

高科技提昇製程用水回收率實務探討

盧彭潭*、陳奎麟**、劉凱溢***

摘 要

在能源日益短缺的今日，節能減碳及各項資源使用及再利用在管理上更突顯出重要性。新建的半導體廠中製程用水回收被廣義要求回收率需達到 85%以上，經將製程廢水分流，部份較乾淨的水經純水系統回收至前處理再使用，剩餘較差部份則經廢水回收供次級用水使用，但均未達回收率標準，因此欲再提升製程用水回收率則需改善回收系統處理單元或改善原水水質。

回收系統藉由統計分析的變異數分析(ANOVA)及各可回收水源比較，有效找到導致回收系統無法再提升的真因，經改善回收水原水水質，不但使原本懸浮固體物(SS)不穩定之廢水可回收，並有效大幅提升廢水回收量，每日可回收 800 m³/day。廢水回收系統因回收量的大幅提升，但所衍生的問題是回收系統中逆滲透法 (RO)易發生堵塞及 RO 清洗效果不佳的問題，藉由實驗設計法(DOE)可迅速及有效的找到操作參數，不但延長回收系統壽命，及符合公司 Cost Down 之政策目標，更建立系統特性資料以便日後追蹤之用。

【關鍵字】製程用水、回收系統、懸浮固體物、逆滲透法

*華邦電子股份有限公司廢水課 高級工程師

**華邦電子股份有限公司水氣化部 經理

***華邦電子股份有限公司廢水課 副理

一、前言

科技發展帶動我國產業發展，而水資源為產業發展之重要因素，無論是直接使用於製程中或間接使用於冷卻水塔等皆為不可或缺。然台灣水資源運用卻受限於地形陡坡及降雨分布不均等限制因素，在資源永續發展原則下，未來可能面臨天然水資源運用實施總量管制，因而在水資源利用調配、回收再利用與管理上更突顯出重要性與迫切突破性。

經濟部工業局 2001 年率先提出製程部分的廢水回收率達 85 % 以上者，享有 5 年免稅或股東投資抵減 2 擇 1 之租稅優惠。國內近年來面臨缺水危機，工業局因此計劃全面檢討用水量大的製造業，並比照現行製程廢水回收的規定進行管理，以節省工業用水。

本廠改善前製程廢水回收率未達 85%(如圖 1 所示)，針對此狀況為符合公司環安衛及 Cost Down 之政策目標，製程用水回收率提升就變成不可避免的方式。製程廢水回收除可節省用水量外，並可降低廢水排放量。



圖 1 製程回收率

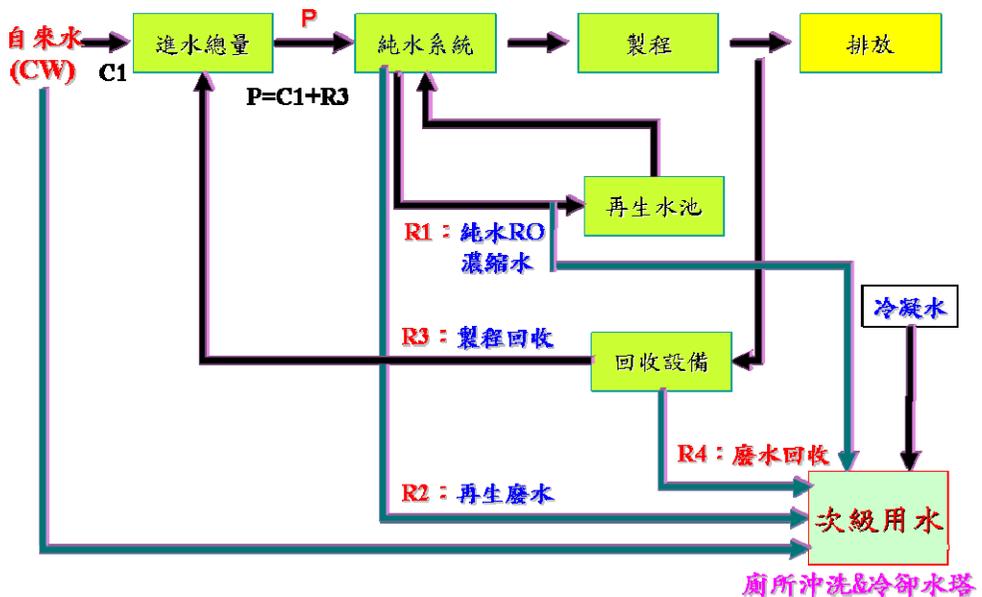
二、系統簡介

1. 製程用水流程及製程回收率

製程用水是由自來水(City Water, CW)進入純水系統：如多層過濾塔、去離子塔及逆滲透進行純化後產生，一般製程使用後均直接排放至廢水廠進行處理，但為提升廠區內水資源再利用，則會增設處理單元盡量將製程廢水做有效再利用(如圖 2 所示)。

製程回收率計算則如下：

$$\text{製程回收率} = (R1 + R2 + R3 + R4) / P * 100\%$$



2. 次級用水現況

本廠次級用水為供給冷卻水塔、洗滌塔及廁所沖洗水使用，其水源包含 RO (Reverse Osmosis)濃縮水、UPW (Ultra Pure Water)再生、自來水、MAU (Make-up Air Unit)排水及廢水回收等，條件設定導電度需小於 380 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 及 pH 介於 6.3-8.7 之間。

192 驗證對綠色產業之演進

次級用水一般由上述回收系統提供用量，若回收系統提供量不足時，則需補充自來水，自來水用量越多則水費相對增加，次級用水自來水補水量現況年平均補水量約 579 CMD(如圖 3 所示)，自來水補水量相當驚人，故在工廠考量下提升其他水源補充量勢在必得，在 UPW RO 濃縮水與 UPW 再生部分均受限機台用量導致水量無法提升，在 MAU 排水部分則受氣候影響(冬天水量需求少則補水量少，夏天補水量多則需水量則高)，改善方向只剩下廢水回收部份可以提升。(如圖 4 所示)

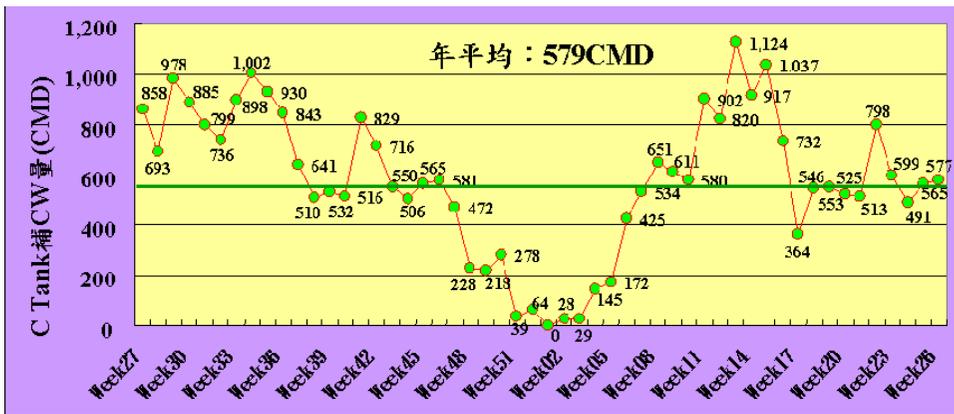


圖 3 次級用水補自來水現況圖

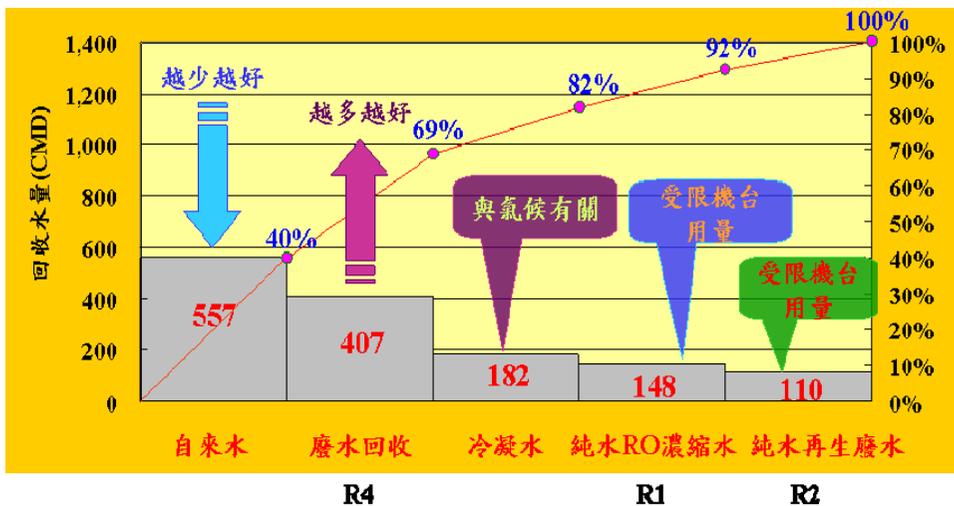


圖 4 次級用水水源分配柏拉圖

3. 廢水回收系統流程

本廠廢水回收原水採用化學研磨放流水(Chemical Mechanical Polishing)及氫氟酸(HF)放流水，回收系統可區分為前處理系統及後段處理系統，前處理系統將此兩股放流水經泵輸送，通過纖維過濾塔(Fiber Filter Tower)及 20 μm 過濾器，利用纖維塔孔隙大小及濾心，去除水中較大懸浮固體物，過濾後之水暫存於暫存槽中；若原水導電度經監測大於設定值，則 By pass 氣動閥打開切換至中和廢水槽。後處理系統則為 RO 處理單元，經由 RO 泵輸送，經過 5 μm 過濾器後由 RO 高壓泵輸送進入 RO 系統，以去除水中之離子，最後進入次級用水儲存槽供給廁所沖洗及冷卻水塔使用，如圖 5 所示。

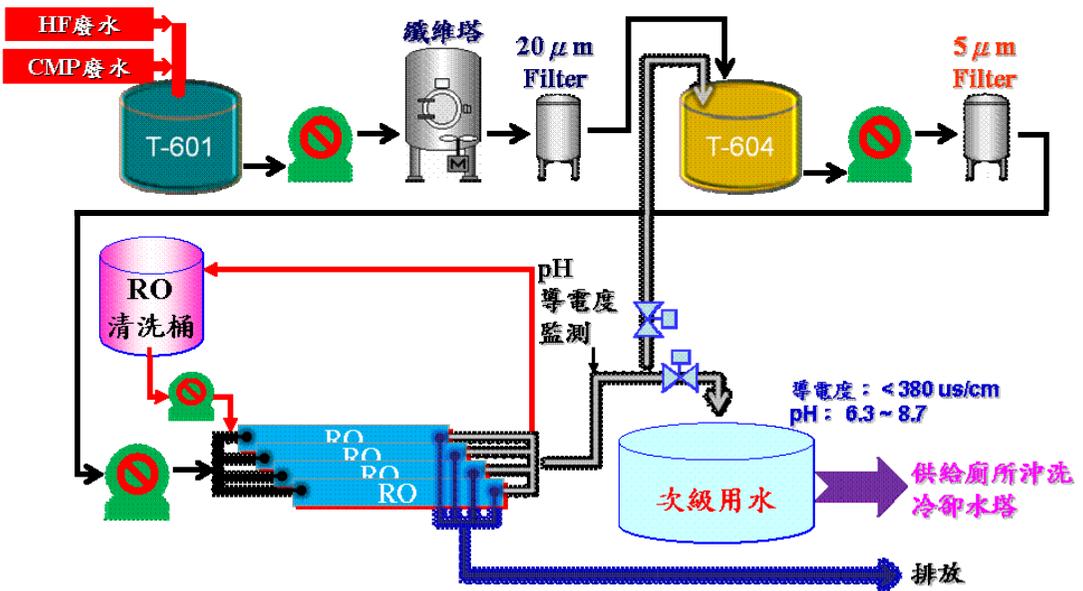


圖 5 回收系統流程圖

4.廢水系統水量

在本廠廢水系統中，共有四種系統處理單元，可分為中和廢水、生活污水、HF 廢水及 CMP 廢水等。綜觀各系統中，廢水處理系統屬於最大宗排放為中和廢水及 HF 廢水，水量分別為 1,810 CMD 及 1,077 CMD，目前 RO 系統以回收 HF 廢水為主，若能回收中和系統則能有效減少排放及自來水使用量，更能減少公司成本，如圖 6 所示。

5.回收系統運轉狀況

在本廠廢水回收系統中，主要考量因素：充足水源及系統維護簡單，原水水質因素如 SS 及原水導電度等。因 RO 現有系統容量限制，由水量比較可知 HF 放流水較中和系統放流水少，並考量到中和廢水系統 SS 較高(如圖 7)，故暫不列入回收目標。然而回收 HF 廢水有下列問題：

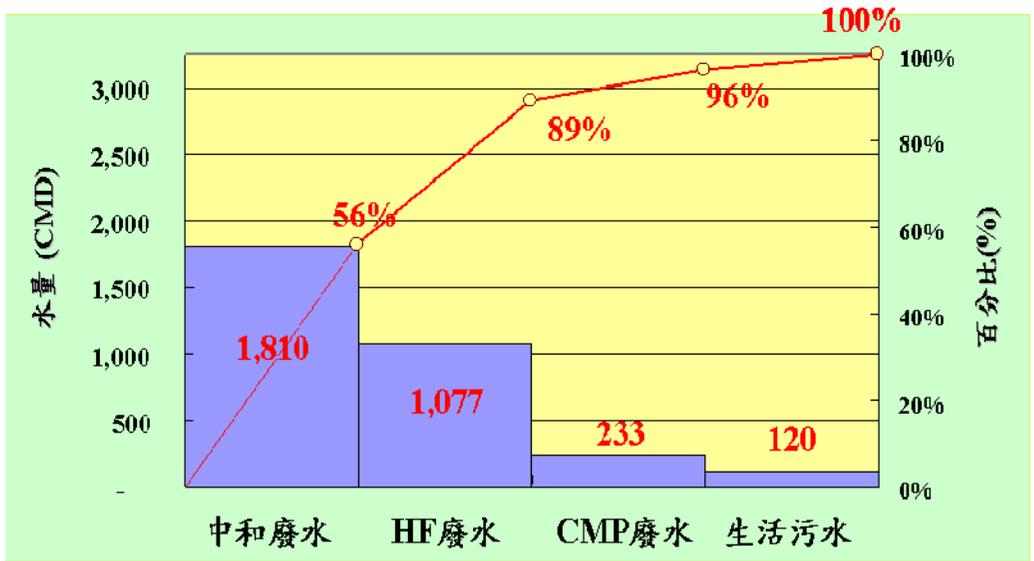


圖 6 總排放水量分佈圖

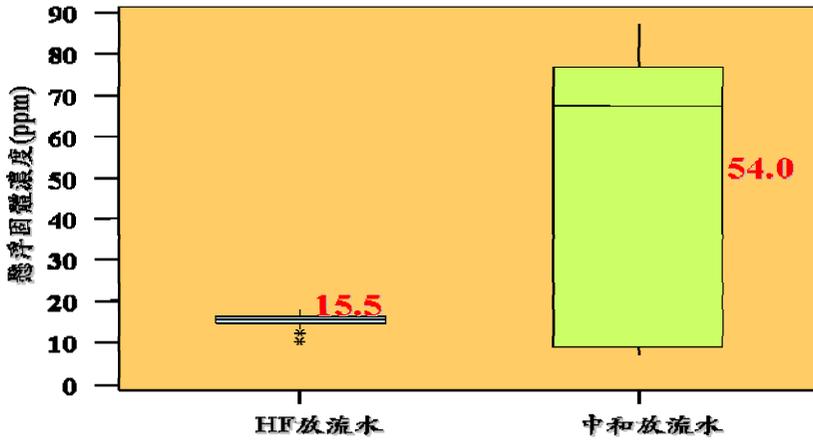


圖 7 HF 放流水與中和放流水 SS 分佈箱型圖

(1)後段 RO 因 HF 放流水含大量鈣鹽及陰離子(硫酸鹽及氯鹽)，使 RO 表面容易阻塞且壓差迅速上升，產水量快速下降，造成清洗頻繁增加人員負擔，且 RO 清洗後效果不一。

(2)HF 放流水與中和放流水比較下導電度偏高(如圖 8 所示)，當 RO 導電度去除率差時則無法達到回收水質要求影響，也間接影響回收水量的提升。

針對以上運轉缺失，本課組員重新評估回收中和系統放流水的可行性，並針對 RO 清洗效果不一，以實驗設計方法進行清洗方法改善。

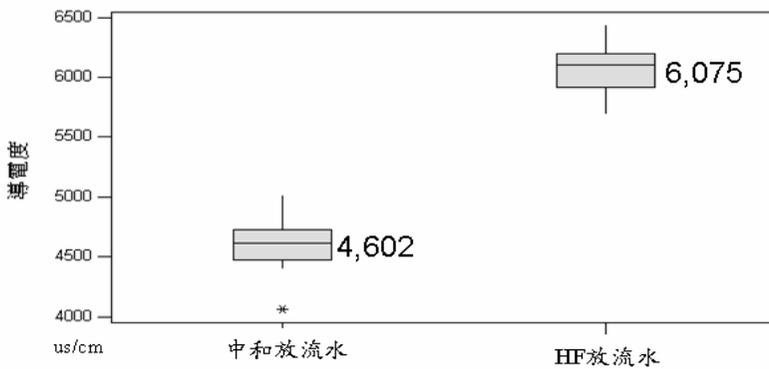


圖 8 HF 放流水與中和放流水導電度分佈箱型圖

三、處理改善介紹

1.原水水質改善

由前面討論，雖中和放流水導電度較 HF 廢水低，為考量降低中和放流水導電度及抑制微生物生長，將中和放流水 pH 從原先 6.5~8 調為 5~6，結果顯示導電度有明顯改善，如圖 9 所示。

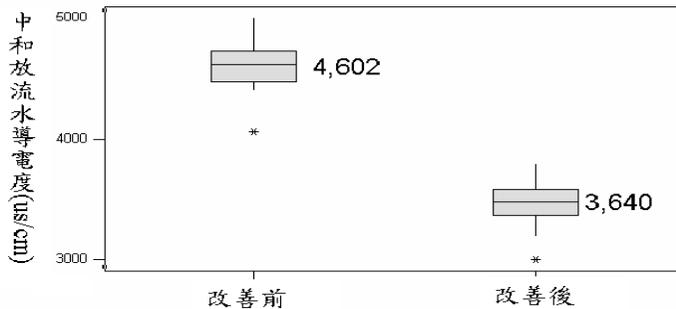


圖 9 中和放流水導電度改善前後比較

2.RO 清洗方式

考慮過去 RO 清洗方式未統一且缺少有效評估的方式，本課討論後決定以統計中的實驗設計法(DOE)進行 RO 清洗實驗。考量因子有 NaOH 濃度、H₂SO₄ 濃度、注藥時間、浸置時間、注藥方式。為減少驗證的時間及各因子交互作用，再進一步利用 2^{k-p} 部分實驗法進行重要因子篩選；注藥方式可分為 2 種：一種為先酸洗再鹼洗(NaOH=1%及 H₂SO₄=1 %)，注藥時間與浸置時間均為 10 分鐘；另一種則為先鹼洗再酸洗(NaOH=2 %及 H₂SO₄=2 %)，注藥時間與浸置時間均為 30 分鐘，如表 1 所示。

表 1 RO 清洗實驗因子水準表

因子	水準-1	水準-2
NaOH	1%	2%
H ₂ SO ₄	1%	2%
注藥時間	10 min	30min
浸置時間	10 min	30 min
注藥方式	先酸在鹼	先鹼在酸

藉由各項參數改變針對 RO 進行清洗比對，觀測值為產水量(望大值)。經實驗結果可得知注藥方式影響產水量甚鉅(如圖 10 所示)。再依各因子之 RO 參數調整比較後，獲得較佳清洗 RO 方式為先鹼洗再酸洗(NaOH=2 %及 H₂SO₄=2 %)、注藥時間 10 分鐘及浸置時間 30 分鐘為最佳清洗方法。

Pareto Chart of the Standardized Effects

(response is 產水量, Alpha = .05)

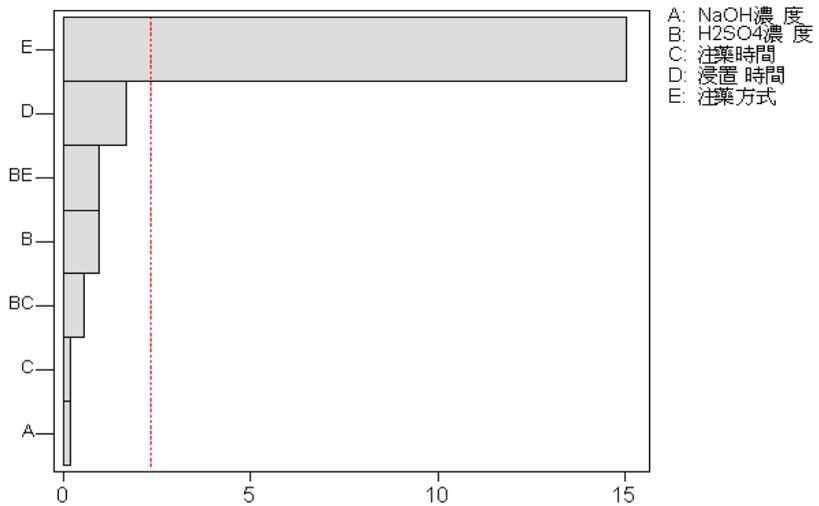


圖 10 影響 RO 清洗各因子效果比較圖

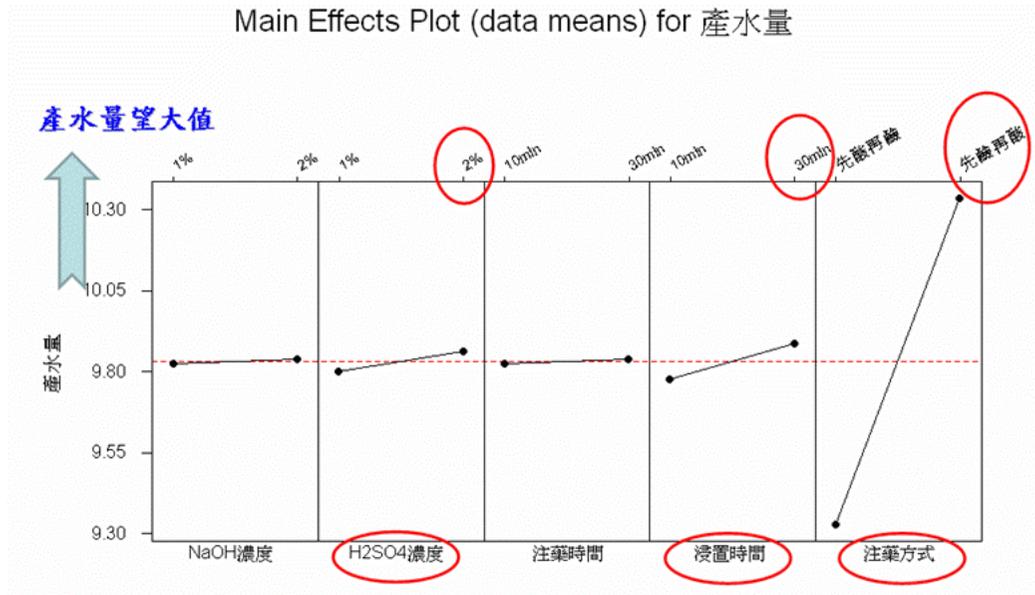


圖 11 影響 RO 清洗各因子主效果圖

四、結論與建議

本廠回收系統由原先收集 HF 放流水，因 HF 放流水含大量鈣鹽及陰離子，造成 RO 表面容易阻塞、壓差迅速上升及產水量不足，且清洗頻繁嚴重增加人員負擔，故藉由 pH 調整方式(調為 5~6)使得中和放流水能夠代替 HF 放流水。

針對 RO 易阻塞問題則利用實驗設計方法及各項參數變化找出 RO 最佳清洗方式。利用先鹼洗再酸洗程序(NaOH=2 %及 H₂SO₄=2 %)注藥時間與浸置時間均為 30 分鐘下，RO 清洗效果最佳，藉由此改善讓本廠回收系統運轉更順暢且有效再利用水資源。

利用現場操作及經驗傳承來建立實務性操作是每個廠區最重視的，本廠回收系統也不例外，藉由放流水回收水源改善及 RO 清洗方式修正，找出符合本廠回收系統現況最佳操作程序，建立一套實用性系統操作後，將使操作人員更瞭解且更容易進入狀況。

五、參考文獻

- 1.陳奎麟、劉凱溢、徐國明、謝作程，半導體業中和廢水回收實例介紹，2003 產業環保工程實務研討會論文集，580~597，2003。
- 2.王春和，工業實驗設計講義，中正理工學院，王春和教授編寫，2008。
- 3.唐麗瑛，實驗設計(DOE)講義，交通大學工業工程與管理學系，唐麗瑛教授編寫，2008。
- 4.彭定國、吳鴻錚、鄭大興，MINITAB 統計分析與應用，新文京開發出版(股)公司，2006。
- 5.石炳鑫、謝大為，半導體製造業水資源回收再利用之研究，2003 產業環保工程實務研討會論文集，542-552，2003。
- 6.黎正中、陳源樹 譯，實驗設計與分析，高立圖書有限公司，2005。

一、軟板產業背景說明

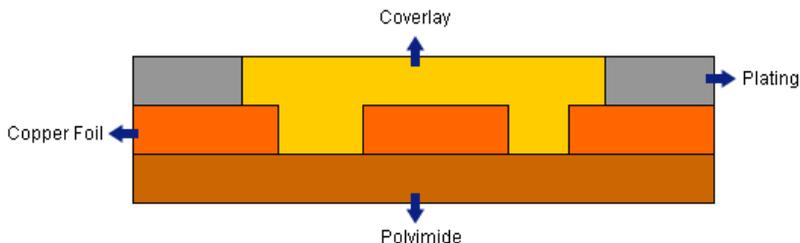
軟性電路板是由軟質介電材料所支撐的一種線路板，業界目前多數以 FPC(Flexible Printed Circuitry)來稱呼，因應電子產品的多樣化設計，不但電器連接十分重要，多樣化立體設計所必須提供之組裝便利性更加重要，尤其對於一般獨立設計的單元，如果有軟板的協助即可輕易的分離設計並相互搭達成互連與組裝。軟板的結構形式有單面板、可雙面連接單面板、雙面軟板、及多層軟板。目前以廣泛運用於電子產品方面，包括光碟機、筆記型電腦、手機、數位相機與攝影機、印表機等等。

隨著電子資訊產品的普及化，軟板的用量跟著大幅成長，3C 產品的熱絡更使得軟板的需求加溫。國內產值的部分由 2000 年約 90 億元台幣，每年以 20% 的成長率增加，至 2005 年已超過 150 億元台幣；但仍僅佔整體電路板市場之 10% 以下。國內的軟板廠商超過 25 家，其中旗勝、嘉聯益、百稼、齊欣及雅新的產值就超過 7 成以上，旗勝為日商 MOK 轉投資，其所生產之 FPC 大多回銷至日本，是目前國內最大的軟板生產商；嘉聯益與百稼合併後成為國內第二大軟板廠商。軟板生產技術不斷更新進步，也更造就電子產品之精密度及方便性。

二、軟板種類說明

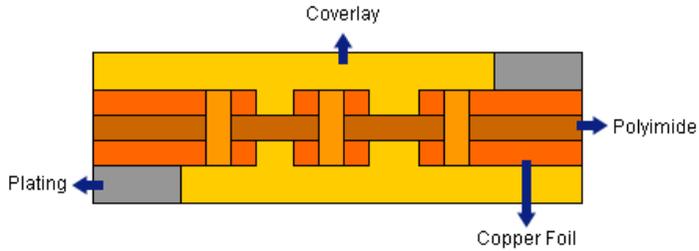
1. 單面板

使用單面板之基材於電路成形後，加上一層覆蓋膜，成為一種最基本的軟性電路板。



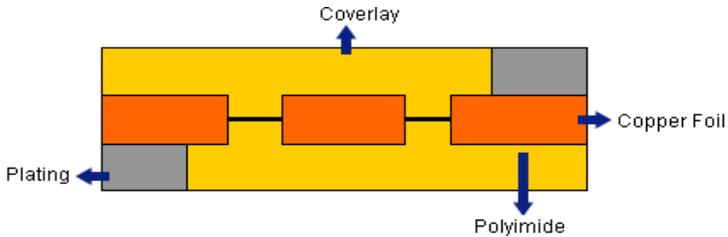
2. 雙面板

使用雙面板之基材，於雙面電路成形後，分別在各面加上一層覆蓋膜，成爲另一種基本電路板



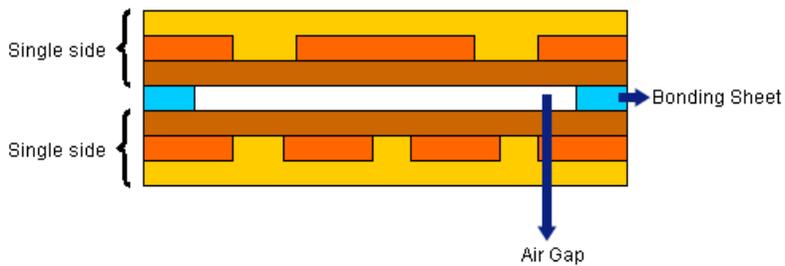
3. 單銅雙做

使用單一純銅，於電路成形之前後過程中，雙面表層分別結不同之覆蓋膜，此時雙面均露出導電部分稱之單銅雙做。



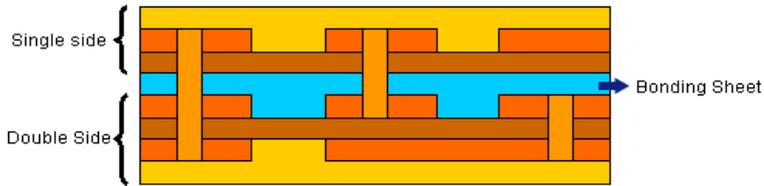
4. 單+單(Air Gap)

結合兩層單面板，並於折合區域中以無膠裸空的设计，達到高屈撓要求之目的。



5.多層板

以單面板或雙面板組合，計設為三層或三層以上電路層圖中多層板是以單面板結合雙面板為例。



三、軟板產業製程說明

由於軟板及硬板在使用之用途的要求下，其製作之方式亦有些不同，但主要之製程內仍包括鍍通孔顯影、蝕刻、表面處理等生產步驟，一般軟板製作之流程由圖 1 所示，相關材料及製程之說明簡述如下：

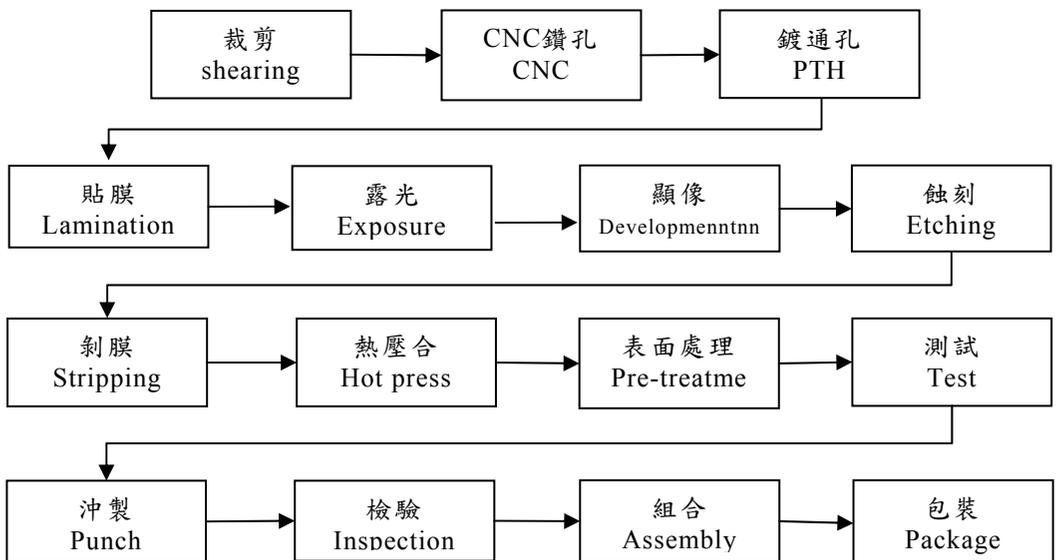


圖 1 軟性電路板生產流程圖

1.介電薄膜材質

軟性電路板的結構中即以介電材料最特別，由於有機化學科學技術之進步，使軟性電路板在電性、機械強度方面均表現優越；目前市場上主流產品使用之軟板薄膜以聚酯樹脂及聚亞醯胺樹脂為大宗，具有高溫之穩定性。

2.導體材料

軟板的金屬導體材料以銅為主體，各種不同的銅皮應用於軟板基材的製作，銅皮又以電鍍銅皮及軋壓銅皮為主。電鍍銅皮因性能之限制，主要用於單次撿取組裝的應用方面，價格低取得容易是其優勢；至於軋壓銅皮具高延展性，製作成本高，且製作寬幅不易加大，使用上較麻煩。近來亦有高分子厚膜因易於連續生產，在單雙面及多層結構的軟板製程上亦常使用。

3.膠合材料

高溫的聚亞醯胺樹脂膠合材料由於低熱膨脹及安定性良好，為軟板製作最常使用之膠合材料；另外聚酯樹脂與環氧樹脂的混合型樹脂，因具有良好之低價、柔軟度、熱穩定性及抗化學性，亦是一種不錯的材料選擇。

4.電鍍及金屬表面處理

為了保有組裝的特性，電路板的金屬表面必須做抗氧化及可焊接或組裝的金屬表面處理。考量 SMT 組裝要求，有機氮類之化合物可有效保護銅面之焊錫性，極為一般之有機保焊膜製程配方；處理銅面則常採用電鍍金屬及塗佈金屬方式，錫鉛是一般金屬表面塗佈最常使用的方式，上錫方式是以錫膏重融處理，由於環保的因素，已有其他之金屬化合物作為替代品；一般如果使用聚酯樹脂的軟板製程幾乎又採用電鍍焊錫的方式來作焊接金屬表面處理，尤以簡單電子消費產品居多；目前常用之薄金表面處理方法，主要係應用於低電阻高性賴度應用之對象，表面處理製作方式包括浸金、電鍍金及還原金等，緩衝層則使用鎳金屬。

5.覆蓋層及綠漆塗佈

多數的軟板設計為了保護線路且同時界定組裝及焊接的區域，軟板一般有兩種覆蓋層製作方式，其一事使用附膠合材料的覆蓋膜，另一種則是保護層塗

佈或綠漆塗佈，最普遍之塗佈方式為絲網印刷，但每一種方式均有其限制條件及優勢，如動態撈取的軟板因結構耐久性、耐高溫性及惡劣使用環境要求，必定使用覆蓋膜方式製作。

四、軟板產業廢水特性說明

依據製程及實際操作之情形分析，因為須確保製作過程之板面清潔及短路之產生，於每一個生產過程中均需要使用純水進行清洗，且清洗程序於顯像、蝕刻及表面處理時均採用多次清洗方式，一般整體單面板製程之用水量約 $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ，目前多數工廠均已建立用水回收之機制，即將 2 次以上之清洗用水以多段逆洗或機械過濾方式進行回收再利用，其餘之廢水摻合了濕式洗滌塔之溢流水、冷卻水塔排放水及生活廢水一併排入廢水處理廠加以處理，其廢水一般特性如下：

pH：7-7.5

Total Fe：0.05 mg/l as Fe

T-H：150mg/l as CaCO_3

M-A：8 mg/l as CaCO_3

SO_4 ：190 mg/l as SO_4

Cl^- ：300 mg/l as CaCO_3

Silica：3.8 mg/l as SiO_2

Conductivity：1,900-2,100 $\mu\text{s}/\text{cm}$

SS： $\leq 30 \text{ mg}/\text{l}$

COD：60~150 mg/l

目前軟板製造業者對於廢水處理均採用調勻、混凝、沈澱為主之物理化學處理為主，主要係利用混凝劑及 PAC 之膠凝功能，結合金屬離子污染物並膠羽化，再利用重力沈澱方式將污染物去除，一般均可將 COD 及金屬離子予以降低，但有些廠商因操作問題經常仍造成 COD 不穩定且介於放流水標準邊緣；或另對於導電

度部份大都仍高於 $1,000\mu\text{s}/\text{cm}$ ，對於排放水體是灌溉渠道的廠商會形成困擾，因此通常廠商會增加生物處理單元，利用曝氣及二次沈澱方式將 COD 及導電度再有效降低。至於如要配合廢水回收再利用則將另加考慮三級處理之應用。

五、軟板產業廢水回收之困難說明

廢水回收再利用執行是否成功與落實之關鍵除了技術之選用外，主要取決於廢水回收之經濟可行性，亦即關係著設備投資成本、運轉成本及人力成本，一般目前廢水回收成本考慮設備攤提之原則下，每噸之廢水回收約 30 元以上，主要因為高級處理設備費用偏高。但使用一般常用之砂濾、活性炭吸附等方式所產出之水質又僅限用次級用水及冷卻用水，經濟效益不高且水量使用有限。若能運用較先進之高級處理技術如薄膜技術，另再配合本土化之設備模組，將會有降低處理費用之可能性。再者 PCB 生產業者由於中國大陸頒佈之「現有 PCB 業法定水污染物排放濃度現值與基準排水量」(如表 1 所示)，對台商而言，將會是 PCB 產業目前面臨最大之挑戰，相對減少廢水排放而增加用水回收率亦是重要課題。

至於廢水回收較高級且可性之技術為 UF 與 RO，上項技術均已成熟，只是價格較貴。薄膜利用壓力為驅動力，並利用薄膜孔徑大小或表面特性進行溶質溶劑之分離，以達處理或純化水質之功能。超過濾(UF)主要為篩除機制(Sieving)，其薄膜孔徑較 MF 略小，操作壓力在 50~700 kPa 之間。其主要功能為可去除膠體、色度、有機物及懸浮微細顆粒，降低 SDI、去除腐植質、膠體性二氧化矽、鋁化合物和鐵、錳之氧化物。通常 UF 程序在半導體業及電子業作為超純水系統之最後一道防線，移除超純水中之微量微生物或微粒子，以確保超純水純度，其重要性不可言喻。逆滲透為薄膜程序中薄膜孔徑最小者，逆滲透去除機制可分為篩除(Sieve)及溶解-擴散(Solution-Diffusion)。篩除與一般過濾原理相同，乃是以膜面上之孔隙，篩除大於孔隙之物質，逆滲透更可把小於孔隙之分子加以篩除。溶解-擴散之原理為假設逆滲透膜為一非多孔性(Non-porous)構造，其薄膜孔徑對不同物質之分離範如表 2 所示。溶液先溶解於膜上，再受壓通過薄膜，藉由膜對於溶液中各成分溶解度之不同而達分離作用。逆滲透設備主要功能為去除水中重金屬、毒性物質與有機物，以

174 軟性電路板廢水回收探討

及降低水中溶解性固體物濃度，對於離子亦有良好之去除效果。對逆滲透的進流溶液而言，不宜有粗大懸浮固體物，故進流溶液必須預先處理，薄膜處理不須大量添加化學藥劑以改變污染物的物化特性以達到去除的目的。

薄膜之構造與應用特性是影響處理水值的重要關鍵，目前薄膜市場中主要的四種商品模組分別為平板式(plate)、螺旋式(spiral wound)、管狀式(tubular)及中空纖維膜式(hollow fiber)。平板式薄膜，薄膜模組密度為 $100\sim 400\text{ m}^2/\text{m}^3$ ，具有易於清洗及更換之優點，每單一組件之表面積最大可達 100 m^2 ，平板薄膜構造圖詳如圖 2 所示；螺旋式薄膜之構造如圖 3 所示，包含兩片平板(flat-sheet)薄膜與一可繞曲多孔性薄層(sheet)，而形成如三明治般之組合，並捲成圓筒狀。每單一元件(element)最大可達直徑 300 mm ，長 1.5 m 之設計。相較於平板式薄膜，此模組之薄膜密度在 $700\sim 1,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ 之間，水頭損失較小；管狀式薄膜為最簡易之薄膜構造，將薄膜製為管狀，內徑在 $6\sim 40\text{ mm}$ 之間，在小型廠中，單一管膜會外襯一層不鏽鋼或 PVC 套管。另有將 $3\sim 151$ 個管膜縛成一束置於圓形套管中，組成一模組，所提供之薄膜表面積為 $0.2\sim 7.4\text{ m}^2$ ，循環速度最高可達 6 m/s ，故此模組不須有良好之前處理，具有易於清洗之優點。美中不足的是，薄膜填充密度低，因此會增加建造成本，構造圖詳如圖 4；中空纖維薄膜，每一模組內約由數千至數百萬個中空纖維集結而成。依進流水進流方向區分為內向外(inside-out)及外向內流(outside-in)薄膜。中空纖維構造圖詳如圖 5 所示。在外向內流之組件中，薄膜管束(bundle)會組合成 U 型，且僅有一端密封(seal)。中空纖維應用於 UF 模組則薄膜密度為 $1,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ，而 RO 模組則達 $10,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

表 1 中國現有 PCB 業法定水污染物排放濃度現值與基準排水量

污染物項目	直接排放限值	間接排放限值
pH	6~9	6~9
懸浮物(SS)	50 mg/l	80 mg/l
BOD ₅	30 mg/l	60 mg/l
COD(Cr 方法)	80 mg/l	120 mg/l
石油類	5.0 mg/l	3.5 mg/l
氨氮	15 mg/l	25 mg/l
總氮	25 mg/l	35 mg/l
總磷	0.5 mg/l	1.0 mg/l
氟化物	8 mg/l	10 mg/l
陽離子表面活性劑	5.0 mg/l	6.0 mg/l
三氯乙烯	0.3 mg/l	0.5 mg/l
甲苯	0.1 mg/l	0.1 mg/l
二甲苯	0.4 mg/l	0.2 mg/l
總銅	0.5 mg/l	0.5 mg/l
總鋅	2.0 mg/l	2.0 mg/l
總錳	2.0 mg/l	2.0 mg/l
總有機碳(TOC)	30 mg/l	50 mg/l
總汞	0.05 mg/l	
烷基汞	不得檢出	
總鎘	0.1 mg/l	
總鉻	1.0 mg/l	
六價鉻	0.5 mg/l	
總砷	0.2 mg/l	
總鉛	1.0 mg/l	
總鎳	1.0 mg/l	
總鈹	0.005 mg/l	
總銀	0.2 mg/l	
單位產品 基準排水量 單位：m ³ /m ²	單面板 0.20	
	雙面板 0.40	
	多層板(2+n)層 (1.6+0.4n)×0.4	
	HDI 板(2+n)層 (2.5+0.6n)×0.4	

註：1.上表中印製電路板層數加“n”是正整數。如 6 層多層板是(2+4)，n 為 4；HDI 板層數包含芯板，若無芯板則是全積層層數，都是在 6 層基礎上加上 n 層；剛撓板是以剛性或撓性的最多層數計算。

2.上表之現有 PCB 行業水污染物排放控制要求期間為：2010 年 7 月 1 日起至 2011 年 12 月 31 日止。

表 2 薄膜孔徑對不同物質之分離範圍

尺寸(μm)	離子範圍		分子範圍		巨分子範圍		微粒子範圍		巨粒子範圍	
	0.001	100 200	1.000 10.000	0.01	0.1	1.0	10	100	1,000	
分子量	100 200 1.000 10.000 20.000 100.000									
水體中污染物 分佈範圍	水中 溶解鹽	金屬離子	病毒	腐植酸	細菌	囊類	砂粒			
					黏土	淤泥				
薄膜分離程序	逆滲透	極微過濾 超過濾	微過濾	傳統過濾程序						

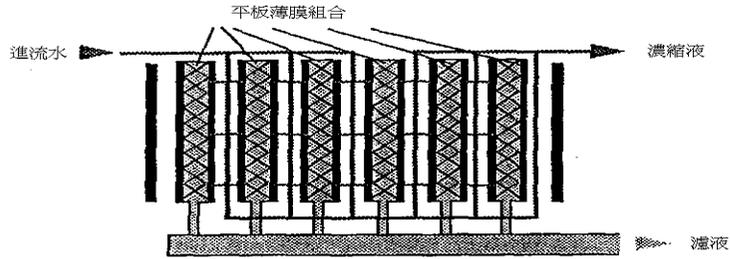


圖 2 平板式薄膜模組

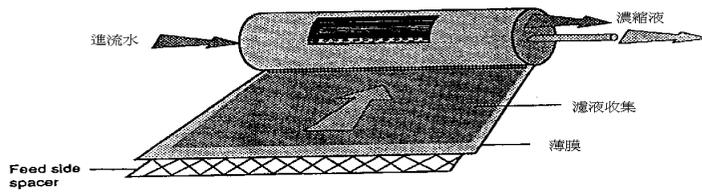


圖 3 螺旋式薄膜模組

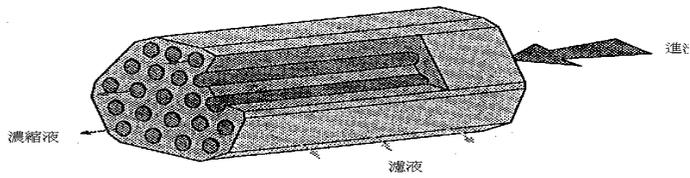


圖 4 管狀式薄膜模組

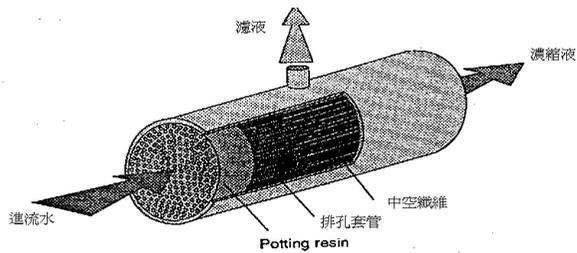


圖 5 中空纖維薄膜模組

根據國內外研究顯示，薄膜程序於水處理上主要阻塞物(Foulants)包括微粒子、膠體物質、有機物、氧化物、微生物及無機鹽類，而工業廢水處理上，人工合成有機物、微生物、蛋白質及膠體粒子是造成阻塞的主要物種(Takizawa, 1996)如圖 6 所示。當 RO 薄膜於操作中遭受到各式物種阻塞時，對於薄膜有不同之影響，表 3 為常見 RO 薄膜經常面臨之各式阻塞及其解決之道。一般而言，對於有機物或微生物所造成的阻塞以氫氧化鈉、EDTA、次氯酸鈉即可有效清除，阻塞物以無機鹽類為主時，酸系溶液(如硫酸、檸檬酸及鹽酸)為良好的清洗藥劑，此對於控制薄膜阻塞扮演重要的角色。

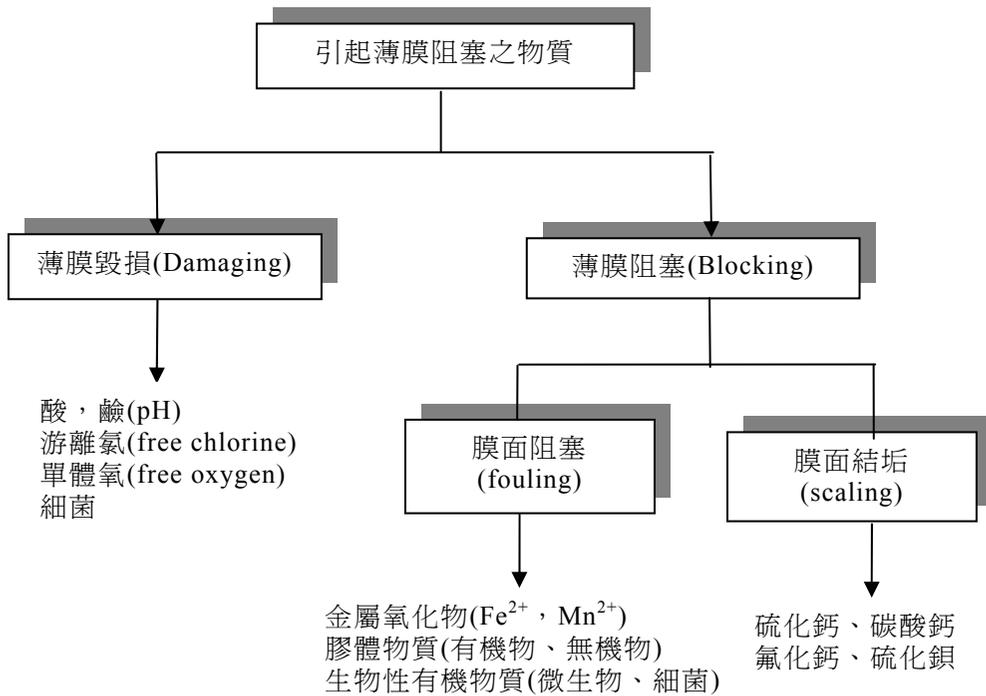


圖 6 引起薄膜阻塞之物質

表 3 阻塞物對 RO 之影響及對策

阻塞物	物種描述	對 RO 之影響	對策
積垢	難溶性之無機鹽類沉積於薄膜進流面，阻止水流通過。常見物種有：CaCO ₃ 、CaSO ₄ 、2H ₂ O ₂ 、BaSO ₄ 、SiO ₂	1. 主要降低對鹽類之去除率。 2. 升高淨穿透壓。 3. 緩慢減少產率。 4. 通常發生於末段。	1. 降低回收率。 2. 調整 pH。 3. 使用抗垢劑。 4. 通常發生於末段。
膠體	懸浮固體物沉積於薄膜進流表面。常見物種有：SiO ₂ 、Fe(OH) ₃ 、Al(OH) ₃ 、FeSiO ₃	1. 快速填壓淨穿透壓。 2. 減少產率。 3. 減少去除率。 4. 通常發生前段。	1. 進行前處理。 2. 降低回收率。 3. 增高離子強度。 4. 電荷穩定化。
微生物	形成生物膜(biofilm)，包括：細菌、微細藻(microalgae)、真菌類。	1. 主要降低產率。 2. 降低鹽類去除率。 3. 可能增加淨穿透壓。 4. 緩慢的發生。	1. 加入 NaHSO ₃ 。 2. EDTA 系之鹼性溶液清洗。 3. 移除活性炭濾床。 4. 間斷性加入 H ₂ O ₂ 或 peracetic acid。 5. 次氯酸鈉。
有機物	聚電解質、油脂(oil、grease)、腐植質(humic substance)、高分聚合物(polymer)	1. 快速地降低產率。 2. 鹽類去除率緩慢增加。 3. 穩定緩慢地造成淨穿透壓之增加。	1. 粒狀活性炭(GAC)過濾。 2. Isopropanol 或 proprietary 溶液清洗。 3. NaOH 化學清洗。 4. 次氯酸鈉。

薄膜阻塞常會造成薄膜產水率隨著時間而減少，目前有許多針對 RO 評估薄膜阻塞之參數，常用的有 SDI (Silt Density Index)，用以評估膠體或懸浮固體之主要參數，用以判斷水中所含污染顆粒數量以及堵塞之速度，其物理意義表示在薄膜表面上形成濾餅程度之大小。一般來說，RO 之進流水之 SDI 值以 0~2 之間為宜。

六、薄膜應用於軟板產業廢水回收的流程設計

由於薄膜是廢水回收再利用時之重要單元，包括 UF 與 RO，初期應用於軟板製程廢水回收時均遭遇相當多之困擾，因在諸多薄膜測試之結果顯示薄膜非常容易阻塞，經觀察及分析阻塞原因發現廢水處理廠之混凝與生物處理時之沈澱過程雖已

180 軟性電路板廢水回收探討

達到處理之效果，但細微且不易沈澱之膠羽或生物體會沾黏於薄膜上，使水之通路予以阻塞，處理通量迅速下降，除非需配合薄膜逆洗作業方能恢復產水量，但一般薄膜對於逆洗過程之承受力不一，如束管膜極容易因逆洗壓力過大而斷絲，除失去薄膜功能外，進而會因廢水滲入而污染了產水水質。

因應目前經濟部工業局公佈之關鍵產品「水再生利用設備及應用服務」相關廠商產品 UF 薄膜，利用國產薄膜進行測試，測試設備以 UF 及 RO 為主，第一階段測試係將廢水處理廠之放流水當作處理對象，因廢水已經過混凝、沈澱及生物處理，放流水中懸浮微粒已低於 20mg/l，但經兩次之長時間測試，記錄每公升通水時間及 RO 之出水水質，由圖 7~10 可進行數據比較發現定時逆洗對於薄膜之通量會有幫助，但長時間操作後因薄膜沾黏之異物不易逆洗，分析其成分內容應為膠羽或細微生物污泥，呈膜狀沾黏於薄膜上，即使使用薄膜旋轉(程序 1)或刮除輔助設施(程序 2)也不易增加通量(如照片 1 及 2 所示);而在 RO 出水水質上也有漸差之現象(約 4-10 μ S/cm)，即使經過逆洗程序也僅能提升出水水質少許，水質雖已符合使用要求，但通水量小則不符需求；因此由此第一階段之測試結果得知使用 UF 及 RO 在廢水處理終端進行廢水回收有其實際之困難，即使逆洗頻率需求加高，且再加上其他處理功能，包括薄膜模組旋轉及表面刮除，提升去除之功能仍有限。

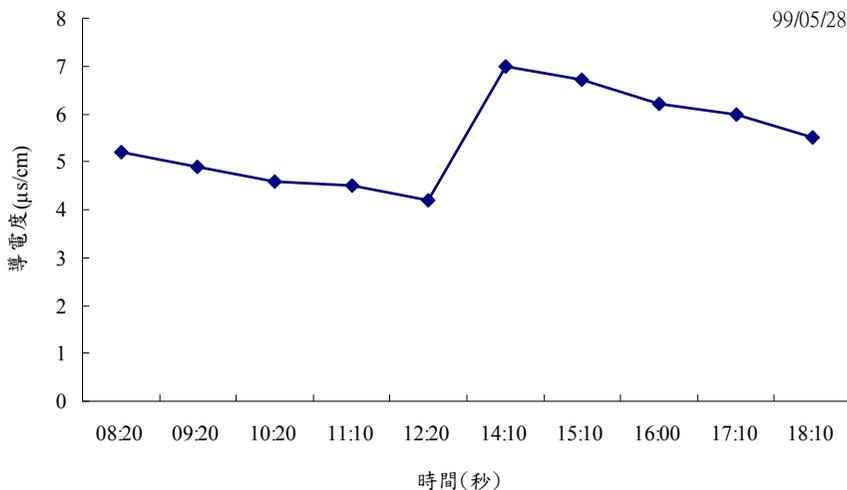


圖 7 第 1 階段程序 1 廢水回收測試紀錄 時間-導電度圖(99.5.28)

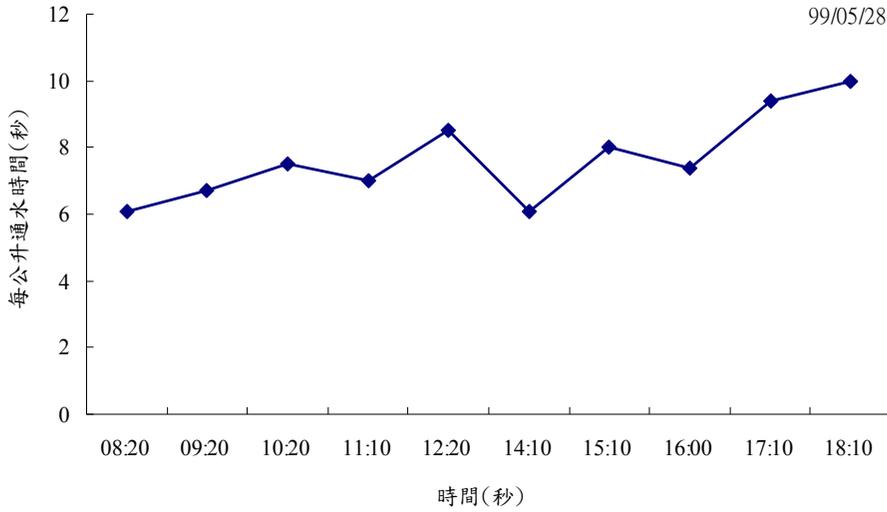


圖 8 第 1 階段程序 1 廢水回收測試紀錄 時間-通水時間圖(99.5.28)

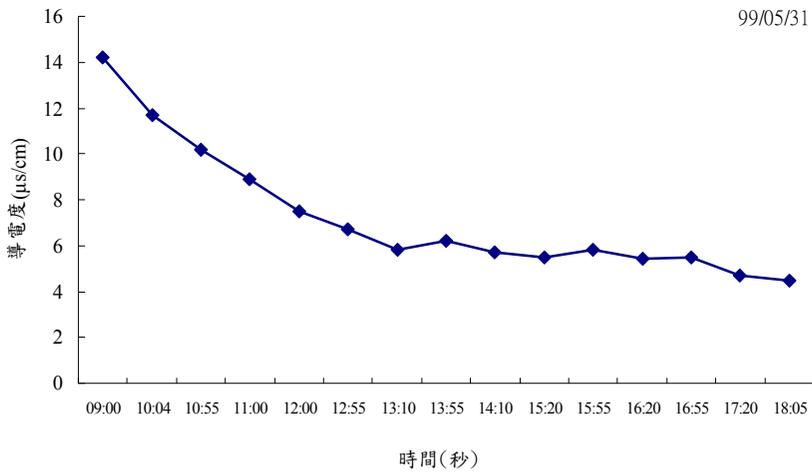


圖 9 第 1 階段程序 2 廢水回收測試紀錄 時間-導電度圖(99.5.31)

182 軟性電路板廢水回收探討

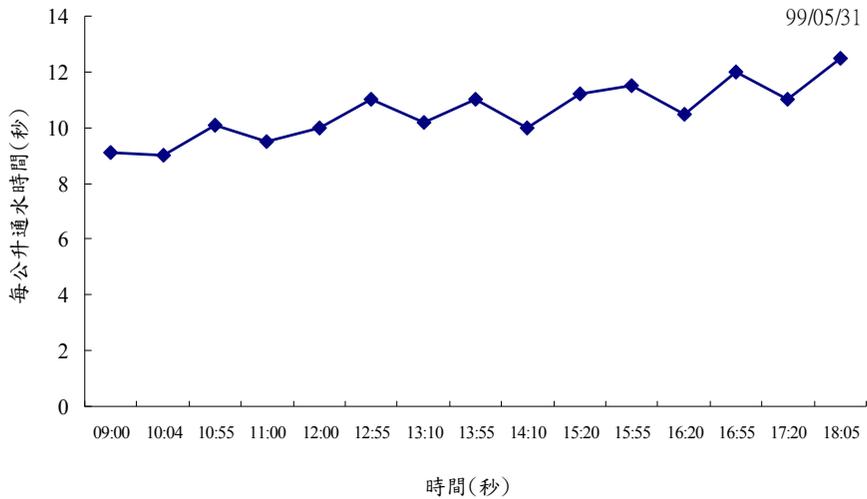


圖 10 第一階段程序 2 廢水回收測試紀錄 時間-通水時間圖(99.5.31)



照片 1 第一階段薄膜沾黏情形



照片 2 第一階段薄膜刮除及反洗共用情形

基於前期測試之失敗經驗，在規劃第二階段測試過程乃使用不同的處理思維，顛覆過去傳統之處理觀念，即直接將廢水進行物理過濾處理，運用 UF 膜直接先將廢水中之尺寸大於 $0.02\mu\text{m}$ 的顆粒過濾後再進入 RO 系統處理，最後產出之回收水可使用於軟板生產製程中。因為處理水源為廢水處理廠之進流水，因此污染度

較高，但經過相同之 UF 及 RO 處理，且定時逆洗去除薄膜積垢，通量較高且薄膜逆洗前後之通量相差 2 倍以上，且 RO 產水之導電度值漸趨穩定，出水水質亦可達到與第一階段水質相同水準且符合使用之需求(請參考圖 11 至 14)，由照片 3 及 4 中可看見逆洗程序單純化，不需另加輔助刮除設備，至於過濾之異物會經薄膜逆洗時脫離薄膜，甚至呈污泥塊狀沈澱物，就處理程序上更加簡便化。一般在處理過程規劃爲了保護 UF 的使用壽命，仍可進行簡單之前處理，例如加壓浮除或纖維過濾，均可先將較大顆粒之污染物先行去除，進而降低後續 UF 及 RO 之處理負荷。

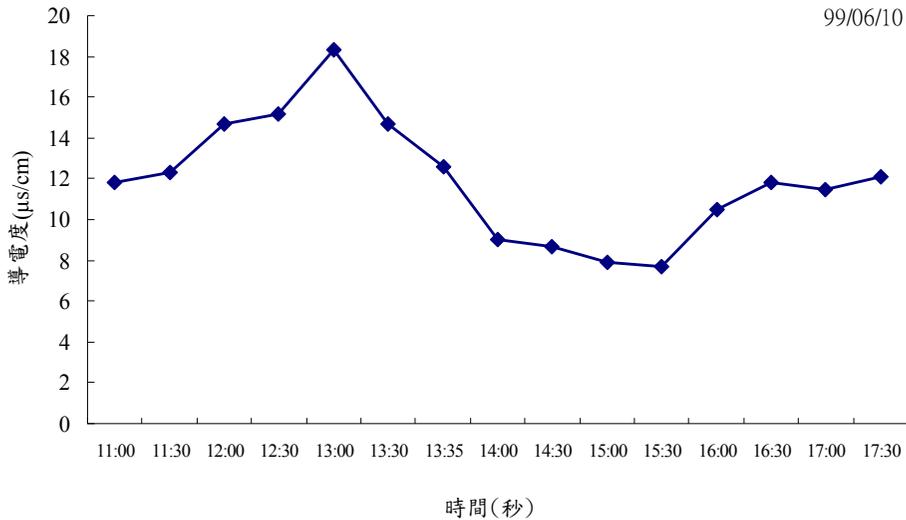


圖 11 第 2 階段程序 1 廢水回收測試紀錄 時間-導電度圖(99.6.10)

184 軟性電路板廢水回收探討

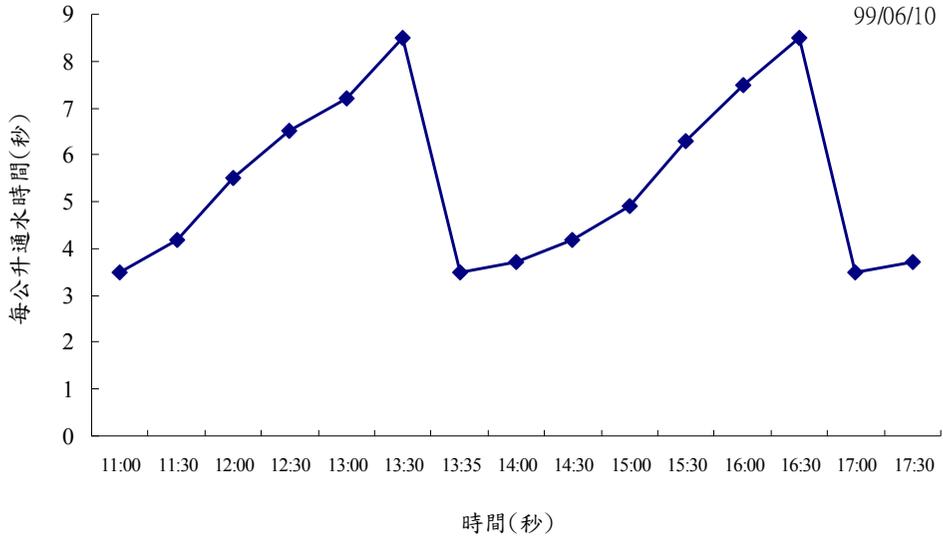


圖 12 第二階段程序 1 廢水回收測試紀錄 時間-通水時間圖(99.6.10)

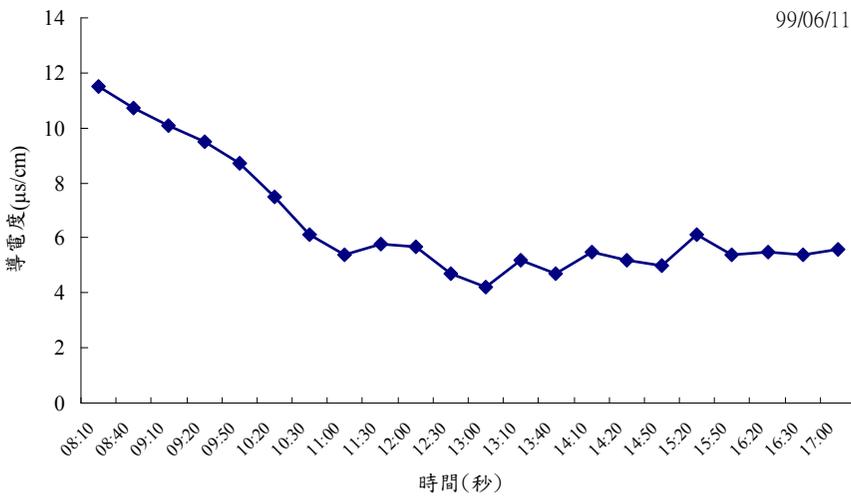


圖 13 第二階段程序 2 廢水回收測試紀錄 時間-導電度圖

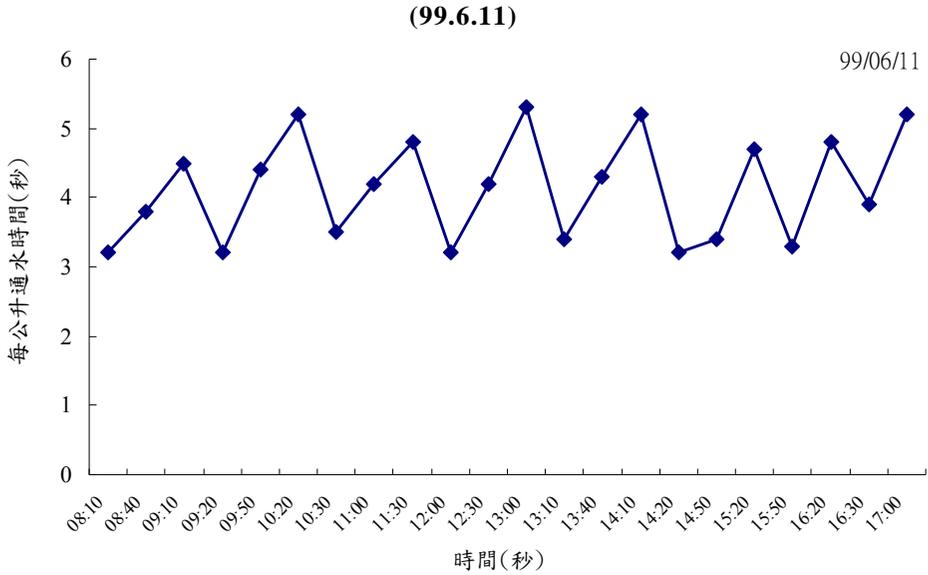
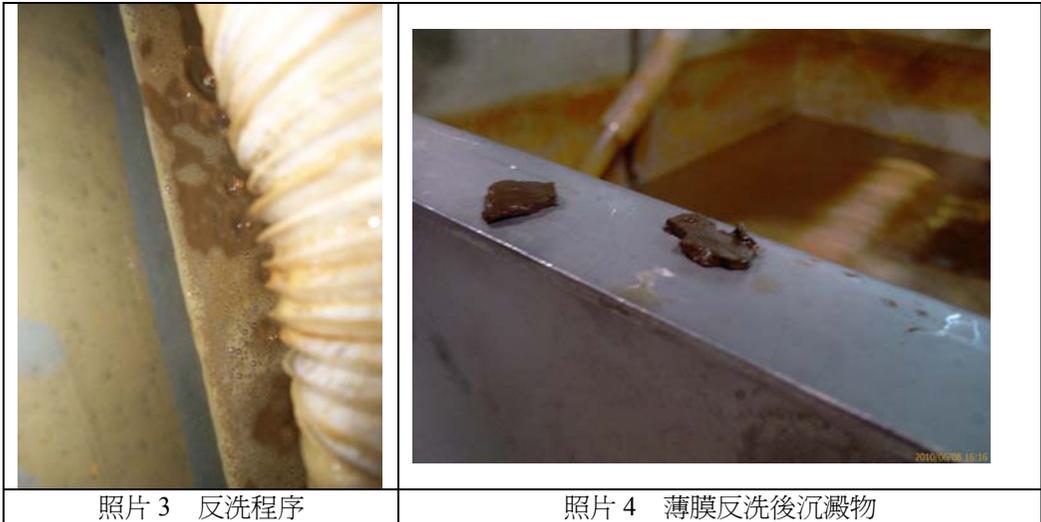


圖 14 第二階段程序 2 廢水回收測試紀錄 時間-通水時間圖(99.6.11)



經上述 2 個階段之測試，依據測試數據的結果將軟板製程廢水之回收再利用處理量成規劃如圖 15 所示，充分利用 UF 及 RO 在廢水回收功能之優勢，並配合分段加壓的方式減輕薄膜之負擔，增加廢水回收之穩定度。另在效益上因廢水進流水可直接進行回收再利用，處理水量可不用再經廢水處理，可省下廢水處理的費用；若能在先經分流分類回收再利用，更可降低廢水回收之處理成本，使廢水回收更符合經濟效益。

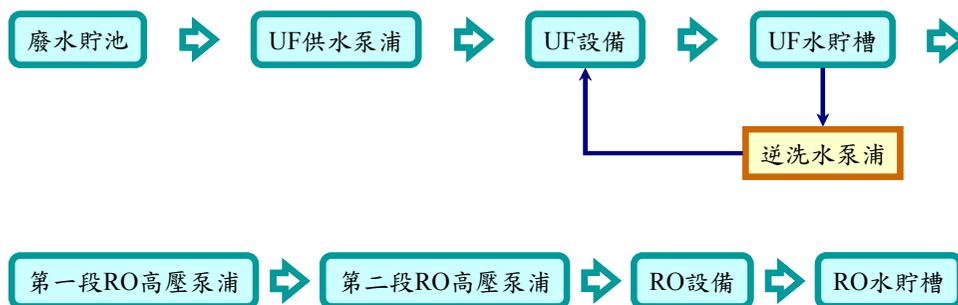


圖 15 設備處理流程圖

七、結 語

廢水回收使用水源為廢水處理廠之進流水已在軟板製程廢水得到驗證，同時部分染整業之廢水亦有同樣之回收再利用處理特性，本文在於提供不同之處理思維，或許可提供廢水回收可行之方向，以降低廢水回收操作之困擾並降低設備、操作及維護成本，提高廢水回收之效益。

八、參考文獻

- 1.經濟部工業局，「電子零組件製造業工業用水效率提升及回收再利用技術手冊」，92.12。

- 2.經濟部水利署，「用水計畫書查核服務及廢水回收率之檢討評估計畫」成果報告，97.12。
- 3.經濟部工業局，「工業用水效率提升計畫」成果報告，96.12。
- 4.TPCA，「電路板基礎製程簡介---軟板篇」。

一、前言

薄膜分離技術由於具有高效率、省能源、佔地小及操作簡單之優勢，其中，無機膜又具有耐高溫、耐高壓、耐化學腐蝕、分離性能佳及使用壽命較長等優點^[1,2]，因此，已逐漸被應用在各種產業製程及廢水處理。近數年來，同步電混凝/電過濾(EC/EF)技術相關應用之研究^[3-6]指出，標的廢水經 EC/EF 程序處理後，其回收水除了品質佳有利用的價值外，亦具有設備占地小、污泥產量少及操作成本低廉等優點。

國內某加工出口區內所包含的產業多元，其中亦涵蓋晶圓半導體製造業及印刷電路板製造業，從傳統產業以至於高科技產業，水的大量使用對於這些產業的水源供應、水費及巨額的廢水處理費用造成很大的負擔；而加工出口區內依排放標準之不同，處理後的水分別由海洋放流及陸地放流，其排水量約為 31,000 噸/日，若能加以回收再利用，將可節省相當可觀的水資源。但是，排放水中仍含有晶圓切割研磨之微細粉體顆粒，以及難分解的含氮有機物等污染物質，上述放流水回收再利用前必須將關切之污染物質加以去除。

因此，本研究嘗試以自製之管狀無機複合膜結合同步電混凝/電過濾程序，處理由加工出口區內之海洋放流水及陸地放流水，探討在不同的電場強度之下，對其濾液品質之影響，並且評估其處理後回收再利用之可能性。

二、實驗材料、方法與設備

1. 水樣來源

本研究所探討之海洋放流水及陸地放流水水樣，係採自於國內某加工出口區。

2. 管狀 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 複合膜之製備

本研究以擠出成形法自行製備管狀無機膜支撐體(材料為 Al_2O_3)，長度為 20 cm，內徑及外徑分別為 0.6 cm 及 1.0 cm，經高溫燒結後，其平均孔徑約為 1 μm 。接著，利用溶膠-凝膠(sol-gel)法配製鍍膜用之 TiO_2 漿液，然後利用浸漿成膜法(dip-coating)將浸鍍液披覆於 Al_2O_3 支撐體上，使形成過濾膜層，浸鍍後於室溫

下自然乾燥後再置入高溫爐進行煅燒(德國 Narterbherm 製，型號 S-19)，即可得到管狀 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 複合膜管，其膜層厚度約為 $12\ \mu\text{m}$ ，平均孔徑約為 $3.6\ \text{nm}$ 。

3. 同步電混凝/電過濾處理系統

本研究所使用之同步電混凝/電過濾模組裝置如圖 1 所示，此處理模組內為單一管狀外壓式(outside-in)無機濾膜，其陽極為鋁材質，陰極為不鏽鋼；陰、陽極間距 $1\ \text{cm}$ ，有效過濾面積為 $56.52\ \text{cm}^2$ 。此模組所需施加電場強度由直流電源供應器控制；進流速率以浮子流量計配合流量控制閥調整；過濾壓差則由高壓幫浦的壓力控制閥控制；過濾過程中，濃縮液則迴流至原液槽；而所收集之濾液，其重量則由連接個人電腦之電子天平每隔 20 秒連續監測記錄。

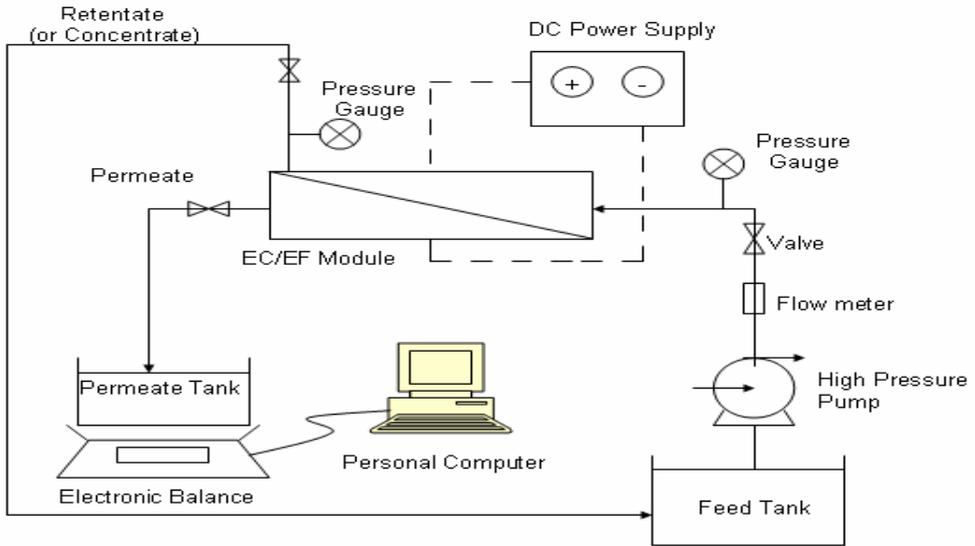


圖 1 同步電混凝/電過濾處理系統示意圖

4.其他實驗設備

- (1)高濃度奈米、界面電位、分子量量測儀：用以檢測廢水中懸浮固體粒徑大小，英國 Malvern 製，型號 Nano-ZS。
- (2)環境掃描式電子顯微鏡(ESEM)：用以觀測管狀無機複合膜微結構，捷克 FEI，型號 Quanta-200。

三、結果與討論

1.放流水基本性質分析

本研究所採集之海洋放流水及陸地放流水之水樣分析如表 1 所示，從表中可觀察出兩種水樣中之 pH 值約為中性，濁度、懸浮固體物(SS)及化學需氧量(COD)皆不高，但是溶液中總固體物(TS)皆大於 1,500 mg/L，顯示水樣中之污染物主要為溶解性物質；此外，兩種水樣中亦含有不少懸浮固體物，其界達電位分別為-13.70 mV 及-2.26 mV。

表 1 海洋放流水及陸地放流水之水質特性分析

	海洋放流水	陸地放流水
pH	7.18	7.35
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2,290	1,170
Turbidity (NTU)	27.1	30.5
TS (mg/L)	1535	1712
SS (mg/L)	20.0	15.0
COD (mg/L)	60	20
NO_3^- (mg/L)	6.53	3.75
NO_2^- (mg/L)	2.39	0.63
Cl^- (mg/L)	96.57	88.73
SO_4^{2-} (mg/L)	113.65	230.18
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	11.44	3.65

水樣中顆粒之粒徑分析利用粒徑分析儀測定，其結果如圖 2 及圖 3 所示，平均粒徑分別為 2,790 nm 及 4,640 nm，且含有部份的奈米級顆粒。

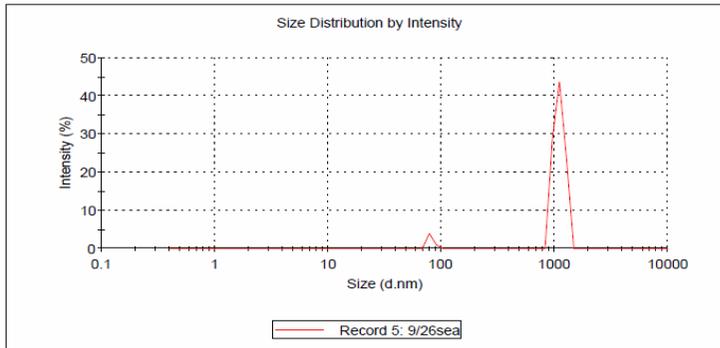


圖 2 海洋放流水中顆粒之粒徑分佈圖

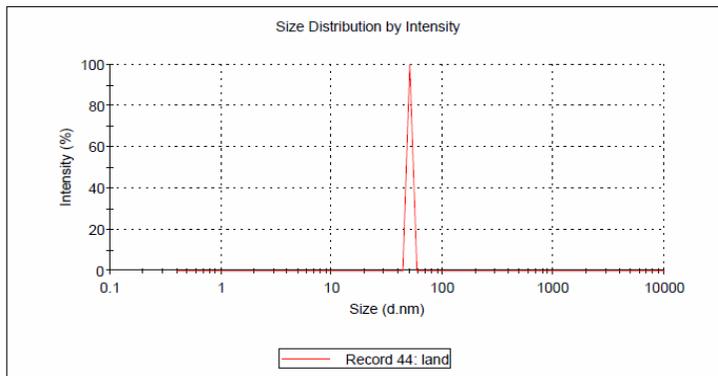


圖 3 陸地放流水中顆粒之粒徑分佈圖

2. 同步電混凝/電過濾模組之操作條件探討

本研究主要探討電場強度對濾液品質及濾液通量之影響，實驗方法為固定處理系統之過濾壓差(294 kPa)及掃流速度(3.33 cm/sec)，而改變電場強度 0 V/cm、10 V/cm、20 V/cm、30 V/cm 及 40 V/cm，隨著實驗的進行記錄時間與濾液通量之變化，其結果如圖 4 及圖 5 所示。

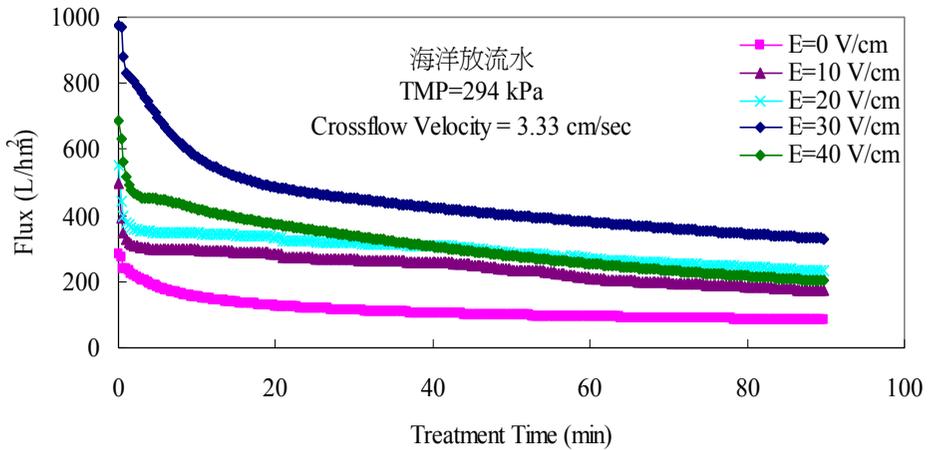


圖 4 海洋放流水經 EC/EF 其濾液通量隨施加電場強度與處理時間之關係圖

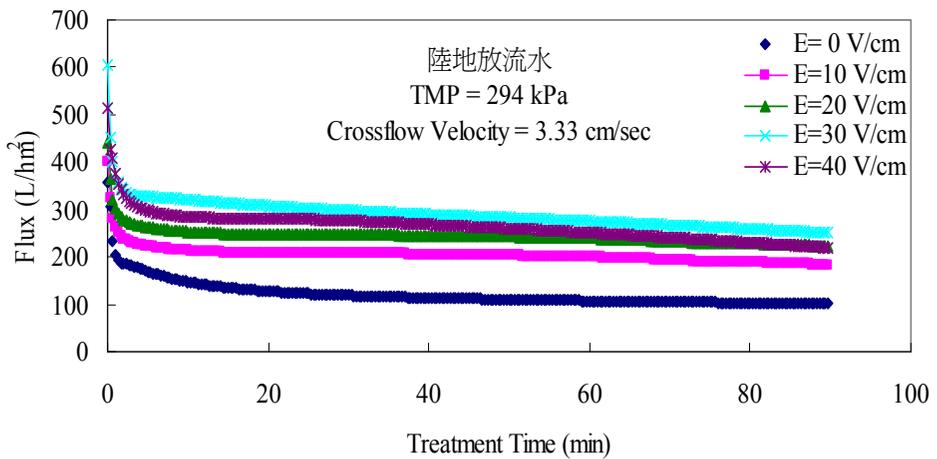


圖 5 陸地放流水經 EC/EF 其濾液通量隨施加電場強度與處理時間之關係圖

根據實驗結果顯示(見圖 4 及圖 5)，提升電場強度對濾液通量的增加有正面效果。由上述二圖中可以觀察出，濾液通量一開始皆具有一極大值，接著會隨處理時間而下降，約在第 20-30 分鐘處濾液通量會達到穩定。此現象是因為一開始濾餅尚未累積，故濾液通量極大，而隨著時間增加，濾餅會不斷增厚，但進流水在薄膜表面之進流速率，會產生剪應力作用而不利於濾餅之形成，故當濾餅之累積效應與清除效應達到平衡，濾餅厚度及濾液通量即達穩定^[3]。

圖 4 及圖 5 顯示，隨著施加電場強度之增加，濾液通量也會增加，當電場強度增加到 30 V/cm 時，會有最大的濾液通量，此電場強度即為其臨界電場強度，當所施加之電場強度超過其臨界電場強度時，濾液通量將不再增加。

在濾液品質方面(見表 2 及表 3)，針對 COD、濁度、SS 等項目，在不施加電場的情況下，僅靠著薄膜過濾就有良好的效果，在施加電場之後，濾液品質更加有效提升；在硝酸鹽、亞硝酸鹽及氨氮的部份，可以由表 2 及表 3 觀察出其去除率明顯會隨著電場的施加而增加。

表 2 海洋放流水經 EC/EF 處理後之濾液水質分析

	Test S1	Test S2	Test S3	Test S4	Test S5
pH	7.43	7.85	8.06	8.49	8.63
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,603	1,806	1,823	1,854	1,953
Turbidity (NTU)	0.80	0.52	0.58	0.90	1.04
TS (mg/L)	1,150	1,120	1,083	1,066	1,008
SS (mg/L)	<1	<1	<1	<1	<1
COD (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
NH ₃ -N (mg/L)	8.22	2.54	0.89	0.01	0.01
NO ₃ ⁻ (mg/L)	3.09	1.06	0.84	0.33	0.28
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.13	0.11	0.08	0.08	0.08
Cl ⁻ (mg/L)	96.40	90.03	88.27	85.22	84.26
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	98.42	96.59	96.33	96.25	95.45

註：S1-S5 測試組別其操作條件分別為電場強度 0 V/cm、10 V/cm、20 V/cm、30 V/cm 及 40 V/cm；過濾壓差及掃流速度分別為 294 kPa 與 3.33 cm/sec。

表3 陸地放流水經EC/EF處理後之濾液水質分析

	Test L1	Test L2	Test L3	Test L4	Test L5
pH	7.78	8.36	8.75	9.26	9.33
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,226	1,672	1,806	1,866	1,953
Turbidity (NTU)	0.62	0.58	0.36	0.79	0.82
TS (mg/L)	1,366	1,106	1,159	1,198	1,257
SS (mg/L)	<1	<1	<1	<1	<1
COD (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
NH ₃ -N (mg/L)	2.31	0.85	0.36	0.01	0.01
NO ₃ ⁻ (mg/L)	2.07	1.95	1.88	1.88	1.56
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01
Cl ⁻ (mg/L)	78.98	72.56	71.23	70.52	68.26
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	201.96	182.45	177.45	176.64	170.35

註：L1-L5 測試組別其操作條件分別為電場強度 0 V/cm、10 V/cm、20 V/cm、30 V/cm 及 40 V/cm；過濾壓差及掃流速度分別為 294 kPa 與 3.33 cm/sec。

由表2及表3亦可以觀察出，在氯離子及硫酸根離子的部份，並不如其他水質項目具有高去除率。因此，本研究進一步探討過濾壓差的改變是否會提高氯離子及硫酸根離子之去除率。由圖6及圖7可以觀察出，當電場強度皆為30 V/cm及掃流速度為3.33 cm/sec時，將過濾壓差由294 kPa調降為98 kPa，濾液通量雖約降為原來的一半，但其濾液品質均有所提升(見表4)，尤其在陰離子方面，在降低過濾壓差後，氯離子及硫酸根離子之去除率更提升至70 %左右。

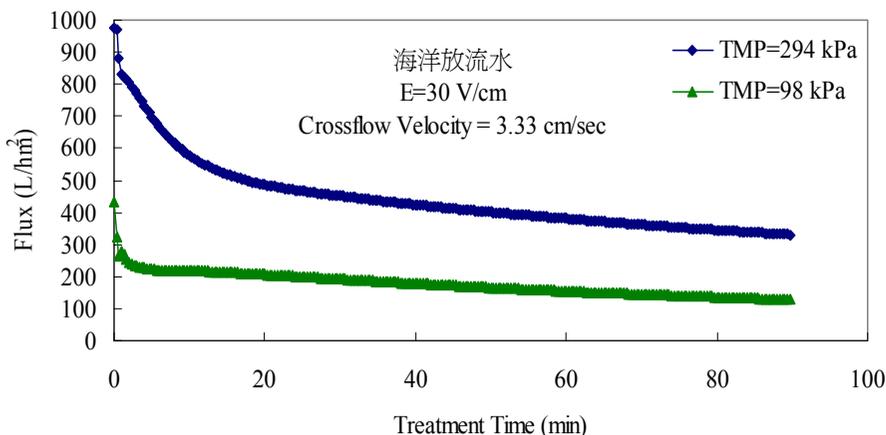


圖 6. 海洋放流水經 EC/EF 其濾液通量隨過濾壓差變化與處理時間之關係圖

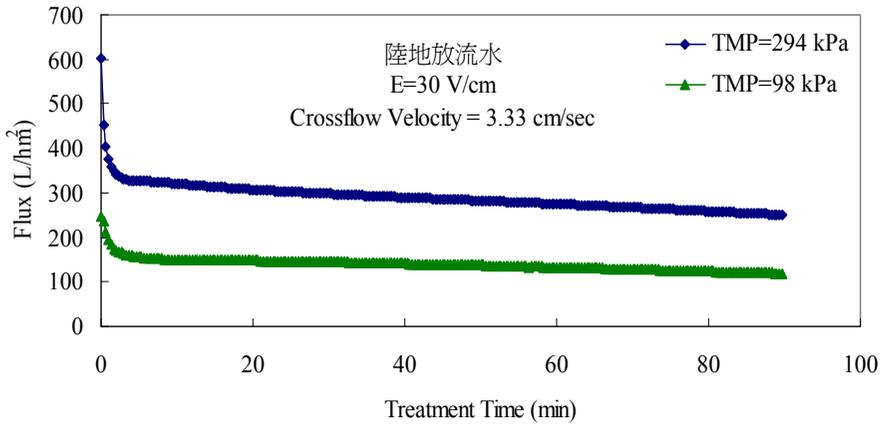


圖7. 陸地放流水經EC/EF其濾液通量隨過濾壓差變化與處理時間之關係圖

表4 海洋放流水及陸地放流水經EC/EF處理後之濾液水質分析

	海洋放流水		陸地放流水	
	Test S4	Test S4-1	Test L4	Test L4-1
pH	8.49	8.76	9.26	8.72
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,854	1,803	1,866	2,070
Turbidity (NTU)	0.90	0.31	0.79	0.60
TS (mg/L)	1,066	960	1,198	1,020
SS (mg/L)	<1	<1	<1	<1
COD (mg/L)	<5	<5	<5	<5
NH ₃ -N (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.33	0.14	1.88	0.01
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.08	0.06	0.02	0.01
Cl ⁻ (mg/L)	85.22	27.92	70.52	31.20
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	96.25	35.70	176.64	42.80

註：S4 及 L4 測試組別之操作條件皆為電場強度 30 V/cm、掃流速度 3.33 cm/sec 及過濾壓差 294 kPa；S4-1 及 L4-1 測試組別之操作條件皆為電場強度 30 V/cm、掃流速度 3.33 cm/sec 及過濾壓差 98 kPa。

綜合以上研究結果顯示，管狀TiO₂/Al₂O₃複合膜結合同步電混凝/電過濾在電場強度30 V/cm的操作條件下，可得到不錯的濾液通量及濾液品質，而將過濾壓差減少至98 kPa更能提升其濾液品質，在此操作條件下，濾液之品質可達到自來水水質之標準，如表5所示。

表5 海洋放流水及陸地放流水經EC/EF處理後其水質與自來水水質標準比較

	自來水水質標準	Test S4-1	Test L4-1
Turbidity (NTU)	4.00	0.31	0.60
NH ₃ -N (mg/L)	0.50	0.01	0.01
NO ₃ - (mg/L)	10.00	0.14	0.01
NO ₂ - (mg/L)	0.00	0.06	0.01
Cl- (mg/L)	250.00	27.92	31.20
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	250.00	35.70	42.80

註：S4-1 及 L4-1 測試組別分別代表海洋放流水及陸地放流水經 EC/EF 後之處理水，EC/EF 之操作條件皆為電場強度 30 V/cm、掃流速度 3.33 cm/sec 及過濾壓差 98 kPa。

四、結 語

本研究利用自行製備之管狀 TiO₂/Al₂O₃ 複合膜結合同步電混凝/電過濾程序 (EC/EF) 處理國內某加工出口區之海洋放流水及陸地放流水，並藉由探討電場強度及過濾壓差對處理成效上之影響，以整合出適合處理此兩種放流水水樣之最佳操作條件，綜合以上之測試結果可歸納出下列結論：

1. 利用自行製備之管狀 TiO₂/Al₂O₃ 複合膜結合同步電混凝/電過濾程序處理海洋放流水及陸地放流水，皆在臨界電場強度 30 V/cm、掃流速度 3.33 cm/sec 及過濾壓差 294 kPa 的操作條件下，有最大的濾液通量，且其濾液品質佳。濁度、懸浮固體物、氨氮及亞硝酸根離子的去除率皆可達 95% 以上，COD 則有 75% 以上的去除效果，硝酸根離子亦有 50% 以上的去除率。
2. 本研究發現，相較於過濾壓差 294 kPa 的操作條件，若降低 EC/EF 系統之過濾壓差至 98 kPa，其濾液通量約減為一半，但卻可進一步提升濾液水質，提高上述污染物之去除率，尤其是可大幅降低氯離子及硫酸根離子之濃度，處理後之濾液水質已符合自來水水質標準，可加以回收再利用。
3. 本研究利用國內自行開發之同步電混凝/電過濾程序結合自行製備之管狀 TiO₂/Al₂O₃ 複合膜，在不添加任何化學藥劑之情況下，將國內某加工出口區之海洋放流水及陸地放流水予以再處理，成功地達到放流水回收再利用之目的，值得推廣並予以工程實現。

五、誌 謝

本研究承蒙經濟部水利署補助研究經費(計畫編號：MOEAWRA0970313)，特此致上謝忱。

六、參考資料

1. Bhave, R. R., *Inorganic Membranes: Synthesis, Characteristics and Applications*, Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1991.
2. 楊金鐘，淺談無機濾膜及其於廢水處理之應用，*化工技術*，第 16 卷，第 7 期，pp. 174-185，2008。
3. 楊金鐘，利用電混凝與電過濾同步處理暨回收含奈米微粒廢水之研究，*工程科技通訊*，第 86 期，pp. 001-005，2006。
4. Yang, G. C. C. and Tsai, C. M., "Performance Evaluation of a Simultaneous Electrocoagulation and Electrofiltration Module for the Treatment of Cu-CMP and Oxide-CMP Wastewaters," *Journal of Membrane Science*, Vol. 286, Nos. 1-2, pp. 36-44, 2006.
5. 張原豪，自製管狀氧化鈦/氧化鋁複合膜同步電混凝/電過濾處理化學機械研磨廢水之效能評估，碩士學位論文，國立中山大學，高雄市，2008。
6. 楊金鐘，顏嘉亨，同步電混凝/電過濾程序處理 TFT-LCD 廠綜合廢水，*產業綠色技術研討會論文集*，pp. 181-194，2008。