

淨水程序操作參數之改變以控制殘餘鋁量之研究

Change of Process Variables for Residual Aluminum Control

郭輔仁* 葉宣顯**

一 前言

飲用水中含過量鋁與人體中樞神經病變間之關係(如老年癡呆症)，雖尚未有定論。但在淨水程序中，微量鋁膠羽亦會降低消毒效率、增加濁度，及沉積於配水管內而降低輸水能力。因此，基於水中含鋁量造成各項缺失之考慮，AWWA於1968年之政策宣示(Policy Statement)中，希望鋁之濃度能低於50 $\mu\text{g/L}$ 。而美國伊利諾州政府曾於1986年以基於人體健康著想之理由，提議將飲水中之含鋁量限制在100 $\mu\text{g/L}$ 以下。至於目前世界各國在飲水水質管理上對鋁所作之規定，除歐洲共同市場(EEC)設有200 $\mu\text{g/L}$ 之最大允許值(Maximum Permissible Level)係屬管制(Regulation)性質外，其他均屬引導值或建議值(Guideline 或稱 Guidance Level)，如世界衛生組織(WHO)之Guidance Level訂在200 $\mu\text{g/L}$ ，1985美國環保署建議之Guidance Level為50 $\mu\text{g/L}$ ，前述EEC之Guidance Level亦訂為50 $\mu\text{g/L}$ 。(1)

而清水中鋁之來源，除原水中本來具有者外，主要來自淨水程序中常使用之含鋁鹽類，如硫酸鋁(Aluminum Sulfate，含結晶水之硫酸鋁，俗稱明礬 Alum)及多元氯化鋁(Poly-aluminum Chloride，簡稱PAC)等，根據統計資料，台灣省自來水公司使用之含鋁混凝劑佔全部混凝劑之98%以上(重量比)(2)。據美國環保署對全美186個給水系統的調查顯示，以明礬為混凝劑之淨水場，其清水之鋁含量有40~50%機率會高於原水(3)。

國內葉氏及莊氏(4)調查南部地區鳳山、潭頂、烏山頭三淨水場，水中含鋁量隨淨水程序變動之情形，結果發現三淨水場之原水含鋁量均低於50 $\mu\text{g/L}$ ，而鳳山淨水場之原水濁度高，明礬用量大，配合以其水之pH值較低(6.8~7.2之間)，使其混凝機制主要生成大量氫氧化鋁，行沉澱絆除之作用，因此在濾池過濾後，其清水中殘餘鋁量可低於50 $\mu\text{g/L}$ ，反觀潭頂、烏山頭二淨水場之原水濁度低，明礬用量少，但因pH值較高(8.0~8.5之間)，使加入之明礬以溶解鋁之型態存在，造成清水中殘餘鋁有時超過200 $\mu\text{g/L}$ 。可見在淨水處理中，清水殘餘鋁量受混凝劑加量與pH值影響極大。

另外葉氏等(5)於實驗室以人工原水為對象，以明礬及多元氯化鋁為混凝劑，進行瓶杯試驗，以探討降低水中溶解鋁之方法，發現只要控制清水pH在5.8至7.5之間，即可減少水中溶解性鋁之含量；而控制之方法，可利用加酸令pH下降，或增加混凝劑量，使操作條件落在氫氧化鋁形成區內，則加於水中之含鋁混凝劑大多沉降成為污泥，清水中殘餘鋁即可降低。

基於以上各點，為尋求降低烏山頭淨水場清水中殘餘鋁含量之方法，本研究選擇在現場進行模型廠試驗，而嘗試加酸調整pH值與增加混凝劑量二方法；並且根據葉氏(6)在烏山頭淨水場所進行之直接過濾試驗，發現該場之低濁度原水很適於直接過濾操作，且所需之混凝劑量亦較傳統程序少，故亦試驗是否能利用直接過濾之較低混凝劑量及較佳之顆粒捕捉能力，而達到降低清水中殘餘鋁量之目的。

* 國立成功大學環境工程研究所碩士

** 國立成功大學環境工程研究所教授

二 實驗設備、材料與方法

本研究主要以模型廠試驗為主，模型廠位於烏山頭淨水廠化驗室一樓，模廠進流水即淨水廠原水，每批次模型廠試驗之前，須先由瓶杯試驗決定混凝劑之加量。以下將依原水水質，瓶杯試驗，模廠設備，模廠試驗，水質分析方法之順序說明之。

2.1 烏山頭淨水廠原水水質

烏山頭淨水廠位於烏山頭水庫旁，其水源來自曾文水庫及其集水區，原水水質狀況(民國78~79年)大致為：水溫 20~31°C，總鹼度 89~175 mg/L (as CaCO₃)，總硬度 108 ~ 152 mg/L (as CaCO₃)，鈣 30~38 mg/L，鎂 5~14 mg/L，pH值7.3~8.5，濁度常在5 NTU以下，故頗適合直接過濾之操作。

2.2 瓶杯試驗

本研究中有關混凝劑之劑量均以 mg/L as Al來表示，以便加入鋁量和殘餘鋁量之比較。瓶杯試驗使用之容器為六個壓克力方形杯 (15 cm×10 cm×10 cm，取水口在中間距底部 6 cm處)。所試驗之兩種混凝劑，一為硫酸鋁(Alum, Al₂(SO₄)₃·18 H₂O, MW:666, Aluminum Sulfate 18-Hydrate, Extrapure, E. Merck, Germany)，另一為多元氯化鋁(PAC, Poly Aluminum Chloride, 液態含Al₂O₃ 10%，若為粉狀PAC含Al₂O₃ 30%，衛源公司，台灣)。在改變pH與添加助凝劑方面，分別以硫酸(H₂SO₄, E. Merck, Germany)以及皂土(Bentonite, 工業級, Japan)為之。

瓶杯試驗的程序為：在六個方形壓克力杯中各加入 1 公升原水，除一杯空白試驗不加藥外，其餘分別依需要加入等容積但不同濃度之藥劑。加藥之後，將六個壓克力杯置於瓶杯試驗機(Stirrer, Philp & Bird, Virginia, U.S.A)上，先以200 rpm快混2分鐘，再以20 rpm慢混20分鐘，隨後靜置30分鐘。靜置沉澱後，分別汲取上澄液，進行各項水質分析。

2.3 模型廠設備

本模型廠計有相同之模型三組，可同時進行實驗，處理水之流程有直接過濾程序與傳統程序兩種，其設備予以介紹如下：

混凝設備方面，快混槽是以壓克力材料製成，尺寸為0.40 m×0.35 m×0.36 m，有效容積0.037 m³。攪拌用漿葉尺寸為0.15 m×0.02 m，共四片，不銹鋼材料製成。慢混槽亦係壓克力材料製成，尺寸為0.55 m×0.50 m×0.50 m，有效容積0.138 m³。攪拌漿葉尺寸為0.36 m×0.04 m，共三片，亦係不銹鋼材料製成。

沉澱單元係採用斜板沉澱槽，希望以其高效率之沉澱作用，可減少槽體所佔之體積，其材質為壓克力，斜板計有八片，設計水力停留時間為60分鐘。

過濾單元分成濾筒與水頭損失板兩部分，濾筒為圓筒狀，以壓克力材料製成，高 2.5 m

，內徑為 10 cm，在不同深度設有水頭損失量測孔，並以塑膠管接至水頭損失量板，共有三座。使用無煙煤及矽砂之雙層濾料，其規格及厚度依所試驗之操作程序而不同，詳如表 1 所示。

表 1 濾料規格

組合 規格	直接過濾		傳統程序	
	砂	煤	砂	煤
有效粒徑 ES(mm)	0.49	1.5	0.49	1.0
均勻係數 UC	1.49	1.2	1.49	1.5
厚度(cm)	25	50	50	25

2.4 模廠試驗

直接過濾試驗之濾率為 300 m/day，採定濾率操作，而快混槽之停留時間為 5 分鐘，慢混槽之停留時間為 15 min，快混槽與慢混槽之攪拌強度 G 值分別為 733 與 50 sec⁻¹，操作時每隔一段時間採取水樣測量濁度並記錄水頭損失，至出水濁度逐漸降低至平穩，即間隔一段時間分兩次各採 1000 mL 水樣，以進行殘餘鉛量等多項水質分析。

傳統混凝—沉澱—過濾程序之試驗，其操作條件與直接過濾類似，快、慢混之強度與停留時間均保持不變，濾率亦相同，亦以定濾率操作。

2.5 水質分析方法

國內葉氏及莊氏⁽⁴⁾曾對各種分析水中鉛含量之方法進行研究，由使用儀器與分析技術之繁簡，及結果精確度與準確度等方面作比較，結果認為以 Pyrocatechol Violet(PCV) 為銻合劑之分光光度計法最適合國內淨水場之使用。本研究之水中鉛含量分析法即採用英國環境部分析師常設委員會(Standing Committee of Analysts, Department of the Environment, 1979)，所公布之 PCV 法，該法係在適當緩衝溶液內，使鉛與 Pyrocatechol Violet 生成藍色之錯合物，然後以分光光度計在 585 nm 波長下量其吸光度值，其中鐵所可能引起之干擾，則以 1,10-Phenanthroline 加以去除之。

水中鉛含量之分析，除測總鉛(Total Al)外，亦將總鉛分成溶解性鉛(Dissolved Al)及顆粒狀鉛(Particulate Al)。總鉛之分析乃在水樣中加入適量的濃 HCl，使保持 0.1 M HCl 狀態，靜置 24 小時後以 PCV 法分析之。而溶解性鉛則先將水樣以 0.2 μm 濾膜(Polycarbonate Capillary Membrane, Poresize 0.2 μm, 47 mm, U.S.A)過濾後，加 HCl 酸化，再以 PCV 法分析之。顆粒狀鉛量則由總鉛量減去溶解性鉛量而得。

實驗中採得水樣除分析鉛含量外，亦分析鈣含量、總鹼度、總溶解性固體物、濁度、pH 值、溫度等項目，其測定方法均參照美國水及廢水標準檢驗法⁽⁷⁾。

三 結果與討論

3.1 瓶杯試驗結果

3.1.1 改變混凝劑加量之瓶杯試驗

本實驗中所進行不同混凝劑加量之瓶杯試驗，分別以明礬與多元氯化鋁為混凝劑，圖 1 即原水濁度為 1 NTU，pH 值 8.3，以明礬為混凝劑，經瓶杯試驗操作後；其殘餘濁度隨加藥量之增加而下降，於 1 mg/L 與 5 mg/L 之加藥量時，下降至 0.45 NTU 之最低點，而在 10 mg/L 又跳升。以試驗時肉眼之觀察，可見 10 mg/L 加藥量時，雖生成許多膠羽，但因過於細小，沉降性不佳，致所測得殘餘濁度較高。在 pH 值方面，加藥量愈多，混凝後 pH 值降得愈低，這是因為明礬溶於水時會因水解反應消耗水中鹼度，致使原水之 pH 值隨加藥量增加而下降，並引起水中溶解性鋁含量之變化。殘餘鋁之測定在圖上可以看出在低加藥量時，殘餘總鋁量隨加藥量之增加而升高，而在加藥量達 0.5 mg/L 後，變成隨加藥量增加而下降，但在加藥量達 10 mg/L，又大幅上升，這種結果可能是高加藥量時，水中膠羽多而細微，沉降不易所致。上澄液之殘餘溶解性鋁則在 0.5 mg/L 之加藥點開始逐漸下降至 10 mg/L 之最低點。依相關文獻⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾之研究得到 pH 值 6.5 時，溶解性鋁量最低，可知這是水中鋁物種在 pH 值位於 6.5~7 之間形成不溶解性的氫氧化鋁膠羽之量最多，使得溶解性鋁降至最低。

在相同原水條件下，以 PAC 為混凝劑，所得結果如圖 2 所示，可見到 PAC 之濁度去除性較明礬為佳，在 10 mg/L 之最高加藥點也沒有濁度上揚之現象，PAC 混凝時，對水中鹼度之消耗亦低於明礬，因此 pH 之降低較少。在殘餘鋁量方面，PAC 混凝後之上澄液總鋁量較低，並不會在高加藥點有揚起現象，而溶解性鋁在 1 mg/L 加藥量以上開始隨 pH 值之下降有降低之趨勢，而以 10 mg/L 加藥量之溶解性鋁而言，尚略高於明礬同加藥點，亦正是 pH 值不同所造成的影響。

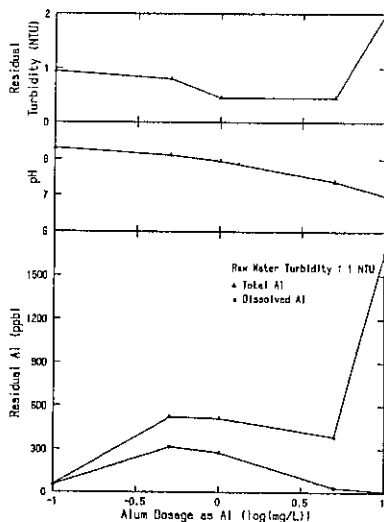


圖 1 以明礬為混凝劑之瓶杯試驗

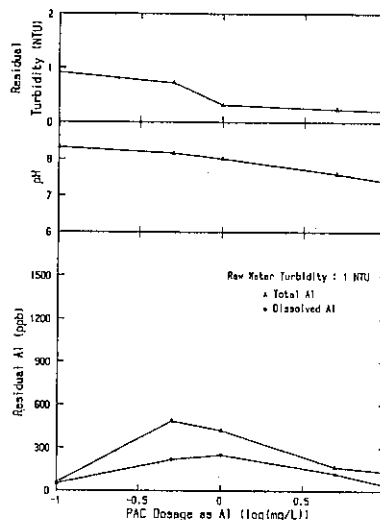


圖 2 以多元氯化鋁為混凝劑之瓶杯試驗

以這部份瓶杯試驗而言，在不同時間，不同濁度原水所進行的明礬與多元氯化鋁為混凝劑的不同加藥量試驗，其表現出之現象皆頗類似，可歸納為：

- (1) 混凝劑加量太少，對水中懸浮質之去除效果不佳，而明礬加量太多會產生衆多細小膠羽，因沉降不易，而令上澄液濁度與總鋁量因而上升。以PAC 為混凝劑則未有此現象。
- (2) 明礬與PAC 之添加皆會消耗鹼度，令水中pH值下降，而以明礬之影響較PAC 為大。
- (3) 因PAC 之添加所造成 pH 值的下降較明礬少，故水中殘餘溶解性鋁含量，會因此受到影響，例如在混凝劑加量達10 mg/L之情況下，明礬會令 pH值降至 7以下，PAC則約在7.1左右；因此在同一原水狀況時明礬處理之殘餘溶解性鋁含量會低於PAC 所處理者。
- (4) 以瓶杯試驗來選擇混凝劑之最佳加藥量，就此部份實驗所得之結果而言，烏山頭之水質常處低濁度狀態，若添加混凝劑量低於 1 mg/L (相當 6.34 mg/L 之 $Al_2(SO_4)_3$ 或12.35 mg/L之 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)，則對濁度之去除並無太大助益，且因所加入之鋁鹽，有一大部份以溶解型態存在，將導至水中殘餘鋁量大量增加之後果。而若選擇較高加藥量(5 mg/L以上) 則可順利去除水中濁度，並令水中殘餘溶解性鋁降至50 $\mu\text{g/L}$ 左右，但須注意混凝時所形成之膠羽要能有效地固液分離，否則將造成總鋁量大增。

3.1.2 改變原水pH值之瓶杯試驗

改變原水pH值之試驗是在原水濁度27 NTU之條件下，以硫酸調整原水之pH值；使用的混凝劑量則參考 3.1.1之試驗中殘餘濁度低，且殘餘溶解性鋁量亦低的加藥量來進行，首先以 5 mg/L明礬為混凝劑，在混凝前調整原水至不同pH值，再進行混凝實驗；圖 3即混凝後pH值和殘餘濁度與殘餘鋁量之關係圖，由實驗數據可知溶解性鋁含量在pH值6.6~7之間三點皆可低於50 $\mu\text{g/L}$ ，而當pH值低於5.1時，溶解性鋁已開始升高，至pH值 4.7更有達4,600 $\mu\text{g/L}$ 以上之高濃度出現。而濁度之去除在此試驗中皆未能低於1 NTU，尤以pH 4.7之2.9 NTU最高。

以同樣步驟，而以PAC 10 mg/L為混凝劑之試驗，結果如圖 4所示，混凝後上澄液之殘餘濁度大多在1 NTU 以下，顯示較明礬混凝有更佳之效果，殘餘溶解性鋁則在pH值 5.7~7 皆有極低之濃度，只在pH降低至4.6 之點，有殘餘鋁量以溶解態為主，而大幅升高之情形。

大體而言，無論明礬或 PAC當混凝劑，其殘餘溶解性鋁量皆受pH值影響甚大，在pH 值6~7之間溶解性鋁濃度可有較低值，一旦pH低於 5以下，則會因水中鋁以溶解態存在，而大幅升高。此種結果和葉氏等⁽⁶⁾以實驗室合成原水進行瓶杯試驗所得到之結論相符。

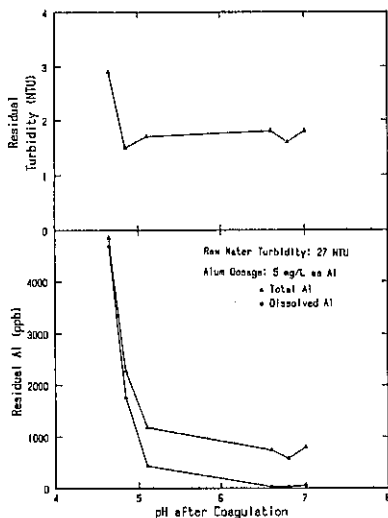


圖 3 明礬為混凝劑，改變pH值試驗

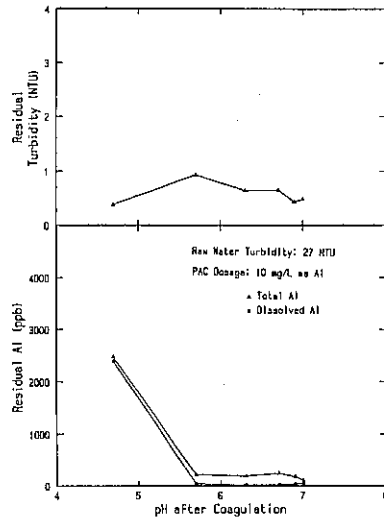


圖 4 多元氯化鋁為混凝劑，改變 pH值試驗

3.1.3 添加助凝劑之瓶杯試驗

本試驗乃利用皂土(Bentonite)為助凝劑，希望經由增高原水濁度，以改變混凝機構，降低加藥量，以視能否減少殘餘鋁量⁽⁹⁾。其中各組試驗是以濁度 0.91 NTU之原水分別添加不同濃度皂土來進行試驗，將此些瓶杯試驗之結果，彙整成明礬加量、皂土加量分別與殘餘濁度(圖 5)，殘餘總鋁量(圖 6)，或殘餘溶解性鋁量(圖 7)關係之三度空間圖。由圖 5可見，隨著皂土之加量增加，明礬劑量0.1 mg/L無法令增加之濁度完全沉降下來，而造成殘餘濁度大幅升高；相反的5及10 mg/L之明礬加藥量時，則在皂土劑量增加時，殘餘濁度並未受到太大之影響，也因如此，由圖上可以看到殘餘濁度在明礬高劑量區之變化不大。

圖 6為殘餘總鋁量之分佈，可看到在低明礬劑量時，總鋁量隨皂土加量增加而增加，而高明礬劑量時，總鋁量反而隨著皂土加量增加而減少，而圖 7溶解鋁量之分佈圖則可看出溶解性鋁之含量僅受明礬劑量之影響，皂土加量之影響不大。於是比較此九組有關不同濁度原水之瓶杯試驗的結果，以及實驗時觀察到的現象，可以歸納以下數點：

- (1) 混凝後pH值之變化，除了受混凝劑加量之影響外，並不因原水濁度之升高而有所改變。
- (2) 由圖 7看出上澄液之殘餘溶解性鋁僅因明礬加量不同，而依pH值之變化而改變，不受原水濁度所影響。
- (3) 高混凝劑量下，因產生之膠羽過於微細，易造成上澄液總鋁量上揚之情況。若同時增添皂土，則有助於總鋁量之降低。
- (4) 在本節試驗中，針對0.9 NTU左右之低濁度原水，添加混凝劑及皂土，可在混凝後得到0.5NTU以下之上澄液，若以文獻上⁽⁹⁾之說明：對低濁度水之混凝，殊為不易，常須添加大量混凝劑，使達共沉降才可發揮沉降糾除濁度之效用。或者可藉由添加助凝劑如黏土(Clay)，使增加濁度，則可在較少的混凝劑加量下，利用吸附及電荷中和之機制達到去除濁度之目的。依此原理，吾人可以考慮在模廠進行傳統程序之試驗時，添加皂土於低濁度原水中以幫助膠羽之沉降，如此可在沉澱槽中去除大多數膠羽及懸浮質，使過濾單元之固體物負荷減輕，則可令濾程加長，出水品質良好，並冀望水中鋁之含量亦因而減少。

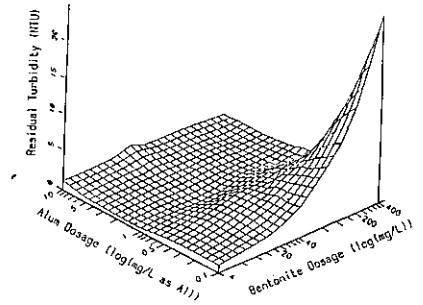


圖 5 明礬及皂土加量對上澄液殘餘濁度之影響

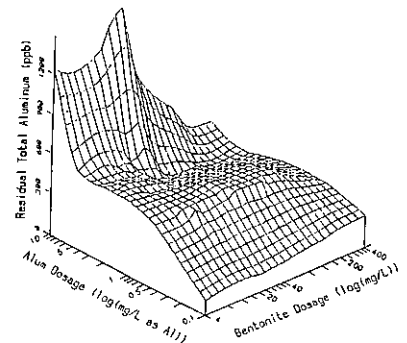


圖 6 明礬及皂土加量對上澄液殘餘總鋁量之影響

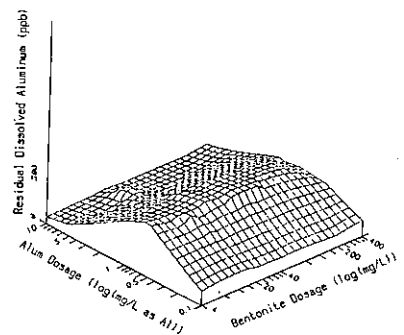


圖 7 明礬及皂土加量對上澄液殘餘溶解性鋁之影響

3.2 直接過濾試驗

3.2.1 改變混凝劑加量

以明礬為混凝劑所進行之直接過濾實驗，計完成六個不同混凝劑加量之試程，在此彙集成如圖 8, 9 所示，在圖 8 中可以看到在直接過濾中，不加混凝劑則濁度之去除效果相當不好，Adin⁽¹⁰⁾強調，過濾時通常必須使用適當之混凝劑，否則無法有效地去除膠體物質，Logsdon⁽¹¹⁾亦認為不加混凝劑之過濾，無法去除大部份之病原生物。而 0.8 與 1.2 mg/L 之明礬劑量均能將出流水濁度降至 0.5 NTU 以下，可見在直接過濾中，低混凝劑量即能發揮去除濁度之效果。圖 9 中更高之明礬劑量 1.6, 2.4 及 4.7 mg/L，亦皆能令出水濁度降至 0.5 NTU 左右，但由圖上可以看到較高加藥量之 2.4、4.7 mg/L，均很早即有濁度貫穿之現象，而其水頭損失亦快速增加。

多元氯化鋁之不同劑量試驗，在圖 10 中，可見到多元氯化鋁 0.27 mg/L 之劑量在直接過濾操作中，並不能使出流水濁度降低至 1 NTU 以下，Adin⁽¹⁰⁾曾指出在直接過濾操作時，若加混凝劑量不足 (Underdose)，將無法順利達到去除濁度之目的。而較高之劑量 0.53 及 1.06 mg/L 則可發揮去除濁度之效用，使出流水濁度約在 0.44 NTU 左右。同樣以多元氯化鋁為混凝劑，而更高加藥量之試驗結果如圖 11 所示，其中 2.12 mg/L 在操作過程中可得到濁度約 0.4 NTU 之出流水，且水頭損失之增加較慢，3.18 mg/L 之出水濁度在 100 分鐘時即開始上揚，且水頭損失增加頗快，顯見其濾程將甚短，而 4.76 mg/L 之高加藥量，不但濁度之貫穿在 80 分鐘時即已開始，其水頭損失之增加更快，因此 3.18, 4.76 mg/L 皆可視為加藥量過多之情況。

將直接過濾操作中，改變混凝劑加量之各組試驗所得到的出流水濁度，殘餘鋁量，pH 值及水質穩定性等資料予以整理在表 2 中，可以看到明礬劑量在 0.3 mg/L 以下無法發揮去除濁度之效用，而由 0.8 到 1.6 mg/L 之劑量，雖可令出流水濁度降至 0.5 NTU 以下，但因混凝劑之加量尚不足使 pH 值降低至接近低溶解鋁之範圍，因此出流水之殘餘鋁量仍高於 200 µg/L；至於 2.4 mg/L 之劑量在濁度及殘餘鋁量兩方面皆可得到良好之結果，但由圖 9 可看出 2.4 mg/L 和 4.7 mg/L 之濾程皆相當短，在淨水程序操作上可謂不合實際。多元氯化鋁方面，雖然加藥量由 0.5 mg/L 以上皆可順利去除濁度，但由 0.3 mg/L 到 4.8 mg/L 之各種劑量殘餘溶解性鋁皆頗高。

總而言之，在直接過濾中欲藉改變混凝劑量，以達到出流水之濁度及殘餘鋁量均低之目標，是不可行的。因為在混凝劑尚不足以降低 pH，使水中殘餘鋁減少之際，直接過濾之濾床已不堪高混凝劑量之負荷。

3.2.2 加酸調整 pH 值

加酸調整 pH 值之試驗，分成明礬 0.8 mg/L 及 PAC 0.53 mg/L 兩種加藥量，並在快混槽中加入適當量的硫酸，使過濾水之 pH 值落在 8 至 4.5 之間，以嘗試利用加酸調整之方式來獲得低濁度且低殘餘鋁之出水水質。

圖 12 即在明礬劑量 0.8 mg/L 時，以硫酸調整出水成 8.0, 7.5, 6.8, 4.6 等不同 pH 值之試驗結果，由圖上可看出在此加藥方式下，出流水之濁度都能低於 0.5 NTU，而水頭損失上可看出 pH 4.6 之水頭損失增加最慢而 pH 6.8, 7.5 則增加稍快。在殘餘鋁量方面，將各不

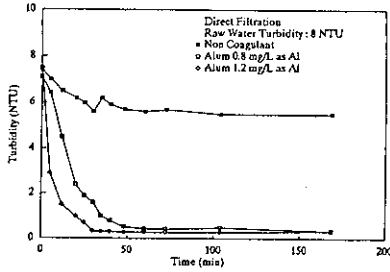


圖 8 明礬 0, 0.8, 1.2 mg/L as Al 之直接過濾操作結果

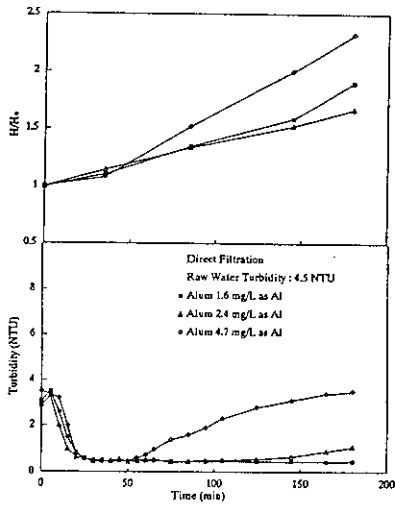


圖 9 明礬 1.6, 2.4, 4.7 mg/L as Al 之直接過濾操作結果

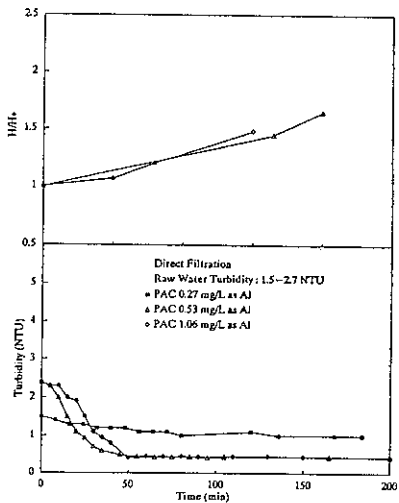


圖 10 多元氯化鋁 0.27, 0.53, 1.06 mg/L as Al 之直接過濾操作結果

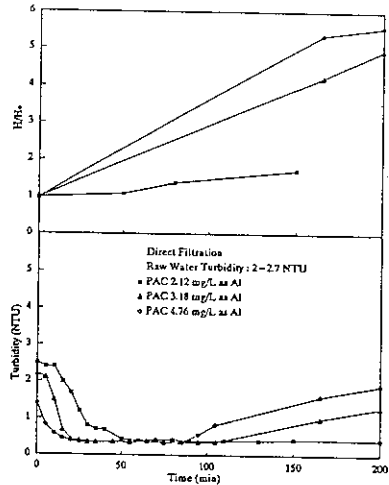


圖 11 多元氯化鋁 2.12, 3.18, 4.76 mg/L as Al 之直接過濾操作結果

表 2 直接過濾操作改變混凝劑加量之試驗

項目	劑量 (mg/L as Al)	pH	濁度 NTU	TAL* (ug/L)	DAL* (ug/L)	水質穩定性
明礬	0	8.1	5.5	98	69	S**
	0.2	8.1	1.5	111	86	S
	0.3	8.1	1.2	254	248	S
	0.8	8.0	0.4	284	275	C**
	1.2	7.9	0.27	286	279	C
	1.6	7.9	0.45	288	275	C
	2.4	7.7	0.44	125	100	C
	4.7	7.6	1.4	615	218	C
多元氯化鋁	0.3	8.1	1	231	214	S
	0.5	8.1	0.43	337	319	S
	1.1	8.0	0.41	314	304	S
	2.1	8.0	0.44	329	316	S
	3.2	8.0	0.34	279	263	S
	4.8	7.9	0.34	263	261	C

* TAL : Total Aluminum (ug/L)

DAL : Dissolved Aluminum (ug/L)

** C : Corrosion 表示LSI 值為負

S : Scale 表示LSI 值為正

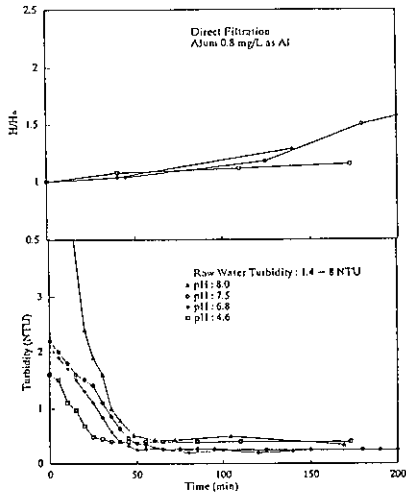


圖 12 明礬 0.8 mg/L 之直接過濾操作, 加酸調整 pH 值試驗

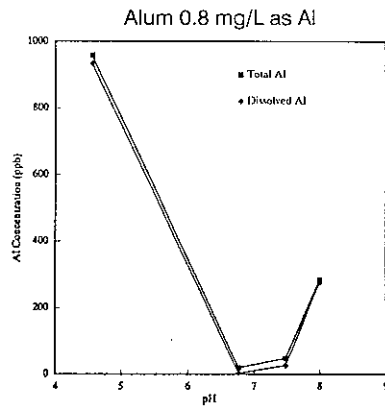


圖 13 明礬 0.8 mg/L 加酸調整 pH 值之殘餘鋁量

同 pH 值之清水中殘餘鋁量整理於圖 13 中, 可以看到低殘餘鋁量之 pH 範圍在 6.8~7.5 之間, 一旦高過或低於此範圍, 則殘餘鋁量即升高超過 200 $\mu\text{g/L}$ 之管制, 此點和瓶杯試驗之結果頗相吻合。

多元氯化鋁 0.53 mg/L 之劑量下, 加酸調整 pH 值之試驗結果彙整如圖 14 所示, 圖中 pH 值 8.1 者濁度為 0.43 NTU 其餘 pH 7.5, 6.8, 4.7 者均能使濁度低至 0.2 NTU 左右, 而水頭損失方面 可看出 pH 4.7 者水頭損失增加最慢, pH 8.1, 7.5, 6.8 三者則相差不多。這些不同 pH 值之清水中殘餘鋁量之高低如圖 15 所示, 以 pH 6.8 為最低值, 次為 pH 7.5, 而 pH 8.1 已超過 200 $\mu\text{g/L}$, pH 4.6 更高達 700 $\mu\text{g/L}$ 左右。此和圖 13 頗為類似, 顯然鋁鹽混凝劑會造成多少殘餘鋁量, 主要仍受 pH 值之影響。

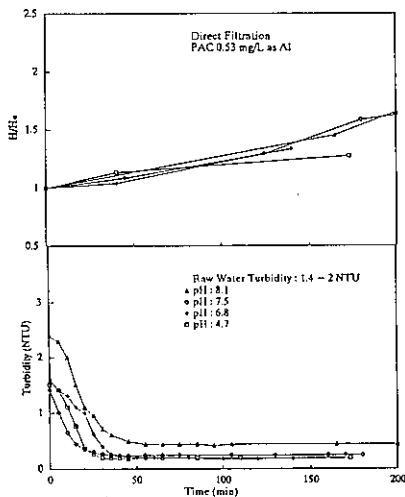


圖 14 多元氯化鋁 0.53 mg/L 之直接過濾操作加酸調整 pH 值試驗

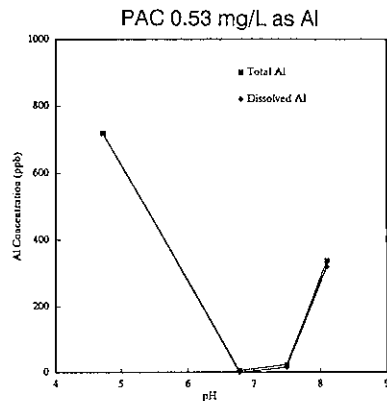


圖 15 多元氯化鋁 0.53 mg/L 加酸調整 pH 值之殘餘鋁量

再看表 3 將各組試驗之殘餘鋁量一起比對，可看出在不同混凝劑及不同劑量下，加酸調整 pH 值為 6.8~7.4 左右者，其殘餘鋁量均可遠低於 200 $\mu\text{g/L}$ ，且出水濁度亦均能低於 0.5 NTU，由此可知利用加酸調整 pH 來控制殘餘鋁量當為可行之方法。在文獻中⁽¹⁾曾調查美國境內淨水場降低清水中殘餘鋁之方法，調整 pH 值正是最常被採用之一種。

3.3 傳統混凝-沉澱-過濾程序試驗

傳統混凝-沉澱-過濾程序之模廠試驗是以瓶杯試驗之結果為基礎，進行增加混凝劑量之實驗，其中以明礬 1, 3, 5 mg/L 三種劑量來行傳統程序試驗。圖 16 即其試驗之結果，其中 1 mg/L 之出水濁度可低至 0.25 NTU，且在沉澱槽之膠羽量較少，而隨著劑量之增加至 3 mg/L 及 5 mg/L，在沉澱槽所沉降之膠羽亦增多，且其出流水之濁度更低，可達 0.1 NTU 左右，但亦有一些微細膠羽仍會流過沉澱槽，進入過濾筒中，使得 3 mg/L, 5 mg/L 之濾床水頭損失大於 1 mg/L 者。

而在傳統程序操作時若添加一些黏土 (Clay)，或可充當膠羽形成之助凝核心，一則可令形成之膠羽增重，以增加沉降去除之機會，二則可減少微細膠羽流入濾床之機會，降低濾床之負荷。此正是文獻中提及，將低濁度之原水增加濁度，使去穩定之機制由沉澱絆除轉成吸附與電價中和之一種應用⁽⁹⁾。

因此，由 3.1.3 節之瓶杯試驗決定添加皂土之劑量，選擇以 1 mg/L 之明礬劑量，添加 20 mg/L 之皂土，以及 5 mg/L 之明礬劑量，添加 200 mg/L 皂土來進行實驗。圖 17 即此二組試驗之結果，其中 1 mg/L 之明礬添加 20 mg/L 皂土之試驗，其出水濁度約為 0.29 NTU，尚略高於圖 16 未加皂土之實驗；而 5 mg/L 明礬添加 200 mg/L 皂土之試驗，其出水濁度為 0.12 NTU，觀察沉澱槽中膠羽之狀況，則後者有較易沉降之現象，Amirtharajah 及 Trusler⁽¹²⁾曾研究在同一 pH 及攪拌強度 G 值下，不同混凝劑量會產生不同大小之膠羽。是否因此能有延長濾程之作用，則將以全程試驗進一步了解。

表 4 將本節實驗之水質狀況做一整理，以傳統程序試驗中出流水之水質分析結果，所進行之水質穩定性計算，可發現在所試驗加藥量下，過濾水之 LSI 均為負值。此外可以見到在水質低濁度及低殘餘鋁量之選擇上，明礬 1 mg/L 雖可達降低濁度之目的，殘餘鋁量卻高於 200 $\mu\text{g/L}$ 甚多；明礬 3 mg/L 則是殘餘鋁量正在 200 $\mu\text{g/L}$ 左右，但若以水質安全性而言，此劑量並不符合日常之操作需求，唯有 5 mg/L 之劑量可在濁度及殘餘鋁量皆獲得滿意之結果，而以此加藥量在沉澱槽中將形成許多膠羽，而添加皂土可促進膠羽沉降來看，吾人決定以全程之試驗，即操作模廠直到濾程中止 (因水頭損失或濁度貫穿)，以瞭解此種操作方式之可行性。

3.4 全程實驗

全程實驗乃利用 3.2 直接過濾試驗中，可達低濁度與低殘餘鋁出水之加酸調整 pH 值的操作方式，以及 3.3 傳統程序操作中，增加混凝劑及增添助凝劑之操作方式，來進行實驗。以此些可獲得良好出水水質之操作條件，進行全程操作，直到濾程中止，以比較其水頭損失增加情況及濾程長短，濾程之中止是以水頭損失超過 2 公尺，或出水濁度超過 0.5 NTU 作為指標。

表 3 直接過濾操作加硫酸調整pH以降低出水鋁含量之試驗

項目	劑量 (mg/L as Al)	pH	濁度 NTU	TAL* (ug/L)	DAL* (ug/L)	水質穩定性
明礬	1.2	7.9	0.27	286	279	C**
		7.4	0.22	58	42	C
		6.9	0.23	ND	ND	C
	0.8	4.6	0.39	693	648	C
		8.0	0.40	284	275	S**
		7.5	0.25	48	26	C
多元氯化鋁	2.1	6.8	0.36	ND	ND	C
		4.6	0.40	959	935	C
		8.0	0.44	329	316	S
	0.5	7.5	0.20	ND	ND	C
		6.7	0.16	ND	ND	C
		3.4	0.20	2254	2206	C
多元氯化鋁	0.5	8.1	0.43	337	319	S
		7.5	0.24	ND	ND	C
		6.8	0.20	ND	ND	C
		4.7	0.19	719	719	C

* TAL : Total Aluminum (ug/L)
 DAL : Dissolved Aluminum (ug/L)
 ** C : Corrosion表示LSI值為負
 S : Scale表示LSI值為正

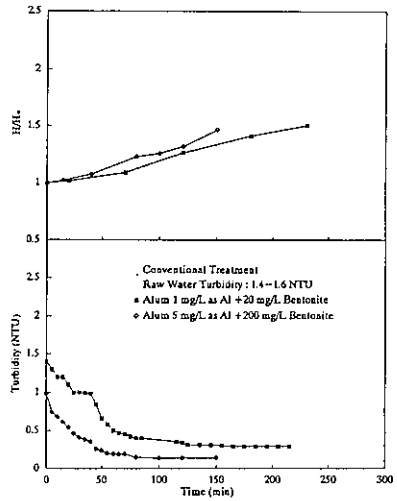


圖 17 傳統程序之添加濁度試驗

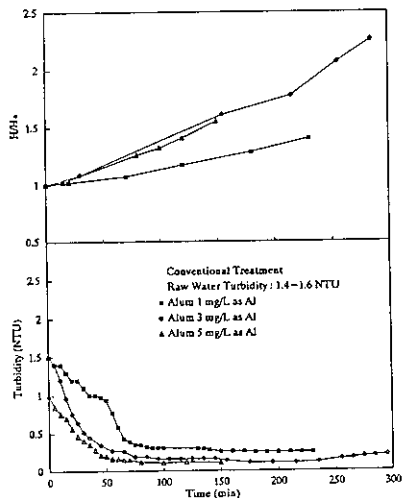


圖 16 傳統程序之增加明礬劑量試驗

表 4 傳統程序試驗之殘餘鋁量

明礬劑量	pH	濁度 NTU	TAL*	DAL*	水質穩定性
1 mg/L as Al	7.6	0.25	453	448	C**
3 mg/L as Al	7.6	0.12	235	216	C
5 mg/L as Al	7.4	0.11	116	106	C
1 mg/L as Al + 20 mg/L Bentonite	7.6	0.29	345	329	C
3 mg/L as Al + 20 mg/L Bentonite	7.7	0.16	199	184	C
3 mg/L as Al + 50 mg/L Bentonite	7.8	0.13	207	198	C
5 mg/L as Al + 200 mg/L Bentonite	7.4	0.12	81	83	C

* TAL : Total Aluminum (ug/L)
 DAL : Dissolved Aluminum (ug/L)
 ** C : Corrosion表示LSI值為負

圖18即是將加酸調整之實驗：包括直接過濾程序之明礬0.5 mg/L 及多元氯化鋁 0.5 mg/L，以及傳統程序明礬0.5 mg/L 等三組試驗做一比較。直接過濾部份，以明礬0.5 mg/L之混凝劑量，在添加硫酸調整pH值至 7.4之情況下所得到之結果，由圖中可看到其出水濁度能在0.27NTU左右維持穩定，而水頭損失之增加亦相當緩慢，直到實驗進行至56小時，水頭損失超過 2公尺才中止濾程，此時出水濁度仍無上揚之跡象。而以多元氯化鋁0.5 mg/L 之加藥量，在加硫酸調整 pH 值至 7.4之直接過濾操作，其穩定出水濁度可低至0.16 NTU，而於20小時開始有上揚之趨勢，於36小時超過0.5 NTU，在濾程中，水頭損失亦於36小時後增加至180 cm左右。傳統程序中，明礬0.5 mg/L之加藥量，以加硫酸控制pH值在7.4左右，所得之實驗結果，其出水濁度在0.3 NTU左右，水頭損失增加緩慢，至69小時才超過 2公尺。

在殘餘鋁量方面（見表 5），明礬 0.5 mg/L以硫酸調整 pH 值，在直接過濾及傳統程序兩種操作方式下，皆有約180 µg/L之殘餘鋁，而在直接過濾中PAC 0.5 mg/L之試驗則有較低之殘餘鋁量，約在 100 µg/L左右。

三者之比較可發現多元氯化鋁之處理水濁度較低，但濁度貫穿較早，水頭損失增加亦較快，據其出流水殘餘鋁量較低來看，或即因有較多之膠羽截留於濾床內，因此造成濾床較易堵塞，以致水頭損失增加較快，濁度貫穿較早之現象。而明礬在同樣之加藥條件下，傳統程序出水濁度略高於直接過濾，但水頭損失則較直接過濾為小，在沉澱槽未發現明顯膠羽之情況下，實難以由肉眼觀察來判斷二者差異之由來。

另外傳統程序提高混凝劑量以期降低殘餘鋁量方面，以明礬5 mg/L之劑量，進行添加污泥，及未添加污泥之實驗，如圖19所示，未添加污泥者，在出水濁度穩定時，濁度為 0.15 NTU左右，而在濾程進行至6小時濁度即開始提高，至約13小時出水濁度超過0.5 NTU，可視為濾程之終結，水頭損失方面在18小時才達到 57 cm，對濾程之長短並無影響。而另一組添加200 mg/L烏山頭實廠污泥(TS:41,992 mg/L)，以幫助膠羽的形成與沉降去除，出水之濁度在0.13 NTU達到穩定，於11小時開始上揚，至18小時超過0.5 NTU。

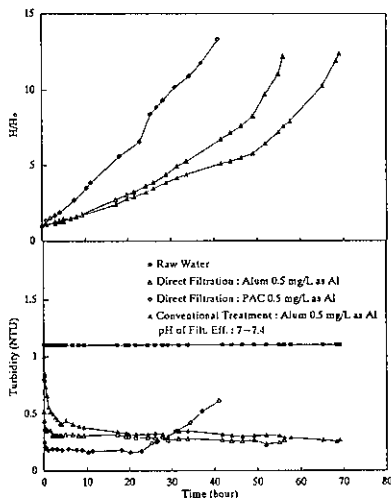


圖 18 加酸調整 pH 值之全程試驗

表 5 全程試驗之結果比較

操作方式	加藥劑量	pH	濁度 NTU	TAl*	DAI*	濾程 (Hour)	中止原因
直接過濾	Alum 0.5 mg/L as Al	7.1~7.4	0.21	174	164	56	水頭損失超過 2 m
	PAC 0.5 mg/L as Al	7.2~7.5	0.18	102	96	36	濁度超過 0.5 NTU 及水頭損失增加
傳統程序	Alum 0.5 mg/L as Al	7.1~7.5	0.22	189	158	.69	水頭損失超過 2 m
	Alum 5 mg/L as Al	7.5	0.15	149	133	13	濁度超過 0.5 NTU
	Alum 5 mg/L as Al + 污泥	7.5	0.13	157	125	18	濁度超過 0.5 NTU

* TAl : Total Aluminum (µg/L)

DAI : Dissolved Aluminum (µg/L)

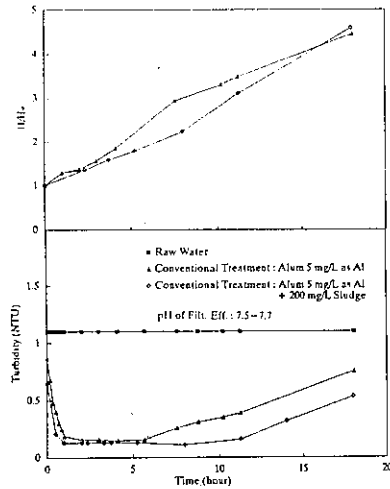


圖 19 明礬劑量 5 mg/L 添加污泥之全程試驗

二者清水中之殘餘鋁量如表 5 所示，皆在 150 $\mu\text{g/L}$ 左右，證明在傳統程序中添加助凝劑對清水殘餘鋁量之影響不大；對此二者之比較，可以發現添加污泥時，濁度之上升較慢，所以濾程得以延長約 5 小時。

表 5 中以上述五組試驗之出流水，進行水質項目分析來計算藍氏指數，結果在此些全程試驗中所得之水質，LSI 均為負值，亦即水質有趨於腐蝕性之可能。總合清水濁度，殘餘鋁量及穩定性等水質項目予以比較，可以發現加酸調整 pH 值之方式所得到之濾程均較傳統程序增加混凝劑量之方式長；而其中又以明礬為混凝劑之濾程比多元氯化鋁為混凝劑者為長。水質方面，整體而言，在這些操作條件下所得之出水水質均可符合低濁度與低殘餘鋁，而若再考慮污泥產生量與混凝劑加量之費用，則應以加酸調整之方式較為經濟可行。也因此文獻上⁽¹⁾述及美國淨水場減少殘餘鋁量之方法並未以增加混凝劑為之，而是以調整 pH 值為最常用之方法。

雖則在這些操作方法下所得水質之 LSI 均為負值，而有腐蝕性之可能，但若考慮及 LSI 並非完全可靠⁽¹³⁾，且腐蝕性亦可以抗腐蝕劑予以控制時⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾，這種淨水方法仍不失為降低殘餘鋁之可行方案。

四 結論與建議

本研究以烏山頭水庫之原水進行實驗室及模廠試驗後，得到以下數點結論與建議：

1. 欲藉增加混凝劑量之方法以降低清水中殘餘鋁量，在直接過濾操作中，是不可行的；因增加混凝劑量所產生之大量膠羽全數流入濾池內，將使濾床迅速被堵塞，致濁度過早貫穿，而未能達到淨水之目的。而增加混凝劑量之方法用於傳統程序操作上，因所產生之

膠羽可在沉澱槽中去除一部份，濾床之負荷得以減輕，故於清水水質上，可得到濁度低於0.3 NTU，殘餘鋁量低於200 $\mu\text{g/L}$ 之結果，唯濾程太短為其缺點。

2. 以低混凝劑量配合加硫酸調整pH值在 7.4至7 之間，用於直接過濾操作及傳統程序操作，均可有效控制清水殘餘鋁量在200 $\mu\text{g/L}$ 以下，其濁度亦可低於 0.5 NTU，且混凝劑加量少(0.5 mg/L as Al)，濾程長，對去除濁度與減少殘餘鋁而言，不失為一值得考慮之方案。
3. 在傳統程序操作中，增加混凝劑量之同時，配合以添加助凝劑的方法，以促進膠羽形成，使沉降於沉澱池中，則可減輕濾池之負荷，在出水水質和未添加助凝劑相差不多的情況下，達到延長濾程之目的，但效果有限，所得濾程仍不超過20小時。
4. 在淨水濾程中，清水濁度可能尚在0.5 NTU 以下，而殘餘總鋁量已高於200 $\mu\text{g/L}$ ，因此若水中鋁含量列入管制，則過濾操作時監控項目應不止於濁度與水頭損失，尚須把出水殘餘鋁量亦納入。
5. 在本研究中，所得到低濁度且低殘餘鋁之清水 pH 值多在7.4 左右，而以Langelier Saturation Index計算水質穩定性之結果均為負值，亦即可能對管線具有腐蝕性。但LSI僅一指標性質，建議對此水質是否確實具有管線腐蝕性，再作實測研究以確認之。若經證實該水質確具腐蝕性，則仍可採用防止腐蝕措施以為補救。

五 誌謝

本研究承蒙國科會專題研究計劃(NSC-0410-E006-30)經費補助，在此深致謝意。模型廠操作期間，承蒙烏山頭淨水場人員鼎力相助，在此一併致謝。

六 參考文獻

- (1) Letterman, R.D., and Driscoll, C.T., "Survey of Residual Aluminum in Finished Water," J.AWWA, Vol.80, No.4, pp.154~158(1988).
- (2) 蔣本基，蕭水銀，葉俊榮，飲用水水質處理藥劑之評估，行政院環保署委託研究報告，民國73年。
- (3) Miller, R.G., et al., "The Occurrence of Aluminum in Drinking Water," J. AWWA, Vol.76, No.1, pp.84~91(1984).
- (4) 葉宣顯、莊典謨，原水水質及淨水場操作狀況對飲用水中含鋁量影響之研究，行政院環保署專題研究報告，民國79年8月。
- (5) 葉宣顯、郭輔仁、陳瑞文，飲用水中殘餘鋁量控制方法之研究，行政院環保署專題研究報告，民國80年8月。
- (6) 葉宣顯、李俊德、黃國林，"直接過濾前處理最佳化之研究"，中華民國自來水協會第二屆給水技術研討會論文集，pp.135~150(1985)。

- (7) APHA, AWWA and WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Waste-water, 17th ed. (1989).
- (8) Qureshi, N., and Malmborg, R.H., "Reducing Aluminum Residuals in Finished Water," J.AWWA, Vol.77, No.10, pp.101~108 (1985).
- (9) O'Melia, C.R., "Coagulation and Flocculation," In physicochemical Processes for Water Quality Control, W.J.Weber, ed., Wiley-Interscience, New York (1972)
- (10) Adin, A., et al., "The Application of Filtration Theory to Pilot-Plant Design," J.AWWA, Vol.71, No.1, pp.17 (1979).
- (11) Logsdon, G.S., and Lippy, E.C., "The Role of Filtration in Preventing Water-borne Disease", J.AWWA, Vol.74, No.12, pp.649 (1982).
- (12) Amirtharajah, A., and Trusler, S.L., "Destabilization of Particles by Turbulent Rapid Mixing," ASCE Journal Environ. Engineering, Vol.112, p.1085 (1986).
- (13) Singley, J.E., "The Search for a Corrosion Index," J.AWWA, Vol.73, No.11, p.579 (1981).
- (14) Heumann, D.W., and Ramberg, S.H., "Corrosion Inhibitor Effects on Los Angeles Water Sources," Proceeding of 1990 AWWA Water Quality Technology Conference.
- (15) Murray, W.B., "Corrosion Inhibitor with The Alternate Application of a Zinc Salt and Sodium Metasilicate," Proceeding of 1990 AWWA Water Quality Technology Conference.