

澄清湖高級淨水處理模型廠試驗個案報告

葉宣顯¹、曾怡禎²、林財富³、陳振正⁴、賴文亮⁴

1. 國立成功大學環境工程系 教授
2. 國立成功大學生物系 副教授
3. 國立成功大學環境工程系 副教授
4. 國立成功大學環境工程系 博士班研究生

摘要

為改善大高雄地區自來水水質，乃在民生用水最主要供應者，澄清湖水廠內建立模廠，就各種不同的淨水流程進行兩年之試驗與比較。

模廠試驗之第一部分為探討實廠現有傳統程序加以改進之可行性，包括避免前加氯，使處理程序生物活性化，GAC (粒狀活性碳)取代無煙煤/矽砂雙層濾料濾床上層之無煙煤，GAC 床取代雙層濾料濾床，以及無煙煤/矽砂雙層濾料床串聯 GAC 床等。雖然此些措施，比較現有實廠之前加氯、混凝、沉澱、過濾等流程，均有增進 NPDOC、THMFP 之去除，降低 TTHM 之生成，和提昇清水生物穩定性 (低 AOC 值)的功能，但在味道、口感上之改進，未臻理想，且硬度方面亦未能降低。

模廠試驗之第二部份為探討傳統混凝、沉澱、過濾程序，再加上前、後臭氧，結晶軟化及 GAC 吸附等高級淨水程序之效果。比較前一部份之傳統淨水改進程序，此高級處理程序之清水在濁度、NPDOC、THM、THMFP 及生物穩定性等水質參數上可得到進一步之提昇。總硬度經由結晶軟化可降低至 150 mg/L as CaCO₃ 以下，但總溶解固體物 (TDS)之降低只有 10%左右，且臭味及口感之品質並不穩定。

模廠試驗之第三部份係以 NF 為主體之薄膜程序，NF 薄膜對總硬度及 TDS 分別有 90 及 85% 左右之去除率，NPDOC 之去除率約 75%，濾液濁度平均只有 0.02 NTU，THMFP 值低於偵測極限。水質生物穩定性參數 AOC 值可達荷蘭所要求小於 10 μg-C/L 之穩定性指標，餘氯穩定性亦最高。臭味物質可完全去除，處理水達到無臭味之要求。另外，口感方面經數次消費者之盲樣測試亦最受肯定。故包含 NF 之流程可產生最佳之

清水水質。

然 NF 程序成敗之關鍵在於阻塞 (fouling) 之控制。根據模廠實際操作之經驗，適當之前處理，進流水 pH 之控制，及抑垢劑適量之添加，均為必要之動作。前處理方面，傳統之混凝、沉澱、過濾程序不足以確保 NF 程序之順利運轉。UF 及 MF 可將進流水之 SDI 值降低至小於 1，對防止膠體物及粒狀物之阻塞有很大之幫助。

一、前言

澄清湖淨水廠之原水抽自高屏溪，經曹公圳流入澄清湖水庫，經人工曝氣及自然淨化作用後，抽入淨水場，以預氯、快混、膠凝、沉澱 (或浮除)、及快砂濾之淨水程序處理後，經配水系統供應大高雄地區，為最重要之民生用水來源。然因高屏溪及曹公圳受到人為之污染，使水庫優養化，浮游生物及藻類大量繁殖。再加上水質硬度偏高，燒開水時，產生白色之沉澱物，使消費者對自來水水質有所疑慮。

過去幾年，政府為求改善大高雄地區之飲用水水質，曾於 83 年 6 月完成「高雄地區自來水水質改善工程」，於澄清湖水庫內設置曝氣循環設備、增設除藻、除色、除臭設備，並抽換老舊之配水管線。同年 10 月完成「高雄地區工業用水與民生用水分開供應計畫」，將南化水庫、高屏溪伏流水、深井等較佳之水源供應民生用水，鳳山淨水場之清水則專供工業用水。在此相關計畫完成後，高雄地區 170 處飲用水監測站之水樣，經高雄市政府及自來水公司檢驗，雖均符合現行臺灣省及高雄市自來水水質標準，但為進一步提昇自來水水質在口感、味覺等適飲性之品質，滿足民衆對高品質飲用水之要求，並因應未來日趨嚴格之飲用水水質標準。自來水公司參酌歐、美、日等先進國家之經驗，檢討國內現有之淨水設施，乃決定逐步推動高級淨水處理技術。為求規畫設計之周延，決定於澄清湖興建「高級淨水處理模型廠」，準備在現場就各種可能之處理流程進行模型試驗，以瞭解各程序之優缺點，並尋求可能之最佳流程，以提供未來實廠興建、操作、運轉時之參考。

本研究小組應台灣省自來水公司之邀請，提出模廠試驗計畫構想書，就改善現有操作程序、新增高級處理單元及流程配置提出規劃案，中國鋼鐵公司則依與自來水公司所簽訂之技術合作開發協議，出資請工業技術研究院化學工業研究所進行模廠細部設計及建造工作，再交由本研究小組進行為期二年之試驗研究。第一年計畫自民國八十七年

六月起至翌年六月止。第二年計畫則自民國八十八年十一月起至八十九年十月止。

二、試驗程序及方法

2-1 試驗流程及操作參數

二年試驗期間所試驗過之主要流程共有 14 個，如表一所示。可概分為三大類，第一類為傳統淨水程序之改進，包括避免前加氯，使處理程序生物活性化，GAC 床取代無煙煤/矽砂濾床，GAC 取代二層濾料濾床上層之無煙煤，或無煙煤/矽砂濾料床串聯 GAC 床，及傳統淨水程序加入結晶軟化單元。第二類為傳統混凝、沉澱、過濾程序，再加上前、後臭氧，結晶軟化及 GAC 吸附等單元。第三類係以 NF 為主體之薄膜程序，再加上為防止其阻塞(fouling)之各種前處理程序。至於模廠主要單元之規格及操作參數則分述如下。

1. 混凝沉澱

試驗期間，快混池攪拌機之轉速定於 110 rpm，而液體硫酸鋁 (7.5%, Al_2O_3) 之加藥點則設置在快混池之進水口處。本試驗期間明礬加藥量在 50 ~ 80 mg/L 之間。慢混池之 G 值兩流程均控制在 40 sec^{-1} ；沉澱池兩流程均採斜管沉澱池，沉澱池溢流率在 18.8 ~ 69.8 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ 之間。

2. 快濾床

兩流程之快濾床內之濾料均採雙層鋪設，下層為石英砂 25 cm，上層為無煙煤 35 cm，無煙煤與濾砂有效粒徑分別為 0.89 及 0.51 mm。試驗期間，濾速控制在 100 ~ 200 m/d 之間。

3. 臭氧接觸槽

臭氧接觸槽槽體材質為 SUS304，包含三支接觸槽，槽管徑分別是 25、25 及 38 cm，槽高度皆為 4.5 m。進流水從槽體上端流入，進流口設於每一支接觸槽距槽頂下 35 cm 處，亦即水流採下流式。而臭氧氣體則可由任何一支接觸槽底部之散氣盤注入，氣體採

表一 模廠試驗主要流程

程序	試驗流程
I. 傳統淨水程序之改進	
1	原水→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→清水 ↑ NaOCl
2	原水→快混→膠凝沉澱→GAC 床→清水 ↑ NaOCl
3	原水→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→GAC 床→清水 ↑ NaOCl
4	原水→快混→膠凝沉澱→GAC/矽砂濾床→清水 ↑ NaOCl
5	原水→快混→膠凝沉澱→結晶軟化→無煙煤/矽砂濾床→清水 ↑ NaOCl
II. 包含臭氧、活性碳之流程	
6	原水→前臭氧→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→後臭氧→結晶軟化→GAC 床 →清水 ↑ NaOCl
7	原水→前臭氧→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→後臭氧→GAC 床→清水 ↑ NaOCl
III. 包括薄膜單元之流程	
8	原水→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→NF 膜→清水 ↑ NaOCl
9	原水→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→GAC 床→NF 膜→清水 ↑ NaOCl

10	原水→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→GAC床→UF膜→NF膜→清水 ↑ NaOCl
11	原水→快混→膠凝沉澱→無煙煤/矽砂濾床→MF膜→NF膜→清水 ↑ NaOCl
12	原水→快混→膠凝沉澱→結晶軟化→無煙煤/矽砂濾床→MF膜→NF膜→清水 ↑ NaOCl
13	原水→前臭氧→快混→膠凝沉澱→結晶軟化→MF膜→NF膜→清水 ↑ NaOCl
14	原水→前臭氧→快混→膠凝沉澱→結晶軟化→MF膜→後臭氧→GAC床→清水 ↑ NaOCl

向上流式，氣體注入量由各別之流量計以針閥控制之。臭氧是由臭氧產生機 (OZAT CFS-1, Ozonia, France) 以液氧製造。試驗期間，前、後臭氧量之劑量分別控制在 0.9 ~ 3.5 mg/L 及 0.56 ~ 4.8 mg/L。

4. 結晶軟化(fluidized bed crystallization, FBC)系統設備

結晶軟化系統設備包含有：三合一槽體、結晶軟化反應器以及砂濾機。三合一槽體 (140 cm (L)×140 cm(W)×180 cm (H))是由系統進水槽、軟化水出水槽，及調整 pH 值之中和槽所組成。試驗期間，結晶軟化反應器(直徑 15.3 cm，高 500 cm) 之 pH 控制在 9.0±0.2，上昇速度為 100~116 m/hr。以石英砂(有效粒徑 0.51、0.62 mm)為擔體。

5. 粒狀活性炭(GAC)床

傳統淨水程序改進中使用到 GAC 之處，包括單獨之 GAC 床，濾料厚度 60 cm (Filtrisorb 820, Calgon)，EBCT 4.3 min，及 GAC/矽砂兩層濾料濾床，其中 GAC 厚度 35 cm (Filtrisorb 820, Calgon, EBCT 2.5 min)，石英砂 25 cm (有效粒徑 0.51 mm)。至於後臭氧單元之後，則有二支 GAC 床，面分別填裝高度 62 及 110 cm 之粒狀活性炭(Filtrisorb 300, Calgon)，其 EBCT 分別控制在 5 ~ 7.1 及 12.5 ~ 15 min 之間。

6. 薄膜硬體設備

薄膜單元最早加入模廠試驗者為 NF (nanofiltration) 系統，該系統以 NF 模組為主，模組分成兩個 Stages，共有三根壓力管 (pressure vessel)，以 2 : 1 的方式排列，每根壓力管中有 3 個 Elements (size 4040)，以串聯方式聯接，試驗所用者係 FilmTec NF70 (Dow Chemical)，材質為 thin-film composite (TFC)，型式為螺旋式 (spiral-wound)，系統回收率為 75%。起初以混凝、沉澱及兩層濾料 (或再串聯 GAC 床) 為 NF 之前處理，後來為進一步改善 NF 膜之阻塞 (fouling) 現象，於 NF 之前，再加上 UF (ultrafiltration) 及 MF (microfiltration)。

UF 系統 (Microza UF system, Asahi Chemical) 主要由兩支 LGV-5210 型膜管並聯組成。膜型式為中空絲 (hollow fiber)，材質是 PAN (polyacrylonitril)，而每一根中空絲長為 2.2 m，內徑 0.8 mm，外徑 1.4 mm，每根膜管有效表面積為 41 m²，MWCO (molecular weight cut off) 為 13,000，過濾時水由膜外側流向內通過中空絲 (稱之為 outside-in)。MF (Microza MF system, Asahi Chemical) 膜管亦為中空絲 (hollow fiber) 型式，材質為 PVDF (polyvinylidene -fluoride)，過濾水方式亦為 outside-in。中空絲長為 2.2 m 內徑為 0.7 mm，外徑 1.3 mm，薄膜孔徑約 0.1 μm。

2-2 水質參數之分析方法

本模廠試驗中各種水質參數之分析，除水質生物穩定性參數 AOC (assimilable organic carbon) 依 van der Kooij 之方法外⁽¹⁾，其餘則以「美國水及廢水標準檢驗方法」(Standard Methods) 為準⁽²⁾。

三、結果與討論

以下就模廠兩年操作結果，從各流程清水之一般性水質參數、有機參數、水質穩定性、臭味及口感等方面，作一綜合性之比較。

3-1 一般水質參數

圖 1 為不同流程清水濁度之比較。圖中顯示，流程 8、9、10、11、12、13 及 14 之最後單元均有薄膜系統者，無論其前處理程序為何，其清水之平均濁度均可符合美國環保署現行「加強表面水處理規則」⁽³⁾濾床出水濁度 95%之時間需小於 0.3 NTU 之規定。至於至少有兩種濾床者（如無煙煤/矽砂濾床及 GAC 床）之流程 3、6 及 7，由於有多層之阻絕作用，故其清水濁度亦均可符合上述美國環保署濾床出水濁度之規定；而僅有一濾床之流程 1、2、4 及 5，其出水濁度就無法完全符合上述之規定。其中混凝沉澱後接 GAC 床者之流程 2，其出水濁度之平均值大於 0.5 NTU，顯示欲以 GAC 床取代無煙煤/矽砂濾床是有其困難性。至於流程 1、4 及 5，清水濁度小於 0.3 NTU 之水樣數佔全部水樣數之百分比，以流程 4 最大，其值為 94%，其次為流程 1，其值為 86%，最後則為流程 5，其值為 83.3%，此結果表示，欲達美國環保署現行濾床出水濁度之標準，採薄膜程序及多種濾床均是可考量的方向。

其次在硬度方面，由圖 2 得知，包括 NF 系統之流程 8、9、10、11、12 及 13，其清水之總硬度平均值均已降至低於 50 mg/L as CaCO₃，而流程 5 及試程 6，因有結晶軟化床之單元，故其清水硬度平均值約為 130 mg/L as CaCO₃，應可符合我國預計自 92 年 7 月開始實行之第三階段硬度限值之 150 mg/L as CaCO₃ 管制值，而未採結晶軟化床或 NF 系統之流程 1 及 4，因其未具有去除硬度之能力，故清水硬度平均值與原水相近，其值約為 250 mg/L as CaCO₃。

圖 3 為各流程清水 TDS 之比較。各流程中，除第 6 流程與採用 NF 系統之 8、9、10、11、12 及 13 流程外，其餘流程均無 TDS 分析數據。由圖可得知，採用 NF 系統之

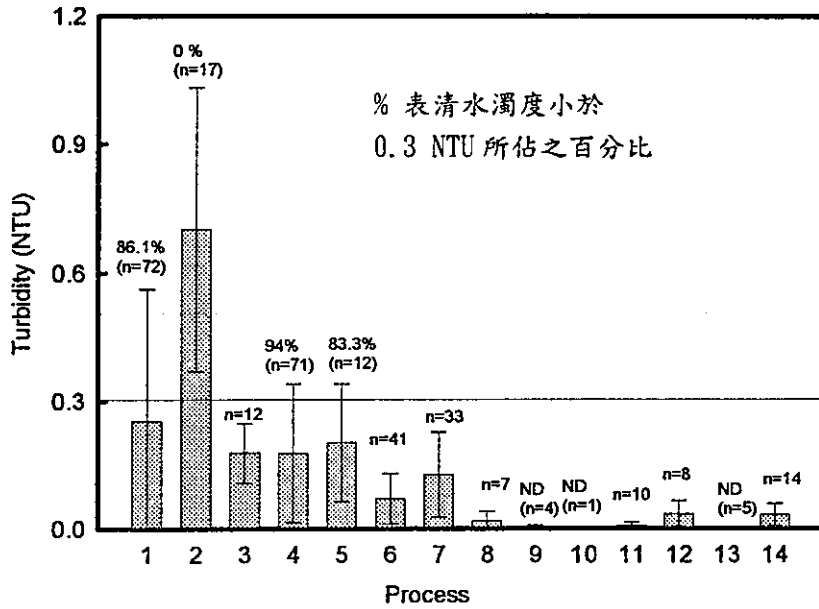


圖 1 不同流程清水濁度之比較

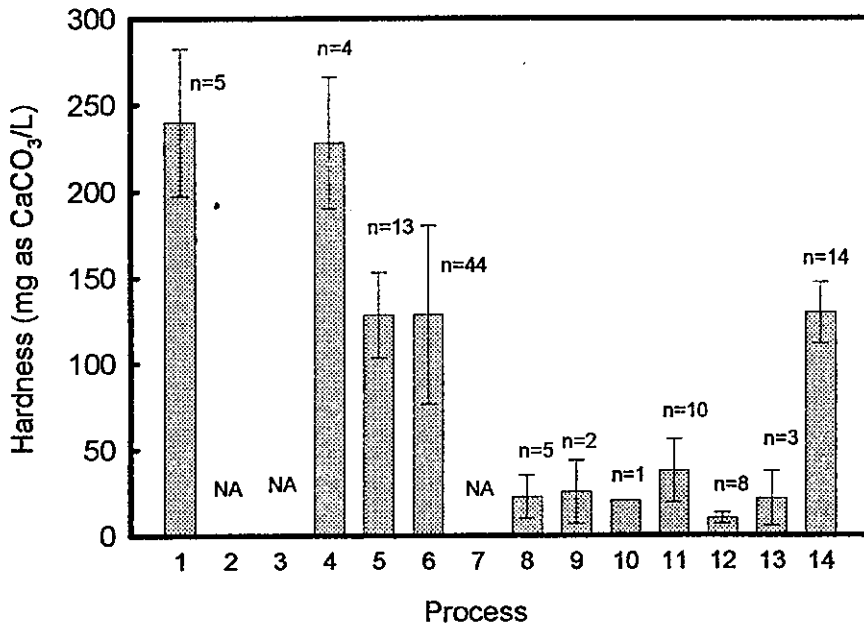


圖 2 不同流程清水硬度之比較

各流程，其清水平均 TDS 皆能控制於 50 mg/L 以下，遠低於 92 年 7 月預計實施之第三階段 TDS 限值 250 mg/L，顯見 NF 對溶解固體物之優異去除效果。至於流程 6，其清水平均 TDS 則高達約 310 mg/L，與澄清湖原水平均 TDS (約 340mg/L) 值相比約只有 10% 左右之降低，主要應由結晶軟化單元所貢獻。因吾人已知傳統混凝、沉澱、過濾單元以及臭氧、GAC 等對 TDS 變動之影響甚為有限，故可推測流程 1~5 之清水 TDS 值應與原水相近。

3-2 有機參數

對於有機參數，首先比較各流程對 NPDOC(非揮發性溶解有機碳)之去除，NPDOC 代表水中溶解性之有機物量。由圖 4 可知，流程中有 NF 系統之流程 8、9、10、11、12 及 13 清水中之平均 NPDOC 值，除流程 8 約為 0.2 mg/L、流程 9 約為 0.4 mg/L 外，其餘流程均低於或接近偵測極限(0.1 mg/L)。而流程 14 清水平均之 NPDOC 值為 0.25 mg/L，較流程 13 之低於偵測極限為高，顯示後臭氧/GAC 去除 NPDOC 之能力較 NF 為低。至於流程 6 及 7，兩者除流程 7 中 GAC 床之前未接結晶軟化床外，其餘單元完全相同，而實驗數據顯示，兩流程清水之 NPDOC 值並無明顯差異；然從結晶軟化床之操作結果得知，該床對有機物應有某種程度之去除能力，此表示流程 7 之 GAC 床應較流程 6 之 GAC 床承受更多之有機物質。至於流程 2 及流程 4，因均有 GAC 床之單元，故其清水之 NPDOC 相近，約為 0.6 mg/L，而採無煙煤/矽砂濾床為過濾單元之流程 1 清水之 NPDOC 則為 0.75 mg/L，此表示 GAC 對有機物吸附去效果應較無煙煤/矽砂濾床為佳。至於將無煙煤/矽砂濾床與 GAC 串聯之流程 3，其清水之 NPDOC 又較流程 1、2 及 4 為高，此現象與前面結果相異，經分析此試程之操作期間為 88 年 3 月中旬至 88 年 5 月底，該 GAC 床自開始啓用，已操作近一年，故此差異性應與此有關。

其次為清水總三鹵甲烷 (TTHM) 之比較 (圖 5)。所有流程之清水除流程 2、4 及 10 未有數據外，其餘 TTHM 平均值均小於 10 $\mu\text{g/L}$ ，均遠低於我國環保署及 US EPA 之

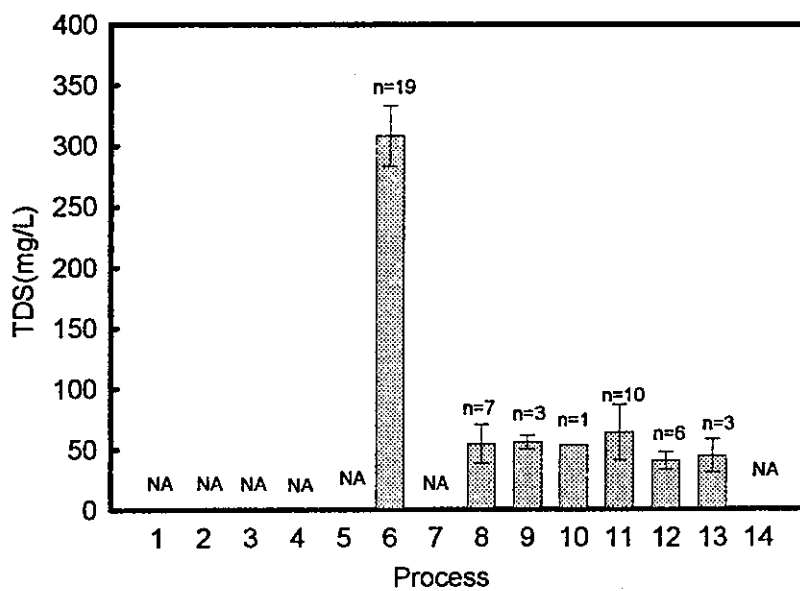


圖 3 不同流程清水 TDS 之比較

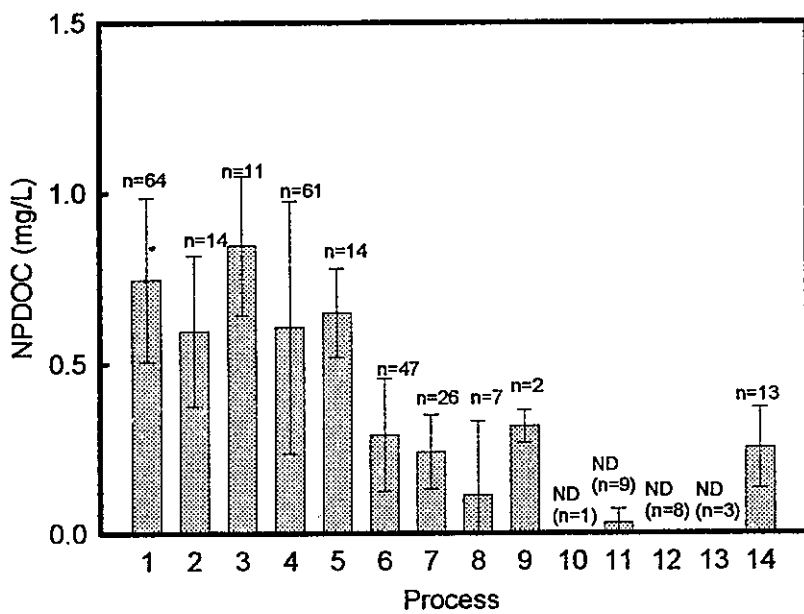


圖 4 不同流程清水 NPDOC 之比較

現行飲用水水質標準。與現行澄清湖實廠清水 TTHM 平均值約 30 $\mu\text{g/L}$ 亦有明顯改進。其中包含 NF 系統之流程其 TTHM 最低 ($<3 \mu\text{g/L}$)，其次為包含臭氧、GAC 單元之流程 ($<5 \mu\text{g/L}$)。

圖 6 所示為各流程清水之 THMFP 值。流程 8、流程 11 及流程 12 之 THMFP 值均低於偵測極限 (CHCl_3 3.2 $\mu\text{g/L}$, CHCl_2Br 0.8 $\mu\text{g/L}$, CHClBr_2 0.76 $\mu\text{g/L}$, CHBr_3 1.19 $\mu\text{g/L}$)，顯示 NF 薄膜對三鹵甲烷前驅物質(precursor)有很好之阻絕功能。流程 14 之 THMFP 約為 6 $\mu\text{g/L}$ 。而採用傳統淨水及其改進程序之流程 1 至 5 之 THMFP 值，約為 25 至 45 $\mu\text{g/L}$ ，與澄清湖原水之 THMFP 平均值約 80 $\mu\text{g/L}$ 比較，其去除率約 45~70%。另外流程 6 之前、後臭氧、GAC、結晶軟化，結合傳統混凝、沉澱、無煙煤的砂濾床之高級淨水程序亦可使 THMFP 低至 2 $\mu\text{g/L}$ ，顯示該流程對 THM 前質亦有甚佳之去除效果。

3-3 餘氯穩定性

根據環保署所公告之「飲用水水質標準」，加氯消毒之供水系統，目前容許之自由有效餘氯量為 0.2~1.0 mg/L ，故餘氯在配水管網內之穩定性，將為自來水事業單位所關注者。圖 7 為取流程 1、4、7、12 及澄清湖實廠經加氯消毒之清水，置於數個乾淨之 1 公升棕色玻璃瓶內約九分滿，然後在不同時間間隔，採樣分析其殘餘之自由餘氯量，以瞭解各流程及實廠清水耗氯量之差異性。該圖顯示流程 12 包含薄膜程序(MF+NF)，由前面數小節所述，知其出水之水質甚佳 ($\text{NPDOC} < 0.1 \text{mg/L}$)，故其 25 小時後之氯消耗量甚低 (約為 0.1 mg/L)，其次為包含前、後臭氧及 GAC 之流程 7 (總耗氯量約 0.2 mg/L)，再者為流程 4，而流程 1 及實廠之耗氯率則非常接近，其值約為 0.5 mg/L 。故得知隨著處理層級之提昇，餘氯之穩定性亦得以提昇。

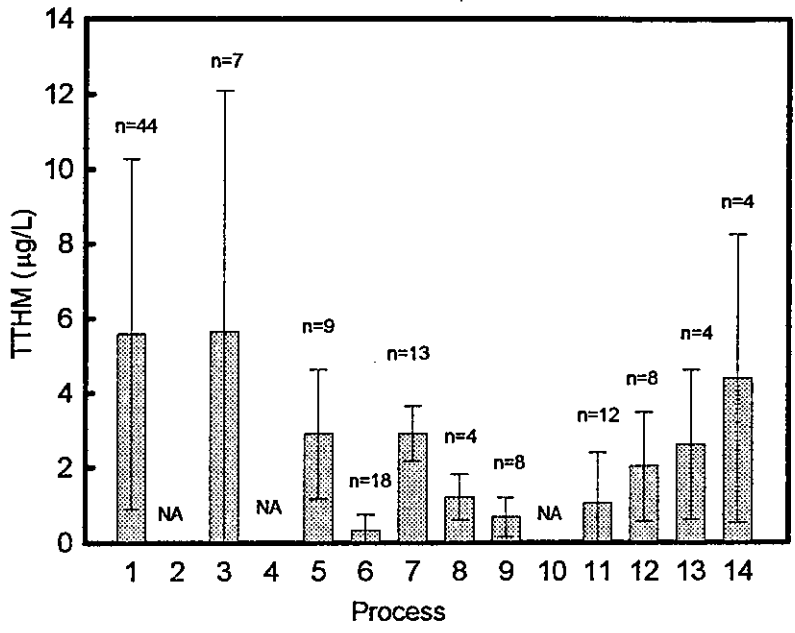


圖 5 不同流程清水 TTHM 之比較

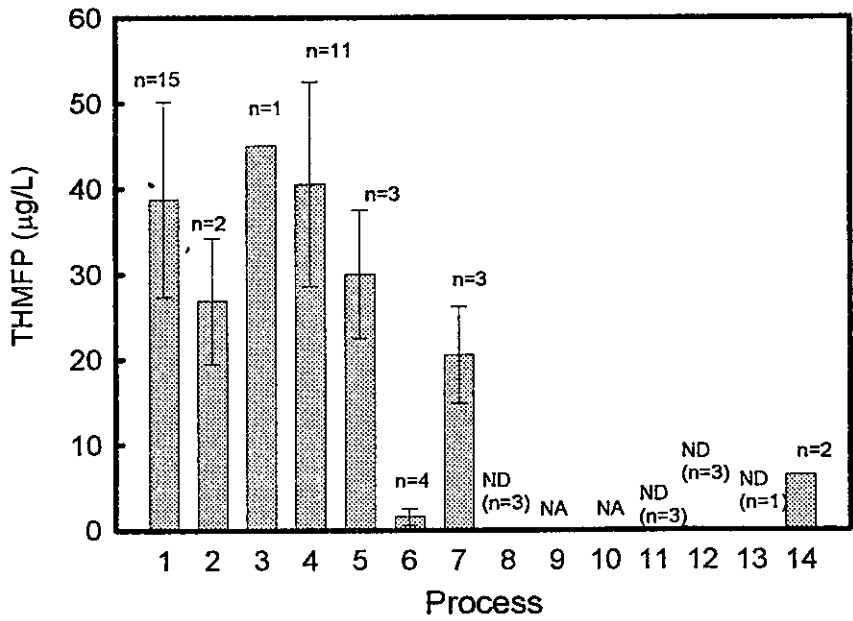


圖 6 不同流程清水 THMFP 之比較

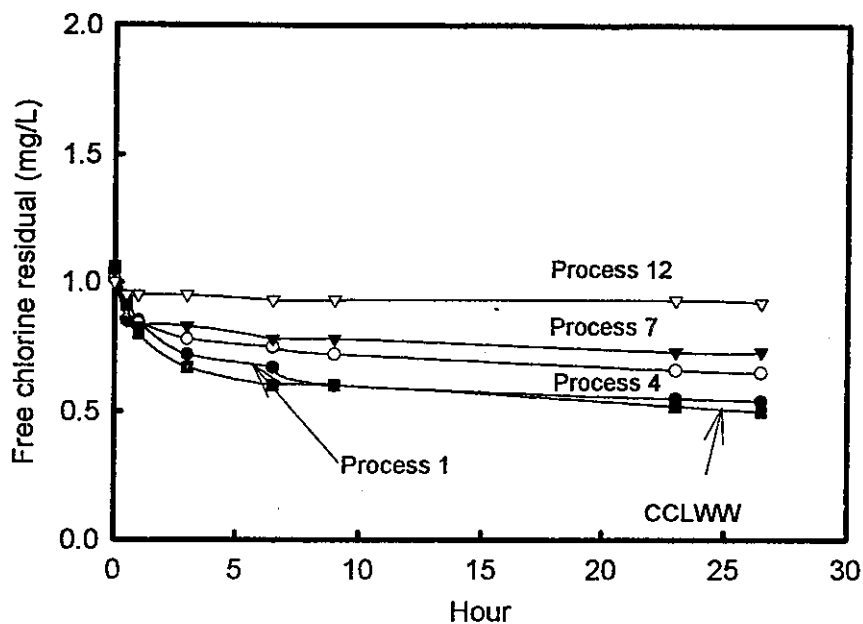


圖 7 不同流程清水耗氯量之比較

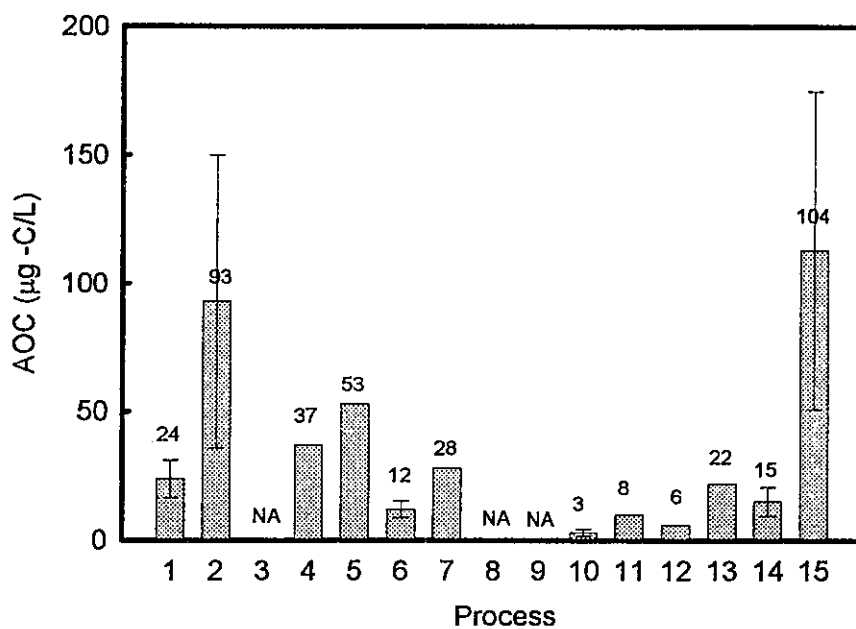


圖 8 不同流程清水 AOC 值之比較

3-4 水質之生物穩定性

圖 8 為澄清湖實廠清水及模廠所有處理流程清水 AOC 值之比較。由圖中可發現，僅有流程 10、11 及 12 採濾床配合 NF 薄膜單元者，其清水水質可符合荷蘭自來水界所要求之生物穩定性水質規範，即清水 AOC 值控制在 10 $\mu\text{g-C/L}$ 以下⁽¹⁾，而採兩種濾床串聯之流程 10，其 AOC 平均值更低至 3 $\mu\text{g-C/L}$ ，此應是模型廠之處理流程均未採前加氯，故濾床本身均具有生物活性，相對地可更有效地降低水中 AOC 值，然流程 13 雖有 NF 薄膜單元但其前未有濾床，故其 AOC 值又升高至 22 $\mu\text{g-C/L}$ ，較有濾床配合 NF 薄膜單元者為高。流程 13 之處理程序中之 NF 單元，若以後臭氧/GAC 取代時 (流程 14)，其 AOC 又降至 15 $\mu\text{g-C/L}$ ，此結果顯示，後臭氧可將有機物轉化成生物分解性較高之親水性小分子者，而被後續之具生物活性之 GAC 床去除，故可將 AOC 值降低。對於未採 NF 薄膜程序，但採前後臭氧、結晶軟化床及配合兩種濾床之流程 6，其 AOC 平均值為 12 $\mu\text{g-C/L}$ ，顯示其生物穩定性亦甚高。其它傳統處理流程 1、2、4 及 5 與採前加氯處理程序實廠比較時，發現實廠之 AOC 值高達 113 $\mu\text{g-C/L}$ ，而模廠數個流程除 NPDOC 值高之流程 2 有較大之 AOC 值外，其餘之 AOC 值則在 24~53 $\mu\text{g-C/L}$ 之間，此應是實廠實施前加氯，氧化作用本來就會增加 AOC 值，而整個流程中都保持有餘氯，使生物作用無從發揮，亦使 AOC 值居高不下。

3-5 臭味及口感

表 2 為各流程清水以 Flavor Profile Analysis 進行分析，各種臭味被檢測到機率及強度之比較。由表中得知，流程 12 包括 MF 及 NF 膜系統單元，及流程 14 採前後臭氧配合 MF 膜及 GAC 床者之清水經檢測無任何味道(odor free)。至於流程 11 同屬 MF、NF 薄膜程序者，6 次採樣分析結果被檢測到 odor free 之機率仍高達為 85.8%，但有一次檢測出氯味強度 4，經進一步分析，知採樣時間為 89 年 7 月 20 日，此時恰為澄清湖廠原水來源高屏溪發生廢溶劑污染事件期間，當日原水被檢測出有油味 (oily)，強度為

表 2 各流程清水不同臭味之發生機率及強度

Process	樣本 總數	味道種類					
		土霉味	魚腥味	油味	氯味	未知	無味道
Process 1	15	46.7% (3.4)*	33.3% (4)	6.7% (4)	----	6.7% (4)	6.7%
Process 4	12	41.7% (2.4)	16.7% (4)	8.3% (2)	----	8.3% (6)	25%
Process 5	6	50% (3.3)	33.3% (4)	----	----	----	16.7%
Process 6	7	57.1% (3.5)	14.3% (6)	----	----	----	28.6%
Process 7	4	50% (2)	----	----	----	----	50%
Process 8	3	32% (2)	----	----	----	----	68%
Process 11	6	----	----	----	14.2% (4)	----	85.8%
Process 12	3	----	----	----	----	----	100%
Process 14	2	----	----	----	----	----	100%

*括號內之數值代表臭味強度

表 3 高雄環保媽媽服務隊試飲模廠水樣之結果

口感等級	不同流程出水			
	流程 3	流程 6	流程 10	實廠清水
最好	2	1	8	0
其次	4	4	3	0
中等	5	5	0	1
最差	0	1	0	10
總分	30	27	41	12

6。而當日處理流程屬傳統程序之流程 4，其清水可測得 oily 臭味，強度為 2。由上可知水源遭受污染時，水中之臭味，無法藉傳統程序有效去除，即使將混凝、沉澱、兩層濾料濾床之出水，再經 MF 及 NF，臭味物質仍無法完全去除。傳統程序後接 NF 薄膜之流程 8，其被檢測為 odor free 之機率為 68%，而前後臭氧配合 GAC 床者之流程 7，則有一半的機率被檢測為 odor free。

至於採前、後臭氧、結晶軟化及 GAC 吸附床之流程 6 清水，在 7 次採樣中，僅有 28.6%之機率測出為 odor free，其餘則為土霉味、魚腥味，其中土霉味被測出之機率最高，為 57.1%，而強度平均值則為 3.5。至於以傳統混凝、沉澱、過濾為骨幹之流程 1、4 及 5，則其測到 odor free 之機率為 6.7~25%，測到土霉味之機率大於魚腥味，但前者之強度低於後者，油味及其他未知名之味道亦會出現，但其機率更低。綜合來看，經薄膜處理清水之水質在臭味之去除方面仍然優於其他單元之出水。

另高雄醫學大學工業衛生研究中心為執行行政院環保署委託之專案計畫⁽⁴⁾，曾於 88 年 4 月 15 日至模廠採取流程三（無煙煤/矽砂濾床串聯 GAC 床）、流程六（無煙煤/矽砂濾床、臭氧、結晶軟化、GAC 床）、實廠之清水及自來水經逆滲透(RO)膜處理水，經煮沸後，於隔日在高雄市政府及國立科學工藝博物館以盲樣方式供民眾試飲，並做問卷調查。總共 380 人參與試飲，男性佔 43.9%，女性佔 56.1%，其中 75.8%為高雄市市民，餘為其他縣市。試飲結果，實廠、流程三、流程六清水及 RO 水之評分分別為 58.6、66.6、70.5 及 76.3（最佳者給 100 分，最低者 0 分）。而上述水樣依序有 34.7%、53.7%、64.7% 及 78.4%的試飲者認為可接受。至於不可接受之理由方面，實廠、流程三、流程六清水及 RO 水，分別有 28.2%、21.1%、15.5%及 10.3%之試飲者評為口感差，而分別有 35.5%、9.7%、5.5%及 3.4%之試飲者覺得水中有異味。由以上結果得知，可見民眾對現行實廠清水之抱怨主要在於水中之異味，而模廠無論流程三或流程六對異味之去除，均較實廠提昇許多。

88 年 5 月 18 日高雄環保媽媽服務隊至模廠參觀，並推派代表試飲水樣，以流程 3（無煙煤/矽砂濾床串聯 GAC 床）、流程 6（無煙煤/矽砂濾床、臭氧、結晶軟化、GAC

床)、流程 10 (即流程 3+UF,NF) 及實廠清水進行盲樣測試,係直接自試飲台龍頭取水試飲。並約定口感最佳者給 4 分,依序遞減 1 分,最差者給 1 分。當日共有 11 位完成試飲,其結果如表 3 所示。可見 NF 薄膜清水得到最高之評價,次之為流程 3,再其次為流程 6,而實廠清水得分最低。

3-6 流程綜合評述

流程 1 至 5 係實廠現有混凝、沉澱、快濾傳統程序之改進,包括添加 GAC 或結晶軟化單元,但均避免前加氯。其優點在於流程簡單,可就實廠現有硬體設施作局部修改即可,且對溶解性有機物之去除、清水之臭及味及生物穩定性等均較實廠之傳統淨水程序佳。但與包含臭氧、GAC 或薄膜單元之流程相比均較差,在總硬度 (流程 5 除外) 及 TDS 方面亦無法符合環保署飲用水水質標準第三階段之限值。再者因無前氧化劑,處理設施內可能會有滋生藻類等生物之問題。

流程 6 及 7 為傳統程序加上前、後臭氧及 GAC,流程 6 更包含結晶軟化,其優點在於對溶解性有機物及消毒副產物前質之去除,清水水質之生物穩定性可進一步提昇,且各先進國家已累積有此方面大規模實廠相當多的經驗。臭氧-GAC 流程對臭味之去除,雖較傳統程序為佳,但仍未臻理想,清水偶而仍可測出土霉味及魚腥味。文獻上亦曾報導法國有關臭氧-GAC 程序對臭味去除之研究,包括實廠及模廠,結果顯示在剛啓動時,GAC 對土霉味等有很大之去除效果,但在 6 至 9 個月之後,則有臭味物質貫穿之現象發生⁽⁵⁾。澄清湖原水中引起臭及味之化合物究竟為何?其在 GAC 上之吸附力如何?均有待進一步之研究。再者台灣南部溫度較高,生物活性化之 GAC 床是否可能帶出輪蟲或線蟲等微生物,及其對水質之影響,亦是值得注意的。

流程 8 至 13 包括 NF 薄膜單元,可生產最佳水質之清水,無論就濁度,有機參數如 NPDOC、THMFP,生物穩定性,臭及味,微生物性水質觀之均然。而且在總硬度及 TDS 方面亦可符合環保署飲用水水質標準第三階段之限值。然 NF 薄膜程序用於表面水處理成敗之關鍵在於良好之前處理,以適當地控制阻塞(fouling)。根據本模廠試驗之經驗,傳統之混凝、沉澱、過濾程序不足以確保 NF 程序之順利運轉,UF 或 MF 對防止膠體物及顆粒物之阻塞有很大幫助。而飼水 pH 值之控制及抑垢劑之適當添加,為控制積

垢(scaling)必需者。再者 NF 程序清水回收率較低，高耗能量，且目前世界上大規模 NF 實廠之經驗仍不多，均為其缺點。至於流程 14 係結合結晶軟化、MF 及臭氧-GAC，清水水質在有機參數、生物穩定性、臭及味、微生物水質方面均相當良好，僅有些項目略遜於 NF 出水，但其主要缺點在於 TDS 無法符合環保署飲用水水質標準第三階段之限值，且生物活性化 GAC 床可能帶出輪蟲、線蟲等微生物。

四、結論

1. 澄清湖實廠目前採前加氯、混凝、沉澱（或浮除）過濾、消毒之方式處理，清水水質如濁度、鐵、錳、三鹵甲烷...等均能符合國內現行飲用水水質標準。但因採前加氯之方式，將生物活性排除於整個處理程序之外，致溶解性有機物無法去除，且有可能與藻體或其代謝物反應生成有異臭味之物質。同時亦使清水之生物可利用有機碳(AOC)含量升高，可促進配水管網內生物膜之生長及增加餘氯在管網內之耗減速率。如此亦迫使水廠在出廠之清水內必須維持較高之餘氯，以確保配水管網末端之餘氯仍能符合法規之要求。
2. 在混凝、沉澱、過濾傳統處理流程之改進上，包括避免前加氯，使處理程序生物活性化；GAC 床取代無煙煤/矽砂兩層濾料濾床，GAC 取代兩層濾料濾床上層之無煙煤，或者是兩層濾料濾床串聯 GAC 床。雖然此些措施，較之現有實廠之前加氯、混凝、沉澱、過濾之流程，均有增進 NPDOC、THMFP 之去除，降低 TTHM 之生成，提昇清水生物穩定性（低 AOC 值）的功能，但在味道、口感之改進上，未臻理想。且硬度方面亦未能降低。
3. NF 薄膜對總硬度及 TDS 分別有 90 及 85% 左右之去除率，NPDOC 之去除率約 75%，濾液濁度平均值只有 0.02 NTU，THMFP 值低於偵測極限。水質生物穩定性參數 AOC 值可達到荷蘭所要求小於 10 $\mu\text{g-C/L}$ 之穩定性指標，餘氯穩定性亦最高，臭味物質可完全去除，處理水達到無臭味之要求。另外，口感方面經消費者之盲樣測試亦最受肯定。故一般而言，包含 NF 之流程可產生最佳之清水水質。然 NF 程序成敗

之關鍵在於適當之前處理，以控制阻塞及積垢現象，再者薄膜程序之高耗能量及缺乏長期、大規模實廠操作之經驗，為其實際運用時，必須考量之因素。

誌 謝

本研究計畫得以順利完成，首先要感謝台灣省自來水公司提供研究經費。其中尤其要感謝第七區管理處檢驗室在水質分析工作上所提供之協助。同時要感謝中國鋼鐵公司提供模廠試驗設備經費，及在設備維護上提供多方之協助。也感謝林昇衡、蔡木川、葉益志、謝東穎、林銘洲、高山鎮、陳怡萱、汪俊育、陳郁仁、周翬皓、楊豐誠等諸位先生之協助。

五、參考文獻

1. Van der Kooij, D. “ Assimilable Organic Carbon as an Indicator of Bacterial Regrowth ”, *Jour. AWWA*, 84 : 2 : 57-65., 1992.
2. APHA, AWWA, WEF, *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., 1995.
3. US EPA, “National Primary Drinking Water Regulations : Interim Enhanced Surface Water Treatment,” *Federal Register*, Vol. 63, No. 241, pp. 69478 – 69484, 1998.
4. 洪玉珠 “高雄地區自來水配水系統影響適飲性物質的調查及改善對策之探討 (2/2)” ，行政院環保署研究報告，1999.
5. Suffet, I.H., and Wable, O., “ Removal of Taste-and-Odor Cmpounds by Activated Carbon ”, In *Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control*, Ed. by Suffet, I.H., Mallevalle, J., and Kawczynski, E., American Water Works Association, Denver, Colorado, USA, 1995.
6. 葉宣顯、高山鎮、王典雅、林昇衡 “前處理對 NF 薄膜程序影響之研究” ，第十七屆自來水研究發表會報告集，第 231-243 頁，2000.