

薄膜程序

回收石化產業放流水之應用

◎執筆 盧文章●楊子岳

摘要

本篇主要是以微過濾結合逆滲透系統之薄膜程序作為石化產業放流水回收之測試模組，經由模廠實地驗證，評估其適用性。經 6 個月長期之實廠測試結果顯示：MF 薄膜程序作為逆滲透之前處理，可有效降低逆滲透薄膜之阻塞，當廠方排放水之水質發生異常時，常造成 MF 薄膜阻塞，以氫氧化鈉及次氯酸鈉之混合液作為化學清洗藥劑進行薄膜化學清洗，能有效清除阻塞物，恢復薄膜流通量，經薄膜表面阻塞物之元素分析，發現阻塞物以有機物為主。在 RO 薄膜程序方面，得到於測試過程中並無明顯阻塞情況發生，且經處理後之回收水化學需氧量小於 10mg/L，導電度小於 100 μ S/cm，評估可將此回收水作為冷卻水塔之補充水。最後，本篇亦針對石化廠排放水回收再利用流程提出完整的系統規劃及建議，作為業者進行石化廢水回收再利用時之參考。

關鍵字：微過濾、逆滲透、回收再利用、石化業、放流水

前言

衆所周知，水資源短缺與水質惡化，已成為我國產業發展主要瓶頸之一。行政院經建會配合國家六年建設計畫，已將水資源開發技術列為「八大關鍵工業技術」，並將清潔生產、工業減廢與水污染防治設備開發列為「十大新興工業」之污染防治工作發展重點。因此，水資源利用之「開源」、「節流」、「回收」與「防污」為國家邁入廿一世紀之重要研發課題。

鑑於國內水資源缺乏問題日益嚴重，新增水源開發愈來愈不可能，而且成本高、耗時長、變數大，加上「自來水費」、「污水排放費」將提高及工業用水平均 65% 之回收率之政策推動下，產業界除了加強推動工廠節水管理外，已逐漸思考水回收再利用之可行性。在水回收方面，如能將廢水依其性質分流回收，可降低其困難度及提高回收率，然國內除部分新興產業（如電子業、半導體業）及新設立之工廠較易進行分流回收處理外，大部分傳統產業或較為老式之工廠並無分流之管線，增加分流回收之困難度。因此，管末廢水回收即成為水回收考慮的方案之一。

管末廢水水質相當複雜，隨著產業的特性而異，就算是相同產業其管末廢水之水質特性亦未必一致。因此，對於

廢水回收再利用之規劃必須視各廠而訂，不能一概而論，否則將導致失敗的回收，造成損失。一件成功的回收方案需全面考慮到經濟性、適用性、水回用點及濃縮廢液處理等方面。於衆多回收技術中，薄膜程序屬較新的技術，所謂薄膜程序包括有微過濾(Microfiltration, MF)、超過濾(Ultrafiltration, UF)及逆滲透(Reverse Osmosis, RO)等程序，在國外已有應用薄膜程序回收廢水成功之案例，而國內則正處於起步的階段，因此本篇應用薄膜程序於石化產業排放水回收再利用，並進行模廠實地操作測試，評估其可行性。

薄膜程序之簡介

薄膜程序運用於水處理已日趨普遍，其中較為常用之薄膜程序包括 RO、UF 及 MF，這些薄膜程序皆以壓力為驅動力，並利用薄膜孔徑大小或薄膜表面之特性進行溶劑與溶質之分離，以達處理或純化水質之目標，表 1 為各薄膜程序可去除之物種⁽¹⁾。

(一) 薄膜程序

1. 微過濾與超過濾

微過濾主要是以孔徑大小來分離水中的懸浮固體物質，微過濾的薄膜孔徑大小通常在 $0.05\ \mu\text{m}$ ~ $5\ \mu\text{m}$ 之間，因此

表 1 各薄膜程序可去除之物種⁽¹⁾

薄膜程序	平均薄膜孔徑大小 (nm)	目標污染物
MF	200	懸浮固體物、濁度、致病菌(隱孢子蟲、梨形鞭毛蟲、細菌)
UF	2-50	大分子有機物、病毒、膠體、蛋白質
NF	<2	色度、有機農藥、金屬離子
RO	<1	溶解性固體物、硝酸根、放射性物核種

對於水中較大之懸浮粒子及微生物有良好的去除效果，通常MF 薄膜程序之操作壓力介於30~300kPa 之間，屬低壓操作的薄膜程序。MF 通常被使用於去除懸浮固體物(SS)及微生物。根據Letterman⁽²⁾研究顯示，經MF 處理後之濾液，對於2 μm 以上之粒子有99% 以上之去除效果，其濁度小於0.1 NTU；Olivieri 等⁽³⁾以0.2 μm 之MF 處理飲用水，約可去除15% 之有機物(Total Organic Carbon/TOC)；Yausa⁽⁴⁾研究以混凝配合MF 薄膜程序用於飲用水之處理，對於濁度有相當的去除效果。另外，MF 配合RO 薄膜程序於飲用水處理或於生活污水之回收運用，亦有不錯之處理效果⁽⁵⁾。

超過濾的過濾機制與MF 相同，主要為篩除機制，但UF 薄膜孔徑較MF 略小，操作壓力在50~700kPa 之間。超過濾程序的應用範圍包含化學製程(如超純水)、食品製程。其中在廢水回收處理應用上，可回收利用潔淨之濾液(permeate)及高濃度濃縮液，此在汽車烤漆工業方面應用廣泛，除可回收高價值之染漆原料(屬濃縮液)，又可節省用水。UF 也可應用在減量污泥(或固體)上，以減少污泥最終處置之問題。

MF 或UF 程序常作為RO 或極微過濾(Nanofiltration, NF)之前處理上，RO 或NF 已被證實對於溶解性離子有相當之分離效率，在回收重金屬或製程用水，也具有相當之經濟效益，然而因RO 或NF 在使用上常因阻塞而造成操作成本增加，因此以MF 或UF 薄膜程序作為RO 或NF 之前處理，處理成效極為顯著。

縱然MF 或UF 在水處理應用上逐漸廣泛，唯在使用上最大關鍵在於薄膜阻

塞及材質劣化的問題，其中以薄膜阻塞為薄膜程序在應用上受限的主因。造成材質劣化原因有強氧化劑(如：氯)、強酸或強鹼等；薄膜的主要阻塞物(foulants)包括微粒子(particulates)、膠體物質、有機物、氧化物、微生物及無機鹽類；MF 或UF 程序在不同的應用上，有不同之阻塞物質，在地表水處理應用上，微粒子、膠體粒子、有機物及微生物為主要之阻塞物，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⁽⁶⁾。

2. 逆滲透

逆滲透為上述薄膜程序中薄膜孔徑最小者，其薄膜孔徑在0.1nm 以下，因RO 孔徑甚小，故改以分離分子量(Molecular Weight Cut-off, MWCO)表之，通常RO 之MWCO 小於200(道爾敦Dalton, D)。RO 其操作壓力在800~8,000kPa 之間，於溶液中溶質濃度較高者(如：海水之TDS 約為35,000mg/L)，其操作壓力可能更高，以克服於分離時，因半透膜兩側之濃度差所造成滲透壓之阻力。由於RO 之薄膜孔徑甚小，因此RO 對於溶解離子有分離之效果。對於二價以上之高價離子，如： Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 等，有99% 以上之去除率，對於單價離子，如： Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 亦有95% 以上之去除效果。由於RO 對於物種有極佳之去除率，於水純化或飲用水處理上極為廣泛，而於廢水回收/回用上，薄膜程序亦逐漸受到重視。唯薄膜在操作過程中，常因薄膜阻塞造成產率降低或增加操作成本，以及濃縮液處理或處置等問題，是RO 在發展上必須克服之關鍵。一般來說，解決薄膜阻塞之問題常需有

良好之前處理。楊氏⁽⁷⁾以UF爲NF之前處理能有效改善NF之阻塞率。工研院能資所於染整業排放水回收再利用之研究中⁽⁸⁾，以線上混凝(in-line coagulation)配合多介質砂濾爲RO系統之前處理，亦有不錯之處理效果，並且有省空間及經濟之優點。在濃縮廢液之排放方面，世界各國將朝著減少濃縮廢液之排放以達零液體排放(Zero Liquid Discharge)之目標。Buhrmann⁽⁹⁾利用螺旋式(spiral)RO處理礦酸與冷卻水塔排放之混合工業廢水，將處理後之清水回用於冷卻水塔，而濃縮廢液部分則利用真空濃縮法處理，可接近「零排放」之目標。Rautenbach⁽¹⁰⁾等則以RO/NF高壓之薄膜程序，利用NF薄膜可將單價及二價離子分離之特點，使得整系統回收率提高至97%以上，濃縮廢液則以結晶蒸發法處理，以減少在濃縮廢液排放對環境之衝擊。

近幾年來，NF薄膜程序亦逐漸應用於水處理上。NF薄膜程序亦屬以壓

力爲驅動力，操作壓力較RO略低，介於350~1000 kPa之間，有較省能源之優點。NF對於高價離子有95%以上之去除率，對於單價離子約有80%以上之去除效果，顯示NF薄膜程序對物種分離能力亦佳。NF薄膜程序常運用去除鈣、鎂離子，具有軟化水質之功效。

(二)薄膜組件

薄膜技術運用於工業使用上常見各種薄膜組件(Module)包括1.管狀式(Tubular) 2.中空絲(Hollow fibers) 3.平板式(Plate unit) 4.螺旋式(Spiral-wound)(如圖1所示)。各薄膜組件特性之比較列於表2，分述如下：

1. 管狀式

管狀式薄膜組件之管內徑通常在12.5mm~25mm之間，操作時水力流況爲擾流(turbulent flow)，流速在2~6m/s，其雷諾數(Reynolds numbers)需大於10,000，以增加牽引力(drag force)減少薄膜阻塞之發生，因此可承受較大的

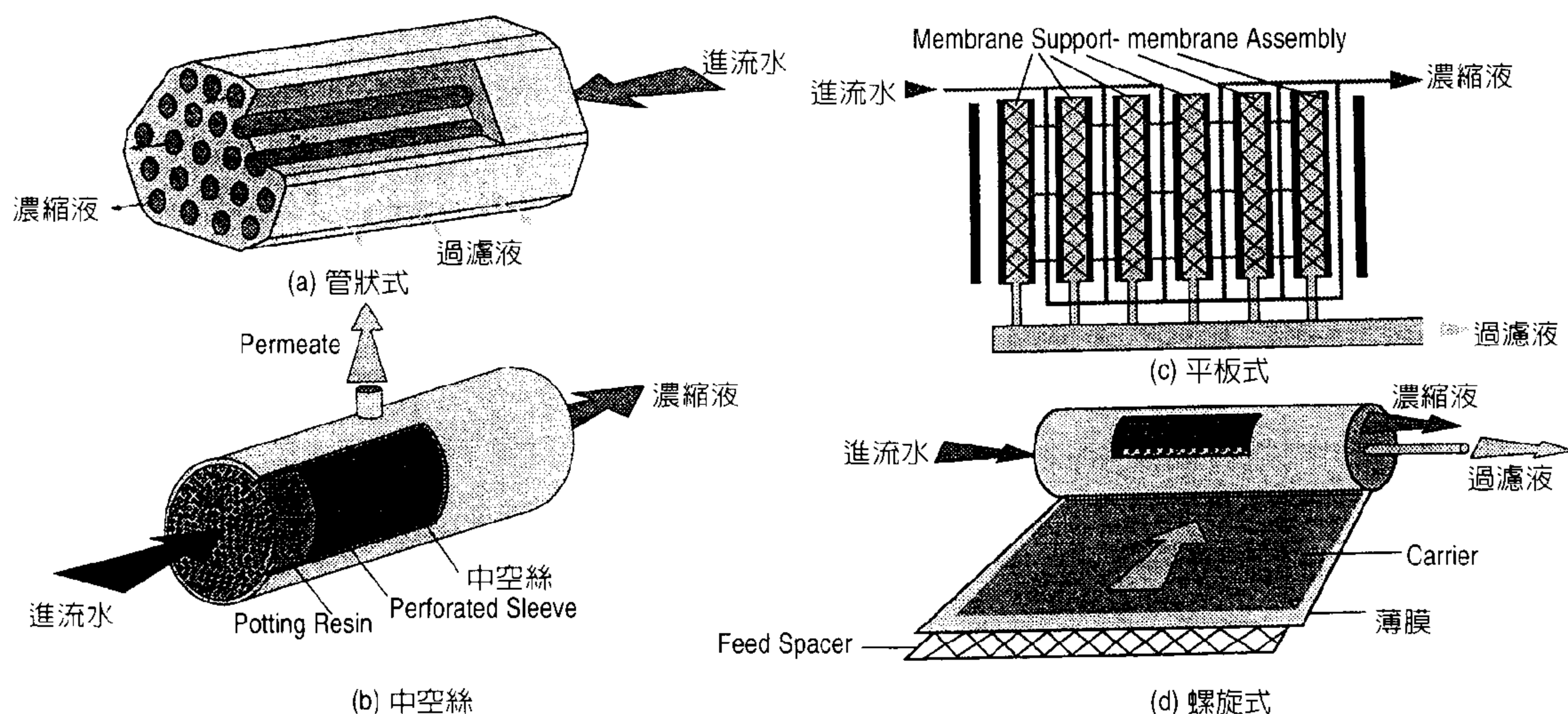


圖1 各薄膜組件圖

表 2 薄膜組件特性之比較

薄膜組件	薄膜組件特性					
	單位體積膜面積 (m ² /m ³)	建造成本 (美元/m ²)	更換薄膜費用 (美元/m ²)	清洗效果	水力條件	耗能
管狀式	<200	1,300~1,500	280~700	優	優	高
中空絲	1,000~10,000	1,000~1,500	600	可	可	低
平板式	100~400	500~1,000	50~100	優	佳	略高
螺旋式	700~1000	800~1,000	40~100	可	可	低

粒徑微粒子，並且易於清洗之優點。管狀式於 4 種薄膜組件單位體積中具有最低薄膜過濾面積，因此管狀式之設備需較大之空間。

2. 中空絲

中空絲薄膜構造比管狀式內徑較小，約在 0.2~3mm 之間，每一匣(cartridge)中通常含 50~3000 個中空絲，於各式薄膜組件中單位體積之薄膜表面積為最高，中空絲內操作流速在 0.5~2.5m/s，雷諾數在 500~3,000 之間，屬層流(laminar flow)之範圍，但對於膠體或懸浮固體物較為敏感。

3. 平板式

平板式薄膜組件之單位體積之薄膜面積低，因此需有較大之設置空間。操作時，進流面(feed)含有 spacer 時，可增加水流之擾動，因此薄膜阻塞潛能較低。除此之外，更換及清洗薄膜容易為平板式之優點。

4. 螺旋式

螺旋式薄膜之組件內含 feed spacer 與 carrier，feed spacer 厚度約 0.76~1.1mm，主要為增加紊流以減少濃度極化(concentration polarization)之現象，其掃流速度約在 10~60

cm/sec，雷諾數約 100~1,300 之間，carrier 為濾液流動之通道，最後集中於中央之收集管中。此組件具有最低之建造及操作成本，並且具更換薄膜簡易之優點。

(三)薄膜阻塞指數

薄膜阻塞會造成薄膜產水率隨著時間而減少，常發生於薄膜前處理不良之情況下，主要是水體中之膠體、懸浮固體、大分子有機物、金屬沈積物等阻塞薄膜表面，致使清水無法通過薄膜所致，薄膜阻塞是薄膜程序在應用上的最大問題。因此目前有許多針對 RO 或 NF 評估薄膜阻塞之參數(如表 3)，常用的有：SDI(Silt Density Index)、MFI(Modified Fouling Index)、MPFI(Mini Plugging Factor Index)及 LSI(Langelier Saturation Index)，其中 SDI、MFI 及 MPFI 為評估膠體或懸浮固體之主要參數，其物理意義表示在薄膜表面上形成濾餅程度的大小。最近亦有研究指出，利用水中微粒子分析儀(particle counter)量測作為膠體阻塞指標之一⁽¹¹⁾。

LSI 即是評估金屬化物的沈積性或

表 3 各阻塞參數之限值⁽¹¹⁾

阻塞參數	範圍	薄膜程序
MFI	0~2 sec/L ²	RO
	0~10 sec/L ²	NF
MPFI	0~3×10 ⁻⁵ L/sec ²	RO
	0~1.5×10 ⁻⁴ L/sec ²	NF
SDI	0~2	RO
	0~3	NF
LSI	<0	RO
	<0	NF

腐蝕性傾向，為避免薄膜在操作上沈積而阻塞薄膜，因此常控制於 LSI<0 之情況，當 LSI>0 時表示將有碳酸鈣析出，當 LSI<0 表示水中以溶解性之鈣離子及碳酸根離子存在，因此為防止碳酸鈣沉積於薄膜上，LSI 為薄膜程序操作上判定碳酸鈣沉積與否之重要指標。傳統處理程序中常以鋁鹽作為混凝劑，而鋁鹽在高 pH 以不溶性之膠體存在，進入薄膜系統中會阻塞薄膜，因此為控制鋁鹽之問題，常將進流水之 pH 降至 4.5 左右以確保鋁鹽以溶解型態存在⁽¹²⁾。

當薄膜於操作中遭受到阻塞時，各種不同形式之阻塞可能有不同的影響及解決對策，阻塞物可分為積垢、膠體、微生物及有機物等⁽¹³⁾。

石化廢水回收實廠驗證

(一)測試工廠簡介

本次測試所選定之石化廠位於中部地區，該廠區內共計有 12 條生產工廠，由於每條生產工廠製造之產品各異，產品種類眾多，且部分生產工廠還處於試車階段，排放廢水時間及水質無法掌控，使得所產生之廢水水質呈多樣

且變化性極大。該廠綜合廢水處理廠處理之廢水包含了 12 廠區所產生廢水、生活污水及冷卻水塔排放廢水，預估最終排放量將達每日 12,000m³ 以上。雖廢水水質成份變化極大，但經調和槽、加壓浮除槽（浮油槽）、中和槽、曝氣槽、脫氣槽、終沈池、第二階段曝氣槽、脫氣槽、終沈池、加壓浮除槽、中和槽及砂濾槽等處理單元處理後之水質均能達到 87 年放流水標準。該廠為配合政府推動節水及減廢之政策，擬定管末廢水回收計畫，並與工研院能資所共同合作以薄膜程序進行末端廢水回收之實廠測試，評估回收水回用至該廠區適合之用水處，減少該廠之用水量，達到產業永續發展之目標。

(二)管末廢水回收測試流程

對於管末廢水回收可使用的高級處理有許多選擇，如 RO 膜、電透析及離子交換等。在此，以石化廢水之水質特性分析，選擇之處理系統必須有效去除有機物、離子及懸浮固體物，經過經濟性、穩定性及操作維護之方便性等之考量後，擇定 RO 膜系統為主要污染物去除程序，用以去除水中之有機物及離子，以降低處理後水中之有機物及水中溶解性之物種。由於 RO 薄膜系統之運用通常需有良好之前處理，故評估 MF 薄膜為 RO 薄膜程序之前處理，以延長 RO 薄膜之使用年限，有效回收管末廢水。圖 2 為管末廢水回收測試流程示意圖，廠區綜合廢水經生物處理系統後排至放流池中，模廠測試所使用的水源即由放流池中抽取之排放水，先經 MF 薄膜前處理後，再經 RO 薄膜程序進行處理，表 4 為測試使用薄膜之基本資料。

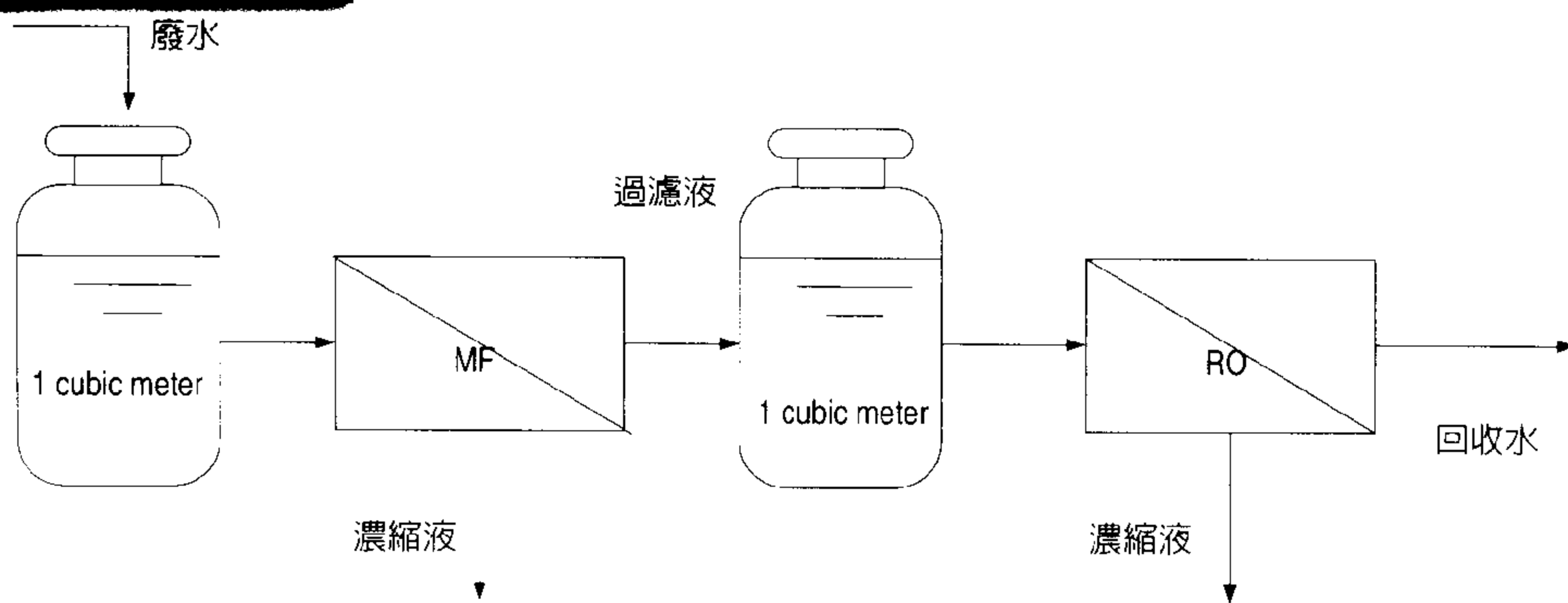


圖2 管末廢水回收流程示意圖

表4 測試薄膜之基本資料

項 目	分 離 程 序	
	MF	RO
薄膜廠家	Asahi Chemical	Dow Chemical Company
薄膜型號	USV-3003	BW30-2540
薄膜材質	PVDF	TFC
薄膜組件	Hollow Fiber	Spiral Wound
薄膜有效面積/Module (m ²)	7	2.98
過濾方式	Outside-in	—
薄膜孔徑 (μm)	0.1	—
最大操作壓力 (MPa)	0.3	4.1
最大承受 SDI	—	5
pH 操作範圍	1~10	2~11

模廠測試採用旭化成公司製造之MF薄膜，屬中空絲薄膜組件，薄膜孔徑為0.1 μm，薄膜為高抗氧化劑及耐酸鹼值之PVDF材質，適合用於多變異性之廢水水質，系統為全自動化之試驗模組。針對MF薄膜系統，操作程序包含有三個流程：過濾、逆洗及沖洗。三個流程進行一次稱之為一個循環。進行過濾時水流方式為外向內(outside-in)，系統操作採用定流量模式，其設計產水

量為1m³/hr。系統附有自動逆洗功能，視水質情況可設定自動逆洗時間。

逆滲透系統則採用Dow Chemical公司生產之BW30-2540 RO複合薄膜(TFC)，系統設計之操作壓力約在1~2MPa之間，對於氯化鈉之去除率為98%(在單一膜管回收率15%，操作壓力1.6MPa及濃度2,000 mg/L下)，對於溶解性離子有良好之去除效果，可作為分離之主程序。

(三)結果與討論

1. MF 薄膜系統操作

MF 薄膜系統設定於 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 之定流量情況下操作，當系統差壓值超過 0.2MPa 或上升速度太快時，則需停止操作，進行化學清洗去除阻塞物質，當恢復其過濾通量後再繼續操作。依進水之水質變動，系統操作回收率在 $85\sim 93\%$ 之間，濾過液之 SS 已極低，濁度亦在 0.1NTU 以下，進流水之 SDI 值為最大值 6.67 而濾過液則在 4 以下，濾過液之 SDI 值雖符合 RO 系統進流水 $\text{SDI}<4$ 之規範，但對於 MF 薄膜系統之濾過液而言，其 SDI 值仍屬偏高，由於 SDI 值的高低代表膠體粒子的多寡，依濾過液之濁度及 SS 含量觀之，顯示濾過液中之懸浮膠體粒子數量已極低，因此由膠體粒子所造成 SDI 值增高之可能性減少。另外，由圖 3 可約略看出當 MF 濾液 COD 濃度較高時，則 MF 濾過液之 SDI 值有升高之現象，然兩者之相關性並非相當明顯，由此推測 SDI 值偏高可能是 MF 濾過液中之有機物於 SDI 量測時吸附在 0.45

μm 濾膜上所造成。MF 薄膜對於 COD 之去除率約在 $1\sim 70\%$ 之間，去除範圍相差甚大，此可能是因為 SS 上吸附有機物，當 SS 大量被去除時，一起將 COD 加以去除。

在 MF 測試過程中，曾數次因該廠廢水處理系統操作不當，造成排放水水值異常，導致 MF 薄膜快速阻塞的情形，需停止操作並進行化學清洗，在清洗試驗中發現，以氫氧化鈉及次氯酸鈉混合液 ($0.2\%\text{NaOCl}$ 及 $0.5\%\text{NaOH}$ 清洗 2 小時) 作為清洗藥劑可有效移除薄膜上之阻塞物，恢復情況良好。為進一步瞭解阻塞物組成元素，於 MF 系統內加入實驗室型 MF 膜管 (型號: MF XUSP-1003)，此小型膜管材質與模組測試 MF 薄膜相同，其過濾方式為垂直流式而非掃流式，與 MF 系統並行操作，待小型膜管完全阻塞後取出分析阻塞物質，分析結果如表 5 所示，未經化學清洗前，薄膜表面之阻塞物主要元素為 C、O、Na、Fe、Mg、Ca 等元素 (如圖 4)，根據化學清洗結果，可推斷阻塞物以有機物為

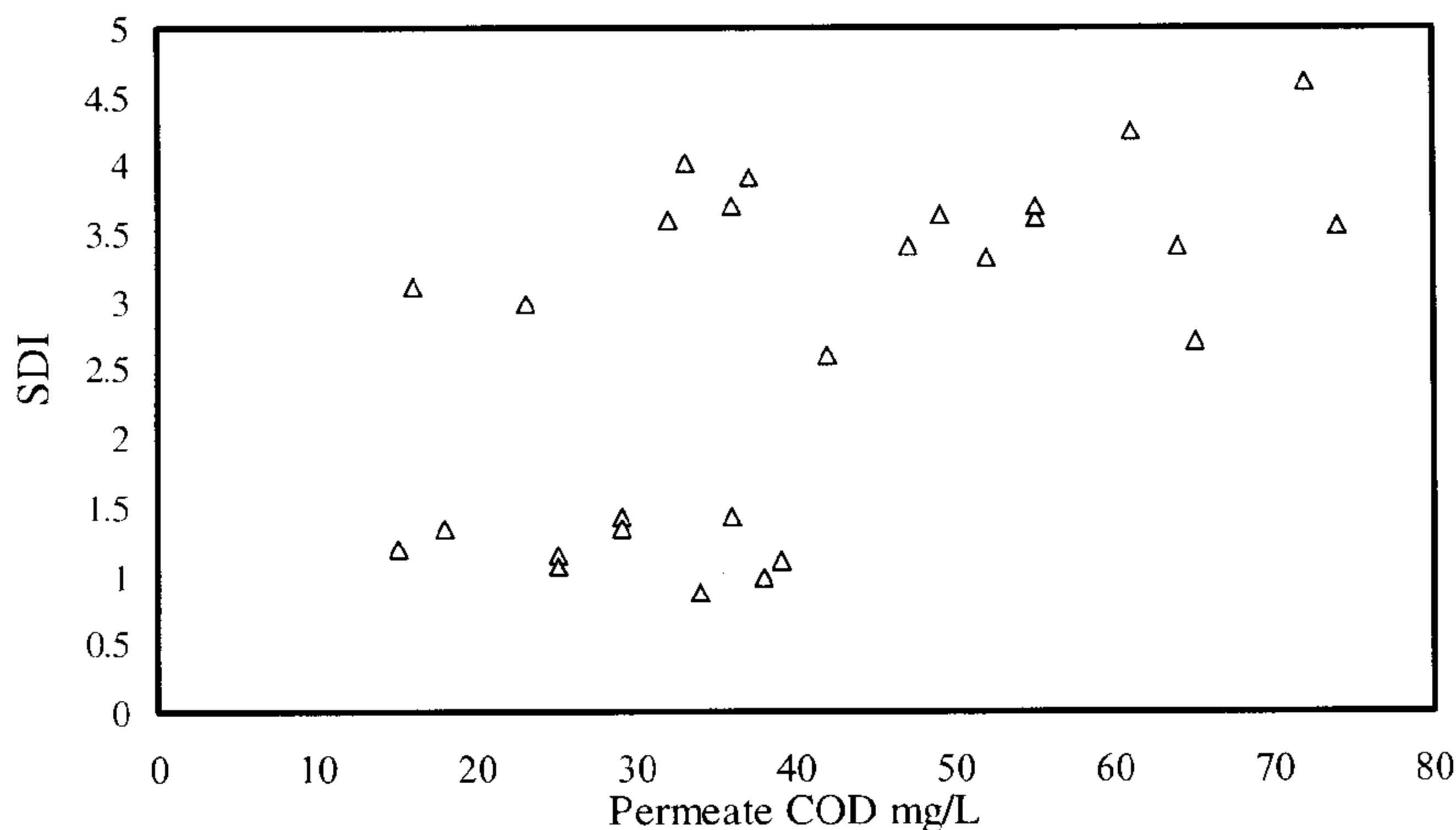


圖 3 MF 濾液 COD 與 SDI 關係圖

主。根據國外研究報告指出，水中含有陽離子(如：Ca、Fe)易與有機物形成錯化合物，容易造成薄膜阻塞，而小型膜管外徑表面於阻塞物分析中，有Fe、Na、Mg等陽離子存在，可能是與有機物形成錯化合物所造成⁽¹⁴⁾。此外，分析中空絲內側表面並無阻塞物，所偵測到之C、F元素為PVDF組成之成分元素，顯示並無阻塞物通過薄膜孔徑而吸附於內徑表面。經化學清洗後，分析膜管外徑表面元素，只有C、F兩元素，顯示化學清洗能有效去除吸附於薄膜表面之有機物。

表 5 阻塞物元素分析

	狀態	偵測元素
中空絲外徑表面污染物 (化學清洗前)	黏稠性物種	C, O, Fe, Na, Mg, Al, Si, Cl, Ca
中空絲內徑表面 (化學清洗前)	無阻塞物	C, F
中空絲外徑表面	無阻塞物	C, F

C、F 為 PVDF 組成之元素

2. RO 薄膜系統操作

經 MF 前處理後之濾過水直接進入 RO 系統中，RO 進流水 pH 以硫酸控制在 6.2~6.5 之間，用以防止碳酸鈣積垢，降低 RO 薄膜阻塞之風險。當 RO 操作之水質量傳送係數[流量/(膜過濾面積×淨驅動壓力)]於 0.027m/(hr·MPa)左右時，並無明顯的阻塞情況發生，顯示廢水經 MF 薄膜處理後，可有效降低 RO 薄膜處理時之阻塞發生。在處理後水質方面，對於 TDS 之去除率達 93% 以上(以導電度去除效果表之)，而 COD 之去除率則略低，在 75~98% 之間，此可能與水中物種帶電強度有關。根據 RO 薄膜

之去除機制中，RO 對於物種之去除主要以靜電排斥力而去除水中物種，因水中離子帶有正電荷或負電荷，故去除率較高，而廢水中之有機物在 pH6.2~6.5 之間，可能有部分有機物以分子型態存於水中，因此而降低薄膜對於有機

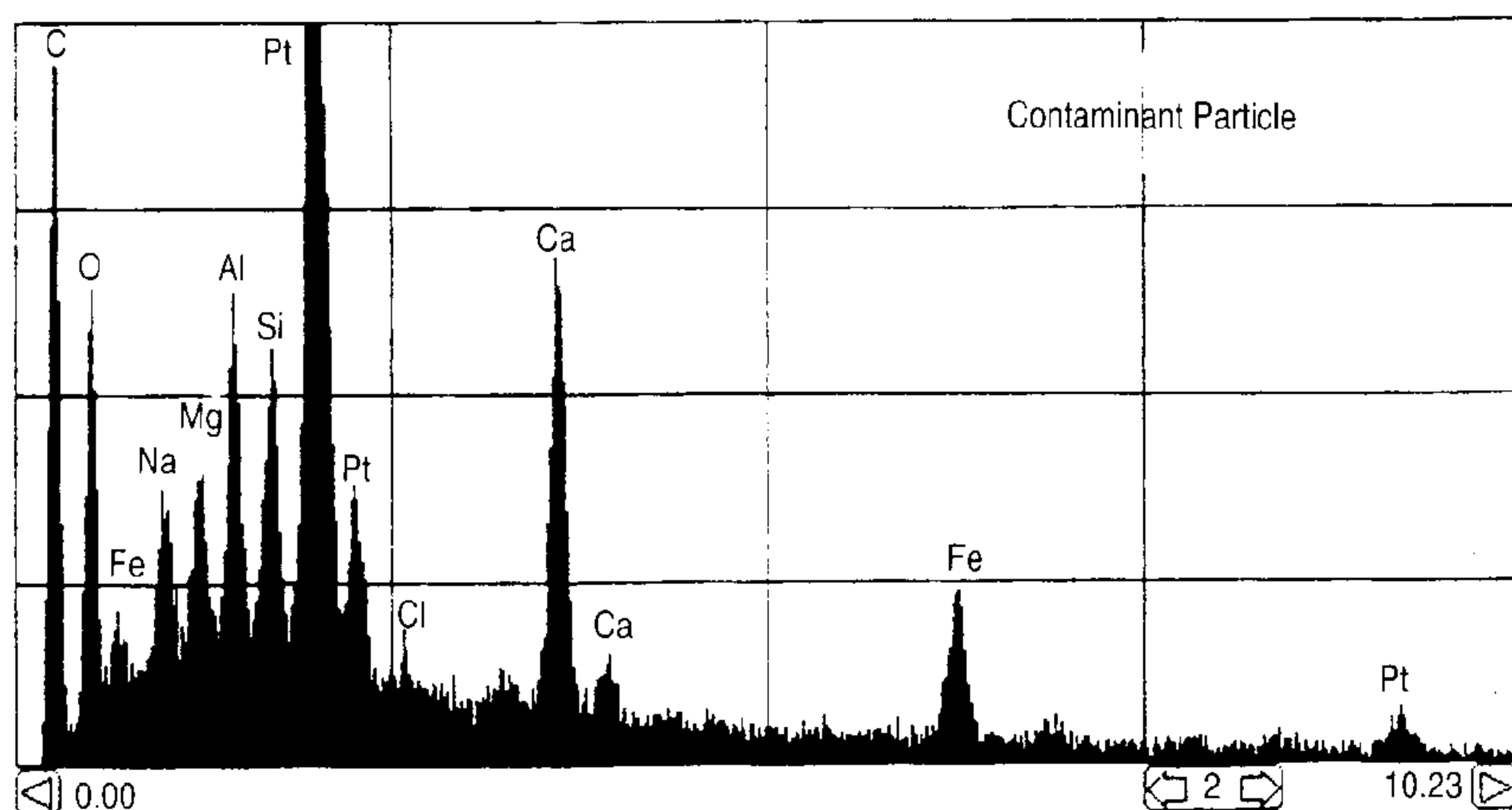


圖 4 薄膜阻塞物元素分析圖

物之去除。

在此廢水回收試驗中，經 MF 及 RO 程序處理後之水質相當良好(表 6)，由表 6 之水質項目初步評估處理後之水質應可回收成為冷卻水之補充水，至於其可行性，需做進一步之探討。

應用建議

石化產業排放水回收實廠驗證中，經 MF 及 RO 薄膜處理後水質良好，但可能會面臨 RO 濃縮廢液排放上的困難，如本驗證工廠之管末廢水 COD 濃度高於 50mg/L 時，則濃縮廢液之 COD 可能超過 100mg/L，高於 87 年放流水排放標準，造成排放上的問題。故規劃管末廢水回收方案中，應將濃縮廢液一併考慮，才是完整的回收規劃。

石化產業管末廢水回收所產生之濃縮廢液的特點為含生物難分解之有機物，以本試驗所得濃縮液分析結果顯示

BOD/COD 比值小於 0.1，若將濃縮廢液直接回至生物處理系統，則可能造成原生物處理系統效能的降低，最終導致有機物的累積，急需提出完整的配套措施以解決濃縮液排放問題。

處理生物難分解性之有機物使用較廣泛的技術有高級氧化程序，於廢水處理或水回收處理上皆有其可行性，不過目前應用不廣之情形乃限制於運轉成本過高，除非在法規上有所限制，在經濟考量上相對不具吸引力，處理成本約高於 100 元/kgCOD，因此為降低高級氧化之處理成本，結合高級氧化處理及傳統生物處理成為將來之發展趨勢。如能以高級氧化將濃縮廢液中生物難分解性有機物處理至生物可分解後，再導入生物處理程序中處理，如此可節省以高級氧化礦化有機物成 CO₂ 所需大量化學藥劑成本。由於大部分石化產業廢水處理設備有生物處理單元，因此進行廢水回收

表 6 排放廢水水質及回收水水質

水質參數	排放水水質	MF 濾液	RO 濾液回收水水質	冷卻水塔補充水水質
導電度值 (μS/cm)	800~1800	800~1800	<100	394
pH	7.8~8.5	1.8~8.5	5.7~6.3	7.7
總硬度 (as mg/l CaCO ₃)	125~150	120~150	<10	195
總鹼度 (as mg/L CaCO ₃)	300~320	—	<10	126
SiO ₂ (mg/L)	6.9	—	—	9.0
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	576	—	<30	96
Cl ⁻ (mg/L)	76	—	<10	19
總鐵 (mg/L)	0.07	—	ND	0.2
COD (mg/L)	15~80	—	<10	—
SS (mg/L)	<20	ND	ND	—
Turbidity (NTU)	1~15	< 0.1	<0.1	1.5
SDI	>6.67	<4	—	—
薄膜對導電度去除率(%)	—	—	>93	—
薄膜對 COD 去除率(%)	—	1~70	75~98	—
薄膜系統回收率(%)	—	85~93	45~60	—

規劃時可將此一併考慮。然而薄膜程序對於各式的物種皆有良好之去除率，但濃縮廢液為排放上限制之一，結合各式處理程序處理難處理廢水，應可降低處理成本及提昇處理水之品質，甚至可回用至工廠製程用水或次級用水，可解決供水上之壓力。圖5為建議之完整管末廢水回收系統規劃之概念圖，其有下列優點：

1. 薄膜程序處理水質良好，可回用至工廠製程用水或次級用水。
2. 為完整之廢水回收方案，避免錯誤之設計造成損失。
3. 氧化難分解性有機物至生物易分解性，不需礦化成 CO_2 ，減少高級氧化處理費用。
4. 生物處理費用便宜。
5. 提高工廠廢水回收，節省用水量。

應用限制：

1. 薄膜前處理系統初設成本較高。
2. 薄膜系統操作不當易發生薄膜阻塞，操作困難度相對增加。

3. 高級氧化處理殘餘氧化劑量(H_2O_2 、 Cl_2 、 O_3)可能影響後段生物處理效果。

結語

薄膜程序運用於製程、飲用水或超純水處理已日趨廣泛，本篇提供薄膜程序應用於石化排放廢水管末回收模組實廠測試之實例，並提出完整廢水回收規劃概念，可作為未來「廢水回收」努力之方向。薄膜程序對於各式的物種皆有良好之去除率，但濃縮廢液為排放上限制之一，結合現有廢水處理程序、薄膜程序及高級氧化程序之回收方案，可降低處理成本及提昇處理水之品質，解決供水上之壓力，達到產業永續經營及發展之遠程目標。■

參考文獻

1. Weber, Jr. W. J., and LeBoeuf E. J., (1999) "Processes for Advanced Treatment of Water" Wat. Sci. Tech. Vol. 40, No. 4~5, pp.11-19.

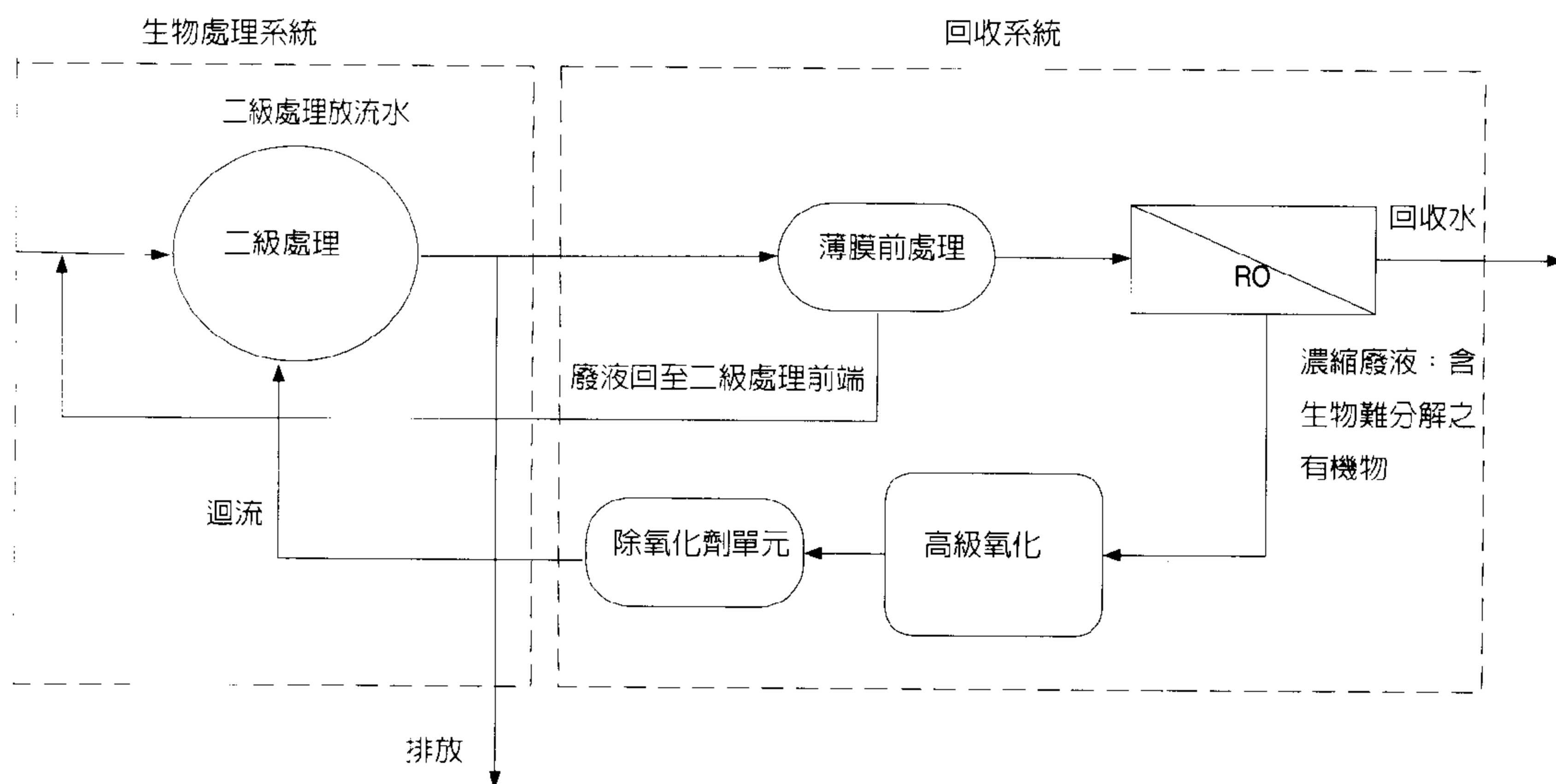


圖5 管末廢水回收系統概念圖

2. Letterman, R. D., et al., (1991)
"Evaluation of Alternative Surface Water Treatment Technology," Report to New York State Department of Health, Bureau of Public Water Supply Protection.
3. Olivieri, V. P., et al., (1991)
"Continuous Microfiltration of Surface Water," Proceedings of the AWWA 1991 Membrane Processes Conference, Orlando, Fla., p.385.
4. Yuasa, A. (1998) "Drinking Water Production by Coagulation-Microfiltration and Adsorption-Ultrafiltration," Wat. Sci. Tech. Vol.37, No.10, pp. 135-146.
5. Sadr Ghayeni, S. B., Madaeni, S. S., Fane, A. G., and Schneider, R. P., (1996) "Aspects of Microfiltration and Reverse Osmosis in Municipal Wastewater Reuse," Desalination, Vol. 106, pp.25-29.
6. Takizawa, S. et al., (1996) "Membrane Fouling Decrease by Microfiltration with Ozone Scrubbing," Desalination, Vol. 106, pp. 423-426.
7. 楊子岳 (1999), 「桌上型快速薄膜試驗評估 NF 薄膜程序在表面水處理上之運用」國立成功大學環境工程學系碩士論文。
8. 張振章 (1999), 「染整產業排放水回收再利用技術開發」經濟部八十八年年度科技研究發展專案計畫研究報。
9. Buhrmann, F., van der Wal, M., Hanekom, D., Finlayson, F., (1999) "Treatment of Industrial Wastewater for Reuse," Desalination, Vol. 124, pp.263-269.
10. Rautenbach, R., and Linn, Th., (1996) "High Pressure Reverse Osmosis and Nanofiltration, a "Zero Discharge" Combination for the Treatment of Waste Water with Sever Fouling/Scaling Potential," Desalination, Vol.105, p.63-70.
11. Taylor, J. S., and Jacobes, E. P., (1996) "Reverse Osmosis And Nanofiltration," In AWWARF, Lyonnaise des Eaux, South Africa, Water Treatment Membrane Processes, McGraw-Hill, New York.
12. ICR Manual for Bench-and-Pilot-Scale Treatment Studies, 1996, EPA 814/B-96-003.
13. Scott, K., (1995) Handbook Industrial Membranes, Elsevier Science Publishers, Oxford, UK.
14. Schafer, A. I., Fan, A. G., and Waite T. D., (1998) "Nanofiltration of Nature Organic Matter: Removal, fouling, and the Influence of Multivalent Ions," Desalination, Vol. 118, pp.109-122.