



台灣自來水公司

一〇一年度

## 烏山廠淨水程序改變操作參數以控制殘餘 鋁量之研究

研究單位：第六區管理處烏山頭給水廠

研究人員：工程員兼股長 陳 錦 風

技 術 士 李 冠 緯

技 術 士 陳 志 男

技 術 士 涂 榮 宗

技 術 士 張 天 教

研究期程：中華民國一〇〇年五月至一〇一年五月



## 目 錄

一、緣起	2
二、研究目的	3
三、現況說明與文獻回顧	4
四、研究方法與實驗設備、材料	14
五、研究結果與討論	16
六、結論與建議	21
七、參考文獻	22

## 一、緣起

水是人類所賴以生存的最重要因素之一，隨著科技的蓬勃發展，自來水質的良窳也同時代表著高度文明重要指標的意義。因此，淨水場淨水程序功能的提昇，攸關供水品質是否能滿足民眾健康與飲用之雙重需求，目前本公司淨水處理單元多以聚氯化鋁(PACl)與硫酸鋁(Alum)為主要鋁鹽混凝劑，須建立使用混凝劑之淨水場清水鋁含量基本資料，作為日後檢討納入管制項目與否之參考依據。

然而近年來飲用水中鋁含量與中樞神經系統病變間的相關性陸續被證實，世界各國也相繼訂定飲用水中鋁含量標準或建議值。正常人中少有鋁中毒的報導，但有些調查報告發現，飲水中鋁濃度高的地區，老年癡呆症的盛行率較高。洗腎病患也會因為透析用水含高量鋁，曾有引起的腦病變的案例，病患會有語言困難、抽筋、失憶及失智等症狀。

## 二、研究目的

雖「飲用水水質標準」尚未訂定飲用水/自來水中鋁含量限值，但行政院環保署已將其列入飲用水污染物候選清單(Contaminant Candidate Lists, CCLs)，目前可能參考鄰近地區日本飲用水水質殘餘鋁限值 0.2mg/L。本廠目前清水之殘餘鋁介於 0.28~0.42 mg/L，故需改變原本操作參數或操作方式，以降低清水之殘餘鋁量。

改善水中殘餘鋁除了淨水場必須在最適化條件進行混膠凝外，也和淨水場的處理效能及水質條件相關。最佳化的淨水場處理操作需降低清水濁度以減低顆粒性鋁濃度；水中的溶解性鋁含量則會受到混膠凝的 pH 影響，清水總鋁含量和鋁型態分佈皆會受到混膠凝條件及淨水處理操作效能影響。基於淨水場之處理效能與水源水質特性，研究報告提出不同鋁型態的淨水場清水殘餘鋁建議控制策略。綜合上述，當淨水場混膠凝在最適化條件且在最佳效能操作下，包括最適化劑量、快混/慢混條件及停留時間、最佳 pH、足夠沈澱時間及良好濾床條件等，水中殘餘鋁含量應該可以有效控制。

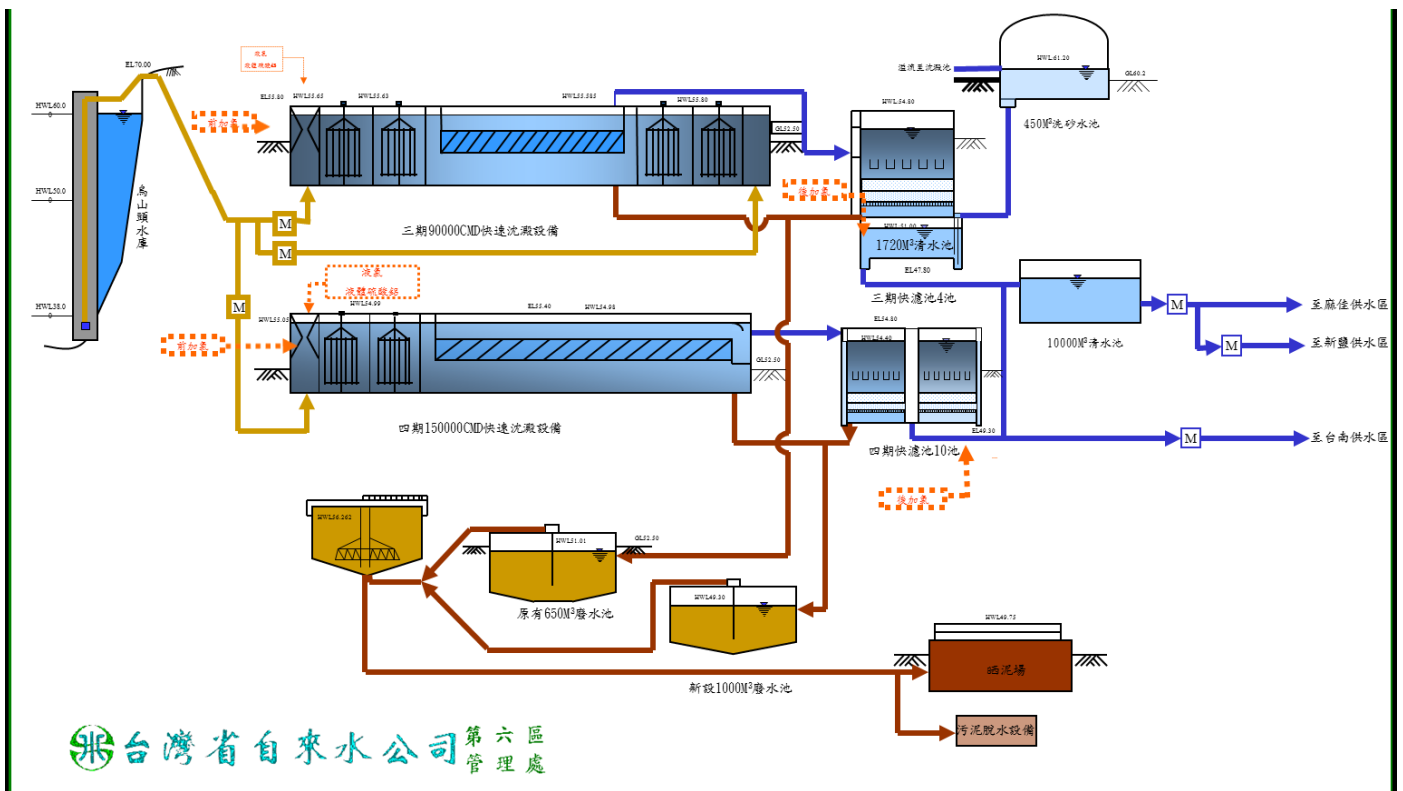
本研究係以烏山頭原水為背景水，除探討鋁系混凝劑硫酸鋁、多元氯化鋁不同加藥劑量之杯瓶試驗，或以調整原水 pH 之杯瓶試驗方式，進而找出最佳之操作處理程序。

### 三、現況說明與文獻回顧

#### (一) 現況說明

##### 1. 現況之操作處理條件

本廠原水由烏山頭水庫經導水管線、化學加藥（前加氯、液體硫酸鋁）、快混池、膠羽池、沈澱池、快濾池、清水渠、後加氯，配送至配水管線系統(如圖一)。其中四期處理設備係於73年間擴建完成，分南、北兩套之傳統處理設備。



圖一 烏山頭淨水廠處理流程圖

### 1-1 流量資料

Parameter		流量
設計流量	平均流量	240,000CMD
	最大水力流量	300,000CMD
瞬時尖峰流量		320,000CMD

### 1-2 快混池

主題	資訊	
	三期	四期
1. 形式		
池數	1	2
水躍深度 (m)	0.68	0.78
總體積 (m <sup>3</sup> )	34.58	141.12(70.56*2)
2. 流量		
設計值(CMD)	90,000	150,000
操作值 (CMD)	100,000	210,000
3. 停留時間：		
設計值(sec)	22	12
操作值 (sec)	20	9
4. G 值：		
設計值 (sec <sup>-1</sup> )	548.2	790.16
操作值 (sec <sup>-1</sup> )	548.2	790.16
5. Gt 值：		
設計值	$1.2 * 10^4$	9487.2
操作值	$1.2 * 10^4$	9487.2

### 1-3 膠羽池

主題		資訊			
		三期			四期
		東邊	西一	西二	
處理階段		4	3	3	4
池數		8	3	3	8
尺寸(每池)	長度(或直徑)	4.98m	6m	8.7m	9.4m
	寬度	4.50m	6m	7.7m	8.4m
	深度	3.25m	3.78m	3.75m	4.2m
	總表面積	529m <sup>2</sup>	376m <sup>2</sup>	693m <sup>2</sup>	2464m <sup>2</sup>
混凝時間	平均(min)	24	20	31	19
	最大流量(min)				
	操作值 (min)				
膠羽機	設計值 (Hp)	5	3	3	5   3   2   1
	操作值 (Hp)	5	3	3	5   3   2   1
G 值 :	設計值	61	54.2	64.5	59.6
	操作值	61	54.2	64.5	59.6
Gt 值 :	設計值	1.1×10 <sup>5</sup>	6.5×10 <sup>4</sup>	1.2×10 <sup>5</sup>	1.08×10 <sup>5</sup>
	操作值				

### 1-4 沈澱池

主題		資訊		
		三期		四期
		東邊	西邊	
刮泥機(Hp)		2	2	2
尺寸(每池，長 m×寬 m×深 m)		12.5×10.25×3.1	30×10.25×3.4	36.4×17.2×4.2
溢流率	設計值 (m/day)	113~115		120~160
	操作值 (m/day)			
停留時間(min)		41~46	41~46	29~46



傾斜板面積	12.5*10.25*0.95=121.7	30*10.25*0.9=276.8	36.4*17.2*0.97=607.3
有效容量	794	1906	4883
操作問題：	1. 傾斜板易被上浮膠羽沈積、附著，若不定期清洗，膠羽會被沖刷出，影響出流水濁度。		

### 1-5 過濾池

主題		資訊						
		三期			四期			
形式(單一/多重濾料)		二層			二層			
池數		4			4			
尺寸	長度(m)	9.14			9.6			
	寬度(m)	4.87			4.8			
	總表面積 (m <sup>2</sup> )	353.9			921.6			
控制方式(定率/定壓)		定濾率			變濾率			
濾率	設計值 (m/d)	252.8			162.8			
	操作值 (m/d)	280.8			217			
表面沖洗	形式	水壓力旋轉式表面洗砂器						
	表面沖洗速率 (m/d)	72			144			
	沖洗時間 (min)	2			8~10			
反沖洗速率	操作值 (m/d)	864~1296			1080			
	操作時間(min)	6~8			10~12			
主題		資訊						
<b>濾料</b>								
濾料種類	深度 (cm)		均勻係數		有效尺寸		比重	
	三期	四期	三期	四期	三期	四期	三期	四期
石英砂	60	60	1.5 以下	1.65 以下	0.5	0.45	2.6 以上	2.6 以上
濾石	30	30						

## 1-6 消毒設計資料

主題		資訊	
		三期	四期
接觸形式(清水井/儲水槽)		清水池	清水渠
T <sub>10</sub> /T Factor		0.1	0.1
尺寸	長度或直徑	23.88	3
	寬度	22.58	2
	最小操作深度	0.8	1.3
	總體積	1720	23.4
	有效體積(T <sub>10</sub> /T Factor)	172	2.34
相關操作參數	消毒劑種類	Chlorine	
	最大消毒劑濃度(mg/L)	前氯 1.0 後氯 0.85	
	最大 pH 值	7.9	
	最小溫度 °C	20	
其他設計資訊			

## 2. 原水水質現況

淨水處理所產生之沉澱排泥及反沖洗廢水，經廢水濃縮池處理，上澄液回收至四期膠羽池；原水水質狀況：pH 值約 8.0~8.3 之間，濁度常在 10NTU 以下，硫酸鋁加藥量 18 mg/L，原水溶解鋁 0.028~0.053mg/L 之間。

### (二) 文獻回顧：

#### 1. 飲用水鋁含量標準

我國飲用水水質標準目前尚未訂定鋁含量限值，行政院環保

署已將其列入飲用水水質列管污染物篩選目標之一。根據環保署的委辦計畫成果，該報告是建議參考美國二級飲用水標準制訂鋁之管制範圍為 0.05–0.2 mg/L(行政院環保署, 2007)。

## 2. 鋁對人體健康影響

鋁(aluminium, Al)為 III A 族元素，是地球上最豐富的金屬，約佔 8%，普遍存在於岩石、土壤及礦物中。鋁為世界上最廣泛應用的金屬之一，普遍地存在於天然食品、人工食品添加劑、藥物和天然水中。水中鋁的可能來源包括土壤、岩盤的天然釋放或是水處理使用鋁鹽混凝劑導致。

鋁以往被認為是低毒性或是無毒性的物質，無機鋁非常不易被人體所吸收，且進入人體的鋁很容易被排出、不易造成累積。根據估算成人由食物和飲用所攝取的鋁含量約為 5–7 mg/day，由飲用水所貢獻的鋁攝取量小於所有攝取量的 5%，其中只有大約 0.3–0.4% 鋁被人體所吸收(Yokel et al., 2001)。高濃度的鋁人體吸收可能發生在胃藥的抗酸劑或是高磷酸鹽血症的醫學治療上，由於這些物質是鋁氫氧化物，鋁會慢慢累積在病患體內造成體內的鋁累積。鋁在人體的詳細新陳代謝機制目前不甚清楚。研究指出，少於 1% 的攝取鋁是由胃腸所吸收，其餘則會由人體排泄出來。被人體吸收的鋁少部分會在骨骼、肝臟、腦組織累積，但是多數會

從血液被腎臟去除且排泄到人體外(Yokel et al., 2001; Priest, 2004)。

### 3. 鋁之水化學

鋁在水解時呈現兩性行為，在酸性溶液中為正電荷離子，在鹼性溶液中為負電荷離子，水中的鋁離子依水解程度不同而有多種不同水合型態，通常在酸性溶液中，鋁的主要物種為  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ ，是一個八面體的結構，隨著 pH 的增加，鋁離子和  $\text{OH}^-$  逐漸鍵結，會使電性由正離子變為負離子。

當鋁的聚合體形成時，其分子量增加且溶解性減少，因此形成的聚合鋁物體具可沉降性而可在淨水程序中以沉澱及過濾機制予以去除，含鋁之混凝劑在經過混凝、膠凝反應後，所形成的型態有許多種，但若以淨水工程上希望減少清水中殘餘鋁的觀點來看，我們可用簡單的操作型定義將水中的鋁分成溶解鋁與固態鋁，前者無法在淨水程序中去除，將殘留於清水中，後者則可利用淨水程序中沉澱、過濾的機制予以截留下來。

以鋁在水中的型態而言，所謂固態鋁是指在水合時產生的  $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$  及一些由鋁之多元體結構成的可沉降性膠羽，其中可能包括吸附在固態懸浮微粒上之鋁膠羽。反之所謂溶解鋁既是指除  $\text{Al}(\text{OH})_3$  外的單核鋁物種，與有機或無機離子錯合之溶解性錯合鋁

以及一些溶解性多元鋁物種。

在淨水程序中混凝與膠凝是去除水中雜質之重要單元，用在沉澱單元與過濾單元之前；一般所謂混凝是指破壞水中膠體顆粒之穩定，使膠體與膠體間之互斥力下降，而能相互接觸，凝結成較大之顆粒，其操作通常須添加化學藥劑輔助之。而膠凝則是在混凝之後，膠體顆粒已去穩定之階段，利用物理因子增加顆粒與顆粒間接觸碰撞的機會，促使顆粒能形成更大的凝集以利於後續之沉澱或過濾操作。混凝單元對水中顆粒之去穩定度，依混凝劑之不同而有不同的作用機制，大體上可予以分成四種：

1. 壓迫電雙層。
2. 吸附及電價中和。
3. 沉澱絆除。
4. 吸附及架橋作用。

在混凝膠凝機制中，希望能令膠羽生成愈大，則能減少水中濁度的殘留，若以鋁的分類而言，既希望固態鋁生成愈多，溶解鋁生成較少，則不但可減少水中濁度，亦可降低水中鋁的殘留量。

#### 4. 淨水程序之殘餘鋁

自來水中的殘餘鋁含量除了有可能危害人體健康的疑慮外，也會引發其他美觀問題。水中含有較高濃度的鋁時，鋁可能

會在配水管線中以水合氫氧化鋁之懸浮物存在或和鐵、錳或矽化物形成膠羽沈積物。這些含鋁的懸浮物或沈積物會在流速突然擾動時，由用戶的水龍頭流出，導致水濁度增高(Costello, 1984)。也有文獻認為，當水溶解性鋁濃度超過 0.2 mg/L 時，後混膠凝作用(post-flocculation effect)可能會產生，也就是產生乳白色的氫氧化鋁沈澱物，形成白色混濁的飲用水(milky coloured water)，引起消費者的抱怨。後混膠凝作用會和水溶液的 pH 有很大關連性。此外，未被濾除的微小鋁膠羽可能會包藏細菌或病毒，降低消毒效率造成水質安全的疑慮。淨水程序的殘餘鋁會受到原水鋁含量濃度、鋁鹽混凝劑劑量高低、水體 pH、過濾效率有關。傳統淨水程序的混膠凝和過濾可以有效減低水中的殘餘鋁濃度。根據國外文獻，藉由操作良好的淨水過濾程序(或淨水場)可以有效壓低殘餘鋁濃度在小於 0.1 mg/L。

### 5. 淨水處理常用之混凝劑種類及特性

名稱	化學式	適用 pH 條件	特性
硫酸鋁	$Al_2(SO_4)_3$	4.5~7.9	混凝適宜之 pH 值接近中性，適用於低濁度，價格低廉。
多元氯化鋁	$Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$	6.0~9.0	具有鹽基性鹽類，鹼度消耗少，且具有高價陽離子，架橋能力強，膠羽形成快。
氯化鐵	$FeCl_3$	5.0~11.0	最佳的 pH 值範圍較廣，所形成之膠羽體積大而重，沉降性及脫水性佳，但腐蝕性高。

## 四、研究方法與實驗設備、材料

1. 硫酸鋁混凝劑不同加藥量，分別為 0、9、12、15、18、21、24ppm。
2. 調整原水之不同 pH 值及加藥量條件之杯瓶試驗，原水條件如下：

原水水樣別	濁度(NTU)	pH 值	取水深度	水溫
101 年 5 月 18 日(1)	9.44NTU	8.02	水面下 3M 及 8M 混和	26.5°C
101 年 5 月 23 日(2)	7.68NTU	8.07	水面下 3M 及 8M 混和	27.1°C

3. 由硫酸鋁混凝劑改為聚氯化鋁(PACL)之杯瓶試驗。
4. 水質檢驗使用之儀器

4-1 濁度計—HACH 2100P (每次使用前均以二級標準品校正)。

4-2 pH 計 (每次使用前均需以標準品 pH4/7/10 校正)。

4-3 分光光度計—DR2400，波長 522nm。

5. 混凝劑配製

5-1 6000ppm 硫酸鋁溶液：取 2.3 mL 液態硫酸鋁，以純水稀釋至 500mL。

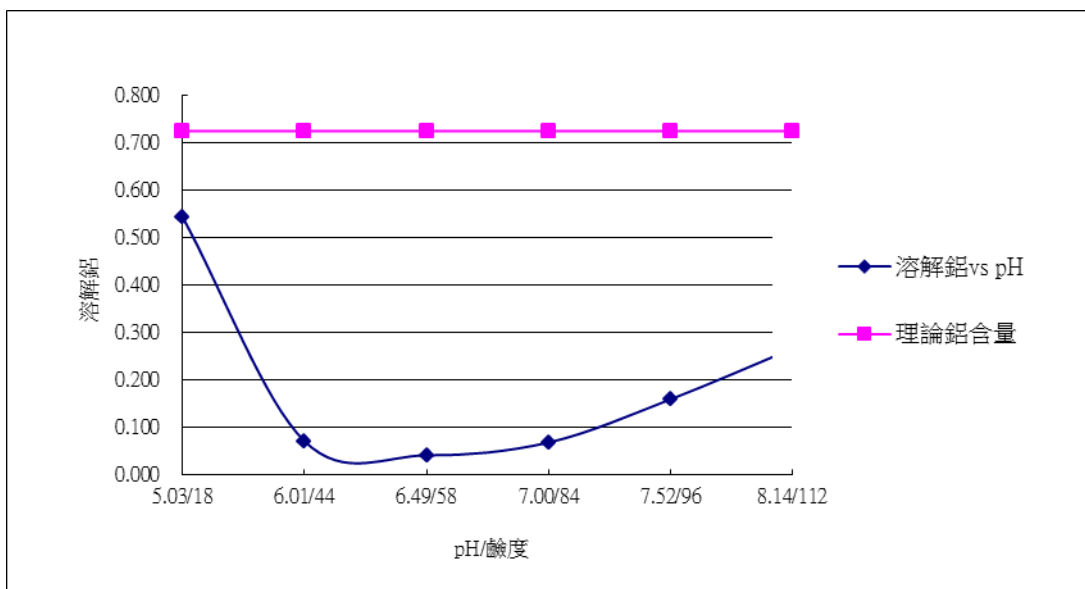
5-2 6000ppm 多元氯化鋁溶液：取 2.5mL 多元氯化鋁，以純水稀釋至 500mL。

6. 鋁分析所用之器皿的清洗方法

在使用後，以清水略加清洗，隨後放入 10% 的硝酸中浸泡隔夜，取出後，以純水少量多次沖洗後備用。



7. 本廠本次取杯瓶最適加藥量 18 (mg/L)，由硫酸鋁/聚氯化鋁-氧化鋁含量 7.6 (%)， $2Al/A_{2O3}$ (莫耳分率為  $54/102=0.5294$ )，得理論溶解鋁含量 0.724(mg/L)。分別由不同 pH/鹼度之原水條件經本廠之操作杯平條件後，經  $0.45\mu m$  濾紙，測得下列之沉澱水溶解鋁濃度變化情形(理論上清水溶解鋁與沉澱水相同)。由結果得知於 pH/鹼度為 6.49/58 可得最低之溶解鋁濃度。



## 五、研究結果與討論

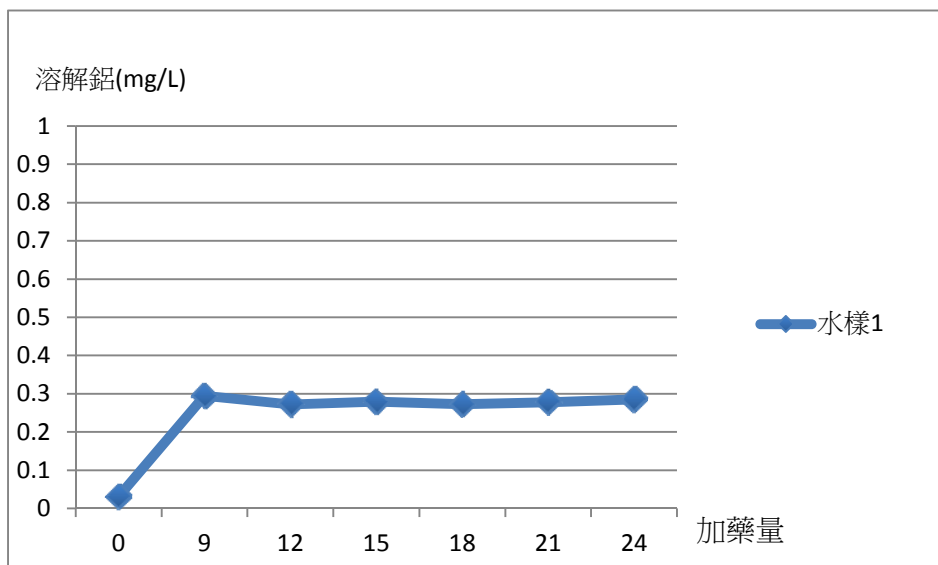
### (一) 硫酸鋁混凝劑不同加量之杯瓶試驗：

分別以本廠水樣 1(表一、圖一)及水樣 2(表二、圖二)原水為實驗對象，添加不同硫酸鋁加藥量，以原操作條件，經快混 200rpm、7 秒、慢混 55 rpm 18 分鐘、靜置 30 分鐘後、於水深 10 公分處取樣檢測溶解鋁含量，並以本廠之原硫酸鋁加藥曲線 18mg/L 為比較。

表一 原水濁度 9.44NTU

加藥量 (mg/L)	0	9	12	15	18	21	24
沉澱水 pH	8.02	7.91	7.88	7.82	7.74	7.73	7.67
溶解鋁 (mg/L)	0.031	0.294	0.272	0.279	0.273	0.278	0.285

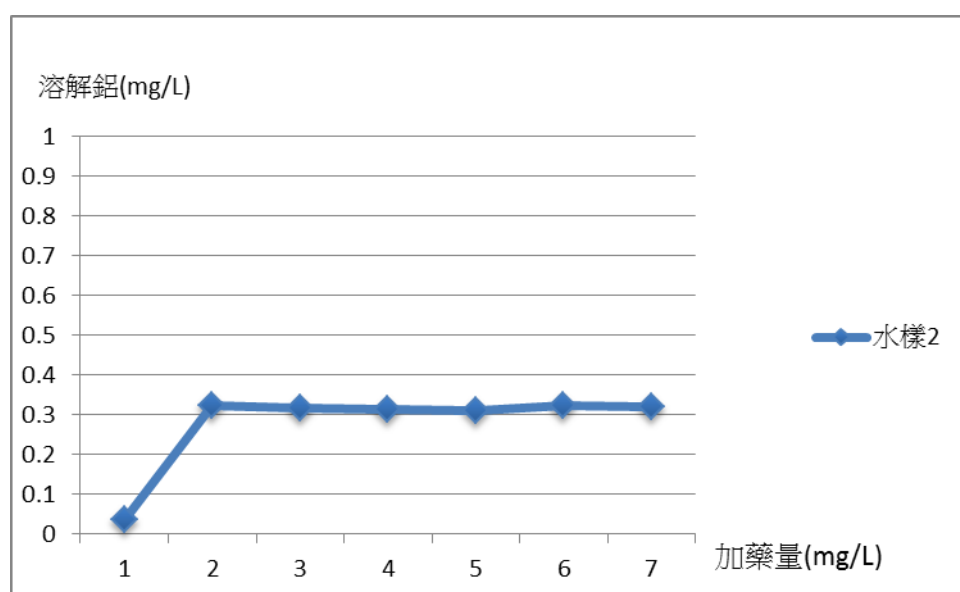
圖一 原水濁度 9.44NTU



表二 原水濁度 7.68NTU

加藥量 (mg/L)	0	9	12	15	18	21	24
沉澱水 pH	8.07	7.97	7.92	7.89	7.83	7.78	7.74
溶解鋁 (mg/L)	0.036	0.325	0.318	0.313	0.311	0.325	0.322

圖二 原水濁度 7.68NTU



由圖一、圖二得知，硫酸鋁加藥量為 9 mg/L 及 24mg/L 比較時，硫酸鋁加藥量增加，其沉澱水溶解鋁濃度並未明顯增加。

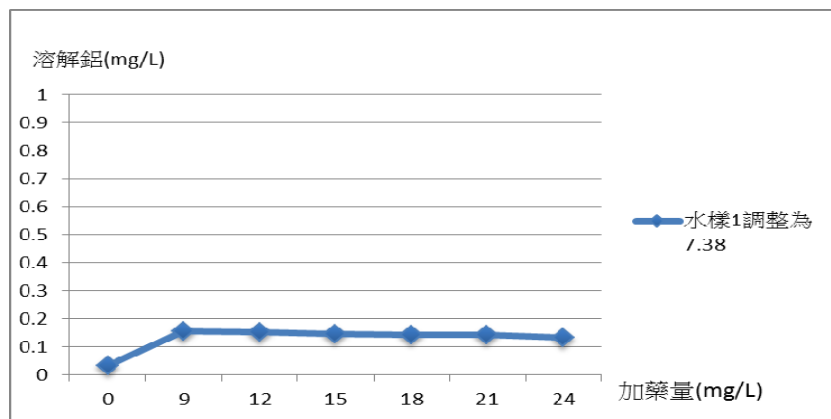
(二) 調整原水 pH 值之杯瓶試驗：

分別以烏山頭原水水樣 1(表三、圖三)及水樣 2(表四、圖四)為實驗對象，調整 pH 值後添加不同硫酸鋁加藥量，經快混 200rpm、7 秒、慢混 55 rpm 18 分鐘、靜置 30 分鐘後、於水深 10 公分處取樣檢測溶解鋁含量。

表三 原水 pH 由 8.02 調整為 7.38

加藥量 (mg/L)	0	9	12	15	18	21	24
沉澱水 pH	7.38	7.23	7.21	7.19	7.18	7.16	7.14
溶解鋁 (mg/L)	0.033	0.155	0.153	0.148	0.142	0.142	0.135

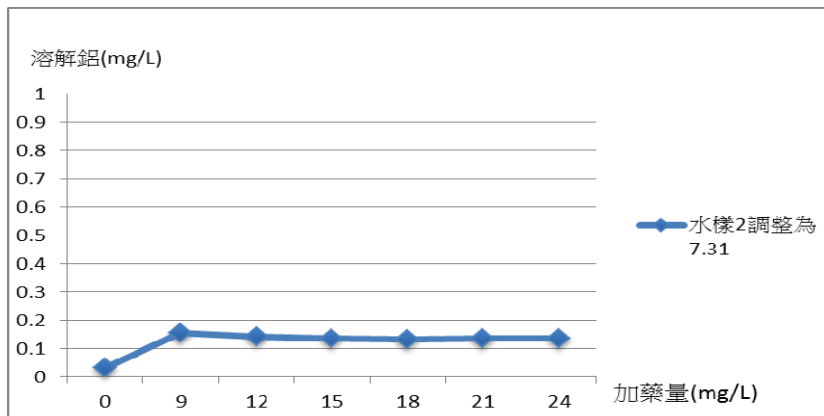
圖三 水樣 1pH 調整為 7.38 溶解鋁變化情形



表四 原水 pH 由 8.07 調整為 7.31

加藥量 (mg/L)	0	9	12	15	18	21	24
沉澱水 pH	7.31	7.16	7.14	7.11	7.08	7.07	7.05
溶解鋁 (mg/L)	0.035	0.157	0.142	0.138	0.134	0.136	0.138

圖四 水樣 2pH 調整為 7.31 溶解鋁變化情形



由圖三、圖四得知，原水 pH 以硫酸調降為 7.4 左右時，硫酸鋁加藥量由 9 mg/L 至 24mg/L，其沉澱水溶解鋁都低於 0.16 mg/L。

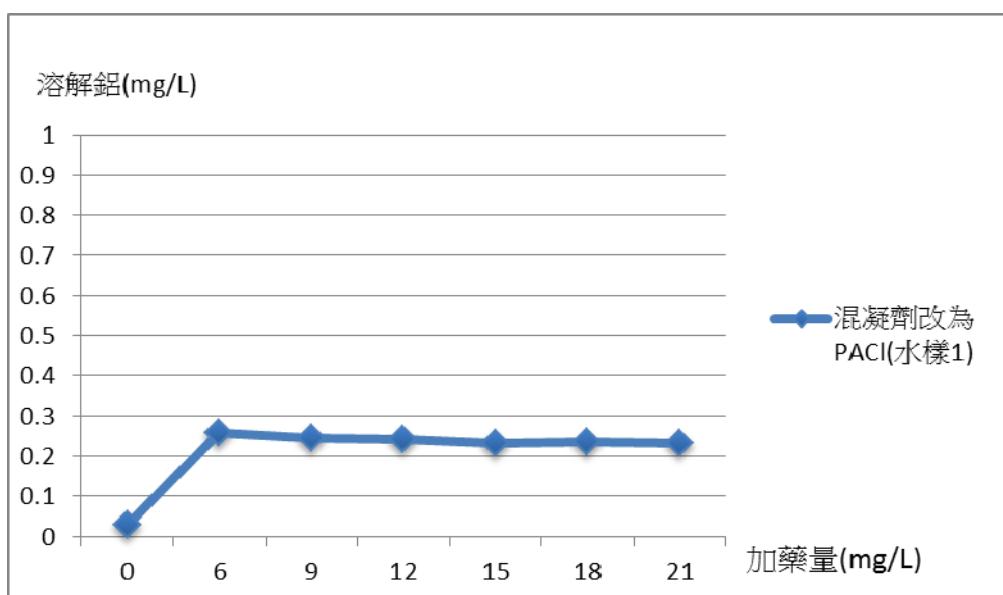
(三) 硫酸鋁混凝劑改為 PACL 之杯瓶試驗：

分別以烏山頭原水水樣 1(表五、圖五)及水樣 2(表六、圖六)為實驗對象，混凝劑種類由硫酸鋁改為 PACL，經快混 200rpm、7 秒、慢混 55 rpm 18 分鐘、靜置 30 分鐘後、於水深 10 公分處取樣檢測溶解鋁含量。

表五 原水水樣 1 改為 PACL 加藥

加藥量 (mg/L)	0	6	9	12	15	18	21
沉澱水 pH	8.02	7.89	7.85	7.81	7.77	7.72	7.68
溶解鋁 (mg/L)	0.031	0.259	0.246	0.243	0.232	0.236	0.235

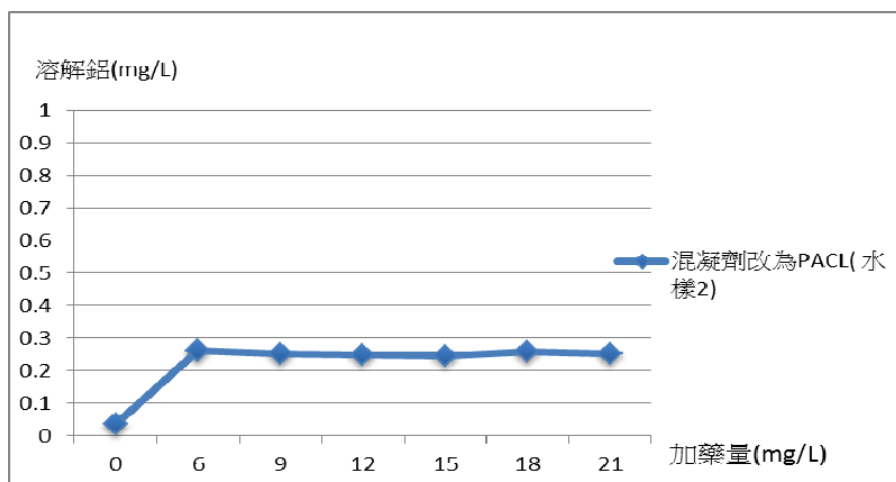
圖五 水樣 1 改為 PACL 加藥之變化情形



表六 原水水樣 1 改為 PACL 加藥

加藥量 (mg/L)	0	6	9	12	15	18	21
沉澱水 pH	8.07	7.95	7.90	7.86	7.84	7.76	7.71
溶解鋁 (mg/L)	0.036	0.264	0.253	0.251	0.248	0.258	0.254

圖六 水樣 1 改為 PACL 加藥之變化情形



混凝劑由硫酸鋁改為 PACL，因其適用 pH 範圍較廣，沉澱水溶解鋁含量較硫酸鋁低(低於 0.3 mg/L)，但仍高於 0.2 mg/L。

## 六、結論與建議

### (一)調整原水 pH 值至最佳加藥 pH 值(pH 為 6.49)：

降低硫酸鋁混凝劑加藥量，並無法降低清水中之溶解鋁殘餘量，在不改變鋁鹽混凝劑條件下，由本研究結果得知，若將原水 pH 值調整至 7.4 左右時，依原操作條件可將其清水中之溶解鋁殘餘量降至 0.2 mg/L 以下。

### (二)改變取水高度，取得較低 pH 值之原水：

烏山頭水庫表層水 pH 值約 8.6，中層水 pH 值約 7.7，底層水 pH 值約 7.4，竹仔坑抽水站現有 3 個取水口，取水高度為 54.4 米、49.8 米及 45.6 米，54.4 米為開放溢流式，無法控制進水，現已發包完成增設封閉升降式閘門乙座，預計 11 月完工，屆時可控制取中下層較低 pH 值之原水，原水 pH 值如能由現有之 8.10 降至 7.60，搭配使用 PAC1 混凝劑，可預期將清水中之溶解鋁殘餘量降至 0.2 mg/L 以下。

### (三)改變混凝劑種類：

現有使用之鋁鹽混凝劑硫酸鋁，更改為鐵鹽混凝劑如氯化鐵、硫酸亞鐵，但須評估是否造成色度及管路腐蝕等問題。目前五區竹崎淨水廠為試驗中，此為後續本廠考量試驗方法之一。

## 七、參考文獻

1. 自來水公司烏山頭系統烏山頭四期淨水場工程設計報告，民國 76 年 12 月，自來水公司南區工程處。
2. 高肇藩，給水工程，民國 79 年 9 月。
3. 黃政賢，給水工程，民國 87 年 6 月 10 日。
4. 楊萬發譯，水及廢水處理化學，國立編譯館，民國 86 年。
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. 中華民國自來水協會，自來水設施操作維護手冊，民國 82 年 2 月。
7. Priest, N. D., "The biological behaviour and bioavailability of aluminium in man, with special reference to studies employing aluminium-26 as a tracer: review and study update", *Journal of Environmental Monitoring*, 6(5), (2004).
8. Yokel, R. A., Rhineheimer, S. S., Brauer, R. D., Sharma, P., Elmore, D., McNamara, P. J., "Aluminum bioavailability from drinking water is very low and is not appreciably influenced by stomach contents or water hardness", *Toxicology*, (2001).
9. Costello, J.J., "Postprecipitation in distribution system", *Journal of American Water Works Association*, 76(11), (1984).
10. 台灣自來水公司，「水公司各淨水場清、配水含鋁量分析調查及最適化處理之研究」，99TWC01，(2011)