



工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control

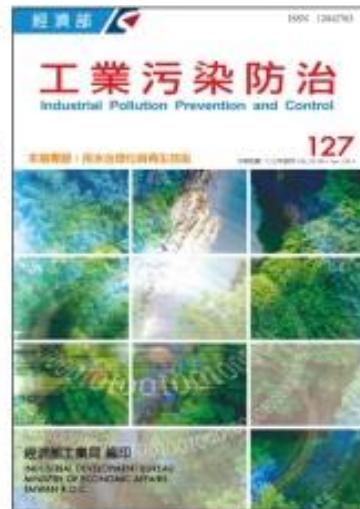
本期專題：用水合理化與再生技術

127

中華民國一〇三年四月 VOL.33 NO.1 Apr. 2014



本期專題為「用水合理化與再生技術」，承蒙周委員明顯、康委員世芳兩位委員多方邀稿，期盼提供業界及學者專家就此專題深入探討的參考，並能運用於實務技術方面。



中華民國七十一年一月創刊

中華民國一〇三年四月出刊

發行人：沈榮津

總編輯：凌韻生

編輯委員：申永順、李育明、林志森、周明顯、郭勝隆、康世芳、張添晉、鄭福田
(依姓氏筆劃順序)

本期專題編輯委員：周明顯、康世芳

企劃：陳良棟、于台珊、許思亮

執行編輯：陳見財、陳志銘、葉雅馨

發行所：經濟部工業局

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02) 2754-1255 FAX：(02) 2704-3753

網址 <http://www.moeaidb.gov.tw>

財團法人台灣產業服務基金會

台北市大安區106四維路198巷39弄14號1F

TEL：(02) 2325-5223 FAX：(02) 2325-3922

網址 <http://www.ftis.org.tw>

行政院新聞局出版事業登記證

局版臺誌第三一四七號

中華郵政北字〇五二七號

執照登記為雜誌交寄

印刷承製：賀聖印刷

127 工業污染防治

溫室氣體

工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量
調查與分析

..... 陳鵬宇、李佩玲、潘建成、王義基、陳良棟

1

廢棄物處理

利用浮選技術分離矽泥之研究

..... 李珣琦、謝雅敏、陳偉聖、施冠宇、申永輝

17

水處理技術

淨水場之實廠操作成果研究

..... 賴逸嵩

25

本期專題：用水合理化與再生技術

我國廢污水再生利用推動現況

..... 楊偉甫、李永平、阮香蘭、劉尚儒、於維芬、游勝傑

49

從國際經驗看台灣推動水再生之關鍵議題

..... 莊順興、歐陽嶠暉

61

工業區產業用水最佳化與再生技術推動

..... 黃抒毓、黃淑君、陳蓉瑩

75

電透析技術在工業用水與廢水再生上的應用

..... 周珊瑚、莊世享、梁德明、廖啟鐘、夏工傑

87

半導體封裝製程用水管理及回收系統探討

..... 林國盛、吳靜宜、吳毓昌

101

高雄地區飲用水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物監測與去除

..... 楊金鐘、顏嘉亨、王智龍

111

溫室氣體

工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

陳鵬宇^{*}、李佩玲^{*}、潘建成^{**}、王義基^{***}、陳良棟^{****}

摘要

本研究係依聯合國「跨政府氣候變遷專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)」1996 年發布之「IPCC 國家溫室氣體排放清冊指南」(以下簡稱 IPCC 1996 指南)，建立我國 1990~2012 年工業製程及產品使用部門非燃料燃燒溫室氣體排放量，經調查統計，2012 年工業製程及產品使用部門溫室氣體排放量共計 20,376 千噸 CO₂e；若以排放源類別區分，「礦業(非金屬製品)」及「金屬工業」占比最高，分別為 44.7% 及 38.7%；以溫室氣體種類別區分，CO₂ 占比最高 (83.0%)，其次為 SF₆(7.3%)、HFC(4.9%)、PFC(3.6%) 等含氟氣體；歷年排放量方面，與經濟發展情形明顯相關，如產品減產、產品替代、金融風暴等，另近年產業配合政府推動自願減量，亦對排放量下降趨勢作出貢獻，2002~2012 年共約下降 29.0%。

【關鍵字】工業製程、非燃料燃燒、溫室氣體

^{*}財團法人台灣綠色生產力基金會 工程師

^{**}經濟部工業局永續發展組規劃科 技正

^{***}經濟部工業局永續發展組規劃科 科長

^{****}經濟部工業局永續發展組 副組長

一、前　言

聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)規範，所有締約方應提出溫室氣體各種排放源和吸收匯(Sink)之國家溫室氣體排放清冊；我國雖非 UNFCCC 締約方，但為因應行政院環境保護署於清冊建置之需求，並掌握我國工業製程及產品使用部門溫室氣體排放情形，特進行工業製程及產品使用部門 1990~2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放量調查與分析。

依據國家溫室氣體排放清冊架構(IPCC 1996)(如圖 1)，本研究係統計在工業製程或產品使用中非經由燃料燃燒所造成之溫室氣體排放，如水泥旋窯經化學反應($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)所釋放之 CO_2 ，與我國能源局或國際能源總署(International Energy Agency, IEA)定期公布之燃料燃燒溫室氣體排放量不同，燃料燃燒之排放量係歸類於清冊之能源部門中。

本研究延續林姿君等(2012)於 2000~2011 年排放量之統計結果，已新增統計 2012 年數據、追溯建立 1990~1999 年排放量、檢視修正 2000~2011 年相關數值，並依據歷年趨勢結果，提出分析說明。

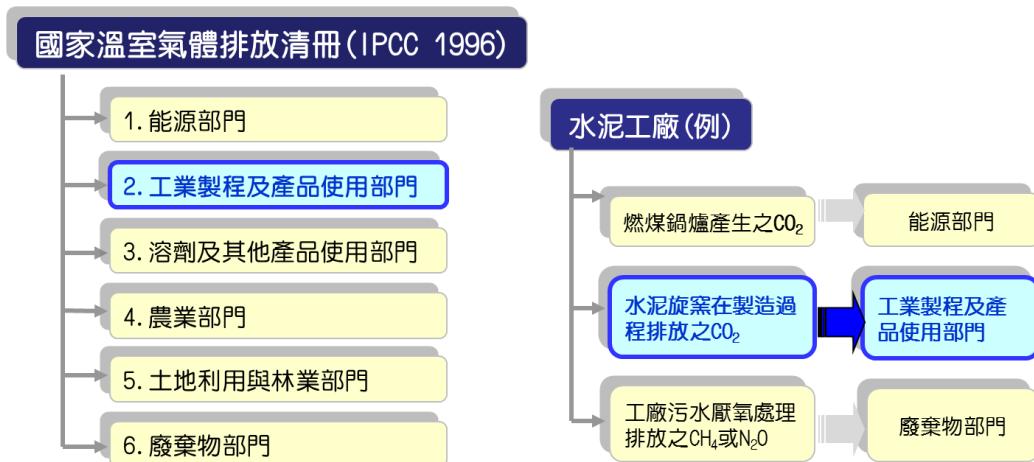


圖 1 國家溫室氣體排放清冊架構(IPCC 1996)

二、統計說明

1.統計架構

「工業製程及產品使用部門」下之分類包括：礦業(非金屬製品)、化學工業、金屬工業、鹵烴及 SF₆生產、鹵烴及 SF₆使用、其他製程等 6 項，並依我國工業製程特性新增「積體電路或半導體」、「TFT 平面顯示器」及「高壓斷路器及其他開關絕緣氣體」等 3 項次分類，計 6 類 56 項(如圖 2 所示)。

分類	次分類	項目
1礦業(非金屬製品)	水泥、石灰生產(2項)、石灰石與白雲石使用(2項)、純鹼生產與使用(2項)、屋頂瀝青、瀝青鋪路及其他(玻璃生產2項)	11
2化學工業	氨、硝酸、己二酸、碳化物(3項)生產及其它(碳煙、乙烯、氯乙烯生產等19項)	25
3金屬工業	鐵及鋼、鐵合金、原鋁生產、鋁鎂鑄造SF6用量	4
4鹵烴及SF6生產	生產HFC-23副產品排放、逸散排放	2
5鹵烴及SF6使用	冷凍空調、發泡劑、滅火劑、氣溶膠、溶劑、蝕刻使用、 <u>積體電路或半導體</u> 、 <u>TFT平面顯示器</u> 、 <u>高壓斷路器及其他開關絕緣氣體</u>	8
6其他製程	紙漿及紙板製品(2項)、食物和飲料(酒類、肉類等6項)	8

備註：粗體底線為依我國製造業特性新增之工業製程/產品別。

圖 2 「工業製程及產品使用部門」分類統計架構(IPCC 1996)

2.估算方法及流程

依據 IPCC 指南，溫室氣體排放調查方法，包括蒐集並建立活動數據、選擇方法別(TIER)、選擇排放係數、估算溫室氣體排放量、及不確定性分析等 5 個步驟，說明如下：

4 工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

(1) 蒐集並建立活動數據

活動數據資料來源包含：(A)業者提供；(B)政府統計資料(如工業生產統計年報、國貿局進出口統計)；(C)公會統計、政府研究報告或徵詢該行業代表性廠商、及(D)其它資料庫(如環保署廢棄物管制中心)等方面。

(2) 選擇方法別(TIER)

依據國內可取得活動數據種類選擇 IPCC 指南方法別，分別為方法一(TIER 1)、方法二(TIER 2)及方法三(TIER 3)，但各次分類其方法別定義具差異，仍需以各次分類指南建議內容為主。以「生石灰生產」為例，若生石灰產量數據來源為國家級生產統計數據，則選擇 TIER 1；若能分別取得高鈣石灰、含白雲石石灰、水硬石灰等類石灰產量，則選擇 TIER 2；若取得之活動數據係生產石灰時加入的各種碳酸鹽量，則選擇 TIER 3。

(3) 選擇排放係數

排放係數優先使用國內調查建立之產品強度進行估算，以符合國內產業實況，其次選用 IPCC 1996 指南之排放係數建議值。

(4) 估算溫室氣體排放量

依據可取得活動數據種類選擇 IPCC 指南方法別後，即可參考指南建議之溫室氣體排放量計算方法進行估算，但各次分類其方法別定義具差異，仍以該分類指南建議內容為主。大致上，TIER 1 係以產品活動數據(產量或使用量)乘上排放係數或全球暖化潛勢值(Global Warming Potential, GWP)求得排放量；TIER 2 則根據產品及製程特性計算排放量，如：質量平衡、氧化還原等；TIER 3 數據精確度最高，係直接量測或依盤查清冊取得排放量。

(5) 不確定性分析

依 IPCC【誤差傳遞法】進行合併之不確定性分析，包括：(A)量化單一排放源/匯合併之不確定性；(B)量化統計結果不確定性，並將量化結果參考溫室氣體盤查議定書(GHG Protocol)數據精確等級，予以定性說明，如表 1 所示。

表 1 溫室氣體盤查議定書(GHG Protocol)數據精確等級

數據精確程度	平均值的百分比區間
精準(High)	±5%
好(Good)	±15%
普通(Fair)	±30%
低(Poor)	高於 30%

3.時間序列的一致性

根據 IPCC 1996 指南，若活動數據來源、排放係數、或計算方法別等，於歷年排放量統計調查過程中有變更情形，需進一步提出說明。本研究於 1990~2012 年之工業製程及產品使用部門活動數據蒐集中，因部分項目無法維持時間序列的一致性，已改由其他管道蒐集(如表 2 所示)。

其中主要影響統計結果之差異項目分別為：

- (1)高爐鋼胚生產：2001~2012 年係彙整國內鋼鐵公司清冊取得排放量(TIER 3)，1990~2000 年則以高爐鋼胚產量與排放係數計算排放量(TIER 1)。
- (2)鹵烴及 SF₆ 使用：

A.鹵烴及 SF₆ 使用排放量情形自 2002 年後才完整呈現。

B.早期各分類項目無活動數據資料原因如下：(a)冷凍空調(HFC-134a)、滅火器(HFC-227ea)、高壓斷路器及其他開關絕緣氣體(SF₆)，早期相關之鹵烴及 SF₆ 使用量較少，故未進行調查；(b)積體電路或半導體、TFT 平面顯示器，2000 年前因廠商家數少，HFC、PFC、SF₆ 使用量低，故未進行統計。

1990~2000 年及 2001~2012 年二方數據來源重疊時間區間僅 2002 年及 2003 年，若排除「鹵烴及 SF₆ 使用」分類，其他差異項目對工業製程及產品使用部門非燃料燃燒溫室氣體排放量之影響則分別為 2.63% 及 0.94%，誤差為 5% 以下，屬可接受範圍。

6 工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

表 2 我國工業製程及產品使用部門非燃料燃燒溫室氣體排放量統計變更項目

分類	具差異產品 次分類項目	1990~2000 年		2001~2012 年	
		活動數據來源	方法別	活動數據來源	方法別
1.礦業(非 金屬製品)	石灰石使用	環保署固定空氣污染 源資料庫	TIER 1	1.工業生產統計年報 2.國貿局進出口統計 3.國內鋼鐵公司使用量	TIER 1
	白雲石使用	1.工業生產統計年報 2.國貿局進出口統計	TIER 1	1.工業生產統計年報 2.國貿局進出口統計 3.國內鋼鐵公司使用量	TIER 1
2.化學工業	硝酸生產	工業生產統計年報	TIER 1	酸鹼公會提供	TIER 1
3.金屬工業	高爐鋼胚生產	國內鋼鐵公司之鋼胚 產量	TIER 1	彙整國內鋼鐵公司清冊 溫室氣體排放量	TIER 3
	鐵合金生產	工業生產統計年報	TIER 1	鋼鐵公會提供	TIER 1
4.鹵烴及 SF_6 生產	無	-		-	
5.鹵烴及 SF_6 使用	冷凍空調使 用、高壓斷路 器及其他開關 絕緣氣體	無相關調查資料 (1990~2001)	無統計	環保署計畫(2002~2012)	TIER 2
	滅火劑	無相關調查資料 (1990~2001)		環保署計畫(2002~2012)	
	積體電路或半 導體、TFT 平 面顯示器	無相關調查資料		環保署計畫(2001~2012)	
6.其他製程	無	-		-	
註：(1)石灰石及白雲石使用(2001~2012 年來源)：銷售量+進口-出口-鋼鐵公司使用量 (2)白雲石使用(1990~2000 年來源)：銷售量+進口-出口					

三、結果與分析

1.2012 年統計結果

我國工業製程及產品使用部門 2012 年非燃料燃燒排放量統計結果為 20,376 千噸 CO_2e ，如表 3 所示，不確定性 $\pm 5.0\%$ ，符合「精準」(High)等級。

表 3 我國工業製程及產品使用部門 2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放量統計結果

單位：千公噸 CO₂e

溫室氣體種類 製程分類	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	PFC	SF ₆	小計	占比-分類別
1.礦業(非金屬製品)	9,110						9,110	44.7%
2.化學工業	4	38	214				256	1.3%
3.金屬工業	7,798	IE	IE			92	7,890	38.7%
4.鹵烴及 SF ₆ 生產				No	No	No	0	0.0%
5.鹵烴及 SF ₆ 使用				997	725	1,397	3,118	15.3%
6.其它製程	2						2	0.01%
總計	16,914	38	214	997	725	1,490	20,376	
占比-溫室氣體種類別	83.0%	0.2%	1.1%	4.9%	3.6%	7.3%	100.0%	

說明：

- 1.「灰底」表示指南未建議納入統計之氣體。
- 2.「No」表示無排放源；2012 年國內無鹵烴及 SF₆生產廠商。
- 3.「IE」表示該分類項目排放量已作估計，但列在其他分類項目；金屬工業之 CH₄ 及 N₂O 排放量已併入 CO₂ 排放統計。

(1) 分類別

以分類別分析 2012 年排放量占比，如圖 3 所示，以「礦業(非金屬製品)」占比最高(占 44.7%)、「金屬工業」占比次之(38.7%)、第三高為「鹵烴及 SF₆ 使用」(占 15.3%)；其中，「礦業(非金屬製品)」分類中以水泥生產占比最高(占該部門 86.0%、占整體 38.4%)、「金屬工業」分類中則以高爐鋼胚占比最高(占該部門 92.4%、占整體 35.8%)。

(2) 溫室氣體類別

以溫室氣體種類別分析 2012 年排放量占比，如圖 4 所示，以 CO₂ 占比最高(83.0%)，其次為 SF₆(7.3%)、HFC(4.9%)、PFC(3.6%)等含氟氣體。CO₂ 排放量主要來自「礦業(53.9%)」及「金屬工業(46.1%)」，SF₆、HFC、PFC 等含氟氣體主要來自「鹵烴及 SF₆ 使用」，其他溫室氣體 N₂O 及 CH₄ 則來自「化學工業」。

8 工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

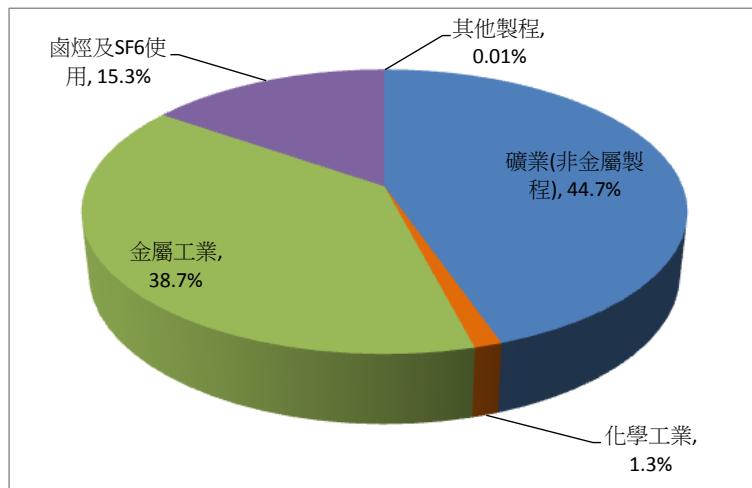


圖 3 我國工業製程及產品使用部門 2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放占比

—依分類別

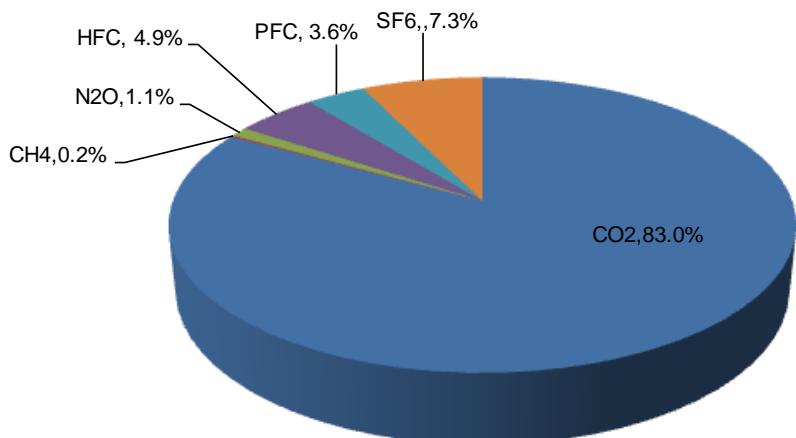


圖 4 我國工業製程及產品使用部門 2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放量占比

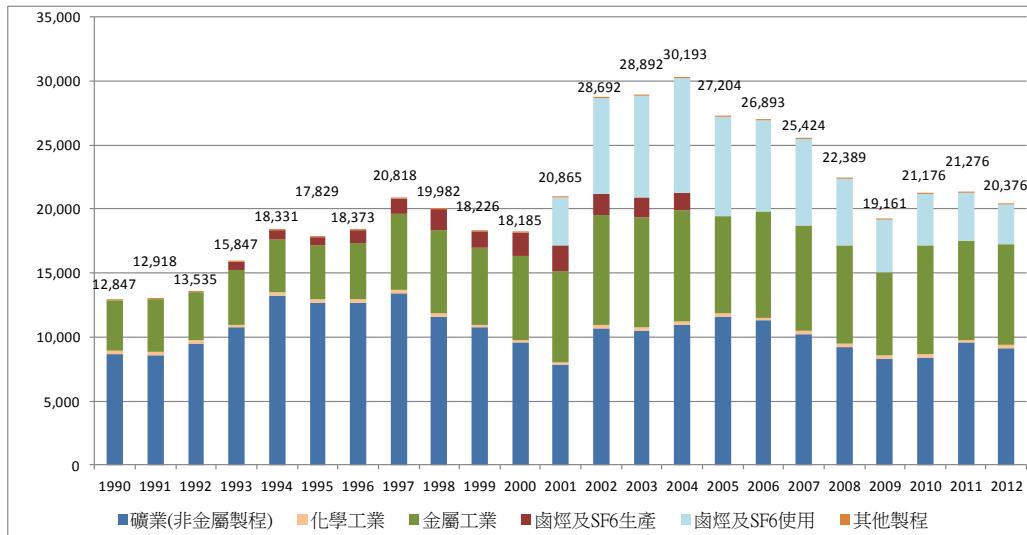
—依溫室氣體種類別

2.1990~2012 年統計結果

因部分項目活動數據來源差異影響，工業製程及產品使用部門 1990~2000 年排放量，明顯低於 2001~2012 年；不確定性方面，1990~2000 年約 $\pm 5.5\% \sim \pm 6.0\%$ ，已趨近於「精準」(High)等級，但屬「好」(Good)的等級，2001~2012 年約 $\pm 5.0\% \sim \pm 5.5\%$ ，屬「精準」(High)等級。整體而言，工業製程及產品使用部門非燃料燃燒溫室氣體排放量除與經濟發展情形明顯相關，如產品減產、產品替代、金融風暴等，另近年產業配合政府推動自願減量，亦對排放量下降趨勢作出貢獻，即自 2002 年 28,692 千噸降至 2012 年 20,376 千噸，共減少 8,316 千噸，約下降 29.0%。

(1)分類別

以分類別呈現之 1990~2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放量如圖 5 所示，相關分析說明如下：

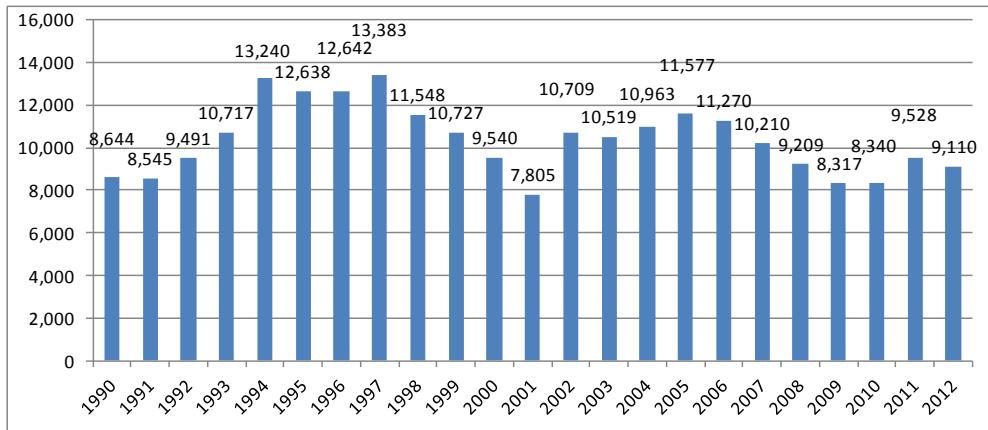


(單位：千公噸 CO₂e)

圖 5 我國工業製程及產品使用部門 1990~2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放量
—依分類別

10 工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

- A.由於「鹵烴及 SF₆ 使用」分類自 2002 年才完整建立其活動數據，故造成工業製程及產品使用部門 1990~2001 年排放量，明顯低於 2002~2012 年。
- B.歷年溫室氣體排放量皆以「礦業(非金屬製品)」及「金屬工業」二項分類占比最高。
- C.礦業(非金屬製品)歷年排放趨勢如圖 6 所示，主要排放來源為「水泥生產」，主要排放溫室氣體種類為 CO₂，為歷年排放量最高次分類項目。水泥生產排放量與產量(經濟發展)有關，1997 年後因亞洲金融風暴而逐漸下降，2002 年因第 11 家水泥廠投產，故排放量增加，2006 年後因各廠減產而再度下降，於 2009 年金融風暴後排放量降至最低，2010 年後排放量維持約 8,000 千噸。



(單位：千公噸 CO₂e)

圖 6 我國 1990~2012 年礦業(非金屬製品) 非燃料燃燒溫室氣體排放量

- D.金屬工業歷年排放趨勢如圖 7 所示，主要排放來源為「高爐鋼胚生產」，溫室氣體排放種類包含 CO₂、CH₄ 及 N₂O，為僅次於水泥生產排放量之次分類。早期鋼鐵業為起步階段，故排放量為上升趨勢，至 2000 年後每年約介於 6,000~7,000 千噸之間，2008~2009 年間排放量受金融風暴影響降低，而 2010 年後由於經濟復甦，且國內第 2 家高爐鋼胚廠商投產，故排放量略為上升。

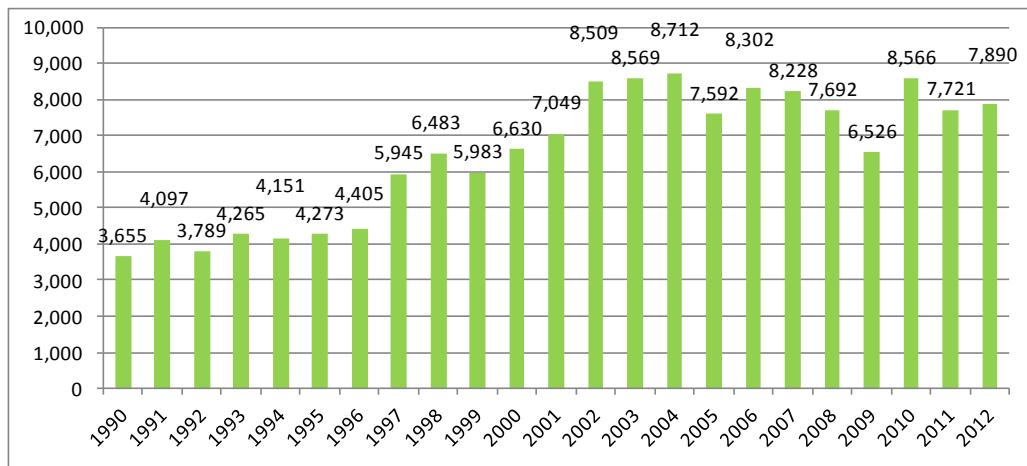
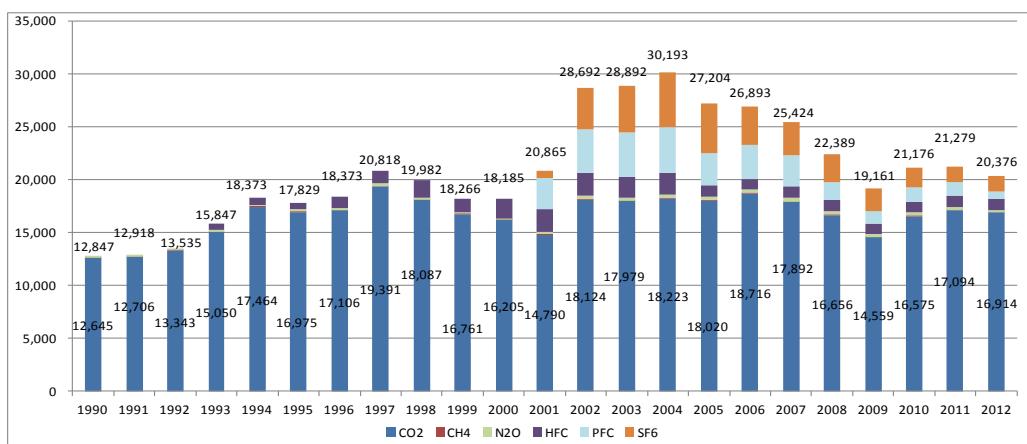
(單位：千公噸 CO₂e)

圖 7 我國 1990~2012 年金屬工業非燃料燃燒溫室氣體排放量

(2)溫室氣體種類別

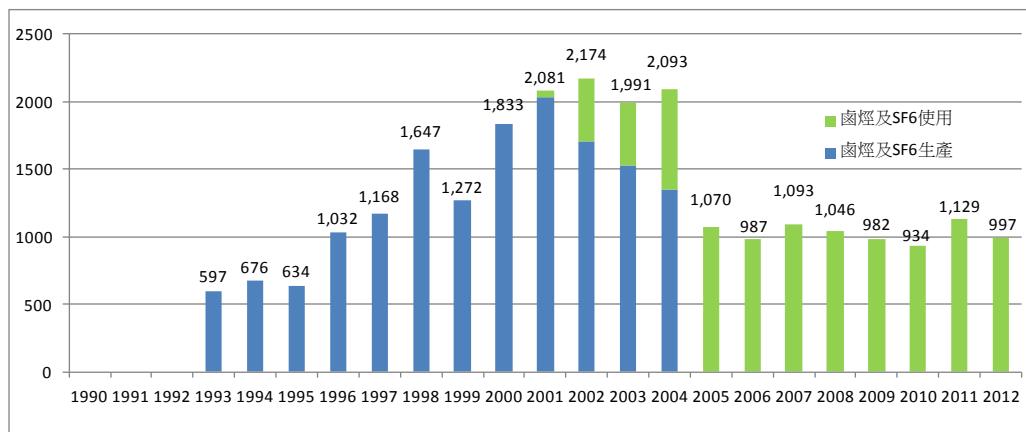
以溫室氣體種類別呈現之 1990~2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放量如圖 8 所示，相關分析說明如下：

(單位：千公噸 CO₂e)圖 8 我國工業製程及產品使用部門 1990~2012 年非燃料燃燒溫室氣體排放
—依溫室氣體種類別

12 工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

A. 溫室氣體排放種類以 CO₂ 為主，HFC、PFC 及 SF₆ 等含氟氣體排放量歷年則有不同變化趨勢。

B. HFC 歷年排放量如圖 9 所示，主要可由以下三部分排放來源趨勢變化說明：



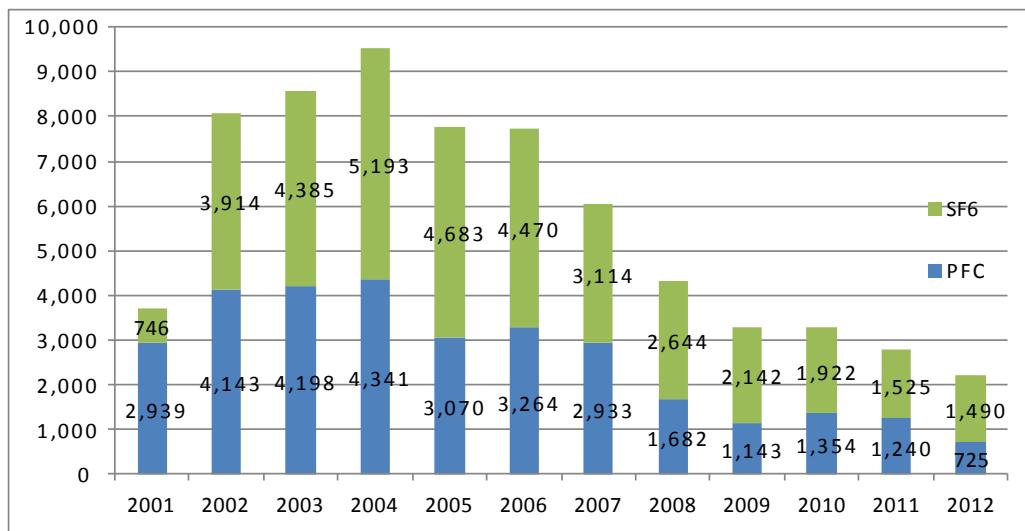
(單位：千公噸 CO₂e)

圖 9 我國工業製程及產品使用部門 1990~2012 年 HFC 排放

- 「鹵烴及 SF₆ 生產」分類之「副產品排放」：係指氟氯烴生產製程中副產物(HFC-23)之排放，國內自 1993 年起投產，並於 2004 年停產，故造成 2005 年後 HFC 排放量明顯下降。
- 「鹵烴及 SF₆ 使用」分類之「冷凍空調使用」：係指冷凍空調運轉時 HFC 漏漏排放。為因應蒙特婁議定書之管制時程，我國自 1996 年逐步凍結 HCFCs 的消費量(非 IPCC 指南建議估算溫室氣體種類)，業者逐步改以 HFC(IPCC 指南建議估算溫室氣體種類)取代，故排放量自 2002 年 332 千噸 CO₂e 上升至 2012 年 725 千噸 CO₂e。
- 「鹵烴及 SF₆ 使用」分類之「滅火劑」：係指滅火器填充使用 HFC 排放。排放量占比較低，但近年為成長趨勢，排放量自 2010 年 90 千噸 CO₂e 上升至 2012 年 186 千噸 CO₂e。

d. 「鹵烴及 SF₆使用」分類之「積體電路及半導體製程」：係指製程中使用 HFC 所造成的排放。積體電路及半導體產業自 2001 年後廠商家數才逐年增加，故始於 2001 年起納入溫室氣體排放數據調查統計；然以 2012 年為例，約排放 86 千噸 CO₂e，對排放趨勢成長較無影響。

C.PFC 與 SF₆排放源主要來自「鹵烴及 SF₆使用」分類之「積體電路或半導體」、「TFT 平面顯示器」等排放，如圖 10 所示，其排放量自 2005 年以後逐年下降，係因該產業配合政府政策推動溫室氣體自願減量之結果。



(單位：千公噸 CO₂e)

圖 10 我國工業製程及產品使用部門 2001~2012 年 PFC 及 SF₆排放

四、結語

本研究依據 IPCC 1996 版指南架構，完成我國 1990~2012 年工業製程及產品使用部門溫室氣體排放量調查，並依據分類別及溫室氣體種類別分析其排放變化。其

14 工業製程及產品使用部門非燃料燃燒 1990~2012 年溫室氣體排放量調查與分析

中，高爐鋼胚數據來源無法維持時間序列的一致性，2000 年以前排放量以 TIER 1 計算，2001 年後則以 TIER 3 計算，「鹵烴及 SF₆使用」2001 年前則因 HFC 等含氟氣體使用量少，而未進行調查，但以 2002 年及 2003 年兩種方法均存在的數據試算工業製程及產品部門非燃料燃燒溫室氣體排放量，排除「鹵烴及 SF₆使用」後誤差分別約為 2.64% 及 0.94%，誤差為 5% 以下，仍屬可接受範圍。

2012 年工業製程及產品使用部門非燃料燃燒溫室氣體排放量共計 20,376 千噸 CO₂e，不確定性約±5.0%，符合溫室氣體盤查議定書(GHG Protocol)「精準」(High)等級；歷年分析部分，工業製程及產品使用部門非燃料燃燒溫室氣體排放量除與經濟發展情形明顯相關，如產品減產、產品替代、金融風暴等，且近年產業配合政府推動自願減量，亦對排放量下降趨勢作出貢獻，即自 2002 年 28,692 千噸降至 2012 年 20,376 千噸，共減少 8,316 千噸，約下降 29.0%。

參考資料

1. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), Guide lines for National Green house Gas Inventories, 1996。
2. 林姿君、陳良棟、王義基、潘建成、李佩玲、江國瑛，台灣工業製程非燃料燃燒排放估算與分析，工業污染防治，第 124 期，p.1~9。
3. 工業統計年報，經濟部統計處，1990~2012。
4. 進出口統計資料庫，關稅總局，1990~2012。
5. 台灣區石化公會年報，台灣區石油化學同業公會出版，1990~2012。
6. 鋼鐵資訊，台灣區鋼鐵工業同業公會出版，1990~2012。
7. 工研院，碳捕集及封存技術與溫室氣體減量相關技術推動工作專案工作計畫，行政院環保署，2012。
8. 工研院，建立非二氧化碳溫室氣體管理制度與減量技術專案計畫，行政院環保署，2011。
9. 工研院，推動產業非二氧化碳溫室氣體排放減量，行政院環保署，2009。
10. 工研院，推動含氟溫室氣體產業排放減量，行政院環保署，2008。

- 11.工研院，破壞臭氧層物質與含氟溫室氣體管理策略規劃專案，行政院環保署，2006。
- 12.中技社，台灣地區工業製程、溶劑及其他產品使用之溫室氣體排放推估計畫，行政院環保署，2000。

廢棄物處理

利用浮選技術分離矽泥之研究

李珣琦^{*}、謝雅敏^{**}、陳偉聖^{***}、施冠宇^{*}、申永輝^{*}

摘要

在矽泥的分選中，品位及回收率是 2 個重要的指標。本研究利用浮選法將矽泥中的矽及碳化矽分離，同時參考氧化還原電位作為浮選的影響參數，希望藉由氧化還原電位的控制，可以提高品位及回收率。經由浮選法分離矽泥之結果，在品位的分析結果中，在精礦及尾礦的品位分析，結果都為相近。在回收率的分析結果中，尾礦的回收率，傳統浮選法的結果約為電位浮選法的 5 倍。在精礦的回收率，電位浮選法的結果約為傳統浮選法的 4.5 倍。

【關鍵字】矽泥分選、氧化還原電位、傳統浮選法、電位浮選法

^{*}國立成功大學資源工程學系

^{**}台灣首府大學

^{***}國立成功大學資源再生及管理研究中心

一、前　言

近幾年由於半導體產業及太陽能工業發展迅速，因此廢棄矽泥的產生量也日益增加。在台灣，每年約有 21,000~22,000 公噸的廢棄矽泥產生^[1]，因此如何有效的將廢棄矽泥再利用，成為一個重要的課題。

廢棄矽泥的來源主要是半導體產業及太陽能工業的製程過程中所產生的研磨漿液，而這些研磨漿液的主要成分為有機溶劑(聚乙二醇, PEG、二乙二醇, DEG)、碳化矽(SiC)、矽(Si) 與微量的鐵等組成^[2]，以往此漿液多以廢棄物處理，如果能回收矽泥中的碳化矽及矽，就能降低半導體產業及太陽能工業的製程成本。

廢棄矽泥的分選方法可以分為重力法、化學法及浮選法。重力法是利用碳化矽及矽之間比重的不同，利用水作為介質，將碳化矽及矽分離出來。先利用離心法將矽泥中的雜質清除，再利用酸洗劑去除矽泥中的金屬物質，此時矽泥中的主要成分為碳化矽及矽，再加入比重介於碳化矽及矽之間之浮選劑，再經離心力而得到矽及碳化矽^[3]。

在化學法中，先將廢棄矽泥與酸混合，並利用加熱將矽泥中的固體及液體分離液體部分回收水及醇類，固體部分回收碳化矽及矽之混合矽泥，再利用混合酸液可以得到碳化矽及矽^[4]。浮選法是一種傳統及快速的方法^[5]，由於碳化矽及矽在矽泥當中的成分比重相似，因此在浮選當中，可以利用不同的陽離子型界面活性劑將矽泥中的碳化矽及矽分離^[6]。由於浮選的過程中，浮選的時間、礦漿濃度及不同的界面活性劑都會影響品位及回收率，因此進一步利用矽泥中的碳化矽及矽表面性質不同，藉由氣泡及調整劑的作用使礦漿中的碳化矽及矽分為親水性及疏水性，利用氣泡將礦漿中的疏水性矽礦粒形成泡沫層而濃集，而親水性之碳化矽礦粒則留在礦漿中，而達到碳化矽及矽之分離^[7]。將電位參數應用在浮選法當中開始於硫化礦物的浮選，利用礦漿中礦物粒子及捕集劑的氧化還原的變化，造成礦物粒子的 zeta 電位不同，使得礦物粒子表面的性質產生改變，可以用來控制礦物的分選^[8]。

由上述可知，利用重力法雖然可以得到較高的碳化矽或矽，但是需要長時間的沈降才能得到較高的回收率。而酸洗法是近幾年較常用的將碳化矽及矽分離方法，可回收純度較高的碳化矽及矽，但是由於需要等溫度冷卻及配合酸洗，因此回收的

時間會變長，而無法快速的得到分離的碳化矽及矽。浮選法控制參數為礦漿的 pH 值、界面調整劑等參數，但是在浮選藥劑上需要不斷推測。

本研究利用浮選法並加入氧化還原電位成為控制參數，藉由參考礦漿電位的變化，一起控制礦物表面的反應，使其疏水化或親水化，從而達到浮選分離的目的。

二、實驗流程

本研究所蒐集之廢棄矽泥先進行物理化學性質(粒徑分佈、化學成分)之分析(表 1)，由物理化學性質分析結果中得知，廢棄矽泥 pH 值為中性、含固量為 70%、矽含量為 25% 及碳化矽含量為 75%。然後以浮選方式將矽泥中矽及碳化矽分開，在浮選過程中，藉由探討傳統浮選法及電位浮選法之不同，以瞭解回收品位及回收率之差異(圖 1)。

表 1 物理化學性質分析

	pH	含固量(%)	碳化矽含量(%)	矽含量(%)	平均粒徑(μm)
矽泥	7	70	75	25	12.52

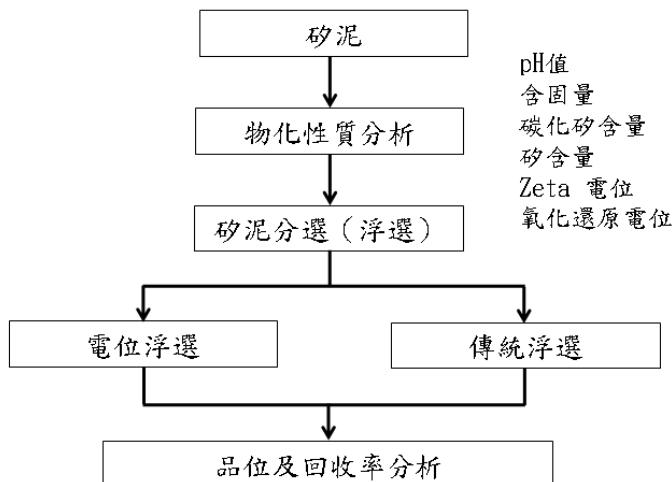


圖 1 實驗流程圖

三、結果與討論

3.1 Zeta 電位及氧化還原電位之分析結果

在利用浮選法分離矽與碳化矽粒子之前，先確定二種粒子在不同酸鹼度溶液中，粒子表面所帶的電性，由 Zeta 電位分析結果可以得知(圖 2)(圖 3)，碳化矽的等電點約為 pH 值 2.5，矽的等電點約趨近於 pH 值 1，除碳化矽當 pH 值在 1 及 2 之間表面帶正電荷，碳化矽大於 2 以上及矽二種的粒子表面皆帶負電荷。除了表面電位之外，礦漿中離子濃度也會影響浮選結果，由氧化還原電位分析結果可以得知(圖 2)(圖 3)，碳化矽氧化還原電位在 pH 值小於 10，氧化還原電位皆為正值；pH 值大於 10，氧化還原電位皆為負值。矽氧化還原電位在 pH 值小於 11，氧化還原電位皆為正值，pH 值大於 11，氧化還原電位皆為負值。在酸性的環境當中，氧化性越強，在鹼性的環境當中，則是還原能力越強。

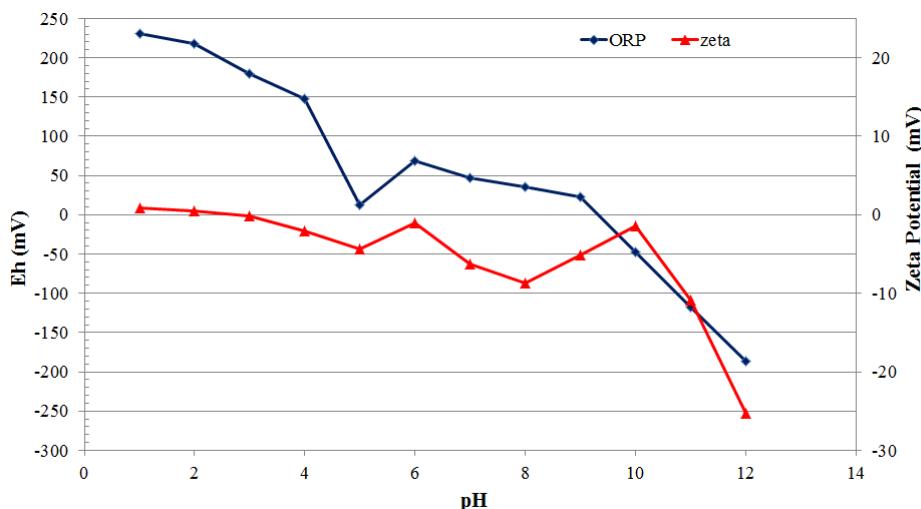


圖 2 碳化矽粒子之 Zeta 電位及氧化還原電位隨 pH 值變化圖

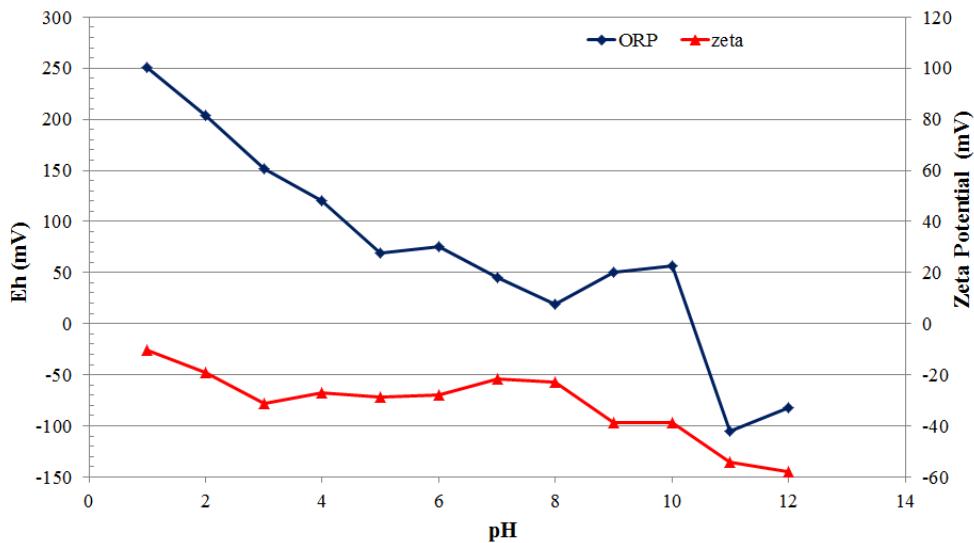


圖 3 砂粒子之 Zeta 電位及氧化還原電位隨 pH 值變化圖

3.2 砂泥浮選結果

本研究利用傳統浮選法及電位浮選法將砂泥中之矽及碳化矽進行分選其分析結果如下表所示(表 2)，由傳統浮選法結果可以得知，精礦的品位為 97.8%，回收率為 18.23，尾礦的品位為 52.77%，回收率為 42.93%。電位浮選法結果可以得知，精礦的品位為 98%，回收率為 80.61，尾礦的品位為 51.86%，回收率為 9.54%。

表 2 浮選結果比較表

分析結果 浮選方法	精礦		尾礦	
	品位(%)	回收率(%)	品位(%)	回收率(%)
傳統浮選法	97.8	18.23	52.77	42.93
電位浮選法	98	80.61	51.86	9.54

3.3 綜合討論

在選礦的過程中，品位及回收率並無法同時滿足，由傳統浮選結果可以得知，如果要提升精礦的品位，則必須降低減少精礦的回收率，因此在進行浮選時，本研究先進行矽粒子及碳化矽粒子 Zeta 電位與氧化還原電位分析實驗。由圖中可以看出(圖 4)，矽與碳化矽的 Zeta 電位絕對值分別是在 pH=10~12 時最大，在 pH=3 ~8 時較小(除等位點之外)，由於 Zeta 電位已經有較大的變化因此形成粒子表面的疏水化，造成了雙電層的縮小，使得 Zeta 電位變大，進而有效造成礦漿的穩定性。在本研究當中，氧化還原電位也是浮選的一個重要參數，由圖中可以看出(圖 5)，矽與碳化矽的氧化還原電位在酸性的環境中為氧化能力強，在鹼性的環境中為還原能力強。在浮選的過程中，藉由觀察矽與碳化矽在礦漿中的氧化還原狀況，可以控制調整劑的使用量，除了可以維持精礦的品位外，更可以提高精礦的回收率，因此可以使碳化矽的回收量增加。

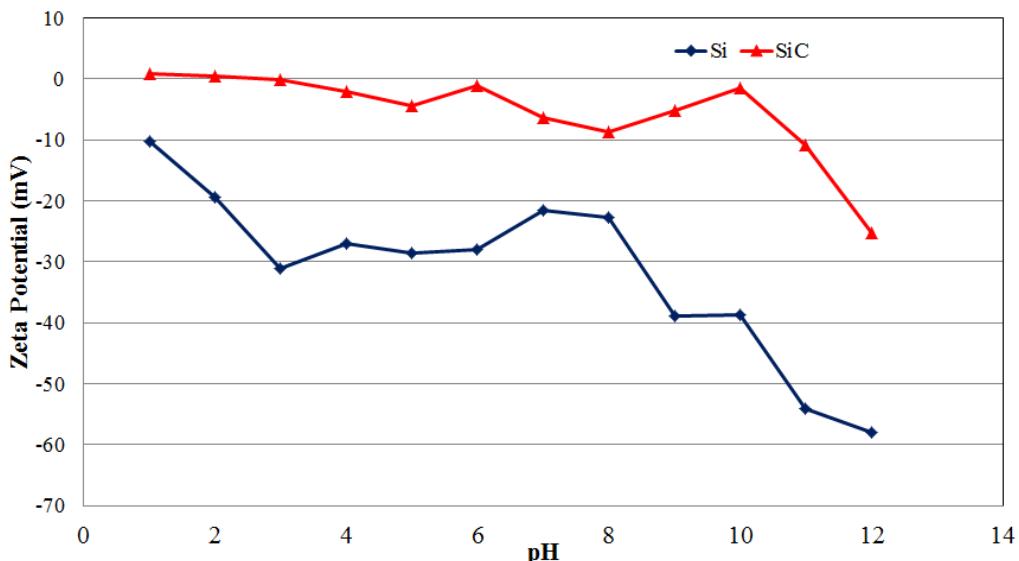


圖 4 Zeta 電位隨 pH 值變化圖

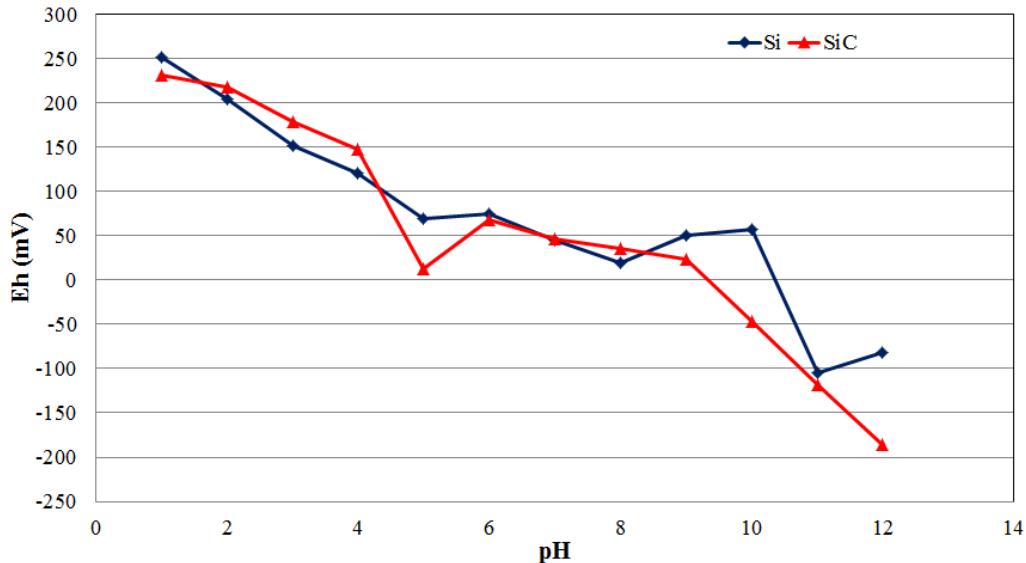


圖 5 氧化還原電位隨 pH 值變化圖

在傳統的浮選法當中，為了提高回收率則必須降低精礦的品位，在謝雅敏^[7]文中，利用沉降法及浮選法的配合，可以先使矽泥的碳化矽含量由 64.34% 提升到 84.92%，然後在經由浮選法可以將精礦的碳化矽含量提升到 99.0%，回收率為 70%。並沒有參考氧化還原電位，雖然比傳統浮選法提升了品位及回收率，但是回收率的結果仍偏低。而本研究中，藉由氧化還原電位的參考，可以更精確的確認金屬矽的在礦漿中變化，因此可以回收礦漿中的更多碳化矽，更能提高回收率。

四、結論

本研究利用浮選法作為矽泥的分選方法，並在浮選的過程當中加入觀察氧化還原電位的變化，來比較傳統浮選法及電位浮選法品位及回收率。經由本研究的結果，其結論如下：

1. 品位的分析結果，傳統浮選法及電位浮選法在尾礦及精礦的品位分析，結果都相近。

24 利用浮選技術分離矽泥之研究

- 2.回收率的分析結果，尾礦的回收率，傳統浮選法的結果約為電位浮選法的 5 倍。在精礦的回收率，電位浮選法的結果約為傳統浮選法的 4.5 倍。
- 3.藉由本研究所使用之電位浮選法，品位的分析結果可以與傳統浮選法相近，但是精礦的回收率較高，因此利用氧化還原電位作為浮選的參數，可以回收礦漿中更多的精礦，更能提高回收率。

參考文獻

1. 行政院環境保護署事業廢棄物申報及管理系統：<http://waste.epa.gov.tw/prog/IndexFrame.asp?Func=2>。
2. Surek, T., Crystal growth and materials research in photovoltaics: progress and challenges, Journal of Crystal Growth , 275:292-304 2005 。
3. 藍崇文、林彥志、王班玉、戴怡德，回收矽泥之方法，專利編號：I347305，2008 。
4. 郭澤煌，單晶矽切割廢液的處理回收方法，專利編號：201226334，2012 。
5. 李文鐘，選礦學，國立編譯館主編，世界書局印行，327，1979 。
6. Junii Shibata, Norihiro Murayama, Kengo, “Flotation separation of SiC from wastes in the silicon wafer slicing process, the Society of Chemical Engineers, 32(1) :93-98,2006.
7. 謝雅敏、吳梅芳、劉萬禮、陳偉聖、張祖恩，廢切削油底泥之物化性質與資源化技術研究，2013 半導體廢料回收及稀有金屬純化精鍊技術研討會論文集，p.97~104，2013 。
8. 羅先平，”難選鉛鋅硫化礦電位調控浮選機理與應用”，冶金工業出版社，156，2010 。

水處理技術

淨水場之實廠操作成果研究

賴逸嵩*

摘要

本研究以大湳淨水場為標的，針對自來水場於功能試車期間所進行之各項試驗成果做一說明，包括：瓶杯試驗、實廠加藥成果、二段式加藥模式、沉澱池出水水質與快濾池操作之關係等。並對水場未來可能面臨之水質標準提高及影響作一說明。

測試結果顯示：瓶杯試驗模擬可以結合實廠操作獲得相當良好之水質；其中沉澱池出水水質穩定，濁度維持在 1.6NTU 以下。二段式加藥模式有別於傳統單段加藥，使出水水質更加穩定並有減少加藥之潛力。良好之沉澱池出水(濁度 \leq 1.6NTU)可減輕快濾池負荷，確保出水品質(濁度 \leq 0.3NTU)；其耗水率均在 2.6% 以下，相對反沖洗之操作成本較低。

【關鍵字】瓶杯試驗、二段式加藥、V 型快濾池

*台汽電集團星能股份有限公司 專業經理(土木技師、環工技師)

一、前　言

大湳淨水場原先既設一二期廠供水量為 300,000CMD，為供應桃園地區主要水廠之一，隨著都市之發展已有供水不足現象。自來水公司大湳淨水場本次擴建新增三期廠 150,000CMD 之規模，並提高出水標準(清水及沉澱池出水)。除了前述較高之出水標準外，與其他自來水公司現有淨水場不同者尚包括：1.設有沉砂池、沉泥池之前處理單元 2.設有二段式加藥機制。以下茲針對大湳三期淨水場在實廠操作成果作一介紹，以供讀者參考。

二、背景資料

2.1 水源水質

大湳淨水場為一地表水處理廠，原水取自桃園大圳及鳶山堰，其中桃園大圳取水量可達 30 萬 CMD，經導水管涵輸送至一期原水抽水站再經 § 2000mm 導水管線重力流至三期原水抽水井；鳶山堰原水經泵浦及尖山中繼加壓站二次加壓，經 § 1500mm 導水管線泵送至本期原水進水井，取水量可達 35 萬 CMD。桃園大圳水源來自石門水庫之後池、鳶山堰水源來自後池堰下游 19 公里以及三峽與鶯歌鎮交界大漢溪之中游上；均屬石門水庫系統。

由於大湳淨水場水源來自地表水，因此水質會受季節、天候、地形及地質之影響；在豐水期大量原水沖刷河床下通常會造成濁度升高現象。由大湳給水廠逐月平均濁度圖如圖 1 顯示：在 6~10 月豐水期時濁度較高，11~5 月枯水期時濁度較低。本計畫功能試車期程（為 102 年 10 月 16 日至 102 年 12 月 14 日）已進入枯水期，進流井原水平均濁度在 6~50NTU 間，如圖 2 所示，pH 在 7.8~8.0 間。

2.2 淨水處理設施

大湳淨水場為一傳統式自來水處理廠，其平面配置圖如圖 3 所示。本淨水處理流程包括：沉砂、沉泥、混凝、膠凝、沉澱及快濾；處理好之水排至場內清水池暫

時貯存，並經各加壓泵浦、各清水壓力管線送至各區配水池，為大桃園區主要之給水廠之一。大湳淨水場採分期擴建方式辦理供水規模之提升，三期擴建工程除了增設 150,000CMD 之淨水處理場外，並新設處理規模為 450,000CMD 之沉砂池及沉泥池前處理單元，以提高淨水場之供水能力。三期處理設施與一二期不同者尚包括快濾池之型式：其中一二期採表面水洗之綠葉式快濾池，三期採氣洗+水洗之 V 型 (Aquazur 型)快濾池。前處理單元之設計資料統計如表 1 所示；各期之設計資料統計如表 2 所示。

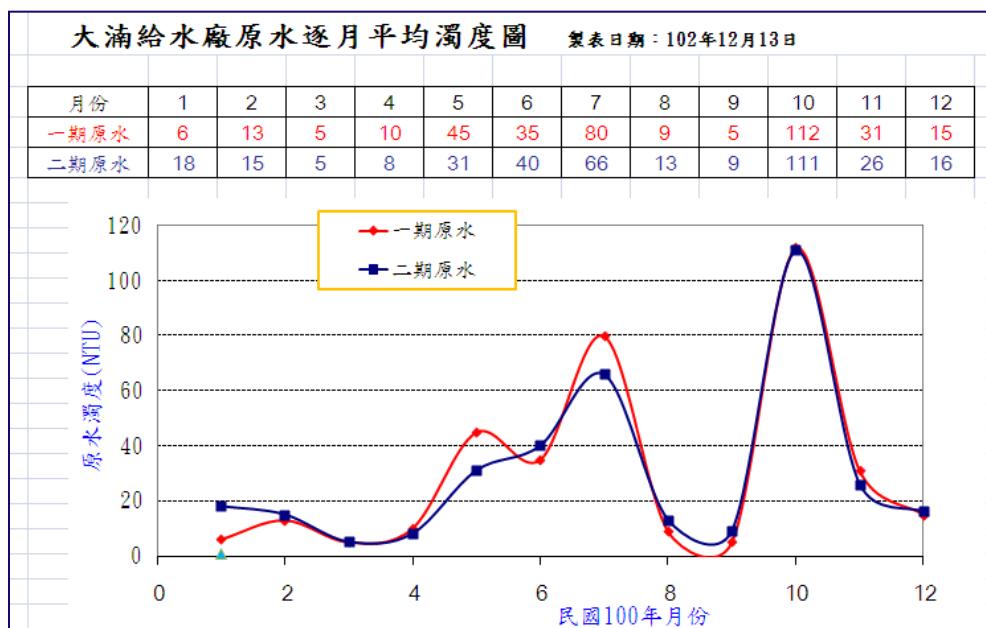


圖 1 大湳給水廠 100 年原水逐月平均濁度圖

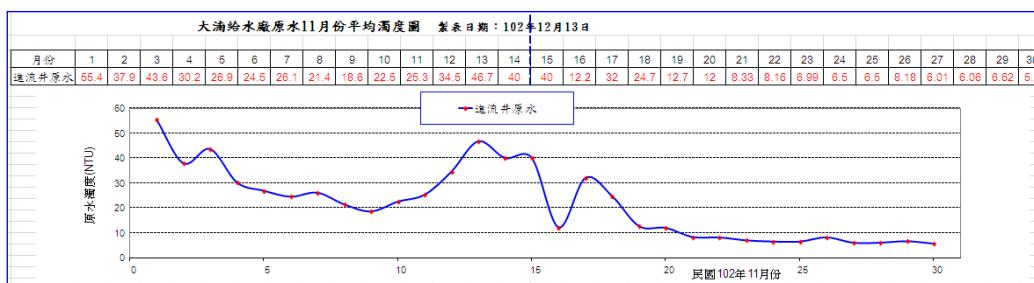


圖 2 大湳給水廠 102 年原水 11 月份平均濁度圖

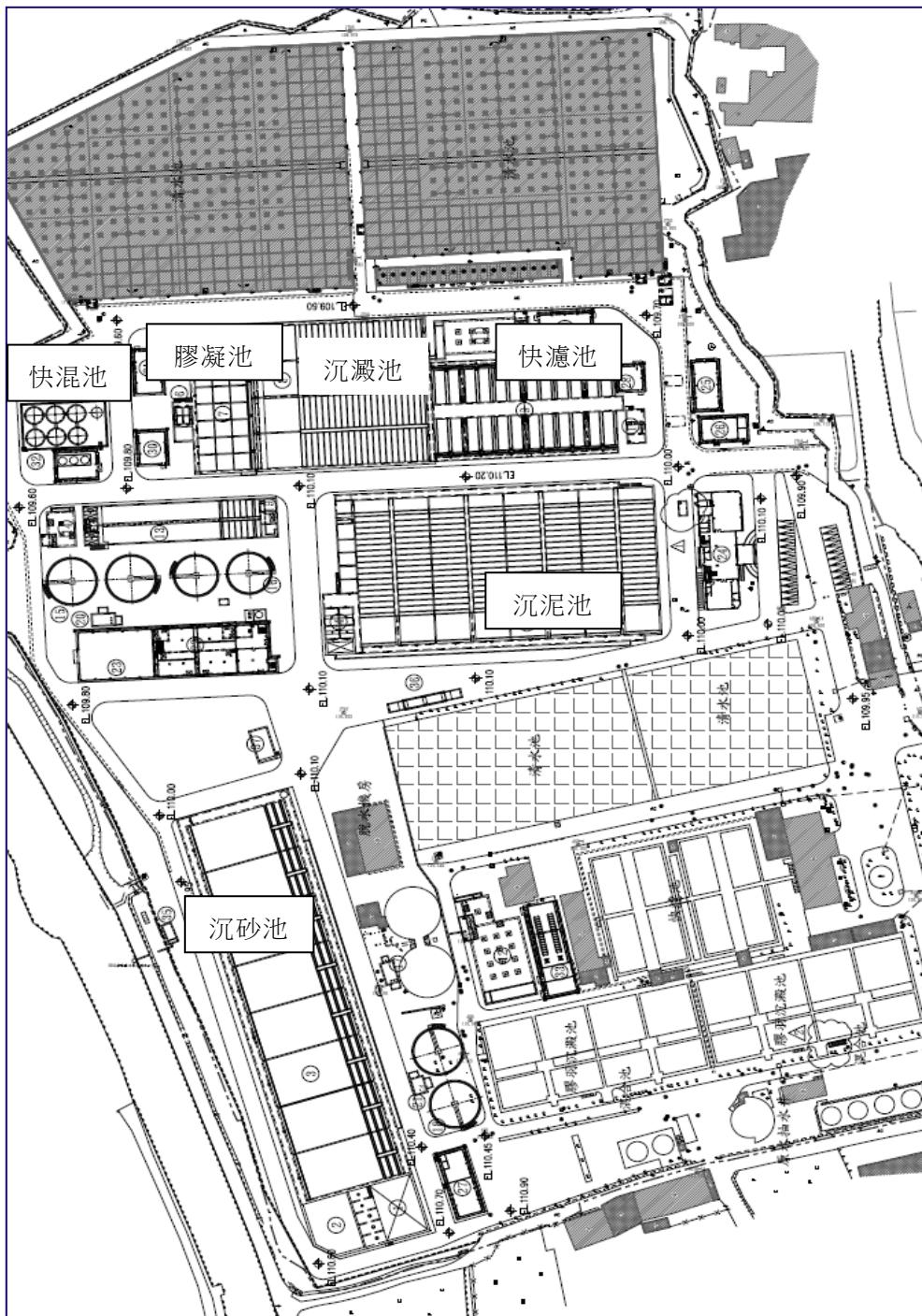


圖 3 大湳淨水場平面配置圖

表 1 大湳淨水場前處理單元設計資料表

單元設備	規格	規格
設計處理量(CMD)	450,000	
沉砂池	池數	8
	每池尺寸	18.2x36.0x6.57(WD)
	水力停留時間(Hr)	1.84
沉泥快混池	池數	2x2 小池
	每小池尺寸	4.8x4.8x5.43(WD)/ 4.8x6.4x5.41(WD)
	G 值(s^{-1})	465/350
	GT	44,650
沉泥池	池數	8
	每池尺寸	12.95x56.2x5.33(WD)
	水力停留時間(Hr)	1.66
	傾斜管面積(M^2)	496
	傾斜管總面積(M^2)	3,968

表 2 大湳淨水場各期設計資料表

各期規格 單元設備	第一期規格	第二期規格	第三期規格
設計處理量(CMD)	150,000	150,000	156,000
快 混 池	池數	1x1 小池	1x1 小池
	每小池尺寸	3.35x3.35x3.10(WD)	3.6x3.35x3.10(WD)
	G 值(s^{-1})	--	625/330
	GT	--	31,890
膠 凝 池	池數	4x3 小池	8x3 小池
	每小池尺寸	4.6x3.53x3.76(WD)	4.6x3.53x3.76(WD)
	G 值(s^{-1})	40/28.6/10.1	55.37/38.28/23.44
	GT	11,073	95,311

表 2 大湳淨水場各期設計資料表(續)

單元設備\各期規格	第一期規格	第二期規格	第三期規格
設計處理量(CMD)	150,000	150,000	156,000
沉澱池	池數	4x3 小池	4x3 小池
	每池尺寸	9.36x21.0x3.50(WD)	9.36x21.0x3.50(WD)
	水力停留時間(Hr)	0.44	0.44
	傾斜管面積(M ²)	103.1	103.1
快濾池	型式	綠葉改良式	綠葉改良式
	池數	8	8
	設計濾率(M/day)	180	180
	濾層	50cm 濾砂+ 25cm 無煙煤	50cm 濾砂+ 25cm 無煙煤
	濾砂有效粒徑(MM)	0.6±0.05	0.6±0.05
	濾砂均勻係數 Cu	<1.5	<1.5
	無煙煤有效粒(MM)	1.0±0.1	1.0±0.1
	無煙煤均勻係數 Cu	<1.7	<1.7

三、混凝膠凝處理

3.1 混凝膠凝處理機制

原水中常含有懸浮固體、膠體微粒、溶解性有機物等雜質，不適於直接飲用；因此在自來水場傳統處理程序會添加以化學藥品，以混凝膠凝機制破壞此些微細顆粒間之穩定性，形成較大膠羽後以固液分離方式將雜質去除。混凝膠凝之處理機制主要包括有 4 種：1.電雙層壓縮(Double Layer Compression)；2.電價中和(Charge Neutralization)；3.架橋或吸附作用(Bridging/Adsorption)；4.沉澱掃曳(Enmeshment；Sweep Coagulation)；在實廠操作混凝膠凝時，通常是由 2 種以上之機制同時發生。

3.2 混凝膠凝模擬

瓶杯試驗(Jar Test)是控制混凝劑加藥量最好之工具，模擬之重點在於與實廠操作條件越接近越好，其中實驗用混凝劑係採目前水場內所使用藥劑-多元氯化鋁 PACL(Poly Aluminum Chloride)經稀釋 100 倍後使用。本計畫於功能試車前及期間依水質特性進行瓶杯試驗；其中水質之混凝、膠凝模擬系依據實廠之設計參數而規畫，茲說明如下：

3.2.1 淨水混凝模擬

混凝(Coagulation)目的在經由加入混凝劑(Coagulant)，以破壞表面帶電荷之膠體顆粒或懸浮固體物之穩定性；快混(Flash Mixing)為其中主要之程序，目的在於提供混凝劑與膠體微粒充分的混合。依 Susumu^[1] p.88，GT=500~1,600 即有很好之混凝成果。依 Zeta Meter Inc.^[2]，速度梯度 G 值 300~1,200 併同水力停留時間 20secs~ 數分鐘可以獲得良好之沉澱掃曳(Sweep Coagulation)效果。

1. 快混池 1 其 $G_1=625\text{ s}^{-1}$ ， $T_1=22.7\text{ sec}$ ， $V=3\times 3\times 2.28\text{ M}$ 。
2. 快混池 2 其 $G_2=330\text{ s}^{-1}$ ， $T_2=53.7\text{ sec}$ ， $V=3\times 3\times 5.40\text{ M}$ 。
3. 設計 $G_{avg}=478$ ， $GxT_{avg}=31,890$ 。
4. 實廠模擬 Jar Test 採 $G=530, T=60\text{secs}, GT=31,800$ at 23°C 。其所對應之杯瓶凝集機轉速為 280rpm 。

3.2.2 淨水膠凝模擬

膠凝(Flocculation)目的在經由緩慢攪拌，增加顆粒間碰撞次數，以形成較大膠羽以利沉澱分離。依 Susumu p.121：速度梯度 G 值呈遞減 70~10，併同水力停留時間 20~40mins 可以獲得良好之膠凝效果。

1. 膠凝池 1 其 $G_1=55.37\text{ s}^{-1}$ ， $T_1=814.07\text{sec}$ ， $V=6\times 6.1\times 5.02\text{M}$ 。
2. 膠凝池 2 其 $G_2=38.28\text{ s}^{-1}$ ， $T_2=814.07\text{sec}$ ， $V=6\times 6.1\times 5.02\text{M}$ 。
3. 膠凝池 3 其 $G_3=23.44\text{ s}^{-1}$ ， $T_3=814.07\text{sec}$ ， $V=6\times 6.1\times 5.02\text{M}$ 。
4. 設計 $G_{avg}=39.03$ ，總水力停留時間=40.7min， $GT=95,311$ 。
5. 實廠模擬 Jar Test 採 $G=53, T=30\text{min}, GT=95,400$ at 23°C 。其所對應之杯瓶凝集機轉速為 57 rpm 。

3.2.3 沉泥混凝模擬

大湳淨水場前處理單元之沉泥池僅設快混池未設膠凝池，屬不完整之混凝膠凝，因此無法準確推估膠凝效果。茲以凝聚試驗機最小轉速作為膠凝 G 值參考值；即杯瓶凝聚機轉速為 10rpm，慢混 20 分鐘。

- 1.沉泥快混池 1 其 $G_1=465\text{ s}^{-1}$ ， $T_1=48\text{sec}$ ， $V=4.8\times4.8\times5.43\text{M}$ 。
- 2.沉泥快混池 2 其 $G_2=350\text{ s}^{-1}$ ， $T_2=63.8\text{sec}$ ， $V=4.8\times6.4\times5.41\text{M}$ 。
- 3.設計 $G_{avg}=408$ ， $GT_{avg}=44,657$ 。
- 4.實廠模擬 Jar Test 採 $G=370$, $T=120\text{secs}$, $GT=44,400$ at 23°C 。其所對應之杯瓶凝聚機轉速為 200 rpm。

3.3.4 最佳混凝劑加藥量

- 1.取試驗原水約 2L(2000ml)置入燒杯中，一共準備六瓶水樣。
 - 2.正常程序：以 H_2SO_4 或 NaOH 調整原水，使水樣 pH 值達前述最適混凝 pH 試驗所得之最佳值。由於淨水場只設補充鹼度折損之 NaOH (原水於 $\text{pH}<7$ 時添加)，加上試車期原水偏鹼性，茲予以省略。
 - 3.以前述試驗所得之初步混凝劑量為中心，各酌量增減些微混凝劑量加入至燒杯內水樣中。
 - 4.沉泥池以瓶杯試驗機 200rpm 快混 2 分鐘，20rpm 慢混 20 分鐘。沉澱池以瓶杯試驗機 280rpm 快混 1 分鐘，57rpm 慢混 30 分鐘。
 - 5.停止瓶杯試驗機靜置 30 分鐘；觀察各燒杯膠羽沉降情形並取樣分析原水上澄液殘留之濁度。沉泥池目標處理水質為濁度 $\leq 10.0\text{NTU}$ 。沉澱池目標處理水質為濁度 $\leq 2.0\text{NTU}$ 。
- 各瓶杯試驗結果代表性加藥成果圖如圖 4~8 所示、高濁度水加藥曲線如圖 9、高濁度水加藥曲線如圖 10 所示：

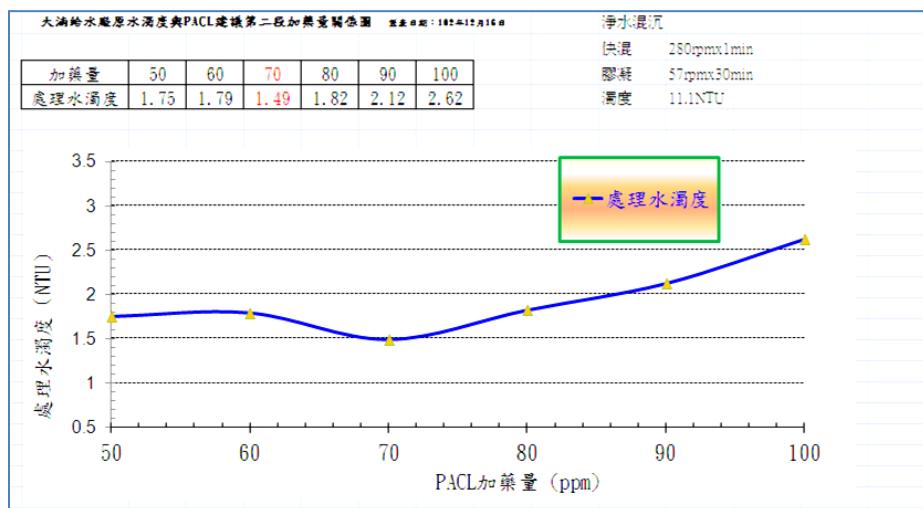


圖 4 大湳給水廠瓶杯試驗結果一

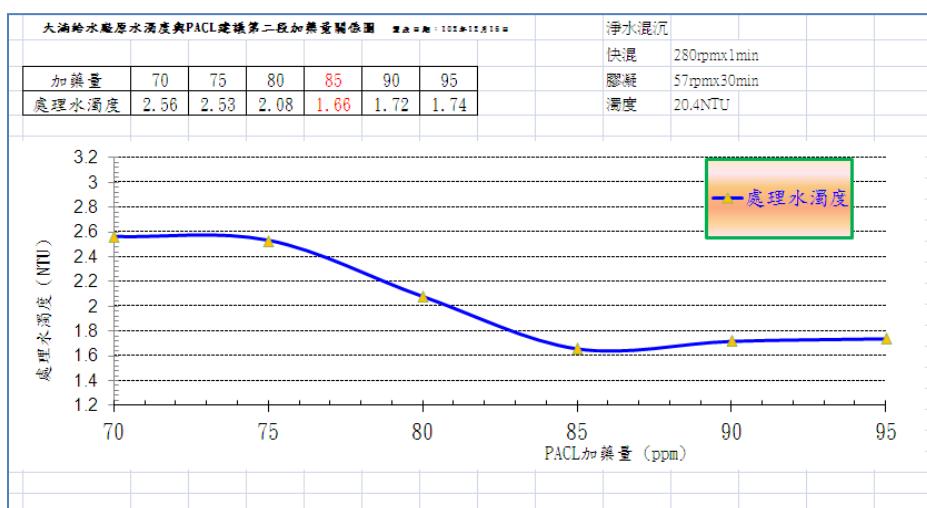


圖 5 大湳給水廠瓶杯試驗結果二

34 淨水場之實廠操作成果研究

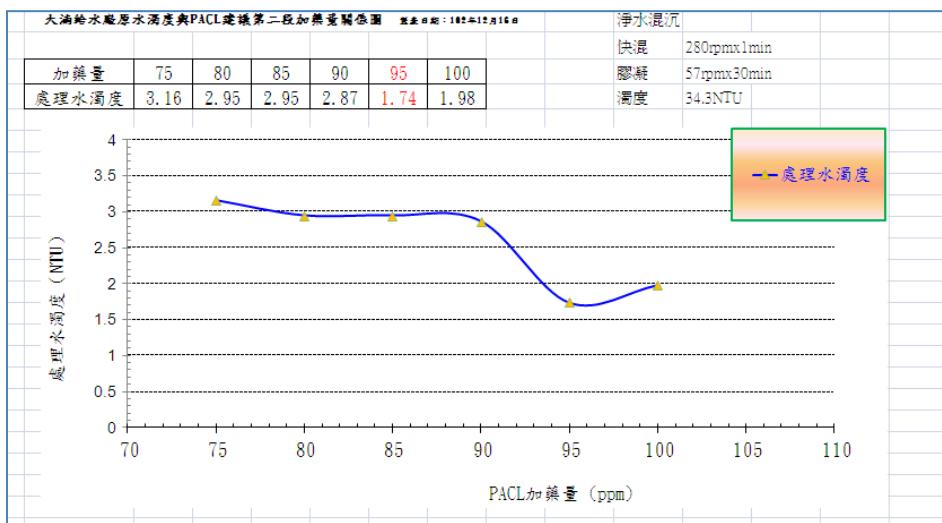


圖 6 大湧給水廠瓶杯試驗結果三

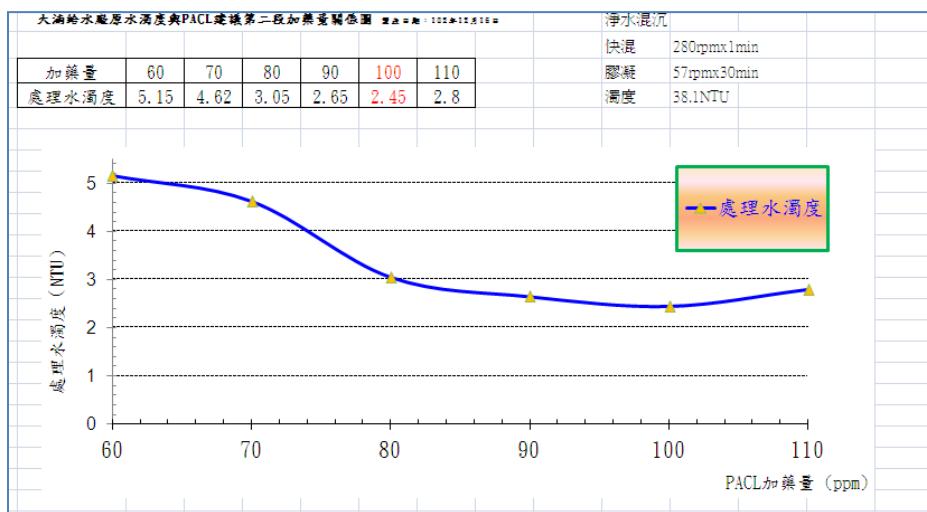


圖 7 大湧給水廠瓶杯試驗結果四

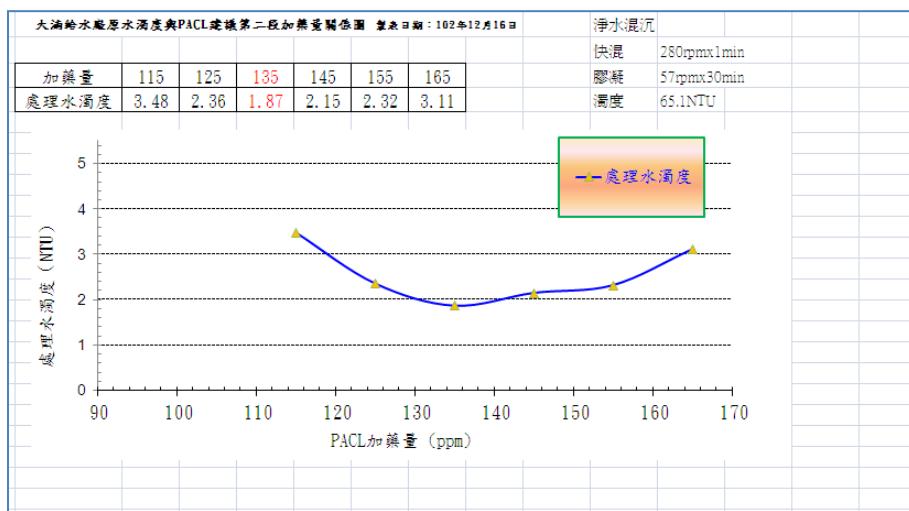


圖 8 大湳給水廠瓶杯試驗結果五

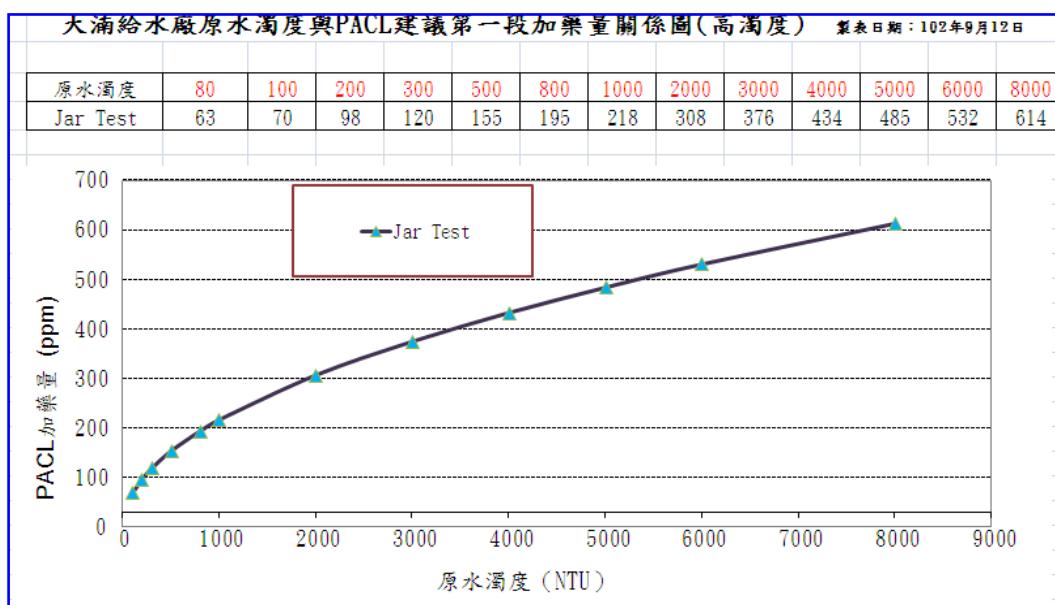


圖 9 大湳給水廠瓶杯試驗高濁度水加藥曲線

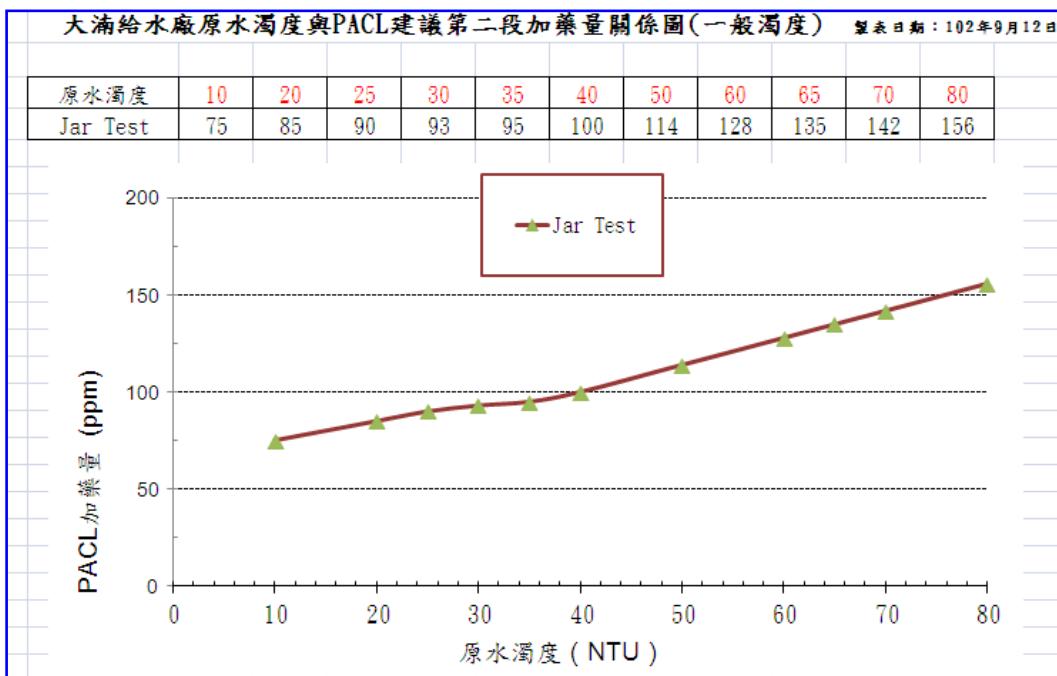


圖 10 大湳給水廠瓶杯試驗低濁度水加藥曲線

3.3 混凝劑加藥量之比較

在進行瓶杯試驗階段曾以淨水場一二期之加藥率進行測試：分別以 15、20、25、50、60、70mg/L 之加藥量進行試驗，發現低濁水採較低之加藥率處理效果並非十分好；加藥量 15~25mg/L 時上澄液濁度仍在 2.78~4.66NTU 間，加藥結果如圖 11 所示。試車期間檢測一二期實廠操作成果，發現原水濁度 10NTU 左右時沉澱池出水在 3.32~5.92NTU 間，同樣有濁度偏高現象，其結果如表 3 所示。

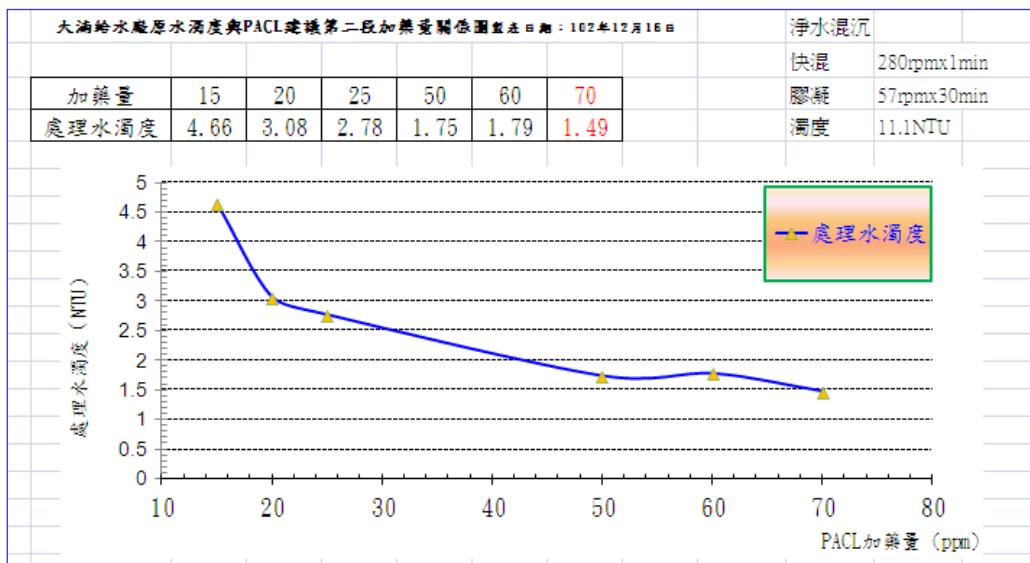


圖 11 大湳給水廠瓶杯試驗結果六

表 3 大湳給水廠一二期處理水質表

項目 日期	原水濁度(NTU)	一期沉澱池出水濁度(NTU)	二期沉澱池出水濁度(NTU)	一期快濾池出水濁度(NTU)	二期快濾池出水濁度(NTU)	PACL加藥率(mg/L)
1021125	10.3	4.32	3.32	0.14	0.29	14.4
1021126	13.9	4.06	6.99	0.07	0.27	16.6
1021127	10.2	5.92	5.90	0.10	0.25	15.0
1021128	8.51	1.35	3.64	0.13	0.18	11.1
1021129	10.7	4.76	5.14	0.07	0.23	14.7
1021203	10.5	5.83	3.89	0.07	0.23	15.1

3.4 二段式加藥之研究

大湳淨水場之二段式加藥模式係分別於沉泥池進水井、混凝池進水井處設加藥管線加藥，經混凝、膠凝後分別於沉泥池及沉澱池進行固液分離。是否啟動沉泥池之第一段加藥取決於原水之濁度：當原水濁度屬高濁度(≥ 80 NTU)，採二段式加藥；當原水濁度屬低濁度(< 80 NTU)，採單段式加藥。

本模式與目前國內外學者採二階段混凝(Two Stage Coagulation)^[7]、多階段混凝之加藥模式不同；該研究係在各階段之快混池設加藥管線，將總加藥量分不同比例分別加入各快混池。

以大湳淨水場之水質而言係考慮：高濁度水經由沉泥池前處理單元之第一段混凝劑加藥處理，以去除可經由電價中和形成較大膠羽之懸浮物質。經第一段加藥處理後之水濁度約為 10~20NTU，再進入混凝、膠凝、沉澱程序以進行第二段混凝劑加藥處理，以經由沉澱掃曳作用去除膠體微粒，其處理水濁度為低於 2NTU。如此二段式加藥提供一更加穩定之水質處理環境，以及具備更大處理範圍(更高濁度)之優點。此外在試車期間由瓶杯試驗成果顯示：二段式加藥模式之加藥量有較單段式加藥模式為低 45~72mg/L 之現象，其結果如表 4 所示。

表 4 大湳給水廠二段式加藥量比較表

項目 原水濁度	沉泥池第一段加藥 (mg/L)	沉澱池第二段加藥 (mg/L)	總加藥量 (mg/L)
360NTU	0	255	255
	130	75	205
435NTU	0	270	270
	145	75	220
525NTU	0	295	295
	159	75	234
715NTU	0	330	330
	183	75	258

3.5 實廠加藥之特性

本計畫所進行之瓶杯試驗雖然係於可控制條件之實驗室所辦理，較之實廠有較理想之環境；惟沉泥池及沉澱池均設有傾斜管具備巨大之比表面積，對於細小之膠體微粒可進一步去除，因此實際加藥量通常會較瓶杯試驗為低。實廠操作修正之加藥曲線如圖 12 及 13 所示。

由於實廠水質水量是呈現動態變化，瞬間測出結果僅能代表其趨勢，因此加藥量之反應宜考慮平均值。再者加藥至反應完成有時間之落差，亦即從混凝膠凝至離

開沉澱池會有數小時之延遲；在水質變化大時，加藥調整必須等待些許時間才能出現效果，此些要點均是在實廠操作應有之認知。

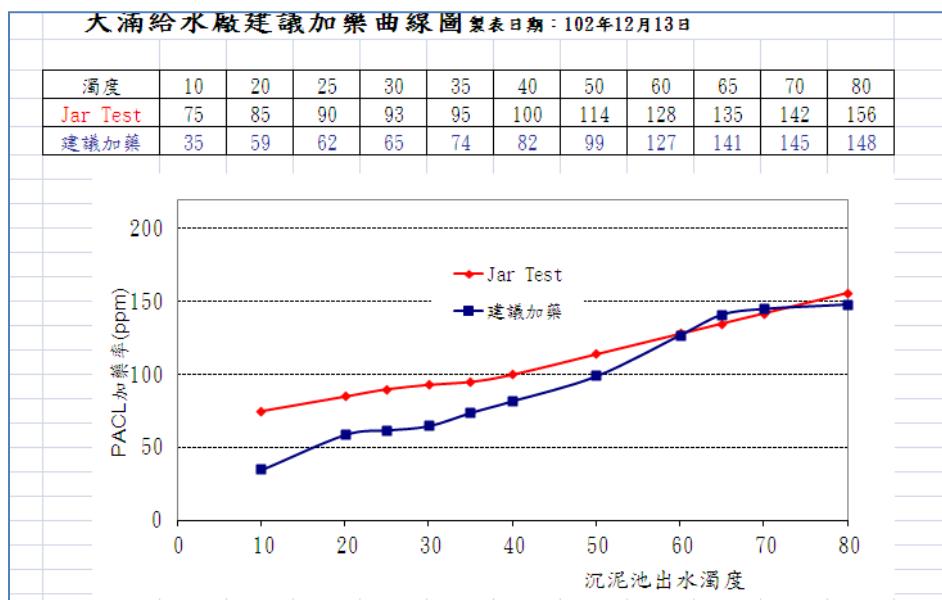


圖 12 低濁水建議加藥曲線

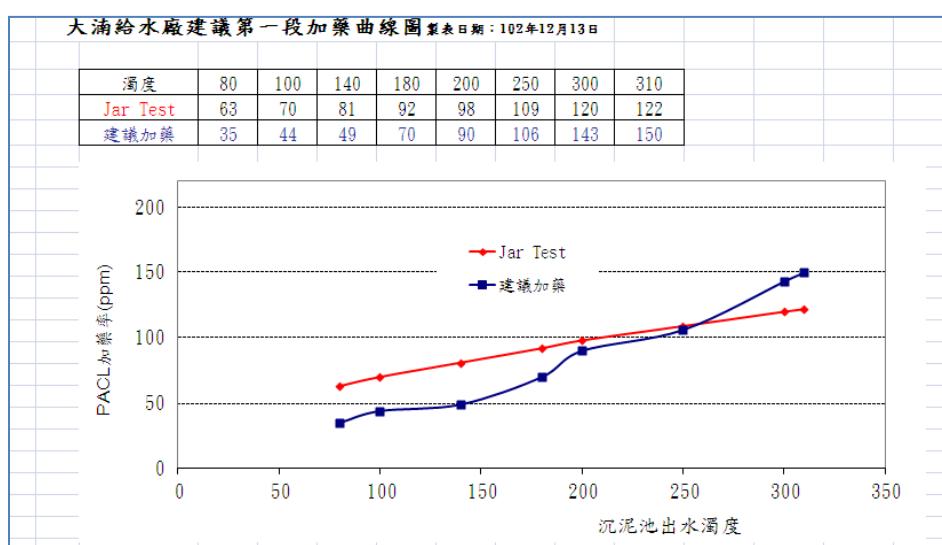


圖 13 高濁水建議加藥曲線

四、過濾處理

4.1 過濾處理機制

經沉澱處理後之水因仍帶有細微膠體微粒雜質，通常須經過濾之程序以達飲用水標準。過濾之處理機制主要包括有 6 種：1.攔除(Straining)；2.慣性衝擊(Inertia Impaction)；3.吸附作用(Adsorption)；4.重力沉降(Sedimentation)；5.吸收作用(Absorption)；6.生物作用(Biological Action)；在實廠操作時與混凝膠凝相似，通常是由二種以上之過濾機制同時發生。

隨著過濾之進行雜質不斷累積在濾床間隙，造成過濾水頭之損失；當累積達到臨界點時雜質會穿出(Break Through)，造成過濾水質的劣化。為使濾床恢復原有之過濾功能，必須以過濾水或空氣反向沖洗濾床(Back Wash)；因此正常操作快濾池須注意其臨界點並事先進行濾床之清洗。

4.2 實廠過濾成果

大湳三期淨水場設有 12 池單層濾料快濾池，為具備氣洗、氣洗+水洗及水洗功能之 V 型快濾池。本單元控制反洗之機制包括有濾程(Filter Run)及水頭損失(壓差)：PLC 根據濾池的優先秩序，組成一個等待反沖洗之濾床組。每次反洗只進行一池濾床之清洗，不允許兩個濾池同時進行反洗；當一床濾池正在反洗時，其它濾池請求反沖洗的信號則存入 PLC 中，然後再按儲存秩序，對濾池依序進行反洗。

由實廠操作心得：當沉澱池出水之濁度越低，相對進入快濾池之固體負載會較低；由於沉澱池出水水質良好，通常反沖洗時機係由濾程控制。就反沖洗機制而言，適當提高氣洗+水洗(至少 5 分鐘)操作時間，可提高濾床之清潔度。

三期快濾池設計濾率為 110M/day，因此配合較佳之沉澱池出水水質可以適度提高其濾率。由實廠操作成果顯示：配合沉澱池處理水在濁度 1.6NTU 以下，快濾池出水濾率在 164M/day 以下均能獲得濁度 0.3NTU 以下之水質。由於實廠出水量需配合水廠之調度需求，無法如同實驗室有完整控制條件；由濾率與出水濁度之成果探討其相關性似乎不大，如圖 14 所示。試車期間沉澱池出水與快濾池出水之濁度關係圖，如圖 15、16 所示；其中沉澱池出水濁度在 0.46~1.85NTU 間、快濾池出水濁度在 0.05~0.33NTU 間。

4.3 快濾池反洗廢水量之比較

快濾池反洗廢水量與進流水濁度、濾床乾淨度、過濾水標準、反洗之流體種類有密切關係。本研究暫以沉澱池出水濁度作為觀察指標：發現三期快濾池因進流之處理水濁度低，相對濾床反洗頻率低；耗水率低約為 1.53~2.58%且耗水率與處理水量成正比傾向。一二期快濾池因進流之處理水濁度較高(詳表 3-1)，相對濾床反洗頻率高；亦即耗水率高，約為 5.07~6.04%，其結果如表 5 所示。由於耗水率高相對反沖洗泵浦之操作頻率高，代表耗電量亦會較高。

表 5 大湳給水廠各期耗水率比較表

項目 日期	沉泥池至 一期之流 量(CMD)	沉泥池至 二期之流 量(CMD)	沉泥池至 三期之流 量(CMD)	一二期廢 水處理量 (CMD)	一二期 耗水率 (%)	三期廢 水處理 量(CMD)	三期 耗水率 (%)
1021125	51,112	52,103	239,023	6,235	6.04	5,544	2.32
1021126	51,292	52,082	239,979	5,604	5.42	6,184	2.58
1021127	104,685	50,994	170,535	9,227	5.93	3,645	2.14
1021128	90,934	92,095	179,865	9,282	5.07	2,893	1.61
1021129	95,351	95,367	177,402	9,707	5.09	2,775	1.56
1021130	89,797	90,441	179,193	9,559	5.30	2,740	1.53

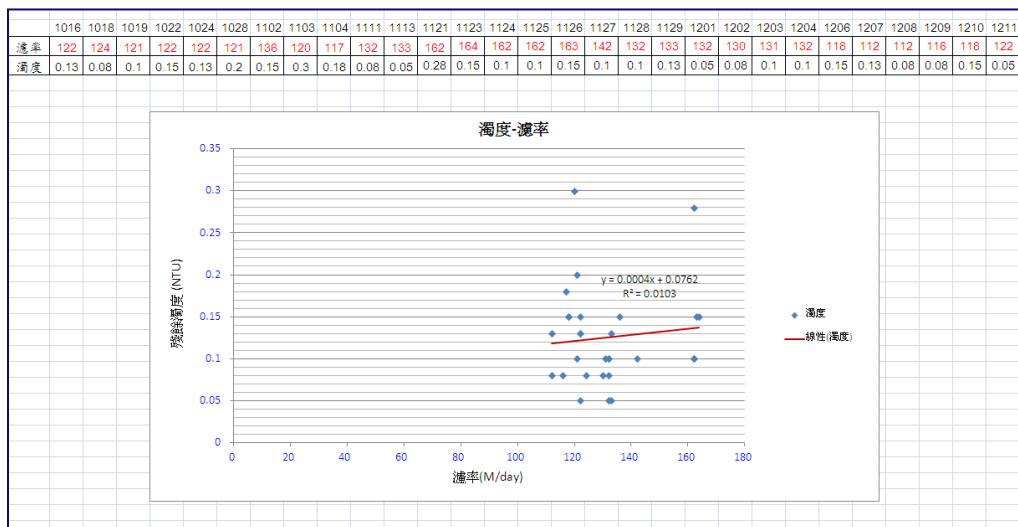


圖 14 快濾池出水濁度與濾率關係圖

42 淨水場之實廠操作成果研究

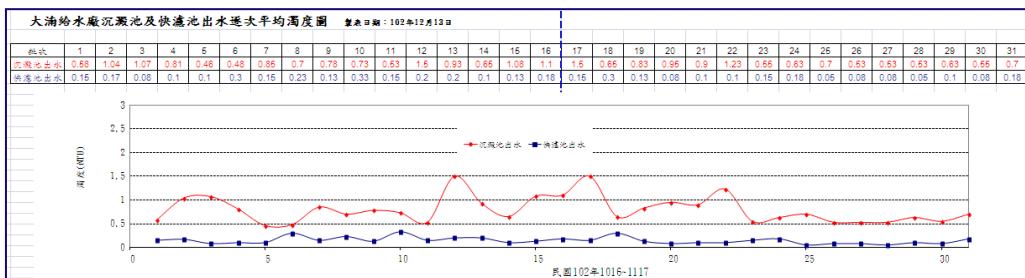


圖 15 大湳給水廠 102 年 10~12 月沉澱池及快濾池出水濁度圖一

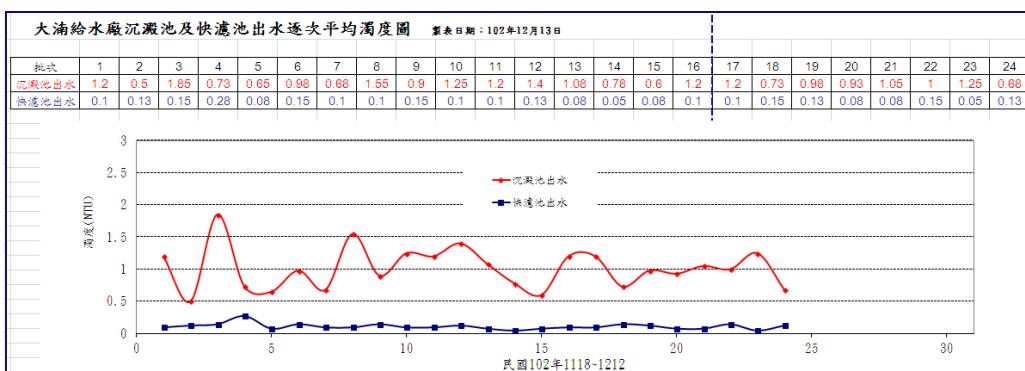


圖 16 大湳給水廠 102 年 10~12 月份沉澱池及快濾池出水濁度圖二

五、處理水質標準之未來趨勢

5.1 淨水低濁度之需求

由各種研究顯示：飲用水中若受隱孢子蟲(Cryptosporidium)、梨型蟲(Giardia)等致病菌污染，感染後會造成輕度的到嚴重的腹瀉、失水、腹絞痛及輕微的發燒症狀。原水中若存在前述致病菌，因其具備抗氯性高特性，只依靠傳統加氯程序並無法完全去除；亦即過濾水所殘存濁度與致病菌之數量有呈正比之傾向。美國 EPA^[4]指出濁度可提供病菌作為食物及屏障之來源；這些濁度未去除可能促使病菌在配水系統再次之滋生，嚴重時會造成水媒疾病(waterborne disease)之漫延。

本計畫規定：沉澱池出水濁度 $\leq 4.0\text{ NTU}$ 及清水正常出水量時濁度 $\leq 0.5\text{ NTU}$ ，

最大出水量時濁度 $\leq 1.0\text{NTU}$ ；即為提高飲用水標準之開端。

台北市自來水事業處自民國 96 年起即內部規定：快濾池過濾水在 95% 之頻率下必須滿足濁度 $< 0.2\text{NTU}$ 、單一過濾池任意時刻過濾水必須滿足濁度 $< 0.3\text{NTU}$ ；並且沉澱池出水在 95% 之頻率下必須滿足濁度 $< 2.0\text{NTU}$ 。

美國 EPA 對地表水自來水廠之要求包括：1. 快濾池出水濁度每個月統計其小於或等於 0.3NTU 之樣本數至少為總樣本數之 95%。2. 快濾池出水濁度任一時間不得大於 1NTU。美國 EPA^[4]也對快濾池出水濁度與致病菌去除率關係進行研究，顯示：快濾池出水濁度控制在 0.3NTU 以下有很好之病菌去除效果。

在健康意識抬頭下，民眾對於飲用水之要求標準會越來越高。因此預期未來清水水質之濁度要求會更加嚴苛。大湳淨水場三期廠在功能試車階段已證明：沉澱池出水濁度控制在 1.6NTU 以下、經快濾池過濾(濾率在 164M/day 以下)後，其濁度可滿足 0.3NTU 以下之標準。

5.2 淨水總鋁之考量

目前國內之飲用水標準並未納入總鋁，惟在國人對健康意識之殷切期盼以及與世界接軌之潮流促使飲用標準有提高之必要。環保署已於日前公告「預告修正飲用水標準第三條草案」：其中第三款化學性標準第三目為「影響適飲性、感觀物質」，並於其下增列「鋁」於第十二次目，標準為 0.2 毫克／公升，自一百零四年七月一日施行。

由於鋁為自然存在於土壤及岩石之金屬，為構成地表之主要成分之一；當來自地表水之水源，其通過路線有鋁金屬之成分存在時，其水質總鋁含量可能就較高。由文獻回顧：總鋁係由溶解性鋁(dissolved aluminum)及顆粒性鋁(particulate aluminum)所構成，PACL 之加藥量與顆粒性鋁含量有成正比之傾向，而顆粒性鋁又容易於過濾階段大部分去除^[8]。此外，飲用水中殘餘鋁含量與清水之 pH 值、濁度等參數相關。國外研究^[6]顯示：清水之濁度控制在 0.15NTU 以下，殘餘鋁含量可達 0.1mg/l 以下。高鹼度水加少量混凝劑($\text{pH} > 8$)或低鹼度水加超量混凝劑($\text{pH} < 6$)均可能提高殘餘鋁含量。

為比對 PACL 加藥量對總鋁之影響，於試車期間 1021001 曾檢測沉澱水之濁度為 1.8NTU、過濾水之濁度為 0.2NTU、過濾水總鋁含量為 0.016mg/l，為低於標準值；間接證明快濾池效率之提高可同時大部分去除顆粒性鋁。但由於測試樣本太少，且採簡易檢驗方法；實廠加藥與殘餘總鋁之課題仍有待吾人進一步研究。目前只能推論：在原水總鋁含量不高之條件下，配合良好操作之過濾程序，通常殘餘總鋁含量均能較低。

六、結論與建議

1. 隨著國人對健康意識之重視，飲用水標準逐漸提高已為一必然趨勢；其中濁度為衡量水質優劣之一重要指標。由於過高之沉澱池出水濁度容易造成濾床之阻塞，可能造成快濾池出水品質不佳、濾程縮短、反沖洗廢水量增加等問題；因此配合飲用水標準之提高，淨水場也應同時會要求降低沉澱池出水之濁度。由實廠操作經驗顯示：適當控制加藥量，沉澱池出水可滿足濁度 $\leq 1.6\text{NTU}$ ，相對而言可確保過濾水出水濁度 $\leq 0.3\text{NTU}$ 。
2. 淨水場採二段式加藥之模式由實廠測試成果顯示為一可靠之處理程序：具備水質穩定、加藥量較單段為低、可有效處理高濁度水之優點。大湳淨水場原設定為當原水濁度高於 80NTU 時啟動二段式加藥；由本場枯水期時低濁水期長之特性，未來可考慮當原水濁度高於 30NTU 時啟動二段式加藥，並由實廠操作成果驗證其可靠度。
3. 隨著快濾池效率之提高，顆粒性鋁亦可同時大部分去除，相對而言快濾池出水之總鋁含量亦能同時降低。然而鋁元素普遍存於地表，對於地表水水源之含鋁量並不易估算；因此為因應水質標準對總鋁之要求，建議增加總鋁含量之檢測，以掌握並適時調整操作參數；而實廠加藥與殘餘總鋁之關係仍有待進一步研究。

參考文獻

- 1.Susumu Kawamura , Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities 2nd ed. , 2000.
- 2.Louis Ravina、Nicholas Moramarc ,Coagulation & Flocculation- Zeta-Meter, Inc.-forth ed. , 1993.
- 3.David J. Pernitsky , Coagulation 101 , 2003.
- 4.US EPA , Guidance Manual for Compliance with the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule:Turbidity Provisions ,1999.
- 5.US EPA , Water Treatment Manuals-Filtration,1995.
- 6.P T Srinivasan 、T Viraraghavan 、 K S Subramanian , Aluminum in Drinking Water: An Overview,1999.
- 7.鄭雅伶，階段式加藥混凝-膠凝程序處理自來水之研究，2005。
- 8.陳金花、鄭秀娥、歐麗苓，如何降低坪頂淨水場鋁含量探討，2011。

本期專題：用水合理化與再生技術

專題編輯委員

康世芳

學歷

日本東北大學土木工程研究所工學博士

經歷

工業技術研究院化學工業研究所 工程師
淡江大學水資源及環境工程學系 副教授
淡江大學水資源及環境工程學系 教授
臺北市臺北翡翠水庫管理局 局長

現任

淡江大學水資源及環境工程學系 教授

周明顯

學歷

國立台灣大學化工博士

經歷

中國石油公司煉製研究所 研究員
國立中山大學環境工程研究所 副教授
國立中山大學總務處環保組兼組長
國立中山大學環境工程研究所 教授
國立中山大學環境工程研究所 所長

現任

國立中山大學環境工程研究所 教授

專題介紹

水資源匱乏已是全球性的問題，台灣雖雨量豐沛，但由於地形關係不易貯留、降雨豐枯不均及水庫淤積等，導致工業用水所需之供水量日益見拙。所以用水合理化及水再生利用之發展，有助於穩定產業水資源之供應，並達水資源永續利用之目標。

本期專題邀請游勝傑教授，提供水利署近年推動我國廢污水再生利用現況。莊順興教授介紹國外水再生利用案例，分析我國推動水再生利用的關鍵議題。艾易康公司黃抒毓介紹近年執行工業局產業用水之經驗與案例。水之源企業周珊瑚副董事長，說明電透析技術應用在工業用水及廢水回收案例。日月光半導體林國盛副處長分享封測產業之用水管理及回收實務經驗。此外，楊金鐘教授分析與探討自來水之危害因子。

上述 6 篇文章，係針對產業用水及回收再生技術，邀請學者與實務專家撰寫相關政策與解決方案，藉以拋磚引玉，期能引起研究之風潮，提供國內節水及水回收技術之參考。專題作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

我國廢污水再生利用推動現況

楊偉甫^{*}、李永平^{**}、阮香蘭^{***}、劉尚儒^{****}、於維芬^{*****}、游勝傑^{*****}

摘要

水資源乃為民眾日常生活及農工商業發展之重要基礎，台灣雖四面環海、位於多雨且潮濕之亞熱帶季風氣候區，年降雨量高達世界平均值之 2.6 倍，然受地理環境限制，水資源貯留不易，平均每人每年可分配之水量僅約世界平均值之七分之一，名列全球缺水國之一，故而水資源之有效運用及新興水資源之開發，乃為解決國內水資源問題之重要議題。我國現階段水資源政策，乃以水資源多元化供應、環境保護為前提，尤大型水利設施難通過環評審查，使新興水資源之開發成為未來達成穩定供水之重要一環。新興水資源中，因廢、污水之再生利用具水源水質水量穩定、不受天候影響等優勢，已然成為優先發展之項目，經濟部水利署更為此規劃一系列之調查研究及規劃計畫，以地理氣候、人口密度、產業型態及都市經濟發展等做為缺水區域劃分之依據，並以此為推動使用再生水之優先順序，同時藉由都市污水廠放流水供工業使用、工業區綜合廢水廠放流水供工業使用、工業大戶自設再生水廠及民生大戶環評承諾事項追蹤等策略之推動，以達成「把一滴水變成兩滴水」之理想。現已知全臺再生水使用量約 25 萬餘噸/日，未來亦將藉專法之訂立、水價合理化、用水計畫書管理及再生水廠之完工等方式，努力達成「民國 120 年供應再生水 120 萬 CMD，佔公共給水量之 10%」之目標，建立國內水資源永續利用之環境。

50 我國廢污水再生利用推動現況

【關鍵字】再生水、水回收、廢污水回收

*經濟部水利署 署長

**經濟部水利署綜合企劃組 組長

***經濟部水利署綜合企劃組 科長

****經濟部水利署綜合企劃組 正工程司

*****臺灣水環境再生協會 會員、中原大學生物環境工程學系 專任助理

*****臺灣水環境再生協會 秘書長、中原大學生物環境工程學系 教授

一、台灣水資源現況

台灣四面環海，位於多雨且潮濕之亞熱帶季風氣候區，每年受颱風及梅雨季影響，年降雨量約為世界平均值之 2.6 倍；然受地形與地質條件之限制，中央山脈南北縱走、東西向河川分別注入太平洋及台灣海峽，河川坡陡流急，降雨之後地表逕流迅速流入海洋，甚難儲存，水庫等大型水利設施雖多，然因河谷狹窄，總容量相對較小，加上蒸發散損失、地表入滲等因素，致使可運用之水量僅約 143 億立方公尺/年(約為年平均降雨量之 16%)，每人每年得分配之雨量更僅約世界平均值之七分之一，於全球百餘國家中排名偏後，名列全球缺水國之一，屬高度缺水之地區，近年更因氣候變遷、全球暖化，使國內「春旱」現象常態化，如何有效運用水資源，已然成為穩定國家社會發展之重要課題。

國內水資源之供應，主要仰賴水庫、攔河堰及越域引水…等大型水利設施，然該些大型水利設施之開發及建設所需工程浩大，且須付出龐大之環境代價，多已延宕或取消；又 921 地震影響，國內山區地質更為脆弱，受颱風豪雨之沖刷，使既有水利設施淤積嚴重(統計全台 96 座水庫原設計總容量約 28.5 億立方公尺，至民國 100 年底總容量已減至 20.5 億立方公尺)，影響國內水資源之供應與調配甚鉅，另地下水超量使用、水源污染等，亦使國內水資源情勢更加緊張。

據經濟部水利署 97 年研究調查報告顯示，台灣地區各期程需水總量(含非水利會及非台糖農場灌區用水)，在未實施擴大節水措施之情況下，估計未來 20 年之需水量將持續上升，至 120 年時需水量將達每年 228.65 億立方公尺，若實施擴大節水措施，則 120 年時需水量約近 216.28 億立方公尺^[1]；又 98 年報告^[2]亦統計國內各地區用水資料，並推估至 120 年間各區之用水缺口量表，顯示基隆、桃園、新竹、苗栗、台中、彰化、雲林、嘉義、台南、高雄、屏東、花蓮等 12 個地區均有其用水缺口，並點出現階段缺水量以中、南部縣市為大宗(約 190,000-340,000 CMD)(表 1)，北部及東部地區，則受氣候條件、人口密度、產業型態及都市經濟發展程度等因素影響，暫非屬缺水之地區。雖各項研究報告統計數字不一，但均反映出我國水資源之供應將出現缺口，又中、南部地區為我國工業重鎮，鋼鐵、半導體…等大用水產業多聚集於該些地區，若無法解決水資源匱乏之窘況，將對國內產業及

52 我國廢污水再生利用推動現況

經濟發展造成重大影響。

表 1 民國 120 年前各區域用水缺口彙整表^[2]

區域 (縣市)		年份	98 年	100 年	105 年	110 年	115 年	120 年
北部區域	基隆市	25,000	—	—	—	2,000	12,000	
	桃園縣	185,000	277,000	—	—	5,000	39,000	
	新竹縣、市	—	37,000	50,000	70,000	84,000	96,000	
小計		210,000	314,000	50,000	70,000	91,000	147,000	
中部區域	苗栗縣	61,000	24,000	63,000	14,000	20,000	25,000	
	台中縣、市	—	55,000	50,000	124,000	214,000	259,000	
	彰化縣	—	41,000	222,000	—	—	—	
	雲林縣	145,000	220,000	50,000	119,000	164,000	169,000	
小計		206,000	340,000	385,000	257,000	398,000	453,000	
南部區域	嘉義縣、市	—	—	40,000	—	—	—	
	台南縣、市	—	23,000	—	—	—	—	
	高雄縣、市	206,000	175,000	44,000	—	—	—	
	屏東縣	—	—	5,000	20,000	—	—	
小計		206,000	198,000	49,000	20,000	—	—	
東部區域	花蓮縣	—	—	5,000	9,000	—	—	
小計		—	—	5,000	9,000	—	—	
總計		622,000	852,000	489,000	356,000	489,000	600,000	

單位：CMD

為免水資源不足成為國內經濟與民生發展之瓶頸，我國政府已 95 年核定「新世紀水資源政策綱領」，並於 98 年將抗旱行動提升至國安層級，除持續延長既有水庫之壽命外，「如何把一滴水變成兩滴水」及新興水資源之開發，已然成為現今水資源開發及運用之重點，為此，經濟部水利署始執行廢、污水再生利用之相關研究調查及規劃計畫，包含水再生利用產業發展科技計畫(96-100 年)及水再生利用風險管控技術研發計畫(101-105 年)，並積極推動再生水資源發展條例之立法，期藉提升產業用水效率及技術輔導、廢污水再生利用模廠驗證、風險調查與評估、水處

理技術之研發與提升、教育推廣…等，得使廢污水經再生後得成為國內水資源供應之生力軍，舒緩國內水資源緊張之情勢。

二、再生水之定義

由水利署現行提出之「再生水資源發展條例」(草案)條文中所述「再生水係指以污水、廢水或污(廢)水處理後之放流水為水源，經在處理產生之水」，得循環水量及回用水量但凡經淨化處理程序，即可稱之為再生水；現階段再生水使用量之調查，乃透過水再生利用技術服務團，利用問卷及現場訪查與追蹤調查之方式，統計國內工業及民生用水大戶之再生水使用量，其再生水使用量統計原則為以「經水處理設施後再使用」之水量為主，於工廠內之廢水回收再利用部分，考量雨水及空調冷凝水，因水質尚屬潔淨，僅需簡易處理即可再利用，與「再生」之意義相去甚遠，且冷卻用水系統及廢氣洗滌系統因循環利用水量極大，如若列入再生水之範疇，恐過度膨脹再生水使用量，故雨水、空調冷凝水、冷卻系統循環水及廢氣洗滌系統循環水均暫不納入現行統計再生水使用量時之「再生水」中(圖 1)，另循環水量、回用水量及重複利用水量之定義於此亦有所調整，詳說明如下^[3]：

1. 循環水量

一定期間內，不論有沒有經過處理，於特定一個用途單元(系統)中循環之水量，如工業間接冷卻用水系統、local scrubber 系統與 central scrubber 中大量的水被循環利用，或是純水系統濃排水再利用做為純水系統進水。

2. 回用水量

被用過的水不論有沒有經過處理，再用於其他用水單元的水量，一般是屬於跨用途單元水的再利用，如製程排水再利用做為純水系統進水或次級用水、各類廢水回收再利用等灰水資源自利用，以及如雨水、空調冷卻水回收等綠水資源再利用。

3. 重複利用水量

經過處理或未經過處理繼續在工廠中使用的水量，包含循環水量與回用水量。

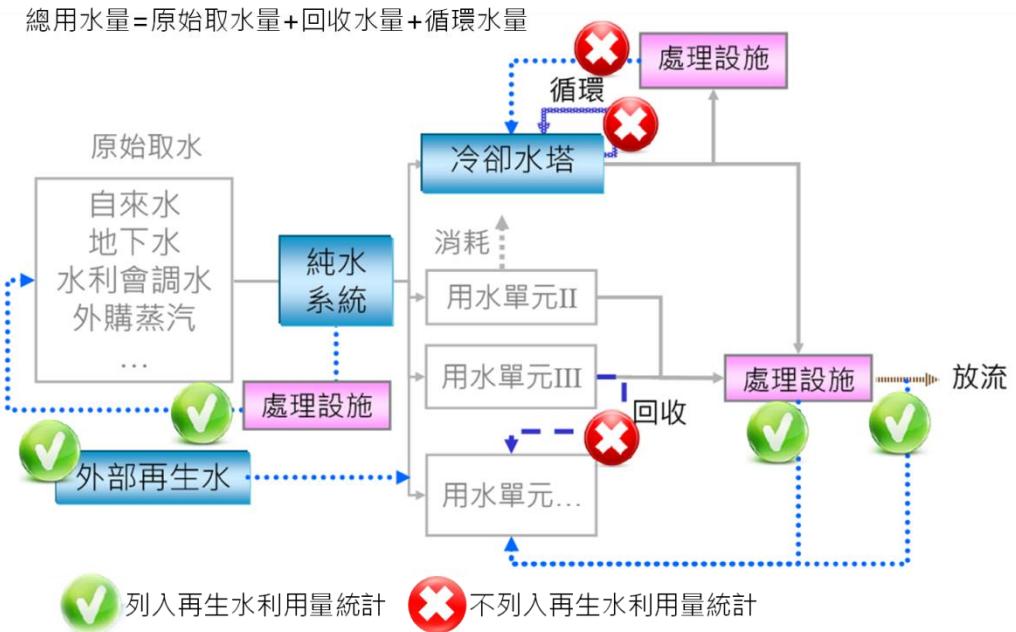


圖 1 現行統計再生水用量之定義^[3]

三、水再生利用推動現況說明

廢、污水再生利用，係將髒水經妥善處理後，再次使用之行為，其「髒水」之主要來源有都市污水及工業廢水兩種，於推動回收再利用之策略與進度上亦有所不同，詳分述如下。

3.1 都市污水再生利用現況說明

都市污水再生利用可分為兩部份，一為民眾生活污水經由縣市政府所管轄之污水下水道系統收集，進入污廠、處理至滿足放流水標準後，將原排放至承受水體之放流水引至再生水廠，處理至符合再生水水質要求後，提供給各式用途使用；另一部分乃以學校、社區、醫院或大樓等大用水戶為單位，將區域內產生之污水自行收集、處理至符合再利用目的之水質要求，於區域內再行利用。

都市污水廠放流水因具水質水量穩定且不受氣候影響等優勢，已成為國內推動水再生利用時之重點，內政部營建署有意利用下水道經費之結餘款進行再生水廠之興建與管線之埋設，故水利署及營建署乃共同合作，分就再生水之用戶端調查/媒合與風險管控評析及再生水廠與輸水管線之建置期程等進行調查與規劃，且配合「污水下水道第四期建設計畫-水回收再利用計畫」之執行及經費運用，初期將以福田廠、鳳山溪廠及永康廠於 105 年始供應再生水為目標，而後安平廠、豐原廠、臨海廠亦將陸續完工並供應再生水(詳目標期程可參考表 2)，該六座再生水示範廠預計於民國 120 年將可供應 330,000 CMD 之再生水，是為舒緩國內水資源緊張情勢之重要角色，圖 2^[3]說明六座具放流水再生利用潛勢且規劃優先推動之污水廠，中壢廠及桃園廠乃規劃以 BOT 之方式辦理，相關單位亦積極促成其放流水再生利用；中長期之水再生利用，將以桃園廠、彰化廠、楠梓廠等為優先^[4]。民生用水大戶之污水再生利用方面，透過水再生利用技術服務團之調查與輔導，統計截至 102 年底，國內民生用水戶再生水使用量約 5,300 CMD^[3]。

表 2 最優先推動方案之供水期程及供水量^[4]

供水端	需用端	105 年	106 年	110 年	120 年
福田廠	中港特定	86,500	86,500	128,500	128,500
安平廠	安平工	--	4,500	4,500	4,500
	南科	--	64,500	64,500	64,500
鳳山溪廠	臨海工	45,000	45,000	45,000	45,000
豐原廠	中科	--	10,000	12,500	25,000
永康廠	數谷	10,000	10,000	15,000	30,000
臨海廠	臨海工	--	10,000	20,000	32,500
合計 6 案		141,500	230,500	290,000	330,000

單位：CMD

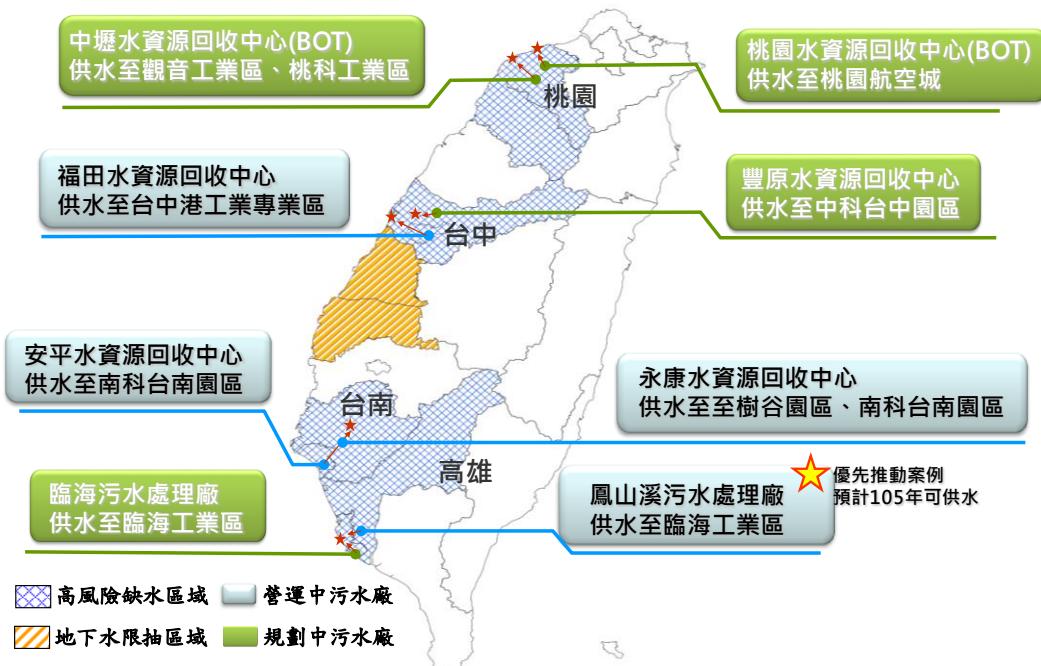


圖 2 具放流水再生利用推動潛勢且規劃優先推動之污水廠

3.2 工業廢水再生利用現況說明

同都市污水再生利用，工業廢水之再生利用亦可分為兩部份，一為工業區綜合廢水廠之放流水經再生後，供應區內廠商再次使用；另一部分則為工業用水戶自行將產生之廢水再生處理後，於製程中再次利用。

考量工業區綜合廢水廠之進流水來自區內各式業者，水質複雜且恐含有毒性物質，所需再生成本較高，故現階段乃以調查業者廠內回收量(依圖 1 之原則進行調查)及輔導業者提升水回收量為主，據水再生利用技術服務團之調查與輔導結果，統計截至 102 年底，國內工業用水戶再生水使用量約 245,351 CMD^[3]。

四、水再生推動願景

為有利於國內水再生利用之推動，經濟部水利署於 99 年即提出水再生利用發展策略，做為我國廢污水再生利用發展之重要目標及方向，並於 100 年訂定水再生利用政策目標「民國 120 年供應再生水 120 萬 CMD，佔公共給水量之 10%」，以友善環境/公眾宣導、強制法令/獎勵措施、缺水地區重點推動及關鍵技術/產業扶植等為四個主要執行方向(圖 3)，以都市污水廠放流水供工業使用(700,000 CMD)、推動工業區綜合廢水廠放流水供工業使用(50,000 CMD)、鼓勵輔導工業大戶自設再生水廠(350,000 CMD)及追蹤輔導民生大戶環評承諾事項(100,000 CMD)等為主要方針(圖 4)，各項目標值未來將配合調查成果及推動現況做滾動式調整，終以 1,200,000 CMD 之再生水使用量為目標。



圖 3 水再生利用發展政策藍圖及目標量

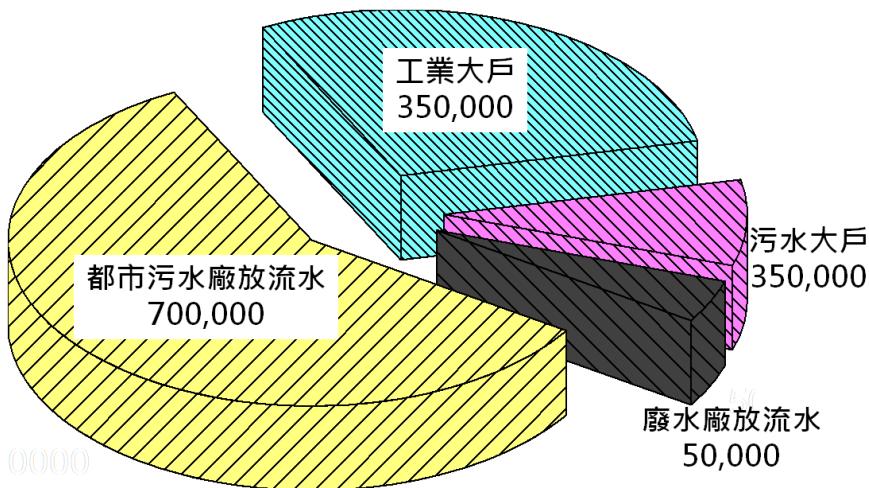


圖 4 水再生政策分項目標值

承過去水再生利用產業發展科技計畫之成果，為提升用水戶使用再生水之意願、達成上述再生水政策目標量，乃成立水再生利用風險管控技術研發計畫(101-105年)，以用水戶及國內水處理業者之立場為出發點，進行風險評析、監控技術與節能系統之研發及本土性產業與產品之扶植為主要重點(圖 5)，並分以新興水源潛勢調查、輸水設備與基礎建設共構、獎勵優惠補助/強制作為、水價與廢污納管費合理化等重點，建立我國水再生相關之管制或強制制度；利用缺水地區重點推動、廢污水廠提升/興建等作為，進行水再生利用相關風險評估、加強產水與用水之鏈結；藉發展整合型水處理技術搭以綠能科技，除可符合國家能源政策，達節能減碳目的，亦可帶動相關產業之技術發展與創新，拓展海外市場；最終以深耕教育及新興水源展示中心之方式，擴大工業用水信心、泯除民眾及業者對使用再生水之疑慮，使國內水再生利用及相關產業得順利發展^[5]。

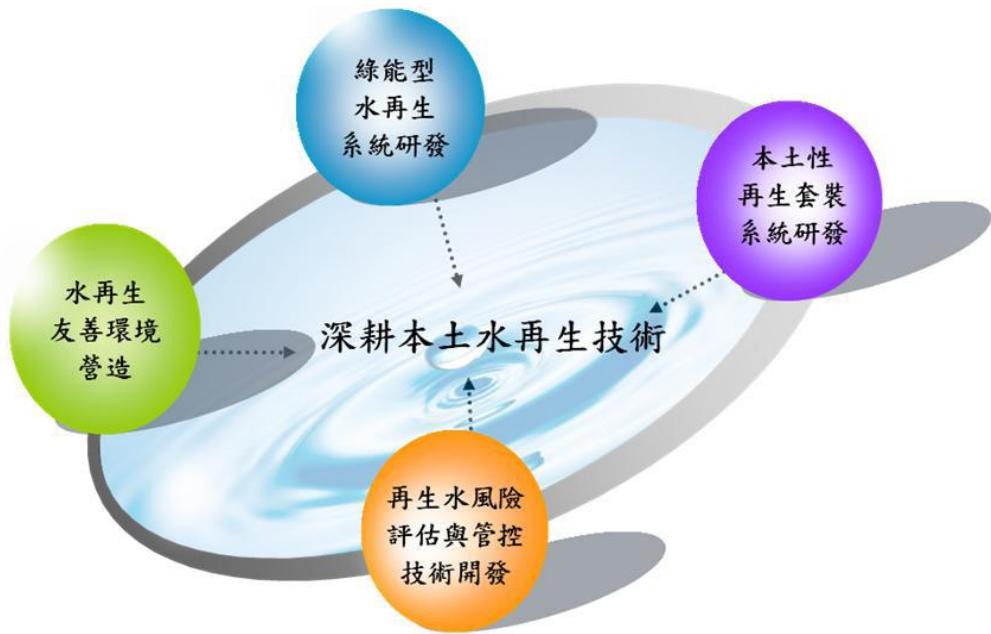


圖 5 水再生利用風險管控技術研發計畫技術藍圖

五、結語

再生水之供應與管理，擬規劃將其視為都市小水庫，統計截至 102 年之再生水使用量調查結果，國內現階段再生水用量每日約 25 萬餘噸，爾後隨國內再生水廠之完工、廢污水再生利用之推廣與輔導、用水計畫書審查、環境影響評估要求及承諾事項之實踐、再生水資源發展條例之訂定，我國再生水使用量將可望有突破性之成長，創造一社經發展與環境保育得並進之永續環境。

參考文獻

1. 「區域水資源經理策略擬定之研究」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2008 年。
2. 「結合預定公共污水廠放流水再利用之調查及規劃」，2009 年。
3. 「水再生利用推動盤查與促動服務計畫(2/3)」，經濟部水利署，2013 年。
4. 「公共污水處理廠放流水回收再利用推動計畫」，內政部營建署，2014 年。
5. 「水再生利用策略研究整合管理計畫(2/3)」，經濟部水利署，2013 年。

從國際經驗看台灣推動 水再生之關鍵議題

莊順興^{*}、歐陽嶠暉^{**}

摘要

近年來台灣水資源在供給端變化大、水庫調節量下降之情況下，缺水風險逐漸升高，推動「水再生」能降低缺水風險並符合水資源永續利用之核心價值，已逐漸成為社會共識。政府雖已標列「民國 120 年再生水使用量達每日 120 萬立方公尺」之政策目標，但推動之難度似乎不小。所謂他山之石可以攻錯，本文乃整理國外成功推動水再生之案例經驗，解析我國現階段推動水再生關鍵包括：1.水再生屬於水利基礎建設之定位，2.水再生應被納入整體供水計畫，3.推動水再生之用途應明確，4.水再生設施及管線應視同水源開發之投資，5.水再生應具備經濟效益，6.研擬法令推動水再生，7.使用者參與及成功之教育宣導，8.水再生技術之可靠度應長期驗證等 8 項關鍵議題，期能將國外經驗轉殖至我國成功應用，提供我國推動水再生建設之參考。

【關鍵字】水再生、水資源管理、工業再利用、都市再利用、飲用再利用、缺水

^{*}台灣水環境再生協會 理事長、朝陽科技大學環境工程與管理系 教授

^{**}台灣水環境再生協會 名譽理事長

一、台灣推動水再生之歷程

1.1 水再生已受社會重視

在過去的二十多年間，隨著用水量的日趨不足，國內開始推動各種水資源的有效利用措施，包括自 1981 年代由民間社團及社會人士開始鼓吹節約用水，1991 年代推動用水合理化之水回收，以及 2001 年代進入建置穩定水源之水再生利用，至 2006 年行政院核定「新世紀水資源政策綱領」，將推廣水再生利用以及相關產業之發展納入推動策略與措施中，同時，亦提及研訂水源多元化發展條例，輔導與獎勵廢污水再利用之事業興辦，提升用水效率^[1]。至此階段顯示，水再生利用已受到政府及社會大眾之重視。

而近年來，更因氣候變遷及水庫淤積問題，使穩定供水更具挑戰，缺水成為每年均可能發生之隱憂，農田休耕、減壓供水成為生活中常見之用語，往後之十年、二十年，可預見台灣之水資源在供給端變化大、水庫調節量下降之情況下，缺水風險將逐漸升高，穩定供水更形嚴峻，水再生於台灣整體水資源供給所能扮演之角色應值得加以重視。

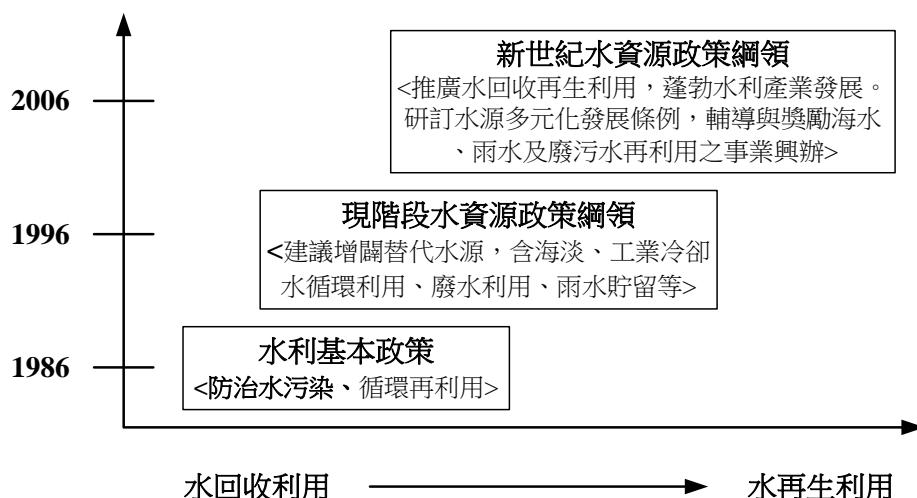


圖 1 水資源回收及再生利用政策推動歷程圖

1.2 水再生未見推動成效

雖然水資源永續利用為當前社會共識，推動水再生符合水資源永續利用之核心價值，台灣亦具備缺水、供水不穩定等發展水再生之基本要素；然而，多年來之水再生政策均未能落實執行，僅有部分事業或開發單位因廠內需求或環評承諾而有水回收利用之作為，至目前台灣仍無具水源規模之水再生系統運作。政府雖已標列「民國 120 年再生水使用量達每日 120 萬立方公尺」之目標^[2]，但未見長期策略之支持。讓人不禁要問，台灣真的需要推動水再生嗎？有推動水再生之必要嗎？

然而，多年來供水不穩定之隱憂於台灣持續存在，缺水風險實則愈來愈高，但實務上政府承受此供水壓力僅在於枯水期後期(每年 2 月至 4 月)，每年豐水期一到，壓力消失，水再生成為隔年議題，年復一年如此循環，致使水再生建設未能落實。再則，台灣長期處於低水價之供水條件，再生水並無法提供用水者經濟上之誘因，故推動不易。綜言之，政府雖重視水再生，但並未積極面對缺水風險及克服經濟因素，致使建設停滯不前，白白浪費許多良好之水資源。所謂他山之石可以攻錯，本文整理國外成功推動水再生之經驗，期能提供我國推動水再生之參考。

二、國際推動水再生之經驗

2.1 國際成功經驗案例

國際上推動水回收再利用已超過三十年，Water 21 最近報導各類型水再生案例之挑戰及成功關鍵^[3]，茲將相關資訊整理於表 1，並摘要說明如下。

1. 整合水資源管理

許多國家或地區已著眼於整合水資源管理以平衡水之供給及需求，降低供水不穩定之風險。多元化供水管理經常納入非傳統水源之開發，如水回收再利用，雨水回收利用或海水淡化等選項，而在管理系統思考上，整合水資源管理之核心在於整合低成本但較不可靠之水源(如河水)與高成本但較可靠之水源(如回收水與海水淡化)。如 1995 年 West Basin (加州)之案例顯示，其藉著提供 5 種用途之

64 從國際經驗看台灣推動水再生之關鍵議題

再生水供給特定之用水者，於 2005 年再生水之使用達到供水量之 7 %，並推估 2025 年達 41 % 為目標，此客製化供水之成功案例，再生水成為乾旱時期可靠之水源，且其價格較自來水便宜，創造出經濟、環境及社會之多重效益。

在 Sydney (澳洲)之案例中，整合水資源管理之作為包括節約用水、地下貯存 (deep storage)、水回收及海水淡化，於 2010 年回收水約佔供水量 6.6%，預估至 2015 年將達 2 倍之成長。Singapore 雖處於降雨豐富之區域，但因人口密度高及集水區域有限，水回收亦為其整合水資源管理之重要元素，其再生水佔供水量之 30%，主要成功之關鍵在於政府支持、有效的公眾教育及溝通、由單一機構綜管全部水資源(包括飲用水、廢水及回收水)。另 Madrid 案例為歐洲最大之都市水回收再利用案例，可提供 $70 \text{ Mm}^3/\text{yr}$ 之回收水，藉由 1,200 km 之二元供水管線以滿足 10 % 需水量之要求。國際案例經驗指出，在缺水區域水資源整合管理，常藉由乾旱期降低供水，並以水回收滿足人口成長之用水需求及降低氣候變遷之影響。圖 2 為水質與水利用與處理歷程示意圖。

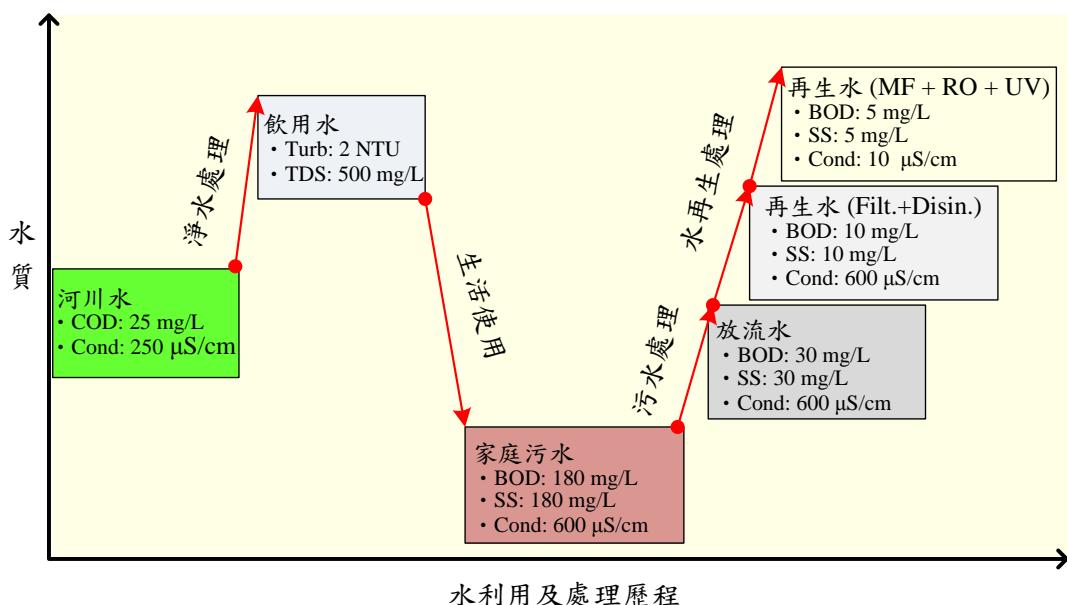


圖 2 水質與水利用及處理歷程示意圖

2. 都市再利用

對於回收於都市用水經常需要適當之基礎建設，如二元供水管線，在新都市能以較經濟之方式建設二元供水系統。而於管理上，防止管線錯接(cross-connection)為最主要考量，以避免用水衛生問題。Pimpara Gomera (Queensland, Australia)案例對區域內 45 %用戶提供再生水，目標在於降低 16 %自來水用量。日本對於建築物內使用再生水及雨水已有 40 年以上約 2,500 個案例之經驗，其中地方法規要求、經濟誘因及稅賦優惠為推動成功之主因，同時 MBR 技術已被認定為最適合用於現地處理之水再生技術。

財務上提供誘因亦為推動水回收再利用相當有用之工具，如 The Solaire Apartments (New York, US)案例，此計畫特點為當水回收達到 25 %以上時，將降低水費及下水道費 25 %以補助其水回收之操作費用，此作法降低其用水量達 50 %，且大量減少能源成本。東京新宿區域對 30 層樓以上之大樓要求使用再生水沖廁，可降低用水成本約 23 %，且由於大樓於規劃時已考量二元管線系統，故可明顯降低成本。綜合而言，對於都市水再利用成功之關鍵，包括政府及法規強力支持、管理單位投入、透過有效之公眾教育獲得社區支持、有效之處理、謹慎之監測與水質控制，且回收水價格較自來水便宜。

3. 適於飲用之再利用

1962 年 Montebello Forebay (加州)為第一個成功補注地下水層之案例，而 1969 年 Windhoek (Namibia) 為唯一使用回收水直接飲用之案例，雖然多年經驗均未顯示出對人體健康之影響，但公眾反對及對微量未知污染物之影響仍是主要限制因素。以回收水作為間接飲用所使用之技術分類，不論採直接注入地下水層或表面漫流或補注水庫，近年來薄膜技術已成為普遍採用之技術，如圖 3 所示。GWR (Orange County, California) 為全球最大之間接飲用再利用之計畫，其藉由將再生水補注地下水層以防止海水入侵，並提供做為間接飲用之水源，目前處理容量約為 256,000 m³/d，並預計擴充至 378,000 m³/d，而由於其處理規模大，故操作成本僅約 0.35 US \$/m³，最佳之能耗量為 0.53 kW·h/m³。對於小規模之處理廠，操作成本可能為大廠之二倍以上，如 Torrele (Belgium)案例，其規模為 7,000 m³/d，但亦展現經濟上之可行性。綜合國際上水回收於飲用之案例顯示，成功之關鍵在於使用多重保障之技

術，確保水質符合飲用水要求、詳細的準備與模型廠試驗，強力之政府與法規支持，展現經濟及環境上之效益。

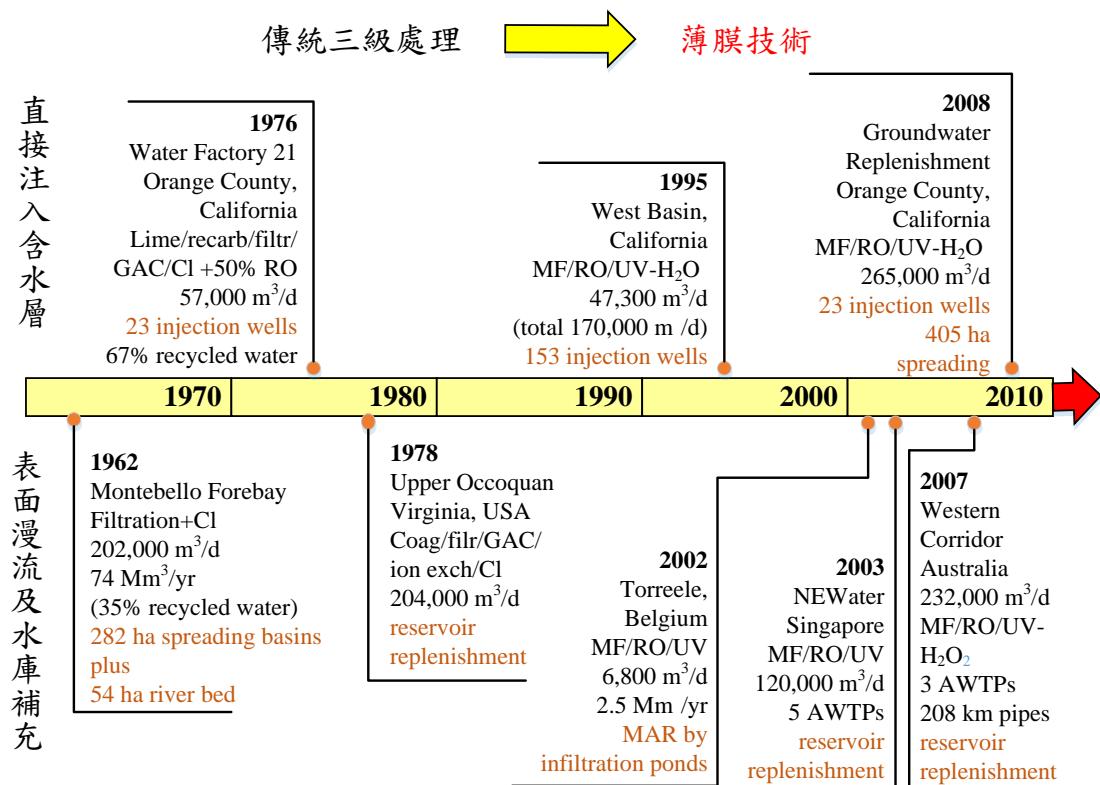


圖 3 水回收間接飲用所使用之水再生技術發展

4. 工業再利用

工業再利用為再生水最大利用機會之一，當自來水供給受限、成本增加或排放水要求更嚴格時，再生水回收做為工業使用之潛力亦隨之增加。一般回收於工業上主要使用用途包括冷卻補充水、鍋爐用水及製程用水，各類工業用水常依產品及製程而異，不易有一致性之水質標準。對於回收水於工業上冷卻水塔利用時，氣膠所潛在之致病菌風險為最受關注之點，對於設備與配水系統之腐蝕、結垢與生物積垢則為常見之問題，對於水質提升如硬度控制、不溶性鹽類去除等，於許

多工業均已有相當成功之案例，如石化業、電廠、紙廠、染整廠、電子廠及食品廠等。West Basin (California) 之案例為提供客製化水質之成功案例，其自 1995 年以來，以 MF/RO 為主之技術產製 3 種品質之再生水供工業使用，以較低之價格提供工業穩定之水源。其他類似之成功案例，如新加坡、墨西哥(San Luis Potosi)、印度(Panipat)、北加州(RARE Project)及夏威夷(Honolulu)等。綜合而言，再生水於工業再利用之成功關鍵，在於處理效率與可靠性以及技術上與經濟上之可行性。

表 1 國際水回收案例之成功關鍵

類別 (用途)	案例	推動機會	挑戰	成功關鍵
整合水資源管理 (都市用水、增加供水水源、工業用水、農業用水)	Sydney (澳洲) West Basin (加州) NEWater (新加坡) Costa Brava (西班牙) Cyprus (賽浦路斯) Tainjin (中國) Beijing (中國)	● 水源不足 ● 乾旱安全 ● 發展地區性供水 ● 高能源成本 ● 供給大水量用戶	● 建設高成本之處理設施及基礎建設(二元配水系統) ● 管理競爭性水源 ● 符合水質要求與確保水質之控制 ● 合約協議與法規修訂	● 政府承諾或授權 ● 再生水水質較優且價格低於自來水 ● 多重管控確保良好水質(水源控制、高比例都市污水、完整二級處理、高級處理技術、完整水質監控、遵守嚴格操作程序) ● 公眾參與與教育使社會接受
都市再利用 (景觀澆灌、庭園用水、消防用水、沖廁用水、清洗用水)	Knittlingen (德國) Madrid (西班牙) Honolulu (夏威夷) Bora Bora (波利尼西亞) Australian experience West Basin(加州)	● 政治或相關單位之承諾 ● 氣候變遷造成嚴重乾旱 ● 有限的新飲用水源 ● 高標準之環境排放要求	● 建設及運轉二元配水系統 ● 控制操作成本(在不可預測之能源價格下)。 ● 良好的管理操作 ● 研訂最適當之水價訂策略 ● 良好品質控制以防止錯接 ● 社區教育	● 當地主管機關及公民之認知與授權 ● 特定方案以符合用戶(客戶)之需求 ● 提供技術與設計以符合各種用途之需求 ● 同時提供高品質純水供工業使用以有助於確保經濟上之可行 ● 撰寫完整之使用手冊供民眾使用 ● 得到衛生單位之支持 ● 公私夥伴關係之建立

表 1 國際水回收案例之成功關鍵(續)

類別 (用途)	案例	推動機會	挑戰	成功關鍵
分散式都市再利用及建築物內循環再利用 (沖廁用水、庭園用水、冷卻補充水、清洗用水)	Shinjuku, Tokyo (日本) The Solaire building, New York (美國) 建築物內循環利用 (日本) Knittlingen (德國)	● 政府承諾或授權 ● 法規要求 ● 有利的誘因與稅賦	● 可靠的回收水 (在需求高度變動情況下) ● 良好衛生之回收水質(如顏色) ● 輕微污染程度之灰水量無法滿足沖廁水量 ● 相對較高之能源消耗(使用 MBR 技術)	● 法規調整與財務支持 (透過補助與誘因) ● 建商與市政府雙贏之關係 ● 可靠的水質與水量及較便宜之水價 ● 早期規劃與設計降低二元供水管線之初設成本 ● 水回收再利用之法規與手冊 ● 水再生系統技術性設計與操作之 Know-how
適於飲用之再利用 (注入含水層之間接飲用再利用：直接注入含水層作為海水入侵屏障、表面漫流及水庫補充，直接飲用再利用)	GWRX Orange County (加州) Torreele (比利時) Occogan (美國) Western Corridor (澳洲) Windhoek (那米比亞) West Basin (加州) NEWater (新加坡)	● 水源供給不穩定 ● 地下水位降低 ● 嚴重之乾旱及用水增加 ● 確保水量以防氣候變遷 ● 聯邦政府建設補助	● 嚴格之回收水質要求 ● 成本高且需資本投入 ● 微量污染物之重要議題 ● 於低產率時回收設施之管理 ● 公眾之接受度及法規之認可 ● RO 濃縮液應被處理／再利用 ● 加強都市逕流污染之控制	● 強力的政治與社區支持及合作 ● 極佳之資訊政策及教育溝通 ● 多重水質保障方法、可應變之技術、模型廠試驗及連續展示長期計畫期間之水質提升 ● 分區控制方式、乾旱安全及可靠供給高品質之用水(在環境敏感及經濟可行之方式下) ● 獨立監控以提供無偏差之資訊給管理人員。 ● 可靠之操作及線上程序與水質控管。 ● 公私夥伴關係之建立。

表 1 國際水回收案例之成功關鍵(續)

類別 (用途)	案例	推動機會	挑戰	成功關鍵
工業再利用 (工業再利用都市再生水) (工業水循環再利用)	San Luis Potosi (墨西哥) RARE Project (加州) West Basin (加州) Honolulu (夏威夷) Panipat (印度) Closed loops (德國)	<ul style="list-style-type: none"> ● 缺水及乾旱 ● 不同團體用水衝突 ● 推動多元化供水之意願 ● 政府政策 <ul style="list-style-type: none"> ● 環境保護目標 ● 供水安全性 ● 降低成本 ● “綠色”形象 	<ul style="list-style-type: none"> ● 基礎建設確保配水及連續供水 ● 原水水質變動 ● 處理程序高度之可靠性 ● RO 鹽水之處置 ● 流量之調勻 <ul style="list-style-type: none"> ● 原廢水水質高變動性 ● 嚴格再生水水質目標 ● 回收之效益需優於投資與操作成本 ● 必須有效率及可靠的廢水處理與水再生程序 ● 零排放目標 	<ul style="list-style-type: none"> ● 聯邦及州政策，水回收法規及政治面之支持。 ● 穩定之水質，符合客戶要求及高度之操作可靠性。 ● 具生產性之資金計畫 (公私部門夥伴關係) <ul style="list-style-type: none"> ● 從 Closing loop 展現經濟效益 ● 技術及經濟可行之高效率與可靠之水回收程序 ● 經濟成長與產業成功 ● 對環境之覺知 ● 有經驗之操作者(公私部門夥伴關係)
農業灌溉 (稻米、玉米、小麥、牧草、馬鈴薯及園藝)	Milan (義大利) Noirmoutier (法國) Australian experience San Luis Potosi (墨西哥)	<ul style="list-style-type: none"> ● 缺水及乾旱 ● 水資源管理政策及水回收再利用法規 ● 現存之供水完全被分配或污染 	<ul style="list-style-type: none"> ● 灌溉之季節性需求或高貯存需要 ● 非常嚴格之水回收標準 ● 建設與操作廢水處理設施之資金 ● 免費或低價供給農民高品質灌溉用水 ● 沿海區域海水入侵下水道增加鹽度 	<ul style="list-style-type: none"> ● 農民與管理者之承諾不破局 ● 建立使用回收水之準則及使用手冊 ● 財務平衡、高處理效率及可靠性操作 ● 維持既有及都市周圍之農業 ● 公眾教育計畫及非營利組織之合作 ● 公私夥伴關係之建立

2.2 成功推動水再生之關鍵

綜合上節之國外成功經驗案例，歸納推動水再生之幾點關鍵如下：

1. 水再生之新觀念”滿足使用目的(fit-to-purpose)”

“滿足使用目的”之觀念在於依使用目的決定水再生之水質，此為推動水再生之第一要件；亦即，水回收再利用之用途將主導廢水處理之程度及水再生程序及操作要求，水再生利用所需水質因回收用途而有極大之差異，依用途而設定客製化水質方能使水再生之推動目標明確，縮短推動時程。

2. 政府承諾及法規支持

推動水再生政策常為滿足穩定供水之要求，實屬國家基礎建設之一環，由各國成功案例可知，在非以利潤為前提之條件下，政府部門強力支持及法規修訂為成功推動水再生之必要條件。

3. 確保經濟可行

水再生要確保經濟上可行為推動上一大挑戰，因其常受到被低估成本或受補貼之傳統水源之競爭，在許多成功案例中，所收取之水費皆僅能滿足操作成本。提供財務上誘因、公債及稅率優惠均為可採用之做法，同時由穩定整體水資源面向評估將更能展現水再生之效益。

4. 公眾接受及持續溝通

社會大眾認知及了解水再生之衛生安全及其適用性為成功推動水再生關鍵之一，持續之溝通及簡要易懂之資訊應提供給民眾及政治人物以作為宣傳水再生及永續水環境效益之用。

5. 水再生技術應更精進

水再生技術之挑戰目前並未完全解決，尤其回收用於工業利用及適用於飲用利用之情況，技術要點包括提升效能、效率、穩定可靠及成本效益。

6. 重視能源效率及碳足跡

永續發展、零碳排放及污染排放掌控為水循環及水回收再利用所需考量重點之一，當考慮都市成長及能源效率之最佳化時，水再生已成為一逐漸受到重視之議題。

三、台灣推動水再生之關鍵議題

台灣推動水再生之現況為「議題已受重視，建設未見推展」，推動之成效有限。綜合國際成功推動水再生之經驗，列舉我國推動之關鍵議題如下。

1. 水再生屬於水利基礎建設之定位

在認知缺水風險之國家，均將水再生建設視為國家基礎建設，如加州、新加坡、以色列等，藉由政府主導將水再生納入整體水資源管理之一環。在我國之現況，水利主管機關已逐步將水再生納入水資源管理體系中，然而水再生未屬水利法範疇，相關之建設尚未能被視為水利基礎建設，故推動之成效大受影響，在認知我國缺水之條件下，將水再生視同水源開發之國家水利基礎建設，為首要檢討之關鍵議題。

2. 水再生應被納入整體供水計畫

水利主管機關應將再生水作為調整供水之來源，藉由對用水大戶之用水計畫書審查與重新核定，調整供水量及水源，重新核定後節省之自來水應釋出供其他利用，對於需水單位，則可指定部分用水以再生水供應，降低整體缺水壓力。

3. 推動水再生之用途應明確

水再生之用途應有明確使用者，方能有效推動。水再生之水質差異極大，採用途導向方能明確定義所需之水質(如工業用水 B、C 級)，也才能加速推動之時程。就台灣而言，西部區域擁有全世界最高密度之工業區與大型用水產業，於枯水期其承受之缺水風險最高，將大型污水處理廠之放流水再生供作其第二水源，將有助於穩定工業生產，產生最大效益(如福田廠處理水供給台中港特定區、鳳山溪廠處理水供給臨海工業區、安平廠處理水供給安平工業區及台南科學園區)。此外，配合新市鎮開發時設置二元供水系統，以再生水替代非飲用之都市用水，亦為水再生極大效益之展現。

4. 水再生設施及管線應視同水源開發之投資

水利主管機關依水資源之利用需要，可直接核定污水處理廠處理水為水源，協助用水需求單位規劃替代水源，視同水源開發之投資，並協助設置再生水之輸水系統。由中央政府與地方政府協調處理設施與輸水系統建置與管理方式(如政

72 從國際經驗看台灣推動水再生之關鍵議題

府自辦、BOT、PFI 等方式)。

5. 水再生應具備經濟效益

依市場法則，具經濟效益之前提下方能有效推動水再生，在我國低水價之條件下，創造具經濟效益之水再生環境更是不易。由國外成功案例之經驗，將水再生建設視為基礎建設，以收取之水費支付水再生廠例行操作及維護費用，為有效推動水再生之作為，並於財務、公債及稅賦上提供誘因；另高級再生水已達純水等級，再生水價之擬定亦應納入水質因素，並配合各種管理作為，以加強水再生之競爭性，如供水一元化管理(如用水計畫管理與再生水供給一併考量)，污水排放費徵收或減免機制，及水量優先供應原則等作為，藉由整體評估以使水再生具備經濟誘因。表 2 為水再生廠產水營運成本分析^[5]。

6. 研擬法令推動水再生

透過「再生水資源發展條例」之研訂及立法，方能持續執行水再生之建設，衡諸我國財政與國情，在無法令支持下，水再生之定位及管理作為將無法長期執行與有效落實，所有國際成功案例均顯示，沒有政府強力支持，水再生建設無法推動，政府之決心為水再生之核心問題。

7. 使用者參與及成功之教育宣導

再生水之使用雖符合永續水資源管理之概念，然而使用者或公眾對再生水之陌生則是影響其被接受之主要原因，國外成功經驗均有長期之監督機制及公眾參與計畫之配合，唯有長期持續之良好水質展現及使用者與民眾參與，方能建立社會對再生水之信心，且成功之教育宣導應落實於應用性實證上，透過實際參訪觀摩，方能展現成效。

8. 水再生技術之可靠度應長期驗證

水再生技術雖已有多年應用經驗，然而技術之可靠性、進流水質之影響、操作風險之降低及長期使用之效益，均應有持續性之長期驗證計畫，以確保達成水質保障及技術效益目標。

表 2 再生水產水營運成本

水再生廠名稱	水再生程序	再生水量 (CMD)	單位產水營運成本 (元/m ³)
福田廠	硝化+結晶軟化 混凝+沈澱 UF+RO+加氯	86,500	2.68-14.75
安平廠	UF+RO+UV	66,000	11.11
鳳山溪廠	UF+RO+加氯	45,000	13.00
豐原廠	UF+RO+UV	10,000	12.10
永康廠	UF+RO+UV	10,000	11.11
臨海廠	UF+RO+UV	10,000	11.70

註 1:再生水量係預估 106 年之產水量。

註 2:單位產水營運成本包含水再生廠及管線操作維護成本。

四、結語

縱觀未來，台灣將面臨愈來愈嚴峻供水不穩定之壓力，水再生可提供穩定水源，應被整合至水資源管理體系。雖然國內低水價條件限制了水再生之推展，但國外成功案例提供許多值得我國借鏡之寶貴經驗，期待我國水再生系統之建置能有效推展，及時為穩定供水做出貢獻。

參考文獻

- 經濟部，新世紀水資源政策綱領(核定本)，中華民國 95 年 1 月。
- 經濟部水利署，新紀元水利施政綱要計畫(102-111 年)，中華民國 102 年元月。
- Valentina Lazarova, Global milestones in water reuse: Key to success and trends in development, Water 21, IWA, August 2013.
- 經濟部水利署，國際水再生利用推動經驗評析，中華民國 99 年 12 月。
- 內政部營建署，公共污水處理廠放流水回收再利用推動計畫期末報告，中華民國 103 年 4 月。

工業區產業用水最佳化與再生技術推動

黃抒毓*、黃淑君**、陳蓉瑩***

摘要

經濟部工業局長期致力於產業園區用水需求檢討，藉由用水效率提升及工業區廢水回收再利用之推動達到目標，本文就本公司過去承接工業局推動計畫，「產業水資源使用最佳化對策」及「彰濱工業區再生水廠推動」兩案之規劃成果進行說明，其一係針對於缺水容忍度較低之電子業，探討其用水特性及發展趨勢，研擬其水資源使用最佳化對策；另於回收實務作業上，則以彰濱工業區廢水回收利用推動為案例說明，藉由模廠驗證廢水回收之可行性，完成再生水廠規劃，回收提供製程用水，持續提倡水再生利用新觀念。

【關鍵字】用水最佳化、再生技術

*艾益康工程顧問股份有限公司 計畫經理

**艾益康工程顧問股份有限公司 主辦工程師

***艾益康工程顧問股份有限公司 副工程師

一、前　言

台灣地區受地形、氣候影響且水資源開發與運用受限，屬高風險缺水地區，然而「水資源」之供需問題，無論在高科技產業或傳統產業均佔有舉足輕重之地位，產業界對於用水的需求，隨著產量增加勢必影響，如何確保水源穩定供應已成為我國總體經濟成長重要一環，必須由前端源頭減少用水量及後端廢水回收再利用，減緩企業對用水需求及可能面臨缺水之風險。

經濟部工業局長期致力於產業園區用水需求檢討，藉由用水效率提升及工業區廢水回收再利用之推動達到目標，本文就本公司過去承接工業局推動計畫，「產業水資源使用最佳化對策」及「彰濱工業區再生水廠推動」兩案之規劃成果進行說明，其一係針對於缺水容忍度較低之電子業，探討其用水特性及發展趨勢，研擬其水資源使用最佳化對策；另於回收實務作業上，則以彰濱工業區廢水回收利用推動為案例說明，藉由模廠驗證廢水回收之可行性，完成再生水廠規劃，回收提供製程用水，持續提倡水再生利用新觀念。未來期望在政府與民間達成節約用水與水再生利用之共識下，提升我國水再生利用技術服務能力，開創水再生利用產業之契機。

二、產業水資源使用最佳化策略(前端源頭減量)

2.1 電子產業用水分析

電子產業為目前台灣重要經濟產業，由台灣各產業用水分析可知，主要電子產業用水量合計約 42 萬噸/天，約 1.53 億噸/年，其中竹科聚落約占 53%，南科聚落占 30%，中科聚落占 17%。以次產業分析，半導體產業占 59%、液晶顯示器產業產 41%。電子產業各標的用水比例，如圖 1 所示，其在製造過程中，多半須使用大量清水，因此製程用水（含用於清洗）占了相當大的比例（89%）。政府為減少電子產業用水需求，正針對工業區內廠商進行產業升級轉型輔導計畫，於用水方面期望可從減少製程用水量著手。本文以電子產業中之兩大主要用水業別，半導體產業及平面顯示器產業進行水資源使用最佳化對策研擬。



圖 1 電子產業各標的用水(取水量)比例

半導體工廠之用水大項為廢氣洗滌用水，由於半導體在製造過程中，使用相當多種的化學品及特殊氣體，當它們氣化或反應殘留之氣體被排氣系統抽除後，一般會先經過初級處理設備處理，當中包含了燃燒、吸附及洗滌，故此部份用水占半導體工廠用水比例不低；平面顯示器方面，生產製程中，以薄膜工程階段之清洗、塗佈、蝕刻、薄膜，面板工程階段之洗淨、組立為主要之用水單元，在各階段之水質要求皆為電子級純水。

2.2 提高電子產業製程用水效益

2.2.1 半導體製造業

一般來說，各半導體工廠在產品組合與製程上，耗水量大約介在 2.0 ~2.5 噸水 /3 片之間，月產量約三萬片。然而製程純水必須經過一道道處理手續純化，純水依原水水質與水處理系統設計之不同，處理每單位純水耗用之自來水會有極大之差異。因此除改善製程方式外，超純水系統亦可成為一有效提升節水效益之系統，以下針對降低其製程用水量策略進行說明。

1. 超純水系統

超純水系統流程普遍須經過活性碳塔、二床三塔離子交換、紫外線殺菌等程

序。就節水立場而言，建議可採用離子交換樹脂塔，然由於逆滲透膜模組有其不可替代性(它可除去非離子態之微粒物質等，而離子交換樹脂塔無法去除)，故兩者搭配使用是一較佳之組合方式。

2.化學站(Chemical Station)機台節水回收

半導體製程上，化學品使用複雜，若可排放源頭即進行分類管理，不僅回收率可提高，且廢水處理負擔亦可減輕。化學站為超純水之用水大宗，其節水方式如下：

- (1)於設備採購之前須將節水需求及作法告知設備製造商。
- (2)回收管線依不同特性、類別回收，以達到最大之回收量及減少廢水之處理成本。
- (3)機台調機時，即應進行該機台之排放水質分析，使符合回收標準之水質均能回收。
- (4)更改機台 Recipe，減少用水量。

3.Wet Scrubber 節水回收

- (1) Wet Scrubber .DAS. 及 CDO 為耗水量甚大之設備，可進行相當之回收再利用。
- (2)DAS 或其它有機溶劑之廢液需專管分類回收，以增加回收率及降低處理本。
- (3)收集系統中，需加入酸鹼控制，使供水符合所需。

4.清洗方式改善

- (1)機械清洗技術可以刷子清洗、高壓超臨界流體清洗、超音波清洗。
- (2)濕式化學清洗程序可以 HF-HNO₃ 進行表面蝕刻清洗
- (3)SUGAI F.R 槽經過觀察，發覺 Wafer 在清洗槽內清洗，清洗時間約 155s~185s 間其水阻值即可達到設定值，且清洗時間在 270s~300s 間其水阻值幾乎持定值，故可透過減少清洗時間達到節水效益。

2.2.2 平面顯示器產業

在平面顯示器產業之生產過程需大量純水用量，除了改變各段製程方式進行節水，亦可透過純水系統之回收達到省水效益。

1.超純水系統

- (1)超純水系統 RO-R 濃排水回收。
- (2)廠務純水製造系統 2B3T 再生廢水回收再利用。
- (3)廠務超純水製造系統次級排水回收再利用。
- (4)廠務純水製造系統 MB 再生廢水回收再利用專案。
- (5)既有超純水前處理採用逆滲透法。
- (6)RO 濃排水回收再利用，增設 RO 系統提升濃排水水質，產水可作為製程原水。

2.來源管制：改變原物料之特性

製程中原物料特性的掌握及選擇，是後續處理量及難易度的重要指標，因此在不影響產品品質的原則下，所選擇的原物料可採低污染性、低消耗性、易處理、使用後可資源化的物質做為原料，以達到節水之目的，其做法列舉如下：

- (1)採用水替代溶劑做為洗劑，後續有機廢水處理也能減少處理水量及處理成本。
- (2)以草酸取代王水蝕刻，後續廢液處理較王水容易，pH 值調整加藥量減少，故產生之污泥量也較少，對於環境負荷較低，污染處理成本也自然下降。
- (3)面板電路導線由鉻金屬改為鋁金屬，鉻蝕刻液改為鋁蝕刻液，可減少蝕刻後含鉻廢水量污泥量大幅減少，而鋁蝕刻液含有高濃度磷酸，可應用作有機廢水添加劑；經廠商回收還可製成肥料。

3.製程節水回收

TFT LCD 製程常用之節水技術，以清潔生產之角度包括減量使用、回收、再使用、再循環及管理措施。

目前電子產業之發展係以科學園區為中心，未來隨著帶動周邊工業區之發展，用水需求將達到 76 萬噸/天，於是高用水產業自覓穩定水源方案及提升自我用水效率，為未來產業發展必須考量之重要因素，故電子產業水資源使用建議對策未來應著重於協助業界導入正確的水資源管理觀念與技術，提倡產業製程節約用水或水循環利用觀念，協助產業改善水資源利用效率。

三、工業廢水回收使用推動(後端水回收再利用)

為解決產業未來用水與供水間存在的缺口，除了從產業用水合理化檢討外，亦可由廢污水再生利用，補足部分工業用水需求。廢污水回收再利用在國外已施行多年，然國內尚缺乏相關經驗，目前經濟部正辦理「新興水源發展先期實施計畫」，以落實工業區廢水處理廠放流水再生再利用，其中已針對彰濱工業區廢水處理廠廢水回收再利用進行相關測試及規劃，期望未來可提供廠內廠商製程用水使用，減少其用水量。

3.1 彰濱工業區水再生利用規劃

1.水再生進水及產水水質

放流水回收再利用規劃，除須先瞭解回用水質之特性與相關影響條件，對於將來回收水的使用標的與目標水質設定亦為相當重要的一環，彰濱工業區之再生水是以處理工業區污水廠之工廠綜合放流水為主，回收水供應規劃以冷卻水用途用水為主，其進水要求及產水水質如表 1。

2.水再生處理程序及規模研擬

彰濱工業區污水廠之工廠綜合放流水已經過模廠試驗，以纖維過濾+超濾系統（Ultrafiltration, UF）+逆滲透系統（Reverse Osmosis, RO）處理流程，脫鹽率可達到 95% 以上，50% 產水率之 RO 整廠平均產水，比導電度可小於 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (試驗期整廠平均產水實測值<200 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，RO 產水水質符合冷卻用水水質要求，因此，彰濱工業區放流水以纖維過濾+UF+RO 處理流程為可行之程序，如圖 2，其產水水質符合冷卻水補充用水水質標準為標的。

彰濱工業區污水處理廠一、二期設計處理廢水約為 8,000 噸/天，水回收規劃取水量為平均放流水的 50% 上限，由於本廠比導電度約在 7,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，考量 RO 薄膜處理能力，RO 回收率建議為 50%，建議設廠規劃先以 4,000 噸/天為基準，後續再依使用情形與需求進行擴充，未來如有環境景觀及生活次級用水亦可考慮局部供應。

表 1 彰濱工業區污水廠水再利用之進水及產水水質要求

項目	單位	進水限值	產水水質	自來水水質
pH	—	6.0~9.0	5.5~8.0	6.0~8.5
氨氮(NH ₃ -N)	mg/L	10	<0.1	0.5
總溶解固體 (TDS)	mg/L	6,000	<250	800
比導電度(EC)	μS/cm	10,000	<350	-
總硬度 (TH)	mg/L as CaCO ₃	800	<10	400
氯鹽(Cl)	mg/L	2,000	<80	250
化學需氧量 (COD)	mg/L	100	<10	<4
總有機碳 (TOC)	mg/L	30	<2	<2
懸浮性固體 (SS)	mg/L	30	<3	<3
濁度 (Turbidity)	NTU	20	<0.2	<2

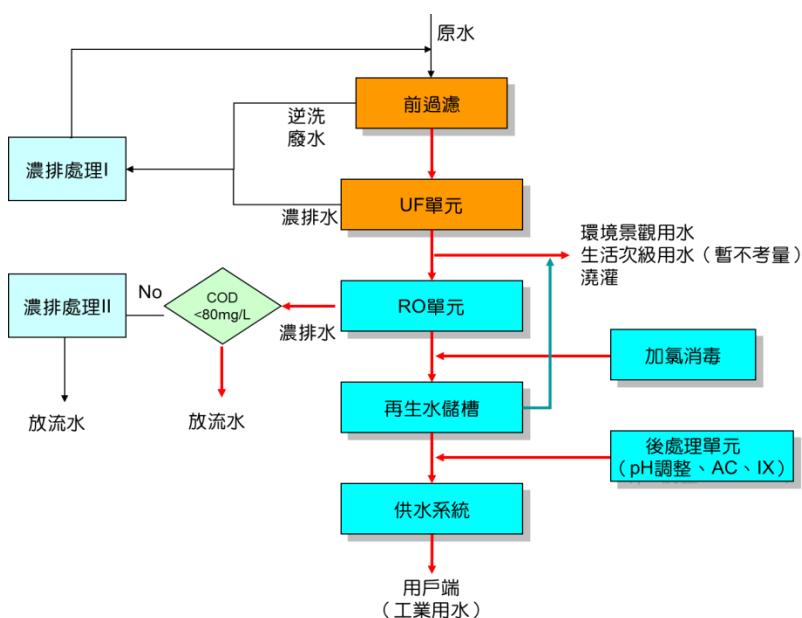


圖 2 再生水廠處理流程圖

3.配置建置費用及操作費用

再生水廠建置工程經費總計約 1.99 億元，操作維護費主要包括電費、藥品費、薄膜置換費等，估算每年操作維護費約 2,990 萬元，單位造水成本估算，土建管線以 20 年、機電 10 年為分攤基準，單位造水成本估算彙整如表 2 所示，初步估算彰濱工業區水回收含攤提之每噸造水成本為 28.34 元，不含膜更換之每噸造水成本為 21.51 元。

表 2 單位造水成本估算

項目	數值	單位
每日產水量	4,000	m^3
設備建造/投資攤提成本	7.58	元/ m^3
操作維護成本/（含膜更換）	20.76	元/ m^3
操作維護成本（不含膜更換）	13.93	元/ m^3
總計（含攤提/含膜更換）	28.34	元/ m^3
總計（含攤提/不含膜更換）	21.51	元/ m^3
自償率*	-41.1%	

註*：自償率估算售水費用以自來水價 12 元計算

規劃水回收廠設備需求用地面積約 $1,200 \text{ m}^2$ ，建築用地規劃以 2 倍設備需求用地面積估計，約 $2,400 \text{ m}^2$ ，規劃建築樓層形式為一樓平面廠房及辦公室區，彰濱工業區廢水處理廠用地如圖 3 所示，再生水廠配置如圖 4 所示。再生水廠以產水規模 4,000 噸/天估算，用地約需 $2,400 \text{ m}^2$ 。

再生水推動依循促參法與秉持使用者付費原則，優先開放民間參與投資興建營運，推動單位依促參法辦理民間自提方案公告，徵選優良廠商興建，售水費用由供水端與用水端協商合理售水價格。如民間缺乏參與投資意願，政府再依採購法辦理，由政府出資興建，採統包工程推動，經營管理則委託民間公司，相關費用再由使用廠商分期攤還。

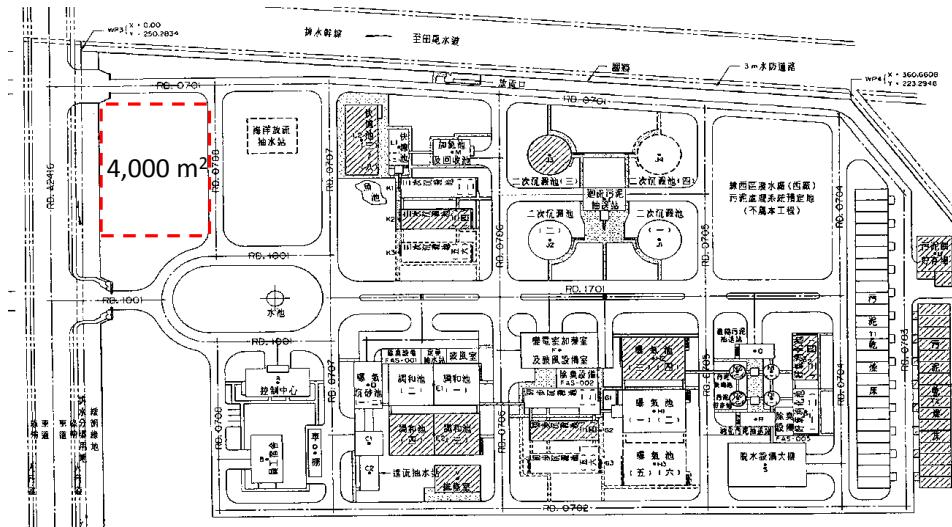


圖 3 再生水廠位置

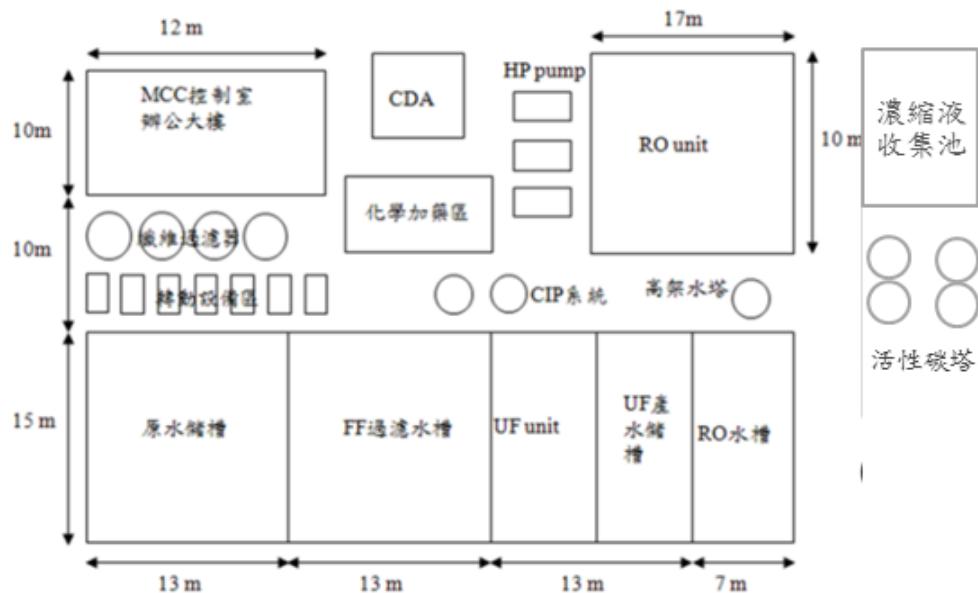


圖 4 再生水廠主要設備平面配置規劃

3.2 工業區內配水管網分析

初步規劃將再生水廠設置於廢水處理廠內，彰濱工業區用水大戶以寶德能源及長春石化為主，其已表達用水意願，輸水管線配置建議以為兩家為優先規劃對象，自再生水廠至用戶端總長度約需 2.0 公里。本區地勢平坦且輸水距離短，無須設置中繼加壓站或中繼水塔，可直接由再生水廠供應至使用端。

彰濱工業區推動再生水供水管網建置，初期建議以目前有使用意願廠商為設計管網，初步估算總長度約為 2,000 公尺，管材建議使用 HDPE，管徑為 200 mm，配水管線佈設包含管材成本及配管施工費用，工程總費用合計約 2,079 千元。

彰濱工業區因區內供水條件限制，持續開發招商將衍生區內廠商無水可用之虞，如以某公司為例，其預計於民國 103 年中需用水 2,000 噸/天，民國 105 年將再新增 2,000 噸/天用水量，已明顯造成供水缺口，如藉由彰濱工業廢水回收可因應，滿足彰濱工業區未來用水需求，雖然再生水處理技術與產水水質已獲肯定，但因價格等問題仍不具誘因，故現階段仍需政府研擬相關執行策略以利推動。

四、結語

有鑑於全球氣候變遷造成我國水資源匱乏，再加上傳統水資源開發日趨困難，為求有效解決缺水危機，積極輔導產業用水效率提升並發展新興水資源為必然之趨勢。經濟部工業局長期致力於推動工業節水綜合行動，除建置工業用水基礎資料外，並積極推動產業用水效率提升輔導以減少用水量。另亦針對廢水回收部分，由政府率先於工業區內推動，實證廢水回收之可行性，使大用水戶得以起而效之，在政府與民間達成節約用水共識，亦可提前達到民國 110 年用水回收率 65% 之目標，並開創水再生利用產業之龐大契機，達到水資源永續發展及總量管制之目標。

參考資料

- 1.多元化水源發展政策實施計畫之研擬(1/2)，水利署，96-97。
- 2.產業園區用水效率提升暨能資源整合計畫，經濟部工業局，101。
- 3.產業水資源使用最佳化對策規劃報告，經濟部工業局，101。
- 4.工業區污水處理廠模廠試驗及綜合評估報告，經濟部工業局，102。

電透析技術在工業用水與廢水 再生上的應用

周珊瑚^{*}、莊世享^{**}、梁德明^{***}、廖啟鐘^{****}、夏工傑^{*****}

摘要

水資源缺乏已成為國際間重要議題，氣候變遷造成水資源分配不均的問題越來越嚴重，聯合國環境規畫署預估，到 2027 年約有 1/3 的世界人口將面臨嚴重的水資源枯竭。水利署也訂定水再生政策，2031 年再生水需佔公共給水量的 10%，即必須達到 120 萬噸/天。水再生其中一項重要關鍵在於脫鹽，尤其在廢污水的脫鹽上需選擇耐垢的薄膜技術，電透析法已被證實相對較 RO 薄膜對雜質、膠質、有機物及硬度的耐受性較高，目前在工業用水與廢水再生上，已應用在 RO 濃水再生、冷卻循環水脫鹽再生、各類低濃度廢水再生等。本文即就相關應用的案例作一介紹。

【關鍵字】電透析(electrodialysis)、水再生(water reclamation)、脫鹽(desalination)

^{*}水之源企業股份有限公司 副總經理

^{**}水工社有限公司 總經理

^{***}工業技術研究院 材料與化工研究所 水科技研究組 組長

^{****}工業技術研究院 材料與化工研究所 水科技研究組 研究員

^{*****}水之源企業股份有限公司 資深工程師

一、前　言

二十一世紀被稱為“水的世紀”。根據聯合國糧食及農業組織指出，世界正經歷著水資源危機，預期有限的淡水資源將面臨嚴重不足。聯合國環境規畫署也預估，由於全球的暖化現象、全球人口的增長及自然資源的匱乏，且未來將有 50% 的人口居住在城市裡，再加上工業持續發展與農業汙染所導致地下蓄水層的品質惡化，到 2027 年約有三分之一的世界人口將面臨嚴重的水資源枯竭。

台灣地區在用水需求方面，根據水利署全國用水量的統計及預估，2005 年農業及保育用水需 126 億噸(約佔 70%)，生活用水需 36 億噸(約佔 20%)，工業用水需 17 億噸(約佔 10%)，合計全國用水量約 179 億噸，工業用水雖占 10%，但產值卻占生產毛額 24-26%，因此工業用水之穩定供應相當重要，同時工業用水至 2021 年預估將成長至 28 億噸，政府並要求新開發計畫的工業用水的回收率至少需達 65% 以上，顯示工業用水回收再利用的重要^[1]。工業用水的節約用水方案以製程用水、冷卻用水、鍋爐用水、生活用水及廢水回收為主要方向，其中工業廢水由於組成分複雜，其回收相對需作較完整的考量，包括不同特性的廢水分流、最適當的整合性處理回收流程、回用方式、經濟效益評估與濃縮水排放等問題，因此相對其他水再生技術具有更高的挑戰性。

水與廢水再生中主要的議題是在去除水中的有機物、懸浮微粒與鹽類(即 TDS，總溶解性固體)，常見的脫鹽技術包括離子交換樹脂、逆滲透(reverse osmosis, RO) 及電透析(electrodialysis, ED)等技術，其中離子交換樹脂適用於低濃度鹽類($TDS < 200 \text{ mg/L}$)的去除，ED 適用於中高濃度鹽類($TDS 500\text{-}5,000 \text{ mg/L}$)的去除，RO 則較適用於 $TDS > 5,000 \text{ mg/L}$ 鹽類的去除，由於 ED 薄膜相對 RO 薄膜具有相對耐垢的特性，因此近年來有許多應用在工業用水與廢水再生上的案例，本文主要目的即在介紹電透析相關技術在水再生的應用。

二、電透析技術介紹

首先針對 RO 與 ED 這兩種較常用在水與廢水再生上的程序作一比較 RO，以壓力為驅動力，ED 以電力作為離子分離的驅動力，兩者的比較如圖 1。

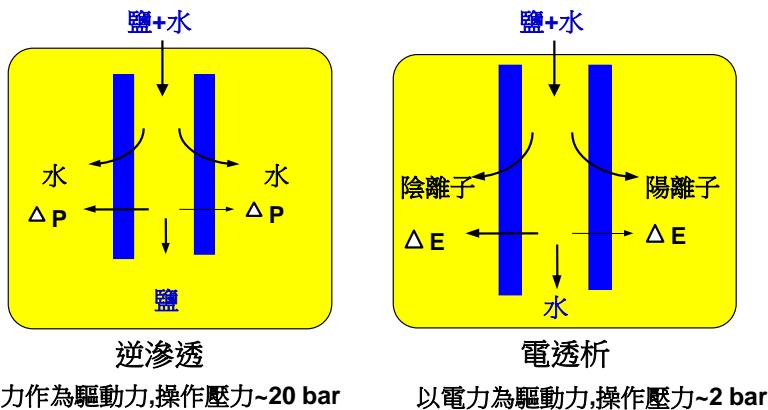


圖 1 RO 與 ED 分離的驅動力比較

RO 技術利用的逆滲透原理大家較為熟悉，在此不贅述。ED 技術是提供正負直流電來當吸引水中離子移動的驅動力，並藉由不同特性的薄膜對水中的離子作分離選擇，利用陽離子只能穿透陽離子交換膜，而陰離子只穿透陰離子交換膜的特性，在外加直流電場的作用下，水中的陰離子移向陽極、陽離子移向陰極，最後得到淡水及濃水，達到淡化除鹽的目的。而進一步改良之倒極式電透析(EDR, electrodialysis reversal)乃利用直流電正負極和內部導流的切換以延長薄膜使用壽命；隨著薄膜材質不斷的改良，薄膜透析之性能、化學穩定性皆大幅提昇。

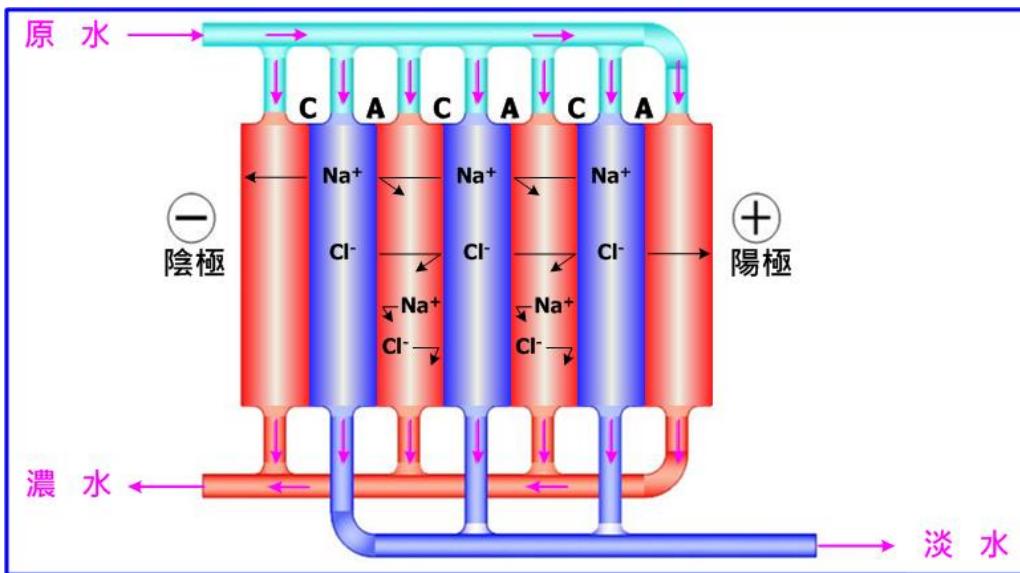


圖 2 電透析脫鹽示意圖

電透析法在水處理上適用性廣，目前在工業用水與廢水再生上，已應用在 RO 濃水再生、冷卻循環水脫鹽再生、各類低濃度廢水再生等。EDR 系統通常無須因防止 fouling 與 scaling 而添加化學藥品，其比 RO 可更有效處理高 fouling 原水。一般 RO 系統需要較昂貴的超過濾(UF)作為前處理單元，EDR 系統的前處理單元可較為簡單，可能只需要砂濾或微過濾。

表 1 EDR 與 RO 脫鹽的適用特性比較

適用特性	EDR	RO
前處理方式	砂濾/微過濾/超過濾	超過濾
SDI	< 15	< 2
結垢清洗方式	倒極切換加鹽酸	化學藥劑
抗生素附著清洗方式	次氯酸鈉	化學藥劑
驅動力	電力	壓力
水流流力	切線流	部分切線流/垂直流
有機物脫除	局部	全面

RO 的壽命與進流水的前處理有很大的關係，在廢水回收的應用上尤其有很大的限制，因此如何減少 fouling 與 scaling 為最重要的關鍵因素，過濾、有機物的前處理(如活性碳吸附及生物高級處理)與進流水 pH 的調整是最常用的方式。而 EDR 膜較 RO 膜有較好的物理性及抗化性(包括耐 SiO_2)，尤其 EDR 系統採用不溶性電極(如鈦絲塗釤電極)，因此可每隔一定時間(約 15 分)將兩端電極極性互換，而淡水及濃水之控制閥亦隨之切換，如此反覆操作，能自動清洗離子交換膜表面上的結垢，可增加電透析系統的操作穩定性及壽命，所以 EDR 對雜質、膠質及細菌的容忍度較 RO 為高，一般原水淤泥阻塞指數(silt density index, SDI)之要求 RO 為 $\text{SDI}_5 < 5$ ，EDR 為 $\text{SDI}_5 < 15$ 。EDR 經由評估實驗證明 EDR 的總效益優於其他方法(如 RO, UF/RO)，還有以下優點^[2]：

- 1.高濃水濃度：EDR 處理的濃水濃度可達 TDS 100,000 mg/L。
- 2.排放水溫可達 45°C ，且溫度提高可增加 EDR 的效率。
- 3.耐化學性優：pH 1-10，可用 5% HCl 清洗膜表面結垢或用 H_2O_2 及氯殺菌。
- 4.EDR 膜面不易結垢(fouling & scaling)， CaSO_4 飽和度可達 175%，若添加抗垢劑於 EDR 濃縮迴流中， CaSO_4 飽和度更可達 400%。
- 5.能源消耗低(45-90psi 低壓操作)與水回收率高(迴流設計可達 95%的水回收率)。
- 6.清洗維修週期長、壽命長，操作管理簡單。

三、電透析技術的應用

工研院(ITRI)自從 2001 年來在經濟部技術處的科專計畫中研發 EDR 技術，目前已應用有超過 20 個實績，同時多為廢水回收的應用，包括各種行業廢水、冷卻水循環水與 RO 濃水的回收，相對已比美國與日本的 EDR 技術在廢水回收應用上更具性價比的優勢，表 2 為 ITRI EDR 技術與其他類似技術的比較。

表 2 ITRI EDR 技術與其他類似技術的比較^[3]

國家 項目	ITRI EDR 技術應用	中國大陸 (2~3 家)	美國	日本	日本
設備來源	中國大陸	中國大陸	GE/Ionics	Asahi glass	Tokuyama
膜材製造	異相膜 ¹	異相膜	均相膜 ²	均相膜	均相膜
材料差異	膜厚 <1 mm 耐磨損 電阻稍高	膜厚<1mm 耐磨損 電阻稍高	膜薄 0.5 mm 不耐磨損 電阻較低	膜薄<0.3 mm 不耐磨損 電阻較低	膜薄<0.3mm 不耐磨損 電阻較低
應用	脫鹽 廢水回收為主(各行業廢水、冷卻水循環水與RO濃水回收)	產品分離 無機酸鹼與化工產品 地下水脫鹽	脫鹽 半鹹水為主，少數廢水回收(地下水與冷卻循環水回收)	產品分離 無機酸鹼 有機酸 脫鹽	產品分離 無機酸鹼 有機酸 脫鹽
技術差異	前處理技術與程序控制整合	缺乏完整程序整合與控制技術	缺乏彈性前處理技術		
設備價格	1 倍	1 倍	2 倍 以上	2 倍 以上	2 倍 以上
膜壽命保固 (地下水脫鹽)	3 年		3 年		
地下水脫鹽 操作成本 ³	2.5-2.8 元/m ³		2.8~3.2 元/m ³		
廢水脫鹽操作成本 ⁴	3.0-3.6 元/m ³ (有機結垢只需鹼洗)		3.5~4.3 元/m ³ (不耐鹼洗，有機結垢需搭配其他藥劑)		

說明：

¹ 異相膜：直接用磨細的離子交換樹脂，通過黏合劑混合加工成型的膜。因含有離子交換官能基的部分與形成膜狀結構部份具有不同化學組成，故稱異相膜。

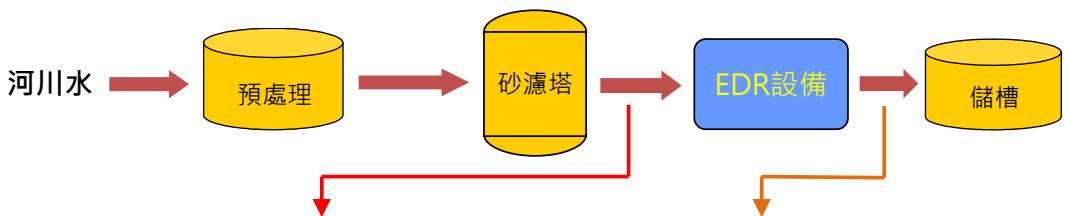
² 均相膜：是不含黏合劑的離子交換膜，通常是高分子基膜直接接上官能基而得的離子交換膜，或用含官能基的高分子樹脂溶液直接製得的膜。

³ 地下水脫鹽操作成本(電費+藥品)，以 TDS 原水 2,000mg/L 及產水 200 mg/L 為估算基準。

⁴ 廢水脫鹽操作成本(電費+藥品)，以 TDS 原水 2000 mg/L 及產水 200 mg/L 為估算基準。

3.1 河川水與地下水脫鹽處理

案例 A 廠為螺絲製造工廠，採用導電度約 $1,060 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的河川水為工廠原水，其用水系統的主要處理單元包括混凝、沉澱、砂濾及 EDR，處理流程與 EDR 處理前後水質如圖 3 所示。其中 EDR 為 6 台模組(每台模組為三級三段，450 對膜)，回收率約為 70~80%，脫鹽率約為 76-82%。操作成本分析如表 3 所示，約為 0.91 元人民幣/ m^3 ，與自來水水費 1.25 元人民幣/ m^3 比較，相當具經濟效益。



進水水質		
pH	:	7.74
M鹼度	:	320 mg/l
電導度	:	1064 $\mu\text{S}/\text{cm}$
總硬度	:	205 mg/l
氯離子	:	160 mg/l

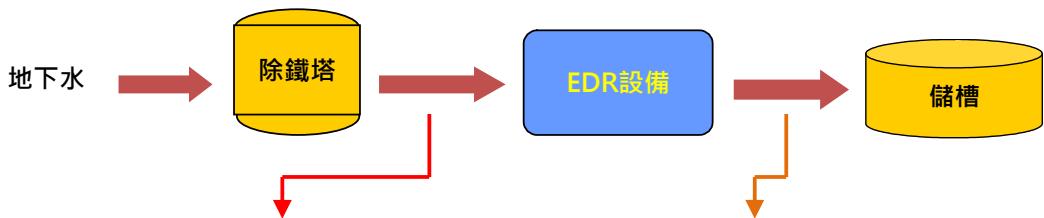
處理後水質		
pH	:	6.5~8.0
M鹼度	:	≤ 24.2 mg/l
電導度	:	≤ 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$
總硬度	:	≤ 22.1 mg/l
氯離子	:	≤ 14.2 mg/l

圖 3 河川水脫鹽處理案例 A 廠之流程與水質

表 3 案例 A 廠用水系統操作成本分析 (單位:人民幣)

	整套流程所 需費用	藥品費 (元/ m^3)	維修費用 (元/ m^3)	合計 (元/ m^3)
單純 EDR 所需費用	0.28	0.17	0.06	0.51
前處理設備費用	0.27	0.08	0.05	0.40
整套流程所需費用	0.55	0.25	0.11	0.91

案例 B 廠則是在南台灣的一個政府機關，採用地下水使用於盥洗與清洗衣物水，用水量 50 CMD，因為原水含鐵量約為 1 mg/L，先經由錳砂除鐵塔後，即進入 EDR 處理，可將導電度由 1,245 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 降至 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下，脫鹽率達 70%以上，處理流程與 EDR 處理前後水質如圖 4 所示，EDR 本體的操作成本約為 4.9 元 NT/m³，其中電費和 HCl 的費用約各佔 55% 與 45%，整套設備操作成本包括漂白水等約為 6.9 元 NT/m³。同時，在總硬度高達 320 mg/L 的條件下，經由適當的倒極與酸洗維護，並無薄膜結垢的現象，且產水的總硬度可達 100 mg/L 以下。



進水水質		
pH	: 7.48	
M鹼度	: 286	mg/l
電導度	: 1245	$\mu\text{S}/\text{cm}$
總硬度	: 320	mg/l
氯離子	: 18	mg/l
總鐵	: 0.01	mg/l

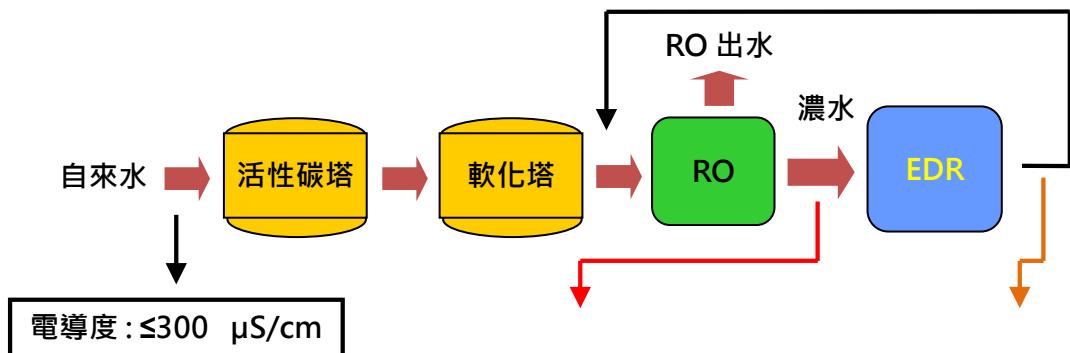
處理後水質		
pH	: 6.0~7.5	
M鹼度	: ≤50	mg/l
電導度	: ≤375	$\mu\text{S}/\text{cm}$
總硬度	: ≤100	mg/l
氯離子	: ≤0.2	mg/l
總鐵	: ≤0.01	mg/l

圖 4 地下水脫鹽處理案例 B 廠之流程與水質

3.2 RO 濃水脫鹽處理

案例 C 廠為某食品公司的飲料廠，水處理系統的 RO 濃縮水(300CMD)，導電度約 760-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，先經由過濾器去除懸浮固體，然後以 EDR 去除導電度，處理水可直接作為軟水使用。當發生異常狀況，偵測到處理水導電度超過 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 時，處理水自動迴流至 EDR 原水槽，並發出警報。圖 5 為案例 C 廠 RO 濃縮水 EDR

處理流程與 EDR 處理前後水質。其中 EDR 為一台三級三段的模組(450 對膜)，EDR 濃水採循環式與部分排放，使水回收率約達 80%，主要運轉成本為電費，其他成本不高，但相對節省軟水成本，換算整體設備投資成本的回收年限約為 2.5 年，表 4 為案例 C 廠用水系統操作成本分析，相當具有經濟效益。



RO濃縮水水質			EDR處理後水質		
pH	:	7.5			
電導度	:	760~800 $\mu\text{S}/\text{cm}$			
總硬度	:	3~5 mg/l			
氯離子	:	39~42 mg/l			
SO_4^{2-}	:	180~190 mg/l			
			pH	:	6~8
			電導度	:	$\leq 250 \mu\text{S}/\text{cm}$
			總硬度	:	ND mg/l
			氯離子	:	$\leq 5 \text{ mg/l}$
			SO_4^{2-}	:	$\leq 30 \text{ mg/l}$

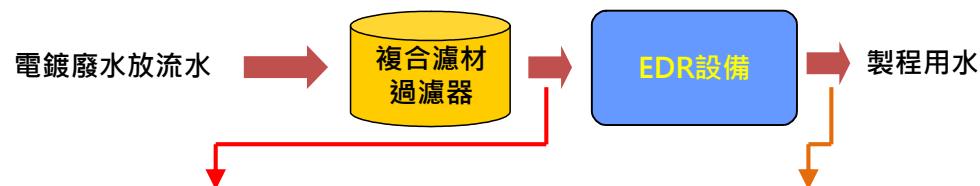
圖 5 案例 C 廠 RO 濃縮水 EDR 處理流程與 EDR 處理前後水質

表 4 RO 濃縮水處理案例 C 廠 EDR 回收成本分析

項目	用量	單價	操作成本 NT\$/m ³ 產水	操作費用 NT\$/d
電力	268 kWh/d	1.8 NT\$/kWh	2.01	482
36% 鹽酸	2.0 kg/d	4 NT\$/kg	0.03	8
薄膜(5%)	20 對膜/年	1,500 NT\$/膜	0.34	82
pH 電極	2 支/年	5,000 NT\$/支	0.11	27
微過濾濾心	1 組/月	3,000 NT\$/組	0.41	98
折舊(10%)		219,000 NT\$/year	2.5	600
每日操作成本小計			5.4	1297
節省軟水費	240m ³ /d	18 NT\$/m ³	-	4,320
每日節省費用小計				2,801

3.3 廢水回收處理

案例 D 廠為某螺絲工廠的酸洗製程廢水放流水，導電度約為 3000-5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，總硬度 150-350 mg/L，氯離子 800-1,300 mg/L，COD 200-300 mg/L，經由複合濾材過濾器簡單的前處理後，再進入 EDR 進行脫鹽，導電度可降至 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下，總硬度和氯離子則分別小於 20 mg/L 與 50 mg/L，COD 降至 120 mg/L 以下，可直接作為工廠製程用水使用。圖 6 為案例 D 廠廢水回收 EDR 處理流程與 EDR 處理前後水質，該案例產水量 200 CMD，脫鹽率約達 92%，EDR 的運轉成本(主要為電費與酸洗藥劑費用)約為 1.3 元人民幣/ m^3 。圖 7 與圖 8 則分別為 EDR 處理前後(原水與淡水)之導電度與氯離子的變化，同時，該案例廠自 2007 年操作至今，證實在此較高的硬度與 COD 條件下，EDR 操作性能良好，並無 scaling 與 fouling 的問題。



進水水質			EDR處理後水質		
pH	:	6~9	pH	:	6~8
M鹼度	:	50~100 mg/l	M鹼度	:	≤ 20 mg/l
電導度	:	3000~5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	電導度	:	≤ 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$
總硬度	:	150~350 mg/l	總硬度	:	≤ 20 mg/l
氯離子	:	800~1300 mg/l	氯離子	:	≤ 50 mg/l
SO_4^{2-}	:	200~350 mg/l	SO_4^{2-}	:	≤ 80 mg/l
COD	:	200~300 mg/l	COD	:	≤ 120 mg/l

圖 6 案例 D 廠廢水回收 EDR 處理流程與 EDR 處理前後水質

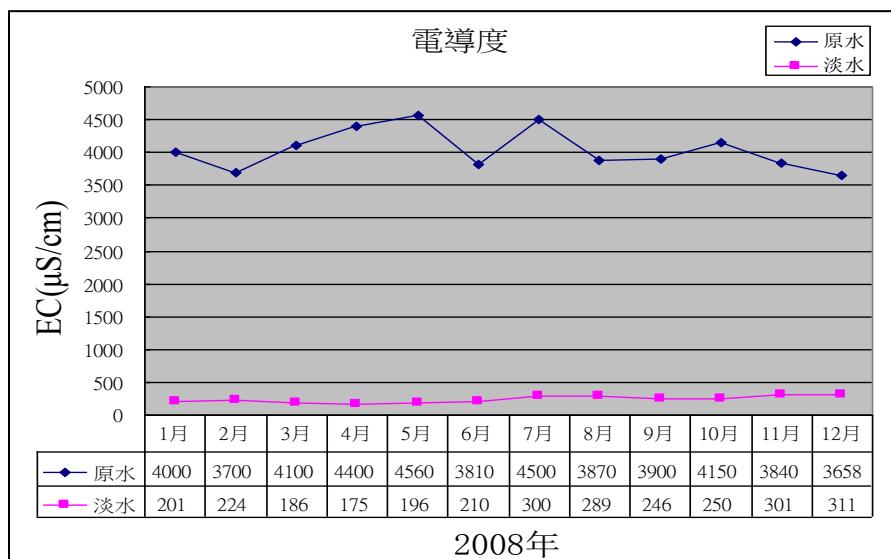


圖 7 案例 D 廢水回收 EDR 原水與淡水之導電度變化

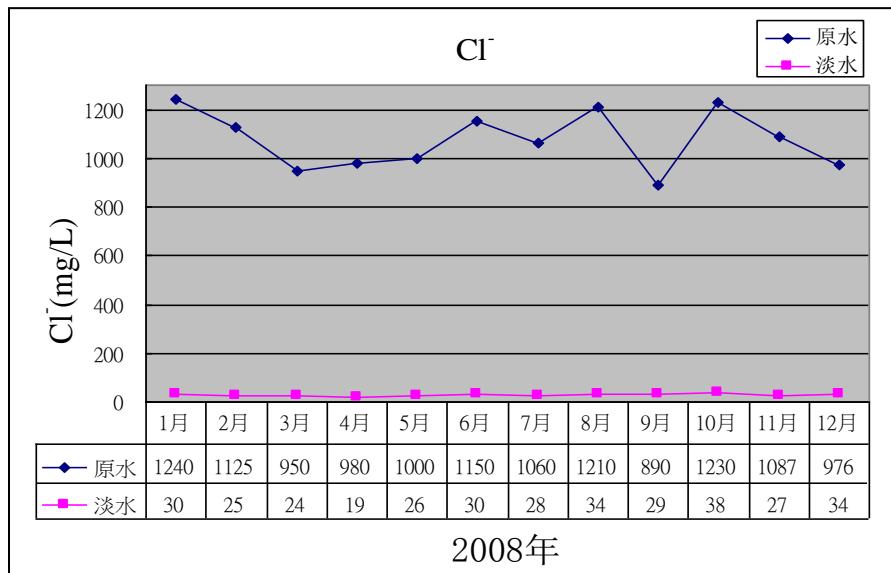


圖 8 案例 D 廢水回收 EDR 原水與淡水之氯離子變化

案例 E 廠為某半導體廠的低濃度氫氟酸(HF)廢水，導電度約為 800-1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ， F^- 約 80-120 mg/L，經由前置過濾器作為前處理後，即進入 EDR 進行脫鹽，導電度可降至 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下， F^- 幾乎都小於 3 mg/L，再經適當處理即可回製程使用。圖 9 為案例 E 廠 HF 廢水回收 EDR 處理流程與 EDR 處理前後水質，該案例產水量 300 CMD，脫鹽率約達 92%，EDR 的運轉成本(主要為電費與酸洗藥劑費用)約為 4.4 元 NT/m³，其中電費約佔 80%。圖 10 與圖 11 則分別為 EDR 處理前後(原水與淡水)之導電度與氟離子的變化。

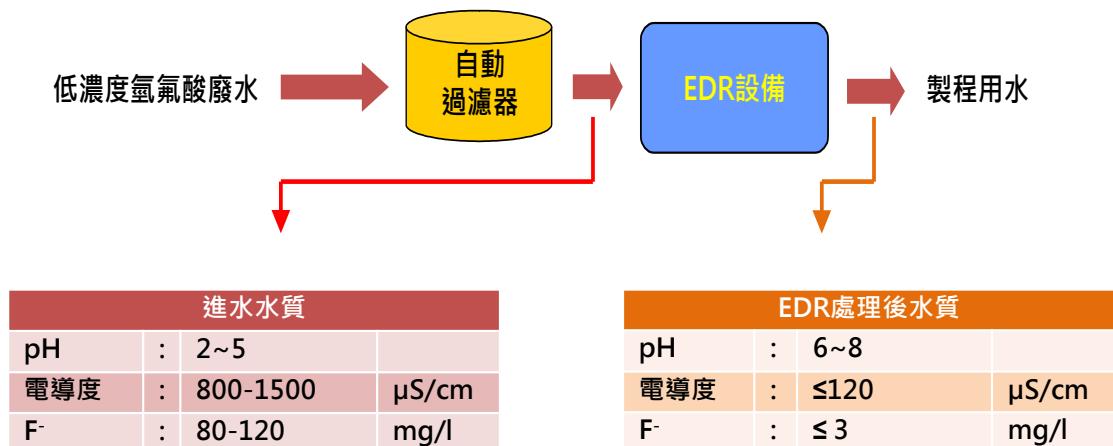


圖 9 案例 E 廠 HF 廢水回收 EDR 處理流程與 EDR 處理前後水質

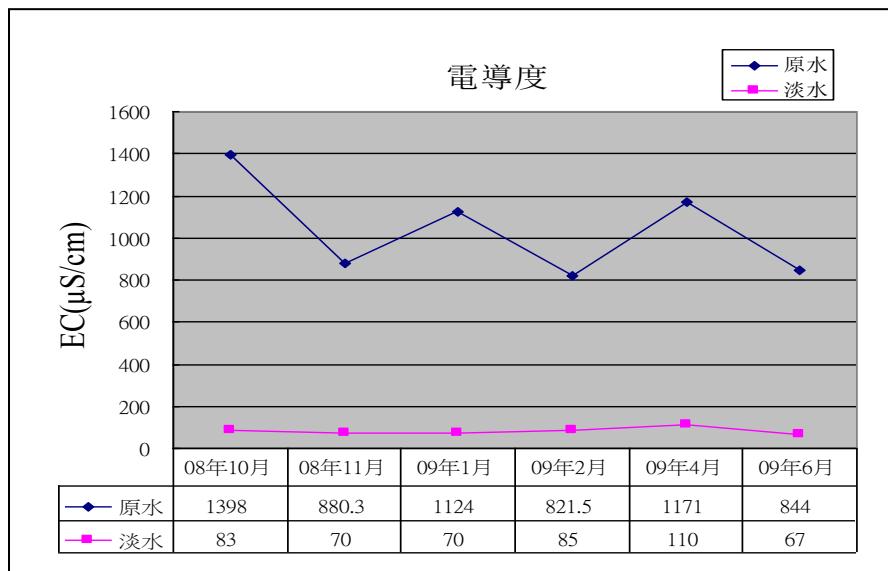


圖 10 案例 E 廠 HF 廢水回收 EDR 原水與淡水之導電度變化

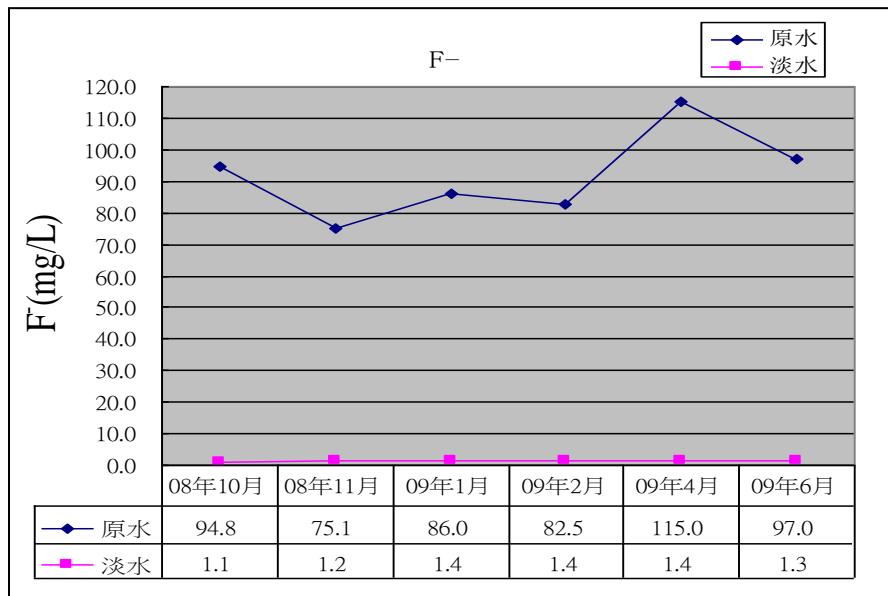


圖 11 案例 E 廠 HF 廢水回收 EDR 原水與淡水之氟離子變化

參考文獻

- 1.連錦漳、楊伯耕、陳良棟、顏振華、史濟元，提升工業用水效益及水回收再利用政策及商機，水利產業研討會，A4-1~A4-22，2006。
- 2.許永昌，交互式電透析系統在純水及廢水回收之應用，化工技術，14, 105-109，1994。
- 3.梁德明、彭淑惠、陳致君、廖啟鐘，低污泥資源再生設備與系統開發報告，財團法人工業技術研究院，2004。

半導體封裝製程用水管理 及回收系統探討

林國盛^{*}、吳靜宜^{**}、吳毓昌^{***}

摘要

由於氣候變遷，造成旱象頻繁，高科技產業製程需使用大量純水，為紓解水資源不均問題，科學園區對半導體產業訂定製程水回收率要求，而半導體封裝製程排水主要為無藥清洗及酸鹼廢水等具回收效益的排水，針對各製程排水特性做分管分流及化學品資料庫建立，並建立水質管控表，進行回收水及製程用水的有效管理，可使廠區用水達到最佳效益。

製程水回收處理單元如純水系統，主要差異性於將製程排水特性納入各處理單元操作及維護面進行處理流程設計，無藥處理單元為初濾、UV、UF 及 RO 系統等串聯使回收系統出水達到水質管控標準。

【關鍵字】半導體、封裝製程、製程水回收、UF

*日月光半導體製造股份有限公司 廠務處副處長

**日月光半導體製造股份有限公司 廠務處主任工程師

***日月光半導體製造股份有限公司 廠務處工程師

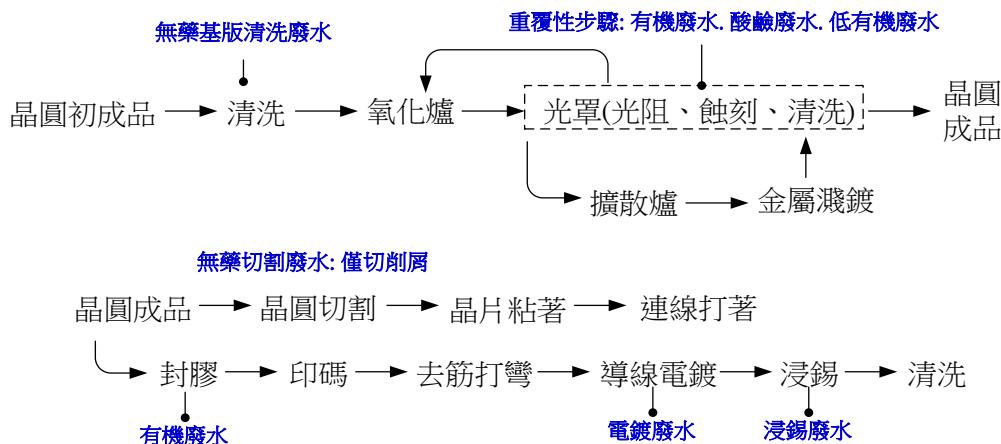
一、前　言

近年來因為氣候變遷，造成季節雨量不平均，在旱季常有限水危機的隱憂，水資源的重要性日漸遽增，台灣近年來以高科技產業為主，其中光電、半導體產業製程須清洗晶圓耗用大量純水，產業製程需要穩定的供水需求才能保持產能穩定，故高科技產業紛紛進行各廠水回收政策及技術發展使工廠能有穩定供水源。而政府透過許可審查及環境影響評估等行政措施等要求產業必須減低廢水排放量並提高用水回收率，其中科學工業園於新建半導體廠房更要求製程水回收率須達到管控標準，且新建廠申請水措等許可證須面臨環境影響評估及有限的許可廢水排放量，都使得製程水回收技術變成高科技產業的另種競爭優勢，而未處於科學園區內半導體封裝產業雖無受到製程回收水率，但企業以環境永續及深耕台灣的理念，持續投注心力於廢水減量，增設製程水回收設備以提高水源的使用率。

製程水回收課題可涵蓋兩個層面，分別為用水管理及回收系統，如何有效管理不同製程之排水系統及回收水質使之符合各製程用水要求或次級用水標準，並建立回收水系統用水分配標準。針對舊廠區的機台排水分流管路配置及回收系統建立等總廠用水平衡管理系統建置，與新建廠時即對全廠給排水系統與回收水處理系統進行整合規劃及建置標準，皆為製程水回收成功的重要因素。

二、半導體封裝製程排水性質介紹

半導體產業鏈可分從上游矽晶圓製造、中游各規格晶圓經由電鍍及光罩設計、蝕刻、擴散等製程，產生不同用途之晶圓、下游則為晶圓切割、構裝成片狀的晶粒，再經焊接、電鍍、包裝及測試後即為成品。^[1] 半導體封裝製程流程如圖 1 所示，在各階段製程的清洗步驟須使用大量的純水，清洗廢水可分為有藥及無藥部分，針對不同成分排水須做分流系統處理規劃，其中封裝製程以無機酸鹼及無藥清洗排水為大宗，而針對廢水特性做有效回收管理。

圖 1 半導體封裝製程及廢水特性示意圖^{[1][2]}

半導體產業特有製程廢水為化學研磨(CMP)、含氟廢水及蝕刻廢水等各性質及處理方法如表 1 所示，可見半導體製程排水主要污染物為無機廢水及重金屬為主，各廢水而各段製程需要反覆清洗消耗大量清水，部分製程如切割及清洗站別產生排水並無添加化學品其廢水成分單純，而製程機台清洗所產生批次非連續性的高 COD 清洗廢水等皆須納入進行製程機台排水或廢液回收的考量要件。

表 1 半導體製程排水性質及處理方法^{[2][3]}

種類	排水性質	處理方法
CMP 廢水	細研磨砥粒、有機酸、酸鹼廢水、氧化劑及界面活性劑等	化學混凝、薄膜過濾、電化學混凝、離子交換
含氟廢水	氟化物、酸鹼廢水等	化學混凝、晶種迴流、流體化床結晶、離子交換、浮除法
蝕刻廢水	酸鹼廢水、雙氧水、HAC	化學混凝、無機廢水處理
電鍍廢水	氰化物、氟化物、銅、鎳、鋅等重金屬	
去光阻廢水	DMSO、MEA 等有機溶劑	生物處理、廢液回收系統
清洗廢水	切削屑、金屬微粒、酸性廢水	過濾、化學混凝等

三、封裝製程水回收管理規劃及處理系統

3.1 廠區用水平衡分析圖建立

廠區水回收首先需進行廠區水量及排水性質進行瞭解，針對廠區各製程機台排水進行調查，並進行水平衡圖調查，稱為工廠用水平衡分析圖如圖 2 所示，針對各系統皆安裝流量計，以了解全廠用水及排水量平衡，並做資料統計，用來評估瞭解各系統的可回收量，並確實掌握回收系統的回收率及各用水系統廢水排放量，並可進行定期審視廠區用水回收效益。

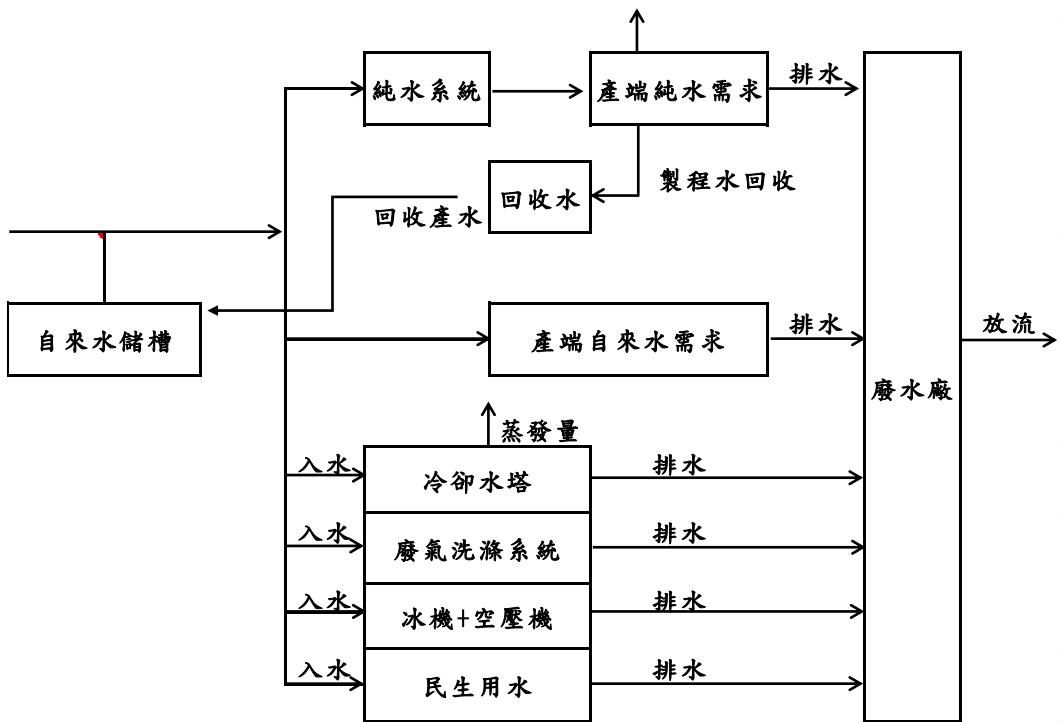


圖 2 廠區用水平衡簡圖

3.2 製程機台排水化學品資料清查

針對不同製程機台排水進行全面性普查，對各機台所使用原物料及各排水量進行調查，並建立機台排水資料庫，首先針對各排水進行化學需氧量(COD)分析，此

是為了確切掌握廢水處理廠的處理能力並能因應製程變動而瞭解廢水廠的負荷變化，避免因導入新製程或提高產能而造成廢水廠負荷過大，造成廢水廠處理能力下降。半導體排水 COD 濃度範圍如表 2 所示，並對廠區常用原物料化學品建立資料庫，瞭解其排水化學性質做為廢水處理及回收處理技術基準。

表 2 半導體封裝製程排水 COD 濃度範圍

	無藥清洗	有藥清洗	有機廢水	無機酸廢水
COD (mg/L)	<100	100-1,000	>1,000	<50

3.3 回收用水系統建立及處理系統介紹

藉由機台原物料資料先進行有效分流分管模式建立，針對各機台化學品資料來進行分流管理，並判定此股排水的回收效益，其分流架構如圖 3 所示。回收水系統建構初步要針對廠區各製程用水需求先建立回收水水質標準控制表，再以此產水要求進行水回收處理系統各出水分配，舊有廠區水回收系統根據廢水回收簡易度及現有空間分階段進行，而新建廠時則以舊廠操作資料做回收處理系統及回收水用途分配系統規劃，其回收技術與純水系統相似，差異於回收水系統的機台排水特性較自來水複雜，設計時考量針對排水特性做回收處理程序之排序。

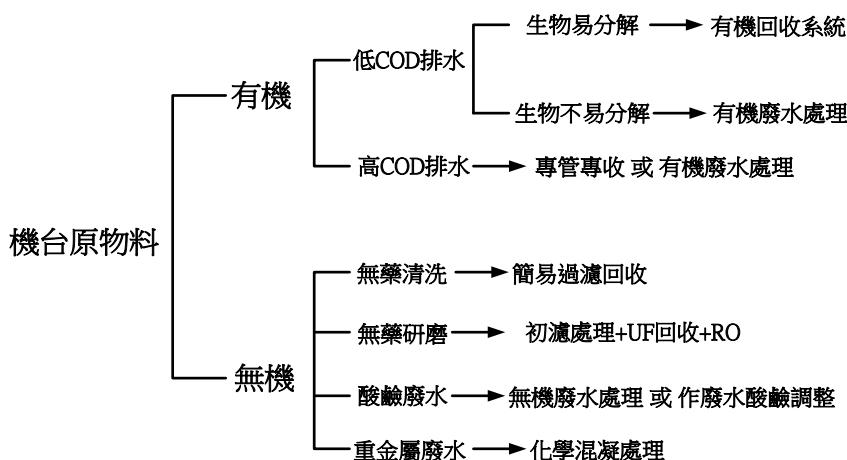


圖 3 機台排水分流架構範例

四、日月光高雄廠區水回收運轉成果

4.1 廠區水回收系統介紹

目前廠區現有回收系統如表 3 所示，包含雨水及無藥清洗回收系統，針對製程無添加化學品排水做優先處理，因排水僅有微量切割屑問題，可單純以過濾機制進行水處理回收直接至工業水池使用，以導電度作為管控標準，如圖 4 所示，而初濾設備更換則以壓差值進行觀察管控。

表 3 回收水處理系統及用途

	雨水系統	無藥清洗	無藥切割研磨	冷凝水回收
性質	雨水	切削屑	細研磨砥粒	空調箱冷凝排水
回收系統	一般儲水	初濾處理	UF+RO 處理	一般儲水
用途	民生次級用水	工業水池	初級純水	冷卻水塔循環水

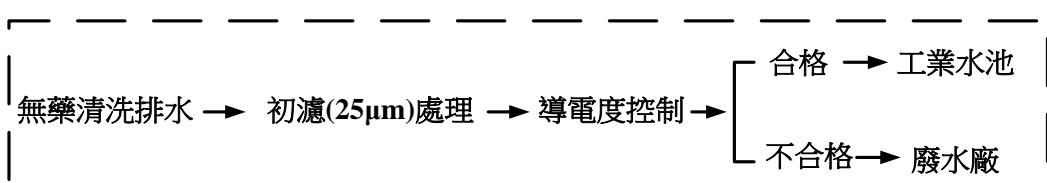


圖 4 無藥清洗廢水回收系統

無藥研磨廢水回收實廠分 A、B 兩廠進行討論，其進流水質如表 4 所示，可見無藥研磨廢水因未加藥其有機碳濃度低於 1 mg/L，切割廢水粒徑較大主要分布於 100-1,000 nm^[5]，而研磨廢水粒徑偏細其粒徑分布於 100-500 nm^[5]，處理流程如圖 5 所示，研磨廢水因添加研磨液其濁度較高如表 4 所示，且研磨廢水的二氧化矽濃度也較高，易有 UF 及 RO 膜結矽酸垢問題，在操作上以壓力作為管控，以 A 廠 UF 產水分析數據如表 5 所示，顯示在 UF 產水有總菌落數及溶解性矽酸鹽問題，而溶解性矽酸鹽造成的 UF 及 RO 膜結垢，隨積垢增加會造成 pH 值下降^[6]，故 pH 變

化也可做為矽酸結垢情形的參考，並定時進行 UF 及 RO 膜清洗，而 UF 膜以鹼性溶液清洗效果較佳，可改善膜阻塞的情形；UF 產水之總菌落數過高則經後端 UV 滅菌處理及 RO 處理。

表 4 廠區無藥切割研磨排水及回收系統產水之水質資料

廠區-系統	A 廠-切割	B 廠-切割	B 廠-研磨	出水要求
導電度 (us/cm)	5-10	5-10	<10	<5
濁度 (NTU)	1,000-3,000	500-2,000	>10,000	<0.5
總硬度 (mg/L as CaCO ₃)	<3	<3	<3	-
TOC (mg/L)	<1.0	<1.0	<1.0	<0.5
SiO ₂ (mg/L)	<10	<10	<50	<0.02

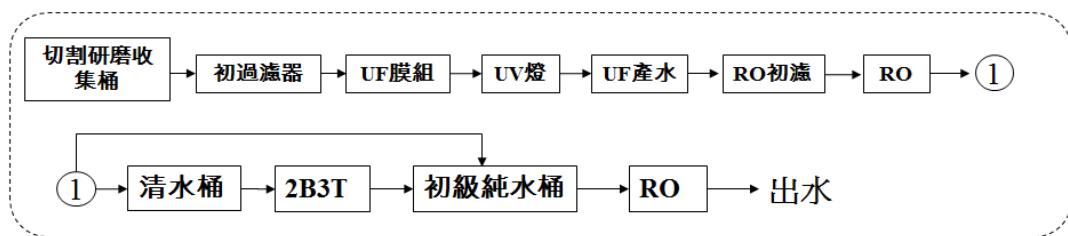


圖 5 無藥切割研磨廢水回收系統

表 5 A 廠 UF 產水之水質資料

濁度 (NTU)	總菌落數 (CFU/mL)	SiO ₂ (mg/L)	總有機碳 (mg/L)	導電度 (μmho/cm)
0.15	7.8×10 ⁴	4.92	0.4	18

而針對不同封裝製程，對供水要求也不同，故各回收系統產水經由水質管控系統分配到不同儲水系統，再經過廠區內純水系統進行再處理送至產線端使用，回收處理程序之排序皆考量排水粒徑及操作常見問題而進行規劃，如 UF 系統結垢、膜過濾機制、微生物菌落生長、RO 膜阻塞及 RO 藥洗酸鹼用量等操作問題皆因應各廠需求做調整。

4.2 廠區回收率探討

廠區回收率根據廠區自來水使用量作為計算基準，由於封測製程主要耗水點為無藥機台排水及機台冷卻水使用，故若此兩製程排水可有效回收，則整廠自來水總回收率可達 50-65%(如圖 6 所示)，而此兩製程回收水佔目前總回收系統的 45-60%(如圖 7 所示)，而 UF+RO 處理單元回收率最高可達 90%，其 RO 濃縮水排至廢水廠處理，而業界部分會回收至原水池再進行回收處理。

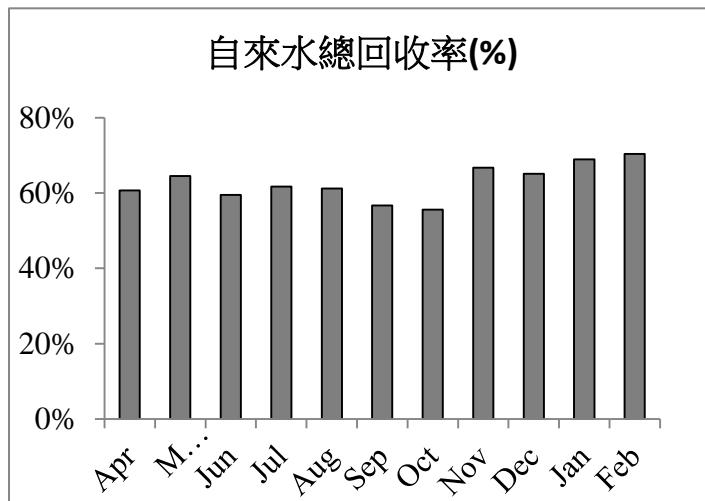


圖 6 B 廠區自來水總回收率

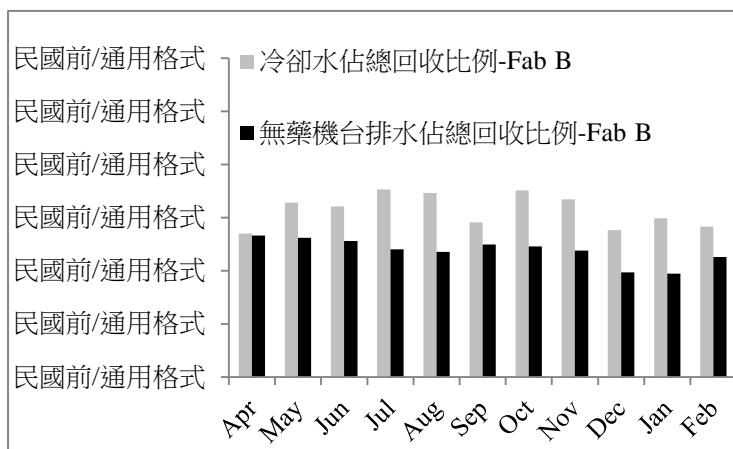


圖 7 無藥清洗排水及冷卻水回收系統佔廠區總回收比例

五、結論

無藥回收系統操作主要問題於隨操作時間增加產生膜結垢及通量減少問題，平常系統定時維護和清洗可改善結垢情形，而無藥系統主要為研磨砥粒等粒狀物問題，故規劃設計時須先進行機台排水的粒徑分布，才能選擇適當孔徑薄膜進行處理。

現有廠區因空間有限，目前僅針對無藥清洗機台排水進行回收處理，整體回收率仍有提高的空間，目前於新建廠時進行有藥清洗廢水回收系統規劃，針對有藥清洗廢水回收系統預以 MBR 串聯 RO 系統進行處理，盼能持續提高製程自來水用水回收率，減低廢水排放量及環境衝擊，並持續檢討改善廠區各系統用水量，提高回收率，在旱象頻繁的氣候變遷下，能減低對自來水源的依賴度，並以環境永續發展為目標，持續改善廠區對環境的衝擊。

參考文獻

1. 行業製程減廢及污染防治技術-半導體業介紹，產業製程清潔生產綠色技術資訊網，
http://ebooks.lib.ntu.edu.tw/1_file/moeaidb/012653/a03g013.pdf
2. 鍾鼎文，晶圓廠濕蝕刻機台排水分流系統與氟系廢水處理設施效能評估研究，國立交通大學碩士論文，民國 97 年。
3. 鄧宗禹、黃志彬、邱顯盛，化學機械研磨廢液之處理與回收，毫微米通訊，第九卷第一期。
4. 江世雄，半導體廠房水回收系統設計，國立成功大學碩士論文，民國 100 年。
5. 林昱宏，製程廢水回收處理系統之經濟效益研究，國立交通大學碩士論文，民國 99 年。
6. 沈世如，CMP 廢水中溶解矽於 UF 薄膜結垢之研究，國立交通大學碩士論文，民國 97 年。

高雄地區飲用水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物監測與去除

楊金鐘^{*}、顏嘉亨^{**}、王智龍^{**}

摘要

本研究主要含括二部份：(1)針對高雄地區某校園的自來水及飲水機出流水中殘留的 8 種鄰苯二甲酸酯類及 13 種藥物進行長期的監測；(2)使用一種同時具有過濾及吸附功能之新穎奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序來去除飲用水中之鄰苯二甲酸酯類及藥物。飲用水水質長期監測結果顯示，鄰苯二甲酸酯類在飲水機出流水中之殘留濃度相較於自來水中者來得低；而藥物在自來水及飲水機出流水中之殘留濃度則無明顯之差距。在同步電混凝/電過濾程序之最佳操作參數下，可以將自來水中的鄰苯二甲酸酯類及藥物濃度降低至 ND-52 ng/L，此試驗結果略優於飲水機出流水中之殘留濃度。此外，本文亦針對上述關切污染物的相關去除機制加以探討。

【關鍵字】飲用水、鄰苯二甲酸酯類、藥物、管狀複合膜、電混凝、電過濾

^{*}國立中山大學環境工程研究所 教授，國立中山大學新興污染物研究中心主任

^{**}國立中山大學環境工程研究所 研究生

一、前　　言

近十年來，新興污染物(emerging contaminants, ECs)的來源及宿命已被認定為最重要的環境議題之一^[1-5]。新興污染物被發現存在於多種的表面水體^[1,6-8]、都市污水處理廠放流水中^[3,6,9-11]及自來水廠之各項處理單元^[3,6,9-11]，甚至殘留在飲用水中^[8,12]。水中新興污染物主要被檢測到之濃度範圍介於 ng/L 到 μg/L 之間，其濃度遠低於水中常見之有機物^[3,6,10,13]。

有關國內飲用水中之新興污染物(例如：環境荷爾蒙、藥物及個人保健用品)殘留量之論文發表極少，2011 年間，本研究團隊曾經針對高雄市大樹、大寮、鳳山、岡山、鼓山、路竹、林園、楠梓、鳥松、橋頭、前金、前鎮、仁武、三民、小港及左營等 16 個行政區隨機選擇 16 個採樣點位進行自來水採樣。調查結果顯示，自來水樣品中可檢出乙醯胺酚 (平均濃度 1 ng/L，最高濃度 18 ng/L)、咖啡因 (平均濃度 8 ng/L，最高濃度 26 ng/L)、先鋒黴素 IV (平均濃度<1 ng/L，最高濃度 1 ng/L)、待克菲那 (平均濃度<1 ng/L，最高濃度 7 ng/L)、紅黴素 (平均濃度 44 ng/L，最高濃度 693 ng/L)、吉非羅齊 (平均濃度<1 ng/L，最高濃度 5 ng/L)、布洛芬 (平均濃度 1 ng/L，最高濃度 8 ng/L)、酮洛芬 (平均濃度<1 ng/L，最高濃度 3 ng/L)、礦胺甲噁唑 (平均濃度 2 ng/L，最高濃度 25 ng/L) 及三氯沙 (平均濃度 6 ng/L，最高濃度 45 ng/L) 等 10 種藥物，其中，先鋒黴素 IV、待克菲那、吉非羅齊、酮洛芬及礦胺甲噁唑之相對標準偏差達 400% (共 16 筆數據)，此表示自來水樣品中新興污染物檢出濃度差異性大且重複性差。另外，於 10 種被檢出的藥物中，以咖啡因的出現頻率最高，其檢出率高達 75%^[14]。2012 年間，本研究團隊針對供給高雄地區民生用水的 6 大淨水場出水水質進行連續 6 個月監測，選定使用淨水場供水之 11 所國民小學及 1 所使用地下水之國民小學廚房採集水樣檢驗，以不同淨水場所供給之民生用水水質進行比較，並同時採集及檢驗廚房內經逆滲透處理之烹飪用水，進而比較逆滲透處理系統 (含離子交換樹脂處理單元) 對於關切的藥物類及鄰苯二甲酸酯類(俗稱“塑化劑”或“增塑劑”)的去除效率，歷經連續 6 個月採樣及檢驗，綜合調查結果 (共 144 筆數據) 發現，經過自來水廠淨化程序處理的民生用水，依然可在選定的 11 所國民小學廚房內之自來水中檢測出含有 ng/L (ppt)濃度等級之 15 種關

切的藥物類及鄰苯二甲酸酯類殘留，針對水樣所檢出各種關切的污染物 6 次平均濃度之比較發現，除了澄清湖淨水場代表採樣點位被檢出較高平均濃度的先鋒黴素 IV (3 ng/L，檢出率為 17%) 外，其餘代表採樣點位之水樣被檢出的抗生素藥物類平均濃度皆小於 1 ng/L；咖啡因 (平均濃度為 5-11 ng/L，檢出率為 75-83%) 及三氯沙 (平均濃度為 1-4 ng/L，檢出率為 42-67%) 被普遍檢出於每個採樣點位之水樣；大樹區地下水樣品被檢出較高平均濃度的鄰苯二甲酸二丁酯(di-n-butyl phthalate; DnBP) (226 ng/L，檢出率為 100%)；而坪頂淨水場代表採樣點位之水樣被檢出較高平均濃度的鄰苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(di-(2-ethylhexyl) phthalate; DEHP) (172 ng/L，檢出率為 100%) 及鄰苯二甲酸二異壬酯 (di-iso-nonyl phthalate; DiNP) (162 ng/L，檢出率為 100%)^[15]。同樣在 2012 年，本研究團隊也調查與比較台灣北部及南部的 2 個學術研究機構 (N 區及 S 區) 其飲用水(自來水及飲水機出流水)中之藥物及鄰苯二甲酸酯類含量的同異性，其中，自來水水質調查結果顯示，N 區較 S 區水質佳，且在所有自來水水樣中可檢出紅黴素平均濃度為 ND-2 ng/L；咖啡因平均濃度為 ND-13 ng/L；礦胺甲噁唑平均濃度為 ND-<1 ng/L；三氯沙平均濃度為 ND-16 ng/L；鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP) 平均濃度為 ND-45 ng/L；鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP) 平均濃度為 18-61 ng/L；及鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP) 平均濃度為 9-238 ng/L^[16]。

部份的研究^[17-19]指出，許多的新興污染物對於水中生物具有慢性毒性以及對人體健康有潛在的風險；而許多新興污染物(例如：鄰苯二甲酸酯類(phthalate esters, PAEs)^[12] 與藥物及個人保健用品(pharmaceuticals and personal care products, PPCPs)^[20])另具有一項特點，就是它們並非皆可長期存在於水環境介質中，但由於人類的廣泛使用以及其穩定的轉化率，使其持續於一般水體環境中被檢出。

國外許多的報導^[2,4,6,21]已證實，新興污染物於水體介質的完全去除被認為是極為困難的，一般都市污水處理廠只能部分地將其自水中移除。另一方面，多項常見水處理技術(例如：高級氧化程序(advanced oxidation processes, AOPs)^[24-26]、活性碳吸附^[27-29]、超過濾(ultrafiltration, UF)^[30-33]、奈過濾(nanofiltration, NF)^[33-36]及逆滲透(reverse osmosis, RO)^[24,37,38]等)亦被使用於水中新興污染物之去除研究上，但相關結果也顯示無法完整地去除水中所有的新興污染物。在國內，本研究團隊先前針

對高雄地區國民小學廚房烹飪用水中之藥物及塑化劑殘留監測調查結果亦顯示，逆滲透處理系統對於水體中抗生素藥物類、非抗生素藥物類及鄰苯二甲酸酯類 ppt 濃度等級殘留量之去除能力有限^[15]；另外，針對台灣南北部自來水中之藥物及鄰苯二甲酸酯類殘留調查與比較之研究結果亦顯示，供給台灣南北部的自來水淨水場處理設備及飲水機處理系統，皆對於 ppt 濃度等級之藥物及鄰苯二甲酸酯類殘留未能完全有效加以去除^[16]。隨著生活水準之提高，民眾對於飲用水水質之要求日漸提高，即使新近修正發布的飲用水水質標準(103 年 1 月 9 日)也沒有管制藥物及鄰苯二甲酸酯類化合物。因此，開發新穎的處理技術以有效去除飲用水中的各種新興污染物確實有其必要性。

目前，欲經濟有效地去除廢水或自來水中之新興污染物與其他有機物仍是很大的挑戰。有鑑於日益嚴苛的水質管制標準，薄膜處理程序已被廣泛地認為是一具有可行性之技術。Acero et al.^[33] 利用超過濾及奈過濾及奈過濾(或稱“奈米過濾”)程序針對 11 種選定之新興污染物進行試驗，其結果指出超過濾相對於奈過濾之處理效率不佳，標的污染物之去除效率皆低於 50% 以下。Yoon et al.^[32]的研究指出，奈過濾確實可有效去除 PPCPs，但對於其他關切的新興污染物則不然。此外，奈過濾及逆滲透程序被應用在 PAEs 及 PPCPs 去除的多項研究報導^[31,36-38]，其相關結果顯示出差異極大的去除效率，範圍介於 10-99% 之間。相關研究^[39,40]曾指出，若欲使用薄膜程序去除如此廣泛族群之新興污染物，選擇正確的薄膜材質及其特性則是一個關鍵點，薄膜對於污染物之去除機制包括：尺寸排除、薄膜吸附、電性排斥...等^[24,32,33,35]。簡言之，尺寸排除效應其主要發生在當薄膜孔徑小於或相當於標的新興污染物之分子尺寸，故可將該污染物質排除在濾液外，該現象通常發生在奈過濾及逆滲透膜上；而薄膜吸附及電性排斥效應則被認為是超過濾膜去除水中新興污染物之主要機制，係因其較大之薄膜孔徑無法有效去攔阻該些污染物質，故須藉由污染物被吸附於薄膜或者與薄膜間電性相異之排斥力來進行水中新興污染物之去除。

超過濾雖然在去除水中新興污染物之效能上並不突出^[30,32,33]，但在水處理方面依然是相當常見的處理單元，主要係相對於奈過濾及逆滲透而言，超過濾具有耗能較低及濾液通量較大之優點。反之，奈過濾與逆滲透二者雖然對於水中某些新興污染物之去除可獲得不錯之去除效率，但其去除效果並非全面性的^[33,35,36]，對於不同

種類之新興污染物彼此間之去除效能差異頗大。因此，對於新興污染物之去除而言，開發一個具有高處理效率及濾液通量之薄膜處理程序則是亟需的。

為了符合前述的需求，本研究團隊乃利用新穎之同步電混凝/電過濾(simultaneous electrocoagulation and electrofiltration；EC/EF)專利技術展開本文所述之相關研究與探討。同步電混凝/電過濾技術係由本文第一作者所開發^[41]，且已被應用在去除含奈米顆粒之多種廢水^[42-45]。近年來，該技術更與一功能性奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合(簡稱為“新穎電薄膜處理模組”)，針對水中殘留藥物之去除進行試驗，其結果指出在適當之操作條件下，對於水中殘留的咖啡因、紅黴素及礦胺甲噁唑具有 95%以上之去除效率；而乙醯胺酚之去除效率則約為 78%^[46,47]。雖然由前述試驗結果來看，該新穎電薄膜處理模組已具有優異之去除效能，但對於普遍存在於各種水體(包括：自來水、瓶裝水、山泉水、地表水及地下水等)中許多種類之新興污染物去除而言，相關之試驗仍屬起步階段，有待持續研究與探討。

本研究內容主要含括二部份：(1)針對高雄地區某校園的飲用水(自來水及飲水機出流水)中殘留的 8 種鄰苯二甲酸酯類及 13 種藥物進行從 2011 年 3 月至 2013 年 7 月期間之長期監測；(2)使用一新穎奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序(簡稱“新穎電薄膜處理模組”)來去除自來水中之鄰苯二甲酸酯類及藥物，處理後之濾液水質則與飲水機出流水水質加以比較。此外，本研究亦針對上述新穎電薄膜處理模組去除關切的鄰苯二甲酸酯類及藥物其相關機制加以探討。

二、實驗材料與方法

2.1 化學藥劑

在本研究中，關切的鄰苯二甲酸酯類(俗稱“塑化劑”或“增塑劑”)共有 8 種，分別為鄰苯二甲酸丁基苯甲酯 (butyl benzyl phthalate; BBP)、鄰苯二甲酸二丁酯(di-n-butyl phthalate; DnBP)、鄰苯二甲酸二異癸酯 (di-iso-decyl phthalate; DiDP)、鄰苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(di-(2-ethylhexyl) phthalate; DEHP)、鄰苯二甲酸二乙

酯(diethyl phthalate; DEP)、鄰苯二甲酸二甲酯(dimethyl phthalate; DMP)、鄰苯二甲酸二異壬酯(di-iso-nonyl phthalate; DiNP)、鄰苯二甲酸二正辛酯(di-n-octyl phthalate; DnOP)。另外，關切的藥物共有 13 種，分別為咖啡因(caffeine)、紅黴素(erythromycin)、待克菲那(diclofenac)、1,1-二甲基雙胍鹽酸鹽(1,1-dimethylbiguanide hydrochloride)、四環素(tetracycline)、乙醯胺酚(acetaminophen)、先鋒黴素 IV(cephalexin)、磺胺甲噁唑(sulfamethoxazole)、吉非羅齊(gemfibrozil)、布洛芬(ibuprofen)、酮洛芬(ketoprofen)、萘普生(naproxen)及三氯沙(triclosan)。前述化合物之檢測分析用標準品皆符合美國化學學會(American Chemical Society, ACS)等級。表 1 及表 2 則分別簡列出該些化合物之基本性質及利用液相層析串聯質譜儀(LC-MS/MS)分析之重要參數。

表 1 關切的 8 種鄰苯二甲酸酯類其基本組成及利用 LC-MS/MS 分析之重要參數

鄰苯二甲酸酯類	CAS 編號	化學式	分子量 (g/mol)	離子源模式	子母離子對 (m/z)	裂解電壓 (eV)	碰撞電壓 (eV)
鄰苯二甲酸丁基苯甲酯 (butyl benzyl phthalate; BBP)	85-68-7	C ₁₉ H ₂₀ O ₄	312	正	313→205, 149	72	1, 5
鄰苯二甲酸二丁酯 (di-n-butyl phthalate; DnBP)	84-74-2	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	278	正	279→205, 149	72	1, 9
鄰苯二甲酸二異癸酯 (di-iso-decyl phthalate; DiDP)	26761-40-0	C ₂₈ H ₄₆ O ₄	446	正	447→149, 85	104	25, 25
鄰苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 (di-(2-ethylhexyl) phthalate; DEHP)	117-81-7	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	390	正	391→279, 167	140	5, 15
鄰苯二甲酸二乙酯 (diethyl phthalate; DEP)	84-66-2	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	222	正	223→177, 149	60	1, 13
鄰苯二甲酸二甲酯 (dimethyl phthalate; DMP)	131-11-3	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	194	正	195→163, 133	55	5, 21
鄰苯二甲酸二異壬酯 (di-iso-nonyl phthalate; DiNP)	28553-12-0	C ₂₆ H ₄₂ O ₄	418	正	419→149, 71	104	21, 13
鄰苯二甲酸二正辛酯 (di-n-octyl phthalate; DnOP)	117-84-0	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	390	正	391→261, 121	104	1, 53

表 2 關切的 13 種藥物其基本組成及利用 LC-MS/MS 分析之重要參數

藥物	CAS 編號	化學式	分子量 (g/mol)	離子源模式	子母離子對 (m/z)	裂解電壓 (eV)	碰撞電壓 (eV)
咖啡因 (caffeine)	58-08-2	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	194	正	195→138, 110	112	17, 21
紅黴素 (erythromycin)	114-07-8	C ₃₇ H ₆₇ NO ₁₃	733	正	735→576, 158, 116	139	17, 29, 45
待克菲那 (diclofenac)	15307-79-6	C ₁₄ H ₁₁ Cl ₂ NO ₂	295	負	294→250, 214	82	5, 17
1,1-二甲基雙胍鹽酸鹽 (1,1-dimethylbiguanide hydrochloride)	1115-70-4	C ₄ H ₁₂ ClN ₅	165.5	正	130→71, 60	77	21, 9
四環素 (tetracycline)	60-54-8	C ₂₂ H ₂₄ N ₂ O ₈	444	正	445→427, 410	110	8, 12
乙醯胺酚 (acetaminophen)	103-90-2	C ₈ H ₉ NO ₂	151	正	152→110, 65	107	13, 37
先鋒黴素IV (cephalexin)	15686-71-2	C ₁₆ H ₁₇ N ₃ O ₄ S	347	正	348→158, 106	72	5, 33
磺胺甲噁唑 (sulfamethoxazole)	723-46-6	C ₁₀ H ₁₁ N ₃ O ₃ S	253	正	254→156, 92	110	12, 12
吉非羅齊 (gemfibrozil)	25812-30-0	C ₁₅ H ₂₂ O ₃	250	負	249→127, 121	92	1, 5
布洛芬 (ibuprofen)	31121-93-4	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206	負	205→161	55	1
酮洛芬 (ketoprofen)	22071-15-4	C ₁₆ H ₁₄ O ₃	254	正	255→209, 105, 77	129	9, 21, 49
萘普生 (naproxen)	22204-53-1	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	230	負	229→185, 169	60	1, 25
三氯沙 (triclosan)	3380-34-5	C ₁₂ H ₇ Cl ₃ O ₂	289.5	負	287→35	75	4

2.2 自來水及飲水機出流水樣品採集

自來水及飲水機出流水樣品係採集自台灣南部某校園，於 2011 年 3 月至 2013 年 7 月期間進行採樣，分別於 2011、2012 及 2013 年採集 45、10 及 32 批次水樣。

樣品採集程序係遵循我國環保署標準方法 NIEA W101.54A^[48]。全部水樣皆分別被盛裝於 1 L 棕色玻璃瓶中，並存放於 4°C 環境下，為了預防水樣中關切污染物的降解，所有樣品皆於採集後 14 天內分析完畢。

2.3 奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜之製備及特性分析

2.3.1 奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜製備

本研究所採用的外壓式(outside-in)奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜其製備方法可參閱本研究團隊先前之報導^[42,47]。簡言之，製備方法可以分為 3 個步驟：(1) 利用擠出成形法製備氧化鋁陶瓷基材(管狀支撐體；內、外徑分別為 0.6 cm 及 1 cm；平均孔徑為 1 μm)；(2)披覆聚偏二氯乙烯(polyvinylidene chloride, PVDC)於基材上，並於高溫下將 PVDC 碳化而形成碳/氧化鋁複合膜；最後，(3)利用旋轉浸鍍法(spin-coating method)將碳/氧化鋁複合膜浸泡於硫酸鐵溶液中，乾燥後再使用甲烷作為碳源進行化學氣相沉積 (chemical vapor deposition, CVD)程序，即可獲得奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜，作為後續同步電混凝/電過濾程序使用。

2.3.2 奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜特性分析

奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜之孔徑分佈及平均孔徑係利用蒸氣壓氣體滲透裝置進行量測，其詳細結果請參見先前之報導^[43,47]。至於此管狀複合膜之顯微結構則利用環境掃描式電子顯微鏡(environmental scanning electron microscopy, ESEM)進行觀察。

2.4 同步電混凝/電過濾(EC/EF)試驗

本研究利用奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序形成一新穎電薄膜處理模組，再用來評估其去除自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物之能力。每次 EC/EF 試驗開始前，先將 8 L 甲醇水溶液(5 vol %)導入新穎電薄膜處理模組及管路中，藉以清洗可能殘留之污染物。在本研究中，處理模組係以濃縮液迴流為操作模式；而該外壓式奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜之過濾面積約 47.1 cm²；陽極為鋁或不銹鋼，陰極則為不銹鋼(SS 316)，陰、陽極間距為 1 cm。

本研究之新穎電薄膜處理模組試驗主要以探討電場強度之變化(0、10、20 及 30 V/cm)為主，故將透膜壓差(294 kPa)及掃流速度(6.91 cm/s)予以固定。表 3 為本研究相關試驗之實驗設計與參數配置，藉由 3 種不同之過濾模式來評估其個別的去除效能，以及相關之去除機制。此新穎電薄膜處理模組試驗過程皆沒有針對試驗用之自來水進行 pH 調整，濾液收集端則利用電子天平連接電腦每隔 20 秒記錄一次收集量，而濾液則於試驗結束後進行標的污染物之分析。

表 3 新穎電薄膜處理模組之實驗設計與參數配置

試驗組別	過濾模式	陽極材質	電場強度 (V/cm)	透膜壓差 (kPa)	掃流速度 (cm/s)
1	CFF ^a	---	0	294	6.91
2	EF ^b	SS 316 ^c	10	294	6.91
3	EF	SS 316	20	294	6.91
4	EF	SS 316	30	294	6.91
5	EC/EF ^d	Al	10	294	6.91
6	EC/EF	Al	20	294	6.91
7	EC/EF	Al	30	294	6.91

^a一般的掃流過濾程序。^b 電過濾程序，陰極為不鏽鋼。^c 不鏽鋼材質。^d 同步電混凝/電過濾程序，陰極為不鏽鋼。

2.5 鄰苯二甲酸酯類與藥物之固相萃取及分析

本研究利用商用 Oasis HLB 萃取管柱(500 mg, 6 mL, Waters, USA)針對水中鄰苯二甲酸酯類及藥物進行萃取，其步驟簡述如下：(1)利用 6 mL 甲醇及 6 mL 去離子水進行萃取管柱活化；(2)將 1 L 水樣導引流經萃取管柱，流速為 1-2 滴/秒；(3)以甲醇水溶液(5 vol%)進行沖洗；(4)以 6 mL 甲醇沖提出萃取物；(5)沖提物於 40°C 下以氮氣吹乾；(6)針對鄰苯二甲酸酯類與藥物分別以甲醇及甲醇水溶液(25 vol%)回溶至 1 mL。最後，濃縮液經 0.22 μm 過濾頭(13 mm diameter, PTFE)後，以液相層析串聯質譜儀(LC-MS/MS)進行分析。關切的鄰苯二甲酸酯類及藥物其質譜儀設定參數詳見表 1 及表 2，而每一個化合物之檢量線其最小平方迴歸值(least-squares regression analysis)皆大於 0.990，且每個樣品其重覆分析之差異百分比亦小於 2%，確保所有分析皆具有其可靠性。

三、結果與討論

3.1 奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜之顯微結構及其相關分離機制

本節主要針對奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜之顯微結構以及其結合同步電混凝/電過濾程序處理自來水中新興污染物之去除機制進行探討。顯微結構部分，圖 1a 顯示管狀支撐體的表面較為粗糙，有明顯的氧化鋁顆粒輪廓；在支撐體表面再披覆碳質中間層而形成碳/氧化鋁複合膜後，薄膜表面則較為光滑(見圖 1b)；接續，再於碳質中間層上面使其生長奈米碳纖維，製備完成之奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜表層觀測到的影像如圖 1c 及圖 1d 所示，從掃描式電子顯微鏡(SEM)影像可以得知，其奈米碳纖維直徑約介於 100-150 nm，彼此交錯生長呈毛毯狀。

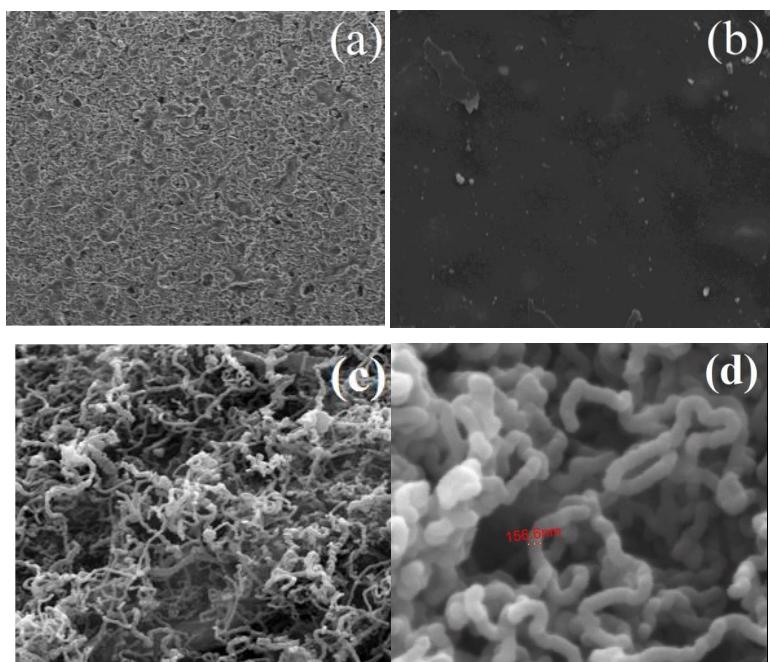


圖 1 氧化鋁基材及其碳質複合膜之表面顯微結構圖：(a)氧化鋁基材(3,000X)；(b)複合膜碳質中間層(3,000X)；(c)表層奈米碳纖維(3,000X)；(d)表層奈米碳纖維(30,000X)

先前，本研究團隊曾經提出關於奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序處理水中新興污染物的概念模型示意圖^[47]，為了方便解說，本文另行將其改繪，如圖 2^[49]所示，其中，氧化鋁基材係作為管狀複合膜支撐體使用，而碳質中間層則扮演著縮減薄膜孔洞及提高分離選擇性之角色，而表層的毛毯狀奈米碳纖維除了可以提供薄膜吸附污染物的位址，亦可增加攔截及富集污染物的機會。因此，當奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序時，處理系統將具有下列去除機制：(1)來自薄膜孔徑及毛毯狀奈米碳纖維之尺寸排除效應；(2)奈米碳纖維之吸附^[50]；(3)電混凝效應；(4)電泳效應；及(5)電性排斥^[51]。

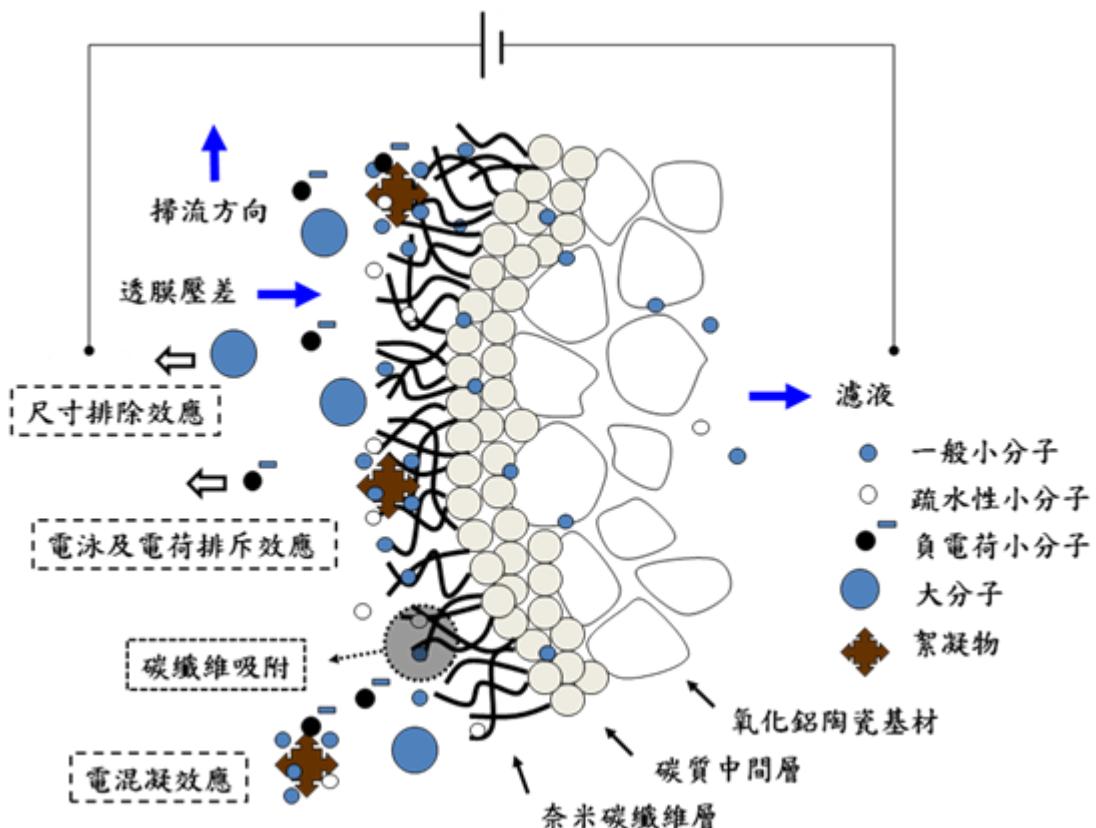


圖 2 奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜部分結構示意圖及其污染物去除機制^[49]

3.2 自來水及飲水機出流水中鄰苯二甲酸酯類和藥物之殘留濃度長期監測

如上所述，自來水及飲水機出流水樣品係在 2011 年 3 月至 2013 年 7 月期間採集自台灣南部某校園，主要針對關切的 8 種鄰苯二甲酸酯類和 13 種藥物進行監測。由於監測數據相當龐大，故後續分析結果將以平均濃度呈現，分析結果詳見表 4 及表 5。根據自來水及飲水機出流水樣品分析結果，關切的 8 種鄰苯二甲酸酯類其濃度主要介於 ND(未檢出)-316 ng/L 之間；而 13 種藥物其濃度主要介於 ND-103 ng/L 之間。由表 4 可知，鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)、鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP) 及鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)三種塑化劑最常被發現殘留在自來水樣品中，主要濃度範圍介為 69-276 ng/L，該數值相對略高於飲水機出流水樣品。此外，飲水機出流水中殘留之鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)其濃度甚高(316 ng/L)，其潛在健康風險值得加以重視。國外研究的部分，Serodio 和 Nogueira^[12]曾指出葡萄牙里斯本地區之自來水含有 0.52 μg/L 之鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)及 0.06 μg/L 之鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)；Luks-Betlej et al.^[21] 之研究亦顯示，德國萊比錫地區和波蘭卡托維茲地區其飲水機出流水中通常可檢出鄰苯二甲酸二乙酯 (DEP)、鄰苯二甲酸丁基苯甲酯 (BBP)、鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)及鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)等 4 種塑化劑。無疑地，自來水及飲水機出流水中之塑化劑殘留問題似乎普遍存在於世界各地，而其殘留濃度範圍主要皆在 ng/L 等級。相對而言，台灣的飲水機出流水中鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)之殘留濃度(34-283 ng/L)確實高於國外者，由於鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)為一內分泌干擾物質，且其半生期約在 2-15 天之間^[52]，在水體環境中屬於較難降解之物質，上述高 DEHP 殘留濃度的現象顯然已經使得台灣居民暴露於高健康風險之下。

在藥物方面(見表 5)，於自來水及飲水機出流水中，咖啡因、酮洛芬及三氯沙為最常被發現之殘留藥物，但比較自來水及飲水機出流水中其藥物殘留濃度之差異並不很大，此可能與殘留濃度相對皆很低有關。顯然地，飲水機系統的離子交換以及逆滲透程序並無法有效地去除前述關切的藥物殘留，而該現象並非只存在於台灣，其他國家之飲水機出流水亦被報導有相同濃度等級(ng/L)之藥物殘留量^[9,10,22]。除此之外，2013 年之分析結果顯示，酮洛芬的檢出率相對高於前兩年；但紅黴素則反

之，2012 及 2013 年的自來水及飲水機出流水樣品中則未被檢測出，該現象可能與此地區一般民眾用藥習慣或種類改變有關。另一方面，三氯沙則具有檢出率提高但殘留濃度卻不高之現象，推斷該化合物可能於給水管線中轉化成其它穩定態物質(例如：甲基三氯沙)，但此論述仍須進一步驗證。

表 4 於 2011 年至 2013 年期間自來水及飲水機出流水中殘留的鄰苯二甲酸酯類
平均濃度值比較

鄰苯二甲酸酯類	LOQ ^a (ng/L)	平均濃度 (ng/L)					
		自來水			飲水機出流水		
		2011 (n=10 ^b)	2012 (n=5)	2013 (n=8)	201 (n=9)	2012 (n=3)	2013 (n=8)
鄰苯二甲酸丁基苯甲酯 (BBP)	1	34 (70 ^c)	ND ^e	ND	33(78)	6 (67)	ND
鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)	1	-- ^d	94 (80)	103(100)	--	47 (100)	12 (100)
鄰苯二甲酸二異癸酯 (DiDP)	1	--	15 (40)	12 (38)	--	1 (33)	2 (63)
鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)	1	131(100)	239(100)	192(100)	92(100)	283(100)	34 (100)
鄰苯二甲酸二乙酯 (DEP)	1	--	7 (40)	1 (63)	--	3 (67)	1 (38)
鄰苯二甲酸二甲酯 (DMP)	1	--	2 (20)	ND	--	2 (33)	2 (63)
鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)	1	447 (100)	69 (60)	276 (100)	316(100)	ND	69 (100)
鄰苯二甲酸二正辛酯 (DnOP)	1	--	48 (20)	21 (38)	--	46 (33)	13 (63)

^a 定量極限。^b 樣品數。^c 檢出率(%)。^d 未分析。^e 未檢出。

表 5 於 2011 年至 2013 年期間自來水及飲水機出流水中殘留的藥物
平均濃度值比較

藥物	LOQ ^a (ng/L)	平均濃度 (ng/L)					
		自來水			飲水機出流水		
		2011 (n=15 ^b)	2012 (n=2)	2013 (n=8)	2011 (n=11)	2012 (n=0)	2013 (n=8)
咖啡因	1	17 (87 ^c)	3 (100)	13 (100)	22 (91)	-- ^d	10 (100)
紅黴素	1	2 (7)	ND	ND	11 (45)	--	ND
待克菲那	1	ND ^e	ND	ND	ND	--	ND
1,1-二甲基雙胍鹽酸鹽	1	ND	ND	ND	ND	--	ND
四環素	1	ND	ND	ND	ND	--	ND
乙醯胺酚	1	3 (33)	ND	ND	7 (36)	--	ND
先鋒黴素IV	1	ND	ND	ND	ND	--	ND
礦胺甲噁唑	1	3 (13)	ND	2 (75)	13 (36)	--	2 (38)
吉非羅齊	1	ND	ND	ND	17 (9)	--	ND
布洛芬	5	10 (7)	ND	ND	ND	--	ND
酮洛芬	1	ND	ND	2 (100)	3 (18)	--	3 (100)
萘普生	1	ND	ND	ND	ND	--	ND
三氯沙	1	49 (34)	ND	14 (75)	103 (45)	--	8 (75)

^a 定量極限。^b 樣品數。^c 檢出率(%)。^d 未分析。^e 未檢出。

3.3 新穎電薄膜處理模組去除自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物

3.3.1 同步電混凝/電過濾程序之濾液通量評估

在 3 種不同薄膜處理程序試驗中，本研究針對不同的電場強度(包括：0、10、20 和 30 V/cm)來探討其濾液通量之變化。試驗結果如圖 3 所示，薄膜處理程序於開始時，所有的試驗組別同時皆具有最大之濾液通量，而當處理時間進行到了 10-30 分鐘時，會有薄膜逐漸受到阻塞而濾液通量漸趨於平緩之現象產生。

比較試驗結果的穩定濾液通量大小可知，施加電場之試驗組別(Tests 2-4)其濾液通量相對較未施加電場之組別(Test 1)來得高，且電場強度的提升與濾液通量變化具有正相關，無疑地，該現象與施加電場所產生之電泳力效應有關。此外，試驗

結果顯示，施加電場強度 30 V/cm 的試驗組別其濾液通量相較於施加電場強度 20 V/cm 的試驗組別並未有太多的提升，推斷該處理系統的臨界電場強度(critical electric field strength, CEFS)可能介於 20~30 V/cm 有關，類似的現象在其他研究^[42,45,53]中亦曾被報導過。其實，早有研究^[54,55]指出，一般而言，當電過濾程序到達臨界電場強度時，該處理程序會具有最大之濾液通量及較佳之濾液品質。而在同步電混凝/電過濾程序之試驗(Tests 5-7)，施加電場強度 30 V/cm 的試驗組別其穩定濾液通量($28.3 \text{ L/m}^2 \text{ h}$)反而低於施加電場強度 20 V/cm 之試驗組別者($32.5 \text{ L/m}^2 \text{ h}$)。由圖 3 亦可發現，施加電場強度 30 V/cm 的試驗組別其濾液通量遞減現象亦較施加電場強度 10 V/cm 或 20 V/cm 之試驗組別者顯著，推斷該現象與電混凝程序有關，畢竟在較高之電場強度下，會有較強的電混凝效應而形成較多的絮凝物，此時，若掃流速度維持不變，則會加速薄膜阻塞速率，因而加速濾液通量之衰減。

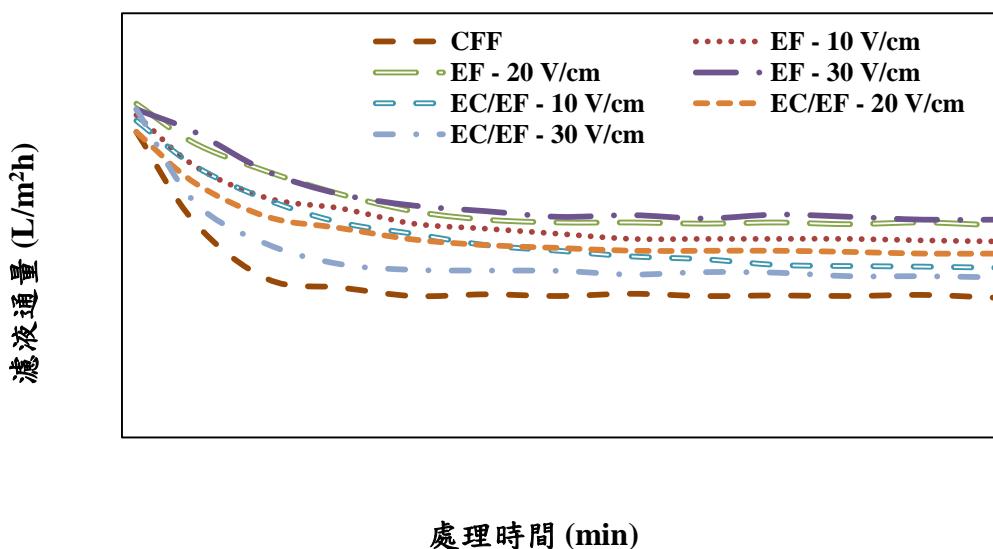


圖 3 3 種不同薄膜處理程序於不同電場強度下其濾液通量隨處理時間之變化圖

3.3.2 新穎電薄膜處理模組處理效能評估及相關機制探討

表 6 顯示本研究中所有薄膜處理程序試驗之處理結果，值得一提的是，表中僅列出檢出率>75%的 3 種鄰苯二甲酸酯類(DnBP、DEHP 及 DiNP)與 3 種藥物(咖啡因、酮洛芬及三氯沙)。相較於其他施加電場之試驗組別，一般的掃流過濾(Test 1)之處理結果其去除效率確實不彰，但仍有 20-45% 的去除率，推測此可能與管狀複合膜表層有毛毯狀之奈米碳纖維有關(註：奈米碳纖維具有疏水性及其大量的吸附位址)，即使一般的掃流過濾也可去除部分殘留於水中之鄰苯二甲酸酯類及藥物，此論述可由他人之相關研究加以佐證。文獻^[31,36]曾報導，薄膜的疏水性與其去除水中鄰苯二甲酸酯類之效能有關；此外，顆粒狀/粉末狀活性碳及奈米碳管/碳纖維亦是已被認定為去除水中新興污染物的可行處理技術^[24-26,46,47]；本研究團隊先前之研究^[47]也證實，朗謬爾模式(Langmuir model)可被用來描述奈米碳纖維對於水中殘留藥物的吸附行為，其平衡吸附量約為 2.07 mg/g。

於電過濾程序試驗組別(Tests 2-4)，鄰苯二甲酸酯類和藥物之去除效率分別介於 42-78% 及 0-77%，實言之，施加電場產生之電泳力除了能產生較高之濾液通量外，對於關切的鄰苯二甲酸酯類和藥物之去除亦能獲得較佳的成效。此外，於中性水體中，奈米碳纖維/碳/氧化鋁複合膜其表面電荷通常帶負電，其與水中帶負電之溶質產生電性排斥作用亦是可能之去除機制，因其他的研究^[32,33]曾報導薄膜表面與水中新興污染物之間的電荷排斥作用。

同步電混凝/電過濾試驗組別部分(Tests 5-7)，由表 6 之處理結果可知，其去除效率優於一般的掃流過濾及電過濾程序，對於關切的鄰苯二甲酸酯類及藥物之去除率分別介於 74-93% 及 62-99%。在本研究團隊先前之研究^[46,47]亦發現，利用相同的同步電混凝/電過濾程序於 30 V/cm 之電場強度下具有去除水中殘留藥物(包含：咖啡因、乙醯胺酚、紅黴素及磺胺甲噁唑)的一定能力，其去除率皆超過 75%。而在本研究中，同步電混凝/電過濾程序其針對鄰苯二甲酸酯類之去除效率明顯高於電過濾程序，證實電混凝效應於處理過程中具有其存在之價值，能有效地優化水質。此外，鄰苯二甲酸酯類化合物分子其水合直徑主要介於 1-2 nm 之間^[36]，該數值小於試驗使用之複合膜孔徑，故電混凝效應之機制主要在於其產生之絮凝體確實能有效地去捕捉水中的新興污染物分子(例如：鄰苯二甲酸酯類化合物)，且難以穿透薄

膜，使得關切的污染物其去除率增加。

另一方面，於表 6 之處理結果亦能發現，3 種藥物除了酮洛芬以外，於同步電混凝/電過濾程序與電過濾程序之試驗組別其去除率差異並不大。雖然於電過濾之試驗組別其酮洛芬之殘留濃度不高($\leq 9 \text{ ng/L}$)，但卻是可以穩定地定量到其數值；反之，在同步電混凝/電過濾之試驗組別則未檢出，此結果或許可歸因於電混凝效應。在本研究主要關切的 3 種藥物中，以酮洛芬之 pK_a 值為最低($pK_a = 4.45$ ， 25°C)，故其在水體中往往具有較大之負電性，因而更容易與電混凝產生之正電性 Al(OH)_2^+ 或 Al(OH)^{2+} 結合，進而形成較大之絮凝體。無庸置疑地，同步電混凝/電過濾程序之表現確實超越單純的電過濾程序。

表 6 三種薄膜處理程序於不同操作條件下針對自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物之處理效能比較

試驗組別	實驗參數			關切的鄰苯二甲酸酯類									關切的藥物								
	過濾模式	電場強度(V/cm)	鄰苯二甲酸二丁酯(DnBP)			鄰苯二甲酸二(2-乙基己基)(DEHP)			鄰苯二甲酸二異壬酯(DiNP)			咖啡因			酮洛芬			三氯沙			
			F ^d	P ^e	R% ^f	F	P	R%	F	P	R%	F	P	R%	F	P	R%	F	P	R%	
1	CFF ^a	0	83	67	19%	152	121	20%	263	191	27%	11	6	45	3	2	33%	28	16	43%	
2	EF ^b	10	88	39	56%	144	52	64%	255	147	42%	14	4	71%	2	2	0%	23	9	61%	
3	EF	20	94	21	78%	156	42	73%	283	109	61%	10	3	70%	1	1	0%	27	7	74%	
4	EF	30	92	24	74%	130	44	66%	274	102	63%	13	3	77%	3	1	67%	22	8	64%	
5	EC/EF ^c	10	77	13	93%	153	22	86%	285	74	74%	10	2	80%	4	ND ^g	>99%	21	8	62%	
6	EC/EF	20	92	9	90%	157	18	89%	277	52	81%	12	3	75%	2	ND	>99%	23	6	74%	
7	EC/EF	30	84	11	87%	142	25	82%	281	71	75%	9	2	78%	2	ND	>99%	26	6	77%	

^a 一般的掃流過濾程序。^b 電過濾程序。^c 同步電混凝/電過濾程序。^d 進流水濃度(ng/L)。^e 濾液濃度(ng/L)。^f 去除效率。^g 未檢出。

圖 4 為 3 種不同薄膜處理程序(一般的掃流過濾、電過濾及同步電混凝/電過濾)中選定之試驗組別其水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物之去除效率比較，而同步電混凝/電過濾之試驗組別(Test 6)具有最佳之處理效能，其鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)、

鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)、鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)、咖啡因、酮洛芬及三氯沙之去除效率分別為 90%、88.5%、81%、75%、>99% 及 74%。上述試驗結果顯示，利用碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序(亦即，新穎電薄膜處理模組)確實能有效地移除水中大部分之鄰苯二甲酸酯類和藥物，相信其具有其應用在處理水中其他新興污染物之潛力。

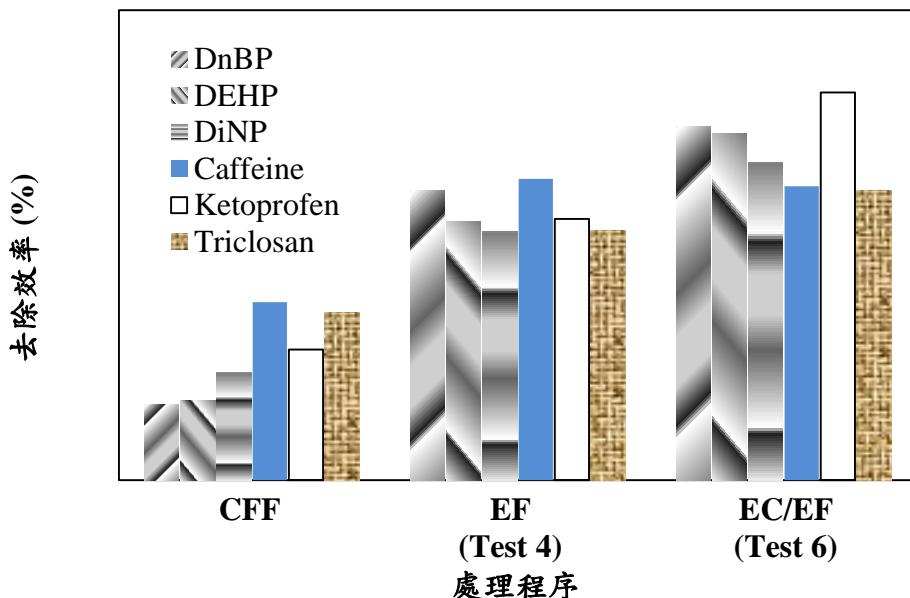


圖 4 三種薄膜處理程序其最佳組別處理自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物之處理效率比較

3.3.3 新穎電薄膜處理模組與飲水機系統之處理效能比較

雖然本研究進行之新穎電薄膜處理模組之試驗組別不多，但奈米碳纖維吸附、電混凝及電過濾效應已被認定是同步電混凝/電過濾程序之核心去除機制用來處理自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物。Test 6 組別其濾液中鄰苯二甲酸酯類及藥物之殘留濃度則被用來與飲水機系統處理後之出流水其殘留濃度進行比較(註：Test

6 試驗用的自來水及比較用之飲水機出流水係來自於同一個供水系統)。在本研究中，飲水機系統之處理單元包括 5 μm 聚丙烯纖維過濾、活性碳吸附、1 μm 聚丙烯纖維過濾、逆滲透程序及煮沸，而其去除自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物之主要程序為活性碳吸附及逆滲透程序。根據表 7 之比較結果，新穎電薄膜處理模組之去除效率確實可以媲美由數個處理單元串聯而成之飲水機系統。雖然有些文獻^[6,12,22]報導可利用傳統的活性污泥法、高級氧化法及各種薄膜程序等以去除水中之新興污染物，但相關研究^[8,12,21,23]結果顯示，仍然會有數十至數百 ng/L 之濃度殘留於飲用水中，該研究結果在在說明了開發新穎處理技術之必要性，尤其是針對水中 ng/L 濃度等級新興污染物之去除。本研究利用奈米纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序去除水中殘留的新興污染物證實的確可符合上述需求，且有實務應用之潛力。

表 7 新穎電薄膜處理模組與飲水機系統處理自來水中殘留的鄰苯二甲酸酯類及藥物之效能比較

化合物	自來水 (2013, n=8 ^a)	處理系統	
		新穎電薄膜處理 模組(n=3)	飲水機系統 (2013, n=8)
<u>鄰苯二甲酸酯類濃度 (ng/L)</u>			
鄰苯二甲酸二丁酯(DnBP)	39-121	9-13	6-19
鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)	62-253	18-25	23-56
鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)	57-426	52-74	38-92
<u>藥物濃度 (ng/L)</u>			
咖啡因	8-17	2-3	5-14
酮洛芬	1-4	ND ^b	2-3
三氯沙	ND-28	6-8	4-12

^a 樣品數。^b 未檢出。

四、結論

本研究針對國內某校園自來水及飲水機出流水中殘留的 8 種鄰苯二甲酸酯類化合物及 13 藥物於 2011 年 3 月至 2013 年 7 月期間進行了監測；另一部分，奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜結合同步電混凝/電過濾程序(簡稱“新穎電薄膜處理模組”)則被利用來去除自來水中殘留的上述新興污染物。主要之研究發現分述如下：

1. 飲用水長期監測結果顯示，關切的 8 種鄰苯二甲酸酯類及 13 種藥物其殘留濃度分別介於 ND-316 ng/L 及 ND-103 ng/L 之間。其中，鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)、鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP) 及鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)此 3 種鄰苯二甲酸酯類最常被發現殘留在自來水樣品中，其濃度值略高於飲水機出流水樣品者。另一方面，自來水及飲水機出流水中最常被發現之殘留藥物為咖啡因、酮洛芬及三氯沙，其中，三氯沙於 2013 年具有檢出率提高但殘留濃度卻不高之現象，推斷該化合物可能於給水管線中已經轉化成其它穩定態物質(例如：甲基三氯沙)所致。
2. 新穎電薄膜處理模組之試驗結果證實其的確具有處理水中 ng/L 濃度等級的鄰苯二甲酸酯類及藥物之能力，此新穎電薄膜處理模組處理自來水之結果顯示，鄰苯二甲酸二丁酯 (DnBP)、鄰苯二甲酸二(2-乙基己基) (DEHP)、鄰苯二甲酸二異壬酯 (DiNP)、咖啡因、酮洛芬及三氯沙之去除效率分別為 90%、88.5%、81%、75%、>99% 及 74%。
3. 新穎電薄膜處理模組對於關切的鄰苯二甲酸酯類及藥物之去除效率確實不遜於由 5 μm 聚丙烯纖維過濾、活性碳吸附、1 μm 聚丙烯纖維過濾、逆滲透程序及煮沸等處理單元串聯而成之飲水機系統。據此，此新穎電薄膜處理模組確實有實務應用之潛力。
4. 對於關切的鄰苯二甲酸酯類及藥物之去除，基本上，新穎電薄膜處理模組之優異性除了可歸功於同步電混凝/電過濾程序之電混凝及電過濾的特殊性能外，奈米碳纖維/碳/氧化鋁管狀複合膜之毛毯狀奈米碳纖維之吸附效應亦扮演著重要角色。

誌謝

本研究承蒙科技部(原名：國家科學委員會)補助研究經費(計畫編號：NSC 99-2221-E-110-037-MY3)，特此致上謝忱；另外，周宗享、邱鈺涵及湯佩玲三位碩

士生於研究期間協助樣品採集與部分實驗工作，特此一併致上謝忱。

參考文獻

- 1.D.W. Kolpin, E.T. Furlong, M.T. Meyer, E.M. Thurman, S.D. Zaugg, L.B. Barber, H.T. Buxton, Pharmaceuticals, hormones, and other organic waste contaminants in U.S. streams, 1999–2000: a national reconnaissance, *Environ. Sci. Technol.* 36 (2002) 1202–1211.
- 2.R. Loos, B.M. Gawlik, G. Locoro, E. Rimaviciute, S. Contini, G. Bidoglio, EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters, *Environ. Pollut.* 157 (2009) 561-568.
- 3.M. Clara, G. Windhofer, W. Hartl, K. Braun, M. Simon, O. Gans, C. Scheffknecht, A. Chovanec, Occurrence of phthalates in surface runoff, untreated and treated wastewater and fate during wastewater treatment, *Chemosphere* 78 (2010) 1078-1084.
- 4.N.A. Al-Odaini, M.P. Zakaria, M.I. Yaziz, S. Surif, Multi-residue analytical method for human pharmaceuticals and synthetic hormones in river water and sewage effluents by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *J. Chromat. A.* 1217 (2010) 6791-6806.
- 5.P. Verlicchi, A. Galletti, M. Petrovic, D. Barceló, Hospital effluents as a source of emerging pollutants: an overview of micropollutants and sustainable treatment options, *J. Hydrol.* 389 (2010) 416-428.
- 6.M. Kuster, M.J.L Alda, M.D. Hernando, M. Petrovic, J. Martín-Alonso, D. Barceló, Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin (Barcelona, Spain), *J. Hydrol.* 358 (2008) 112-123.
- 7.M.F. Rahman, E.K. Yanful, S.Y. Jasim, Occurrence of endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals in the aquatic environment and their removal from drinking water: challenges in the context of the developing world, *Desalination* 248 (2009) 578-585.

- 8.A. Kumar, I. Xagoraraki, Pharmaceuticals, personal care products and endocrine-disrupting chemicals in U.S. surface and finished drinking waters: a proposed ranking system, *Sci. Total Environ.* 408 (2010) 5972-5989.
- 9.T. Heberer, Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water, *J. Hydrol.* 266 (2002) 175-189.
- 10.M. Petrovic, S. Gonzalez, D. Barceló, Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water, *Trends Anal. Chem.* 22 (2003) 685-696.
- 11.R.M. Narbaitz, D. Rana, H.T. Dang, J. Morrissette, T. Matsuura, S.Y. Jasim, S. Tabe, P. Yang, Pharmaceutical and personal care products removal from drinking water by modified cellulose acetate membrane: Field testing, *Chem. Eng. J.* 225 (2013) 848-856.
- 12.P. Serodioa, J.M.F. Nogueira, Considerations on ultra-trace analysis of phthalates in drinking water, *Water Res.* 40 (2006) 2572-2582.
- 13.T. Heberer, Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data, *Toxicol. Lett.* 131 (2002) 5-17.
- 14.楊金鐘、王智龍、周宗享，高雄地區自來水中之藥物殘留初步調查，第 28 屆自來水研究發表會論文摘要集，p. 7，2011 年 11 月，台北市。
- 15.劉紹興、楊金鐘、王智龍、邱鈺涵，高雄地區國民小學廚房烹飪用水中之藥物及塑化劑殘留監測調查，『2012 (第 2 屆) 新興污染物論壇』 (EmCon Forum 2012) 論文集，p. 181-188，2012 年 9 月，高雄市。
- 16.楊金鐘、劉紹興、王智龍，台灣南北部自來水中之藥物及鄰苯二甲酸酯類殘留調查與比較，第 29 屆自來水研究發表會論文集光碟，2012 年 11 月，台中市。
- 17.D.R. Orvos, D.J. Versteeg, J. Inauen, M. Capdevielle, A. Rothenstein, V. Cunningham, Aquatic toxicity of triclosan, *Environ. Toxicol. Chem.* 21 (2002) 1338-1349.
- 18.A.H. Jones, N. Voulvoulis, J.N. Lester, Potential ecological and human health risks associated with the presence of pharmaceutically active compounds in the aquatic environment, *Crit. Rev. Toxicol.* 34 (2004) 335-350.
- 19.L.H. Santos, A.N. Araújo, A. Fachini, A. Pena, C. Delerue-Matos, M.C. Montenegro, Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic

- environment, J. Hazard. Mater. 175 (2010) 45-95.
- 20.D. Barceló, Emerging pollutants in water analysis, Trends Anal. Chem. 22 (2003) xiv–xvi.
- 21.K. Luks-Betlej, P. Popp, B. Janoszka, H. Paschke, Solid-phase microextraction of phthalates from water, J. Chromat. A. 938 (2001) 93-101.
- 22.P.E. Stackelberg, E.T. Furlong, M.T. Meyer, S.D. Zaugg, A.K. Henderson, D.B. Reissman, Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water-treatment plant, Sci. Total Environ. 329 (2004) 99-113.
- 23.S. Kleywelt, V. Pileggi, P. Yang, C. Hao, X. Zhao, C. Rocks, S. Thach, P. Cheung, B. Whitehead, Pharmaceuticals, hormones and bisphenol A in untreated source and finished drinking water in Ontario, Canada - Occurrence and treatment efficiency, Sci. Total Environ. 409 (2011) 1481-1488.
- 24.S.A. Snyder, S. Adham, A.M. Redding, F.S. Cannon, J. DeCarolis, J. Oppenheimer, E.C. Wert, Y. Yoon, Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals, Desalination 202 (2007) 156-181.
- 25.D.P. Grover, J.L. Zhou, P.E. Frickers, J.W. Readman, Improved removal of estrogenic and pharmaceutical compounds in sewage effluent by full scale granular activated carbon: Impact on receiving river water, J. Hazard. Mater. 185 (2011) 1005-1011.
- 26.J.L. Acero, F.J. Benitez, F.J. Real, F. Teva, Coupling of adsorption, coagulation, and ultrafiltration processes for the removal of emerging contaminants in a secondary effluent, Chem. Eng. J. 210 (2012) 1-8.
- 27.B. Gozmen, M.A. Oturan, N. Oturan, O. Erbatur, Indirect electrochemical treatment of bisphenol A in water via electrochemically generated Fenton's reagent, Environ. Sci. Technol. 37 (2003) 3716-3723.
- 28.E.J. Rosenfeldt, K.G. Linden, S. Canonica, U. von Gunten, Comparison of the efficiency of OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O_3/H_2O_2 and UV/H_2O_2 , Water Res. 40 (2006) 3695-3704.
- 29.S. Fukahori, H. Ichiura, T. Kitaoka, H. Tanaka, Capturing of bisphenol-A photodecomposition intermediates by composite TiO_2 -zeolite sheets, Appl. Catal. B46 (2003)

453-462.

- 30.J.W. Cho, G. Amy, J. Pellegrino, Membrane filtration of natural organic matter: initial comparison of rejection and flux decline characteristics with ultrafiltration and nanofiltration membranes, *Water Res.* 33 (1999) 2517-2526.
- 31.M. Bodzek, M. Dudziak, K. Luks-Betlej, Application of membrane techniques to water purification. Removal of phthalates, *Desalination* 162 (2004) 121-128.
- 32.Y. Yoon, P. Westerhoff, S.A. Snyder, E.C. Wert, Nanofiltration and ultrafiltration of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products, *J. Membr. Sci.* 270 (2006) 88-100.
- 33.J.L. Acero, F.J. Benitez, F. Teva, A.I. Leal, Retention of emerging micropollutants from UP water and a municipal secondary effluent by ultrafiltration and nanofiltration, *Chem. Eng. J.* 163 (2010) 264-272.
- 34.A. Ben-David, R. Bernstein, Y. Oren, S. Belfer, C. Dosoretz, V. Freger, Facile surface modification of nanofiltration membranes to target the removal of endocrine-disrupting compounds, *Sci. Total Environ.* 407 (2009) 3793-3802.
- 35.P.Berg, G. Hagemeyer, R. Gimbel, Removal of pesticides and other micropollutants by nanofiltration, *Desalination* 113 (1997) 205-208.
- 36.Y. Kiso, T. Kon, T. Kitao, K. Nishimura, Rejection properties of alkyl phthalates with nanofiltration membranes, *J. Membr. Sci.* 182 (2001) 205-214.
- 37.D. Dolar, A. Vukovic, D. Asperger, K. Kosutic, Effect of water matrices on removal of veterinary pharmaceuticals by nanofiltration and reverse osmosis membranes, *J. Environ. Sci.* 23 (2011) 1299-1307.
- 38.K. Kimura, T. Iwase, S. Kita, Y. Watanabe, Influence of residual organic macromolecules produced in biological wastewater treatment processes on removal of pharmaceuticals by NF/RO membranes, *Water Res.* 43 (2009) 3751- 3758.
- 39.P. Xu, J.E. Drewes, C. Bellona, G. Amy, T.U. Kim, M. Adam, T. Heberer, Rejection of emerging organic micropollutants in nanofiltration-reverse osmosis membrane applications, *Water Environ. Res.* 77 (2005) 40-48.

- 40.K. Kimura, S. Toshima, G. Amy, Y. Watanabe, Rejection of neutral endocrine disrupting compounds (EDCs) and pharmaceutical active compounds (PhACs) by RO membranes, *J. Membr. Sci.* 245 (2004) 71-78.
- 41.楊金鐘，一種利用同步電混凝及電過濾去除水溶液中奈米微粒及乳化液滴之方法與設備，中華民國發明專利，第 I229656 號，2005 年 3 月。
- 42.G.C.C. Yang, C.M. Tsai, Preparation of carbon fibers/carbon/alumina tubular composite membranes and their applications in treating Cu-CMP wastewater by a novel electrochemical process, *J. Membr. Sci.* 321 (2008) 232-239.
- 43.G.C.C. Yang, C.M. Tsai, Performance Evaluation of a simultaneous electrocoagulation and electrofiltration module for the treatment of Cu-CMP and Oxide-CMP wastewater, *J. Membr. Sci.* 286 (2006) 36-44.
- 44.G.C.C. Yang, C.J. Li, Tubular $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite membranes: preparation, characterization, and performance in electrofiltration of oxide-CMP wastewater, *Desalination* 234 (2008) 354-361.
- 45.G.C.C. Yang, T.Y. Yang, S.H. Tsai, Crossflow electro-microfiltration of oxide-CMP wastewater, *Water Res.* 37 (2003) 785-792.
- 46.G.C.C. Yang, C.H. Yen, Treatment of acetaminophen and erythromycin in sewage by the simultaneous electrocoagulation/electrofiltration process using tubular carbonaceous/ceramic composite membranes, in: Proceedings of the 4th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, Oct. 2–6, Tokyo, Japan, 2011.
- 47.G.C.C. Yang, C.H. Yen, The use of different materials to form the intermediate layers of tubular carbon nanofibers/carbon/alumina composite membranes for removing pharmaceuticals from aqueous solutions, *J. Membr. Sci.* 425-426 (2013) 121-130.
- 48.行政院環境保護署，飲用水水質採樣方法—自來水系統，NIEA W101.54A。
- 49.楊金鐘，國立中山大學新興污染物研究中心電子報，第 4 卷，第 3 期，2014 年 3 月。
- 50.P. Tsai, S. Pacheco, C. Pirat, L. Lefferts, D. Lohse, Drop impact upon micro- and nanostructured superhydrophobic surfaces, *Langmuir* 25 (2009) 12293.
- 51.L. Ricq, A. Pierre, J.C. Reggiani, J. Pagetti, A. Foissy, Use of electrophoretic mobility and

- streaming potential measurement to characterize electrokinetic properties of ultrafiltration and microfiltration membranes, Coll. Surf. A Physicochem. Eng. Aspects 138 (1998) 301-308.
- 52.C.A. Staples, D.R. Peterson, T.F. Parkerton, W.J. Adams, The environmental fate of phthalate esters: A literature review, Chemosphere 35 (1997) 667-749.
- 53.T.Y. Chiu, F.J. Garcia Garcia, Critical flux enhancement in electrically assisted microfiltration, Sep. Purif. Technol. 78 (2011) 62-68.
- 54.H.M. Huotari, G. Tragardh, I.H. Huisman, Crossflow membrane filtration enhanced by an external DC electric field: a review, Chem. Eng. Res. Des. 77A (1999) 461-468.
- 55.T. Weigert, J. Altmann, S. Reppeger, Crossflow electrofiltration in pilot scale, J. Membr. Sci. 159 (1999) 253-262.

「工業污染防治」季刊 徵稿啟事

■依據行政院公共工程委員會(90)工程企字第90004111號公告「技師執業執照換發辦法」第5條第1項第4款所訂「國內外專業期刊」一覽表，已將工業污染防治季刊登錄為專業期刊之一，環工技師投稿本刊物將取得高達60分積分，歡迎大家踴躍投稿。

■徵稿說明

1.本刊闢有下列各欄，凡有工業污染防治之研究、工程實務、個案介紹、技術新知等撰述稿均極歡迎。

- | | | |
|---------|-----------|--------------|
| (1)環境保護 | (4)工程規劃設計 | (7)工業減廢／污染預防 |
| (2)處理技術 | (5)操作維護 | (8)資源回收技術 |
| (3)環境管理 | (6)污染防治實例 | |

2.稿件請勿一稿兩投，每篇請勿超過兩萬字(含圖表)，請附中文摘要(300字以內)，並附關鍵字。一經採用酌酬稿費，其版權即歸本刊所有。來稿限未在其他刊物發表過之文稿。

3.來稿請附真實姓名、服務單位、地址及電話，以利聯絡並對讀者負責。(文稿電子檔請逕寄至工業污染防治季刊編輯組)

4.本刊對來稿有刪改權，不採用恕不退稿，如需退稿或不願意被刪改，請在來稿中註明。

5.來稿請寄：台北市大安區四維路198巷39弄14號1樓，財團法人台灣產業服務基金會，並於信封上附註「季刊投稿」字樣，凡需詢問本刊相關事宜，請電(02)2325-5223 轉404 工業污染防治季刊編輯組。

6.工業污染防治季刊編輯組 E-mail:jimi@ftis.org.tw

■編寫說明

1.章節編寫系統請如右例：

1.1
 1.1.1
 1.
 (1)

2.圖表序號請按照文中順序，圖表需清晰，說明文字請採用中文，編號如表1，表2，圖1，圖2等。

3.翻譯名詞採用易通易懂者，首次出現請附原文，如沉澱(sedimentation)

4.原文名詞為首字一般不必大寫，如活性污泥法(activated sludge process)

5.一般通用之縮寫文字不必加點，如BOD、SS等(不必寫成S.S)

6.採用公制單位，如mg/L、m/d、kg/m³、d、m、min、°C等。

7.文句中之數字採用阿拉伯數字，如八十八年請寫成88年，可量化數字每超過三位數請以逗點區隔，如1,250。

8.文句簡明，用字通俗即可，請儘可能避免如“的”、“之”混用情形。

9.請用直式A4大小由左至右書寫電子檔，圖片請掃描入電子檔。

■參考文獻

※文中引用文獻，請註明參考資料出處，並加註編號，例如：.....依據資料顯示^[1]，造成污泥膨化之原因生物，大致上有Sphaerotilus natans,Bacillus,Thiothrix,Escherichia,Beggiatoa,Geotrichum candidum,絲狀增殖酵母及其他絲狀微生物，....活性污泥膨化之原因大致上有：菌種變異、有機負荷及食微比不當、營養劑不足、負荷突變及曝氣流型不良等因素^[2]....。

參考文獻

1.陳國城，廢水生物處理學，國立編譯館主編，茂昌圖書有限公司印行，p.52~55，1991。

2.張訓中，活性污泥鬆化現象及其控制，工業污染防治，第13期，p.169~176，1985。

※參考資料之書寫順序如下：

期 刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月或年。

書 籍：作者，篇名，出處，頁數，年月或年。

研 討 會：篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。

機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，頁數，年月或年。

著作權讓渡同意書

作 者：_____

題 目：_____

作者通訊處：_____

一、保證本篇文章除本次投稿外，相同內容未投國內外其他有版權之期刊；如有上述情形願收回本文。

二、同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，讓渡給經濟部工業局，財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部工業局計畫，有重新製作並將本篇文章置於該會所屬網站及刊物等刊載供外界查詢之權利，但須註明本篇文章作者。作者保留引用文章在自己的著作的權力。如爾後有版權、著作權等之法律紛爭，文責由作者自負。

此 致

財團法人台灣產業服務基金會

作者：_____ 簽章

年 月 日



發行所：經濟部工業局

台北市106信義路三段41-3號

TEL : (02)2754-1255

FAX : (02)2704-3753

本期刊全文網址：<http://proj.ftis.org.tw/eta/>

ISSN 12042783

GPN : 2007100008

工本費：250元