schemes for ternary mixture, *Applied Thermal Engineering*, 21(13-14): p. 1299-1317.
- Nishihama, S. and Yoshizuka, K. (2009), Ion exchange adsorption of molybdenum with zeolitic adsorbent, *Environmental engineering and management journal*, 19(6): p. 365-369.
- OECD (2018), Raw materials use to double by 2060 with severe environmental consequences, <https://www.oecd.org/newsroom/raw-materials-use-to-double-by-2060-with-severe-environmental-consequences.htm> .
- Kirk, R. A., Putintseva, M., Volkov, A. and Budd, P. M. (2019), The potential of polymers of intrinsic microporosity (PIMs) and PIM/graphene composites for pervaporation membranes, *BMC Chemical Engineering*, 18.
- Sander, U. and Soukup, P. (1988), Design and operation of a pervaporation plant for ethanol dehydration, *Journal of Membrane Science*, 36: p. 463-475 (contribution of the company LURGI).

