

硬水軟化之處理技術及處理成本

陳國宏* 黃汝賢** 姜樹成***

余光昌**** 郭勇吉*****

摘 要

本省部分地區自來水硬度高，引起部分用戶使用上的不便，雖然硬度對人體並無確切學理依據之不良影響，仍可考慮予以適度軟化，但為避免硬度過低之軟水造成配水線之嚴重腐蝕，本研究乃以軟化處理後之水中硬度介於 170~180 mg/l (以CaCO₃計)為目標。

當水廠之水源為水質較差的地面水時，適合以石灰—蘇打灰法軟化，此法可同時去除濁度、硬度、鐵錳及水中部分有機物。港西淨水場若以石灰—蘇打灰法進行軟化，每CMD水之處理成本須增加 1.7 元，但可降低前處理所需之預氯量。

如果水廠之水源為水質較佳的地下水或地面水時，則適合採用離子交換法，如通霄廠日南給水站，每CMD水之處理成本 2.0 元，較石灰—蘇打灰軟化法便宜。

一、前 言

目前本省有些地區自來水硬度甚高，主要係因水中含有高濃度溶解性的二價金屬離子(如鈣、鎂、鐵、錳)，其不良影響除肥皂使用量增加及洗滌效果降低外，甚多使用自來水作為工業用水的工廠，為避免鍋爐及熱水管線產生碳酸鈣的結垢而增加危險性，尚必須各自藉著離子交換程序將硬水軟化後再使用。因此，硬度含量過高地區的居民及工廠業者均感困擾。

台灣地區在自來水淨水工程之設計，旨在去除水中的濁度、有害雜質及病菌，未曾

* 開元工程顧問股份有限公司總經理

** 國立成功大學環境工程研究所教授

*** 國立成功大學環境工程研究所碩士

**** 私立嘉南藥學專科學校工業安全衛生科講師

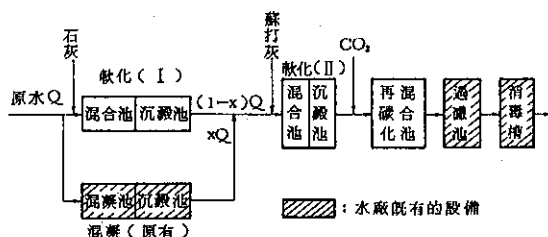
***** 台灣省自來水公司營運處經理

考慮去除硬度，本文將對硬水處理的方式進行研究，找出適合台灣地區自來水硬度之軟化技術，進而以硬度偏高之港西淨水場及通霄廠日南給水站為例，研擬軟化處理流程並分析其所需之工程設施及處理費用。

二、最佳硬水軟化程序之設計

台灣地區水源主要為水庫、湖泊、河川等表面水，也有不少地區是抽用地下水作為自來水源。根據水質檢驗統計報告顯示⁽¹⁾，台灣中南部地區頗多自來水硬度達 300 mg/l 以上，出水量較大者計有通霄、北斗、西螺、崙背、虎尾、新營、旗山、翁公園、拷潭、鳳山、東港及恒春。新營、鳳山、東港之水源為河川地面水，其餘取自地下水。而根據該報告顯示，上述地區的原水與處理水中的硬度含量相近，即目前之淨水程序沒有處理硬水的功能，因此若經費許可時，可考慮增設或改善現有設施，以達到降低水中硬度的目的。目前各淨水場既有的處理程序不一，有些擁有較完整的處理設備，包括曝氣、混凝、沉澱、過濾及消毒等程序；有些使用地下水質較佳之淨水場則僅經過曝氣、消毒後就送出。因此在設計硬水軟化改善設施及程序須因應淨水場既有的設施，再做妥善的規劃。在美國，一般淨水場的硬水軟化程序，如考慮同時去除濁度與其他水中雜質，多數選擇化學沉澱方法。由於飲用水硬度實不應過低，以免造成配水管線的腐蝕，因此宜採用分流式的處理法，以節省化學藥劑的添加量，並以超量石灰—蘇打法與分流式並用，因為硬度含量高的地區，原水中鎂濃度也達 50 mg/l （以 CaCO_3 計）以上。若原水硬度多為碳酸鹽硬度，僅需以超量石灰法處理；若其原水中非碳酸鹽硬度高時，則須考慮加入蘇打灰加以去除。因此根據不同地區之水質特性（鎂硬度、非碳酸鹽硬度的多寡）及既有處理設施的差異，本研究提出三種不同的處理流程。第一種改善流程，係當原水廠的既有處理設施齊全，含混凝池、沉澱池及過濾池時，可考慮圖一之處理流程。

軟化（I）池乃軟化碳酸鹽硬度，並視需要採超量石灰以去除鎂硬度；而軟化（II）池則視需要而設，若水中非碳酸鹽硬度不高時，可以不設。此一處理流程中，混凝池、沉澱池及過濾池均可沿用既有設備，過濾池是用以攔除混凝微膠羽及 CaCO_3 及 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的微膠羽。本流程的特點，乃是一部份水流經超量石灰處理後，用另一部分經混凝後已降低濁度、鹼度的

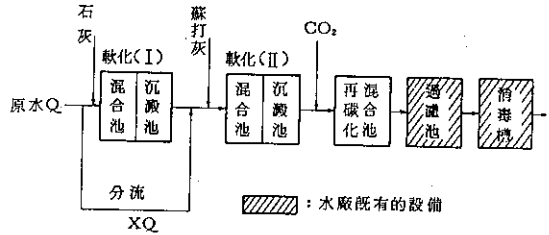


圖一 水廠已有混凝沉澱池、過濾池及消毒槽之硬水處理改善流程

水流加以中和，可消耗超量石灰，也可降低分流部分的硬度，此方式可得到較佳的濁度及硬度去除的平衡。

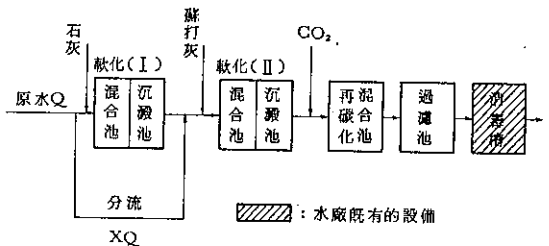
第二種改善流程，係當原水廠的既有處理設施僅有過濾池及消毒槽時可考慮圖二之處理流程：

本處理流程的設計，乃因水廠中沒有混凝沉澱設施，故分流部分並未進行混凝處理，因若再增建混凝設備，需增加成本。本流程乃是傳統的分流處理流程，其中仍可視水質條件而作若干修正，譬如根據鎂硬度的高低決定超量石灰的加量，或根據非碳酸鹽硬度的存在與否決定蘇打灰處理程序是否需要。過濾池仍沿用既有設施，以去除微膠羽降低水垢含量。



圖二 水廠已有過濾池及消毒槽之硬水處理改善流程

第三種改善流程，係當水廠僅作簡單的處理，僅經消毒後即行送水的情況，其操作流程如圖三所示：



圖三 水廠僅有消毒槽之硬水處理改善流程

本流程所需的設備費用較多，因為水廠僅有簡單的消毒設備，沒有任何設備可以輔助硬水的處理，因此整個分流式石灰—蘇打灰軟化程序均需新設，另外也需新建過濾池，以去除微膠羽。

三、石灰—蘇打灰軟化法處理硬水之加藥量及化學污泥產生量

1. 加藥量及化學污泥產生量之理論計算

自來水中鈣、鎂之碳酸鹽硬度可藉所加入之石灰產生化學沉降反應而生成碳酸鈣及氫氧化鎂沉澱物加以去除，至於鈣、鎂之非碳酸鹽硬度則可藉所加入之石灰及蘇打灰產生化學沉降反應而生成碳酸鈣及氫氧化鎂沉澱物加以去除。

在石灰—蘇打灰軟化程序中，二氧化碳 (CO_2) 及各種形式之硬度包括：碳酸氫鈣 ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)、碳酸氫鎂 ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$)、氯化鎂 (MgCl_2)、硫酸鎂 (MgSO_4)、硫酸鈣 (CaSO_4) 及氯化鈣 (CaCl_2) 等之石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、蘇打灰 (Na_2CO_3) 消耗量及化學污泥 (CaCO_3 或 $\text{Mg}(\text{OH})_2$) 產生量可根據化學平衡反應式計算其理論值，如表一所示。

2. 實際加藥量及化學污泥產生量

硬水軟化實驗採用美國 Phipps & Bird Inc. 出品之瓶杯攪拌機，硬水軟化實驗之步驟說明如下：於 1 升燒杯內置入 1 升之試驗水（人工合成硬水，（以鈣、鎂之硫酸鹽或氯鹽及二段水配製）或實際自來水廠硬水）並加入適量之硬水軟化劑，亦即石灰或蘇打灰，接著先快混（攪拌速度 120 rpm）5 分鐘後再慢混（攪拌速度 40 rpm）40 分鐘，此時，人工合成硬水之軟化實驗不加高分子助凝劑，僅於慢混末了將水樣以 0.45 μ 濾紙過濾，取其濾液分析殘餘硬度，而化學污泥產生量則自殘留濾紙上的固體物量精確測出；另外，實際自來水廠硬水之軟化實驗則於快混末了前 2 分鐘加入適量之高分子助凝劑並繼續慢混 40 分鐘後，靜置 2 小時再分析上澄液中之殘餘硬度。

2-1 人工合成硬水之軟化

本實驗主要目的為測定自來水中各種引起硬度之化合物在硬水軟化程序中石灰與蘇打灰之實際消耗量以及產生之化學污泥乾重量，因此乃配製各種單一硬度化合物進行瓶杯試驗，以利比較硬水軟化程序中，在加入石灰、蘇打灰之理論需要量下，其化學污泥產生乾重量之理論值及實際值。

在硬水軟化實驗中，先將粉末狀石灰配製成 10,000 ppm 之石灰水溶液，然後再將軟化劑加入於試驗水；蘇打灰亦按配製石灰水溶液之方法配製。

實驗結果如表二所示。表二顯示硬水軟化程序中化學污泥產生乾重量之實際值有小於理論值之趨勢，推測其原因有二：(1) 由於碳酸鈣及氫氧化鎂固體物有其一定之溶解度 (2) 硬水軟化程序中所產生之碳酸鈣及氫氧化鎂固體物，由於其溶解度積甚小，極易造成膠體狀懸浮物而不易完全沉澱，尤以氫氧化鎂固體物為甚。上述二項原因係根據化學理論加以說明，事實上，亦與本實驗所得之結果相符合，即硬水軟化過程中仍殘留了相當量之溶解性或可過濾 (filtrable) 之硬度。

2-2 港西淨水場及通霄廠日南給水站硬水之軟化

根據台灣省自來水股份有限公司提供之水質資料，本實驗之試驗水乃取自本省兩處硬度偏高地區之自來水廠原水，亦即位於東港之港西淨水場及位於通霄之通霄廠日南給水站，該兩處自來水廠目前使用之處理單元皆無硬水軟化處理設備。其中港西淨水場之

表一 硬水軟化程序中石灰、蘇打灰消耗量及其化學污泥產生量之理論值

消耗石灰或蘇打灰之化合物種類	1 mg/l CO ₃ 、碳酸鹽硬度或非碳酸鹽硬度 (註)		
	石灰 (Ca(OH) ₂) 消耗量 (mg/l)	蘇打灰 (Na ₂ CO ₃) 消耗量 (mg/l)	化學污泥產生量 (CaCO ₃ 或 Mg(OH) ₂) (mg/l)
CO ₃	1.68		2.27 (CaCO ₃)
Ca(HCO ₃) ₂	0.74		2.0 (CaCO ₃)
Mg(HCO ₃) ₂	1.48		2.0 (CaCO ₃) 及 0.58 (Mg(OH) ₂)
CaSO ₄		1.06	1.0 (CaCO ₃)
MgSO ₄	0.74	1.06	1.0 (CaCO ₃) 及 0.58 (Mg(OH) ₂)
CaCl ₂		1.06	1.0 (CaCO ₃)
MgCl ₂	0.74	1.06	1.0 (CaCO ₃) 及 0.58 (Mg(OH) ₂)

註：除 CO₃ 以外，其餘碳酸鹽硬度或非碳酸鹽硬度之濃度均以 CaCO₃ 表示。

表二 人工合成硬水（硫酸塩及氯塩硬度）軟化之實驗結果（水溫 = 21°C）

實驗條件與結果	硬度種類 濃度(以CaCO ₃ 計)	MgSO ₄			CaSO ₄			MgCl ₂			CaCl ₂		
		100	200	300	100	200	300	100	200	300	100	200	300
Ca(OH) ₂ (mg/ℓ)	理論量	74	148	222	—	—	—	74	148	222	—	—	—
	實際加量	74	148	222	—	—	—	74	148	222	—	—	—
NaCO ₃ (mg/ℓ)	理論量	106	212	318	106	212	318	106	212	318	106	212	318
	實際加量	106	212	318	106	212	318	106	212	318	106	212	318
pH 變化		8.3±0.5	7.8±1.2	7.7±1.6	7.5±0.8	7.3±0.5	7.3±0.5	7.1±1.0	7.3±1.7	7.4±1.4	7.2±0.7	7.3±0.2	7.4±0.9
膠羽生成情形		A (註)			B			A			B		
上澄液		白色混濁			澄 清			白色混濁			澄 清		
化學污泥乾重 (mg)	理論值	158	316	474	100	200	300	158	316	474	100	200	300
	1 ℓ 軟化水 實際值	127	265	350	42	96	174	126	284	372	53	85	196
殘餘硬度 (mg/ℓ, 以CaCO ₃ 計)		36	65	90	39	58	88	36	65	81	23	38	55

註：A 表示膠體狀懸浮物 (colloidal suspension)，B 表示顆粒狀懸浮物 (crystalline suspension)。

淨水單元包括：混凝、沉澱、過濾及加氯消毒；而通霄廠日南給水站則直接抽取地下水，經過加氯消毒後即加壓輸水至用戶。表三所示係港西淨水場及通霄廠日南給水站原水及處理水之水質特性，可明顯看出現有淨水程序實無法改善硬度問題。

實際自來水廠原水之硬水軟化實驗中，除了加入所需量之軟化劑石灰及蘇打灰外，並選用 Himoloc SS-120 強陰離子性聚合物作用助凝劑，劑量為 0.5 mg/ℓ。

根據表三港西淨水場及通霄廠日南給水站原水之水質，該二處自來水廠之原水鎂硬度均甚高，分別為 64 mg/ℓ 及 82 mg/ℓ (以 CaCO₃ 計)，為能避免積結較硬水垢，除需加入根據化學平衡反應式計算所得之石灰量外，尚需再加入超量石灰 (excess-lime) 以減少鎂含量⁽²⁾，至於非碳酸塩硬度含量約 80~120 mg/ℓ (以 CaCO₃ 計)，必須添加足夠之蘇打灰，才可有效去除此類硬度。硬水軟化所需之混合時間，通常都較淨水程序之混凝時間長⁽³⁾，根據台灣省自來水工程設施標準，其混合時間不得小於 40 分鐘⁽⁴⁾，一般而言，快混及慢混時間分別採 5~10 分鐘及 40~60 分鐘為宜，可知硬水軟化反應所需時間較一般瓶杯試驗長，

表三 港西淨水場及通霄廠日南給水站之水質特性

水質項目	自自水廠別		港西淨水場(註)		日南給水站(註)	
	原水	處理水	原水	處理水	原水	處理水
溫度 (°C)			24	24	23	23
pH 值			7.4	7.1	7.1	7.1
總鹼度 (mg/ℓ, 以CaCO ₃ 計)			184	155	194	155
鈣硬度 (mg/ℓ, 以CaCO ₃ 計)			200	196	214	208
鎂硬度 (mg/ℓ, 以CaCO ₃ 計)			64	64	82	64
總硬度 (mg/ℓ, 以CaCO ₃ 計)			264	260	296	272
Na ⁺ (mg/ℓ)			19.6	17.6	20.2	19.6
Fe ⁺⁺ (mg/ℓ)			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Mn ⁺⁺ (mg/ℓ)			<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Al ⁺⁺ (mg/ℓ)			<0.06	12.1	<0.05	<0.05
SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)			87	140	144	138
Cl ⁻ (mg/ℓ)			18	42	4.9	6.0
NO ₃ ⁻ (mg/ℓ)			2.6	2.0	<0.05	<0.05
NH ₃ -N (mg/ℓ)			5.20	0.09	<0.05	<0.05
濁度 (NTU)			1.2	0.6	0.2	0.3

註：港西淨水場原水及處理水之取樣時間為 77 年 11 月 9 日；
通霄廠日南給水站則為 77 年 11 月 11 日。

且宜採較高之攪拌速度。根據本研究之實驗結果，雖靜置沉降 0.5 ~ 1.0 小時後，膠羽已可完全沉澱。

以下將分別探討港西淨水場及通霄廠日南給水站之石灰、蘇打灰加量與硬度去除、化學污泥產生量之實驗結果。

(1) 港西淨水場

根據表三港西淨水場之水質特性，按硬水軟化化學平衡反應式可計算 CO_2 、碳酸塩硬度、非碳酸塩硬度及超量石灰所需之石灰、蘇打灰及其化學污泥產生量，茲說明如下：

- ① $\text{CO}_2 = 13 \text{ mg/l}$ ，石灰需要量 = 22 mg/l Ca(OH)_2 ，化學污泥產生量 = 30 mg/l CaCO_3 。
- ② 碳酸塩硬度 = 184 mg/l (以 CaCO_3 計)，石灰需要量 = $136 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$ ，化學污泥產生量 = 272 mg/l CaCO_3 。
- ③ $\text{Mg}^{+2} = 64 \text{ mg/l}$ (以 CaCO_3 計)，石灰需要量 = 47 mg/l Ca(OH)_2 ，化學污泥產生量 = $37.12 \text{ mg/l Mg(OH)}_2$ 。
- ④ 超量石灰，石灰需要量 = 46 mg/l Ca(OH)_2 ，化學污泥產生量 = 46 mg/l Ca(OH)_2 。
- ⑤ 非碳酸塩硬度 = 80 mg/l (以 CaCO_3 計)，蘇打灰需要量 = $85 \text{ mg/l Na}_2\text{CO}_3$ ，化學污泥產生量 = 80 mg/l CaCO_3 。

港西淨水場原水之軟化實驗結果如表四所示。

表四 港西淨水場原水之軟化實驗結果
(水溫 = 20.5 °C)

表四所列之實驗結果指出，當加入 Himoloc SS-120 強陰離子性聚合物後，膠羽可沉降下來且上澄液清澈，此外在加入理論加藥量 $251 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$ 及 $85 \text{ mg/l Na}_2\text{CO}_3$ 時，硬度可自 264 mg/l 降至 59 mg/l (以 CaCO_3 計)，惟其污泥產生量仍較理論量少。軟化實驗完成時，試驗水之 pH 值已升到 11.5，通常必須以 CO_2 氣體予以再碳化 (recarbonation)。

項目	CO_2 之去除	$\text{Ca(HCO}_3)_2$ 及 $\text{Mg(HCO}_3)_2$ 之去除	石灰-蘇打灰軟化之超量石灰法	總硬度之去除
加藥量	添加 22 mg/l Ca(OH)_2	(1)+(2) $158 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$	(1)+(2)+(3)+(4) $251 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$	(1)+(2)+(3)+(4)及(5) $251 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$ 及 $85 \text{ mg/l Na}_2\text{CO}_3$
pH 變化	7.2 → 8.5	7.2 → 9.5	7.2 → 11.1	7.2 → 11.5
硬度 (以 CaCO_3 計)	264	264	264	264
	258	187	158	59
化學污泥乾重 (mg)	30	302	385	465
	理論值			
1/2 軟化水	實際值	33	203	314
膠羽生長情形	A	B	B	B
上澄液		清	澄	澄

註：A 表示膠體狀懸浮物 (colloidal suspension)
B 表示顆粒狀懸浮物 (crystalline suspension)

(2) 通霄廠日南給水站

根據表三通霄廠日南給水站之水質特性，按硬水軟化化學平衡反應式可計算 CO_2 、

碳酸鹽硬度、非碳酸鹽硬度及超量石灰所需之石灰、蘇打灰及其化學污泥產生量，茲說明如下：

- ① $\text{CO}_2 = 24.4 \text{ mg/l}$ ，石灰需要量 = 42 mg/l Ca(OH)_2 ，化學污泥產生量 = 55 mg/l CaCO_3 。
- ② 碳酸鹽硬度 = 194 mg/l （以 CaCO_3 計），石灰需要量 = $144 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$ ，化學污泥產生量 = 388 mg/l CaCO_3 。
- ③ $\text{Mg}^{+2} = 82 \text{ mg/l}$ （以 CaCO_3 計），石灰需要量 = 61 mg/l Ca(OH)_2 ，化學污泥產生量 = 48 mg/l Mg(OH)_2 。
- ④ 超量石灰，石灰需要量 = 46 mg/l Ca(OH)_2 ，化學污泥產生量 = 46 mg/l Ca(OH)_2 。
- ⑤ 非碳酸鹽硬度 = 102 mg/l （以 CaCO_3 計），蘇打灰需要量 = $108 \text{ mg/l Na}_2\text{CO}_3$ ，化學污泥產生量 = 102 mg/l CaCO_3 。

通霄廠日南給水站原水之軟化實驗結果如表五所示。

表五所列之實驗結果指出，當加入 Himoloc SS-120 強陰離子性聚合物後，膠羽可沉降下來且上澄液清澈，此外，在加入理論加藥量 $293 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$ 及 $108 \text{ mg/l Na}_2\text{CO}_3$ 時，硬度可自 296 mg/l 降至 45 mg/l （以 CaCO_3 計），惟其污泥產生量結果與港西淨水場之原水軟化實驗結果甚為相似，亦即污泥產生量仍較理論量少。軟化實驗完成時，試驗水之 pH 值已升到 11.4，通常必須以 CO_2 氣體予以再碳化。

表五 通霄廠日南給水站原水之軟化實驗結果（水溫 = 22°C ）

實驗條件與結果	項目	CO_2 之去除	$\text{Ca(HCO}_3)_2$ 及 $\text{Mg(HCO}_3)_2$ 之去除	石灰-蘇打灰軟化之超量石灰法	總硬度之去除
加藥量		添加 42 mg/l Ca(OH)_2	(1)+(2) $186 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$	(1)+(2)+(3)+(4) $293 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$	(1)+(2)+(3)+(4)及(5) $293 \text{ mg/l Ca(OH)}_2$ 及 $108 \text{ mg/l Na}_2\text{CO}_3$
pH 變化		7.4—8.7	7.4—9.5	7.4—11.1	7.4—11.4
硬度變化 (mg/l ，以 CaCO_3 計)		296 274	296 229	296 123	296 45
化學污泥乾重(mg)	理論值	55	443	537	639
1L 軟化水	實際值	39	345	362	467
膠羽生長情形		A	B	B	B
上澄液				清	混

註：A 表示膠體狀態浮物 (colloidal suspension)
B 表示顆粒狀懸浮物 (crystalline suspension)

港西淨水場及通霄廠日南給水站兩處原水之硬水軟化，若以理論加藥量及超量石灰加入去除總硬度時，其硬度已可分別自 264 mg/l 及 296 mg/l 降至 59 mg/l 及 45 mg/l （以 CaCO_3 計）。現若以此一理論加藥量及超量石灰進行港西淨水場與通霄廠日南給水站原水軟化時，其原水及處理後之水質彙整如表六所示。

最後，根據表三及表六所列之港西淨水場及通霄廠日南給水站之水質特性資料，可作成陰、陽離子電性中和之示意圖，如圖四及圖五。

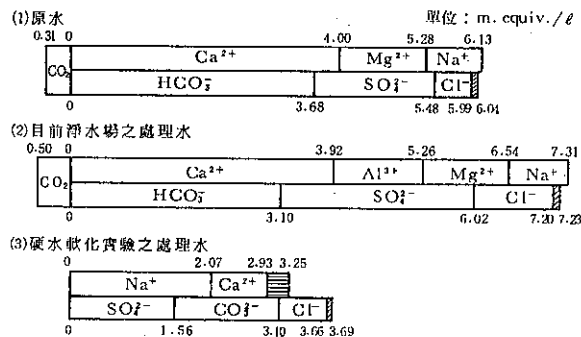
此一實驗結果顯示，鈉離子 (Na^+) 濃度因蘇打灰 (Na_2CO_3) 之加入而明顯增

加，而碳酸根離子 (CO_3^{2-}) 則因 pH 值之增加而增加。至於濁度改變情形則發現石灰—蘇打灰法對港西淨水場之原水有所助益。

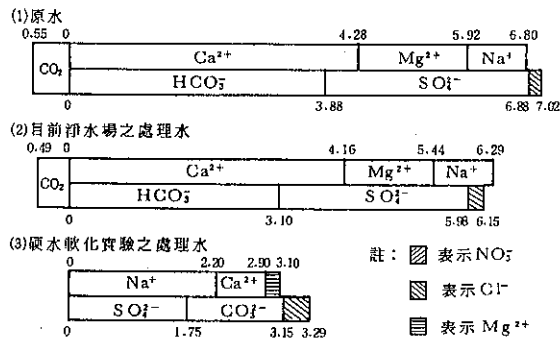
表六 港西淨水場及通霄廠日南給水站原水以理論加藥量及超石灰進行硬水軟化之實驗結果

水質項目	自來水廠別	
	港西淨水場 原水 → 處理水	日南給水站 原水 → 處理水
總硬度 (mg/ℓ, 以 CaCO_3 計)	264 → 59	296 → 45
Ca^{++} (mg/ℓ, 以 CaCO_3 計)	200 → 43	214 → 35
Mg^{++} (mg/ℓ, 以 CaCO_3 計)	64 → 16	82 → 10
Na^+ (mg/ℓ)	19.6 → 47.7	20.2 → 50.4
Fe^{++} (mg/ℓ)	< 0.05	< 0.05
Mn^{++} (mg/ℓ)	< 0.05	< 0.05
Al^{++} (mg/ℓ)	< 0.05	< 0.05
CO_3^{2-} (mg/ℓ, 以 CaCO_3 計)	0 → 77	0 → 70
Cl^- (mg/ℓ)	18.0 → 19.8	4.9 → 5.0
NO_3^- (mg/ℓ)	2.6 → 2.0	< 0.05 → < 0.05
SO_4^{2-} (mg/ℓ)	87 → 75	144 → 84
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/ℓ)	5.2 → 3.5	0.05 → 0
pH 值	7.4 → 11.5	7.1 → 11.4
濁度 (NTU)	1.2 → 0.8	0.2 → 0.2

圖四 港西淨水場之陰、陽離子電性中和示意圖



圖五 通霄廠日南給水站之陰、陽離子電性中和示意圖



四、硬水軟化處理費用分析

台灣省自來水公司經營之淨水場，未曾做過硬水軟化處理，本研究選擇原水硬度約 300 mg/l 之南部港西淨水場及中部通霄廠日南給水站，試以石灰—蘇打灰軟化法及離子交換法，研擬降低硬度所需要之工程設施，並分析處理費用。由於供飲用自來水仍應保留適當之硬度，以避免配水管線之嚴重腐蝕，且基於處理費用之考量，因此，軟化處理後水中硬度以 170 ~ 180 mg/l (以 CaCO₃ 計) 為目標。

1. 石灰—蘇打灰軟化法

1-1 港西淨水場

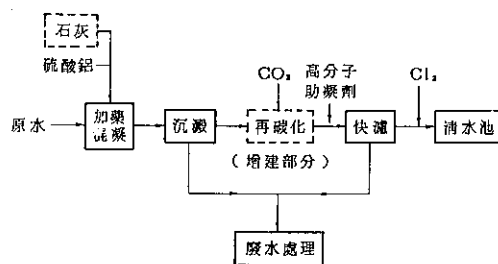
港西淨水場原水取自東港溪地面水，經加藥、混凝、沉澱、快濾、消毒處理後供用東港地區。設計出水能力 40,000 CMD，硬度達 260 ~ 300 mg/l，水質常呈超飽和，析出碳酸鈣造成送配水管內積垢，許多制水閥門因水垢固結而無法開動。

(1) 水質特性與預定處理流程

東港溪原水水質分析如表三，總硬度 264 mg/l，其中鈣硬度 200 mg/l，鎂硬度 64 mg/l，碳酸鹽鹼度 184 mg/l，非碳酸鹽硬度 80 mg/l。港西淨水場已設有去除濁度之處理設備，如採分流軟化時，原設備須更動不少，因鎂硬度尚非太高，為避免增加作業之困難，建議只去除鈣硬度部分，原水混凝前加添石灰 (參考表四之實驗結果)，可將水中硬度降為 187 mg/l，加石灰量 158 mg/l，pH 值由 7.2 上升至 9.5，軟化後加 CO₂ 調回 pH 值至 7 ~ 8，港西淨水場處理流程修訂為圖六。

(2) 設備概要

根據港西淨水場現有之處理設備，若欲增加其軟化功能，如上列流程圖所示，需要



圖六 港西淨水場硬水部份軟化處理流程

表七 港西淨水場增添軟化功能所需設備之工程費用概估

工 程 設 施	數 量	工程費 (萬元)
沉澱池鏈條式括泥機	11 組	880
自動排泥閥及控制裝置	11 組	200
再碳化池 V = 300 m ³	1 池	100
加藥設備—石灰	1 式	300
— 高分子助凝劑	1 式	20
加二氧化碳設備	1 式	150
廢水處理設備	1 式	1,650
脫水機房 60 坪	1 式	180
電氣設備	1 式	250
零星、工程管理費	1 式	270
合 計		4,000

添加設備不多，淨水作業亦無改變。軟化處理各單元之水力要求與一般淨水無異，故原有設備都能適用，僅沉澱池部分目前係由人工排泥，因石灰軟化產生污泥多，需加裝機械刮泥機。

(3) 建設費概估

港西淨水場現有處理設備旨在去除原水濁度、鐵錳與細菌，如欲同時發揮去除過高硬度之功能，需要增加設備之工程費用概估如表七。

(4) 處理成本分析

港西淨水場除原來去除濁度、鐵錳、細菌所需處理成本以外，增添軟化功能部分之處理成本如表八。年費支出以藥品費用最多，如淨水場年平均處理水量為設計水量之70%，藥品年用量亦以(2)節所估之70%計，分析結果，其軟化成本為1.7元/CMD。

1-2 通霄廠日南給水站

日南給水站原水抽自地下水，出水能力20,000 CMD，地下水水質尚合乎自來水質各項標準，只在清水池內加氯消毒即壓送供水區，因硬度偏高，用戶迭生怨言。

(1) 水質特性與預定處理流程

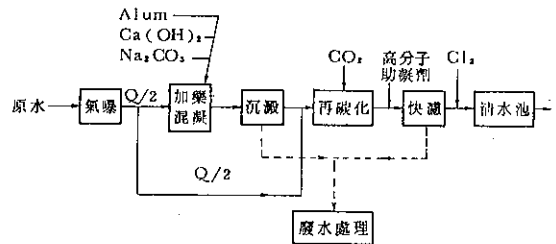
日南地下水水質分析如表三，總硬度296 mg/l，其中鈣硬度214 mg/l，鎂硬度84 mg/l。碳酸鹽鹼度194 mg/l，非碳酸鹽硬度占102 mg/l之多，為同時有效降低鎂硬度，須使用石灰—蘇打灰軟化法，此外原水中含CO₂ 24.4 mg/l，依外國經驗，地下水CO₂ 超過10 mg/l時，宜先曝氣逸去CO₂，以節省石灰用量。由上述原水特性，本場可採分流式處理，軟化一半水量，再與另一半未軟化水混合，估計處理後硬度降為 $\frac{1}{2} \times 46 + \frac{1}{2} \times 296 \div 170$ mg/l，處理流程如圖七。

(2) 設備概要

軟化處理設備之加藥、混凝、沉澱、快濾等單元，與一般淨水場無大差別，水力負

表八 港西淨水場增添軟化功能所需之處理成本概估

項	目	費 用 (萬元)
年	投資年息 7 %	$4,000 \times 7\% = 280$
	設備折舊費—土建 2 %	$800 \times 2\% = 16$
	—機電 6 %	$3,200 \times 6\% = 192$
	維修費—平均 2.5 %	$4,000 \times 2.5\% = 100$
	藥品費—石灰	$3 \times (7,500 \times 0.7) \times 365 = 574.88$
	—高分子助凝劑	$150 \times (20 \times 0.7) \times 365 = 76.65$
	—液化 CO ₂	$7 \times (800 \times 0.7) \times 365 = 143.08$
	動力費 10,000 元/HP-年	90
	用人費 500,000 元/年/人	$3 \times 50 = 150$
	污泥運棄費 160 元/m ³	$160 \times 12 \times 365 = 70$
費	計	1,692.61
處理成本	年處理水量 m ³ (平均)	$4.0 \text{ 萬} \times 365 \times 0.7 = 1022 \text{ 萬 m}^3$
	元 / CMD	1.7



圖七 通霄廠日南給水站硬水部份軟化處理流程

荷也相近，流程中僅增加再碳化池或pH調整池。日南給水站之軟化水量為 10,000 CMD，除了現有之清水池、加氯設備外，其他皆需新建。

(3) 建設費概估

通霄廠日南給水站現有清水池及消毒設備外，如欲將地下水硬度降低至 170 mg/ℓ (以 CaCO₃ 計) 左右，需要增加設備之工程費用概估如表九。

(4) 處理成本分析

通霄廠日南給水站除原來之加氯消毒成本外，增添軟化功能部份之處理成本分析如表十，藥品年用量以平均日處理水量估列，分析結果，其軟化成本為 2.7 元 / CMD。

2. 離子交換法

離子交換法應用於工業用水軟化、去離子、水中特殊成分之去除或回收等方面已甚為普遍。就硬水軟化用途言，其異於石灰—蘇打灰軟化法之特點，主要為設備占地小、硬度去除效率高及不產生化學污泥。近年由於自動控制技術進步，新建之離子交換軟化設備多半採自動運轉而易於管理。

離子交換軟化設備，類似壓力式快濾機。操作上分交換、再生二個步驟，交換即是將原水壓入軟化機，流過樹脂濾床，水中鈣鎂離子被吸收並濾出含鈉鹽軟水。當交換操作相當時間而樹脂吸收能量達飽和時，則需停止交換並進行樹脂再生。再生步驟通常可分為反洗、再生及清洗三個程序，反洗係利用原水由下往上沖洗，使壓密之樹脂產生 50~70% 之膨脹，並將床面污物洗淨；再生係利用約 10% 濃度食鹽水，由上往下緩速

表九 通霄廠日南給水站增添軟化功能所需設備之工程費用概估

工 程 設 施	數 量	工程費 (萬元)
氣曝設備 Q=10,000 CMD	1 座	80
快混池 (歐基履式)	1 座	10
混凝池 (含膠羽機)	2 池	210
沉澱池 (含 13.0 Mφ 刮泥機)	2 池	300
再碳化池 (V=200 M ³)	1 池	80
快濾池 Q=20,000 CMD	4 池	240
快濾控制設備	4 組	460
加藥設備—石灰	1 式	210
—蘇打灰	1 式	90
—硫酸鋁	1 式	60
—高分子助凝劑	1 式	20
加二氧化碳設備	1 式	150
廢水處理設備	1 式	800
操作室 60 坪	1 式	180
電氣及配管	1 式	210
零星、工程管理費	1 式	200
合 計		3,300

表十 通霄廠日南給水站增添軟化功能所需之處理成本概估

項 目	費 用 (萬元)
投資年息 7%	3,300 × 7% = 231
設備折舊費：土建 2%	1,600 × 2% = 32
機電 6%	1,700 × 6% = 102
維修費—平均 2.5%	3,300 × 2.5% = 82.5
藥品費—石灰	3 × (3,060 × 0.7) × 365 = 234.55
—蘇打灰	8 × (1,100 × 0.7) × 365 = 224.84
—硫酸鋁	4 × (500 × 0.7) × 365 = 51.10
—高分子助凝劑	150 × (10 × 0.7) × 365 = 38.33
—液化 CO ₂	7 × (800 × 0.7) × 365 = 143.08
—液氯	—
動力費 10,000 元/HP	1.0 × 70 = 70
用人費 500,000 元/年/人	50 × 3 = 150
污泥運費費 160 元/m ³	160 × 5 × 365 = 29.2
合 計	1388.6
處理成本	年處理水量 m ³ (平均) 2 萬 CMD × 365 × 0.7 = 511 萬 m ³
元 / CMD	2.7

濾過，使飽和樹脂重新恢復吸收機能，濾過水由底部排除；清洗則係樹脂再生後，進行一次一交換流程（cycle）時，將濾過水排除一短時間，洗出機內殘餘之含氯化鈣（鎂）廢液，再正式交換過濾。完成再生操作所需時間 1.0 ~ 1.5 小時。

用為硬水軟化之樹脂，通常使用強酸性納系離子，市面商品有 Duolite、Dowex、Ionac 及 Amberlite 等多種，設計軟化設備，須先計算去除鈣鎂硬度總量（以 CaCO_3 計）、需要樹脂容積及再生鹽用量，然後再安排軟化機尺寸及機數、儲鹽倉庫、鹽液溶解槽、進水交換及再生抽水器等附屬設備。採用離子交換軟化法，原水中濁度及鐵錳等雜項須先去除，以防干擾及降低樹脂吸收功能。前述通霄廠日南給水站之地下水原水得直接以離子交換法進行軟化，港西地面水源宜以其處理後之清水再行軟化。

參考美國 Duolite C20，建議之軟化設計數據如表十一。

茲以通霄廠日南給水站之地下水原水軟化為例，原水鈣鎂硬度 $296 \text{ mg}/\ell$ ，軟化後出水質硬度 $170 \text{ mg}/\ell$ 為目標，設計其軟化設備如下：

2-1 通霄廠日南給水站

(1) 基本設計

採分流式處理，出水量 20,000 CMD，取其中之 9,000 CMD 加以軟化處理，再與其餘 11,000 CMD 未軟化水混和，假設軟化水之硬度 $10 \text{ mg}/\ell$ ，混和水硬度則降為 $(9 \times 10 + 11 \times 296) \times 10^3 / 20 \times 10^3 = 167.5 \text{ mg}/\ell$ 。

每日需要去除鈣鎂量 (CaCO_3) = $296 \times 10^{-3} \times 9,000 = 2,664 \text{ kg}$

需要交換樹脂容積 = $2,664 \times 10^3 / 57.5 = 46,330 \ell$

每日需要再生鹽量 = $100 \times 46,330 \times 10^{-3} = 4,633 \text{ kg}$

表十一 離子交換法軟化設計數據

操作情況	流 率	流 體	時 間	流 量
交 換	5~10 BV/H	原 水	—	—
反 洗	約 13 m/H	原 水	5~15 min	3~8 BV
再 生	4~10 BV/H	10~20% NaCl	30~60 min	80~300 g/ℓ
清 洗	5~10 BV/H	原 水	10~40 min	3~8 BV

樹脂交換容量：57.5 g- CaCO_3 /ℓ-Resin

再生耗鹽量：100 g-NaCl/ℓ-Resin

(BV = Bed Volume)

表十二 通霄廠日南給水站增添離子交換軟化功能所需設備之工程費用概估

工 程 設 施	數 量	工程費(萬元)
軟化機 2.6"φ×3.0'H(SUS)	7 組	700
軟化機自動控制閥(5只)	7 組	350
軟化機樹脂	56,000 ℓ	420
鹽液溶解槽、貯存槽	1 式	150
操作抽水機	15 Hp	4 台
	7½ Hp	2 台
	(填液用) 5 Hp	2 台
原水、過濾水、食鹽水配管	350mm~150mm	150
電子流計計(150mmφ)	8 組	120
自動監控系統	1 式	120
控制室	40 坪	120
分水井	200 m ³	60
輕型鋼架廠棚	200 m ²	70
廢水池	1 式	55
零星、工程管理費	1 式	190
合 計		2,600

(2)建設費概估

通霄廠日南給水站現有處理設備如欲同時發揮去除過高硬度之功能，需要增加離子交換設備之工程費用概估如表十二。

(3)處理成本分析

通霄廠日南給水站增添離子交換軟化功能之處理成本如表十三，其軟化成本為 2.0 元 / CMD。

表十三 通霄廠日南給水站增添離子交換軟化功能所需之處理成本概估

項 目		工 程 費 (萬 元)
年	投資年息 7 %	$2,600 \times 7 \% = 182$
	設備折舊費：土建 2 %	$400 \times 2 \% = 8$
	機電 6 %	$2,200 \times 6 \% = 132$
	修護費—平均 4 %	$2,600 \times 4 \% = 104$
	藥品費—粗食塩	$2 \text{元} \times 50,000 \times 365 = 365$
	一液 氣	$15 \text{元} \times 40 \times 365 = 21.9$
	動力費 10,000 元/HP	$60 \text{Hp} \times 1.0 = 60$
費	用人費 500,000 元/年/人	$50 \times 3 \text{人} = 150$
	合 計	1022.9 萬
	年處理水量 m^3 (平均)	$2 \text{萬 CMD} \times 365 \times 0.7 = 511 \text{萬 m}^3$
元 / CMD	2.0	

五、結 論

1. 採行超量石灰—蘇打灰分流式處理時應視非碳酸鹽含量而決定是否添加蘇打灰，且在超量石灰分流處理操作之下將總硬度降至 $200 \text{mg}/\ell$ (以 CaCO_3 計) 以下，可節省很多藥品的費用，且可使鈣硬度及鎂硬度的含量得到較佳的平衡。

2. 石灰—蘇打灰軟化後所產生的化學污泥量，得視硬度種類、軟化劑種類及沉澱污泥的濃度而定，計算方法可依反應平衡推估，實際值比理論推估值少。

3. 石灰—蘇打灰軟化法在設備與操作程序上與一般淨水處理無甚大差別，但污泥量多且處理設備費較高。在操作成本上，藥品費支出 (包括石灰、蘇打灰及再碳化之二氧化碳) 所佔比例最大。若新設石灰—蘇打灰軟化處理場，每 CMD 處理成本約 2.7 元；若已有處理設備之淨水場兼降低硬度處理，每 CMD 處理成本增加 1.7 元。

4. 離子交換法在國內工業用水已甚普遍，樹脂價格較過去低廉，因之處理成本降低。原已符合飲用水標準之地下水採用本法軟化處理時 (如通霄廠日南給水站)，每 CMD 水之處理成本 2.0 元較之石灰—蘇打灰軟化法便宜。不潔淨之地面水源，離子交換法只能以預處理後之清水再進行軟化。

5. 地面水源之水質愈差時，適合以石灰—蘇打灰法軟化，可同時去除濁度、硬度、鐵錳及水中部份之有機物。港西淨水場若以石灰—蘇打灰法進行軟化，每 CMD 水之處理成本雖增加 1.7 元，但目前處理時之預氣量應可大幅減省，且出水水質也較安全衛生 (即較無三鹵甲烷之顧慮)。

參考文獻

1. 「台灣省自來水公司 74 ~ 75 年水質檢驗統計」，台灣省自來水公司出版，1987。
2. 高肇藩，衛生工程—給水篇，第三版，529 ~ 540 頁，台南市國立成功大學環境工程學系，1980。
3. Water Treatment Plant Desigh, pp.209-226, American Society of Civil Engineers, American Water Works Association, Conference of State Sanitary Engineers, 1985.
4. 「臺灣省自來水工程設施標準」，省府 62 年 3 月 6 日府建公字第 24073 號令公布施行，1973。