

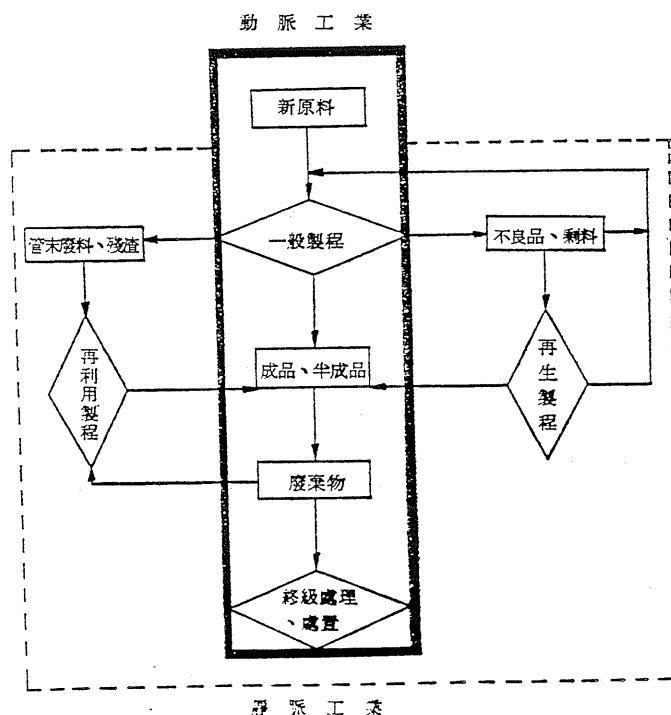
事業廢棄物回收、再利用 ——技術及可行性概論

劉世芳*

緣 起

由新鮮原料 (virgin material) 產製各種不同成品、半成品的工業，可稱為是動脈工業。動脈工業是工業革命後迄今的世界主流。然而，隨著工業的發達，地球上有限的資源已大量的呈現出短缺的警訊；經過工業製程而製售的產品在使用、利用過之後變成廢棄物，也造成嚴重的環境污染，威脅到人類的生活品質與生存空間。

從資源的再生化與廢棄物有效再利用的觀點來看，發展所謂的靜脈工業，也就是廢棄物回收、再利用工業（如圖一所示），既可有效回收可利用之資源，又可以減免環境污染的程度，更可進而發展成為全民經濟體系之一環。



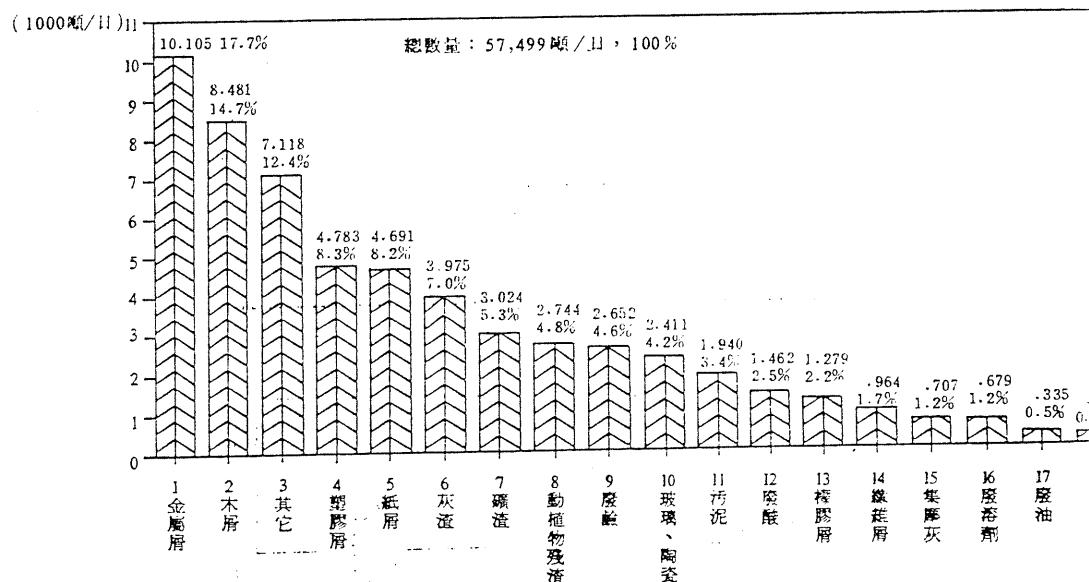
圖一 廢棄物回收、再利用流程

* 工研院化工所污染防治技術組副工程師

本報告概括性地介紹各種回收、再利用的技術處理單元及其可以處理的廢棄物種類，供業界先進參酌指正外，同時可推廣應用，以饗國人。

各種專業廢棄物概況

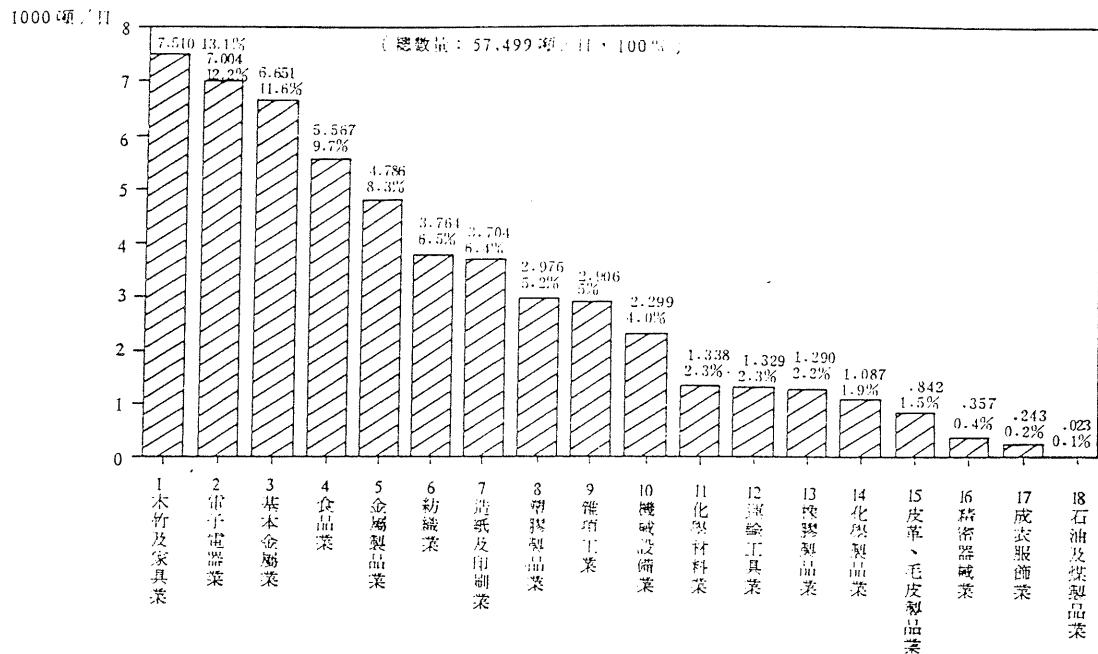
行政院環保署在民國七十四年的一項臺灣地區工廠資料列出各行業廢棄物數量，其總量為每日五萬七千五百噸 (57,499噸/日)；其中數量較大者依序為金屬屑 (10,150噸/日 17.7%)、木屑 (8,481噸/日，14.7%)、塑膠屑 (4,783噸/日，8.3%)、紙屑 (4,691噸/日，8.2%)，其詳列數量及百分比請見圖二。以行業類別來看，則木竹及家具業 (7,510噸/日，13.1%)、電子電器業 (7,004噸/日，12.2%)、基本金屬業 (6,651噸/日，11.6%)、食品業 (5,567噸/日，9.7%)、金屬製品業 (4,786噸/日，8.3%) 五類的數量為最多，列數量請見圖三。



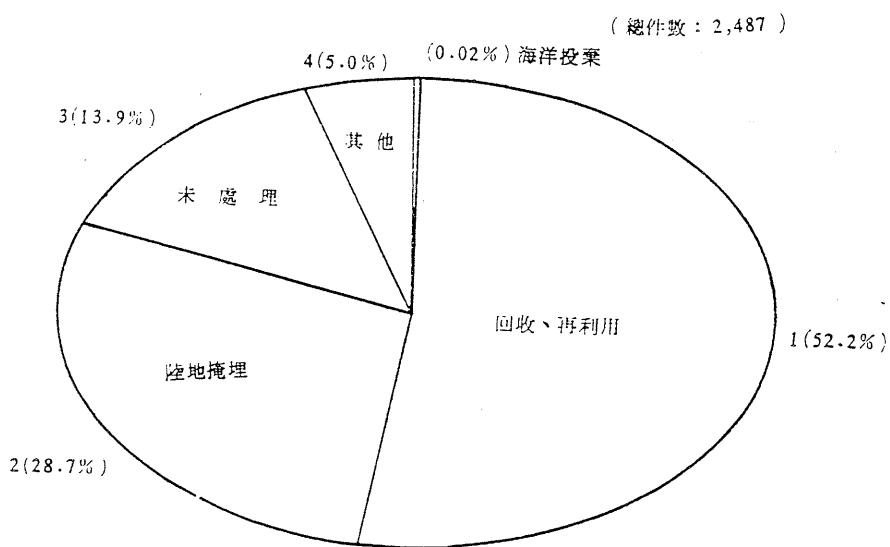
圖二 臺灣地區事業廢棄物之類別數量及其百分比

對於事業廢棄物的最終處理方法，環保署的資料顯示出有回收、再利用的處理方法占 52.2%（請見圖四），但因無詳列何種廢棄物及其處理數量與何種回收、再利用技術，無從判斷出對減低環境污染程度的影響或經過回收、再利用處理後的經濟效益。

再從廢棄物的有害程度來看，臺灣地區產生的有害廢棄物數量為 65,000 噸/月左右，見圖五）。比較廢棄物及有害廢棄物數量，大約每二十五公噸廢棄物就有 1 公噸有害廢棄物；若沒有適當的處理，污染環境的問題將日趨嚴重，而且足以造成國民健康與生態的長久公害。臺灣地區在有害廢棄物調查統計的資料上，列出有機化合物 (69.78%)、金屬及其

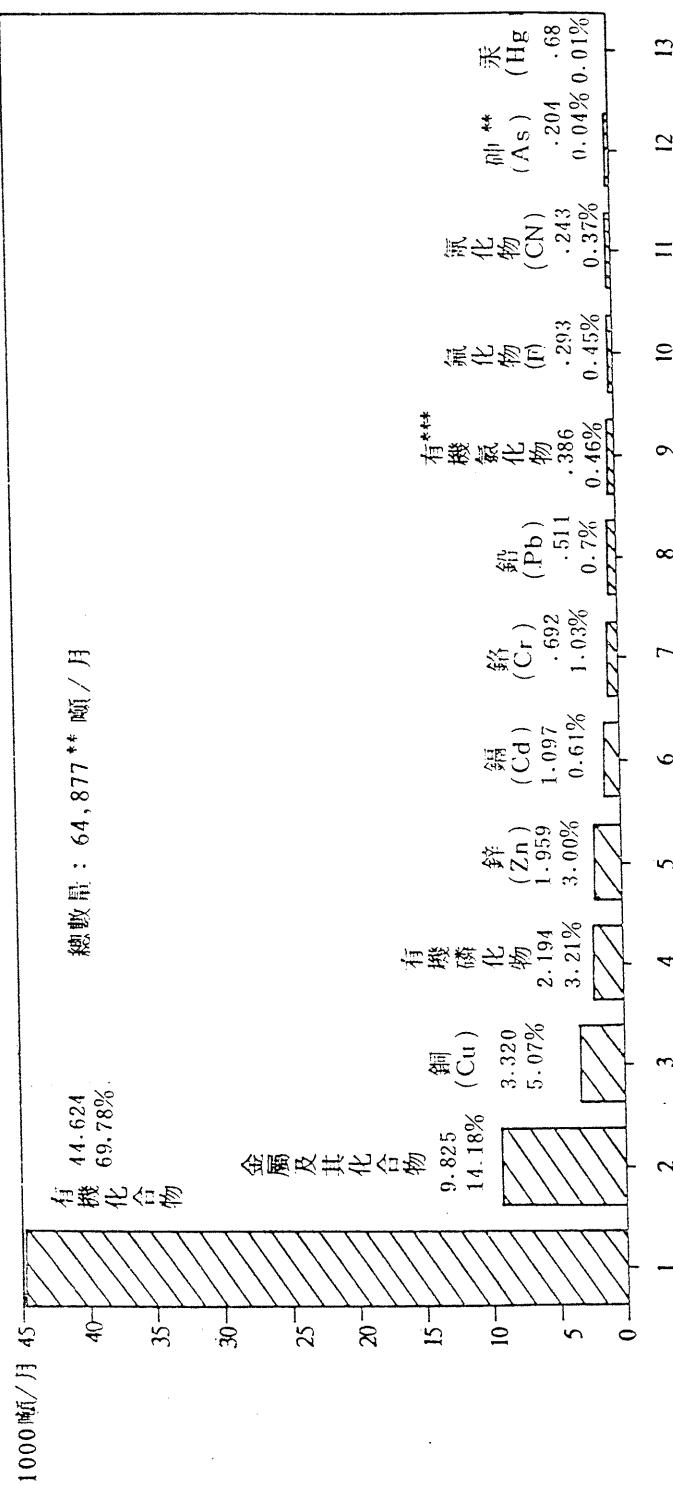


圖三 臺灣地區產生事業廢棄物之行業別及其廢棄物數量百分比



圖四 臺灣地區事業廢棄物最終處理方法百分比

合物 (14.18%)、銅 (5.07%)、有機磷化物 (3.21%) 等十四項有害廢棄物種類及數量；在一項美國地區調查產生有害事業廢棄物的產業中，產量最多的依序為化學業 (chemicals, 37.6%)、基本金屬業 (primary metals, 29.1%)、金屬製品業 (fabricated metals, 7.7



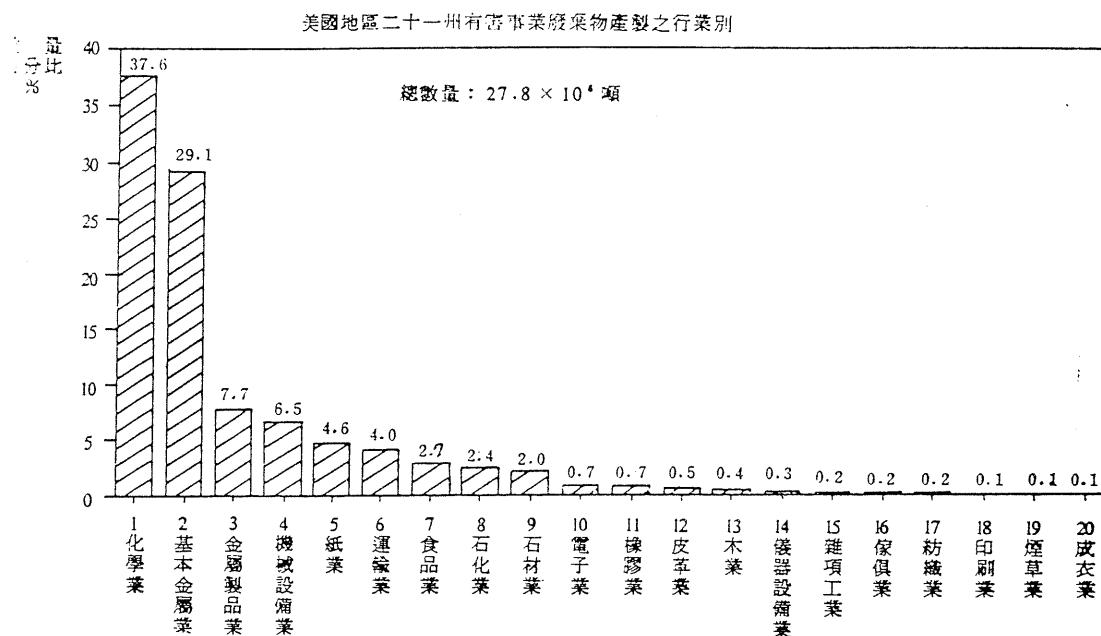
* 原表將多氯聯苯 (PCBs) 共 0.0002 噸 / 月列入，本圖不計入。

** 砷的數量與其百分比有出入，本圖取百分比折算其數量。

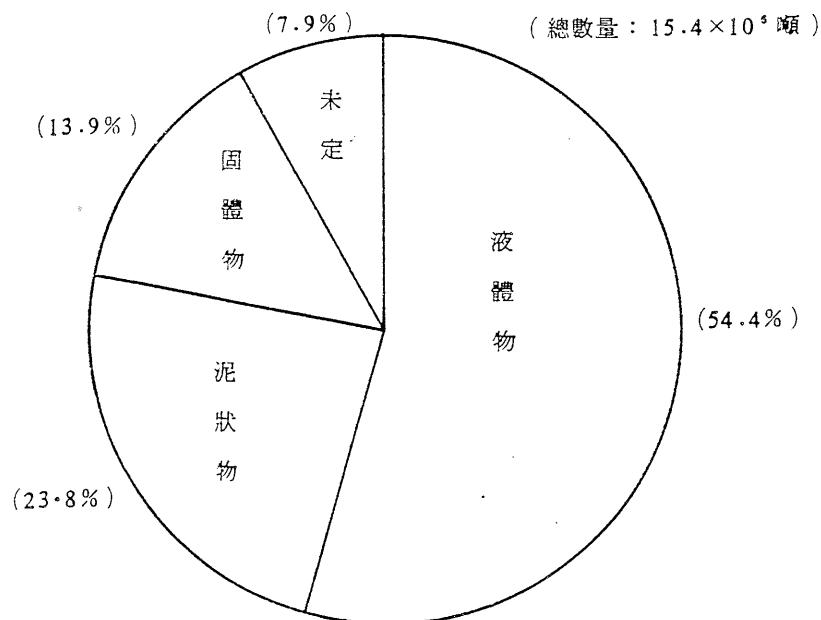
*** 有機氯化物不含高分子聚合物。

圖五 臺灣地區有害事業廢棄物數量*及其百分比

%)、機械設備業 (machinery, 6.5%) 及紙業 (paper, 4.6%) 等五項居首位；以其狀態來分，則液態居多 (54.4%)，(請見圖六、圖七)。



圖六 美國地區二十一州有害事業廢棄物產製之行業別



圖七 美國地區三十州列為一級有害廢棄物的狀態百分比

設若美國地區的統計資料可以相容參考，則臺灣地區產生有害廢棄物之產業應包括有基本金屬業、金屬製品業、電子電器業等大宗項目如重金屬、強酸、強鹼及有機溶劑等具危害性廢棄物。然而廢棄物的危害性質並不能只考慮其本身所具有的毒性、腐蝕性、可燃性及爆炸性等危險特性；更應考慮其本身在利用價值結束時，是否具有再生或毀滅性質，以免造成廢棄物的污染公害問題。顯而易見的例子如廢寶特瓶或廢塑膠袋，雖然沒有人因碰觸或處理這些廢棄塑膠類而蒙受意外，但廢棄寶特瓶阻塞下水道或排水管道卻造成風災來臨後（如民國七十二年韋恩颱風），低窪市區的淹水與積水，所遭受的財物損失不計其數。

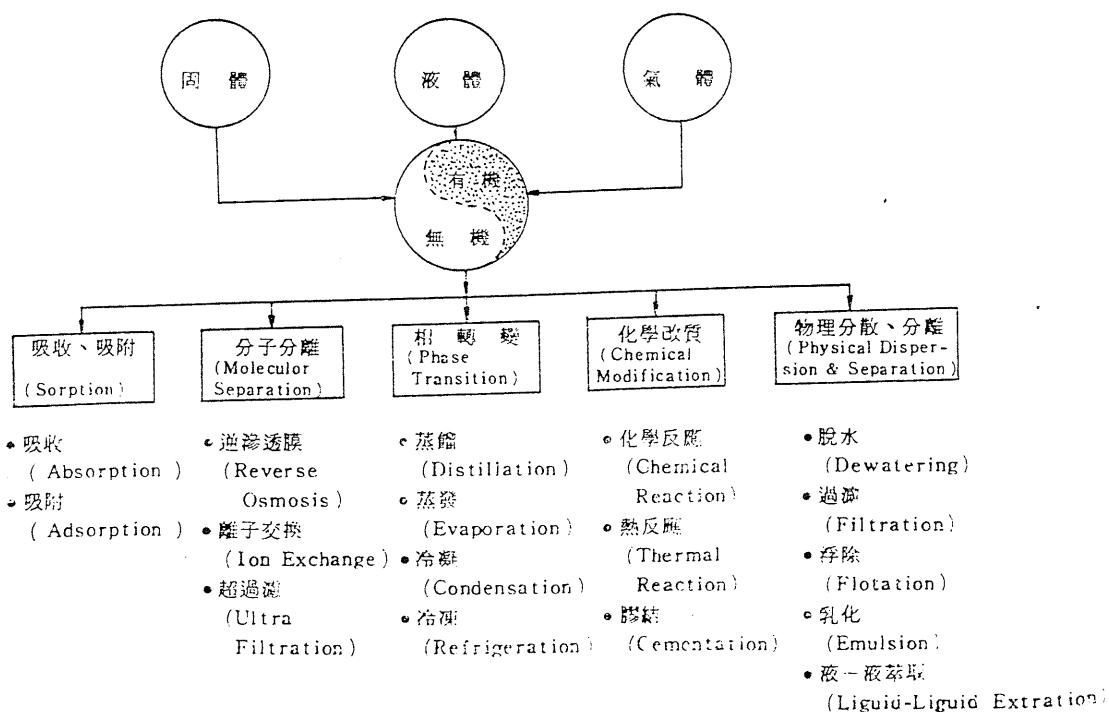
因此，處理廢棄物已是當務之急。若處理廢棄物的手段可再加入經濟效益的誘因，則在減少環境污染的政策上，會有莫大的助益。也就是說，開發或研究改善回收、再利用的工業是一個相當有用的途徑。

從歐、美、日等廢棄物交換中心所統計的結果，有四類廢棄物的成交量最高，最有利用價值，那就是(1)含有高濃度金屬的廢棄物(2)溶劑類(3)濃酸、鹼類(4)可做燃料之易燃物。

事業廢棄物處理單元程序

處理事業廢棄物的技術可粗分為五種不同的物理、化學程序（請見表一）；依其各別的處理程序與常應用的實例又細分為三十五類（請見表二）。

表一、廢棄物性質及其處理單元程序



表二、事業廢棄物的回收處理技術及實例

方 法	技 術	可 應 用 實 例
物理方法	吸收、吸附 結晶 蒸餾 蒸發 過濾 浮除 泡沫分別 (Foam Fractionation) 相分離 逆滲透膜 溶劑萃取 提 取 (Stripping) 離心 粉碎 (Comminution) 乾燥 顆粒化 磁化處理 篩選 (Screening)	除去揮發性有機物 回收無機鹽 回收溶劑 回收硫酸 下水道污泥 乳酪類廢棄物 分離金屬 廢油類 脫鹽 回收金屬 去氯 分離動物油類 廢車，冶礦廢棄物 濾餅 礦屑、熔渣 從礦屑中除鐵 熔塊，鐵渣，煤渣
化 學 方 法	吸收、吸附 膠結 氯化 反乳化 (Demulsification) 電解 水解 焚化 離子交換 中和 氯化 沈澱 選原 鈣化 燒煮 (Cooking) 泡沫浮除 燒結 (Sintering)	回收溶劑 回收銅 氰化物之氧化 可溶性油類回收 回收金屬 纖維類廢棄物 廢油類 回收金屬 廢酸 除酚 金屬類 六價鉻 石膏 不能食用的食物殘渣 回收煤，玻璃 煤礦廢土

以下介紹數種常用的單元處理技術及應用範圍：

(一) 吸收、吸附

吸收及吸附這兩種單元程序在去除廢氣及廢液中的有機物及無機物方面，已有相當的發

展。

吸收應用於氣體回收作業時適用在溶解度大、無揮發性、無腐蝕性、黏度低的物質；吸收度的大小決定於氣體與吸收體（劑）之間的有效接觸面積。酚類化合物、碳氫化合物、硫化氫 (H_2S)、二氧化硫 (SO_2) 等皆可利用吸收程序再加上脫附 (Desorption) 程序而回收可再利用的氣體。空氣污染的臭味、汞、 SO_2 、NO 等亦可用吸收方式去除，（與洗滌 Scrubbing 類似）。

吸附物質基本上有活性碳 (Activated Carbon)、矽膠 (Silica Gel)、活性鋁 (Activated Alumina)、合成沸石 (Synthesis Zeolites)；以活性碳為目前最有效的物質。

活性碳吸附在工業上應用已有90年的歷史，適用的物質屬高分子量、低溶解度（對水）及低極性的有機污染物；對於長鏈或巨大分子的物質則因活性碳吸附孔徑結構的關係，效果不佳。氣相有機物的吸附及脫色、除臭皆可應用。目前應用的範圍有紡織業、製藥業、染整、樹脂及清潔劑等工業，除去的污染物包括有染料、酚、二甲苯、甲苯、TNT、甲酚、氯酚、氯苯及殺蟲劑等。

在無機物的吸附方面，基本溶液中之鹼金屬、氨、砷化物、過氯化鈣、氯、鉻、鈷、銅、氟化物、鉻化物、三價鐵鹽類、氯化金、硫化氫、次氯酸、碘、鉛、氯化汞、鉬鹽、過氯酸鉀、次氯酸鈉、鋅等皆可應用。

表三、三種吸附物質之特性*

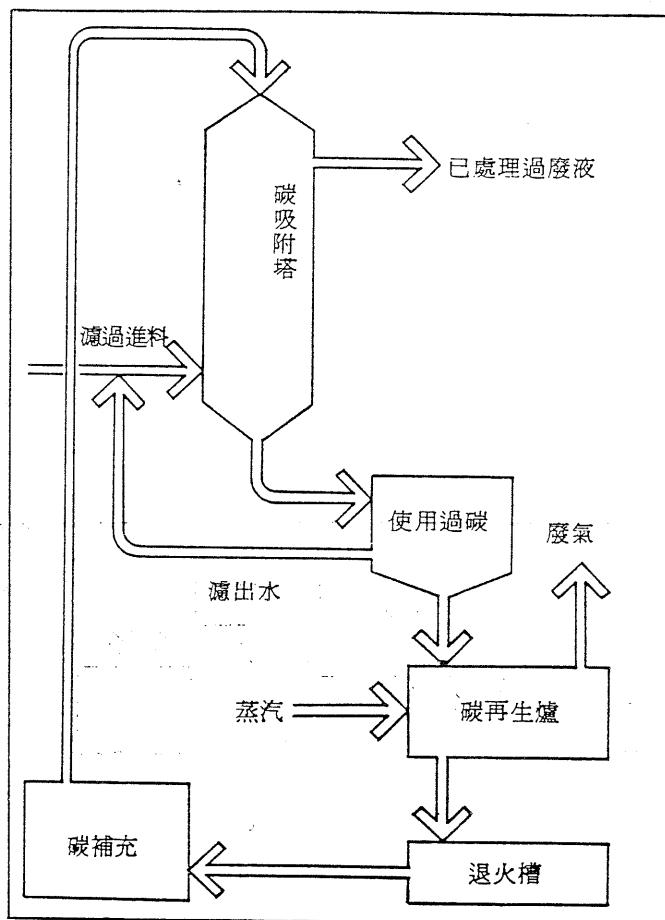
吸 附 物 質	吸 附面 積 (m^2/g)	孔 體 積 (cm^3/g)	平 均 孔 徑 ($10^{-10}m$)
活 性 碳	500~1500	0.6~0.8	20~40
矽 膠	200~600	0.4	30~200
活 性 鋁	175	0.39	90

表四、活性碳對有機溶劑之吸附及脫附能力*

物 質 名 稱	吸 附能 力 (wt%, 25°C, 100kpa)	脫附後殘餘量 (wt%)
四 氯 化 碳	80~100	27~30
汽 油	10~20	2~3
苯	45~55	5.9
甲 醇	50	1.2
乙 醇	50	1.05
異 丙 醇	50	1.15
乙 酸 乙 酯	57.5	4.87
丙 酮	51	3.0
醋 酸	70	2.5

* 選錄自臺灣省工檢會編印「有機溶劑作業環境控制及回收效益之探討」

活性碳在飽和吸附後，可以再生使用；主要有兩種方式：(1)用化學方法脫附，(2)直接在900°C高溫下熱解。有關各種吸附劑的吸附能力、活性碳對有機溶劑之吸附及脫附特性、活性碳吸附及其熱解再生系統圖請分別參見表三、表四及圖八。



圖八、活性碳吸附單元示意圖

□蒸餾、分餾、蒸發

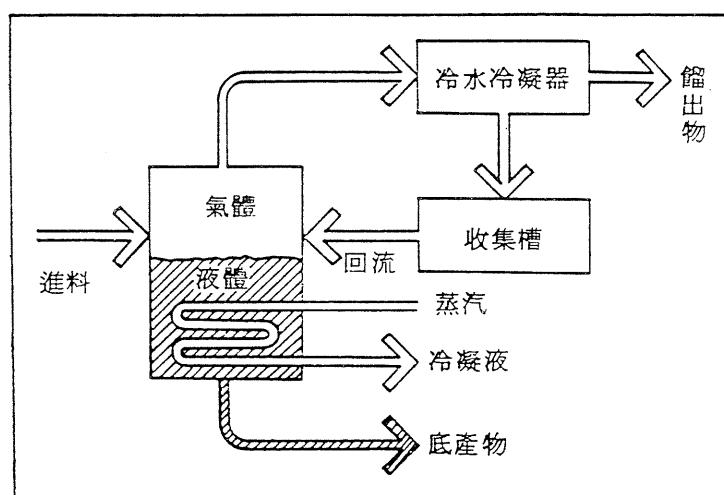
蒸餾的技術可應用在水——有機混合液或有機——有機混合溶液的分離。塗佈業、印刷業、電子業、塑膠業的廢溶劑回收作業，酚、甲基乙基氯、乙基苯及廢油精煉等皆利用蒸餾的程序達到分離的目的。

若要需求純度較高的蒸餾物質或者是廢料的成份較複雜，則可以利用部分蒸餾，即分餾(Fractional Distillation)處理。例如墨水或印刷配方劑、或者是醫院、科學實驗室等要求高純度處理作業者皆可以應用之。

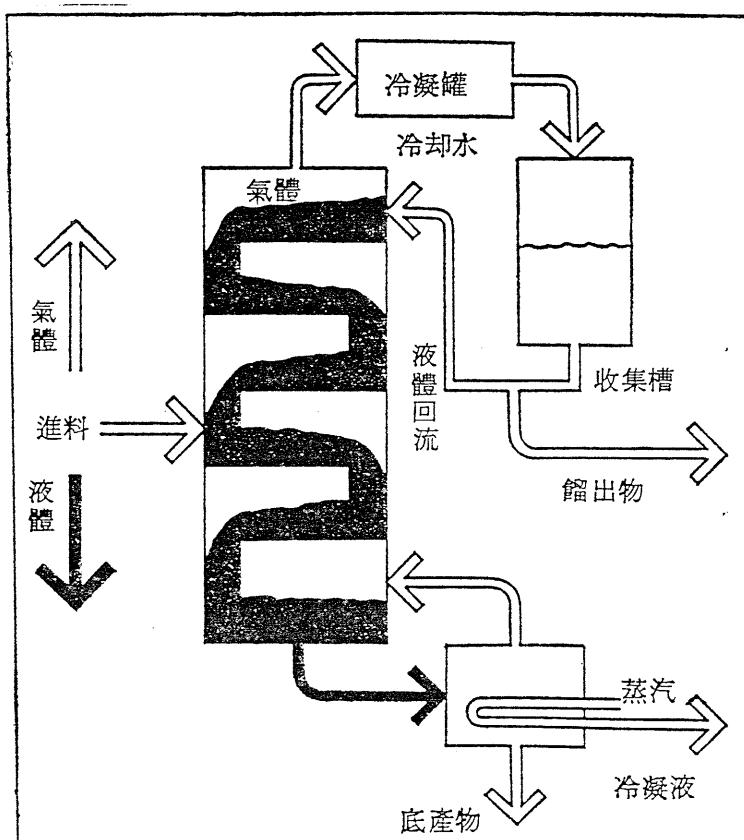
蒸發的程序通常是應用在分離無機溶液或泥漿(slurry)中的水或濃厚污泥中的有機溶劑，是一種分離非揮發性物質的單元處理程序。

適用蒸發程序以分離或回收有用物質的種類包括有重金屬、輻射性物質、氟化物、氯化物、碳氫化合物及鹵化物、胺、氨基化合物、爆炸性物品、染料等。

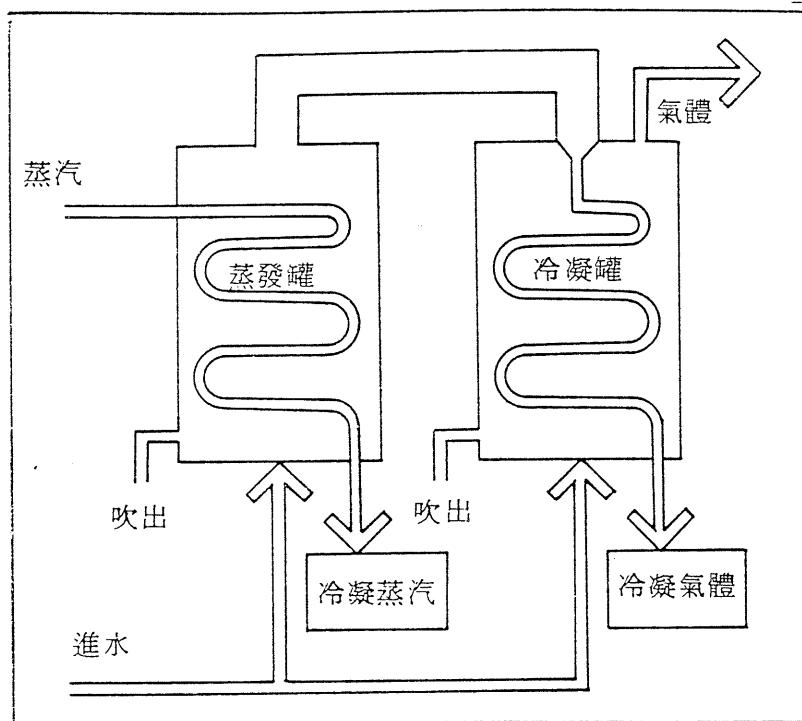
蒸餾、分餾、蒸發的單元程序處理流程圖請見圖九、圖十及圖十一。



圖九、蒸餾單元示意圖



圖十、分餾單元示意圖



圖十一、蒸發單元示意圖

(三)電析、電解

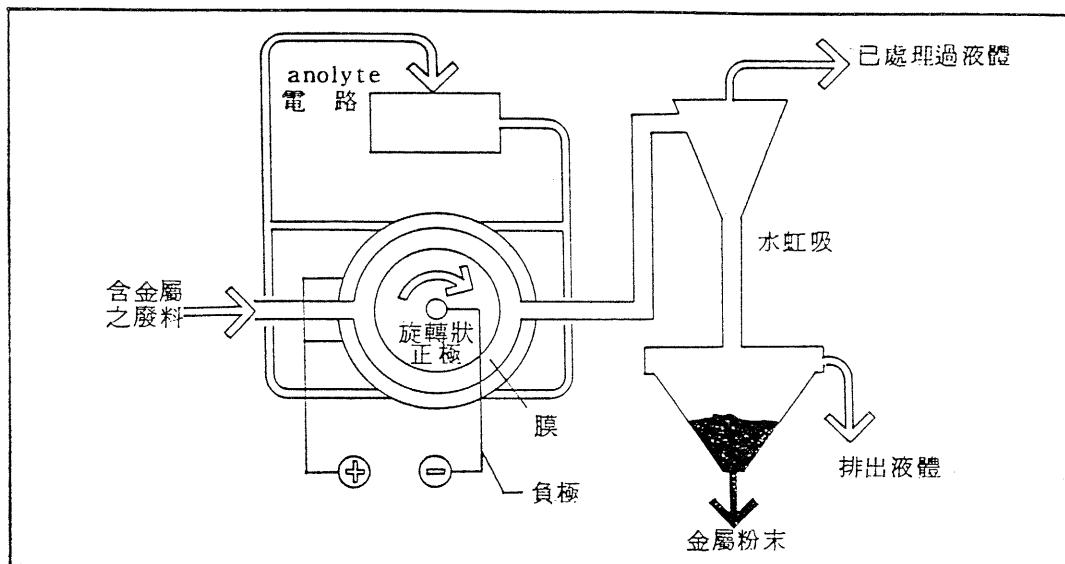
電析 (Electrodialysis) 程序的商業化已有20年以上的歷史，早期是應用在海水的淡化處理、糖業的去灰 (De-ashing) 、照相顯影液的洗滌、乳清的去除金屬及食品中去鹽等方面。在回收作業方面，電析可以應用在電鉻板洗滌、磷液回收、氟化氫、氟化氨的回收等。

電析可將 1,000~5,000 ppm 含量的無機鹽分離至只有 100~500 ppm 的含量；甚至可分離 10,000 ppm 左右的鹽類。電析是利用電流以分離陰、陽離子的單元程序，除了正、負兩極外，尚有陰、陽離子膜交互並排成為一組處理單元。

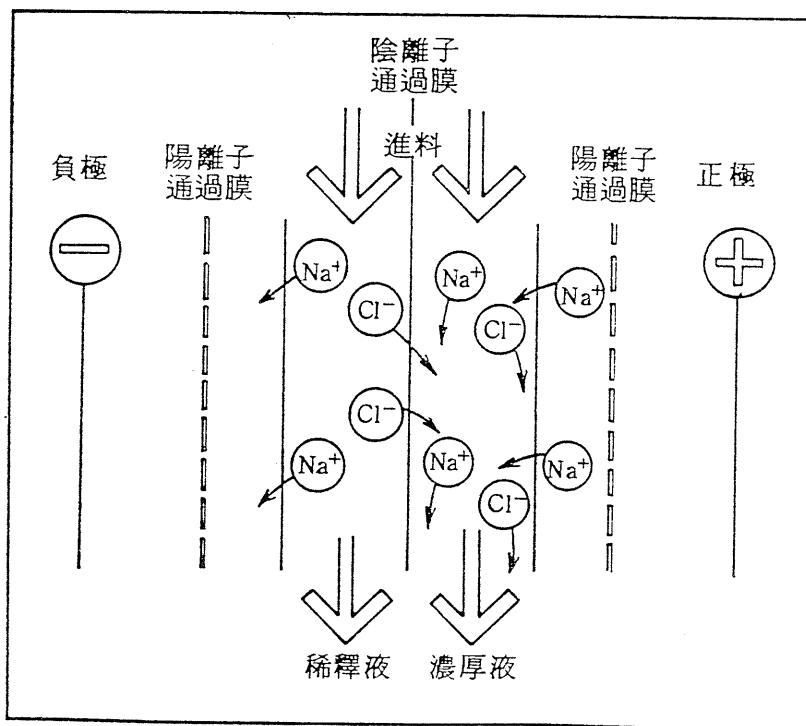
電解在回收作業中主要應用於重金屬的回收。例如相片沖洗業的銀回收、銅礦業的銅回收等；電解亦可以應用於油水分離的程序，此種程序通常稱為電泳 (Electroflootation)。電解回收金屬的程序圖請見圖十二，電析單元簡圖請見圖十三。

氫水 解

水解是一種化學反應，使水與其他物質生成兩種或多種的新物質。水解技術可應用在有機化學工廠的回收作業。例如在石油化工廠中，水解酸性污泥會產生些硫酸和底渣狀的酸性油層，再將硫酸濃縮及再利用，可提供石油精煉程序一半以上的酸。



圖十二 電解單元示意圖



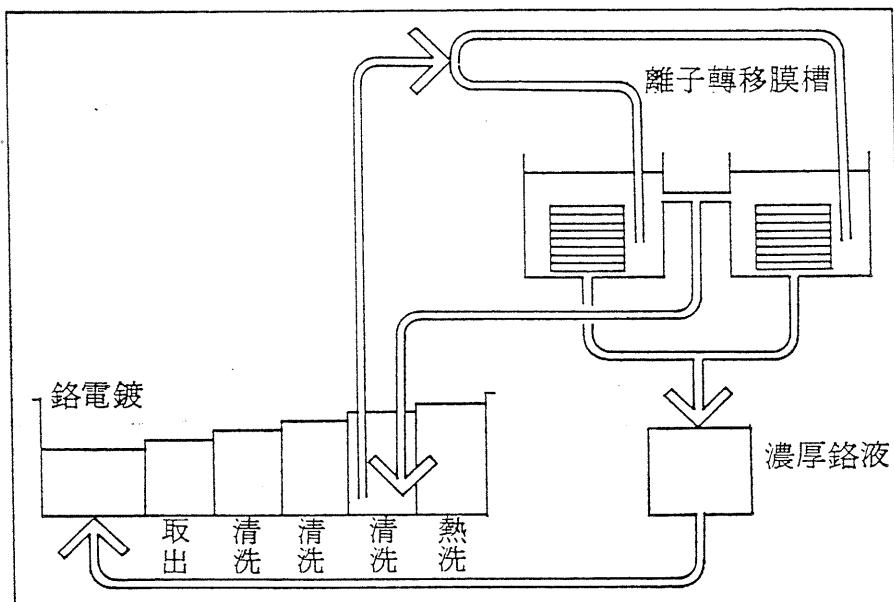
圖十三 電析單元示意圖

其他的應用尚包括有乳酪、食品工業、羊毛洗滌作業、抗生素產製等方面。

(五)離子交換

離子交換技術在十九世紀時就已經應用在水質軟化及糖的結晶程序。在回收的應用範圍亦相當廣泛，舉凡各種金屬類元素在可溶性狀態或鹵化物、硫化物、氯化物、氰化物等陰離子，碳酸、硫酸類以及酚、胺基硫酸鹽類等。

離子交換樹脂係人工合成樹脂，通常含有磷酸基、羧基、酚或置換氨基等功能基，使離子在樹脂與溶液間互相交換，以達到分離的效果。其應用例有電鍍或相片沖洗液的雜質去除或重金屬回收，酒之除鐵，酸液回收鈾，菸草乾燥氣體回收於鹼等，電鍍液中的濃厚鉻液回收圖如圖十四所示。

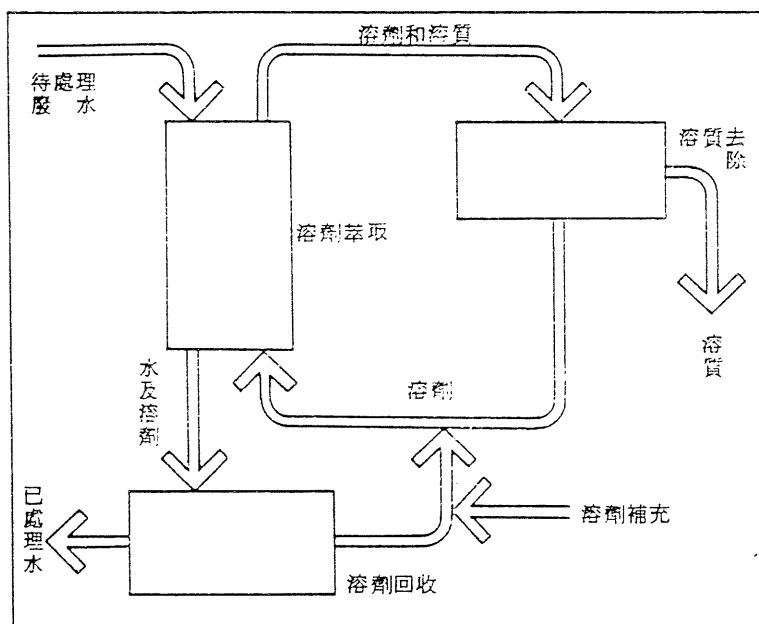


圖十四 電鍍鉻流程離子交換單元示意圖

(六)萃取

萃取（通常為溶劑萃取或液—液萃取）常用來分離水溶液或有機溶液中的有機物質。工業上的應用係從原油中萃取潤滑油，從汽油中萃取硫化物，製藥或精細化學品製造等方面。

在污染控制程序方面，萃取常與蒸餾或提取（Stripping）的單元程序合用，以獲取較高純度的回收物質。例如酚類產品的回收，可將酚的濃度萃取到小於 5 % 或者是數個 ppm 左右。圖十五的簡圖表示在廢液中加入溶劑以萃取殘餘溶劑，再加上蒸餾、提取或吸附等單元程序以分離溶劑與溶質。

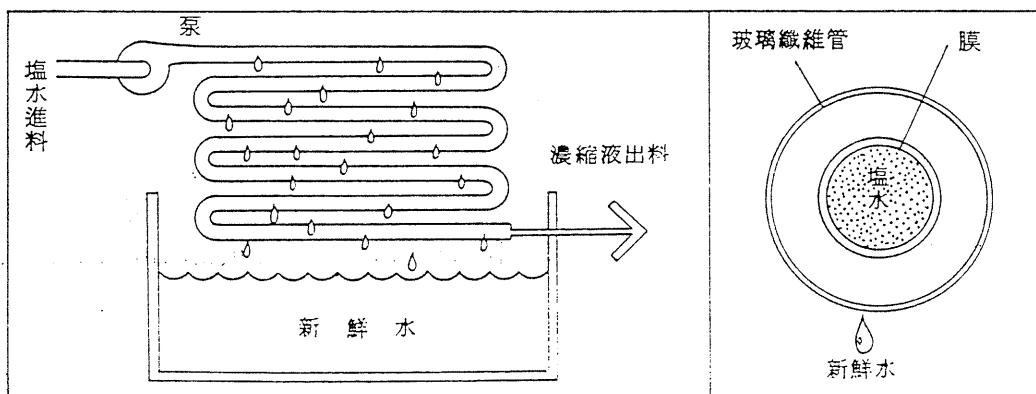


圖十五 溶劑萃取單元示意圖

(七)逆滲透膜

逆滲透膜應用於廢液中離子化與非離子化成份物質的分離。一般含有 500~20,000 ppm 範圍的廢液或是含有 10% 以上溶解性物質的廢液皆可用逆滲透膜法來處理。但是純有機物、強酸、強鹼等無法利用逆滲透膜處理。

純水製造、半導體及電鍍業的洗滌液回收、食品工業中的糖回収等皆適用逆滲透膜。圖十六係管狀逆滲透膜分離鹽份及新鮮水的簡圖。



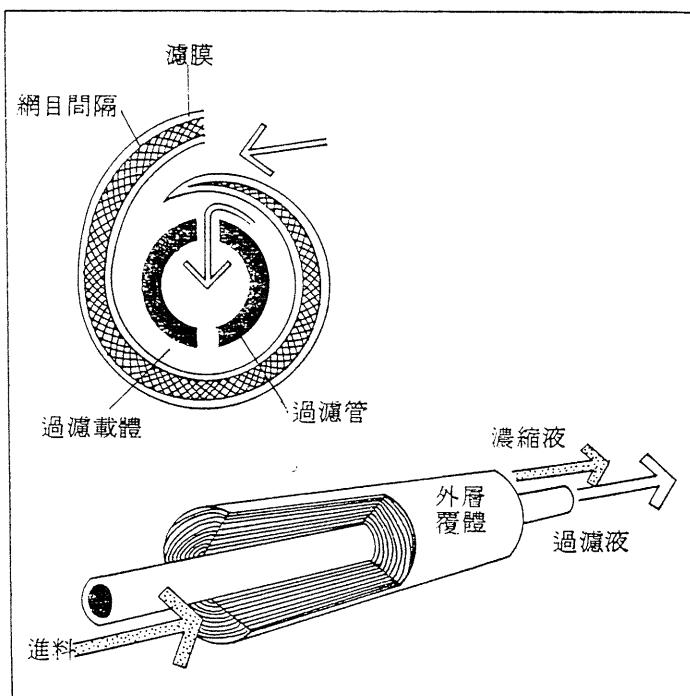
圖十六 逆滲透膜單元示意圖

(八) 超過濾

超過濾亦屬於膜分離技術之一種；超過濾與逆滲透膜不同之處是，逆滲透膜是強迫水分子通過半滲透膜，而非溶質；而超過濾卻是取決於分子的大小，使小的分子通過，大的分子被擋住以分離不同物質。

傳統過濾方式無法分離回收液或廢液的均質溶液或懸浮液，可使用超過濾技術處理。例如紡織業廢液回收 PVA (Polyvinyl Alcohol) 或電積塗佈中的塗液回收，靛藍染浴中的靛藍液回收，乳酪漿液中的蛋白質回收，滾筒機件作業的油類濃縮回收，紙漿廢液回收，工業清潔劑處理，醬油漿液中的蛋白質回收，製藥業及發酵業中的產品回收，柳橙汁漿液中的糖分回收等。

超過濾的壓力操作條件比逆滲透膜低，典型的流速在 20~200 加侖／天／平方呎（約 56.8~568 公升／天／平方公尺）。圖十七為螺旋狀超過濾模組之簡圖。



圖十七 超過濾單元示意圖

單元處理程序技術的限制

各種回收的單元處理程序仍然有其研究開發的技術限制，其大要概括如：

(1) 吸收／吸附、技術方面的限制

- a. 吸收：液體中的氣體溶解度有限。
- b. 吸附：

1. 僅瞭解基本的吸附機制 (mechanism)。
2. 需要加入再生的程序。
3. 缺乏有效的預測模式 (Predictive models)。

(2) 分子分離技術方面的限制

離子交換、逆滲透膜、超過濾的處理效果易受限制；處理程序失敗後的各種因果關係需要詳加探討。

(3) 相轉變技術方面的限制

- a. 蒸餾：欲蒸餾出的氣體或液體會產生不受歡迎的氣泡效應 (Entrainment Effect)。
- b. 蒸發：會使容器器壁形成結晶、鹽化或積垢，同時會有腐蝕、氣泡等現象。
- c. 冷凝：冷凝性低的氣體移除效率低；熱交換器表面會產生顆粒污物。

(4) 化學改質技術方面的限制

- a. 觸媒氫化：
 1. 化學反應速率受限。
 2. 氢轉移速率受限。
- b. 膠結：
 1. 增加流速與接觸時間並不能提高處理效率。
 2. 消耗過量的鐵污泥需做終極處置。
 3. 欲移除低濃度廢液有熱力學方面的限制。
- c. 沉澱：
 1. 會產生複化合物。
 2. 同一個 pH 值會移除多種金屬，不易分開。
- d. 級解 (Pyrolysis)：對程序的變數缺乏適切的了解。
- e. 還原：
 1. 濃縮廢棄物的還原效果不高。
 2. 產生不同離子價的金屬離子，需再進一步處理。

(5) 物理分散、分離技術方面的限制

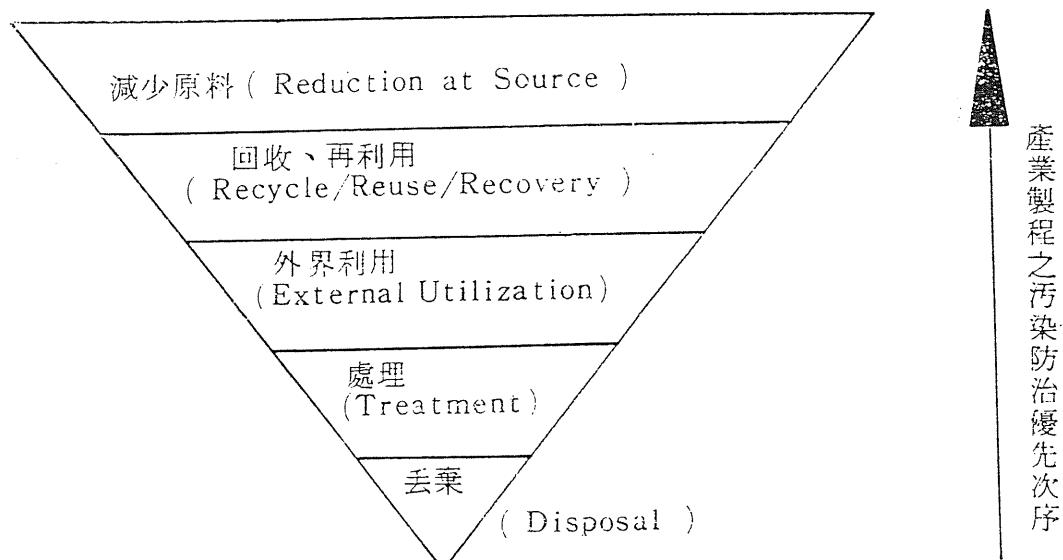
- a. 過濾：
 1. 缺乏對顆粒與濾膜間內反應的了解。
 2. 濾膜的維護不易。
- b. 萃取：需選擇溶劑及接觸介子 (contactors)。

結語

我國在推動工業化過程的初期，未能兼顧環境品質的維護，而陸續出現公害與污染防治方面的問題。目前政策上以經濟發展與環境保護兼籌並顧的原則；經濟部工業局採行的三項策略為：

一、工業發展與污染防治兼籌並顧。

- 二、事先防範污染重於事後改善防治措施。
- 三、鼓勵資源有效利用及回收副產物。
- 以臺灣目前天然資源缺乏，許多工業原料需仰賴進口，而且廢棄物直接、間接性地污染國人環境與居住品質情況下；減少廢棄物排放甚而化腐朽為黃金——將廢棄物變成可再利用物質，是一種雙重效應的途徑；也可說是污染防治手段之一。



圖十八 產業製程之污染防治優先次序

目前臺灣的回收工廠經營的產品包括有有機溶劑類、廢油類、廢五金類、廢橡膠類等，其工廠設備機件較簡陋、投資額小、員工技術加工能力較低是其特徵；相對的在污染防治設備的處理能力也不高，加上以家庭式工廠或地下工廠的經營方式易衍生環境機構管理的盲點。

欲提昇回收加工廠的產能以達到污染減量的目的，有幾點建議：

- (1)針對工廠規模（小型），提供套裝技術設備。
- (2)確實執行管末排放廢棄物分類、貯存作業。
- (3)掌握廢棄物來源，以免時斷時續。
- (4)提高經濟誘因，如減免賦稅，低利貸款購買設備機件等。
- (5)輔導經營管理，使其成為衛星工廠體系之下游廠，或集中使成為回收加工專業區。

參考資料

1. 賴耿陽譯著「塑膠廢料有效利用」，復漢出版社印行。
2. Illinois Inst: of Tech., Chicago, USA "Recovery, Reuse, and Recycle of Industrial Waste" USEPA-600/2-83-114, November 1983

3. 行政院環境保護署「事業廢棄物管制近程措施」行政院環境保護小組第十次委員會決議，中華民國七十六年三月十二日。
4. M.E. Campbell and W.M. Glenn "Profit from Pollution Prevention, A guide to industrial waste reduction & recycling" The Pollution Probe Foundation, Pollution Probe, 12 Madison Ave, Toronto, Ontario, Canada M5R WI
5. S. Garry Howell "EPA Research to Recover Toxic Heavy Metals from Waste Streams Hazardous Waste Engineering Research Laboratory U. S. EPA Cincinnati, OH45268
6. 林進基著「有機溶劑作業環境控制及回收效益之探討」民國76年全國勞工安全衛生研討會
7. 黃榮茂、王禹文、林聖富、楊得仁編譯「化學化工百科辭典」首版，曉園出版社印行
8. 經濟部工業局編印「中華民國七十五年工業發展年報」
9. 紀經增演講「石化工業的製程改善與污染防治」1987.12.22新竹市工研院化工所
10. 「環境保護」石化工業第九卷第二期，1987.9