

自來水會刊第 35 卷第 3 期目錄



實務研究

工程管理 U 化—施工現場資訊之應用……………黃騰宏、林千益…… 1

本期專題 淨水處理及水質安全

海淡水對於供水管網水質之影響及最佳管種選擇……………謝榮哲、曾合意、李嘉榮…… 10
供水管網管末排水中微量重金屬之發生與型態……………薛志宏、陳富鈴、賴頌仁、張美惠…… 18
慢濾池處理效能之探討……………陳文祥、吳美炷、黃聖然、洪世政…… 30
學校水質滯留改善案例探討……………江清蓮…… 41
地面水水域滲流影響地下水深井總硬度之研究……………許國樑…… 48
淨水處理—臺北自來水事業處面對颱風暴雨因應作為……………張琰竣…… 57

他山之石

水安全計畫之實務—以德國為例……………何承嶧、駱尚廉…… 65
北京、澳門、香港與上海浦東—管網漏損控制與管理簡介（下）……………黃欽稜…… 74

國際視窗

「你知道嗎？」—水質……………本刊編輯小組…… 88

協會與你

歡迎投稿 105 年「每期專題」…………… 29
中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法…………… 47

自來水會刊雜誌稿約

- 一、本刊為中華民國自來水協會所發行，係國內唯一之專門性自來水會刊，每年二、五、八、十一月中旬出版，園地公開，誠徵稿件。
- 二、歡迎本會理監事、會員、自來水從業人員，以及設計、產銷有關自來水工程之器材業者提供專門論著、實務研究、一般論述、每期專題、業務報導、專家講座、他山之石、法規櫥窗、協會與您、會員動態、研究快訊、學術活動、出版快訊、感性園地、自來水工作現場等文稿。
- 三、「專門論著」應具有創見或新研究成果，「實務研究」應為實務工作上之研究心得（包括技術與管理），前述二類文稿請儘量附英文題目及不超過 150 字之中英文摘要，本刊將委請專家審查。「每期專題」由本刊針對特定主題，邀請專家學者負責籌集此方面論文予以並列，期使讀者能對該主題獲致深入瞭解。「專家講座」為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。「一般論述」為一般性之研究心得。「業務報導」為國內自來水事業單位之重大工程或業務介紹。「他山之石」為國外新知或工程報導。「法規櫥窗」係針對國內外影響自來水事業發展重要法規之探討、介紹或說明。「研究快訊」為國內有關自來水發展之研究計畫期初、期中、期末報告摘要。「學術活動」為國內、外有關自來水之研討會或年會資訊。「出版快訊」係國內、外與自來水相關之新書介紹。「感性園地」供會員發抒人生感想及生活心得。「自來水工作現場」供自來水從業人員，針對工作現場發表感想。「會員動態」報導各界會員人事異動。「協會與您」則報導本會會務。
- 四、惠稿每篇以三千至壹萬字為宜，特約文稿及專門論著不在此限，**本刊對於來稿之文字有刪改權，如不願刪改者，請於來稿上註明；無法刊出之稿件將儘速通知。**
- 五、文章內所引之參考文獻，依出現之次序排在文章之末，文內引用時應在圓括號內附其編號，文獻之書寫順序為：期刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月。書籍：作者，篇名，出版，頁數，年月。機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，編號，年月。英文之作者姓名應將姓排在名之縮寫之前。
- 六、本刊原則上不刊載譯文或已發表之論文。
- 七、惠稿(含圖表)請用電子檔寄至 aael@mail.water.gov.tw，並請註明真實姓名、通訊地址（含電話及電子郵件地址）、服務單位及撰稿人之專長簡介，以利刊登。
- 八、稿費標準為專門論著、實務研究、一般論述、每期專題、專家講座、法規櫥窗、他山之石、特載等文稿 900 元/千字，「業務報導」為 500 元/千字，其餘為 400 元/千字，文稿中之「圖」、「表」如原稿為新製者 400 元/版面、如原稿為影印複製者，不予計費。
- 九、本刊係屬贈閱，如擬索閱，敬請來信告知收件人會員編號、姓名、地址、工作單位及職稱，或傳真(02)25042350 會務組。本刊將納入下期寄贈名單。
- 十、本會刊內容已刊載於本協會全球資訊網站（www.ctwwa.org.tw）歡迎各界會員參閱。
- 十一、本刊中之「專門論著」、「實務研究」、「一般論述」、「每期專題」及「專家講座」，業經行政院公共工程委員會 92 年 3 月 26 日工程企字第 09200118440 號函增列為技師執業執照換發辦法第五條第一項第四款之「國內外專業期刊」，適用科別為「水利工程科」、「環境工程科」、「土木工程科」。

自來水會刊雜誌

發行單位：中華民國自來水協會

發行人：胡南澤

會址：臺北市長安東路二段一〇六號七樓

電話：(02)25073832

傳真：(02)25042350

中華民國自來水協會編譯出版委員會

主任委員

黃志彬

副主任委員

李丁來

委員

駱尚廉、葉宣顯、康世芳、王根樹、林財富、
陳曼莉、范煥英、洪世政、莊東明

自來水會刊編輯部

臺中市雙十路二段二號之一

行政院新聞局出版事業登記證局第 2995 號

總編輯：李丁來

執行主編：林正隆

編審委員

甘其銓、周國鼎、鄭錦澤、陳文祥、黃文鑑、
梁德明

執行編輯：陳品如

電話：(04)22244191 轉 266

行政助理：古蓁苓

印刷：松耀印刷企業有限公司

地址：台中市北區國豐街 129 號

電話：(04)22386779

工程管理 U 化~施工現場資訊之應用

文/黃騰宏、林千益

一、前言

臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)肩負大臺北用水重任,近 4 年自來水管線汰換每年平均約 160 公里,各項工程施工每年達萬餘件,為降低施工造成市民生活不便,思考以更即時、完整的將施工訊息,提供民眾取得,並將相關資訊有效延伸運用。

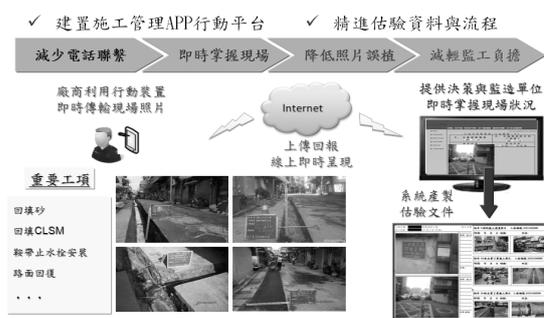
另北水處配合臺北市道路挖掘管理,施工現場人員除須以電話向北水處監控中心通報外,尚須再以市府「臺北市道路挖掘施工通報」APP 進行各項通報及停檢點拍照上傳,造成通報及現場施工照片蒐集等作業重複,且以往採人工編製估驗資料,照片選別費時且偶有相片錯置情形,後續資料訂正造成人力、時間及紙張耗費,又考量北水處施工案件繁多,監工難以全程在場,致無法即時掌控工程進行情況。

隨著智慧型手持裝置的蓬勃發展及資訊技術進步,北水處配合市府推動智慧城市建設,提供 24 小時全年無休的政府服務 (Ubiquitous Government),透過普及的通訊設備及快速、無障礙的網路服務,隨時隨地查詢最新圖資,實行資訊蒐集應用,以提高服務品質效率,提昇城市競爭優勢,建構永續發展的優勢。

北水處導入 U 化 (Ubiquitous),開發工程施工現地管理工具,紀錄相關作業時間及照片等,並與既有之工程管理系統及客服系統流程整合。期望透過施工資訊現場管理工具之開發與使用,尋求業務簡化以及管理突

破。精進方向包括：

- (一)作業簡化：回報及估驗作業簡化，減少紙張使用，效率提升、環保節能。
- (二)即時管理：施工現場電子化即時管理，在有網路的地方即可隨時掌握現場施工狀況，不受時間空間所限制，達到施工品質提昇及人力有效運用之成效。
- (三)資訊公開：施工透明化，民眾直接參與監督，提升施工品質。



本文說明以 APP 改變施工回報及照片蒐集作業,並藉由即時回報資訊,精進施工管理方式,透過即時公布施工資訊,讓施工作業公開透明化。

關鍵字：施工 APP、環保節能、即時管理、公開資訊

二、現況說明

(一)北水處施工及管理

1.回報作業

現場施工人員不但要以電話向北水處監控中心回報施工情形,尚須再以北市道管中心「臺北市道路挖掘施工通報」APP 回報,造成回報作業重複,現場人員耗時費力,難以專注於施工現場之作業管理,易衍生施工錯誤及工安事件發生。



2. 監造作業

考量施工案件繁多及分散，往往監工除須現場監造外，尚有其它會勘、會議、教育訓練或內業公文處理等等，致時有無法全程在場情事，難以即時掌控工程進行情況。

3. 估驗作業

施工廠商隨著工程施作進度進行拍照記錄，再將所拍照片交由公司內業人員，採人工編製方式製作估驗資料，過程需逐張核對拍攝對應工項，不但費時且偶有相片錯置情形，造成後續核對訂正資料之人力、時間及紙張耗費。

(二) 道管中心要求通報事項說明

通報的事項可分為「攝影通報」(固定式攝影機或手機)，及「智慧型手機 APP 通報」兩大類，謹整理分述如下：

1. 「攝影通報」(固定式攝影機或手機)

- (1) 需全程攝影。
- (2) 實施初期 13 個「停檢點攝影」如下，並持續擴充調整中。
- (3) 拍攝方式
 - 固定攝影：含背景之全景攝影。
 - 活動攝影：需將攝影機(或手機)近距離放大攝影。
 - APP：需另外以手機 APP 方式拍攝相片上傳，攝影則持續不能中斷。

2. 智慧型手機 APP 通報

停檢點拍攝

項目	內容	拍攝方式
1. 施工通報	告示牌(背景)	APP
2. 秀證照		固定攝影
3. 切割、開挖		固定攝影
4. 管障通報		APP(X)
5. 開挖完成		活動攝影
6. 降深度量測		活動攝影
7. 管路佈設		固定攝影
8. 埋設深度量測		活動攝影
9. 管溝回填+時間		固定攝影
10. 警示帶位置深度 30cm		活動攝影
11. 落沈試驗+深度測量		固定攝影
12. AC 滾壓密度儀量測拍攝		活、固定攝影
13. 完工道路面清洗		APP

(1) 承上，計有「施工通報(告示牌、交維)等背景」、「管障通報」及「完工道路面清洗」3 項需採 APP 拍照通報。

(2) 中心還要求以手機 APP 上傳相關停檢點相片(道管中心管理頁面如下)，主要項目包含：

- 監工：監造單位人員須持臺北市政府工務局核發「臺北市管線挖掘施工管理人員識別證」入鏡。
- 施工人員：廠商現場人員須持臺北市政府工務局核發「臺北市管線挖掘施工管理人員識別證」入鏡。
- 施工通報：包含挖掘施工通報、銑鋪通報、搶修通報等。
- 管障通報：現場通報管障，交由中心處理確認變更或通知探挖等。
- 管深相片(附標尺及背景)
- 管線測量：上傳開挖管溝內所有管線相片及類別

A 類：單一施工中管線，由施工廠商自行測量管深並拍照上傳後回填。

B 類：多種管線，惟其他管線與施工中管線平行或垂直，由施工廠商量測各管種

深度並於管溝旁標示各管線走向並拍照上傳後回填。

C 類：多種不規則走向管線，需等候繪圖廠商到場。

- 回填 CLSM
- CLSM 初凝(需 1 位施工人員站立於上)
- 逾時通報(無逾時本項可免，搶修案件無此項通報)
- 收工通報

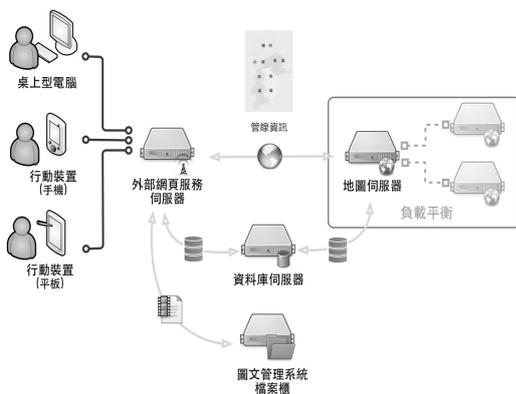
北市道管中心管理頁面如下，道管中心人員即時監管現場作業情形。



序號	管線編號	管線位置	管線類型	管線規格	管線材料	管線人員	管線狀態	管線備註
1	1000017725	萬華區	排水管	φ150	HDPE	李國輝 14 01	11:25	
2	1000017726	萬華區	排水管	φ150	HDPE	李國輝 14 01	11:25	
3	1000017727	萬華區	排水管	φ150	HDPE	李國輝 14 01	11:25	
4	1000017728	萬華區	排水管	φ150	HDPE	李國輝 14 01	11:25	
5	1000017729	萬華區	排水管	φ150	HDPE	李國輝 14 01	11:25	

三、行動平台架構及功能

(一)架構圖



(二)系統功能

1.現場施工資訊回報

- (1)提供使用者帳號登入驗證功能。
- (2)針對各類施工案件之到場、開工、管障、

停水、復水、施工逾時及完工等施工資訊狀態回報。

- (3)建立施工案件，因操作制水閥、辦理施工排水等事項回報機制。
- (4)施工斷不明管時，現場即時照相並上傳回報（監控中心、客服中心等）。
- (5)透過施工資訊回報介接模組，回報並記錄於機關施工資訊資料庫，並於設備管理系統資料庫內記載設備操作歷程。
- (6)問題回饋機制。

2.現場施工照片回報

對於各階段之施工照片回傳，透過壓縮技術減低傳輸時間，並透過施工資訊回報介接模組更新機關施工資訊。

3.施工管線資訊查詢

導入北水處 GIS 管線資訊圖台，包含圖號、閥栓編號、道路、門牌等各項查詢及定位功能，經由定位後可在圖台標定位置，並具備設備基本屬性資料查詢功能。另架設負載平衡機制，以提升當外部使用者增加時，圖台能維持原有服務效能。

4.非計畫性施工停水用戶查詢

提供非計畫性施工（含調配水）造成用戶無水，可查詢配水管口徑 400mm 以下所影響之總表或直接表之地址資訊，輔助現場人員緊急判斷及處理用戶協調事宜，減少無預警停水造成民眾之影響。

5.圖卡調閱

提供查詢管線及閥栓設備圖資查詢功能，人員如有調閱竣工圖或閥、栓圖卡需要時，可透過 APP 提出申請，系統將進行身分判別，屬機關人員可直接取得所需圖資，身分若屬廠商，則需再經北水處監控中心確認

需要後，再開放檢視圖資，以確保圖資安全及避免資料遭濫用。

四、行動平台應用

(一)施工資訊 APP

1.系統登入：系統進行權限管控，使用者登入系統需輸入帳號及密碼；系統具有版本管控機制，登入時將進行版本檢查，如經檢查非最新版本，將提供連結下載更新，系統完成更新前無法登入使用，以確保系統回傳資料之完整性。另提供密碼記憶功能，方便使用者不用每次登入時均須進行帳號密碼輸入。



2.主選單：包含計畫性施工、非計畫性施工、圖卡調閱、施工管線資訊查詢以及問題回報選項。



- (1)【計畫性施工】：預計施工之案件，如配合、管網、給水、銑鋪等。
- (2)【非計畫性施工】：臨時性案件，如緊急

搶修漏水或用戶無水處理案。

- (3)【圖卡調閱】：提供圖卡調閱申請。
 - (4)【施工管線資訊查詢】：提供管線資訊查詢。
 - (5)【問題回報】：回報發生的例外問題。使用者提出問題回報後，系統將以電子郵件方式將問題內容、照片、通報人、通報時間、座標等資訊，通知相關人員，以進行問題處理。
- 3.案件清單：系統將依登入帳號顯示所屬未完工案件清單，並針對特殊案件（1999）標註警示提醒，點選案件後即可進行相關回報及照片蒐集等作業。



4.作業項目選擇

北水處針對計畫性、非計畫性案件有不同管控流程，以非計畫性案件而言，較計畫性案件增加「到場回報」作業，系統強制要求拍攝並回傳現場勘查之交通錐以及門牌，以確認廠商完成到場並擺設警示設施。而於申報「開工」作業時，回傳現場施工告示牌及柔性告示牌則為必要項目。相關作業簡要說明如下：

- (1)點選『準備作業』，進入『告示牌』、『交維措施』和『其他工項』主要畫面，點選任一個按鈕，系統將會切換至拍照頁面。



(2)【到場施工】頁面顯示案件基本資料，包含「施工編號」、「施工地點」、「許可証編號」，其他詳細資訊可點選右上方綠色驚嘆號取得，完成確認後點選「施工通報」進行回報。



(3)施工回報

北水處工程標案工項繁多(約 250 個)，為使現場人員能簡易操作，迅速且直覺選定拍攝照片類別，故將現場蒐集照片歸納為 4 大類(準備作業、施工作業、回填作業、路面修復)計 64 個子項目，並於各大類預留「其他照片」之拍照選項，提供人員於尋無符合現場拍照項目之例外狀況時使用，以保持彈性並滿足使用及後續管理需要。選擇拍照項目類別後，即可進行拍照作業；為提升資訊蒐集之即時性，及考量單次上傳相片數量過多，恐影響傳輸速度，系統將進

行相片檔案壓縮，於完成單一類別項目拍照並點擊回報上傳，APP 即將照片回傳至北水處伺服器，人員即可於網頁平台即時查閱。



(4)閥類操作通報

制水閥之功能係用於調節或停止水流，以利管線或其他設備操作維護及水量之控制調配，宛如家庭內的水龍頭。北水處供水轄區閥類約有 5 萬只，傳統採現場人員以電話向監控中心回報操作情形，監控中心人員再將資訊鍵入系統，惟因施工現場環境噪音干擾，電話傳遞及展轉人工輸入作業潛在資訊錯誤風險。

北水處 APP 提供通報閥類開(啟)、關(閉)功能，現場人員可以手動輸入或直接掃描閥箱蓋背面之銘牌 QR Code 方式，即能進行後續閥類啟、閉通報作業，因系統強制要求通報作業時，需一併回傳現場閥箱照片，所蒐集照片可應用於未來閥箱遭埋沒時，尋覓找回之重要參考。此外，系統提供閥類檢核、警示等智慧功能。

a.重要閥類警示：重要閥類係指北水處加壓站配水池進出水之控制閥等，因影響供水甚鉅，未經許可不得操作，故 APP 不提供此類閥之系統通報，當人員進行此類閥啟閉 APP 通報時，系統將警示寫入失敗，重

大制水閥操作請聯絡監控中心之警語。現場人員必須以電話向監控中心通報，使監控中心能掌握最關鍵訊息。

b.閥類操作檢查：當現場人員透過 APP 申報案件收工時，系統將檢查是否將通報關閉之閥類全數恢復開啟，如經檢核未全數開啟時，系統將警示並提供未開啟之閥類清單，以提醒現場人員於收工時，應將閥類恢復至原開啟狀態，保持供水管網的通暢與健全。



(二)施工資訊管理平台

1.系統登入

使用者輸入使用者帳號及密碼進行登入。



2.主頁面

登入系統後，頁面依帳號權限顯示「工程清單」，清單所列標案清單係對應該帳號於「工程計畫與標案管理系統」內，狀態仍

屬「施工中」之標案。頁面右上角 QR Code 提供施工資訊現場管理 APP 及相關操作手冊下載，可採掃描或點選方式下載。



3.案件列表

選取標案後，系統列出該標案「施工案件清單」，清單以工作準備單號排序，新案在上，舊案在下，右側顯示案件狀態（非計畫性工程：到場回報、到場施工等，計畫性工程：預計施工、完工等）。如需返回「工程清單」，點選頁面左上角「工程清單」可簡易返回，另頁面右上角提供以月份區間篩選、產製估驗資料 PDF 檔、照片壓縮檔及送審功能。



4.照片 瀏覽及編輯

點選案件進入施工照片瀏覽頁面，顯示施工資訊現場管理 APP 回傳之照片，可利用頁面右上角「拍照項目」選擇照片類別，包含準備作業、施工作業、回填作業、路面修

復、完工作業以及其他路證，「其他路證」係以北水處 APP 通報路權單位之照片。照片視窗顯示該照片之類別、回傳日期及時間。

照片視窗下方空白欄位，提供使用者加註照片備註，於該欄位輸入內容後點選更新，系統始將資料寫入資料庫。

如有編輯照片需要，平台提供補照片以及刪除照片功能，當選擇補照片時，系統跳窗提供照片選擇，於選定照片與上傳後，系統瀏覽照片視窗將顯示上傳照片，所標註時間為照片補上傳時間，照片補刪功能僅提供監工權限使用。



4.產製 PDF 估驗資料及送審

系統提供狀態為「完工」之案件「選取」照片功能，選取案件進入「施工照片」頁面，「選取」欲轉置為 PDF 檔之照片後，系統始將訊息寫入資料庫，經「選取」之照片為轉置 PDF 檔之對象。

完成照片選取後，返回「施工案件清單」頁面，點選「產生 PDF」，系統即進行照片轉置作業。

使用者確認 PDF 檔內容無需再調整時，即可於「施工案件清單」頁面，點選右上角「送審」，系統提供檔案開啟頁面，選取欲上傳之檔案後點選「開啟」，系統跳窗

顯示「上傳成功」即完成檔案上傳，送審檔案並鎖定，不可再編輯。



(三)網頁 (外部)

北水處外部網站公開施工案件開工、完工狀態及照片。



五、遭遇困難與因應對策__跨科室及跨單位作業整合

(一)使用者對既有作業改變之抗拒

由於作業模式變動，使用者須配合調整既有作業習慣，為降低使用者對施工 APP 回報作業方式所產生排斥與抗拒心態，因此於推動實施期間不定期透過電話溝通協調、使用者檢討會議、教育訓練等方式收集使用者問題及建議，適時調整改善系統功能，不斷提升系統操作介面便利性及簡化相關作業流程，讓使用者逐漸接受，並能體會其所帶來諸多成效。目前已辦理 10 梯次教育訓練

或說明會，北水處及契約廠商共約 200 餘人參訓。

(二)跨科室及跨單位作業整合

1.臺北市政府道路管線暨資訊中心

為簡化現場人員回報作業，本案以北水處 APP 整合市府「臺北市道路挖掘施工通報」APP 各項通報，需辦理挖掘施工通報系統資料介接，經多次拜訪北市道路管線暨資訊中心，瞭解其業務運作情形，並表達北水處系統介接之需要，終獲同意辦理系統介接。

2.北水處各單位

北水處技術科為施工現場系統化管理推動主要幕僚，各營業分處及工程總隊等為施工監造單位，為使相關人員瞭解整體系統流程與作業，除於系統開發前多次召開需求確認會議，並於完成時辦理相關教育訓練與說明會，使第一線人員可輔導契約廠商使用，並簡易處理廠商相關疑問。

3.施工廠商

為要求廠商指派專人辦理本處施工資訊現場管理系統工地現場操作即時傳輸、相關報表文件產製及其他配合道路主管機關或經機關指定辦理資訊處理相關事項行，北水處於 105 年管線工程契約已新增「資訊勞務人員作業費」。

六、執行成效

(一)即時管理

藉由施工現場資訊的蒐集(包含狀態、照片)，人員經由管理平台可即時掌握最新施工進度，並於遠端進行施工指導，即時發現及矯正錯誤，有效避免重覆施工所造成的材料耗損與民眾干擾，解決以往需常駐現場督

工，影響人員調度之情形，為施工管理之重大躍升與突破。包括：

- 1.監造單位：隨時掌握現場施工進度與資訊，增進決策品質，大幅提昇工程管理效能、整體作業品質及公務部門形象之無形效益。
- 2.監控中心：閥栓操作作業正確性與即時性，以利後續調度管理。
- 3.管考單位：透過通報資料篩選查核，並配合現場抽查，提昇施工品質。
- 4.管線承商：相片即時貼，提高資料正確性，且估驗相片電子化、產製報表一致性，提高管理效能。
- 5.客服人員：即時了解現場施工狀況，提升為民服務。

(二)增進效率

1.節省人力

透過 APP 回報取代傳統電話通報，減少北水處監控人員通話時間約 62.5 小時/月(以管線維修工程 10 標案，報修 150 件/月/標、電話回報 5 通/件[到場回報、開竣工、停復水]、通話時間 30 秒/通推估)，尚不包含配合、管網、給水工程之通話節省，餘裕人力可運用於其他業務。

2.作業時間

系統將現場回報資料依日期、案件及作業類別，自動編排產製表報，省去以往內業人員尋覓照片、標註相片類別所耗費時間，以每年施工案件 20,000 餘筆，每案結省作業時間 30 分鐘計算，全年可節省作業時間 10,000 小時，且具有統一表報格式之管理優勢。

3.簡化作業流程

透過系統一次性回報北水處及相關路

權單位所需資訊，現場人員無需再重複回報，作業減量一半，北水處每年施工案件 20,000 餘筆，每筆減少 5 分鐘回報時間，全年可減少 1,500 小時以上，作業減化使現場人員更可專注於施工管理，提升施工品質及安全。

(三)節能環保

為處理管線設備突發狀況，施工人員以往需往返駐所調閱圖資，相當費時耗工且不利於現場災情控制。透過行動裝置開發管線圖資查詢功能，現場人員能即時查閱所需竣工圖、制水閥圖卡及消防栓圖卡，輔助人員即時正確判斷，對於臨時性搶修案件尤見成效，明顯提升機關災害控管能力。水資源有效利用與節約，保障市民免受無水之苦。另為管控圖資不被濫用，系統並進行權限管控、資料加註浮水印以及流程記錄，藉由行動裝置連接網路，相關同仁可隨時隨地查閱系統資料庫圖資資訊，以超越時空限制，突破必須進辦公室方能使用系統查詢不便性，提高整體工作效率，確保各項作業順利推展。

(四)資訊透明及資源共享

整合新工處道路施工挖掘通報 APP，並將蒐集資料於北水處外部網站公開施工案件開工、完工狀態，降低施工不便性，預防違失舞弊，提高外部監督可及性，達成全民督工、透明公開資訊效益，提供民眾進行查詢，符合「開放政府，全民參與」施政理念。

七、結論

本系統線上施工通報及照片蒐集作業建置推廣初期，歷經約 2 年的系統規劃、系統需求確認、系統分析、系統設計、平台建置、推廣及諮詢輔導工作，自正式上線至

今，各業務單位已逐漸熟練系統。

系統除有效整合現有資訊應用系統外，並以提升北水處同仁及管線廠商執行效率為目標。目前相關施工或停水資訊已公布於官網，便利民眾及機關查詢，另施工 APP 作業已撰擬操作手冊，可供相關單位使用，未來後續應用，計畫將施工 APP 結合現場施工材料使用回報，達材料使用管理，另配合北水處 GIS 躍升政策推動，推動估驗計價線上簽核作業，期望整體流程在安全網路機制下進行，充分發揮作業 U 化及節能減紙施政目標。

誌謝

本報告之完成感謝北水處陽明分處主任廖介廷先生及技術科科長時佳麟先生大力建議與指導。

參考文獻

- 1.臺北市府工程局，「臺北市道路挖掘管理系統—道路維護施工APP通報」，2013年11月。
- 2.臺北市府捷運工程局，「臺北市府捷運工程局工務暨契約執行系統—線上簽核平台」，政府機關資訊通報第300期，2012年10月。
- 3.嘉義市政府，「嘉義市公共設施管線管理系統 App之應用」，2015年4月。

作者簡介

黃騰宏先生

現職：臺北自來水事業處技術科股長

專長：自來水工程、水資源及環境工程

林千益先生

現職：臺北自來水事業處技術科三級工程師

專長：自來水工程、地理資訊管理系統

海淡水對於供水管網水質之影響及最佳管種選擇

文/謝榮哲、曾合意、李嘉榮

摘要

海水淡化廠出水水質之藍氏飽和指標 (LSI) 偏低而具腐蝕性，雖經加藥處理後可符合飲用水水質標準，並控制 LSI 在 ±1 之間及 pH 值在 8.0 左右，惟海淡水再流經輸配水管網後，因延性鑄鐵管之水泥砂漿襯裡會析出 Ca^{2+} 等礦物質，造成供水 pH 值升高，易使水泥砂漿剝落，進而造成管體銹蝕而產生供水出現紅水現象。

本研究即探討在澎湖地區採用海淡水之特殊水質環境下，如何選擇最適當管材，以達到保育水資源並改善供水水質之目的。因此，本研究採用 5 種管材及 3 種水源進行水質浸泡試驗，以分析各種不同水源及不同管材，其浸泡時間與水質變化之關係，俾找出最適合澎湖地區使用之管種。

經試驗結果發現，使用水泥襯裡之 DIP，不論採用第 1 型卜特蘭水泥或第 2 型卜特蘭水泥作為襯裡，在無密封塗層保護時，皆容易受海淡水影響而發生水質異常情形；而採用「環氧樹脂漆密封塗層 DIP」，則可控制 pH 在水質標準 8.5 以內，惟使用海淡水時仍有機會發生 pH 超過 8.5 之異常情形。考量未來澎湖地區海淡水使用比例愈來愈高，爰不建議澎湖地區使用「環氧樹脂漆密封塗層 DIP」。經綜合分析，「環氧樹脂粉體塗裝 DIP」抗壓強度大、抗震能力佳、使用年限長達 40 年以上，且可抵抗海淡水之腐蝕性，確實為目前澎湖地區最適合之管種。

關鍵字：延性鑄鐵管、環氧樹脂粉體塗裝、環氧樹脂漆密封塗層

一、前言

澎湖地區因受氣候影響，雨量稀少，島上水源缺乏，尤以近年來觀光事業蓬勃發展，水源更為不敷用水需求。然而澎湖地區地下水位逐年下降，已產生海水入侵現象，造成部份地區地下水井水質嚴重鹽化；加上近年來居民生活品質提高，民生用水量增加且對用水品質要求提高，地下水井水質已不堪一般民生使用。在氣候變遷、地下水質逐漸惡化，及台灣自來水公司(以下簡稱台水公司)分階段配合政府政策實施地下水減輪抽機制下，供水愈趨不足，尤其旅遊旺季更甚，政府為澎湖地區穩定供水並解決離島居民用水之苦，爰興建海水淡化廠以紓緩澎湖地區的供水缺口。

海水淡化廠出水水質藍氏飽和指標 (Langelier Saturation Index, 以下簡稱 LSI) 偏低而具腐蝕性，需添加藥劑處理以避免侵蝕輸配水管線及對用戶水質產生負面的影響。經台水公司加藥處理後之水質雖可符合飲用水水質標準，並控制 LSI 在 ±1 之間及 pH 在 8.0 左右，惟澎湖地區目前供水管網使用之自來水管線，其中延性鑄鐵管(ductile iron pipe, 以下簡稱 DIP) 長度 57 公里，佔輸配水管線總長約 9.5%，海淡廠出水後流經該供水管網時，DIP 之水泥砂漿襯裡會析出 Ca^{2+} 等礦物質造成管內自來水 pH 逐漸升高，致影響供水水質。

由於澎湖地區使用 4 種不同水源，包含純海淡水、湖庫水、鹽井淡化水及混合水



等，影響各種自來水管材之使用。加以澎湖地區漏水率偏高且管線逾使用年限情形愈趨嚴重，管網體質不良急需將舊漏管線汰換為耐蝕耐壓之優良管種；台水公司目前使用之主要自來水管線為 DIP 及耐衝擊硬質聚氯乙烯塑膠管(unplasticized high impact polyvinyl chloride pipes，以下簡稱 HIWP)，其中 DIP 抗壓強度大、抗震能力佳且使用年限長達 40 年以上，惟其水泥砂漿襯裡會受海淡水影響，造成水質 pH 值異常，易使水泥砂漿剝落，進而造成管體銹蝕而產生供水出現紅水現象；而 HIWP 雖然較不會受海淡水影響而造成水質異常，惟該管材抗壓強度較差且使用年限僅 20 年，重置成本高，實非最佳管材。為降低管線輸送過程之漏水量並提升供水品質，台水公司配合降低漏水率專案計畫於未來 10 年內加速辦理澎湖地區舊漏管線汰換，如何選用最佳管種，實有必要深入研究探討。

二、研究方法

(一)澎湖地區現地調查

1.澎湖地區供水現況

台水公司第七區管理處澎湖營運所供水範圍包括澎湖縣馬公市、湖西鄉、白沙鄉、西嶼鄉、望安鄉、七美鄉等地區。目前澎湖地區現共有馬公(馬公市與湖西鄉)、白沙(白沙鄉全鄉，除白沙鄉吉貝村)、吉貝(白沙鄉吉貝村)、西嶼、望安及七美等 6 個供水系統，用戶數約 27,400 戶，每日平均供水量約 3 萬噸，其馬公系統用戶數約 20,480 戶。除建置 6 座淨水場、5 座鹽井水淡化廠及 38 口地下水直供井外，另設有 3 座海水淡化廠，其每日出水量共約為 1.4 萬噸，約佔每日需水量的 47%，係澎湖地區重要而穩定的水源。

2.澎湖地區管線漏水情形

依據台水公司近 10 年(94-103 年)於澎湖地區之修漏案件統計分析發現(如下表 1)，輸配水管線中，PVCP 漏水 898 件，佔總漏水件數 917 件之比例為 97.93%；且 PVCP 平均漏水密度亦為最高，每年漏水 0.67 次/公里。由此可知，管線材質確為影響漏水之主要原因之一。

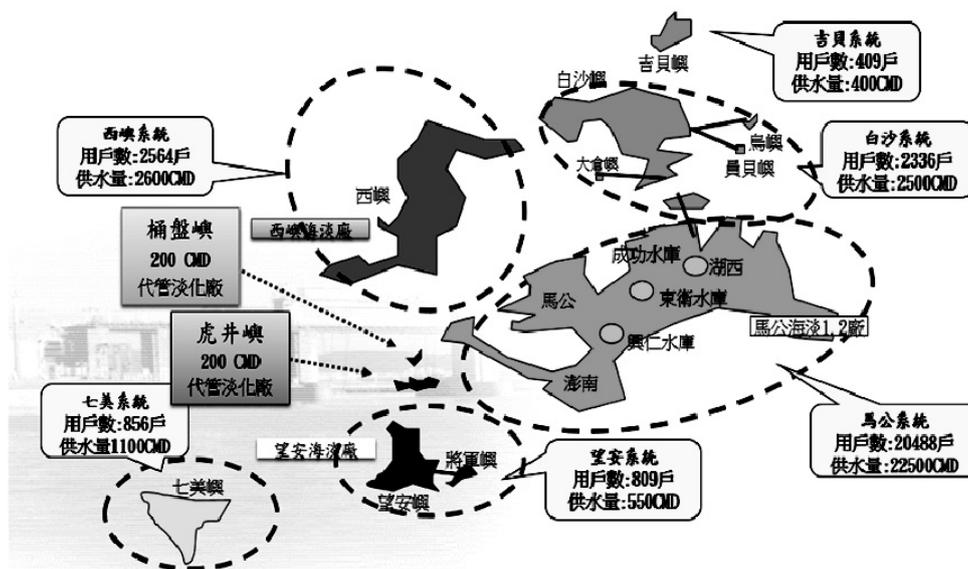


圖 1 澎湖地區供水現況圖

表 1 澎湖地區 94-103 年修漏資料分析表

管材	50mm 以下		65mm 以上		103 年度 管線總長度 (公里)	平均漏水密度 次/年-公里
	總件數	比例(%)	總件數	比例(%)		
ABSP	0	0	1	0.11	52.19	0.0019
CIP	0	0	1	0.11	0.14	0.714
DIP	0	0	5	0.55	57.34	0.0087
HDPEP	0	0	0	0.00	20.18	0
HIWP	0	0	0	0.00	65.61	0
PSCP	0	0	0	0.00	1.29	0
PVCP	1,682	100.00	898	98.14	383.03	0.6736
PVCP/PE	0	0	10	1.09	22.99	0.043
SP	0	0	0	0.00	0.52	0
合計	1,682		915		603.29	0.4305

然而，HDPEP 及 HIWP 雖然亦屬塑膠類管種，惟因該類管材係近 10 年左右所埋設之管線，非屬老舊管材，且其抗壓強度亦較 PVCP 更佳，故尚無漏水紀錄。依據管材耐用年限顯示，所有塑膠類管材使用年限僅 20 年，逾使用年限後抗壓強度降低，需擇劣汰換更新以維持供水管網正常運作，故其重置費用較 DIP 更高，較不具經濟效益。

以澎湖地區近年來施作同口徑 $\phi 100$ mm 之管線工程為例(如下表 2)，HIWP 每公里工程經費 450 萬元，而 DIP 每公里工程經費 535 萬元，如依其使用年限計算，在 DIP 使用 40 年期間，HIWP 需增加汰換更新 1 次，即 40 年內 DIP 之工程成本每公里 535 萬元，而 HIWP 每公里則需要 900 萬元，重置費用較 DIP 每公里高出 365 萬元，亦即 DIP 工程成本僅約需 HIWP 之 60%。

3.澎湖地區水質監測

海水淡化廠出水水質 LSI 偏低且具腐蝕性，雖經添加藥劑處理後 pH 值約在 8.0 左右，惟再流經輸配水管網後，其中 DIP 之水泥砂漿襯裡會析出 Ca^{2+} 等礦物質，造成供水 pH 值逐漸升高及供水水質不良。由圖 2 顯示，馬公地區為純海淡水供水區，馬公 5,000 噸海水淡化廠出水水質 pH 約 8.1~8.6，經配

水管網輸送至馬公管末地區 pH 值逐漸升高至 8.2~9.0 之間。湖西地區為混合水(海淡水佔 90%以上)，其林投供水站出水水質 pH 值約在 8.1~8.3 之間，經配水管網輸送至湖西管末地區，pH 值逐漸升高至 8.5~8.7 之間。

表 2 HIWP 及 DIP 管線工程成本比較表

工程名稱	主要工程內容	工程預算 (萬元)	工程成本 (萬元/km)	管線 使用年限
澎湖馬公安宅小區汰換管線工程	$\phi 100$ mm HIWP 長度3.2km	1,433	450	20年
白沙鄉講美、鎮海、城前村等汰換管線工程	$\phi 100$ mm DIP 長度9.1km	4,860	535	40年

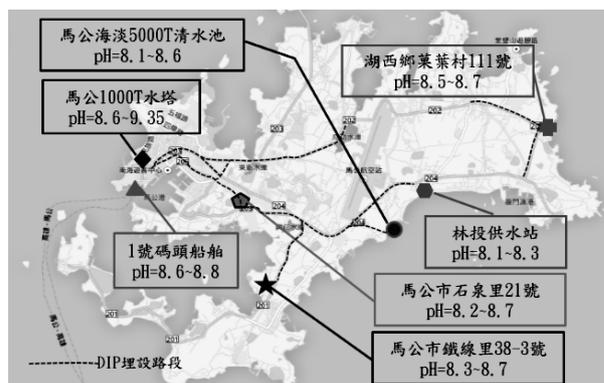


圖 2 馬公及湖西供水管網水質現況調查

由圖 3 顯示，白沙地區為鹽淡混合水(鹽淡水佔 25%以下)，白沙淨水場出水水質 pH 約 7.5~8.0 之間，經供水管網輸送後，因管網內無 DIP，故 pH 值未受影響。



圖 3 白沙供水管網水質現況調查



4.澎湖地區地下水減輪抽

經濟部水利署為穩定供應澎湖地區之生活用水及未來觀光發展需求，並保育地下水源，已重新檢討並調整「離島地區供水改善計畫」內容，其策略為減抽地下水與增加湖庫供水能力，另新建海水淡化廠並改善現有海水淡化廠供水能力，以確保澎湖地區未來至民國 110 年用水需求。自馬公第一海水淡化廠 5,500 CMD 廠完工後，同時開始第一階段地下水減輪抽計畫，減抽地下水量 2,700CMD；另外，預估馬公第二海水淡化廠 4,000CMD 機組興建完成營運後，同時開始第二階段地下水減輪抽 2,000CMD，總計減輪抽地下水量為 4,700 CMD，以達到地下水減輪抽 50%之目標。為達穩定未來目標年用水及達保育地下水之目標，澎湖地區使用海淡水比例將愈來愈高，屆時海淡水對於自來水供水管網之影響，亦將愈來愈大。

(二)管材水質浸泡試驗

1.試驗水源：選用以下 3 種水源

- (1)純海淡水
- (2)鹽井淡化水
- (3)湖庫水

2.試驗管材：選用以下 5 種管材

- (1)DIP+水泥襯裡(第 1 型卜特蘭水泥)
- (2)DIP+水泥襯裡(第 2 型卜特蘭水泥)
- (3)DIP+水泥襯裡(第 1 型卜特蘭水泥)環氧樹脂漆密封塗層
- (4)DIP+環氧樹脂粉體塗裝
- (5)HIWP

2.管材組裝

- (1)試驗管體：長度為 3m，口徑為 $\phi 100\text{mm}$ 。
- (2)試驗管種與組裝方式：

A.DIP(水泥襯裡第 1 型卜特蘭水泥)：依據 CNS-2313-A3055 規範製作長 3 m 鋪塗水泥砂漿襯裡之 DIP，試體兩端皆為插口，先接 K 型短管甲(1 號)，再接法蘭盲板，並於兩端開 1/2 吋牙孔以利注出水，進行水質採樣檢驗。

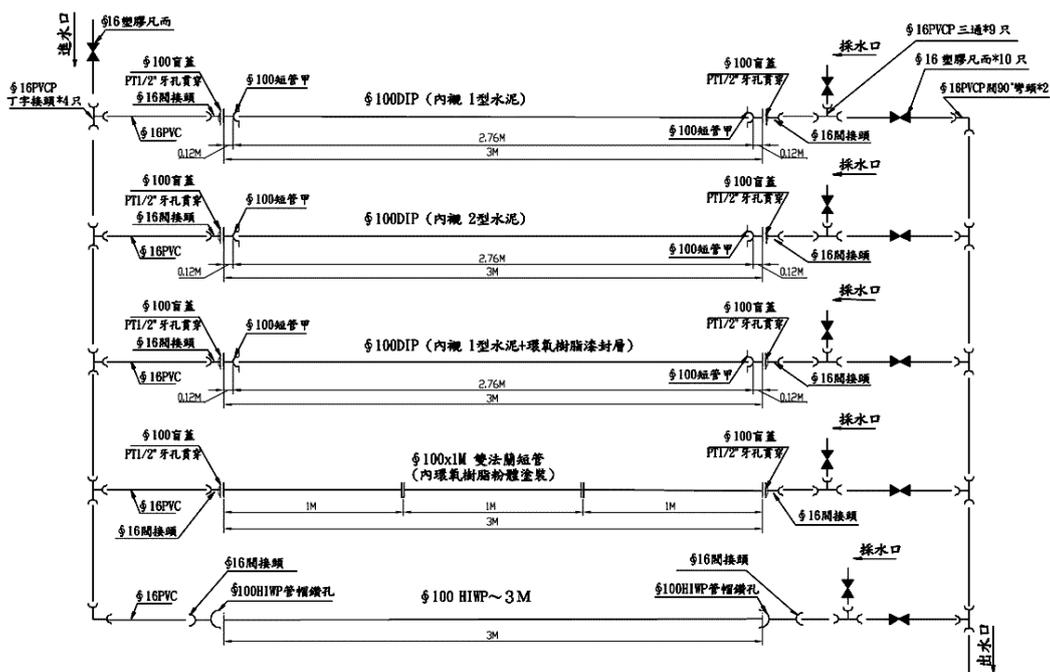


圖 4 試驗規劃佈置圖

- B.DIP(水泥襯裡第 2 型卜特蘭水泥)：同上。
- C.環氧樹脂漆密封塗層 DIP：管體大小及組裝方式同上。另外，密封塗層則依據「BS 7892:2000 規範」標準製作，環氧樹脂漆塗層厚度 0.3mm 以上。
- D.環氧樹脂粉體塗裝 DIP：依據 CNS-13273-G3254 規範製作長 1m 之雙法蘭短管，管線內面採用環氧樹脂粉體塗裝厚度 0.3mm 以上。組裝方式先銜接 3 支長 1m 之雙法蘭短管，兩端再接法蘭盲板並開 1/2 吋牙孔以利注出水，進行水質採樣檢驗。
- E.HIWP：長度為 3m，口徑為 100mm，組裝方式與前揭 DIP 管略同。

3.試驗地點

本研究以 5 種管材為 1 組，並依不同水源分 3 組進行。其中成功淨水場因同時具有鹽井淡化水及湖庫水之水源，因此，於成功淨水場進行該 2 組之試驗；另，純海淡水部分則於馬公 5,000 噸海淡廠進行。

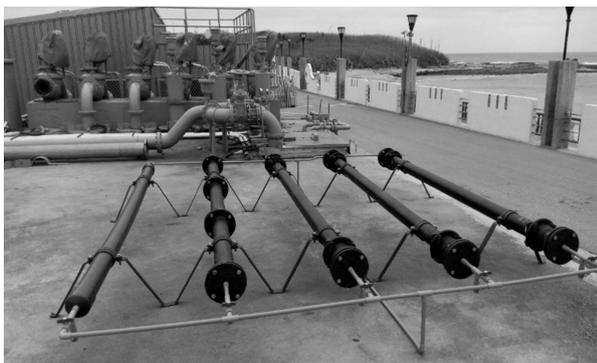


圖 5 馬公海淡廠之試驗管線佈設圖

4.試驗浸泡時間

依據所規劃之浸泡時間，10 分鐘、30 分鐘、1 小時、2 小時、4 小時、8 小時、1 天、2 天、3 天、4 天、5 天、6 天、2 周、3 周、4 周等，依序採取各管之水體並檢驗其水質變化，包含水溫、pH 值、鹼度、TDS、

Ca²⁺及 LSI 值。

三、結果與討論

(一)試驗結果與發現

經過 1 個月的水質浸泡試驗結果發現，「鹽井淡化水試驗組」與「湖庫水試驗組」之試驗結果相近，使用水泥襯裡之 DIP，在無環氧樹脂漆密封塗層保護下，不論採用第 1 型卜特蘭水泥或第 2 型卜特蘭水泥作為襯裡，pH 值約在浸泡 8~24 小時左右皆會超過水質標準 8.5，之後 pH 值仍持續飆高至 11.5~12.0 之間，而 LSI 值亦隨之變化並逐漸提高；反之，在有環氧樹脂漆密封塗層保護下，pH 值亦會緩慢提升，即使浸泡 1 個月之後，pH 值最高亦不超過水質標準 8.5，顯見對於「鹽井淡化水」及「湖庫水」而言，環氧樹脂漆密封塗層可有效改善 DIP 之水泥襯裡造成水質惡化之效益。

由「純海淡水試驗組」試驗結果發現，使用水泥襯裡之 DIP，在無密封塗層保護下，不論採用第 1 型卜特蘭水泥或第 2 型卜特蘭水泥作為襯裡，pH 值約在浸泡第 1 小時即超過水質標準 8.5，之後 pH 值仍持續飆高至 12.0~13.0 之間；而 LSI 值亦隨之變化並逐漸提高。另外，即使在有環氧樹脂漆密封塗層保護下，pH 值亦在浸泡第 1 小時即超過水質標準 8.5，並逐漸提升至 9.0 左右，顯見對於「純海淡水」而言，環氧樹脂漆密封塗層並無法有效改善 DIP 之水泥襯裡造成水質惡化之功效。

另外，採用環氧樹脂粉體塗裝 DIP 或 HIWP，因為無水泥襯裡，因此，不管何種水源其水質呈現穩定且無太大的變化，雖然 LSI 維持在-2.0 至-0.5 之間，仍屬偏低且具腐蝕性，惟 pH 值則維持在 6.8~7.8 之間，其他

鹼度、TDS 及 Ca^{2+} 等均無明顯變化，顯見該管材具有抗腐蝕性。

由試驗結果亦發現，是否發生水質異常在浸泡時間 1 天之內即有明顯變化，爰依不同管種比較其在不同水源下之水質變化情形。依據圖 6 至圖 10 顯示，海淡水之水質變化確實較為明顯，且 DIP 不論是否有無密封塗層，其水泥襯裡皆為受海淡水而影響水質變化，且浸泡 1 小時後 pH 值即會超過水質標準 8.5，而無環氧樹脂漆密封塗層之 DIP，其變化更為明顯迅速，且 pH 值會持續飆高至 10.0 左右。至於有環氧樹脂漆密封塗層之 DIP，pH 值可維持在 8.8 附近，不致於太嚴重，倘能改善海淡水初始出水水質，或經過一段長時間之使用後，pH 值或許可維持在水質標準 8.5 以內。反觀環氧樹脂粉體塗裝 DIP 或 HIWP，因無水泥襯裡問題，在不同水源下，即使使用具腐蝕性之海淡水，水質皆不受影響，呈現穩定狀態。

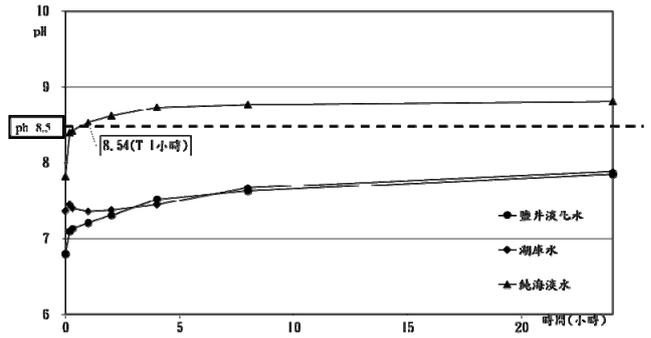


圖 8 水質變化時序圖(環氧樹脂漆密封塗層 DIP)

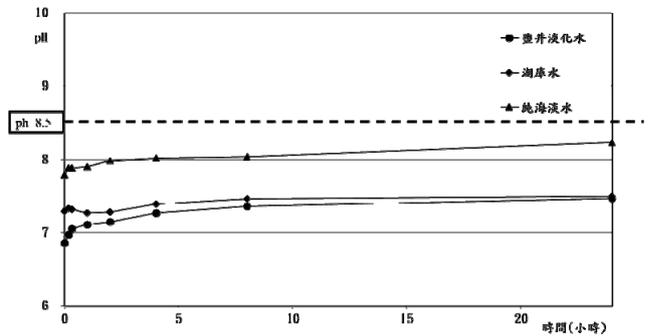


圖 9 水質變化時序圖(環氧樹脂粉體塗裝 DIP)

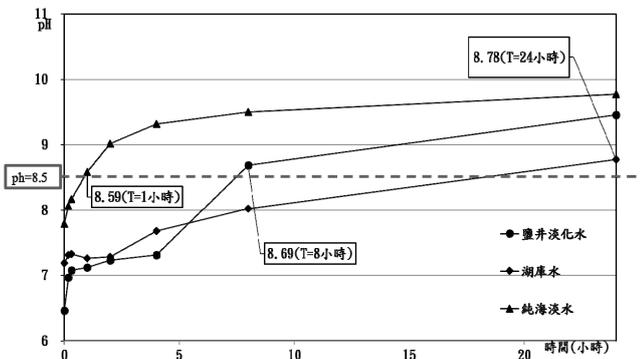


圖 6 水質變化時序圖 (DIP+1 型水泥襯裡)

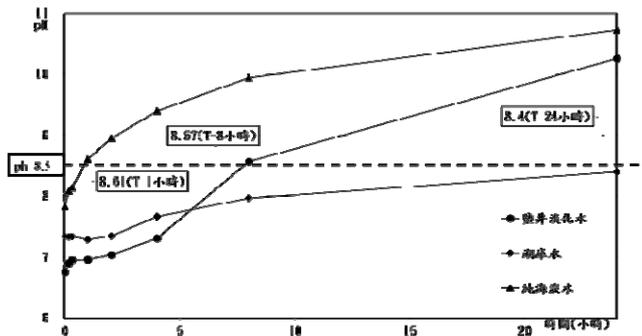


圖 7 水質變化時序圖 (DIP+2 型水泥襯裡)

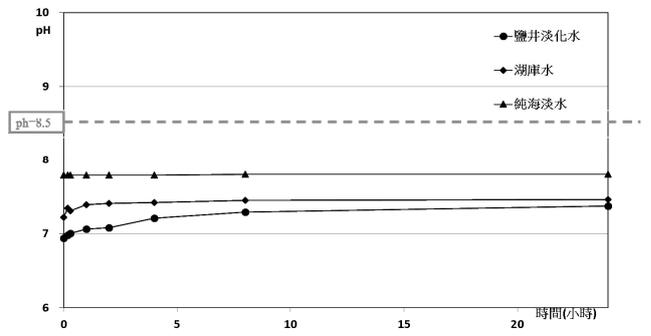


圖 10 水質變化時序圖(HIWP)

(二)專家學者座談會議

本研究報告於管材浸泡試驗完成後，為利後續管材選用，爰於 104 年 4 月 9 日邀請臺北自來水事業處、台水公司各相關單位及興南鑄鐵廠股份有限公司召開座談會議，期藉由自來水事業先進專業探討，俾益提升管材製造技術及自來水工程之水準，會議中各單位討論重點臚列如下：

1. 有關環氧樹脂塗料是否符合飲用水安全，

包含塑化劑及雙酚 A 等，未來在材料規範訂定時，應特別重視。

- 2.環氧樹脂漆密封塗層 DIP 於安裝分水鞍時會發生密封塗層剝落造成水表阻塞問題，未來必須克服才能使用於 ϕ 300mm 以下之管線。



圖 11 密封塗層鑽孔後剝落情形

- 3.蒐集有關沿海地區 DIP 腐蝕漏水情形，做為未來工程設計或規範修訂之參考，亦可就 DIP 管外壁防腐蝕進一步研究探討。
- 4.環氧樹脂塗裝 Epoxy 對於針孔試驗較有問題，亦即 Epoxy 只塗薄薄一層，其均勻度若非以技術優良施作及嚴格品質控管，將會有大落差。
- 5.可參考 ISO 規範要求，先於 DIP 管外施作熱熔鋅或覆鋅漆，之後再塗上環氧樹脂柏油漆，具雙層保護之效果。

四、結論與建議

(一)結論

- 1.經本研究試驗發現，使用水泥襯裡之 DIP，不論採用第 1 型或第 2 型卜特蘭水泥作為襯裡，在無密封塗層保護時，皆容易受海淡水影響而發生水質異常情形。
- 2.「環氧樹脂漆密封塗層 DIP」於湖庫水及鹽井淡化水等一般水源時，可有效阻隔管

內自來水與水泥襯裡直接接觸，以維持水質正常穩定。

- 3.海淡水經處理後其 pH 值已接近 8.0，即使 DIP 已採用「環氧樹脂漆密封塗層」加以改善，仍有機會發生 pH 值超過水質標準 8.5 之異常情形，爰不建議海淡水供水管網使用「環氧樹脂漆密封塗層 DIP」。
- 4.「環氧樹脂粉體塗裝 DIP」因無水泥襯裡故水質不受影響，即使使用海淡水於浸泡時間長達 1 個月，水質仍然相當穩定。加以鑄鐵管抗壓強度大、抗震能力佳、使用年限長達 40 年以上，確實為目前海淡水供水管網最適合之管種，惟國內廠商製作技術及管材檢驗方法皆需再進一步研討，目前尚無法實施採用。
- 5.HIWP 因無水泥襯裡，因此水質亦不受影響，甚至較環氧樹脂粉體塗裝之鑄鐵管更為穩定，惟因該管種抗壓強度較差且使用年限僅 20 年，逾使用年限後抗壓強度降低，需擇劣汰換更新以維持供水管網正常運作，故其重置費用較 DIP 更高，實非最適合管種。
- 6.澎湖地區地下水鹽化情形日趨嚴重，因其氯離子含量較高，將有可能增加 DIP 管外壁產生銹蝕之機率。目前已改採「控制性低強度回填材料」取代砂及碎石級配作為管溝回填，包覆 DIP 可隔離地下水直接接觸 DIP 管外壁，提供進一步的保護。
- 7.本研究進行試驗係採用較實際管網流動狀態更為嚴格之靜置浸泡，如經過最嚴苛的「純海淡水」試驗後，仍可維持合格的水質，代表該管材最適合澎湖特殊供水環境。因此，海淡水供水管網之管種選用建議比照「純海淡水」之試驗結果，以「環

氧樹脂粉體塗裝 DIP」為最優先，其次為「HIWP」。

(二)建議

- 1.國內 CNS-2313-A3055「鑄鐵管水泥砂漿襯裡方法」規範，對於密封塗層之相關規定尚未建全，且國內塗料供料及檢驗能力也尚未齊備，應儘快研議訂定完成，以作為未來使用之準則。
- 2.因國內目前尚未使用「環氧樹脂粉體塗裝 DIP」，管線廠商製作技術需進一步發展且直管檢驗方法亦需研議完備，方能實施採用。
- 3.其餘地區如有供水管網平均停留時間較長而發生 pH 值飆升之情形者，尤其是管線末端或用戶數較少之地區，亦可考慮採用「環氧樹脂漆密封塗層 DIP」，惟最好仍需經過浸泡試驗並確定可行後，再予採用。
- 4.「環氧樹脂漆密封塗層 DIP」於安裝分水鞍以銜接用戶給水外線時會發生密封塗層剝落而影響管中水流，甚至造成阻塞用戶進水設備之情形。因此，建議該管線不使用於 ϕ 300mm 以下且需銜接用戶給水外線之配水管。

參考文獻

- 1.AWWA (1986), “Corrosion Control for Operators”, AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- 2.AWWA (1987), “External Corrosion - Introduction to Chemistry and Control”, AWWA Manual 27, Denver, CO.
- 3.AWWA (1989), “Economics of Internal Corrosion Control”, AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- 4.AWWA (1991), “Control of Water Quality Deterioration Caused by Corrosion for

Cement-Mortar Pipe Linings”, AWWA Research Foundation, Denver, CO.

- 5.AWWARF (1996), “Internal Corrosion of Water Distribuion Systems”, AWWARF-DVGW-TZW cooperative research report, Denver, CO, p.588.
- 6.Langelier, W.F. (1936), “The Analytical Control of Anti-corrosion Water Treatment,” Jour. AWWA, 28:1500.
- 7.中華民國自來水協會，「自來水管線腐蝕之檢討與防蝕策略」研究報告，2003。
- 8.江冠汝，「DIP 管材密封塗層歐美規範探討」，臺北自來水事業處技術科，2014。
- 9.林哲昌、焦士榮、黃智，「薄膜海水淡化廠出水水質穩定化控制技術研究」，中興工程顧問社，2007。
- 10.張伯鴻，「海水淡化廠出水最佳防蝕方式研究」，國立成功大學環境工程學系碩士論文，2004。

作者簡介

謝榮哲先生

現職：台灣自來水公司工務處工程師

專長：自來水工程設計、土木工程、漏水防治

曾合意先生

現職：台灣自來水公司第七區管理處主任

專長：自來水工程、供水操作維護

李嘉榮先生

現職：台灣自來水公司工務處處長

專長：自來水工程規劃、設計、施工及經營管

供水管網管末排水中微量重金屬之發生與型態

文/薛志宏、陳富鈴、賴頌仁、張美惠

摘要

由北水處管末消防栓初排水金屬檢測分析，除鈣、鎂外，水中最主要的金屬依序為鐵、錳及鋁，在滯留導致的不同 pH 值下，各項金屬之溶出狀態有其特異性；固體中鐵錳鋁氧化物形成主要基體，會吸附其他金屬，被吸附金屬中，鉛、銅及鋅與鉻、鎳及鎳具共存狀態。

一、前言

經淨水場淨化處理後符合「飲用水水質標準」之自來水，於輸送過程中，因水與管線系統接觸，可能導致水質產生變化。最常發生且最易為用戶所察覺的狀況為「水黃」或「水濁」，自來水業者通常會告訴用水民眾，那只是管垢或鐵銹，對人體健康無影響，但管線材質多為金屬或混凝土，究竟是否溶出其他有害重金屬，其存在型態為何，如何避免發生，則有必要進一步研究，以利採取相關作為，確保用戶用水安全。

二、文獻回顧

(一)管網微量無機污染物(Trace Inorganic Contaminants, TIC)的可能來源

自來水管網(Drinking Water Distribution System, DWDS)無機污物的可能來源有原水、淨水處理藥劑及管線管材及管線施工等。美國安全飲用水法，國家一級飲用水水質標準中關切的重金屬包括鎳、鉍、砷、鎘、鉻、銅、汞、鉛、銻、硒、碲等 11 項；歐

盟飲用水指令(Drinking water directive)中規範化學性參數重金屬包括銻、砷、鉻、鎘、銅、鉛、汞、鎳及硒 9 項及指標性參數鋁、鐵及錳 3 項，共 12 項；我國飲用水水質標準管制項目包括砷、鉛、銻、硒、鎳、鎘、鉻、鎳及汞等 9 項影響健康物質；鉍及銻等 3 項可能影響健康物質及鐵、錳、銅、鋅及鋁等 4 項影響適飲性物質，共 16 項金屬。

美國環保署(2006 年)分析該國各項飲用水法規及非法規金屬之來源，如表 1，其中管線之混凝土內襯可能溶出者包括鎳、鉻、鎘、鋁及砷等 5 項金屬；因管材溶出者有鉛、銅及鋅；因管線焊料溶出者則有銻及鉍。

(二)管網微量無機污染物(Trace Inorganic Contaminant, TIC)的累積及釋出機制

供水管網無機污染物，會透過一些基本機制，先形成基體(Sinks 或 Substrate)，再接續進行相關作用。基體的由來包括腐蝕垢(Corrosion Scale)、化學沉澱(Chemical Precipitate)、生物膜(Biofilm)及沉降物(Sediment)。

管網系統無機污染物的產生機制，大致可以圖 1 作概念性表示，主要分為累積(Accumulation)及釋出(Release)兩大部份。

累積包括吸著(Adsorption)、共沉(Coprecipitation)及沉降(Sedimentation)

吸著指溶解性 TIC 於基體(Substrate)表面之錯合及內部之吸收作用，共沉則包括於活性沉澱基體上之吸附與絆除，受物理、靜電及化學力等作用之影響。

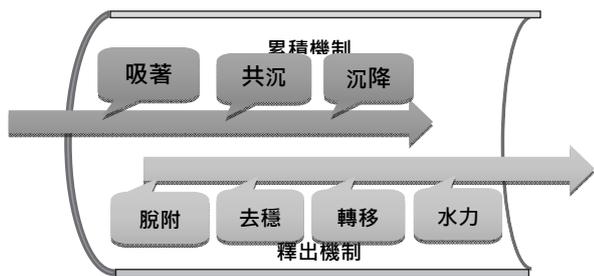


圖 1 管線系統無機污染物累積機制示意圖

影響累積之機制、速率及程度之因素包括污染物種類、溶解態濃度及總濃度、物化性質(包括氧化狀態、表面電荷及型式(錯合或共沉)；固體基體之組成、礦物學特徵(Mineralogy)及型態性質(morphological)；水化學性質(pH、水溫、鹼度、氧化還原電位(ORP)、離子強度、溶解無機碳(DIC)、磷酸

鹽及總硬度及流力狀況(流速、管壁平滑度)等，以上因素由於在每一系統，不同方位均不同，故 TIC 之累積行為是動態的，且會因不同管網系統及特定位置而異。

金屬氧化物與水接觸會於表面生成氫氧官能基 OH⁻，然後吸附水分子，形成水合金屬氧化物(如圖 2)，通常鐵及錳之水合氧化物及活性顆粒碳，為主要控制清水中沉積物金屬吸附者，另鋁及矽之水合氧化物及粘土，則對沉積物之吸附亦有貢獻。

不同吸附體具有獨特的性質，主要電荷來源來自顆粒表面之化學反應、晶格中結晶缺陷、斷鍵或同晶(isomorphous)取代及表面活性離子之吸著。

表 1 各項金屬之可能來源

金屬種類	可能來源
銻	礦、煤礦、石油或管線使用錫銻焊料釋出
砷	礦沉積物、砷農藥、除草劑、作物乾燥劑、木材保存劑、管材混凝土內襯溶出(leaching)
鉍	礦、煤礦、管材混凝土內襯溶出(leaching)
鉍	燃煤、管線使用錫銻焊料釋出
鎘	工業釋出、管材混凝土內襯溶出(leaching)
鉻	礦、工業程序排放及管材混凝土內襯溶出(leaching)
銅	金屬冶煉程序，給水管線腐蝕溶出
鉛	給水管線腐蝕溶出
汞	金屬冶煉程序、氯鹼工業、原水
硒	礦、金屬冶煉程序、燃煤及石油燃燒
鋁	來自管網中殘餘混凝劑之後沉澱(post-precipitation)累積，管材混凝土內襯釋出(leaching)
錳	水源，鐵錳合金冶煉、肥料、殺菌劑及氣油添加劑
鎳	金屬冶煉、管線釋出進入水中
銀	礦、煉鋼
鋅	水源及管線物質腐蝕。

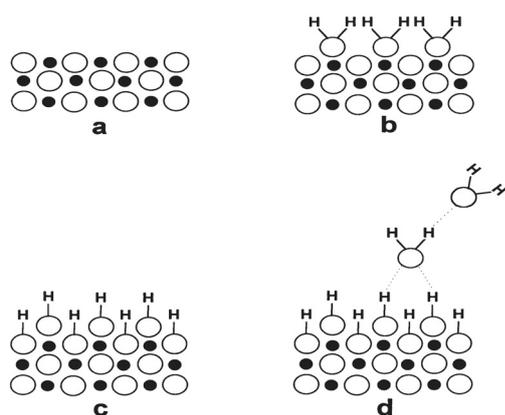
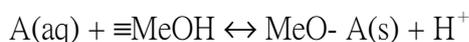


圖 2 水合金屬氧化物之形成(Smith,1999 年)

1.典型的吸附反應如下：



A(aq) 為溶解態污染物， $\equiv MeOH$ 為水合金屬氧化物，反應為可逆，會朝吸附及脫附間平衡方向進行。

水的pH 值因表面電荷及金屬間之電磁反應(Electrostatic interaction)影響吸附速率、選擇性及吸附程度，金屬表面電荷與水的 pH 有關，固體表面零電荷酸鹼度pHpzc 影響吸附分佈。Fe、Mn 及 Al 存在大部份沉積垢中，且對很多 TIC 具吸附親和力，鐵存在氧化物、氫氧化物及碳酸基礦化物等，能對砷及硒產生去穩作用而吸附。MnO₂ 可吸附砷、鉛、鎘、鋅等 TIC；MnO₂ 於低 ORP 或缺氧態(如生物膜中或垢底層)、低酸鹼度(pH<7.5) 易於還原及釋出 TIC。

Smith(1999 年)表示，影響吸附反應之因素最重要的是溶液之 pH 值、其次有被吸附物質之特定性與存在溶液中之濃度、被吸附物質之競爭性、溶液複合物之形成、吸附體之組成及表面鍵結址之多寡。一般而言，低 pH 值、還原狀況、低固體顆粒負荷及高濃度強錯合劑，可導致金屬溶出。

2.釋出

釋出(Release)包括脫附(Desorption)、去穩(Destabilization)、轉換(Transformation)及水力(Hydraulics)等作用。

沉積物(Deposit)或積垢(Scale)於管壁之粘著程度不同，會因水的流向、流速或瞬間壓變狀況而沖出，使固體再懸浮(Resuspension)。另管中固體物遇水化學(Water Chemistry)參數(包括 pH 值、水溫、鹼度、ORP 及水中溶解鈣、DIC 及磷酸鹽等)任一或多參數變化，即可能發生溶出(Dissolution)現象。脫附(Desorption)則通常在於「競爭取代」(Competitive displacement)及「表面取代」(Surface Substitution)之發生，表面取代發生於同物化及(或)電化特性之物質，或基體表面電勢之改變，基體中物質並非完全可逆或不可逆，如管垢底層物質可能最不易脫附。

(三)金屬於基體之吸附

TIC 可能於管壁表面被積垢及沉積物阻滯吸附，例如鐵之氫氧化合物(goethite(α -FeOOH) 、 lepidocrocite(γ -FeOOH) 、 magnetite(Fe₃O₄)及 ferrihydrite)會對砷酸鹽、鉻酸鹽及鉛、鎘及鎳等金屬有強的吸附力。另含水錳氧化物(HMOs)因為有較高表面積及較低之 pHpzc，而有較強之吸附能力。Peng 等人 (2012 年)研究發現，管線累積固體中鋇和錳濃度具顯著相關性，錳氧化物對鋇的吸附力較鐵氧化物強；鍍鋅鐵管錳化合物吸附大量鎳，顯示鍍鋅鐵管管材之鋅內襯(Coating)會溶出鎳、鉛、銅、鎘及鉻。

USEPA(2006 年)表示，積垢及沉積物的礦物學性質會影響吸附或共沉的選擇性(selectivity)及量(Amount)。例如在 pH 值=7 的

狀況下，砷會吸附在鐵固體上，水合錳氧化物會吸附鉛和砷。 MnO_2 沉澱具清除(Scavenge)性質，在檢驗方法中常用於去除如鋁、錳、銅、鎳、鉛、鈇、鋅等微量金屬即可顯示其特性。

pH 值影響吸附及溶解度平衡，大部份無機污染物存在管網中離子的殘餘表面電荷(net surface charge)隨 pH 值而變，如鐵之氧化物及氫氧化物 pH_{pzc} 在 7.5~8.5 間，鋁基化物則有較高得 pH_{pzc} ；鉛、銅、錳及鎳(3 價) 隨 pH 值增加溶解度均降低。

Smith(1999 年)綜整相關研究表示，一般金屬陽離子吸附於氧化物固體表面具有的特性有 a 吸附隨 pH 增加而增加，且通常發生於很窄的 pH 範圍(即吸附脊)b. 吸附脊是被吸附陽離子的特性而非吸附物質 c. 吸附反應消耗 OH^- 。研究水合鐵氧化物之吸附發現，陽離子電荷越高，吸附越強；陽離子水解趨勢越強，吸附越強。

吸附時 pH 越低，選擇性越高；多價金屬陽離子選擇性較單價高；離子半徑越大吸附選擇性越強。在大部份金屬氧化物吸附上，選擇性順序為鎳>鉛>銅>鈇>鋅及鎳>錳

(四)管網無機污染物(TIC)的實際調查研究案例

Peng 等人(2012 年)採集美國 12 個州的 20 個自來水事業 72 個固體樣品(其中 46 個取樣自管段內壁，26 個來自消防栓排水篩出固體)及相對應的管網清水，固體樣品經消化後，均以 ICP/MS 檢測 11 項無機重金屬(Ba、Pb、Ni、V、As、Cr、U、Cd、Sb、Se、Tl)，結果管網清水僅 2 個樣品鉛不符飲用水水質標準。沉積固體中鋇含量最高，鉛、鎳、鈇、

砷、鉻、鈾、錳、銻、錒依序遞減。由累積發生率證明鉛、鎳、鉻、銻於消防栓排水固體之量較管段內壁為高，顯示此 4 種污染物顆粒較易隨水力負荷增加釋出；相反的，鈇、砷、錳、錒在管段內壁之含量較消防栓排水固體中為高，顯示此等污染物對水力或物理性之影響較不敏感。另外由水中重金屬與固體中重金屬含量無相關性現象(水中濃度極低而固體中重量濃度高)，顯示水質參數(pH、鹼度、硬度)、管材溶出來源，礦化(Mineralogical)及吸附(Sorption)等在無機污染物滯留及共沉扮演一個重要的角色。

沉積物(sediments)為累積在低流速區、盲端及污染物池上之鬆軟顆粒物質，成份包括淤泥、泥土、原水中有機物、鐵錳等腐蝕副產物及淨水副產物等。USEPA(2006 年)擷取 Kirmeyer (2000 年)的研究結果，該研究分析配水池與幹管中沉積物成份，發現鐵氧化物分別為 19%及 62%，氫氧化鋁則為 15%與 0%，碳酸鈣各約 10%。另 Friedman 等人(2003)研究發現，低流速(<4 fps)可移去鬆軟堆積物(sediments)及附著物；高流速(>5 fps)則可移除附著的水垢(scales)及鏽瘤(Tubercles)。鋁鹽後沉澱(post-precipitation)可形成堆積物(sediments)，且鋁常是鉛管水垢(scales)的主要成份。

Kim 等人(2011 年)以加拿大安大略省倫敦城 1927 年鋪設之實際鉛管腐蝕垢進行成份分析發現最主要成份為 hydrocerussite($Pb(CO_3)_2(OH)_2$)，小部份為 $PbCO_3$ 及 Pb_3O_4 ，另外主要金屬依序有鋁、鐵、鈣及錳。另研究發現提高 pH 值可降低

腐蝕垢(corrosion scale)中鉛之立即性溶解度及後續(隨時間)之溶解度，以有效降低水中鉛的濃度。鉛腐蝕垢中其他金屬溶出濃度會隨 pH 值而變，如鋇、鈣、鎂在 pH=6 溶出最高，隨 pH 提高降低溶出濃度；鎳、錳、鋅僅在 pH 值等於 6 溶出；鋁、砷、鉻則在高 pH 值溶出較多(砷及鉻是由於易附著在鋁相化合物中，故一併溶出)，最多為 pH=10 時；研究亦顯示砷易附著於鐵相化合物中。低 pH 時，hydrocerussite($Pb(CO_3)_2(OH)_2$) 會轉化成 cerussite($Pb(CO_3)$)。增加水中硬度會減少腐蝕作用，但亦會增加水中溶解鉛濃度；增加餘氯濃度，因增加氧化鉛之量。可減少水中溶解鉛濃度。

Sarin 等人(2003 年)以美國北伊利諾水公司(NIWC)提供之 70 年鍍鋅鐵管進行管垢組成及鐵成分釋出研究，發現管垢以 Fe(III)相沉積物為主，且管垢中以溶解性 Fe(II)態存在。已腐蝕管之鐵釋出主要為 Fe(II)，且溶氧等氧化劑(如結合餘氯)增加會降低鐵的釋出。本研究證明增加氧化劑濃度及維持流動狀況會降低腐蝕鐵管鐵的釋出，氧化劑消耗於氧化管垢中的 Fe(II)及釋出水中的 Fe(II)與更進一步的管材腐蝕。滯留導致之厭氧環境會增加鐵的釋出及增高 pH 值。

研究指出老鍍鋅鐵管腐蝕垢包含 3 層結構，鬆的表面層、表面層下之較濃殼狀層(shell-like layer)及多孔鏽垢心(core)，成份主要為鐵，鏽垢心(core) 多孔結構中有高濃度的 Fe(II)存在。

丹麥企業與建造局(2008 年)研究飲用水系統之金屬釋出，藉由腐蝕原理，說明可能之金屬釋出機制及影響因素。金屬與水中氧反應

發生腐蝕作用，腐蝕有溶解性產物或形成於金屬表面之沉積物(Deposit)；水的成份會決定腐蝕產物之特性；如果腐蝕產物是溶解性的或多孔性的，金屬會繼續腐蝕，但如果形成穩定保護結垢(scale)會覆蓋於金屬表面，形成鈍化層(passive layer)，抑制更進一步腐蝕。低 pH 值狀況，腐蝕產物為溶解性，金屬表面腐蝕繼續發生；高 pH 值，腐蝕非溶解性沉積物發生，形成抑制腐蝕之鈍化層，或金屬表面有缺陷處發生局部腐蝕。一些金屬，如鋁，只在很窄的 pH 範圍內，生成穩定的腐蝕產物。低及間斷性的用水量，會導致難以形成保護層，致長期仍會溶出金屬於水中。水表、分支管、閥類、水龍頭等通常採用銅合金(如黃銅)，表面以鎳鉻電鍍，使表面光亮，一般金屬表面先鍍以一層 $1\mu m$ 鎳，再鍍以 $10\mu m$ 鉻，以防清洗時穿透，惟電鍍層邊緣鉻包覆鎳不全，導致鎳易溶出

三、實驗方法

鑑於管末端為管網系統中累積管垢及沉積物最嚴重的地方，本研究採取管末排水水樣檢驗重金屬含量，以瞭解管網系統中最嚴重之金屬污染狀況，惟此水樣並非用戶飲用的自來水。

於北水處例行管末排水時，採取管末消防栓排水初排水樣，並由管理單位提供盲管管種、管長及口徑等資訊進行分析。

水樣先測定自由餘氯、pH、濁度、總溶解固體量等項目後，分為 A 及 B 兩部份，A 部份以 1%硝酸直接消化；B 部份以孔徑 $1.5\mu m$ 濾紙過濾去除固體物質後，加硝酸保存。濾紙濾除物用以測定總懸浮固體量(TSS)。



每一水樣 A 與 B 兩部份均以感應耦合放射光譜儀測定 Fe、Al、Mn、Pb、As、Cd、Cr、Se、Ba、Sb、Ni、Cu、Zn、Ca、Mg、Be、Tl 等 17 項金屬濃度，A 部份測得結果為管末排水中總金屬濃度，B 部份測得結果則為管末排水溶液中金屬濃度，A 與 B 之差則可求得為固體中金屬濃度。後續進行相關數據分析。各項金屬之偵測極限如表 2

表 2 各項金屬之方法偵測極限

金屬	鐵	鋁	錳	鉛	砷	鎘	鉻	硒
MDL (μg/L)	1.47	1.61	0.73	1.28	2.07	0.73	0.78	1.65
金屬	鉍	銻	鎳	銅	鋅	鈹	碲	-
MDL (μg/L)	0.43	0.92	0.39	1.0	1.37	1.0	2.0	-

四、結果與討論

(一)金屬含量分析

本研究採取的 62 個管末排水水樣，經檢測 17 項重金屬之總濃度平均值，如圖 3，最高者為鈣，達 9312 μg/L，其次依序為鐵、鎂、鋁、錳、鋅、銅、鉍、鉛、鉻、鎳及鎘，其中鉛、鉻、鎳及鎘低於 5 μg/L；砷、硒、銻、鈹、碲則均為檢測不出。溶液中金屬則以鈣、鎂及鋁較高，鋁最大值達 839.6 μg/L，平均值 48.5 μg/L、中數值 26.3 μg/L；砷、硒、銻、鈹、碲均為檢測不出，鉍介於 5~10 μg/L 間，其餘金屬鐵、錳、鉛、鎘、鉻、鎳、鋅、銅濃度在 5 μg/L 以下。比較水樣中固態金屬含量比率，如圖 4，90% 以上者有鐵、錳及鋁；60~89% 者有鉛、鎳、銅、鋅；20~40% 者有鉻及鉍；10% 左右及以下者有鎘、鈣及鎂，顯示管末滯留狀態自來水中鐵、鋁、錳、鉛、鎳、鋅、銅大部份以固態存在，鉻及鉍

則小部份以固態存在，鎘、鈣、鎂則大部份以溶液態存在。

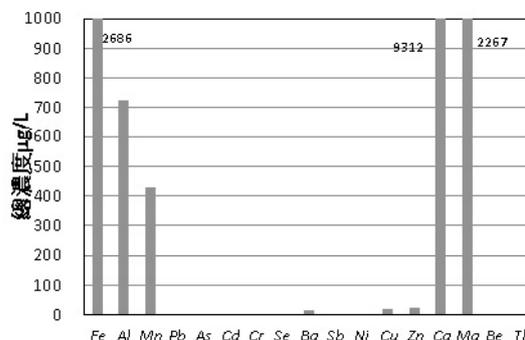


圖 3 管末排水各項金屬平均總濃度比較

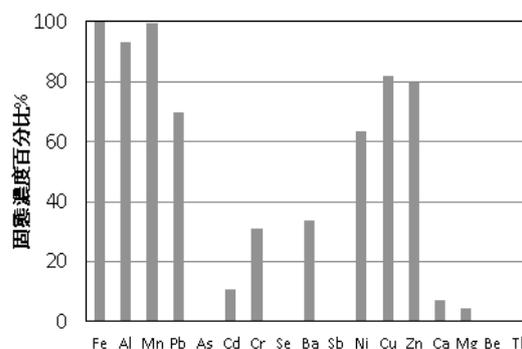


圖 4 管末排水各項金屬存在固態比率比較

分析管末排水中各項金屬總濃度之累積頻度，發現含量較高之鐵、鋁及錳等主要金屬，90% 累積頻度對應濃度分別約在 7500、2000 及 1000 μg/L；而鉛等濃度較低之次要金屬，90% 累積頻度對應濃度則分別為鉛 10 μg/L、鉻 3 μg/L、鉍 20 μg/L、鉻 4.5 μg/L、銅 40 μg/L、鋅 60 μg/L，以鋅、銅及鉍較高。而溶液濃度之累積頻度，90% 累積頻度對應濃度為鐵 10 μg/L、鋁 75 μg/L、錳 2.5 μg/L、鉛 2.5 μg/L、鉻 1.8 μg/L、鉍 15 μg/L、鉻 2.5 μg/L、銅 5 μg/L、鋅 6 μg/L，均遠低於我國「飲用水水質標準」限值，顯示只要充份排水將固態排除，存在水中之溶解態重金屬，含量極微。

(二)金屬含量簡易替代指標分析

為透過簡易水質參數(如濁度)，快速瞭解管末自來水中金屬含量，分析二者之相關性。以鐵、鋁、錳及鉛之總含量對濁度作圖分析發現，總鐵與濁度之相關性極高，如圖 5， $R^2=0.9581$ ，二者可以公式:總鐵(ppb)=139.06*濁度(NTU)-129.3 換算，其餘金屬則不佳。故檢測管末排水自來水之濁度可用以約略判斷總鐵含量。另外，總鐵、總錳及總鋁之含量與總懸浮固體量 R^2 值大於 0.5，有一定程度之相關性，總鉛與總懸浮固體量之相關性則不佳。顯示水中存在某些顆粒物質，尺寸小於 $1.5\mu\text{m}$ ，無法為懸浮固體濾紙濾除，但懸浮水中可造成光的散射，而增加濁度讀值，而以含鐵顆粒最為明顯；而錳與鋁則大部份為大於 $1.5\mu\text{m}$ 懸浮固體顆粒，且此部份固體顆粒可能具光吸收性，而影響濁度的量測。

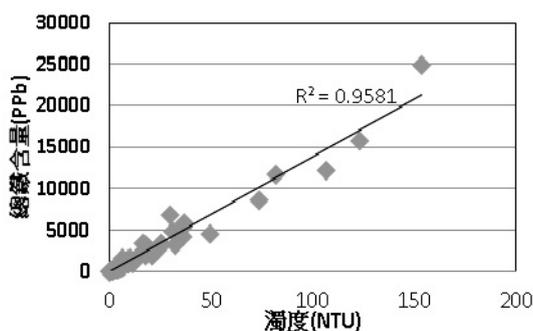


圖 5 管末排水中總鐵含量與濁度之相關性

(三)溶液中金屬與固體中金屬之相關性

以管末排水各項金屬於溶液中濃度與固體中濃度進行相關性分析，結果二者間均無相關性。

(四)金屬與溶液 pH 值之關係

溶液之 pH 值為影響金屬在水中形態的最主要因素，以管末自來水中各項金屬之固體比率對溶液之 pH 值

作圖分析(典型如圖 6~圖 8)，可發現各種金屬之表現不同。鐵在 pH 值 7.0 以上，固體含量達 90%以上；錳在 pH 值 7.0 固體含量 50~100%，pH 值 8.0 固體含量 80~100%，pH 值 9.0，固體含量略降至 60%，溶解度略升；pH 值 10.0 以上，固體含量升高達 80%，溶解度降低；鋁固體在 pH 值 7.0 時固體含量在 40%~100%間，8.0 會逐漸溶解，9.0 固體含量驟降至 0%，10.0 上升至 40~60%，11.0 再下降至 0%；鉛在 pH 值 7.0 固體含量 0~100%，隨 pH 值固體含量逐漸升高，至 11.0 完全形成固體。銅在 pH 值約 7.0 固體含量 30~100%，隨 pH 升高固體含量逐漸升高，至 pH 值 11.0 完全形成固體。鉻在任何 pH 值下，固體百分比均較前述金屬為低，在 60%以下，在 pH 值為 7.0 固體含量 0~70%，pH 值 8.0~9.0 降至 20%以下，pH 值 10.0 略升 11.0 又降。鋇在 pH 值 7.0 以上，溶解度高，固體含量約均在 20%以下；鋅在 pH 值 7.0~8.0 固體含量狀況分散(20%~100%)，9.0 以上固體含量達 80%以上。鎳在 pH 值 7.0~8.0 間固體含量狀況分散(0%~100%)，pH 值 9.0 降至 10%，pH 值 10.0 升達 100%，pH 值 11.0 再降至 40%。歸納各項金屬在溶液不同 pH 值之沉澱及溶解狀況，如表 2。值得注意的是是一些影響健康金屬，在特定 pH 值下，如鉛、鋁及鎳(pH=8.0~9.0)與鉻、鋇(pH=7.0~11.0)，有可能原吸附於管垢固體上，因管末滯留 pH 值升高致溶出，而影響飲用健康。

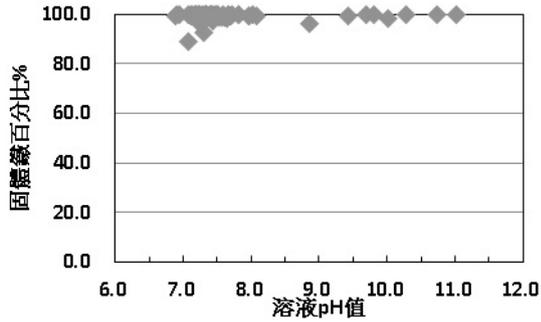


圖 6 固體鐵百分比與 pH 之關係

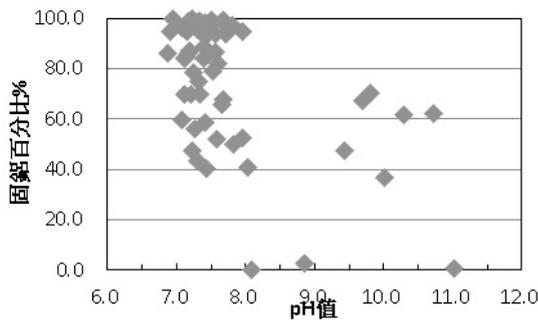


圖 7 固體鋁百分比與 pH 之關係

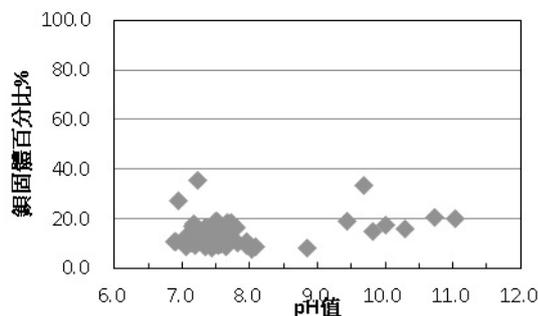


圖 8 固體鋇百分比與 pH 之關係

(五)金屬之共沉與吸附現象

管末自來水中所含固體最主要的金屬為鐵、錳及鋁，這 3 種金屬存在大部份沉積物中，會產生共沉澱，形成活性沉澱基體 (Substrate)，而對溶液中其他微量溶解金屬產生吸附作用。

以管末排水中固體錳濃度及固體鋁濃度之相關性極佳(如圖 9)，鐵與鋁及鋁與錳相關性則不佳。可能原因為鋁大部份來自後混凝產物、水泥管壁釋出及管線施工土壤沉積物等，在管末低流速區，產生 $Al(OH)_3$ 化合物，而水中錳則產生 MnO_2 化合物，當遇管末水高 pH 狀況，此 pH 值低於前者之

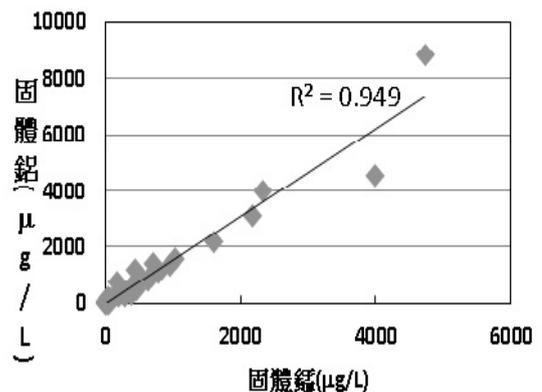


圖 9 管末排水固體中鐵與錳之相關性

表 2 各種金屬在不同 pH 值下之存在形態

金屬/pH 值	7.0~7.5	7.5~8.0	8.0~9.0	9.0~10.0	10.0~11.0
鐵(Fe)	完全沉澱	完全沉澱	完全沉澱	完全沉澱	完全沉澱
錳(Mn)	完全沉澱	完全沉澱	大部份沉澱	大部份沉澱	完全沉澱
鋁(Al)	大部份沉澱	大部份沉澱	完全溶解	大部份沉澱	沉澱溶解共存
鉛(Pb)	沉澱溶解共存	大部份沉澱	大部份溶解	大部份沉澱	完全沉澱
銅(Cu)	大部份沉澱	大部份沉澱	大部份沉澱	完全沉澱	完全沉澱
鉻(Cr)	大部份溶解	大部份溶解	完全溶解	大部份溶解	完全溶解
鋇(Ba)	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解	完全溶解
鋅(Zn)	大部份沉澱	大部份沉澱	大部份沉澱	完全沉澱	完全沉澱
鎳(Ni)	沉澱溶解共存	沉澱溶解共存	完全溶解	完全沉澱	沉澱溶解共存

pHzpc(10)，使之表面帶正電荷，然高於後者之 pHzpc(1.5~2.8)，使之表面帶負電荷，故二者互相吸附，產生共同堆積，而鐵氧化物之 pHzpc 在 7.5~8.5，則與管末水 pH 約略相當，使之呈中性。

想瞭解沉澱基體(Substrate)固體，吸附溶液中之微量金屬之狀況，以固體中鐵、錳及鋁濃度對其他金屬濃度進行相關性分析，發現 pH 值小於 7.5 鐵、錳及鋁與鉻具相關性， R^2 值達 0.48、0.59 及 0.45，顯示 pH 值小於 7.5，有利於鉻吸附於鐵、鋁及錳氧化物固體(於數 $\mu\text{g/L}$ 濃度等級)，如圖 10；另錳與鋇具相關性，顯示 pH 值小於 7.5，固體錳會明顯吸附鋇(約數 10 ppb 濃度等級)，如圖 11。其中鐵會吸附鉻，與 Peng & Korshin(2010 年)評估管線銹垢中鉻易與結晶鐵氧化物共存之結論相符。

分析管末自來水所含固體中鉛與銅、鉛與鋅及銅與鋅濃度之相關性， R^2 分別為 0.62、0.60 及 0.84，三者具相關性，如圖 12，顯示鉛銅鋅之特性相同，易共存。而鉻與鋇、鉻與鎳及鋇與鎳間相關係數 R^2 分別為 0.58、0.54 及 0.61，pH 值小於 8 時，提高為 0.78、0.63 及 0.78，顯示 pH 值小於 8 狀況，鉻鋇鎳更易共存，如圖 13。

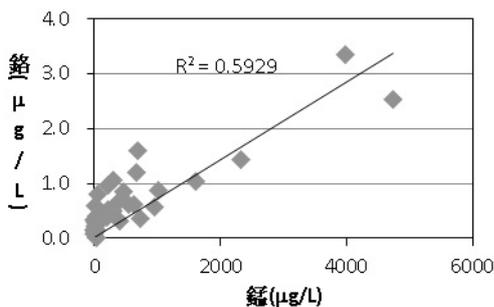


圖 10 固體錳吸附鉻狀況(pH<7.5)

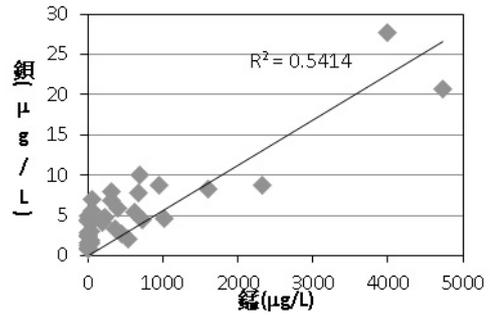


圖 11 固體錳吸附鋇狀況(pH<7.5)

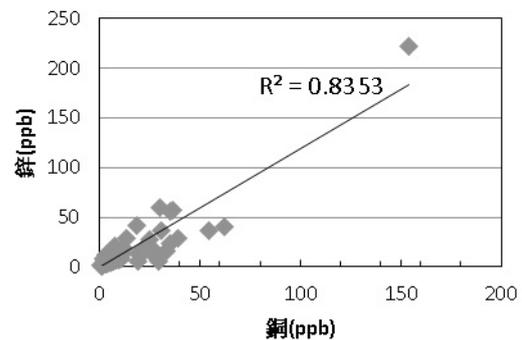


圖 12 銅與鋅共存狀況

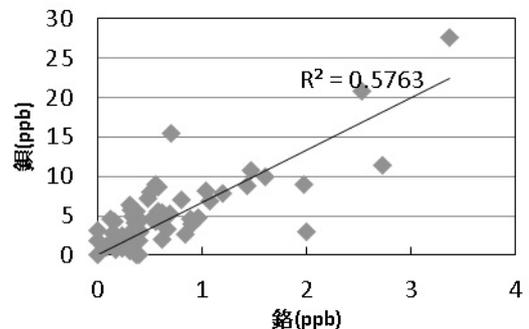


圖 13 鉻與鋇共存狀況

肆、管線溶出金屬評估

USEPA(2006)敘述管線混凝土內襯會溶出之金屬包括砷、鋇、鎳、鉻及鋁，而 Guo(1998)測試管材水泥砂漿溶出狀況，發現鋇、鎳、鉻及鉛、鎳、硒都有溶出。鍍鋅鐵管之鋅內襯則會溶出鎳、鉛、銅、鎳及鉻等金屬：鉛管會溶出鉛，北水處供水管網中，鍍鋅鐵管及鉛管為較早期使用的管材，現均已不使用，但鉛管仍有小部份存在管網中。

比較淨水場清水、管末排水溶液及固體中各項金屬平均濃度，如表 3。淨水場清水經管線輸送後，各項金屬中，硒與鎳未有增加跡象；略有增加者，依增加濃度由高至低依序為銅、鋇、鉛、鎳及鉻，但均低於飲用水水質標準限值；鋁增加最多，有可能為淨水程序殘餘混凝劑造成。

固體中出現鉛及銅濃度較高者，顯示有管材釋出鉛及銅後吸附於基體固體之狀況，是否會在特定狀況脫附，再溶於水中，值得注意。若對照表 2 銅在 pH=7~11 均呈沉澱狀態，不易溶出。鉛則應避免 pH 值達 9.0 致溶出呈離子態。

伍、結論與建議

(一)結論

1.北水處管末排水初排水樣分析結果

a.水中總金屬(含水中固體顆粒及溶液)平均濃度由高至低依序為：鈣>鐵>鎂>鋁>錳>

鋅>銅>鋇>鉛>鉻>鎳>鎳；其餘砷、硒、錒、鉍、鉍、鉍、鉍，均為檢測不出。

b.水溶液中金屬平均含量由高至低依序為以鈣>鎂>鋁>鋇>鋅>鐵>銅>錳>鉻>鉛>鎳>鎳，鋅以下金屬均在 5 μg/L 以下，砷、硒、錒、鉍、鉍、鉍則為檢測不出。

c.各項金屬在管末自來水中大部份呈固體態的有鐵、鋁、錳、鉛、鎳、鋅、銅，鉻及鋇則以小部份固態存在，鎳、鈣、鎂則大部份以溶液態存在。

d.分析各項金屬總濃度之累積發生頻度可分為濃度較高之鐵、鋁、錳等主要金屬，及濃度較低之鉛、鎳、鋇、鉻、銅、鋅等次要金屬。

e.溶液中金屬濃度與固體中金屬濃度無相關性。

2.管末排水總鐵含量可以透過濁度檢測值利用以下公式直接換算，相關係數可達 R2=0.9581

表 3 自來水於管網金屬增加狀況

項目/金屬	鋇 (μg/L)	鉻 (μg/L)	鎳 (μg/L)	鋁 (μg/L)	鉛 (μg/L)	鎳 (μg/L)	硒 (μg/L)	銅 (μg/L)
淨水場 清水	8.0	ND (<0.78)	ND (<0.73)	50	ND (<1.28)	ND (<0.39)	ND (<1.65)	ND (<1.0)
管末排水 溶液	9.2 (26.97 MAX)	1.45 (1.95 MAX)	ND (2.41MA X)	47.2 (839.6 MAX)	1.32 (2.73 MAX)	0.64 (2.27 MAX)	ND (<1.65)	3.43 (16.28 MAX)
管末排水 固體	5.12 (27.68 MAX)	0.652 (3.36 MAX)	ND (0.81MA X)	678.3 (8831.5 MAX)	3.0 (26.18 MAX)	1.15 (14.05 MAX)	ND (<1.65)	15.84 (154.23 MAX)
飲用水 水質標準 限值	2000	50	200	200	10	100	10	1000

總鐵(ppb)=139.06*濁度(NTU)-129.3 其他金屬則無相關性。

- 3.管末排水之 pH 值影響金屬存在的型態，如表 4.2 所示為在 pH=7.0~11.0 間，各項累積金屬之存在型態。值得注意的是在 pH=8.0~9.0 時之鉛、鋁及鎳；在 pH=7.0~11.0 時之鉻、鋇，原吸附存在於固體上之金屬，皆有可能因管末自來水滯留致 pH 值升高而溶出，影響飲用健康。
- 4.管末排水中固體主要以鐵、錳及鋁形成基體(Substrate)，其中錳與鋁相關性佳，管末排水高 pH 值，結合表面零電荷(ZPC,point of zero charge) 酸鹼值 pH_{zpc} 特性，而形成緊密吸附型態共沉澱(Coprecipitation)。
- 5.鐵、錳及鋁形成之基體固體具吸附溶液中微量金屬的能力，本研究顯示鉻會為鐵、錳及鋁基體所吸附，且 pH 值<7.5 有利於鉻之吸附；另錳會吸附鋇。且鎳、鉻與鋇三金屬會於固體中共存；鉛、銅及鋅 3 者亦然。
- 6.北水處管網系統大部份為 DIP 管，經分析可能溶出之金屬以鋁最高，其次依序為銅、鋇、鉛、鎳及鉻，錳與鎳則未增加。

(二)建議

- 1.管末初排水雖非供民眾飲用的自來水，但存在大量鐵鋁及錳等金屬，屬影響適飲性物質，且鋁有致阿茲海默症之虞，建議管線儘量予以連通，避免形成單向管影響影響水質；即便不得已形成，亦應定期充份排水至濁度符合水質標準為止，以避免金屬固體之產生。
- 2.金屬固體於管中形成，易吸附其他影響健康金屬，形成濃縮效應，遇 pH 值變化則易

再釋出，故應避免管線系統長期關閉閘栓，產生滯留，影響水質及民眾飲用健康。

- 3.管網系統及管材應儘量避免其他金屬釋出，如混凝土內襯之鋁及鋇、鉛管的鉛、合金材質的鎳等，建議均應再檢討溶出規範，加強驗收檢驗。

參考文獻

- 1.Hill Andrew S. et al ,2010.Behavior of trace inorganic contaminants in drinking water distribution systems.J.AWWA,102:7:107
- 2.Ching-yu Peng et.al.,2012.Occurance of trace inorganic contaminants in drinking water distribution systems, J.AWWA,104:3:53
- 3.USEPA,2006.Inorganic contaminant accumulation in portable water distribution systems.Contract 68-C-02-042,Total coliform rule issue paper,Washington.
- 4.Kim Eun Jung et.al.,2011.Effect of pH on the concentration of lead and trace contaminants in drinking water:A combined batch,pipe loop and sentinel home study , Water Research 45(3) 2763-2744.
- 5.Ching-yu Peng et.al.,2010.Characterization of elemental and structural composition of corrosion scales and deposits formed in drinking water distribution systems. Water Research 44(5) 4570-4580.
- 6.Sarin P. et al.,2003,Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems:effect of dissolved oxygen,Water Research 38(12)1295-1269.
- 7.The Danish Enterprise and Construction Authority, 2008,Metal release to drinking water-an overview of Danish and European regulations and investigations.

8.Smith Kathleen S. Metal sorption on mineral surfaces:An overview with examples relating to mineral deposits,The environmental geochemistry of mineral deposits part A:Processes,techniques,and health issues , Society of economic geologist,Inc.(SEG),1999.

作者簡介

薛志宏先生

現職：台北自來水事業處水質科科長
專長：水質管理、淨水處理、水質檢驗

陳富鈴小姐

現職：台北自來水事業處水質科三級工程師
專長：水質管理、水質檢驗

賴頌仁先生

現職：台北自來水事業處水質科股長
專長：水質管理、淨水處理、水質檢驗

張美惠小姐

現職：台北自來水事業處水質科三級工程師
專長：水質管理、淨水處理、水質檢驗

本刊 105 年「每期專題」

期別	主 題	子 題	時程
35 卷 第 4 期	營運管理及 績效評估	供水設施及資產管理、資訊管理與應用、 供水管網、自來水營運、客戶服務、人力 資源管理、大數據分析、合理水價等	11 月

~歡迎各界就上述專題踴躍賜稿，稿酬從優~

慢濾池處理效能之探討

文/陳文祥、吳美炷、黃聖然、洪世政

摘要

慢濾池之操作因淨水設備設計互異，以致操作營運經驗無法完全適用於台灣自來水公司所屬慢濾池淨水場，為有效提升慢濾池之操作，利用綜合效能評估技術來評估慢濾池中水質處理不良的原因，透過綜合水質分析及其他相關水質參數為分析基礎，濾池的濾率、有效粒徑、池深、刮補砂方式及相關控制因子進行操作模式探討，並判斷是否將原有之慢濾池設備，加以妥善利用，以期達到最佳的處理效能，並對慢濾池之設計、管理、操作及維護進行完整檢視及分析，期透過慢濾池之最適化設計，以提升慢濾池之操作營運效能。

慢濾用於淨水處理是簡單的技術，無須於程序中添加化學藥劑，透過生物處理來達到去除的效果，生物的活性影響水中污染物的去除。因此，在新的慢濾池開始營運前或刮砂後必須進行濾池熟成的程序，而這也是經現場評估中發現營運中慢濾池淨水場最常忽略的操作程序。

利用資料庫—水質檢驗系統(LIMS)及水質預警資訊系統(ADTS)篩選運營中慢濾池淨水場具參考意義之歷史數據，分析評估現階段慢濾池處理成效，再透過慢濾池淨水場現場評估成果，逐場歸納出目前設計、操作、營運及管理之實場問題，經綜合分析討論提出一套慢濾池最適設計、操作、營運及管理準則，由運營中慢濾池淨水場水質分析結果及現場評估成果，生物性指標均可完全

去除，總有機物、氨氮、鐵及錳於慢濾操作正常狀況下亦大部分可去除，清水水質符合飲用水水質標準。

一、前言

慢濾作用包括沉澱吸附作用和生物化學作用兩個部分：砂面上層水中顆粒物沉降、吸附、截流及綜合性生物分解等作用；濾料表層微生物黏膜中微生物環境對污染物的複合生物作用；濾床隨深度增加對污染物進一步分解轉化，以及對顆粒物的進一步過濾攔截。微生物在污染物去除中發揮了主要作用，慢濾池生物黏膜中含有豐富的微生物種群，包括細菌、藻類、原生動物以及各種微生物的分泌物，這些微生物形成了發展良好食物鏈，生物黏膜的緻密結構對水中污染物形成了很好的物理截留和吸附作用，此與慢濾池之處理效能息息相關。

本研究係對慢濾池設施進行處理效能之探討及改善，使得淨水場舊有的設備可發揮最大的處理能力並達到最佳的處理狀況，避免投注大量的經費添購或修正原有的設備，以加強淨水場之處理能力，以符合未來日趨嚴格的飲用水水質標準。

二、文獻回顧

慢濾處理技術始於 1829 年蘇格蘭地區，由英國學者 John Gibbs 提出，然因占地較廣，漸漸由 1897 年誕生的快濾法所取代，19 世紀後期，德國學者 Robert Koch 透過研究同樣使用 Elbe 河為水源的 Hamburg 及

Altona 兩座城市淨水設備發現，採用慢濾程序處理公共給水的 Altona 市，在霍亂流行期間，致病率明顯低於 Hamburg 市，透過水流流過緻密之砂層(所謂慢濾砂床)可達到去除細菌及濁度的目的 (Barrett et al. 1991; Kohne & Logsdon, 2001; Guchi, 2015)。淨水理論至 20 世紀越顯完備，以 Huisman 在 1974 年所提出的 Slow Sand Filtration 中對慢濾池的淨水機制提出系統性的說明，其機制大約分為五大項：

1. 透過水體停留使水中藻類利用鹽類並產生氧氣，協助其他微生物代謝。
2. 水中微生物及濾砂表面的生物膜經代謝分解水中有機物及部分造成懸浮固體及色度的物質。
3. 濾砂的表面特性可藉由電性吸附及化學鍵結吸附水中的污染物質，伴隨不同條件的濾砂選用，比表面積可達 15000 平方公尺/立方公尺，因此流線在經過濾料的流向改變，重力及離心力有助於吸附機制分離水中污染物。
4. 濾料間的孔隙率可達 40%，污染物流入這些狹小空間時因流速的變化使之沉澱於這些空間內。
5. 濾料表面的生物膜造成電性變化，可提升濾砂的吸附能力並加速微生物的分解效能，而此一機制的有效範圍可深達濾砂面以下 40 公分。

淨水流程中的慢濾系統(Slow Sand Filter, SSF)，其處理機制包括吸附、過濾及生物降解 (Biodegradation)，由於大部分水源中的無機污染物可藉由吸附及過濾予以去除，而傳統淨水程序中不易去除的 NOMs

具有生物分解性，因此可藉由慢濾系統中的生物降解機制來降低部份的天然有機質或是微量的有機污染物，不僅處理效率增加，並較符合經濟效益 (Eighmy, 1992, 1993)。

綜合上述因素，一般有機物質及鹽類可深入濾砂 40~60 公分，因此提出理想的慢濾池應具備以下條件，1.慢濾池建議深度 2.5~4 公尺，2.慢濾砂砂層厚度應介於 0.6~1.2 公尺，3.慢濾池濾砂以上水深建議為 1~1.5 公尺，4.水體在慢濾單元停留時間建議為 3~12 小時 (Huisman & Wood, 1974)。直至近年隨著開發中國家興起，慢濾處理低維護成本及操作技術需求的特色受到許多偏遠地區地方的青睞，以亞洲地方的實場經驗，以預製混凝土設備及磚砌硬體，配合粒徑 0.15~0.5 公厘間的濾料，並依據操作維護方式設置 40 公分~1 公尺的濾料初設厚度，往往就能達到良好的淨水效益(楊等人，2009)。

慢濾池的基本組成包括：表水層、濾砂層(粗砂及細砂)、礫石層及排出管，表水層位於砂層上方提供水往下流動的驅動力穿過濾砂層，可延遲停留在砂層上方數小時之久，砂因耐久性佳且效果不錯，通常做為濾層的材料，其有效粒徑通常在 0.1~0.4 公厘，礫石層其作用在於支撐砂層並避免砂子流出阻塞在濾水管中，水緩緩的由濾砂層的孔隙間濾出，而顆粒、有機物、微生物甚至是病毒或梨形鞭毛蟲、隱孢子蟲等皆被移除，以物理性截流或生物性降解的方式在濾砂層內反應，大部分的作用發生在濾砂的上層，在那裡顆粒沉積、藻類生長、生物相非常活躍而形成明顯的生物膜，但特定的反應行為也會發生在濾砂下層(Cleasby et al.,

1984)。慢濾池的濾料自上而下由細到粗，最上層一般為厚度 0.5 公尺左右、粒徑 0.1~0.3 公厘的石英砂或河砂，下層依次為粗砂，小石、中石，厚度一般為 30 公分，有研究根據慢濾池設計的參數，包括濾砂的有效粒徑(0.17~0.52 公厘)、濾砂層上的水頭高度(10~30 公分)進行研究，發現最佳的操作條件是以細砂、10 公分高的水頭、原水進流速度 0.01 - 0.03 公尺/小時，平均可達到 1.82 log 即 98.5%的微生物去除率(Jenkins et al., 2011)。在慢濾控制技術上有幾個重要的參數必須注意，一是過濾之濾率，濾率的快慢會影響污染物去除的效益，特別是微生物，通常濾率越大去除效果會降低，也可能導致微生物貫穿，因此，有效的取得出水量與濾率之平衡關係非常重要，另一個重要的因素是濾砂層厚度，最少應有 0.6 公尺以上，Bellamy 發現，當濾砂層由 0.97 公尺降至 0.48 公尺時，大腸桿菌的去除率由 97%降至 95%。(Bellamy et al., 1985)

通常過濾的行為包括物理性(轉移)、化學性(連結)及生物降解，其中在慢濾行為，以生物行為最重要。物理性移轉機制包括抓取及濾除兩部分，而當顆粒粒徑大於濾砂層之孔隙時即被移除，而顆粒的累積及微生物生長會造成濾砂層之孔隙減小，而對於小於濾砂層之孔隙之顆粒，抓取成了去除的重要機制。細菌、病毒及膠體粒子大小約 0.01 微公尺~1 微公尺，在較深層的砂濾層中會藉由沉降、截流及擴散作用將其濾除，凡德瓦爾力、顆粒帶電、表層的藻類、微生物胞外物質也提供了重要的去除效益(Muhammad et al., 1996; Bai et al., 2010)。

水中的生物性污染物，如微生物、病毒、梨形鞭毛蟲與隱孢子蟲等原生動物，在慢濾系統中被去除的機會甚高，特別是在生物環境旺盛的砂層的表層，而當砂層上的水越高時，因延長了水力停留時間，大腸桿菌及總菌被去除的機率也越高(Huisman, 1974)，而當砂層表面的原生動物增加時，大腸桿菌被去除的效率也會增加(Collins et al., 1989)。

三、研究方法

經查台灣自來水公司截至今年最新統計資料全台共 455 座淨水場，其中仍有 50 處慢濾系統之淨水場約占整體九分之一，且這些淨水場多屬偏鄉地區，大多為委外巡迴操作場站，相較於快濾系統因其技術需求低(毋須於程序中添加混凝劑及濾池設備毋須經常反洗)，僅需定期刮砂、補砂，若此系統適當操作，將能有效發揮其優點，提供更經濟、良好且穩定的出水品質，惟上述淨水場因建置年代久遠，早期的設計互異，以致操作營運經驗無法完全適用於台灣自來水公司所屬慢濾池淨水場，另外當時設計之處理標的已漸漸不符合現行的水文水質條件，加上多數閥件經年累月年久失修，造成操作人員操作困難，爰此，本研究就慢濾池淨水場評估，綜合分析討論後，提出操作、設計建議準則，作為水公司推動偏遠、離島或其他適當地區採用慢濾池運作的參考。

四、結果與討論

實驗分為實場評估及水質試驗兩大部分，實場評估目的為實場設備盤點及操作效能評析，水質試驗分別檢測原水、慢濾池出流水、清水池以及配水端之水質，以了解處



理的效果。以下分別就西螺淨水場(地下水)及西嶼淨水場(水庫水)為例進行說明。

***西螺淨水場**

本場配置圖及淨水流程圖(詳圖 1 及圖 2),於民國 83 年開始啟用,設計出水量 27,000 CMD,水源取自深井地下水,目前出水量 11,000~12,000 CMD,8 池慢濾池輪替操作。

由表 1 所示,原水經慢濾系統處理後,其濁度、總鐵、總錳均明顯下降,氧化還原

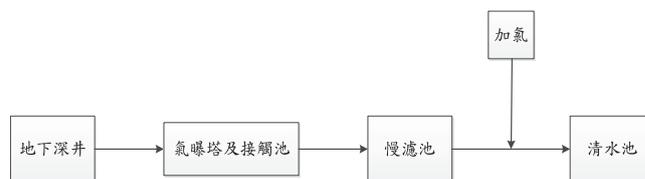


圖 2 西螺淨水場流程圖

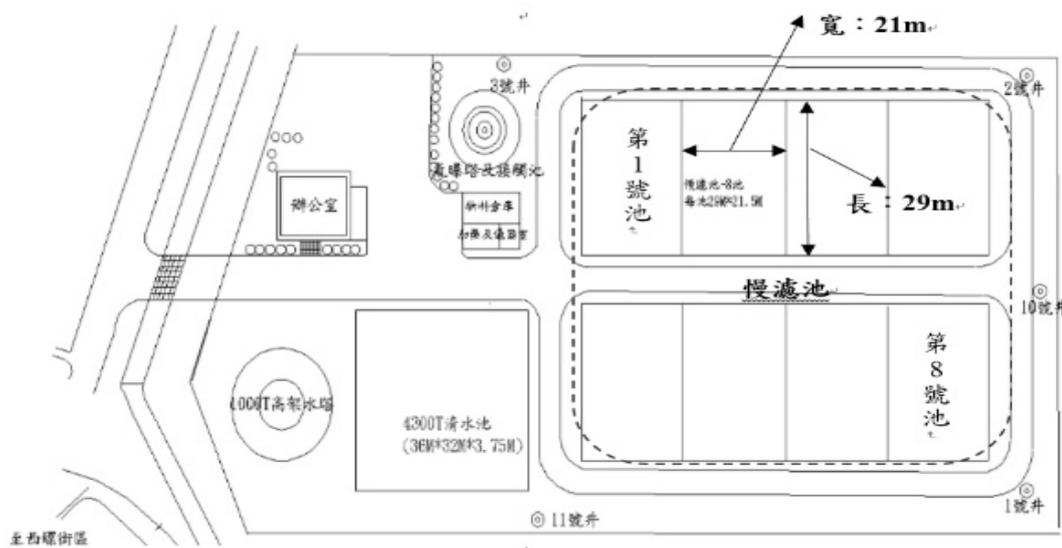


圖 1 西螺淨水場平面配置圖

表 1 西螺淨水場現場採樣水質檢驗分析數據

採樣日期	採樣點	水溫	pH	濁度	餘氯	氧化還原電位	溶氧	色度	鹼度	硝酸鹽氮	亞硝酸鹽氮	氨氮	總鐵	總錳	大腸桿菌群	UV ₂₅₄	陸源微生物源指標	NPDOC	SUVA
		℃		NTU	mg/L	mV	mg/L (%)	鉀鈉單位	mg/L as CaCO ₃	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	CFU/100ml	cm ⁻¹		mg/L	L/mg-m
105.03.03	原水	22.4	7.33	0.49	-	-33.0	0.84 (10.0%)	<5	202	0.11	<0.01	ND	1.05	0.168	<1	<0.001	1.26	0.3	<0.333
105.03.03	慢濾池 1 濾後水	21.7	7.54	0.37	-	228	8.52 (98.7%)	<5	203	0.15	ND	ND	0.04	ND	<1	<0.001	0.94	0.3	<0.333
105.03.03	慢濾池 8 濾後水	21.7	7.61	0.41	-	237.4	8.68 (100.1%)	<5	207	0.13	ND	ND	0.06	ND	<1	<0.001	1.18	0.4	<0.250
105.03.03	清水	22.4	7.68	0.41	0.67	558	8.57 (100.2%)	<5	186	0.13	ND	ND	0.03	ND	<1	<0.001	1.97	0.4	<0.250
105.03.03	配水	21.4	7.57	0.33	0.63	623.7	8.49 (98.0%)	<5	184	0.18	ND	ND	0.03	ND	<1	<0.001	0.97	0.3	<0.333

【註】: ND 表示“未檢出”,“-”表示“無檢測數據”

電位從-33 mV 升至 558 mV，顯示原水從地下深井抽取上來時呈還原態(氧化還原電位為負值)，鐵、錳均偏高，然後經由慢濾池中微生物好氧分解作用，ORP 值逐漸升高，溶氧比例從 10% 上升至 98~100%，鐵、錳值下降(有效被氧化)，處理後水質均符合飲用水水標準。若以河水及湖水在螢光表現上的差異，作為有機物陸源(terrestrial sources)及微生物源(microbial sources)的來源指標(index = $\text{int}(\text{Ex}/\text{Em}) : \text{int}(\text{Ex}/\text{Em}) = \text{int}(370/450 \text{ nm}) : \text{int}(370/500 \text{ nm})$)，經研究顯示，若該指標接近 1.9 時，代表水中的微生物源貢獻較大，此外，若該指標接近 1.4 時，則代表水體中陸地的腐植質貢獻較大，藉由指標的差異可了解環境中天然有機質(NOM)的來源。原水、慢濾池 1 與慢濾池 8 之陸源/微生物源指標分別為 1.26、0.94、1.18 接近 1.4 代表水體中陸地的腐植質貢獻較大，清水該指標為 1.97 接近 1.9，代表水中的微生物源貢獻較大，顯示環境中天然有機質經微生物作用後有些微變化，另 SUVA 值均小於 2，有機物組成以非腐植質親水性小分子量為主。

圖 3~圖 4 螢光光譜分析結果，西螺場原水訊號強多集中於 II、III 區，有機物組成偏屬簡易芳香族蛋白質(II 區)與較疏水性之類黃酸物質(III 區)，經慢濾系統處理後，簡易芳香族蛋白質(II 區)與類黃酸物質(III 區)訊號均降低，慢濾池 1 處理效果較慢濾池 8 佳，清水簡易芳香族蛋白質(II 區)訊號稍高，配水與濾後水訊號差異不大，另可知慢濾系統藉由微生物轉化降解使其有機物組成改變。

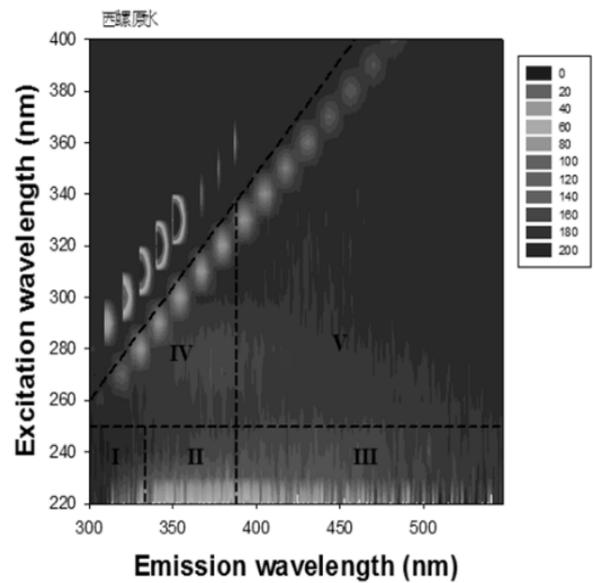


圖 3 西螺淨水場原水

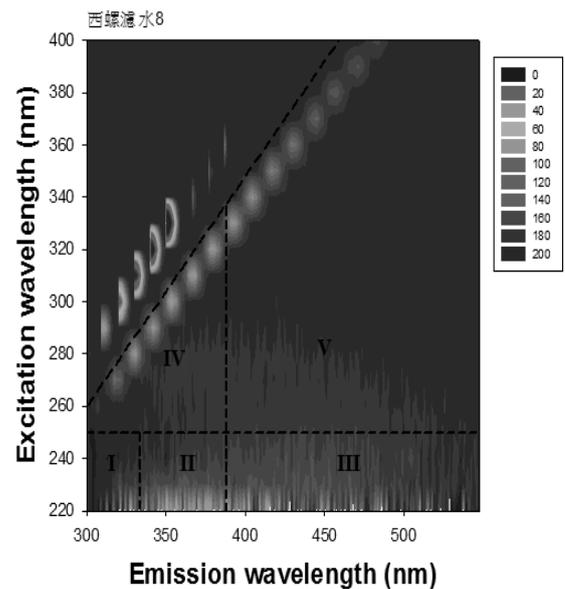


圖 4 西螺淨水場濾後水螢光光譜分析

五、問題及討論

(一)設計問題

1. 濾水溢流堰高度不夠(詳圖 5)，無法有效蓄水至砂面高度，操作彈性空間受限，出水量無法提升。



圖 5 清水溢流堰高度不足

2. 濾水溢流堰高度不夠無法讓慢濾池蓄升至滿池(淹過砂面)，加上無反向進水設計，致無法有效將濾砂層中空氣趕出，又因隨過濾時間增加，摩擦損失水頭逐漸增加，當損失水頭大於砂面之水深時，水往下拉產生部分真空，形成負水頭(Negative Head)。若負水頭超出某一限度時，水中溶解之氣體游離而聚積於砂層中導致空氣閉塞(Air binding)，若無及時將濾層中空氣趕出，則易降低過濾效率，影響出水量。

(二)操作面臨問題

1. 慢濾池輪替操作時，缺少將池水蓄滿淹過砂面停留 5~7 天之“養池”程序，使其建立起完整良好的微生物生態系(藻類、細菌、原生動物…等)，導致經由微生物處理分解作用無法有效發揮(詳圖 6)。
2. 刮砂深度不足，老舊生物膜累積在表面導致濾水效率降低。
3. 因建廠後濾床濾砂無定期汰換，僅補砂而已，無法確認底部濾砂是否已結塊間接影響濾率及處理效果。



圖 6 淨水場濾池刮砂

(三)改善建議

1. 增加濾水溢流堰高度，俾利使水位保持在濾砂面以上。
2. 設計建置濾水倒灌設備(反向進水設計)：
 - (1) 當濾池表面刮砂完畢，在導入原水前，應先將調節井之過濾水返送回濾池，以去除濾砂層中的滯留氣體，俟水面達砂面上 10 公分始可停止返送，再進原水。
 - (2) 亦可於出水幹管上設制水閥，利用其他濾池之過濾水返送。
3. 調節井之高程應在砂面以上，以免產生負水頭。
4. 濾床濾砂開挖重新檢視是否有濾砂結塊情形？若有，重新換補更新整池濾砂(詳圖 7)。



圖 7 濾砂層結塊

***西嶼淨水場**

本場配置圖及淨水流程圖(詳圖 8 及圖 9),於民國 84 年開始啟用,設計出水量 2,200 CMD,水源取自地下水(西嶼深井)及水庫水(小池水庫),目前出水量 800 CMD,2 池慢濾池輪替操作。

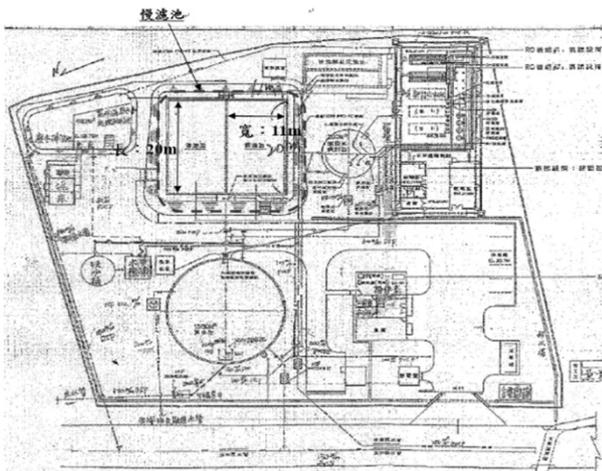


圖 8 西嶼淨水場平面配置

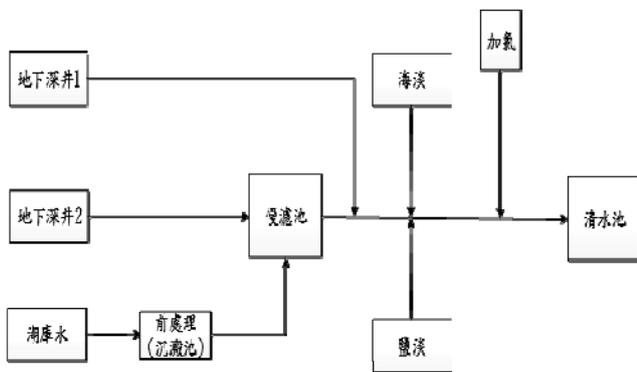


圖 9 西嶼淨水場淨水流程

水質檢驗結果由表 2 所示,原水經慢濾系統處理後,其濁度、色度、總鐵、總錳均明顯下降,因原水(湖庫水)有先經過加藥(硫酸鋁)前處理,消耗鹼度(由 261.4 mg/L as CaCO₃降至 197.6 mg/L as CaCO₃),去除色度、鐵及錳,因先將地下深井水與湖庫水兩股水

源混合後才進慢濾池,故其氧化還原電位由 210 mV 降至 170 mV,溶氧比例由 98.0%降至 77.8%,總錳上升,濾後水水質均符合飲用水水質標準。若以河水及湖水在螢表現上的差異,作為陸源(terrestrial sources)及微生物源(microbial sources)的來源指標 $index = \text{int}(Ex/Em) : \text{int}(Ex/Em) = \text{int}(370/450 \text{ nm}) : \text{int}(370/500 \text{ nm})$,經研究顯示,若該指標接近 1.9 時,代表水中的微生物源貢獻較大,此外,若該指標接近 1.4 時,則代表水體中陸地的腐植質貢獻較大,藉由指標的差異可了解環境中天然有機質(NOM)的來源。原水、沉澱後水、慢濾前混合水、慢濾池濾後水與清水之陸源/微生物源指標分別為 2.05、2.03、1.72、2.09 與 1.95 均接近 1.9,代表水中的微生物源貢獻較大。另 SUVA 值原水大於 2,有機物以疏水性與親水性混合為主,餘均小於 2,有機物組成以非腐植質親水性小分子量為主,代表環境中天然有機質經微生物作用後有些微變化。

圖 10~圖 11 螢光光譜分析結果,西嶼場原水訊號強多集中於 II、III、V 區,其中又以疏水性之類黃酸物質(III 區)訊號最強,有機物組成偏屬簡易芳香族蛋白質(II 區)、類黃酸物質(III 區)與類腐植酸物質(V 區),沉澱後水之類黃酸物質(III 區)訊號明顯下降,慢濾前混合水與濾後水差異不大,主要集中在 II、III 區,但訊號亦已減弱,清水則幾乎降解完畢,顯示本場之有機物經慢濾處理能透過微生物將其轉化降解。

表 2 西嶼淨水場現場採樣水質檢驗分析數據

採樣日期	採樣點	水溫 ℃	pH	濁度 NTU	餘氯 mg/L	氧化還原電位 mV	溶乳 mg/L (%)	色度 鉛鉍單位	鹼度 mg/L as CaCO ₃	硝酸鹽氮 mg/L	亞硝酸鹽氮 mg/L	氨氮 mg/L	總鐵 mg/L	總錳 mg/L	大腸桿菌群 CFU/100ml	UV ₂₅₄ cm ⁻¹	陸源微生物源指標	NPDOC mg/L	SUVA L/mg-m
105.03.17	原水 地面水	19.1	8.17	10.9	-	205.3	8.80 (93.2%)	35	261.4	0.25	ND	0.13	0.37	0.055	<1	0.088	2.05	4.0	2.198
105.03.17	沉澱後水	18.6	7.43	0.89	-	210	9.33 (98.0%)	<5	197.6	0.26	ND	0.05	0.05	ND	<1	0.048	2.03	2.9	1.659
105.03.17	慢濾前 混合水	23.4	7.87	0.70	-	174.0	6.95 (77.8%)	<5	189.3	0.26	ND	0.15	0.06	0.032	<1	0.024	1.72	1.9	1.284
105.03.17	慢濾池 濾後水 (未加氯)	21.7	7.83	0.81	-	210	7.97 (88.6%)	<5	197.6	0.26	ND	0.08	0.06	0.013	<1	0.028	2.09	1.7	1.659
105.03.17	清水	23.7	7.24	0.22	0.42	593	8.19 (94.7%)	<5	88.5	0.25	ND	ND	ND	ND	<1	0.012	1.95	2.2	0.532

【註】：ND 表示“未檢出”，“-”表示“無檢測數據”

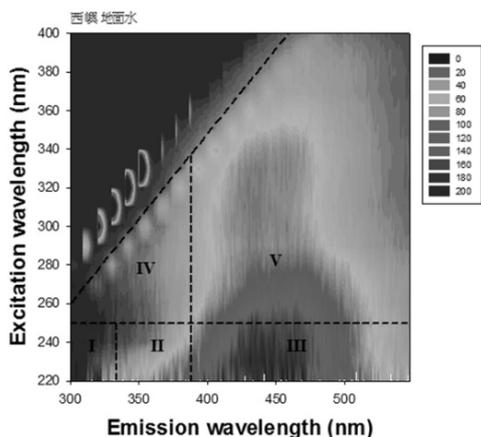


圖 10 西嶼場原水螢光光譜分析

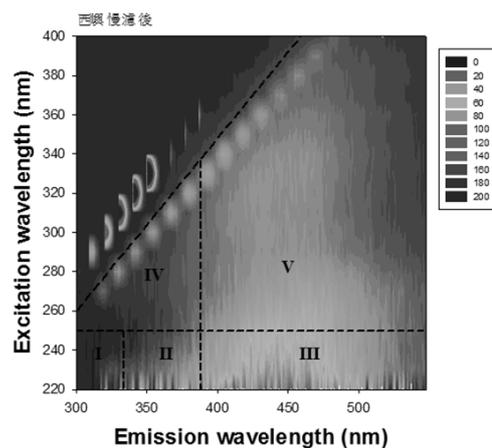
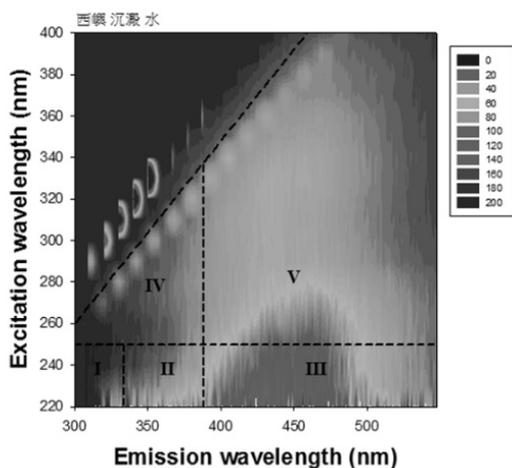


圖 11 西嶼場沉澱水螢光光譜分析



六、問題及討論

(一)設計問題

1. 濾水溢流堰高度不夠(詳圖 12)，無法有效蓄水至砂面高度，操作彈性空間受限，出水量無法提升。
2. 濾水溢流堰高度不夠無法讓慢濾池蓄升至滿池(淹過砂面)，加上無反向進水設計，致無法有效將濾砂層中空氣趕出，又因隨過濾時間增加，摩擦損失水頭逐漸增加，當損失水頭大於砂面之水深時，水往下拉

產生部分真空，形成負水頭(Negative Head)。若負水頭超出某一限度時，水中溶解之氣體游離而聚積於砂層中導致空氣閉塞(Air binding)，若無及時將濾層中空氣趕出，則易降低過濾效率，影響出水量。

- 3.無設置濾水控制閥，無法有效控制砂面液位及過濾之時程。



圖 12 西嶼場濾水溢流堰照片

(二)操作面臨問題

- 1.刮砂深度不足，老舊生物膜累積在表面導致濾水效率降低。
- 2.慢濾池輪替操作時(詳圖 13)，缺少將池水蓄滿淹過砂面停留 5~7 天之“養池”程序，使其建立起完整良好的微生物生態系(藻類、細菌、原生動物…等)，導致經由微生物處理分解作用無法有效發揮，甚為可惜。



圖 13 西嶼場慢濾池輪替操作現場照片

- 3.無設置濾水控制閥，無法有效控制砂面液位及過濾之時程，濾水程序為批次操作，出水量大時液位常常低於砂面，微生物生態系無法有效生長形成完整生物膜，導致濾水時生物處理效能成效不彰。

(三)改善建議

- 1.因原水濁度年平均 ≤ 2 NTU，最高濁度僅 9NTU，若混凝劑加藥控制不當，易導致濾層凝集(結塊)降低透水性，爰建議毋須添加混凝劑(硫酸鋁)。
- 2.本場為慢濾池系統，主要藉由微生物作用達到淨水功效，前加氯恐破壞微生物完整生態系生長，故不宜進行前加氯加藥處理。
- 3.增加濾水溢流堰高度，俾利使水位保持在濾砂面以上。
- 4.設計建置濾水倒灌設備(反向進水設計)：
 - (1)當濾池表面刮砂完畢，在導入原水前，應先將調節井之過濾水返送回濾池，以去除濾砂層中的滯留氣體，俟水面達砂面上 10 cm 始可停止返送，再進原水。
 - (2)亦可於出水幹管上設制水閥，利用其他濾池之過濾水返送。
- 5.調節井之高程應在砂面以上，以免產生負水頭。
- 6.刮砂深度應加深，要能有效刮除累積在表面上之老舊生物膜，俾使恢復其濾率，提升濾水成效，另刮砂後應需“養池” 5~7 天，讓新的生物膜生長形成完整的生態系，以有效發揮生物處理效能。

七、結論

慢濾用於淨水處理是簡單的技術，無須於程序中添加化學藥劑，透過生物處理來達到去除的效果，顆粒、有機物、鐵、錳、氨氮及大腸桿菌群等都有不錯的去除效率。生

物主要聚集在濾砂的表層，相關的研究指出，生物的活性影響水中污染物的去除，因此，在新的慢濾池開始營運前或刮砂後必須進行濾池熟成的程序，也就是經數星期的時間進行濾池生物培養，以確保處理的效果，經本研究的探討，規納結論如下：

(一)透過運營中慢濾池淨水場評估成果，設計主要問題歸納如下：

- 1.濾水溢流堰高度低於砂層高，無法有效確保蓄水高度，造成砂層表面生態環境變異，可能產生砂面上層水時有時無、水位高度變化大、僅局部砂層進行處理，甚至生物膜被曬乾等，將嚴重影響生物活性，致使污染物去除能力降低或無效果。
- 2.慢濾池缺反向進水設計，致無法有效將濾砂層中空氣趕出，又因隨過濾時間增加，摩擦損失水頭逐漸增加，當損失水頭大於砂面之水深時，水往下拉產生部分真空，形成負水頭(Negative Head)，若負水頭超出某一限度時，水中溶解之氣體游離而聚積於砂層中導致空氣閉塞(Air binding)，若無法將濾層中空氣趕出，將降低過濾效率減少出水量，也會影響生物的生長。
- 3.無設置濾水控制閥，無法有效控制砂面液位及過濾之濾程，導致濾水程序變成批次操作，出水量大時液位常常低於砂面，微生物生態系無法有效生長形成完整生物膜，導致濾水時生物處理效能成效不彰。

(二)透過運營中慢濾池淨水場評估成果，操作主要問題歸納如下：

- 1.刮砂深度不足，老舊生物膜累積在表面導致濾水效率降低。
- 2.慢濾池輪替操作時，缺少將池水蓄滿淹過砂面停留 5~7 天之“熟成”程序，使其建立起完整良好的微生物生態系(藻類、細菌、原生動物…等)，導致經由微生物處理分解作用無法有效發揮。

菌、原生動物…等)，導致經由微生物處理分解作用無法有效發揮。

- 3.濾砂僅刮砂補砂，無定期整池更新換砂，部分淨水場濾池濾砂有結塊情形發生，致無法有效發揮淨水功能。
- 4.原操作程序在慢濾池前端加入次氯酸鈉的操作方式，對於生物有極大的危害，無法讓生物保有適當的活性，影響污染物的去除效率且會造成鐵錳沉澱於濾砂形成硬塊。

(三)慢濾池的設計必須根據供水目標的需求、原水特性、環境特性，根據這個條件來加以規劃及設計，設計時更須考量未來操作營運的動線安排及系統的穩定。

(四)慢濾池操作條件取決於原始的設計，而更細微的操作及維護工作，則取決於慢濾池操作時，由各濾池表現出來的狀態，透過淨水目標的訂定，包括水質、水量等，慢濾池操作主要工作包括，濾池熟成、過濾程序控制及濾砂刮除。

(五)慢濾不像快濾須進行反洗但在表層水頭損失大於 90-120 公分時，濾砂須進行刮砂或刨鬆的作業，根據清水水質，一般來說大約 1~12 個月需進行上述的刮砂或刨鬆的作業，若原水水質更好時間還可以往後延長，刮砂是將濾砂表層約 2-5 公分的濾砂加以移除，而被移除的濾砂須在適當的時間進行補充，某些淨水場採用的是將上層濾砂刨鬆以降低水頭損失，而濾砂並未被移除只是刨鬆，但是表層的有機物層已破壞且飄散在表面，不管濾砂是經過刮砂或刨鬆，皆需要有 1-7 天的熟成期以重建表層生物聚落。

八、誌謝

感謝中華民國自來水協會對於本研究經費的補助，也感謝台灣自來水公司相關區處、廠所於研究現場及實驗分析的協助，讓本研究得以順利執行。

參考文獻

1. Bai, X., Wu, F., Zhou, B., & Zhi, X. (2010). Biofilm bacterial communities and abundance in a full-scale drinking water distribution system in Shanghai. *Journal of water and health*, 8(3), 593-600.
2. Barrett, J. M., Bryck, J., Collins, M. R., Janonis, B. A., & Logsdon, G. S. (1991). *Manual of design for slow sand filtration*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
3. Bellamy, W. D., Hendricks, D. W., & Logsdon, G. S. (1985). Slow sand filtration: influences of selected process variables. *Journal-American Water Works Association*, 77(12), 62-66.
4. Cleasby, J. L., Hilmoe, D. J., & Dimitracopoulos, C. J. (1984). Slow sand and direct in-line filtration of a surface water. *Journal (American Water Works Association)*, 44-55.
5. Collins, M. R., Eighmy, T. T., & Malley, J. P. Jr. (1989). Modifications to Enhance the Performance of Conventional Slow Sand Filtration. *Proceedings AWWA Seminar on Emerging Technologies in Practice*.
6. Eighmy, T. T., Collins, M. R., Malley, J. P. Jr., Royce, J., & Morgan, D. (1993). Biologically Enhanced Slow Sand Filtration for Removal of Natural Organic Matter. *AWWA Research Foundation and American Water Works Association*.
7. Guchi, E. (2015). Review on Slow Sand Filtration in Removing Microbial Contamination and Particles from Drinking Water. *American Journal of Food and Nutrition*, 3(2), 47-55.
8. Huisman, L., & Wood, W. E. (1974). *Slow sand filtration (Vol. 16)*. Geneva: World Health Organization.
9. Jenkins, M. W., Tiwari, S. K., & Darby, J. (2011). Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling. *Water research*, 45(18), 6227-6239.
10. Kohne, R. W., & Logsdon, G. S. (2001). Slow sand filtration. In *Bridging the Gap@ sMeeting the World' s Water and Environmental Resources Challenges (pp. 1-3)*. ASCE.
11. Muhammad, N., Ellis, K., Parr, J., & Smith, M. D. (1996). Optimization of slow sand filtration. WEDC, LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, LEICESTERSHIRE LE 11 3 TU(UK), 283-285.
12. 楊香東、向清炳、徐平 (2009)。宜昌薄壁涵管式生物慢濾池設計與施工工藝淺析。中國水利，(11)，29-30。

作者簡介

陳文祥 先生

現職：台灣自來水股份有限公司水質處 組長

專長：自來水處理技術、水質管理

吳美炷 女士

現職：台灣自來水股份有限公司水質處 工程師

專長：自來水水質檢驗及分析、水質管理

黃聖然 先生

現職：台灣自來水股份有限公司水質處 工程員

專長：自來水水質檢驗及分析、水質管理

洪世政 先生

現職：台灣自來水股份有限公司水質處 處長

專長：自來水處理技術、水質管理

學校水質滯留改善案例探討

文/江清蓮

摘要

本文為北水處提供台北好水服務供水轄區學校水質滯留改善案例，該校一棟屋齡約 20 年的 5 層樓教室，惟近來因學校減班及節水措施使用水量減少，蓄水池及水塔平均滯留期遞增至 3~4 日，導致 4 座水塔餘氯降為 ND~0.25 mg/L，偶檢出大腸桿菌群，水質異常探討過程發現末端水塔及用水偏低所致。

水中餘氯偏低不外滯留或水質遭受污染，我國飲用水水質標準規定餘氯 0.2~1.0mg/L，餘氯可避免微生物在貯留過程再生，是水質安全的指標，龍頭水餘氯檢測正常，證明飲用水安全衛生。

歷來水塔滯留的改善方式常以調降水位為先，惟因低水位會加速餘氯揮發而效果不佳，且水塔失去原有儲水功能。本文介紹的改善方式包括：將蓄水池進水由表層改至底層且鄰近揚水幫浦，以減少水蓄水池表面水餘氯揮發量，並提升水塔進水餘氯；調整蓄水池與水塔間串流順序，將原先「蓄水池→用水量大的水塔→較少用水的水塔」的流動順序，改為「蓄水池→較少用水的水塔→用水量大的水塔」的暢流方式，改善後提升為 0.25~0.40 mg/L。

本案改善過程持續追蹤餘氯偏低原因，在不調降水位情況下，找出關鍵因子並完成改善，實務經驗值得傳承推廣。

關鍵詞：餘氯、滯留、用水設備、生物膜、台北好水。

一、前言

我國「自來水用戶用水設備標準」^[1]第 6 條規定蓄水池及水塔總容量應為 0.4~2.0 日用水量，係指常態下自來水的保存期約 2 日以內。以安全飲用水的觀點，自來水中還有適量的餘氯維持自來水的微生物品質，就是飲用水的安全保存期。我國飲用水水質標準規定餘氯 0.2~1.0mg/L，餘氯可避免微生物在貯留過程再生，倘龍頭水無法檢出餘氯，用戶自主檢測水質亦將欠缺水質安全指標。

近來因學校減班及節水措施使用水量減少，導致蓄水池及水塔停留時間漸增，若採行調降水位的方式，則有低水位情況餘氯不易保存、消防緊急用水備源不足及倘遭遇水公司長時間停水則有缺水之虞等問題。

二、○○國中用水設備概述

(一)用水設備基本資料

- 1.一座蓄水池及四座水塔合計總容積約 150 噸，學校日用水量 40~50 噸，水質平均滯留期約 3~4 日。
- 2.蓄水池位於 1 樓地上式、容量 70 噸、消防共用(消防幫浦自蓄水池揚水)。
- 3.四座水塔位於 5 樓頂，容量各約 20 噸。

(二)用水設備及給水串流情形 (詳如圖 1)

由一樓地上式蓄水池東側幫浦揚水至頂樓東側 2 座水塔(a1→a2)，另西側幫浦揚水至頂樓西側 2 座水塔(a4→a3)。4 座水塔供水至鄰近各樓層飲用水，另有消防管線連通支援消防用水。

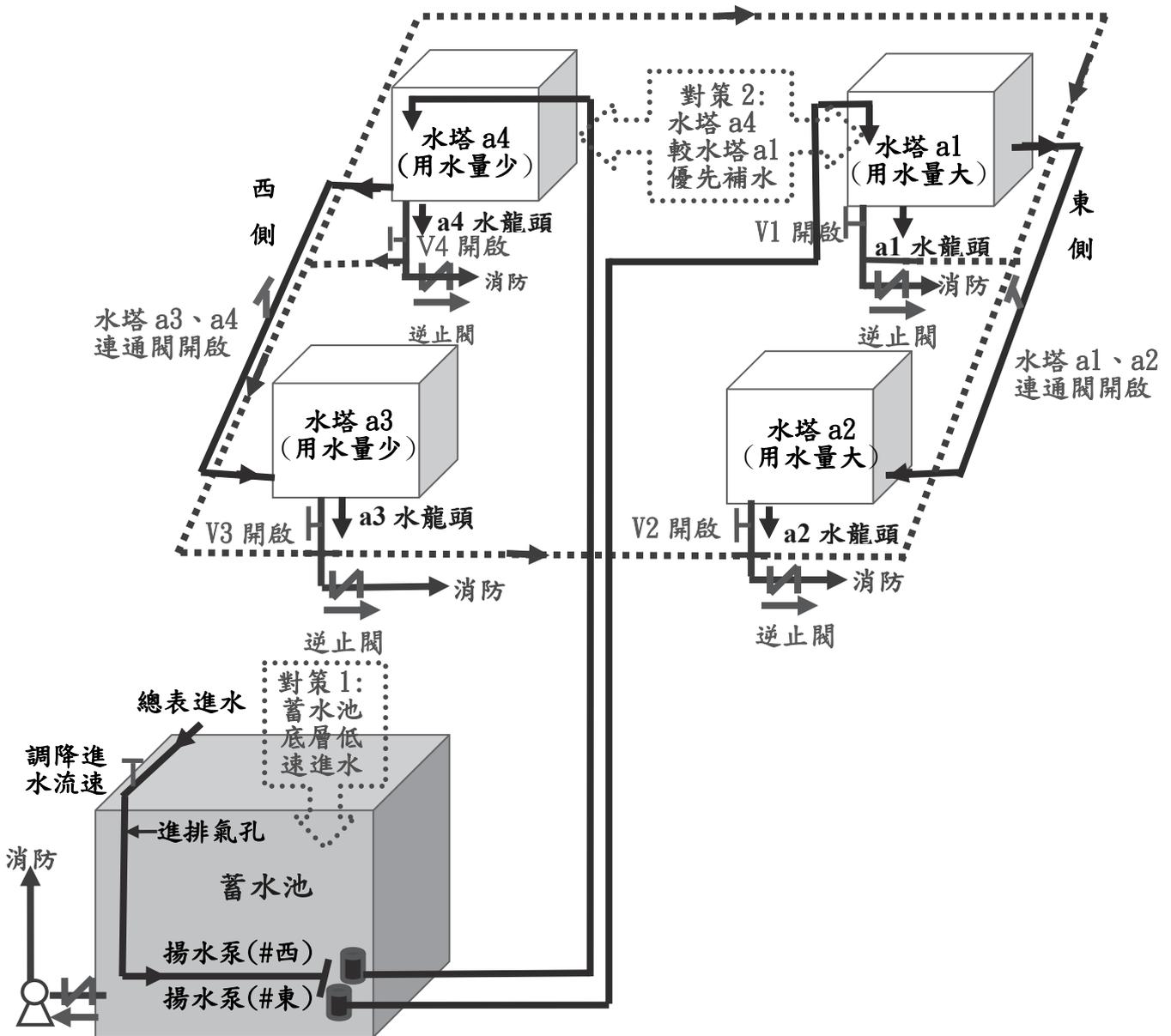


圖 1 ○○國中蓄水池水塔給水串流示意圖

三、用水設備改善前水質異常現象

103 年 10 月檢測○○國中水質，已發現西側水塔(a3 及 a4) 水龍頭餘氯偏低，分別為 0.08 mg/L 及 0.16 mg/L，校方曾採行降低水塔(a3、a4)水位。由於水塔 a3 有支援雨水回收系統，供應該樓層廁所馬桶、小便斗、拖把專用水槽使用，當時校方依北水處建議，已

將水塔 a3 之下水管線與雨水系統之連結處加裝逆止閥。

104 年 6 月例行採樣發現學校水龍頭餘氯仍偏低且檢出大腸桿菌群，迄同年 10 月上旬完成用水設備改善前，多次追蹤檢測水質過程，發現該校西側大樓水塔(a3 及 a4)水龍頭餘氯仍低於 0.2mg/L(詳表 1)。

表 1 OO國中水質異常追蹤檢測紀錄

日期	水樣別	餘氯 mg/L	濁度 NTU	TDS mg/L	pH	大腸桿菌群 CFU/100ml	備註
1040626	水塔 a3 僅由水塔 a4 補水。						
1040626	水塔 a3 水龍頭	ND	0.50	62	7.2	檢出(無大腸桿菌)	ND 表示未檢出
1040626	水塔 a1	0.15	NA	NA	NA	NA	NA 表示未檢測
1040626	水塔 a2	0.12	NA	NA	NA	NA	
1040626	水塔 a3	ND	NA	NA	NA	NA	
1040626	水塔 a4	ND	NA	NA	NA	NA	
1040626	蓄水池進水	0.40	0.41	61	7.2	NA	
1040626	蓄水池底層水	0.24	0.40	64	7.2	NA	進水點對角
1040628	水塔 a1	ND	0.41	61	7.3	檢出(無大腸桿菌)	放假後隔日檢測
1040628	水塔 a2	ND	0.42	61	7.3	未檢出	
1040628	水塔 a3	ND	0.41	63	7.4	檢出(無大腸桿菌)	
1040628	水塔 a4	ND	0.41	63	7.4	檢出(無大腸桿菌)	
1040830	1.開學前清洗水池水塔 2.蓄水池及水塔 a1 均改至底層進水 3.水塔 a1 及水塔 a4 均可補水至水塔 a3						
1040904	水塔 a1 水龍頭	0.34	0.30	69	7.1	NA	清洗水池水塔後進 新鮮水初期尚未完 全反應滯留現象
1040904	水塔 a2 水龍頭	0.30	0.29	69	7.2	NA	
1040904	水塔 a3 水龍頭	0.20	0.28	69	7.2	NA	
1040904	水塔 a4 水龍頭	0.20	0.26	69	7.2	NA	
1040915	水塔 a1 水龍頭	0.40	NA	NA	NA	NA	已反應出滯留現象
1040915	水塔 a2 水龍頭	0.38	NA	NA	NA	NA	
1040915	水塔 a3 水龍頭	0.10	NA	NA	NA	NA	
1040915	水塔 a4 水龍頭	0.20	NA	NA	NA	NA	
1040917	東/西二側水塔各自進水						
1040923	水塔 a1 水龍頭	0.20	NA	NA	NA	NA	
1040923	水塔 a2 水龍頭	0.21	NA	NA	NA	NA	
1040923	水塔 a3 水龍頭	0.08	NA	NA	NA	NA	發現西側水塔 a3、 a4 少用水
1040923	水塔 a4 水龍頭	0.05	NA	NA	NA	NA	
1041007	蓄水池→西側水塔(a4)→西側水塔(a3)及東側水塔(a1、a2)						
1041021	水塔 a1 水龍頭	0.28	NA	NA	NA	NA	自水塔 a4 補水
1041021	水塔 a2 水龍頭	0.29	NA	NA	NA	NA	
1041021	水塔 a3 水龍頭	0.30	NA	NA	NA	NA	
1041021	水塔 a4 水龍頭	0.35	NA	NA	NA	NA	自蓄水池進水
1041221	水塔 a1 水龍頭	0.29	0.35	67	7.4	<1	總菌駱數 <1 CFU/ml
1041221	水塔 a2 水龍頭	0.33	0.35	67	7.4	<1	
1041221	水塔 a3 水龍頭	0.33	0.37	66	7.3	<1	
1041221	水塔 a4 水龍頭	0.44	0.27	64	7.3	<1	

四、水塔餘氯偏低原因研判

(一)水塔水位過低

4 座水塔容積合計約 80 噸，惟水塔水位僅約 1 公尺深，與其他容量 80 噸的獨立水塔比較，其表面水與空氣接觸的面積相對多出 1 倍，自來水貯留過程餘氯揮發量相對增加，導致水龍頭水餘氯低於其他滯留期相同的場所。

(二)水塔用水量不均

1040917 將西側水塔(a3、a4)與東側水塔(a1、a2)隔離，1040923 追蹤西側水塔餘氯仍小於 0.1mg/L，研判係用水量少於東側水塔所致。

(三)用水量少的水塔位於串流供水的末端

1041007 確認西側水塔 a4 水位三極棒，相較高程低於水塔 a1，長久以來，蓄水池揚水幫浦係先供水至東側水塔 a1，再經消防管線連通閥流至其他 3 座水塔，西側水塔 a4

少有機會自蓄水池啟動揚水幫浦進水。

五、改善滯留的關鍵對策

(一)第 1 階段：提升水塔進水餘氯(1040830)

蓄水池及水塔 a1 改至底層進水(如圖 2)，類似工法已應用於多處場所^{[3][5]}，有效提升水塔進水餘氯 0.1~0.2 mg/L。本階段同時開啟水塔 a3 之消防管線閥通閥 V3，進水經水塔 a1 流至水塔 a3，隨後檢測 4 座水塔餘氯為 0.1~0.4 mg/L，餘氯已獲明顯提升。

(二)第 2 階段：確認水塔用水不平均(1040917~1040923)

1040917 關閉西側水塔(a3、a4)消防管線連通閥 V3、V4，避免與東側水塔(a1、a2)連通，使東/西二側水塔各自進水。1040923 追蹤結果確認西側水塔因用水量少餘氯反而降為 0.05~0.08 mg/L。

(三)第 3 階段：用水量大的東側水塔移至串流末端(1041007)



圖 2 蓄水池改至底層進水



圖 3 開啟水塔消防管線連通閥



圖 4 調整水塔控制水位的三極棒

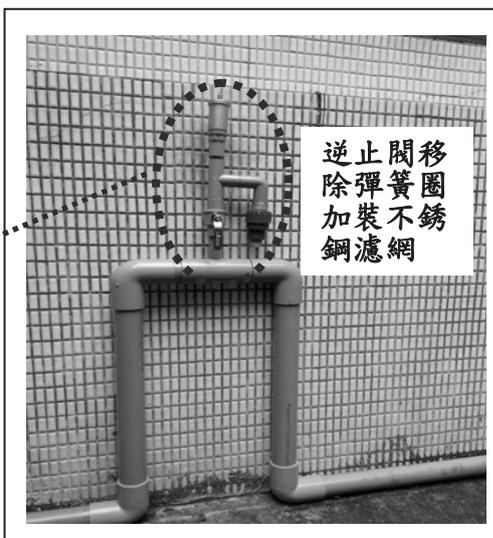


圖 5 蓄水池進水管上方增設進排氣閥

104 年 10 月 7 日發現蓄水池揚水幫浦長久以來先供水至東側水塔 a1，續經連通閥流至用水量少的西側水塔 a4、a3。本階段將 4 座水塔之消防管線連通閥均開啟(如圖 3)，並調整水塔 a1 及 a4 控制水位的三極棒(如圖 4)，使水塔 a4 優先自蓄水池進水，續供另 3 座水塔用水〔蓄水池→西側水塔(a4)→西側水塔(a3)及東側水塔(a1、a2)〕。經 1041021 及

104 年 12 月 21 日二次採樣檢測餘氯 0.28~0.44 mg/L，其他含微生物等水質檢項均正常。此暢流機制為 O O 國中水塔水質滯留改善之成功關鍵。

上述暢流方式應用於直飲台，在末端增設一個常態用水水龍頭，則可維持直飲台水質暢流新鮮。

六、其他水污染防治待改善項目

OO 國中在完成水塔水質滯留改善後，常態下學校飲用水水質安全無虞，惟該校後棟校舍飲用水蓄水池為位於 B1，為避免負壓虹吸進水污染飲用水^[4]，建議於一樓地上式蓄水池進水管上方增設進排氣閥以確保正壓進水(如圖 5)。

此外，蓄水池及水塔均與消防共用之結構下，為避免消防管線滯留之銹水逆流而影響水質，需定期排放消防管線滯留水至雨水回收系統，供作廁所馬桶用水，以維持消防管線水質新鮮潔淨。當完成上述用水防呆設備後，且能持續配合實施自主維護管理，OO 國中即可成為台北好水直飲場所。

七、提高用戶維護用水設備的意願

舊建物用戶水質異常案約有 50% 與用水設備因素有關^[2]，用水設備完善的條件，包括：1. 水質無滯留，2. 能阻隔異物、積水或污水入滲，3. 無負壓進水風險及 4. 消除大樓消防水逆流污染風險。歷年來參與推動用水設備檢查、改善及維護，發現下述問題。

Q1：接飲用水龍頭自來水，用戶不覺得水龍頭水質的重要？

Q2：不知道找誰協助改善用水設備及後續追蹤？專業廠商少且意願低？

Q3：機關未預編相關預算，改善費用受限？

Q4：主管機關未能納入施政績效重點及公權力不足？

針對上述問題，建議：

A1：加強行銷安全用水：餘氯是快速判定水質安全的重要指標，水中餘氯有如血液中的 T 細胞，水中無餘氯，生物會再生。

A2：在水價結構中考量用水設備改善補助獎勵金，以利持續推動用戶水質安全改善。

A3：擴大市場需求，藉模組化及市場機制降低施作成本。

八、結論與建議

(一)蓄水池改至底層進水，類似工法已應用於多處場所，有效提升水塔進水餘氯 0.1~0.2 mg/L 而延長容許滯留時間。若採調降水池水塔水位方式，除因表層水餘氯揮發效應不利於餘氯保存及影響消防緊急用水備源，倘遭遇水公司長時間停水，則有缺水之虞。

(二)學校不同套水塔之滯留期常有不平均現象，將用水量大的水池或水塔移至末端，可有效改善全部水塔水餘氯。此方式應用於直飲台，在末端增設一個常態用水水龍頭，則可維持直飲台水質暢流新鮮，避免排除滯留水浪費水資源。

(三)水質滯留改善後，常態下學校飲用水水質安全無虞，為避免後棟校舍 B1 蓄水池為負壓虹吸進水污染飲用水，建議於一樓地上式蓄水池進水管上方增設進排氣閥。

(四)蓄水池及水塔均與消防共用之結構下，為避免消防管線滯留之銹水逆流而影響水質，需定期排放消防管線滯留水至雨水回收系統，以維持消防管線水質新鮮潔淨。

(五)為提高用戶改善用水設備及專業廠商參與之意願，建議在水價結構中考量用水設備改善補助獎勵金，以利持續推動用戶水質安全改善。

(六)OO國中水質滯留改善過程，持續追蹤餘氯偏低原因，在不調降水位情況下，找出關鍵因子完成改善，實務經驗值得傳承推廣。

參考文獻

- 1.經濟部水利署頒「自來水用戶用水設備標準」，中華民國96年2月13日。
- 2.臺北自來水事業處水質科，「99年度學校安全用水專案報告」。
- 3.江清蓮等，「龍頭水安全飲用之探討—以學校龍頭水為例」，臺北市政府101年度員工平時自行研究報告，臺北自來水事業處，101年。
- 4.史午康等，「坡地供水水質及用戶水質安全屏障之探討—以鹿角坑供水系統為例」，臺北市政府99年度員工平時自行研究報告，臺北自來水事業處，99年。
- 5.江清蓮等，「自來水長期滯留改善實務探討」，自來水會刊第32卷第3期，中華民國自來水協會，102年8月。

作者簡介

江清蓮先生

現職：臺北自來水事業處二級工程師

專長：淨水處理、水質監控及用戶水質改善

中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法

98年2月10日第十六屆理監事會第十次聯席會議審議通過(99年5月部分修正)

一、目的

為鼓勵本會會員踴躍發表自來水學術研究及應用論文，以提升本會會刊研究水準，特設置本項獎勵辦法。

二、獎勵對象

就本會出版之一年四期「自來水」會刊論文中評定給獎論文，最多三篇，每篇頒發獎狀及獎金各一份，獎狀得視作者人數增頒之。

三、獎勵金額

論文獎每篇頒發獎金新臺幣貳萬元整，金額得視本會財務狀況予調整之。
上項論文獎金及評獎作業經費由本會列入年度預算籌措撥充之。

四、評獎辦法

- (一)凡自上年度第二期以後至該年度第二期在本會「自來水」會刊登載之「每期專題」、「專門論著」、「實務研究」及「一般論述」論文，由編譯出版委員會於每年六月底前，推薦6-9篇候選論文，再將該候選論文送請專家學者審查 (peer-review)，每篇論文審查人以兩人為原則。
- (二)本會編譯出版委員會主任委員於每年七月底前召集專家學者5~7人組成評獎委員會，就專家審查意見進行複評，選出給獎論文，報經本會理監事會議遴選核定後公佈。

五、頒獎日期

於每年自來水節慶祝大會時頒發。

六、本辦法經由本會理監事會審議通過後實施，修訂時亦同。

地面水水域滲流影響地下水深井總硬度之研究

文/許國樑

一、緒論

雨水降至地面時，地面水中的總硬度有很多是來自與土壤、岩石接觸所形成，由於土壤中細菌的作用放出二氧化碳，土壤中的水因二氧化碳的存在而高度帶電，會與碳酸達成平衡，在此 pH 降低的狀況下開始有溶解能力，水中的鹼性物質如石灰岩，便開始溶解，通常硬水常發生在表土層較厚且含有石灰的地區，而軟水則發生在表土層較薄且石灰岩稀少或不存之地區，因石灰並非純物質，它尚含有少量的硫酸鹽、氯鹽及矽酸鹽等鹽類，當石灰被水溶解後，這些鹽類亦隨之進入溶液中，形成各河川水域有不同總硬度地面水質；地面水域滲流補注至地下，亦會與地底下石灰岩反應溶解形成不同總硬度地下水質。

政府現階段「飲用水水質標準」訂定自來水總硬度在每 300ppm 以內^[1]，因自來水用戶常反應總硬度 150ppm 以上，加熱會有嚴重沉澱情形，為減少用戶對供水水質總硬度產生抱怨，七區澄清湖委外處理後再調配供水總硬度在 150 ppm 以下為供水參考標準，可符合用戶需求。

花蓮轄區各地面水水質總硬度均在 150 ppm 以下，但供水量及穩定度易受氣候是否下雨而影響供水量，需開發新水源地下水補充，如何尋覓 150 ppm 以下地下水深井做備用水源，方能符合經濟效益，另地下水深井總硬度受地面水水域流影響之程度如何，有需要加以研究探討。

二、文獻回顧

(一)水中硬度的等級^[2]

自來水總硬度存在之含量，係受各地區不同天然地質因素影響所致，總硬度是由兩價金屬陽離子所引起，它們會與肥皂作用形成沉澱物，並會與某些陰離子作用形成水垢，自來水的總硬度可分為下列四個等級如表 1。

(二)台灣土壤^[3]

台灣位處板塊交界，富含各種地形、各種多樣的氣候變化，地表有平原、丘陵、台地、盆地、高山、火山、泥火山、闊葉林、混合林、針葉林、窪地、海埔新生地、月世界...，天氣現象會出現焚風、東北季風、西南季風、梅雨、颱風雨、對流雨...。這些都是造成台灣出現多種土質的各種因素。土壤剖面圖如圖 1。

表 1 水中總硬度等級

硬度等級	軟水	中等硬水	硬水	甚硬水
總硬度	0 - 75 ppm	75 - 150 ppm	150 - 300 ppm	300 ppm 以上

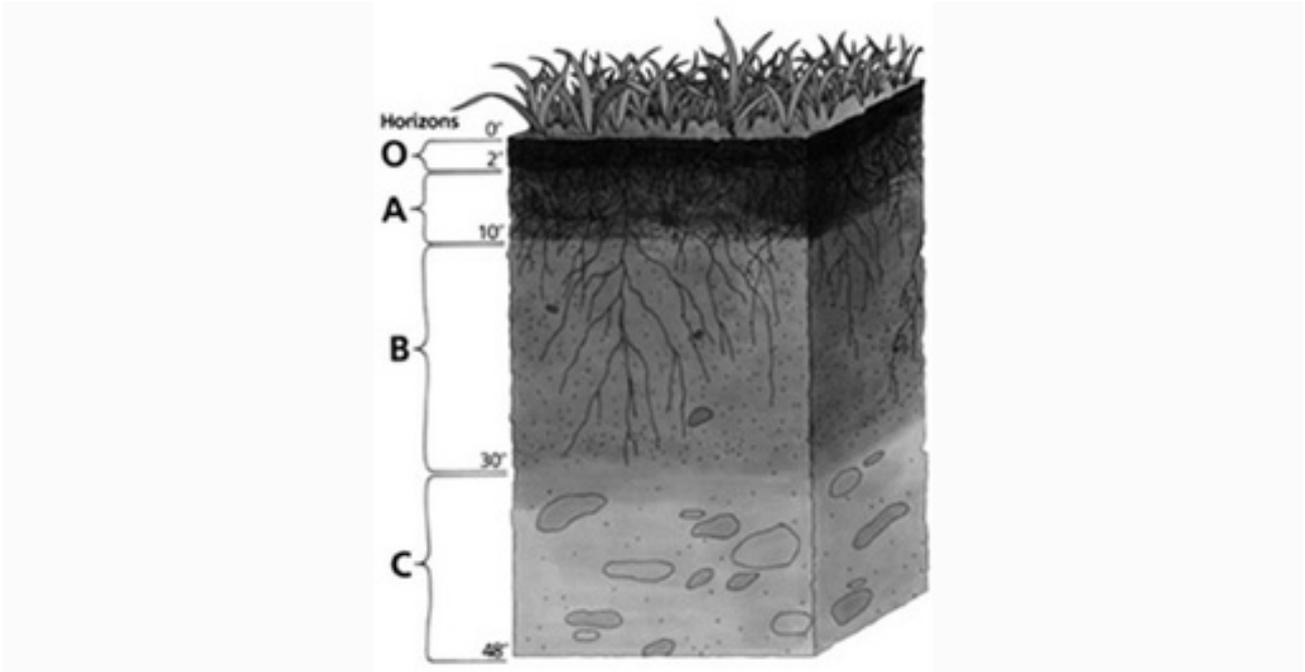


圖 1 土壤剖面圖-O 層、A 層、E 層、B 層、C 層

土壤一般分成六層：O 層是枯枝落葉層，A 層是腐殖質層。E 層是淋溶層。以上三層為表土層。B 層是澱積層。C 層是風化層。R 層是岩石層。以上三層為心土層。通俗分類法 1.黑土 - 富含腐植質的土。2.黃土 - 一般常見的土。3.紅土 - 富含氧化鐵的土，上述排列愈上面愈優質。

三、實驗方法及流程

(一)實驗設備

1.分析天平。2.圓形燒杯。3.滴定管。4.加熱磁石攪拌器。5.量筒。6.採樣器。7.採樣塑膠瓶。8.pH 計。9.濁度計。

(二)實驗藥品

1.總硬度緩衝溶液。2.總硬度指示劑 EBT。3.總硬度 EDTA 滴定溶液 0.01 M。4.總硬度標準鈣溶液 1000ppm。5. pH 標準緩衝溶液。6.濁度計一級校正標準品

(三)實驗方法

本實驗依據環保署環境檢驗所公告 1.水

中總硬度檢測方法 4—EDTA 滴定法 NIEA W208.51A。2.水中濁度檢測方法 5—濁度計 NIEA W219.52C。3.水之氫離子濃度指數 (pH 值) 測定方法 6—電極法，進行研究。

四、結果與討論

(一)溪流地面水水域分佈及水質總硬度檢測結果

自來水公司第九區管理處轄區為花蓮縣，全縣南北長 137.5 公里，東西寬的最寬處為 43 公里，最窄處是 27 公里，分為一市二鎮十鄉，共十三個行政區，轄區共有花蓮溪及秀姑巒溪等中央管河川二條，吉安溪、美崙溪、立霧溪及和平溪等縣管河川四條，花蓮縣溪流流域分佈如圖 2。

花蓮縣共有 3 個流域：1.立霧溪、美崙溪、吉安溪流域。2.花蓮溪流域。3.秀姑巒溪流域。上述 3 流域均源出中央山脈，流入太平洋。業經調查花蓮轄區各鄉鎮由北至南河道未乾涸溪流，依 1.和平溪流域。2.立霧溪、

美崙溪、吉安溪流域。3.花蓮溪流域。4.秀姑巒溪流域。5.海岸山脈流域。上述分佈資料

及採樣檢測水質總硬度結果如表 2、表 3、表 4、表 5 及表 6 分述如下：



圖 2 花蓮縣溪流流域分佈圖

1. 和平河流域：

表 2 和平河流域資料及採樣檢測水質總硬度統計表

溪流名稱	溪流源頭	河道長度	地面水總硬度	溪流出口
立霧溪	南湖大山的東北峰東坡	50.7 公里	和平大橋下 220 ppm	注入太平洋

2. 立霧溪、美崙溪吉安河流域：

表 3 立霧溪、美崙溪吉安河流域資料及採樣檢測水質總硬度統計表

溪流名稱	溪流源頭	河道長度	地面水總硬度	溪流出口
立霧溪	海拔 3000 公尺以上中央山脈	220 公里	186 ppm	注入太平洋
三棧溪	海拔 3,101 公尺帕托魯山	25.0 公里	下游三棧社區 118 ppm	注入太平洋
須美基溪	中央山脈	7.3 公里	佳林村源頭 46 ppm	匯入美崙溪
美崙溪	海拔 2,311 公尺七腳川山	15.4 公里	1 上游砂婆礑淨水場內 99 ppm	注入太平洋
			2 中游乾涸流出與八堵毛溪匯流口 207 ppm	
			3 下游美崙山旁 178 ppm	
吉安溪	海拔 1,321 公尺之吉安山	11.4 公里	下游南濱橋下 216ppm	注入太平洋

3. 花蓮河流域：

表 4 花蓮河流域資料及採樣檢測水質總硬度統計表

溪流名稱	溪流源頭	河道長度	地面水檢測點總硬度	溪流出口
花蓮溪	中央山脈拔子山	39.9 公里	花蓮大橋下 205ppm	注入太平洋
木瓜溪	海拔 2,500 公尺能高南山、奇萊主山及其南峰	42.8 公里	木瓜溪仁壽橋下 162ppm	匯入花蓮溪
白鮑溪	木瓜山南麓	7.2 公里	壽豐鄉河段 103ppm	匯入荖溪
荖溪	中央山脈	9.2 公里	重光社區橋下 103ppm	匯入花蓮溪
壽豐溪	海拔 3060 公尺光頭山	38.0 公里	兆豐農場旁 166ppm	匯入花蓮溪
清水溪	中央山脈	11.6 公里	支亞干淨水場旁 50ppm	匯入花蓮溪
鳳林溪	中央山脈	9.5 公里	鳳林淨水場旁 54ppm	匯入花蓮溪
萬里溪	中央山脈白石山與安東軍山	53.3 公里	萬榮淨水場旁 206ppm	匯入花蓮溪
馬鞍溪	丹大山北邊	38.6 公里	馬太鞍橋下 160ppm	與光復溪匯流之後為花蓮溪
光復溪	中央山脈拔子山	15 公里	光復淨水場旁 98ppm	與花蓮溪匯流

4. 秀姑巒溪流域：

表 5 秀姑巒溪流域流域資料及採樣檢測水質總硬度統計表

溪流名稱	溪流源頭	河道長度	地面水總硬度	溪流出口
秀姑巒溪	中央山脈崙天山南麓	81.2 公里	瑞穗鄉中游 224ppm	注入太平洋
富源溪	倫太文山南麓及沙武巒山北麓	28.0 公里	富源淨水場旁 80ppm	匯入秀姑巒溪
紅葉溪	虎頭山	16.7 公里	紅葉淨水場旁 94ppm	匯入秀姑巒溪
豐坪溪	海拔 2,500 公尺丹大山與馬博拉斯山	37.0 公里	豐坪溪中游 150ppm	匯入秀姑巒溪
卓溪	海拔 2,157 公尺玉里山東南側	9.5 公里	乾涸河道旁 玉里淨水場深井 122ppm	匯入秀姑巒溪
拉庫拉庫溪	中央山脈馬博拉斯山東側	53.8 公里	卓富大橋未與 清水溪匯流前 196ppm	匯入秀姑巒溪
九岸溪	東部海岸山脈	8.1 公里	九岸溪中游 50ppm	匯入秀姑巒溪

5. 海岸山脈面臨太平洋流域：

表 6 海岸山脈面臨太平洋流域資料及採樣檢測水質總硬度統計表

溪流名稱	溪流源頭	河道長度	地面水總硬度	溪流出口
水連溪	壽豐鄉月眉村月眉山	8.0 公里	水璉淨水場旁 169ppm	注入太平洋
大不岸溪	新社淨水場上方	1.4 公里	新社淨水場內 28ppm	注入太平洋
港口秀姑巒溪支流	秀姑巒溪支流	1.1 公里	港口淨水場內 150ppm	匯入秀姑巒溪

表 7 木瓜溪地面水流經平地河床距離對總硬度影響分析表

第 1 個採樣點		第 2 個採樣點		平地河床 距離	總硬度 增加量	平地河床 總硬度增加率
地點	總硬度	地點	總硬度			
仁壽橋	162 ppm	東華橋	166 ppm	8.8 公里	4 ppm	0.45 ppm/km

(二) 地面水流經平地河床距離對總硬度增加量評估

木瓜溪流經仁壽橋，平地河床無支流匯流，至台九線東華橋相距 8.8 公里屬單一水系，業經選取仁壽橋下為第 1 個採樣點，另在東華橋下為第 2 個採樣點，檢驗總硬度，

由此評估地面水流經平地河床距離對總硬度影響如表 7。

由表 7 得知，木瓜溪流經平地河床相距 8.8 公里遠的 2 個採樣點，總硬度採樣檢測結果僅增加 4ppm，換算增加率為 0.45ppm/km，由此評估各溪流地面水總硬度的形成，

主要在流經前段山脈與土壤、岩石接觸所形成，另流至平地河床時，平地河床因水流冲刷，河床可見砂礫及岩石，未有樹根生長吸附的土層，由文獻 2-2 推估應至心土層中的 C 層風化層，風化層屬岩石溶解不易，對平地河床總硬度增加率 0.45ppm/km，是可以忽略不計的。

(三)地面水滲流地質因素對水域深井總硬度影響

溪流地面水及水域中自來水公司第九區管理處現已設置淨水場深井總硬度檢測統計分析如表 8，來探討地下水深井總硬度受地面水水域影響之程度。

花蓮轄區各淨水場深井水源總硬度，有萬榮深井高達 226ppm，較低的有瑞穗深井 108ppm，水域深井總硬度減地面水總硬度為各鄉鎮地質因素影響總硬度的增加量，由文獻 2-2 得知，地面水水域滲流地下深井，由

心土層中的 C 層風化層至 R 層岩石層，由表 8 分析結果得知，地質因素影響總硬度增加量約為 20ppm，未受表土層的枯枝落葉層、腐殖質層及淋溶層三層及心土層樹根生長吸附澱積層的影響，且溪流分佈各鄉鎮，為可接受的結論。

(四)地面水水域滲流影響深井總硬度增加量 20ppm 水源開發應用實例

地面水水域滲流地下深井總硬度增加量約為 20ppm，運用於自來水公司第九區管理處玉營運所富里系統及花蓮給水廠和平系統水源開發應用案例如表 9。

(五)符合新水源開發案質優地下水建議評估

預估地下水新水源開發案源總硬度在 150ppm 以下，則地面水水源應在 130ppm 以下，業經現場採樣各鄉鎮溪流地面水總硬度、pH 值及濁度檢測結果統計如表 10。

表 8 溪流地面水及水域淨水場深井總硬度檢測統計分析表

流域	鄉鎮	地面水 溪流名稱	總硬度 (ppm)	水域深井 總硬度(ppm)	地面水水域滲流地下深 井總硬度增加量(ppm)
和平溪	秀林鄉	和平溪	220	和平深井 246	26
立霧溪、美崙溪、 吉安溪	秀林鄉	立霧溪	186	新興深井 206	20
	吉安鄉	木瓜溪	162	光華深井 177	15
花蓮溪	壽豐鄉	荖溪	103	壽豐深井 123	20
	萬榮鄉	萬里溪	206	萬榮深井 226	20
	光復鄉	光復溪	98	光復深井 120	22
秀姑巒溪	瑞穗鄉	富源溪	80	富源深井 99	19
	瑞穗鄉	紅葉溪	94	瑞穗深井 108	14
	卓溪鄉	豐坪溪	150	三笠山深井 168	18

表 9 溪流地面水影響水域淨水場深井總硬度 20ppm 水源開發應用案例

案例	廠所	供水系統	水源開發應用改善方案
1	玉里營運所	富里	1.明里深井總硬度 245ppm 開發新發水源改善案，擬開發九岸溪地面水總硬度 50ppm 水域深井，推估總硬度應為 70ppm 為新水源最佳參考地點。 2.104 年 6 月 22 日採樣九岸溪錦山砂石深井，檢驗總硬度 137ppm，經上網查閱地圖得知該採樣點尚有秀姑巒溪地面水總硬度 224 ppm 水域交匯，深井水樣混合比例推估秀姑巒溪地面水水域滲流流 38.5%，九岸溪地面水水域滲流流 61.5%，因此建議九岸溪地面水新水源位置可再上移，遠離秀姑巒溪水域滲流影響。
2	花蓮給水廠	和平	1.和平溪地面水總硬度 220ppm，推估水域深井總硬度應為 240ppm，和平深井總硬度 246ppm，證明該水域深井無總硬度 150ppm 以下做為水質改善案用，需再另覓水源。 2.第八區管理處管理處澳花系統深井水質總硬度 107ppm，推估澳花系統地面水為 87ppm，地面水水域附近另覓合適地點開鑿深井，新水源可做改善用。

表 10 現場採樣各鄉鎮溪流地面水總硬度檢測結果統計表

總硬度範圍(ppm)	項次	地面水名稱	總硬度(ppm)	pH 值	濁度(NTU)
130~250	1	秀姑巒溪	224	7.1	69.0
	2	和平溪	220	8.2	387
	3	吉安溪	216	7.9	3.3
	4	萬里溪	206	7.8	156
	5	花蓮溪	205	8.2	3.4
	6	拉庫拉庫溪	196	8.2	26.7
	7	立霧溪	186	8.2	16.4
	8	美崙溪	178	8.0	3.1
	9	壽豐溪	166	8.4	2.5
	10	木瓜溪	162	8.2	0.50
	11	馬鞍溪	160	8.3	5.1
	12	豐坪溪	150	8.3	34.5
0 ~130	1	三棧溪	118	8.2	0.39
	2	白鮑溪	103	8.3	0.18
	3	荖溪	103	8.0	0.16
	4	光復溪	98	7.5	0.25
	5	紅葉溪	94	7.7	0.50
	6	富源溪	80	8.2	0.85
	7	鳳林溪	54	8.3	0.30
	8	清水溪	66	7.5	0.80
	9	須美基溪	46	7.8	0.25
	10	九岸溪	50	8.6	0.60

表 11 美崙溪地面水滲流河道乾涸深井總硬度影響分析表

第 1 個深井參考點		第 2 個深井採樣點		深井距離	總硬度增加量	河道乾涸深井總硬度增加率
地點	預估總硬度	地點	總硬度			
水源村	119ppm	國慶淨水場	150 ppm	2.8 公里	31 ppm	11ppm/km

由表 10 得知，地下水總硬度在 150ppm 以下水源開發案，可由 1.九岸溪 2.須美基溪 3.北清水溪 4.鳳林溪 5.富源溪 6.光復溪 7.紅葉溪 8.白鮑溪 9.荖溪 10.三棧溪等溪流地面水來改善，另檢測地面水 pH 值及濁度可做為地下水源開發參考數據。

(六)地面水滲流河道乾涸深井總硬度增加量評估

美崙溪幹流長度 15.40 公里，主流發源於秀林鄉標高 2,311 公尺之七腳川山東南側，向東南流經娑婆礑，地面水總硬度檢測值為 99ppm，流水源村後，地面水滲流水源村深井為第 1 個參考點，由 4-3 節得知地面水水域滲流地下深井總硬度增加量約為 20ppm，預估水源村深井參考點總硬度為 119ppm；另河道乾涸至 2.8 公里遠國慶淨水場深井為第 2 個總硬度採樣檢測點，由 2 個地點總硬度增加量，評估地面水滲流河道乾涸深井總硬度影響如表 11。

由表 11 得知，地面水滲流河道乾涸水域的深井，2 個地點深井距離 2.8 公里，總硬度增加量 31 ppm，換算河道乾涸深井總硬度增加率 11 ppm/km，由此可運用於其它類似水域，例如卓溪水域，下游乾涸，乾涸河道旁玉里淨水場的深井總硬度評估。

五、結論

本研究對於花蓮轄區各地面水水質總

硬度均在 150 ppm 以下，但供水量及穩定度易受氣候是否下雨而影響供水量，需開發新水源地下水補充，如何尋覓 150 ppm 以下地下水深井做備用水源，方能符合經濟效益，且地下水深井總硬度受地面水水域滲流影響之程度如何，一併加以研究探討，研究結論如下：

(一)木瓜溪流經平地河床相距 8.8 公里遠的 2 個採樣點，總硬度採樣檢測結果僅增加 4ppm，換算增加率為 0.45 ppm/km，由此評估各溪流地面水總硬度的形成，主要在流經前段山脈與土壤、岩石接觸所形成，另流至平地河床時，平地河床因水流沖刷，河床可見砂礫及岩石，未有樹根生長吸附的土層，由文獻 2-2 推估應至心土層中的 C 層風化層，風化層屬岩石溶解不易，對平地河床總硬度增加率 0.45ppm/km，是可以忽略不計的。

(二)花蓮各鄉鎮地面水域滲流地下深井，由心土層中的 C 層風化層至 R 層岩石層，地質因素影響總硬度增加量約為 20ppm，未受表土層的枯枝落葉層、腐殖質層及淋溶層三層及心土層樹根生長吸附澱積層的影響，為可接受的結論。

(三)單一水域深井總硬度，可由地面水總硬度增加量約為 20ppm 估算；另滙流水域深井總硬度已知檢測值，由滙流 2 溪流地面水總硬度，可推估 2 溪流滲流水樣

混合百分比例，採樣點建議遠離高總硬度溪流地面水滲流影響，上述簡單準確判定，有效提升效率。

(四)地面水水域滲流地下深井總硬度增加量約為 20ppm，運用於自來水公司第九區管理處玉營運所富里系統及花蓮給水廠和平系統水源開發應用案例，符合實際。

(五)預估地下水新水源開發案源總硬度在 150ppm 以下，則地面水水源應在 130ppm 以下，統計各鄉鎮溪流地面水總硬度檢測結果，可由 1.九岸溪 2.須美基溪 3.北清水溪 4.鳳林溪 5.富源溪 6.光復溪 7.紅葉溪 8.白鮑溪 9.荖溪 10.三棧溪等水域開鑿深井來改善。

(六)地面水滲流河道乾涸水域的深井，2 個地點深井距離 2.8 公里，總硬度增加量 31 ppm，換算河道乾涸深井總硬度增加率 11 ppm/km，由此可運用於其它類似水域，例如卓溪水域，下游乾涸，乾涸河道旁玉里淨水場的深井總硬度評估。

參考文獻

- 1.飲用水水質標準，中華民國八十七年二月四日行政院環境保護署（87）環署毒字第 00044 28 號令頒布
- 2.李光中、許鼎居、蕭蒨華譯，滄海書局，P172 ~173，2004
- 3.維基百科，台灣土壤，<https://zh.wikipedia.org/wiki>
- 4.環保署環境檢驗所公告檢測方法水中總硬度檢測方法—EDTA 滴定法，<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W20851A.htm>
- 5.環保署環境檢驗所公告檢測方法水中濁度檢測方法—濁度計法，<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W21952C.htm>
- 6.環保署環境檢驗所公告檢測方法水之氫離子

濃度指數（pH 值）測定方法—電極法，
<http://www.niea.gov.tw/niea/WATER/W42452A.htm>

作者簡介

許國樑先生

現職：自來水公司第九區管理處水質課課長

專長：水質化學檢驗

淨水處理－臺北自來水事業處面對颱風暴雨因應作為

文/張琰竣

一、前言

臺北市水源主要以南勢溪及北勢溪流之新店河流域為主(約佔臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)總出水量之 97.5%)，北水處取水以南勢溪自然流量為主，當南勢溪自然流量不足以供應北水處取水所需，則要求北勢溪上游翡翠水庫放水補充。2015 年 8 月 8 日蘇迪勒颱風來襲時，因上游集水區強降雨(最大時雨量福山地區 104mm)，整個烏來地區土石流災情嚴重，造成新店溪上游流域坡地沖蝕、道路崩塌、土石流、堰塞湖以及淹水等災情，致使北水處取水主要來源南勢溪原水濁度大幅飆升至歷年來新高 39,300NTU，雖依各項擬訂緊急應變機制，但仍因原水濁度超高，10,000NTU 以上期間長達 12 小時，造成淨水處理極大困難，經審慎考量首次採取關閉淨水設施因應，以避免設備損壞；雖事後驗證可大幅縮短淨水、供水復原時間，惟面對全球氣候急遽變遷，日後可能有相同或更惡劣風災肆虐，北水處已從此次風災處置過程中吸取經驗，於翡翠水庫至直潭淨水場專管取水尚未完成前，以下本文將檢討淨水場超高濁度淨水處理策略及強化後續作為，不僅對後續面臨相同或更惡劣風災情況有所助益，並能有效因應。

二、北水處淨水場概況說明

北水處轄下設有長興、公館、雙溪、陽明、直潭等以混凝、沉澱、過濾、消毒等處理程序的傳統淨水場，掌理水源、取水、淨

水及出水設施之操作維護管理等事項。

由南勢溪與北勢溪匯流而成的新店溪水源，是大臺北地區的供水命脈。臺北自來水的水源，在無其它替代水源的情況下，97.5%源自於新店溪水源集水區(包括翡翠水庫)(如圖 1)，經由青潭堰、直潭壩及直潭二原分水工等 3 座取水設施取得原水，並藉重力以隧道輸送原水；青潭堰原水管輸水容量為每日 108 萬噸，供應臺北市區內長興、公館二座淨水場處理；直潭壩及直潭二原分水工原水則輸送至直潭淨水場處理，系統輸水容量可達每日 420 萬噸，集水區劃定為「臺北水源特定區」，由專責單位管理。其餘 2.5%為雙溪、陽明山等高山水源，重要水源亦劃為水源水質保護區。

為確保出水水質安全，北水處自 1999 年起實施淨水場綜合效能評估，持續進行設備改善，提升淨水效能，同時參考先進國家做法，於淨水處理採用現代化淨水管理新觀念「多重屏障策略(Multiple Barrier Strategy)」，不論原水水質如何變化，各單元仍可依目標操作。同時自行訂定較「飲用水水質標準」嚴格之淨水場出水水質內控標準，利用連續偵測儀器全天候監測淨水場出水水質，隨時使出水均能符合「飲用水水質標準」。

各淨水場生產作業流程均以無污染排放之設備或工法執行，操作方式採上澄液回收設計，不作廢水排放，對河川環境保護盡一份心力；同時處理快濾反沖洗砂廢水及沈

澱淤泥，以濃縮脫水製成淤泥餅方式，可再利用成為廠商生產原料，符合環保再生原則，讓生態環境永續經營。不僅北水處節省淤泥餅（sludge）最終處置費用，也節省再利用廠商購置原料費用，創造北水處與業者、環保與經濟共同雙贏局面。

北水處淨水場使用綠色能源、改善設備降低淨水耗能、提升效能減少淨水處理用水、嚴格管控淤泥處理廠排放水，以及百分之百回收再利用淨水淤泥，種種措施均在於打造淨水場成為綠色水場。



圖 1 水源現況

三、颱風暴雨高濁度有效因應作為

(一)面對問題、因應策略及執行成效

2015 年 8 月 8 日蘇迪勒颱風挾狂風暴雨襲臺，於南勢溪上游降下豪雨，北水處面臨 4 大艱鉅問題，以下將分別針對問題點統整提出有效因應策略及其執行成效：

Q1：集水區嚴重崩塌，亟待治理復原

Q1 因應策略：集水區崩塌治理

(1)中央主導與地方共同聯手合作，加速災區復原。

(2)劃分整治區塊，由主管機關依權責辦理。

(3)由中央定期召開會議，進行滾動式檢討管控。

Q1 執行成效：

(1)行政院 2016 年 1 月 26 日核定「新店溪上游流域保育治理及區域穩定供水綱要計畫」，綱要計畫區分為「建立流域災害監測預警系統」、「加速集水區保育治理與管理」、「加強河川規劃、治理與非工程措施」及「建構高濁度因應處理及備援能力」四大工作區塊，以強化防災預警、保育集水區土地、改善防洪能力、降低濁度影響，保障居民生命財產安全，及產業合理發展，並確保大臺北地區之水源水質水量，期程共 7 年(2015~2021 年)，總經費約 77.4 億元，短期（2015~2017 年）優先以完成蘇迪勒颱風災後疏濬、搶修與復建工程，並提升防災預警能力，以保障居民生命財產安全。中長期（2018~2021 年）除辦理集水區保育治理與管理等工作外，並依臺北水源特定區管理局整體溪流、坡地之調查規劃，掌握受創後水源區之保育治理並且分工辦理。

(2)北水處依分工權責在第 1 及第 4 區塊，預期效益分別為提升流域災害防災警戒效能，提升淨水場淨水處理能力及水源備援供應能力；目前各主管機關依權責分年度積極辦理河道疏濬、坍方地整治中。

(3)計畫執行採滾動式檢討，每月召開工作執行會議追蹤執行情形，並每 2 個月召開工作分組會議，每年檢討執行成效。

Q2：大量漂流物、泥砂流入，造成取水困難

Q2 因應策略：改善取水設施

- (1)漂流物-改善直潭壩取水口第一道攔污設施。
- (2)垃圾及水草-改善直潭壩取水口第二、三道耙污機。
- (3)泥砂淤積-辦理直潭壩取水口前庭清淤及水庫蓄水範圍水力排砂作業。

Q2 執行成效：

- (1)為避免大型漂流物進入直潭壩取水口前庭，已於 2016 年 3 月 28 日完成第一道攔污柵底部增設隔欄柵 1.8m 高(如圖 2)，有效攔阻大型漂流物，穩定取水功能。



圖 2 隔欄柵施工前、後

- (2)為提升直潭壩取水口耙污機功能，自 2014 年開始進行改善(共 18 門)，已完成 16 門，餘 2 門(8、9 門)底部加高 1.8m(如圖 3)，2016 年 6 月底前完成，確保避免上游大量泥砂阻塞影響第 1~7 門耙污機運作時，仍能分層穩定取水。



圖 3 直潭壩取水口第二道攔污柵第 8、9 門

- A.2015 年 10 月蘇迪勒風災後，已緊急辦理

直潭壩取水口前庭清淤 3,350m³，2016 年 3 月利用水壩放空期間，已將淤積全部清除。可避免產生拉動底泥現象，確保取水水質穩定。

- B.2016 年初透過翡翠水庫管理局配合協助，進行水庫蓄水範圍水力排砂 19.3 萬 m³(庫容由 63%提升至 82%)(如圖 4)，未來將循此模式固定進行，確保蓄水範圍有效庫容。



圖 4 水庫蓄水範圍水力排砂作業

- Q3：短時強降雨，原水濁度瞬間暴增至 39,300NTU，應變時間不足，遠超過淨水場最大處理能力 6,000NTU，並颯破 2012 年蘇拉颱風 12,000NTU 之歷史紀錄

Q3 因應策略：強化預警功能

- (1)爭取應變時間-增設「南勢溪濁度偵測系統」。
- (2)建置新店溪水源即時水情決策系統。
- (3)建立「流域災害監測預警系統」。

Q3 執行成效：

- (1)
 - A.為確保迅速、有效掌握新店溪上游濁度變化，爭取淨水場面臨高濁度時有充分應變時間，及南勢溪重要水質資料颱風期間不中斷，除既有原水預警監測系統(如圖 5)外，經由翡翠水庫管理局協助，2016 年 3

月 25 日再於南、北勢溪會流處，即翡翠一號橋頭下方裝設完成南勢溪濁度偵測系統(如圖 6)，即時掌握原水濁度變化。



圖 5 既有原水預警監測系統



圖 6 濁度懸浮固體偵測器及水質電腦監測系統

- B. 預估可增加下游淨水場約 1 小時之應變時間。
- C. 直潭場可提前掌握原水濁度變化趨勢，立即透過杯瓶試驗結果掌握原水水質特性，提高淨水場應變處理能力。
- (2) 目前雖已建立原水預警機制，整合新店河流域上游包括台電公司阿玉壩、羅好壩、桂山壩、粗坑壩、粗坑發電廠，翡翠水庫及翡翠發電廠，以及北水處直潭壩、二原

取水口、青潭堰流量及水位等相關水文資訊，以預測上游洪峰強度及到達時間，作為操作水門之參考；未來仍應積極強化提升新店溪水源即時水情決策系統，建立雨量與濁度預判機制，除即時監控上游集水區降雨量及流量資訊，並做到可預測其至取水口之水位及水質變化，做為後續颱風災害應變及淨水場下達加藥指令之重要決策參考。

- (3) 依經濟部水利署「新店溪上游流域保育治理及區域穩定供水綱要計畫」，由國家災害防救科技中心（NCDR）建置「新店溪上游災害監測與預警」納入於其災害應變決策輔助系統中，提供即時監測及預警情資，供相關單位於應變決策時的參考。

- A. 透過預警展示平台，了解上游雨量分佈及雨量、濁度、土石流、崩塌等預警，達到即時掌握洪峰到達時點及原水濁度變化趨勢，作為淨水處理應變參考。
- B. 經由汛洪及水位川流量等示警，作為直潭壩及青潭堰放流閘門操作參考，提早因應，降低上游屈尺廣興地區淹水機率，另亦可提供作為翡翠水庫放水稀釋最佳時機之選定參考。

Q4：超高濁度延時長，造成淨水處理極大困難

Q4 因應策略：提升淨水處理能力

- (1) 降低處理濁度-增設沉砂池擋板作為初沉池。
- (2) 確保沉澱池功能-新設沉澱池刮泥設備及提升淤泥處理能力。
- (3) 避開超高濁度原水-啟動翡翠專管工程。

Q4 執行成效：

(1)已於 2016 年 2 月 2 日將既有沉砂池增設擋板作為初沉池，配合加藥（高分子）操作，讓高濁度原水進入淨水場前，可先經過簡單緩衝，增加沉降效率，把大顆粒沉降排除，除可降低進水處理濁度外，亦可減少沉澱池累積大量淤泥。

(2)

A.直潭淨水場共有 6 座淨水處理設施，為因應颱風暴雨期間，帶來大量泥砂進入淨水場，規劃於其中 2 座沉澱池設置刮泥機設備(如圖 7)。

B.可提高處理容量約 100 萬 CMD 之沉澱效能，有利於高濁度原水處理負荷(預計 2016 年 7 月完成 1 座，年底再完成另 1 座)。

C.為紓解其他沉澱池淤泥負荷，汰換直潭淤泥處理場 2 部脫水機，可提升處理量約每日 120 噸乾淤泥(預計 2016 年底完成)。



圖 7 沉澱池設置刮泥機自動刮除淤泥

(3)2015 年蘇迪勒颱風及杜鵑颱風造成南勢溪濁度超過 12,000 NTU，且南勢溪原水濁度高峰及時間，均較以前大幅提高，考量未來發生暴雨及颱風時發生之高濁度狀況，仍將造成大臺北地區供水之危機，另翡翠水庫原水濁度低，如能於暴雨期間只取北勢溪原水且避開南勢溪高濁度原水，則可降低淨水場處理原水之負荷，故重新檢討翡翠專管工程計畫(如圖 8)，以避

免南勢溪原水水量與水質不確定之因素，增加大臺北地區供水穩定及安全。

A.起迄點：翡翠水庫下游增設取水口，設置專管銜接至粗坑壩附近。

B.管線長度：2.5 公里。

C.經費：20 億元。

D.期程：規設（含環評）4 年；施工 3 年。

E.辦理情形：由於本案涉及取水口之選擇及路線擬定等，需依據水文、水理、環境影響及工程等各方面進行評估，方能提出具體建議方案，可行性評估委託技術服務案已於 2015 年 11 月 13 日決標，預計 2016 年 9 月完成評估報告，後續依評估結果，辦理規劃設計作業(包含環評及土地取得)。

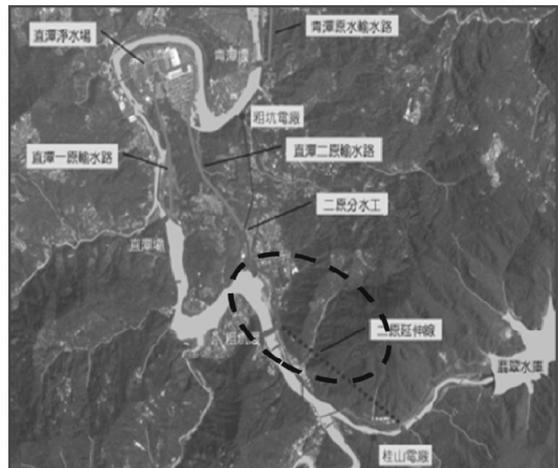


圖 8 翡翠專管工程

(二)其他相關因應改善方案

1.訂定面對高濁度原水 SOP，強化供水應變能力

北水處經歷蘇迪勒颱風後，綜整各淨水場高濁度原水 SOP，並完成各淨水場 SOP 修正計畫，尤其決策流程及決定減量及停止出水時，予以明確規定，重新檢討訂定面對高濁度原水 SOP(原水濁度 6,000NTU 以下，正

常取水；介於 6,000~12,000NTU 之間，減量取水；12,000NTU 以上，停止取水)及減量、停止供水、復水 SOP，可於颱風高濁度期間，有效迴避濁度高峰期，配合降低原水濁度及減量取水操作，有效維持淨水場處理功能，避免累積大量沉澱淤泥。

比較說明 2015 年 9 月杜鵑颱風，北水處依新修訂 SOP 運作成效如后：

(1)出水水質佳

杜鵑颱風淨水場供水濁度 0.5~2.8NTU，遠低於飲用水水質標準 30NTU，較蘇迪勒颱風 5~30NTU 為佳。

(2)有效保留沉澱池處理空間

停止取用 12,000NTU 以上原水濁度高峰，有效保留沉澱池處理空間，如蘇迪勒產生淤泥量累積占沉澱池體積達 22.8%，杜鵑則僅占 9.1%，因此採取新修訂 SOP 因應，即時迴避濁度高峰，始能儘速因應後續高濁度原水及縮短復水作業。

(3)有效節省淨水處理成本

另比較蘇迪勒及杜鵑颱風濁度高峰期間(基期兩天)的藥品費及淤泥清運費(如圖 9)，杜鵑較蘇迪勒颱風節省約 2,400 萬元，益顯新修訂 SOP 之成效。

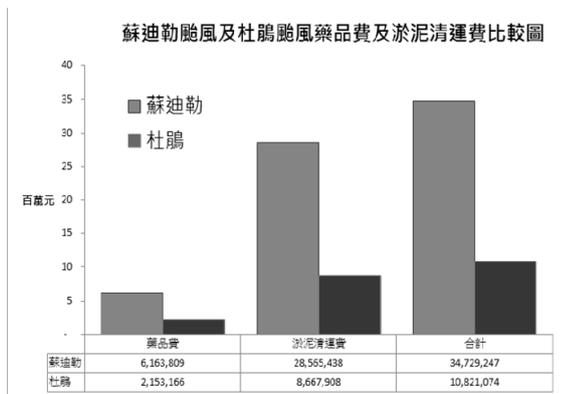


圖 9 蘇迪勒及杜鵑颱風藥品費及淤泥清運費比較

2.檢討關閉淨水設施時機點

蘇迪勒颱風雖採取首次關閉淨水設施騰出備援空間，並驗證可大幅縮短復原時間，惟將進一步檢討如何視水情狀況，調整淨水場處理能力，找出較佳關閉淨水設施時機點，以再提升高濁度時快速復原能力。另杜鵑颱風原水濁度依新制定 SOP 操作，雖已達到完全停止取水之標準，惟為避免完全停止出水後造成後端供水管網空管，反而影響整體復原時程，後續將檢討淨水場達停水標準期間，仍應盡量保持 1~2 座淨水設施持續勉力出水。

3.檢討改善淨水藥品供應

考量爾後新店溪沿岸土石嚴重崩塌遇雨即濁，並因應原水狀況難測造成加藥量及藥品費用增加，每年重新審慎檢討淨水處理藥品採購供應情形。

4.檢討高濁度期間淨水操作策略

(1)直潭場

A.當原水濁度大於 12,000NTU，直潭場直潭壩仍以 110 萬噸/日進水，一原沉沙池除固定排泥 20 萬噸/日外，其餘 90 萬噸/日利用二原分水井及沈砂池排砂閘門作為排出口，進行繞流操作，此操作優點為：

- a.透過原水蝶閥操作控制即可進行快速減水及復水操作。
- b.避免大量高濃度污泥進入沈澱池可縮短災後復原時間。
- c.避免停止取水造成文氏管高低壓導管積氣計量不穩。
- d.固定取水量 110 萬/處理量 90 萬 CMD 可達到基本快混 G 值。

- 可利於分水井觀察膠羽。
- 可簡化取水閘門操作。
- 可簡化混凝加藥操作。

(2)長興及公館場

A.於高濁度期間採分區操作，長興場分為 3 區（水平及水安東、西側），公館場分為四區（南側第 1、2 組及北側第 1、2 組）。

B.當原水濁度大於 12,000NTU，長興場青潭堰仍以 25 萬噸/日進水，由公館場分水井溢流，由公館場分水井觀測膠羽形成狀況；恢復淨水處理時，長興場由水平側，公館場由北側第 1 組進水做為觀察膠羽形成狀況。若良好時，則其他單元陸續恢復。若不佳時，維持進水、調整加藥劑量並停止出水(即放棄該處理單元)直到膠羽形成良好，此時其他單元開始復水而該單元進行排水排泥。

5.修改沉澱池清洗策略

針對平常及颱風高濁期間擬定不同執行策略，平時依沉澱池淤泥量擬定清洗順序，於颱風期間集中派遣人力，迅速配合淨水場排泥及清洗沉澱池淤泥，確保淨水場操作正常。

6.建置變頻快混機

為讓直潭場快混池具備足夠混凝能量，於第 1-6 座淨水設施恢復設置快混機，確保混凝 G 值達到 500sec-1 以上，提高混凝及膠凝效能。

7.錄案教材並模擬各種狀況劇本加強應變演練

(1)各淨水場針對其設施特性分別訂定緊急應變計畫書(如圖 10)，訂定緊急通報流程，並定期實施緊急應變演練。

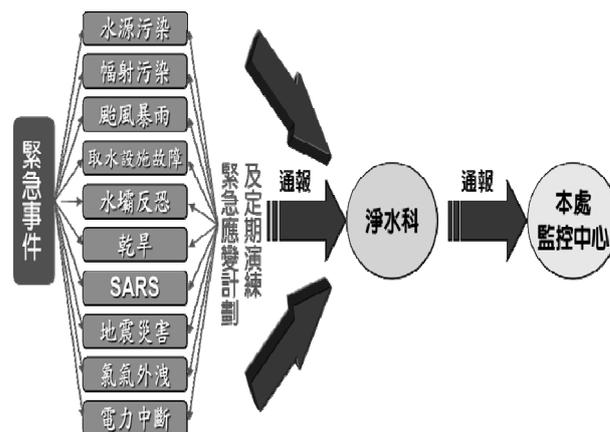


圖 10 緊急應變計畫

(2)平時彙集出水水質異常案例，編撰教育訓練講義，並修訂相關 SOP，辦理教育訓練及能力確認，提升應變及處理能力。

(3)以蘇迪勒颱風處理過程，邀集各單元現場技術人員及責任工程師，檢討尚需精進部分，立即進行軟硬體設施改善並作為案例教材加強演練。另針對水質異常緊急事故處理原則，研擬如何降低災害程度及如何快速復原，並留存高濁度原水水樣，進行實驗找出最佳的處理方式。

四、結論

良好的原水水質及穩定的水量是提供質優量足自來水的基本要件，水源保育工作在相關主管機關及北水處一點一滴持續的努力下，才能讓新店溪水源區的原水水質，在全國各水源區中名列前茅。然而，隨著時代變遷，水源區上游觀光業蓬勃發展、遊客快速增加，及全球氣候極端變遷影響，水源水質有逐漸惡化的趨勢，且臺北市因天然災害造成大規模停水並非首次發生，2001 年納莉颱風因原水濁度高，長興淨水場停止出水 18 小時，造成轄區近 24 萬戶停水，另 2002 年因缺水抗旱亦造成分區停水情事，及 2015

年蘇迪勒颱風因上游集水區強降雨，造成整個烏來地區土石流災情嚴重，影響大臺北地區供水穩定及用水品質，顯見停水與否最大的因素是天候及上游崩塌造成水質異常問題。水源保育工作的挑戰日益嚴峻，北水處將秉持精益求精的精神，為廣大用戶保護好活水源頭及飲用水安全。

面對全球氣候急遽變遷，日後可能有類似蘇迪勒颱風或更惡劣風災肆虐，為徹底解決颱風期間原水濁度飆升致淨水場無法處理之困境，北水處除已重新檢討訂定處理高濁度原水 SOP，積極賡續進行設備改善，及提升淨水效能外，並已著手評估由北勢溪設置專管計畫，且於行政院會建議中央重視新店溪上游土石崩塌的問題，希望經由中央與地方的合作早日將源頭問題解決，讓市民的用水更有保障。

北水處身肩重任，對於淨水處理備載、供水水質安全及流程操作彈性之需求也愈加殷切，累積過去水處理核心技術，及從歷次風災處置過程中汲取珍貴之經驗，積極應用資訊科技改善營運體質，藉由淨水管理資訊化落實全面品質管理，以提供質優量豐的自來水服務，朝向成為世界一流自來水事業的願景邁進。

參考文獻

1. 經濟部，「新店溪上游流域保育治理及區域穩定供水綱要計畫」實施計畫，經濟部，2016年。

作者簡介

張琰竣 先生

現職：臺北自來水事業處淨水科三級工程師

專長：化學工程、環境工程、淨水處理、自來水工程
設計及施工

水安全計畫之實務—以德國為例

文/何承嶧、駱尚廉

摘要

波昂憲章倡議供水系統主要受益者為家戶，此一觀念正與台灣自來水公司「以客為尊」企業精神相呼應。本文希望透過學習德國水安全計畫(Water Safety Plan, WSP)內涵，並評估導入台灣推動後可達到下列預期目標：1. 為用戶提供質優、量足及安全可靠的飲用水：在世界許多地區，有些在供水質量已達高水準後仍持續自我要求不斷提昇；然而在另外一些地區，飲用水中卻仍存有水媒疾病或可能造成健康影響，因此，供應安全優質飲用水的重要性可見一斑。2. 建立用戶對供水品質信心，並得到美感享受：國內飲用水水質標準訂有「影響適飲性物質(例如：硬度)」，當飲用水中如果含較高濃度鈣、鎂離子，加熱後容易產生碳酸鈣及鎂等結晶(俗稱水垢)，雖然研究文獻顯示其成份對健康無害，甚至可預防骨質疏鬆，然而使用者卻常因視覺效果不佳而產生疑慮，而推動水安全計畫除納入用戶感受外，亦同時思考如何強化用戶對飲用水的信心。

本文將以德國為例說明該國如何透過執行水安計畫，進而面對及解決上揭問題。

關鍵詞：水安全計畫、水源、漏水、監控、用戶服務

一、緣起與目的

WHO 制訂(德國)波昂安全飲用水憲章(The Bonn Charter for Safe Drinking Water)，用以強調自來水水源、淨水場、管網系統至用戶端之整體飲用水水質管理架構的重要

性，因為提供安全、可靠及優質飲用水，能促進人民健康及經濟發展，因此政府與主管機關應負起有效管理責任。

本案例研究將探討德國柏林自來水公司(Berliner Wasserbetriebe, BWB)、阿爾布斯塔特自來水公司(Albstadt Werke)及比特堡(Bitburg) Kommunale Netze Eiffel 自來水公司(KNE)執行 WSP 的經驗，並將拜訪「波昂全球水安全計畫國際專案辦公室(Bonn Global Water Safety Plan International Project Office, BG WSP IPO)」，闡述該辦公室目前及未來的發展走向。

以下內容則是與上揭單位針對水安全計畫實際考量及作法聚焦討論的議題，相信可提供台灣執行 WSP 上的有力參照基準。

- (一) 水源水質受新興污染物威脅，自來水事業需配合環保主管機關頒訂新法規調整淨水策略，德國經驗如何與主政單位進行溝通，以達到政府、自來水事業及用戶在確保水質安全的三贏局面。
- (二) 用水量需求因人口增加而急速擴增，然而淨水場擴建進度受制用地取得困難，以及廢水及污泥設備不足，亟需導入淨水處理新方法，德國自來水公司如何看待上述問題，又其如何研訂淨水高級處理及規劃相對應之管理模式。
- (三) 配水管網漏水現象突顯水資源的重要，台灣是世界排名第 18 位缺水國家更需將水資源留下來，德國自來水公司如何透過降低漏水，減少水質污染的發生。

(四)研討德國自來水事業如何藉由資訊公開的用戶服務，強化與民眾互動關係，化被動受理用戶反映問題為主動宣導加值服務，以獲取用戶對於自來水公司提供安全用水的信賴感。

二、文獻回顧

(一)波昂安全飲用水憲章

波昂安全飲用水憲章(The Bonn Charter for Safe Drinking Water)強調自水源地、淨水場、經管網系統至用戶端的整體飲用水水質管理概念及架構，並明確指出政府與主管機關的相關責任。其中所述飲用水安全計畫是一個(或幾個)通過文件形式備案計畫，用以明確描述飲用水輸送過程可能出現的風險，劃分其級別並採取措施減少風險所產生損失。

(二)WHO 水質安全計畫

管理供水安全，建立預防策略是確保飲用水安全的首要步驟，公共供水系統應從自來水水源到使用者端之飲用水配水系統著手；由於飲用水品質管理權責單位在許多方面常常都不直接屬於供水單位，例如：供水單位所在行政轄區也許不在水源區域內，因此常需要各相關權責單位協同合作，以釐清特定供水區域的水質管理責任歸屬。

三、建置水安全計畫與實施流程

(一)WSP 發源地 - BG_WSP_IPO

Bonn Global Water Safety Plan International Project Office 不僅是水安全計畫發源地，亦是台灣未來執行水安全計畫及與世界接軌的一個關鍵連結點。

現任 GWSP IPO 執行長 Dr. Anik Bhaduri

在接洽討論的過程當中，說明當今人類面臨最大挑戰之一，就是實現地球內的每個人都能擁有安全的水資源，然而 GWSP IPO 關心的議題更擴及能源和糧食等安全問題，因此 GWSP IPO 每年均會針對永續性之水、能源及糧食議題舉行國際會議進行討論，誠如上述，除水安全，下一步更需整合能源與糧食等安全議題，或許我們在整合水、能源和糧食之間安全計畫提出發展策略之際，也值得我們花些心思一併審視下列幾項核心問題：

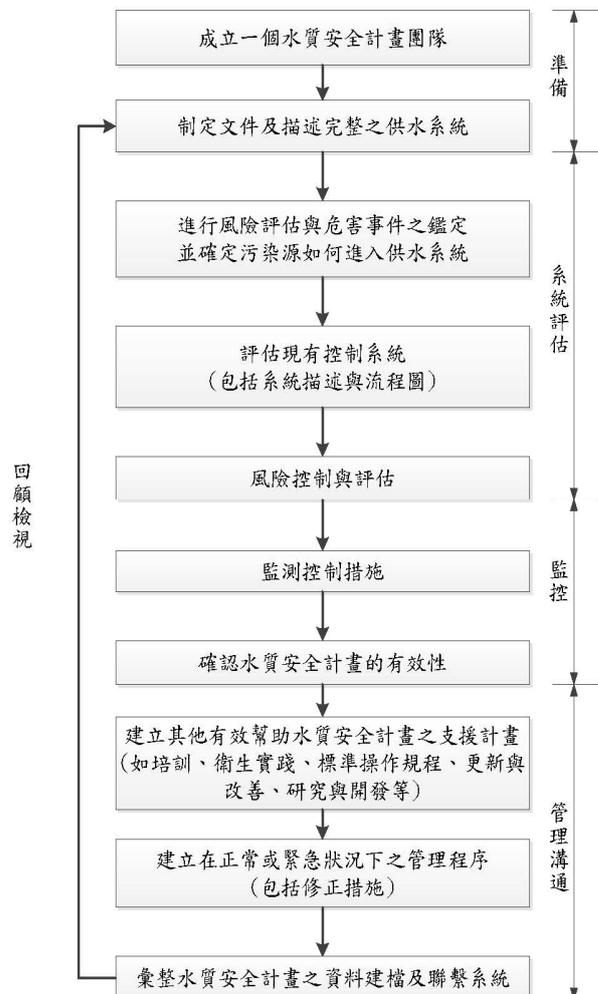


圖 1 水質安全計畫建置與實施流程圖

1.明確定義治理及解決水資源、能源和糧食整合策略：加強相關部門之間的相互聯繫

和相互依存的關係，可降低不必要的天然資源浪費。

2. 與水系統連接的其他自然資源需要更系統性的探討：針對資源數量和質量，需研究決策和行動方案。
3. 提供經濟誘因：反映資源稀有程度，提高使用效率以及限定補貼對象，均可有抑制不當資源使用及提高水資源、能源和糧食安全程度。
4. 持續進行創新研究和技術提昇：政府需要匯集各利益團體對水資源、能源和糧食安全策略的建言，為滿足這些利益相關者的訴求，使他們能夠共同解決問題，確定雙贏的戰略，因此持續進行創新研究和技術提昇，可以協助達成這些目標。
5. 公共及私營部門可考慮資助國際組織研究經費，以持續發展水資源、能源和糧食安全目標：不斷研究發展和制定因應策略有助於促進水資源、能源和糧食安全之間的整合作業，因此全球各國的經費投入將有助於此目標的達成。
6. 需透過國際會議將學術界和其他利益相關者進行意見上的聯繫：各國決策者可透過國際會議瞭解最新的水資源、能源和糧食安全的應用研究及其使用工具，舉凡涉及風險評估、環境威脅及社會影響等評估指標均可透過蒐集用戶反饋，予以研訂及增修具效率的技術發展，朝向水資源、能源及糧食安全關係永續發展目標努力。

(二)WSP 主題之水資源管理

BWB：該公司提供德國柏林地區自來水及污水處理的服務，現有 9 座淨水場、700 座水井，6 座廢水處理場及 148 座加壓站。

目前共有員工 4,886 名（其中自來水部份員工數為 1060 名），每日供應飲用水 55 萬噸給 340 萬柏林用戶使用，供水規模介於台灣地區新北市及高雄市之間；每年售水之收入為 3 億 9,600 萬歐元，用戶接管收入約 1,000 萬歐元。

柏林自來水水源主要來自地下水，淨水場透過井水汲取後經過淨水處理，再配送用戶。德國重視地下水需維持豐富之水量，因此將河湖經過地下水層的過濾及涵養之補助現象為 Bank Filtration，同時在補助地下水之先以「微篩 (Microseive)」或「滲透塘 (Infiltration Pond)」進行前處理，以確保注入之水質符合水源水質標準。柏林主要水源 60% 來自湖泊，30% 來自降雨，以及 10% 來自都市逕流。柏林是水資源得天獨厚的地方，因為水源豐沛而且品質佳，清水不用添加消毒劑即可配送，民眾對水質信賴度佳。

BWB 針對都市地表水體可能遭受家庭或工業廢水污染的監測分析，委託柏林自由大學 Prof. Dr. Achim Schulte 以柏林 Rummelsburg 湖區為研究標的，探討底泥沉積物與水體水質相關性，該研究將湖區平均劃分 15 處採樣點，水體水質分析項目包括含氧量、濁度、葉綠素 a 及水溫；至於底泥分析項目則包括無機性物質(Hg, Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, Zn)和有機化合物((PAH, petroleum derived hydrocarbon in the range C10-C40 and C10-C22, selected nitro-compounds, selected organotin compounds, PCB, AOX and EOX)等。根據該研究初步結果顯示：流水速度與揚起底泥物質相關，而上揭包括水體水質分析項目、底泥無機性及有機化合等物質所分

析的項目，均以建立歷史背景值之資料庫為主要訴求。倘未來需將之引為地下水井補注水源，已預為擬訂將附近工廠移出或將其廢水納入污水下水道或自行處理至合於法規要求再予放流等先備計畫，至於家庭廢水部分則需加速建設污水下水道系統，俾利將之接管以防止湖水水質更加惡化。

「河(湖)岸排列過濾入滲裝置(Bank Filtration, BF)」在德國的運用實例相當普遍，其原理係因德國自來水水源多採自地下水，而良好的地層結構實為天然的過濾設備，為考量水資源永續利用，除河湖自然滲流水外，亦可考量設置「地下水補注水塘(Recharge Pond, RP)」用以蓄積雨水及河湖滲流水，適時將之補注地下，使水源生生不息。然而將 BF 概念引入台灣有其難度，可能需面對用地不足取得不易及限縮行水區土地利用面積而遭致抗爭等複雜問題，在執行上將會是項重大挑戰。

柏林地區水源水質目前有三大隱憂，分別是東南區的硫酸鹽(Sulfate)及西南區的鹽化問題(Saltwater)屬古老地質問題，另外西北區的微量有機物(Trace Organic)則屬新興污染物問題，BWB 已持續鎖定，並針對這些問題進行研究與對策研擬，充份落實從水源端開始執行水安全計畫的精神。

(三)WSP 主題之淨水管理

BWB：柏林地區地面水的主要污染源為人類活動，因此據以研訂下列環境保護策略，以制訂淨水處理策略及維護天然資源。

- 1.劃設水質水量保護區。
- 2.監測地表水及地下水水質。
- 3.鑑別及將污染源減量作業。

4.將受污染區域整治及再生。

承上所述，BWB 體現「取之大地-還之大地」的環境友善態度及下列原則進行淨水處理。

- 1.優先使用在地水資源。
- 2.維持地下水的永續使用條件。
- 3.儘量使用天然原水，避免過度處理。
- 4.在社會可接受水價前提下進行最有效率的操作管理。
- 5.確認地下水層及鑿井深度需兼容並顧。

BWB 的淨水處理流程為：氣曝→快濾→清水→配水，完全不加混凝劑及消毒劑。

另外 BWB 實施「納斯利政策(Natural and Artificial Systems for Recharge and Infiltration, NASRI)」，即針對各項水質污染潛勢的物質(例如：Algae Toxics, Organic Substances, Bacteria, Viruses, PhAC, and Antibiotics etc.)，以專家管理方式(各分項子題負責人均為學有專精博士人才)，持續研發及透過建立模式(Modelling)整合實驗分析數據，並以建立「綱領原則(Guideline Principle)」為最終管理目標，持續進行研發改善。

比特堡自來水公司(Kommunale Netze Eiffel Wasser, KNE)：屬公法機構，位處德國西南方，緊鄰比利時(Belgium)及盧森堡(Luxemburg)，供水範圍以德國為主，必要時將支援該兩國緊急用水需求。該公司 2013 年供水人口僅 51,433 人，劃分 3 個供水區，供水管線長 1206 公里，日供水量 3,966 立方公尺，管材以 DIP 為主(當地稱做 GGG-Rohr)，其餘管材尚有 PVC/PE、鋼管和其他軟管。水源包括地下水(主要)、地上水及河湖水，員工數 50 人，是家非常迷你

的自來水公司。在淨水處理上目前河湖水漸有藻類滋生的問題，惟因河湖水不是主要水源，目前尚非第一處理要務。整體而言，該公司淨水水質用戶的評價是：「水質好到像游泳池，且無需加氯。」

(四)WSP 主題之配水管理

BWB：導入管網數位控制系統(DCS)降低漏水現象。由 BWB 配水管網相關統計資料可知，截至 2012 為止，其管線總長度約 274,00 公里，消防栓約 70,000 只，而制水閥則約 94,000 個。基於降低漏水減少水資源浪費前提，BWB 的策略為選用優良管種，並善用中央監控系統輔助，使其年爆管(burst)次數從 1990 的 1300 次，降至 2012 年的 620 次，降幅 52%，成效斐然。其自來水損失率(Water Loss)一般控制在 3~4%之間(2008~2013)，2014 更降至歷史新低 2.2%，究其實際得知係歸功於良好水壓管理(維持在 4~5bar)及均勻佈設的遙測監控設備(3 個供水區，平均設置 9 個淨水場監控點)。

大柏林供水系統有 5 個操作中心，這些中心負責管線的維護和修復。2012 整體供水管線有 51%是延性鑄鐵管 (Ductile Iron Pipe, DIP)、28%鑄鐵管 (Cast Iron Pipe, CIP)、11%石棉管 (Asbestos Pipe, ASP)、9%鋼管 (Steel Pipe, SP)及 1%其他管種(如 PE, PVC, Concrete etc.)。主幹管以 SP 為主要管種，配水管網則以 DIP 為主力。為了防止霜害，其管線埋深較台灣 1.0m 更深，為 1.5m。

阿爾布斯塔特自來水公司(Albstadt Werke)：途經轉運點斯圖佳特火車總站(Stuttgart Hbf)正進行大規模改建工程，站外牆壁懸掛有深藍色漆管線(詳圖 2)，經洽詢結

果乃為珍惜水資源，施工期間所抽出的地下水以此專管引流至附近雨水下水道系統或地下水補助專管，一則可以維護工地的乾淨清潔，另一方面則是不浪費水資源，在施工結束之時再予以拆除回復原貌，將水循環永續的概念發揮的淋漓盡致。

Albstadt Werke 員工 160 人，服務用戶 37,000 人，管線佈設 51.9 公里，管材包括鐵管(Iron)、鋼管(Steel)及高硬度聚乙烯管(HDPE)，配水管網中最可能影響水質的負向行為即為破管造成的污染事件。Albstadt Werke 引進一套非常有用的檢漏系統來管理管線漏水。該公司針對此類漏水管控問題的操作要領有如下幾項步驟：1.水量平衡(Water Mass Balance)：計算商業損失(Commercial Loss, 售水量/供水量)及真實損失(Real Loss, 每件漏水統計量)。2.監控進出水量(Monitoring Inflow & Outflow)：完整紀錄 24 小時進出水量分佈圖。3.初始最佳化(First Optimization)：劃分水壓管控區(Pressure Zone)，俾利縮小管網分區。4.二階最佳化(Second Optimization)：將記錄儀(Logger)評估裝設位置，俾便偵測及接收訊號。5.決定最佳方案(Optimization Solution)：為利記錄儀(Logger)發出的訊號可以順暢的由接收器(Receptor)接收，同時透過無線傳輸的方式將訊號回傳中控中心，因此 Receptor 需設置高處且較無遮蔽的地點。

就 Albstadt Werke 實務運作經驗得知：在某水壓管控區(Pressure Zone)設置 80 只記錄儀(Logger)，其監控管線總長度 51887 公尺。將傳輸通訊訊號(GSM Modem)與網路(Internet)連接，並評估 Logger 是否均可依評估地點裝設、不同氣候條件是否會影響其準

確度(例如：夏季炎熱及大雨；冬天霜害及結冰)、Logger 電池可有效使用多長時間？以及監測結果的精確性(Precision)如何？但其實證結果令人滿意，其偵測漏水準確度高達 98%(即對於正常圖譜的漏水現象無法有效偵測除外)，即使在惡劣天候亦不影響其功能。



圖 2 施工中回收水管架設圖

Albstadt Werke 漏水監測系統監測漏水點(Break)需具備二只 Logger，在水壓管控區(Pressure Zone)呈現漏水點相對位置，並可由其光譜(Spectrum)及音頻(Frequency)對應漏水監測系統背景值進行確認作業，此系統有效協助降低管理人力及提高應變能力。

比特堡自來水公司(Kommunale Netze Eiffel Wasser, KNE)：自 1976 年起 KNE 供水水質僅一次接獲民眾反應水質具臭味，經查該案係因其他單位工程施工不慎挖破自來水管導致水質受污染，而 KNE 立即修補，洗管並於最短時間回復供水，事後並主動關心該影響用戶約 100 戶的後續用水狀況，深獲好評。重法守法是德國人的民族性，想當

然爾 KNE 同時向破壞者採取求償動作，將相關證據蒐集完備後提出並順利取得賠償，同時也贏回用戶的用水信心。

因 KNE 供水區域高低起伏變化劇烈水壓難以合理調控，因此該公司善用 GIS 進行遠端管網控制系統，並與 SCADA 結合，有效應用於配水系統及處理即時漏水問題，實務做法上即藉著水壓的異常變化，得以即時掌握訊息並採取因應措施。

(五)WSP 主題之用戶服務

柏林水務公司(Berliner Wasserbetriebe, BWB)：根據 2013 年 BWB 所做的顧客滿意度僅 58%，乍看之下，心想如此制度完善，注重研發及講究服務的公司，為何有那麼多的顧客不滿意？但一探原因則是因為水價太過昂貴(每度約 100 元新台幣)所致。然而 350 萬柏林民眾仍仰賴 BWB 提供量足質優自來水以應生活所需，此現象的確引人深思，以價制量的做法確實可以達到減少浪費水資源的目的。但 BWB 除合理反應水價成本，還有那些作為可以提昇對用戶用水品質的滿意度？由下列 BWB 的經營理念及執著精神，可看到其持續改善及自我要求的精神，相當值得學習。不斷改進 BWB 的形象。

- 1.持續努力強化內部員工對自來水產品的信心及對掌握全流程技術訣竅(know-how)的能力。
- 2.設法影響及改變客戶對 BWB 的態度。

為有效執行水安全計畫的用戶水質反饋部分，BWB 設定三項循序策進目標(Target)及應對策略(Stratgy)，最重要精神就是要先鞏固公司內部向心力，再逐步與用戶互動，最終希望能落實上揭經營理念(詳表 1)。

表 1 BWB 與用戶接觸三步驟說明表

	第一階段	第二階段	第三階段
對象	內部 (Internal)	外部 (External)	外部 (External)
目標	1.內部員工對任務的認同。 2.鼓勵職員對自己的工作感到自豪與驕傲。	1.主動將公司公眾事務釋出於公共論壇及政令宣導場合。 2.成為意見領袖	1.鑑別及參與各公共論壇、政令宣導及意見領袖的效果。 2.使用戶潛移默化接受高水價及感謝公司的服務
策略	提供資訊→增加動機→使員工同仇敵愾，一傳十，十傳百為公司效力。	以情感訴求→引起注意→透過溝通平台(例如公司官網)傳遞對用戶的訴求。	持續更新官網資訊→對話(Dialogue)及互動(Interaction)以檢視及修正溝通的方向。

值得一提的事是，在與 BWB 第一次聯繫是假日非上班日，寄去的電子郵件，馬上就收到回擲，並留下代理人緊急聯絡電話及電郵可供聯繫，當時雖然看不懂德文內容，但可以感受到 BWB「以客為尊」的理念乃具體落實在初次的接觸，這個看似不起眼的動作，卻的確令人留下很好的印象。

再來 BWB 非常重視內部員工，我們可以從其官網內容看到「員工圖像」(詳圖 3)，點選每位員工可以看到該員工侃侃而談他的工作內容，工作經驗及他對 BWB 的感想。



圖 3 BWB 員工圖像

另外在 BWB 辦公廳外懸掛的文宣圖片不是大明星，而是 BWB 的基層員工(詳圖 4)。BWB 想要傳遞的訊息即是” Nothing Runs Without Us”，亦即「我們的員工來自你們的家庭；我們的服務品質就如同你的家人般值得信賴。」



圖 4 BWB-Nothing Runs Without Us 圖像

此外 BWB 亦善用社群軟體(e.g. Youtube, Facebook, and Instagram etc.)公布與用戶有關的活動及訊息，將被動接收用戶反映事項，轉而主動釋出用戶關心與水相關的資訊，藉此拉近與用戶的距離。至於每年至少舉辦 50 場以上與水相關的大型活動乃年度盛事，此與台灣每年 4~6 月舉辦的節水活動類似，但為達與用戶互動的效果，BWB 舉辦的次數顯然更多。

至於與輿情的關係則是台灣相似，除了針對不實報導發澄清稿外，有關正面新聞亦會主動與媒體聯繫發佈新聞，因此平時與媒體的互動良好是相當重要。

因為柏林是德國的首都人口眾多，人民又非常友善，因此不同國籍人士均得以此地安身立命，因此 BWB 規劃有多國的語言服務。例如官網就有德、英語；電話客服另有

土耳其語；而網頁內容分設一般民眾版本、兒童版本、教師版本及專業人士版本，以滿足不同使用者的需求。

比特堡自來水公司(Kommunale Netze Eiffel Wasser, KNE)：KNE 非常重視提供用戶用水之水質檢驗作業，由取得德國官方“DakS“(德國標定服務)的標定實驗室認證可以得到佐證。KNE 實驗室有專人負責管理(類同 TWC 水質課檢驗主管)，各水質檢項部分亦有專人負責，分工程度類同環保署 NIEA 及 TAF17025 認證要求的規模，所幸此部分 TWC 的水質檢驗及分析作業已可與 KNE 公司並駕齊驅。

四、結論

1. 德國波昂是國際水安全計畫發源地，對提供量足、質優及服務好的訴求是具體實現的地方，同時該計畫執行及推動單位 GWSPIPO 每年均會在波昂舉行研討會，召集世界各國關心水安全的人士齊聚一堂共同討論，以國際視野的格局嚴肅看待此項議題。
2. 經參訪德國大型自來水公司(柏林自來水 BWB)、中型自來水公司(阿爾布斯塔特自來水 Albstadt Werke)及小型自來水公司(比特堡水公司 Kommunale Netze Eiffel, KNE) 所得共同的心得是：其水源擇選優質來源且水量充沛不虞匱乏，並運用巡查和監測設備予以嚴密保護；地下水以設井抽取為主要汲取水方式，另重視維持地下水的豐沛性，多採 Bank Filtration 方式補助地下水脈。這三個淨水廠均採不加消毒劑方式送出清水，民眾可生飲自來水；配送系統幾乎全仰賴監控設備將水質資訊展現在 GIS 圖面上(或大型監控面板)，而用戶端的客訴反應可以監測數值是否超過法規限值即時呼應用戶關心和感受到的水質問題。至於主動提供用戶水質資訊的作為除網頁定期公布水質檢驗結果，另廣為運用各社群網站(如 Facebook, Youtube, and Instagram)即時提供與水質有關的宣導及活動，均有別於採守勢的等待民眾反應問題來的積極。
3. 德國各地水價由各地區自訂，每度水約折合新台幣 100 元，其國民所得雖為台灣的 2~3 倍，但高賦稅(所得 40%以上)、民族性生性節省及具環境友善觀念等因素，實質上已有效降低水資源浪費，據悉德國每人每日用水量不到 150 公升，此與台灣居世界第 18 位缺水國家的平均日用水量 250lpcd，顯然已提供台灣未來針對水資源管理上相當具說服力的參照。
4. 柏林 BWB 2015 已由之前民營型態(仍具官股)轉為公營型態，其主要原因係由於水公司主要售水收入不足以支撐正常營管及人力成本支出，當經濟主力來自公部門(包括議會通過)的財政挹注，民營與公營型態的互轉機制在德國是普遍的現象，但不論其如轉變，均以不影響供水及服務品質為前提。
5. BWB, KNE, and Albstadt Werke 等自來水公司在配水管網管理上運用先進及輕巧的監控儀器，輔以資料完整 GIS 系統 Database，並選用優良管種和高施工品質將自來水漏水率控制在 3~4%以下(2014 更低至 2.2%)，低漏水率可有效降低自來水在配送階段因管壓變化受地下物質侵入而污染的機率，供水安全性自然提高。

- 6.用戶服務部分，BWB, KNE, and Albstadt Werke 等自來水公司均充份於公司網頁主動公布水質資訊供用戶查詢。值得一提的事是，在與 BWB 第一次聯繫是假日非上班日，寄去的電子郵件，馬上就收到回擲，並留下代理人緊急聯絡電話及電郵可供聯繫，雖然看不懂德文內容，但可以感受到 BWB「以客為尊」的理念乃具體落實在初次的接觸，這個看似不起眼的動作，卻令人留下相當好的印象(Köln RheinEnergie 自來水公司亦採同樣用戶服務措施，惟因該公司人力緊縮因素未便接受參訪，實為可惜)。
- 7.德國因水源管理良善，以一般傳統淨水技術解決水處理問題已然足夠，因此德國學界(柏林自由大學 FUB, 慕尼黑理工大學 TUM)近來關心的議題主要聚焦在水源湖區底泥與水質之間的物質傳輸，將對水源造成何類影響；另外生物性指標(例如 Algae Toxics, Organic Substances, Bacteria, Viruses, PhAC, and Antibiotics etc.)其數據消長對人體造成健康風險及與法規之間的對應性是近來關注的焦點；至於經濟發展造成廢水(例如氨氮)排放、管末處理對水源的污染潛勢及新興污染物議題(Contaminants of Emerging Concern, CECs)亦是其關心和研究主力。
- 8.德國施工工地附近掛有懸空深藍色管線，其用意係施工期間所抽出的地下水以此專管引流至附近雨水下水道系統或地下水補助專管，一則可以維護工地的乾淨清潔，另一方面則是不浪費水資源，在施工結束之時再予以拆除回復原貌，將水循環永續的概念發揮的淋漓盡致，令人佩服。

參考文獻

- 1.水利署，自來水法，2014。
- 2.環保署，飲用水水源水質標準，1997。
- 3.環保署，飲用水水質標準，2014。
- 4.駱尚廉，王根樹，「國內自來水水質安全計畫之推動規劃」，中華民國自來水協會，2013。
- 5.何承嶧，駱尚廉，「水質安全計畫之導入評估」，中華民國自來水協會會刊，第34卷第3期，第57頁，2015。
- 6.何承嶧，經濟部一〇四年台德技術合作人員訓練計畫「為提昇台灣供水品質及經營績效，評估導入國際『水安全計畫』之可行性」出國報告書，經濟部，2015。
- 7.IWA, Bonn Charter for Safe Drinking Water, 2004.
- 8.WHO, Guidelines for Drinking Water Quality, 2004.
- 9.WHO, Climate-Resilient Water Safety Plan Training Workshop (For Urban Supplies), 2012.

作者簡介

何承嶧先生

現職：台灣自來水股份有限公司水質處組長
專長：環境工程

駱尚廉先生

現職：台灣大學環境工程研究所教授
專長：環境工程

北京、澳門、香港與上海浦東 — 管網漏損控制與管理簡介（下）

文/黃欽稜

三、香港

（一）漏控的起因與背景

香港水務署負責整個香港的自來水供應，其供水轄區面積為 1100 平方公里，其中 300 平方公里為集水區，並設有 17 個大小水庫，可儲蓄原水約 5.90 億噸，詳圖 28，儲滿後可供應全香港約 4~6 個月的用水，其中兩個大型水庫甚至蓋在海邊，配合地形以築堤圍海的方式建造水庫，工程十分浩大，庫容量分別為 2.3 億噸、2.8 億噸。即便如此，由於每年香港本地水庫入流量僅 2.95 億噸，相較於香港每年用水量高達 12.3 億噸，明顯入不敷出，許多水源必須由中國大陸支援。為了減少境外水源的比例，香港曾打算擴建更多的境內水庫，但考量昂貴的建設費用與引起的環境衝擊，最終暫緩實施。

由於香港龐大的觀光人口，導致水資源的相對匱乏，香港水務署甚至埋設第二套輸送海水的管網系統，用以供應民眾沖廁之用，雖然分擔了 2.71 億噸的用水，仍然有 9.59 億噸的自來水年需求，是海水不能替代的。因此香港在難以開源的情況下，只能由管網漏控上進行節流，因此自 2000 年以來，香港開始投入大筆經費改造管網系統。

香港的管網全長 8400 公里，超過 2 萬只閥門，系統十分複雜，甚至在九龍地區，每平方公里內配水管長度就超過 27 公里，加上地勢高低起伏，輸送水量與穩定壓力不甚容易，導致水壓高低差距很大，許多地勢較

低的地方管網水壓太高，某些地方的水壓甚至高達 40~50 米。管線老化後經不起水壓的尖離峰變化，而經常發生洩漏，甚至突發爆管，如圖 29 所示。不僅流失珍貴的水資源，更使得繁忙的交通中斷。但水管滲漏率於 2003 年高達 25.8%，管網系統老化問題嚴重，迫使香港水務署必須提出管網整體改善計畫。

（二）管網改善計畫與小區管理措施

為減少水管滲漏情況，香港水務署自 2000 年起對全港總長 8400 公里的水管實施更換及修復計畫，簡稱為 R&R 計畫（Replacement and Rehabilitation Project），爭取於 2015 年前完成更換及修復長達約 3000 公里的水管。更換及修復計畫完成後，水管滲漏率將由 2003 年的 25.8% 下降至 2015 年的 15%。R&R 計畫共分 4 個階段，為期 15 年，預計投入 2360 億港幣，採取整合式的管理方式，引進 IWA 的多管齊下策略，除了更換管線，更進行檢修漏、水壓管理、小區計量等工作。

香港與臺北的狀況十分類似，不僅於 2000 年初的漏水率相仿，皆逼近 30%，而且管網老舊複雜程度也相去不遠，香港許多管線已經埋設超過 30 年，臺北甚至仍殘留不少日治時期的鑄鐵管與鉛管，而且雙方皆人口密集，管線密度極高。於繁忙的街道中更換或更生逾齡管線，香港採用許多免開挖工法，詳圖 30，其經驗值得臺北借鑑。

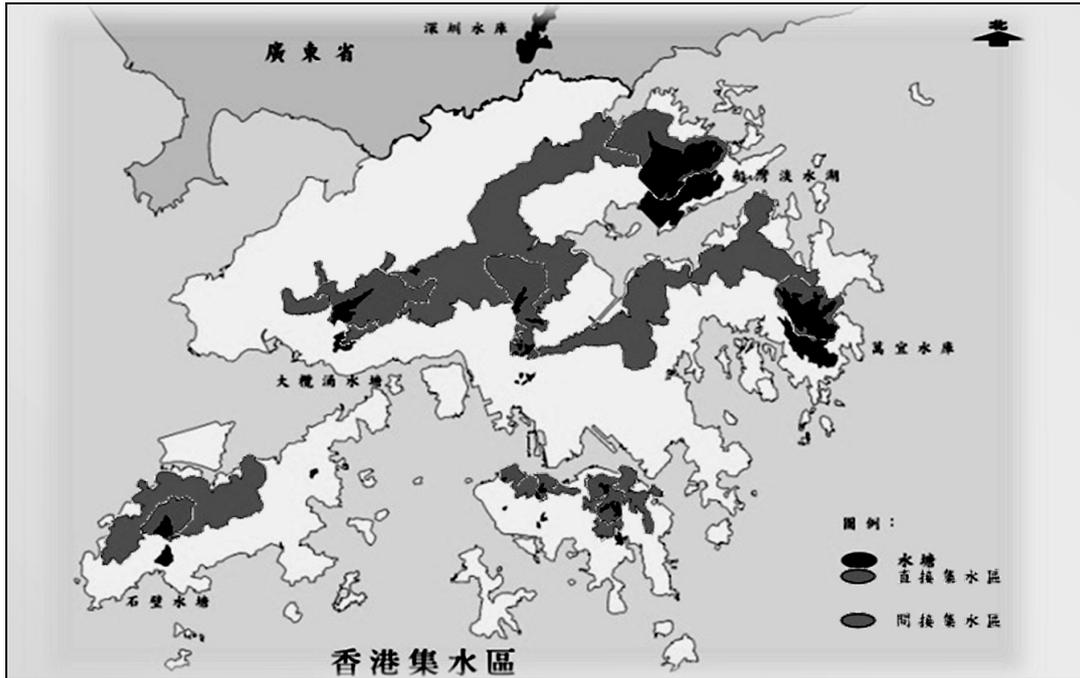


圖 28 香港水務署供水轄區與集水區



圖 29 香港高水壓引致管線爆管與滲漏



圖 30 香港水務署推動更換及修復計劃「R&R」

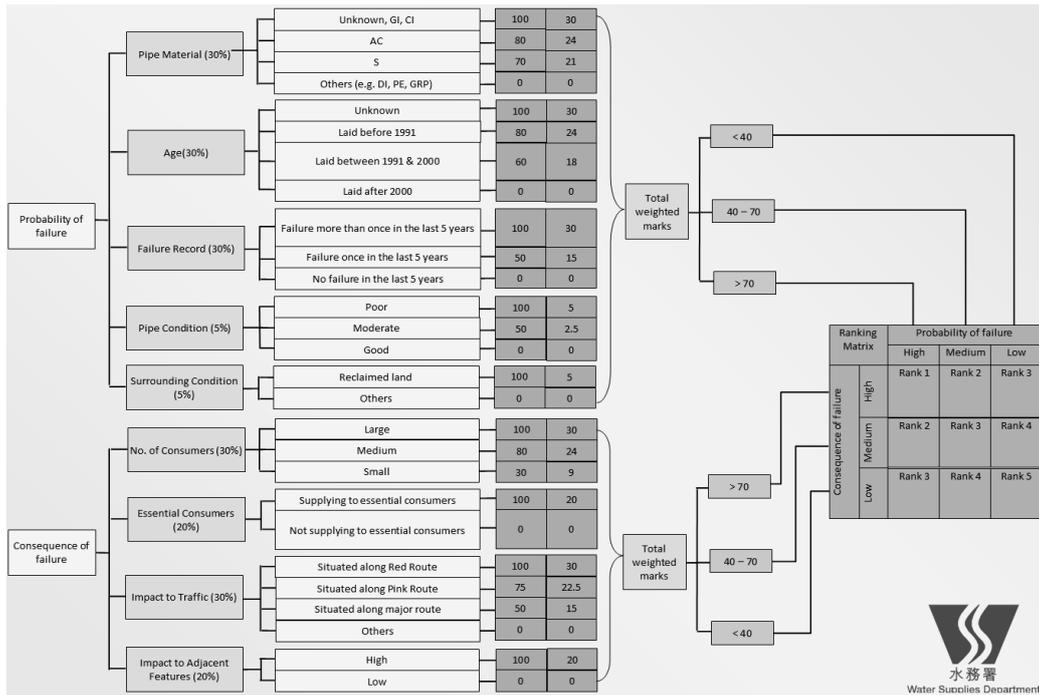


圖 31 香港「R&R」計劃中優先施作管線的挑選法則

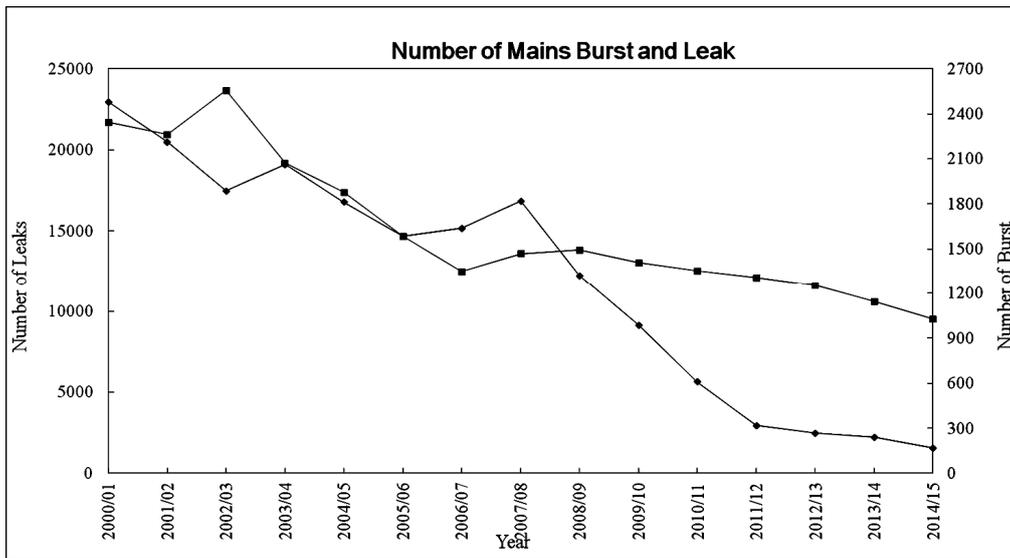


圖 32 香港「R&R」執行 15 年來爆管與修漏逐年遞減

由於全港管線龐雜，為期 15 年的 R&R 計劃仍然無法全面更換所有的管道，僅能施作 36% 的管線，因此香港水務署提出一個更換的挑選評分法則，詳圖 31 所示，基於風險管控精神，以「爆管之機率」、「破管影響性」兩大項目展開，分別對配水管線評分。其中爆管之機率考量管材、管齡、破管次

數、管線現況、環境狀況。破管影響性則考慮周邊用戶數、重要用戶數、交通影響、對鄰近管線衝擊。這些數據由 GIS 擷取後進行評分，最後匯入風險矩陣，九宮格內分為 5 個風險等級，水務署再由評分列為最高風險的管線優先汰換或修復。

香港的挑選方法比較接近臺北的管網

弱點分析，屬於間接方式，即以相對風險評判管線體質，不由實際漏水狀況進行挑選，有可能風險高但實際漏水量不高。而臺北選擇售水率低於 50% 的小區優先汰換之規則，則屬於直接方式，係針對管線真實漏水嚴重程度進行挑選，可實際計算汰換前後的漏水量降低數據，而且臺北於小區內採用全面汰換方式，包含配水管與給水管等大小管線，只要小區漏水超過一半，就全面更新，因此漏控效果十分顯著。經過 15 年的 R&R 汰換與修復，香港的爆管與滲漏修理件數明顯下滑，詳圖 32，尤其是配水幹線的爆管次數，由每年 2600 件大幅降至 169 件，最為顯著。但小管線的滲漏修理件數，雖由每年的 2 萬 2 千件下降至 1 萬件，但仍居高不下。可能的原因在於香港的風險判定挑選法係針對輸配水管線為主，卻遺漏了用戶給水管的部分，所以給水管僅能在配水管更換時順帶施作，屬於被動更新所致。

香港漏控的另一個挑戰，在於區域水壓

過高，由於全港屬於多山丘的地形，甚難將整體水壓均勻化。有鑑於此，香港水務署針對管網的特性與拓撲，搭配轄區 200 多個配水池進行小區劃設，詳圖 33，小區劃設完成後，坐落於地勢較低的小區，由於水壓較高，於是額外在進水點安裝減壓閥，以控制進水壓力，降低區域水壓，減少滲漏量，這類的小區便稱為壓力控區 PMA。至 2015 年中，香港已經劃設了 750 個小區，預計全部劃設完畢後全部小區數量可達 2000 個以上。

由於必須持續控壓，香港的小區為長期封閉。有別於臺北的小區，因為主要用來挑選汰換管線與檢核施工成效，所以臺北的小區平常周邊制水閥全開，需要計量時才封閉。只有臺北盆地周邊丘陵區的少數獨立小區才屬於長時封閉，並設置減壓閥控制水壓，比較類似香港的 PMA。至於盆地中央平原的小區不須以減壓閥進行控壓，臺北是以泵站端的變頻器進行大面積的穩壓，因此臺港的作法不太相同。

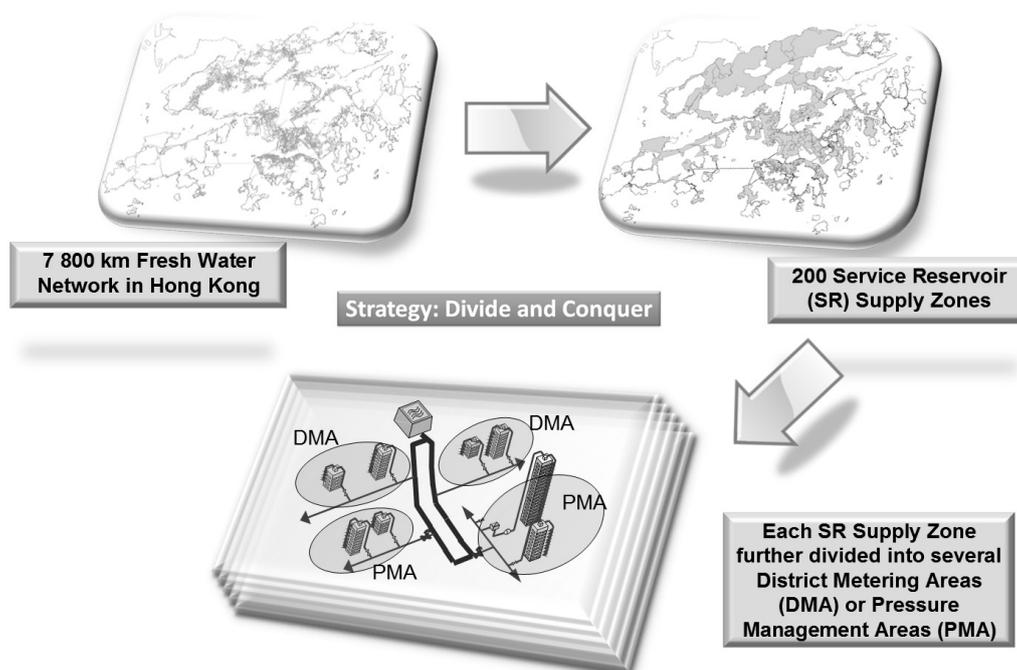


圖 33 香港按管網拓撲、配水池與高程劃設 DMA 與 PMA

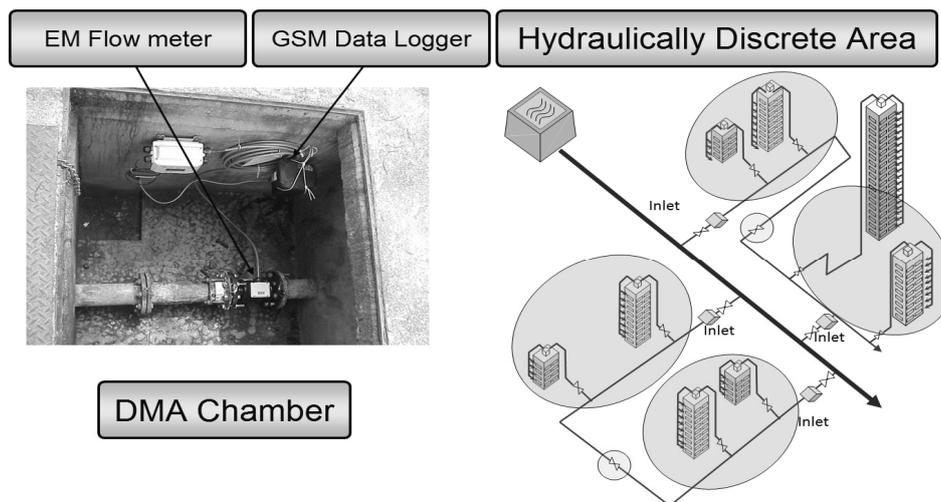


圖 34 香港 DMA 劃設、進水點窰井、流量計設置情況

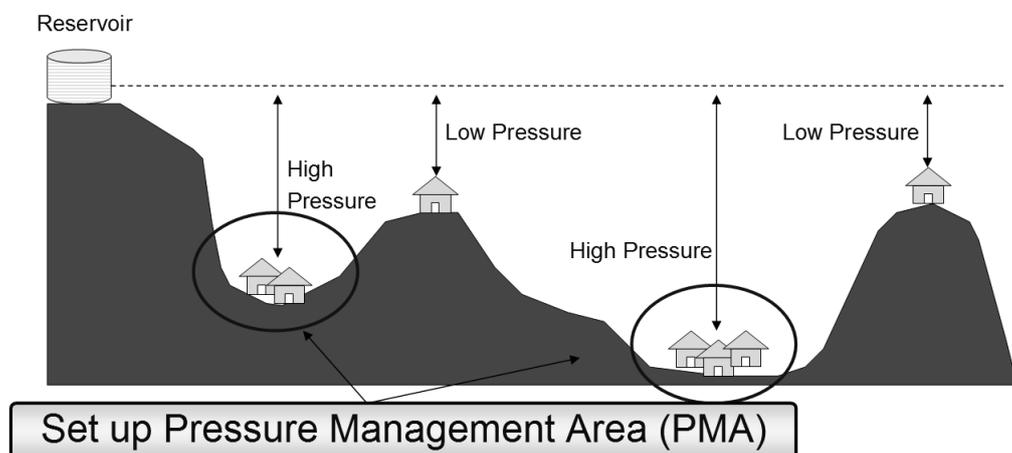


圖 35 香港於地勢之相對低點設置 PMA

香港的 DMA/PMA 進水點皆設有窰井，所設置的流量計均採用電磁式流量計，並使用 GSM 方式回傳訊號，每個小區原則上以一個進水點為主，與其他小區的相通管平時制水閥常閉，如遇到緊急狀況，如爆管、水壓供應不良時才開啟，做為備援進水點之用，詳圖 34 所示。相較於臺北住宅區建物以低樓層式公寓為主，香港住宅建物樓層極高，用戶數很多，所劃設之 DMA 單一進水流量必須能夠供應所需，因此小區的面積比臺北小，區內管線長度也比較短。

有別於臺北的 DMA 多由鄰近街廓分割管網形成小區，香港的 DMA 與 PMA 大多以

高程決定劃設的邊界，詳圖 35，原則上以高程之相對低點設置 PMA，其進水點減壓閥的出壓設定值必須因地制宜，按照當地地勢與住戶用水量隨機調整。因此香港設置 PMA 並無絕對的嚴格設定法則，但有四個原則宗旨，包含(1)降低超額水壓、(2)維持管網水壓穩定、(3)減少管線漏水、(4)延長管線壽命。只要能夠同時滿足四個原則就是令人滿意的 PMA。

(三)設置「智管網」的規劃

隨著香港 DMA/PMA 的區塊數愈來愈多，未來將超過 2000 個小區的規模，屆時海量的流量、壓力訊號也不停湧入 SCADA，

如果僅以人工判斷並進行區塊的手動調整，勢必不能優化調度與管理，更易因監管人員的疲勞或疏失導致狀況頻傳。有鑑於此，香港水務署近年來開始籌建「智管網」(Water Intelligent Network, WIN)。除了納入小區的流量、水壓數據之外，也包含管網區域檢漏之漏水音記錄儀訊號、各泵站出壓流量、配水池水位等資訊，以進行即時監控、後端分析、提供決策等主要目的，詳圖 36。基本上，香港的智管網包含了過去各國監控中心 SCADA 的所有功能，而且隨著科技的進步，必須能夠同時接收固網訊號以及無線訊號，詳細呈現即時資訊至 PC、移動裝置、手機等設備。

系統必須具有雙向功能，亦即除了監看之外，尚能由主控端發出指令，遙控遠端可控設備進行調整。要跳脫傳統 SCADA 的框架，就必須額外增加智能分析的部分，系統

將包含智能警報、模式分析、與行為預測，即時訊號部分主要提供給第一線的操作人員、監管人員對系統進行調度，而後端智能分析的結果則提供給決策人員、規劃人員進行計畫的擬定與政策制定。

此外，智管網的資料來源必須是多元的，除了由前述的 SCADA 系統擷取而來的 Real time Signals 之外，也具備介接其他資料庫的功能，例如 Call Center 系統、GIS、資產系統、MIS、帳務系統等水公司重要資料庫。介接後須先進行資料爬梳、送入演算引擎，之後按照所定義之事件，逐條呈現，再設定事件上下限警報門檻，由雲端發送訊息通知相關人員。其中的演算引擎為關鍵核心，包含即時管網水理分析 (Hydraulic Analysis)、大數據模式分析、遺傳演算試誤法、類神經演算...等，也是各家系統廠商的關鍵技術所在。

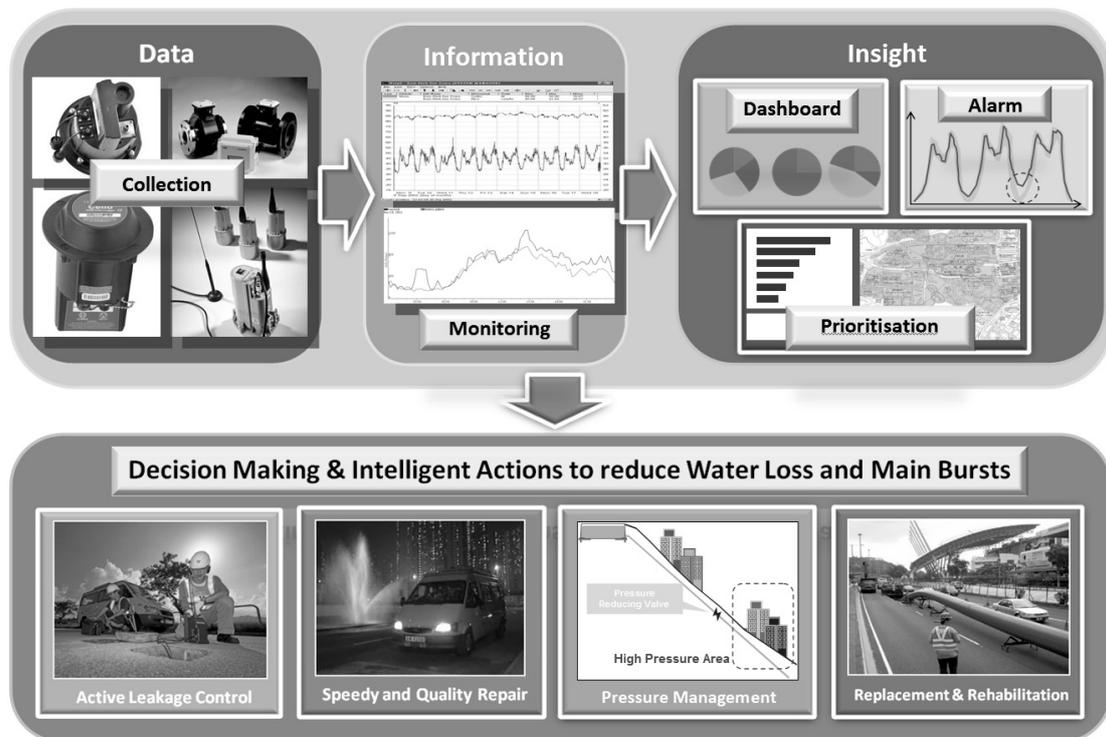


圖 36 香港設置「智管網」之主要目的

香港水務署提出智管網系統之建置規劃，需要包含前述諸項功能，為求慎重，特別邀請三家跨國系統廠商進行測試比較，包含了 LATIS、NetBASE、TaKaDu，詳圖 38 所示，皆為國際間自來水界常用的智能分析軟體，評價都不錯。經匯入香港既有的 SCADA 訊息、主要資料庫資料，透過觀察

軟體之產出界面訊息、智能推論能力、警報靈敏性、系統穩定性、操作便捷性等，以瞭解何種系統軟體比較適合香港的需求。至 2015 年底這項測試結果應可出爐，屆時香港水務署將從中選擇一套系統應用於智管網的核心運算引擎。

在臺北，雖然 SCADA 已經建置超過 15

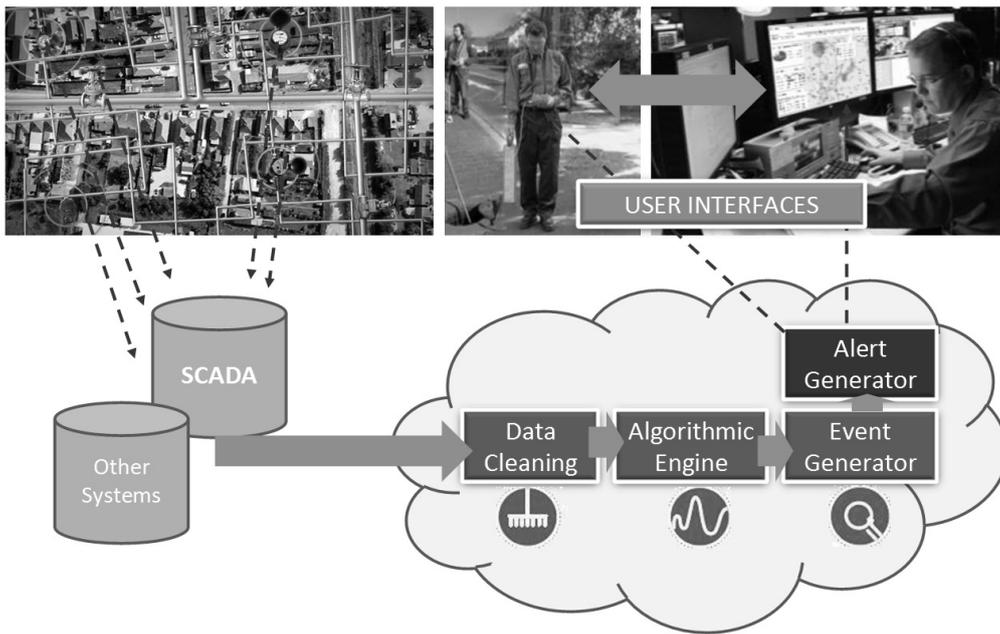


圖 37 香港「智管網」運作基本功能與訊息處理方式



圖 38 香港建置「智管網」的未來候選系統介面



年，但主要的系統調度、異常發覺與排除，都是仰賴具有經驗的資深操作員，系統軟體的主要功能僅是監看管網訊息，並提供遠端操控能力。但對於龐雜的管網系統，如不經過深層的數據挖掘，很難釐清最適操作模式為何，更不易徹底均化系統水壓、減少泵站耗能、提升能源效率。雖然近年來，已陸續有同仁開始對過去所累積的海量數據庫進行挖掘爬梳，但仍只是初探，不易優化整體系統。因此，香港智管網推動歷程值得臺北借鑑。

四、上海浦東

(一)上海浦東威立雅基本數據

上海市分割數個區域由不同的自來水公司供水，位於黃浦江以東的「浦東」地區則由「上海浦東威立雅」自來水公司負責供

水。該公司由法商 VEOLIA 持股 49%，故名浦東威立雅。服務區域面積 672 平方公里，轄區內設有 5 個淨水場、10 個主要泵站，詳圖 39，最大日供水量為 160 萬 CMD。管網之輸配水管長度 4823 公里，服務人口 420 萬人，於轄區西側靠近黃浦江一帶人口較為稠密，東半側廣大區域則屬於上海的郊區，人口較少，轄區內用戶水表合計 128 萬餘只。上海浦東威立雅設有 5 個辦事處，員工總人數合計 999 人。

浦東威立雅因為與外資合作，較早引進採用 Web-GIS 供水管理集成平台，連接各業務資料庫，達成各部門數據間的共享。在生產方面，即時監控淨水場站各項製程數據。於運營方面，建立管網 SCADA，以在線監控管網壓力、流量、水質等狀態。客服方面，

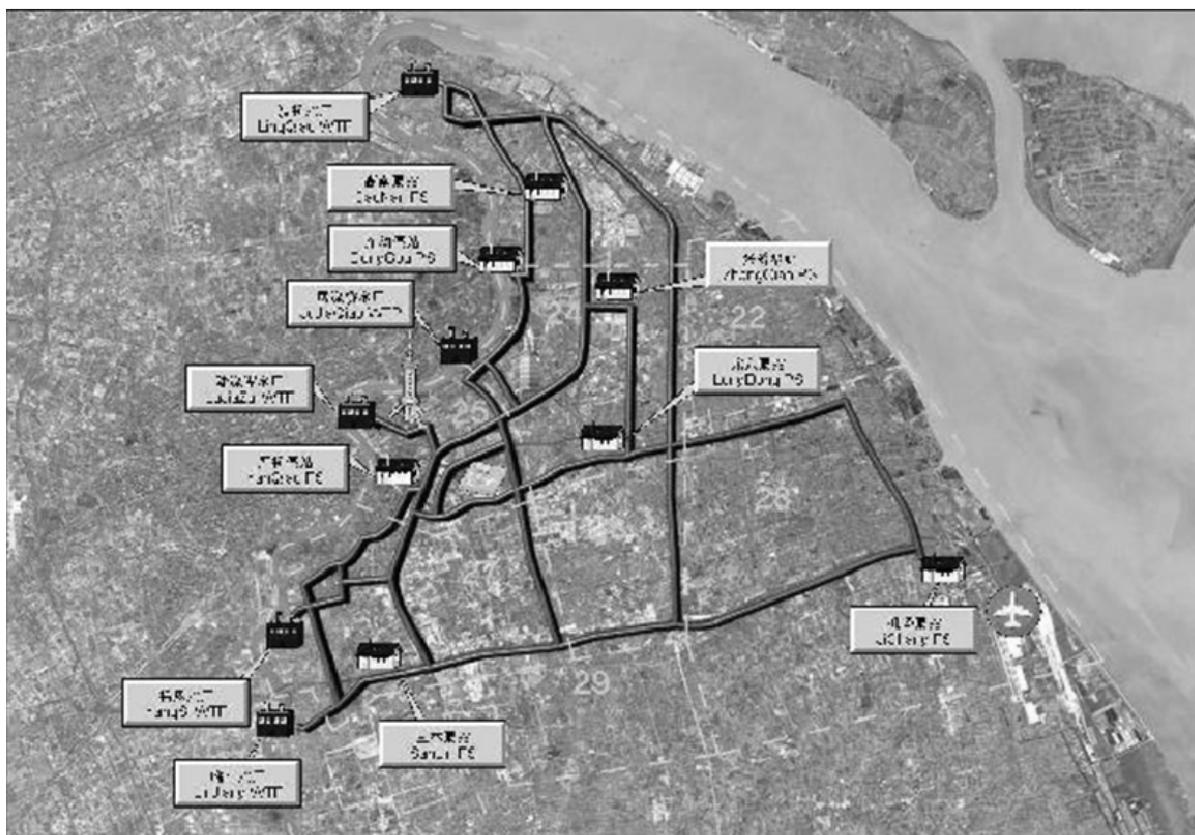


圖 39 上海浦東威立雅供水轄區與主要設置幹管

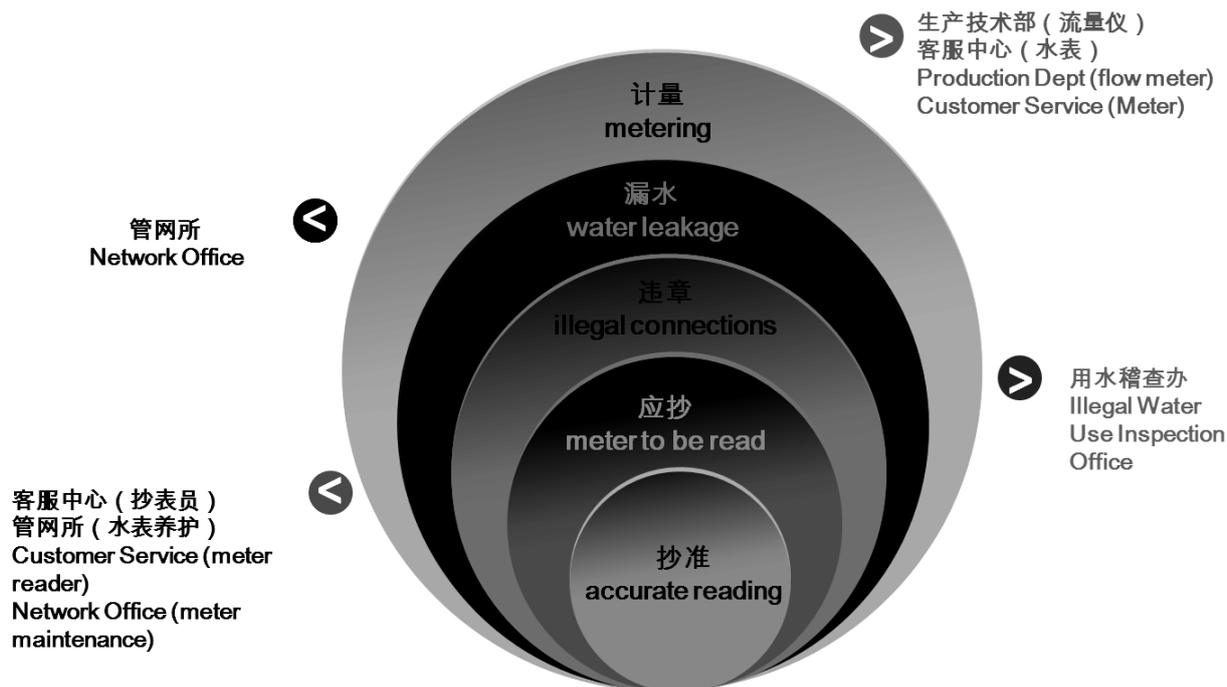


圖 40 上海浦東威立雅產銷差控制策略

則以 PDA 抄表管理、優化抄表路線、並建立用水模式分析數據庫。在中國一線城市中，屬於較為先進的自來水公司。

(二)產銷差控制策略

然而浦東的 NRW% (產銷差率) 卻相當高，以 2014 年的數據顯示，浦東威立雅全年配水量為 5.411 億噸，不含人工額外計帳的售水量僅有 3.547 億噸，代表 NRW 為 1.864 億噸，NRW% 高達 34.45%，即便將人工額外計帳的水量 (目前未知) 也納入售水量，調整後的 NRW% 可能也不低於 30%，顯然管網滲漏與帳面損失十分嚴重。因此，由浦東威立雅提出產銷差的控制策略，詳圖 40，如同洋蔥層層剝皮後，剩下的內核心即為實際抄見售水量。威立雅認為導致水量損失的成份，除了管網漏水之外，還有違章竊水、應抄未得 (水表誤差、計帳錯誤) 這兩個重要項目。三個成份必須以不同的措施加以控制才能減少浦東的產銷差。

威立雅首先將整個供水轄區劃設為 34 個 DMA，也進行次分區的分割，共安裝了 364 個電磁流量計，各自進行計量後，得出一部分 DMA 的 NRW%，詳圖 41 所示，帶有百分比的紫色數字就是 NRW%，紅色整數為 DMA 編號，藍色小數點為次分區編號，雖然還沒完全計量完畢，但由 10 個已經計量的次分區，已經可發現嚴重漏水的區域，集中在 27 號小區內，其中甚至有次分區的 NRW 高達 53.27%。

威立雅主要的漏損控制為進行主動漏水檢測與修復，並將探漏作業委外辦理，根據 2012 年的暗漏檢測成果，詳圖 42 所示，總共測出有效漏水點 808 處，高達 52% 屬於口徑小於 50mm 的用戶給水管破漏，隨口徑加大，探漏點逐漸遞減，金屬材質腐蝕案件比例甚高，佔全部探漏點的 68%。與臺北小口徑給水管漏水比重高達 95%、塑膠管漏水佔 82%，雙方管線漏水樣態稍微有些不同。

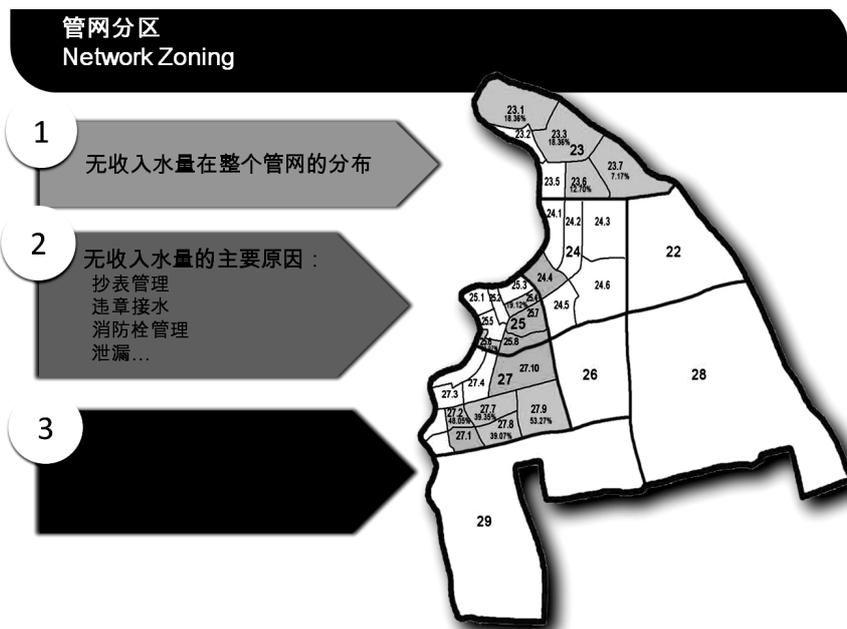


圖 41 上海浦東威立雅管網分區與無收入水量改善措施

口径	≤50	50 < Φ ≤ 100	150	200	300	500	600	800	1400
数量	422	121	137	43	57	21	2	4	1
比例	52%	15%	17%	5.4%	7.1%	2.6%	0.2%	0.6%	0.1%

2012年外包探漏公司找到的有效漏水点在管材上的分布比例 (含明漏复听和暗漏)

管道类型	探漏点数据	比例
金属管	544	68%
其他管材	259	32%

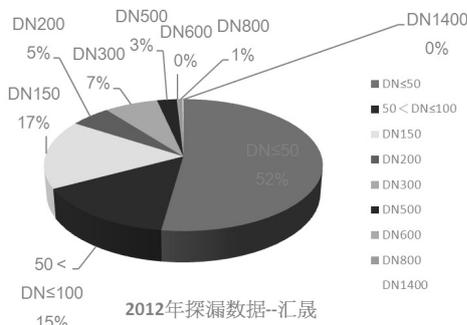


圖 42 上海浦東威立雅 2012 年修漏統計數據

由於浦東地區為長江與黃浦江的沖積平原，地下沉積層分布具有砂層與黏土層交互，因沉積年代不同，其各地區分層與透水狀況皆有所差異，因此某些區域管線漏水往下滲透，形成暗漏，不會湧出成為明漏，而某些區域下方可能具有黏土不透水層，而導致明漏比例較高。威立雅利用 GIS 將 2014 年明暗漏的修理位置進行佈設分析，以兩個比較極端的區域為例，詳圖 43 所示，紅色

點為明漏，綠色為暗漏，可發現陸家嘴區域的暗漏點比例較高，而曹路地區則暗漏相對較少。因此威立雅依照這些滲漏特點，在暗漏比例較高的地區安排較多的檢測巡迴，期能發揮檢測最大功效，及早找出暗漏，減少漏損。威立雅因為當地的滲透特性，十分重視暗漏檢測，因此公司內部對於檢測團隊的期許：不但要儘可能提早檢出暗漏，也要檢出更多暗漏，更要檢出大型暗漏，對於已經

檢出的暗漏必須更快修復。

此外威立雅在探漏與修漏的技術上，更進行一系列的優化與改進，針對不同的現場條件與管材，利用多種技術輔助探漏，除了傳統聽音探漏，對於壓力偏低疑似漏水區域甚至採用氫氣灌入法，藉由偵測氣體洩漏儀器，於氣體高濃度區域密集聽音，以提升檢測命中率。例如某處配水管疑似大量漏水，導致區域降壓，但因土壤滲透性佳，漏水直接滲入旁邊下水道，並未發生路面明漏事件，經氣體輔助探漏，迅速找到兩處鑄鐵管漏水並加以修復，詳圖 44，據威立雅估計，

者兩處修復後每小時可以減漏 109 噸。

對於修漏效率的提升，威立雅改進過去工班按日派遣修復的程序，配發每組工班一套 PDA 系統，以即時數據通知前往修復，提升管理調度效率，縮短通知至抵達修復的時間，並制定相應的流程規範，導入探漏合約，以引導外包修漏廠商進行更有效率的修漏作業。

為了降低浦東的平均修復時間，威立雅更滾動檢討每年修漏合約的啟動時程，避免修漏空窗期的發生。以 2013 年為例，當年暗漏修復自四月才開始作業，雖然到了年底全

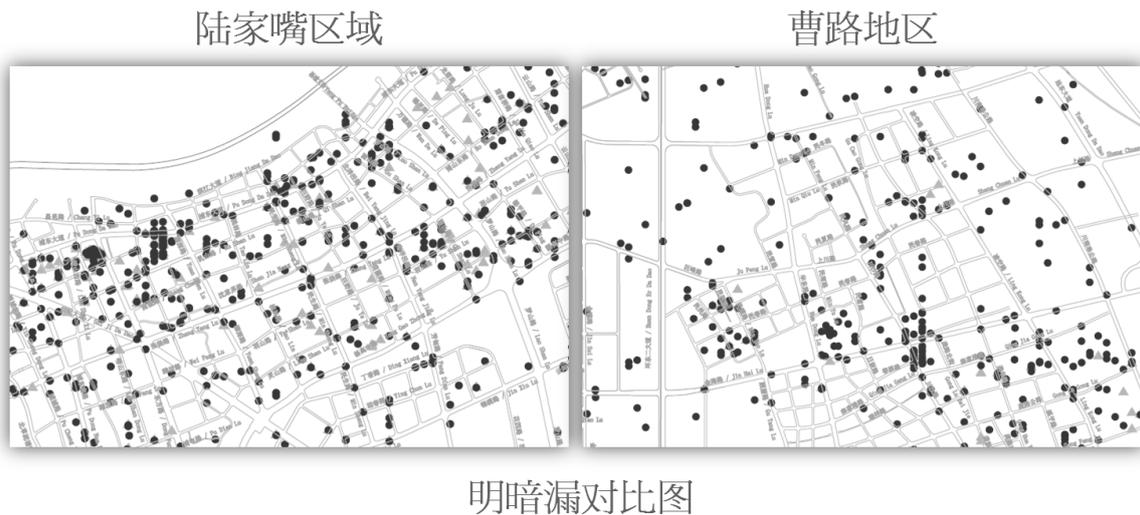


圖 43 上海浦東威立雅明暗漏分布密度比對



圖 44 上海浦東威立雅暗漏修復照片

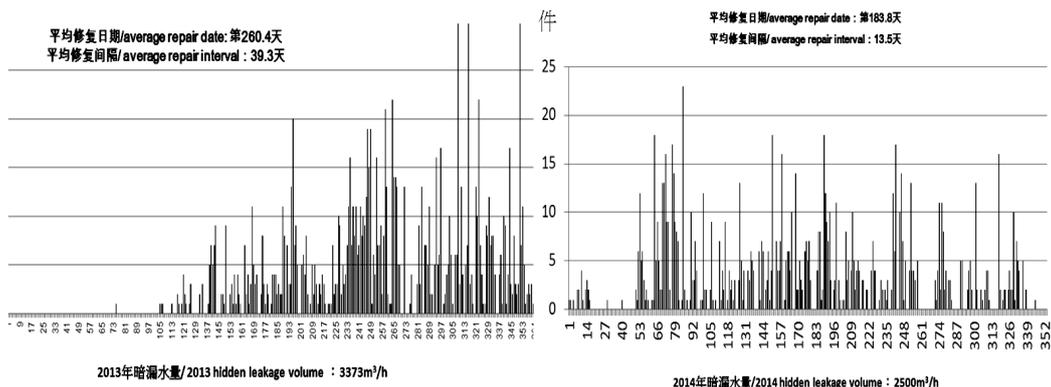


圖 45 上海浦東威立雅於 2014 年（右圖）提升修漏效率

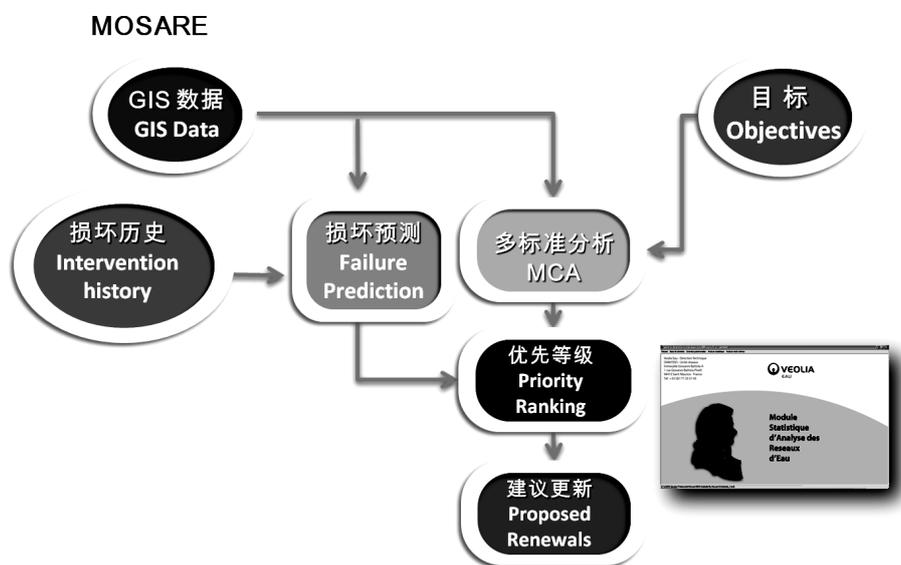


圖 46 上海浦東威立雅資產分析軟體 MOSARE 模式

部修妥，但漏水是 24 小時不停歇的，這 4 個月的時間將額外損失更多水量，因此。到了 2014 年起，威立雅便由年初啟動漏水修理作業，填平修漏空窗期，以減少水量損失。經兩年的比較分析，詳圖 45，2013 年因有修漏空窗期，漏水由發現至修復的時間，即平均修復日期為 264.4 天，而平均修復間隔為 39.3 天。2014 年則因填平空窗期，平均修復日期減少到 183.8 天，平均修復間隔亦壓縮至 13.5 天。這樣的效率提升直接反映在暗漏水量上，2013 年平均暗漏水量為每小時 3373 噸，2014 年則減少至 2500 噸。兩者差距 873

噸，換算每年可減少總漏水量 764.7 萬噸。僅調整廠商合約啟動日期，就可獲取良好的成效，為修漏效率優化的聰明作法。

(三)資產管理與模式運用

除了重視漏水檢修之外，威立雅也有一套管網資產管理分析的方式，找出不良老化的管線，進行汰換以降低漏水。主要利用 GIS 的管網基本資訊、歷年維修記錄、現地採樣等資料，浦東從 2010 年開始使用法國 VEOLIA 所開發的資產管理軟體 MOSARE，首先應用於該年於上海黃浦江畔舉辦的世界博覽會，用於會場內供水管網風險評估，

之後每年對整個浦東的管網進行風險評估，不僅計算出每根管線的漏損概率，而且能夠對管道的未來風險進行評估。整個分析架構與流程詳圖 46 所示，MOSARE 經過規劃者定義管線的合理年限、容許的漏水次數等門檻目標值，就由計算引擎進行多標準分析，結合漏損概率後，便可列出優先汰換的等級，管網汰換規劃人員便可從中合理選擇應當改造的管段，MOSARE 分析工具使用上十分簡便，功能強大，其計算引擎優越，已經於多個國家驗證其效果。更可依照當地水公司財務狀況、管材優略程度，酌以修正汰換門檻。

以 MOSARE 分析 2012 年浦東管網體質的結果為例，可清晰瞭解管線損壞率及關鍵轄區的分佈，分析顯示 2012 年浦東管網最高損壞率的前 0.1%，總長約 4 公里。詳圖 47 左小圖所示，以紅色線段顯示，代表管線體質最糟，有必要優先汰換，威立雅從而可以做出當年或者隔年相應的措施，例如提前編列預算，進行工程設計。在 2012 年由軟體分析後所提出 14 條優先更新管線的建議中，威立雅對其中 7 條進行了改造，開挖後發現漏水的確很嚴重，驗證了模式預測與實際情

況十分吻合，改造汰換後除了有效減少管網漏失、降低產銷差之外，更因此避免了 3 次爆管事故。隨後於 2013 年至 2014 年，更是以 MOSARE 的分析結果作為威立雅管網年度改造計畫之重要參考，共採納了 10 項分析建議。

嚴格來說，威立雅所使用的 MOSARE、香港的風險矩陣法、澳門的管汰演算模式、臺北的管網漏水潛能分析，都屬於間接風險評估法，評估結果甚難絕對正確，但由於隱蔽於地下的管網狀況不易探知，因此自來水公司在選擇適當的管線進行汰換的當下，仍需輔以此類的分析工具，方能有所依循。威立雅為了延長管網改造後的使用壽命，使用與東京都水道局類似的方法，進行整個供水管網轄區內的管道土壤取樣檢測，分析樣本的腐蝕性、酸鹼度、電阻率，並據此繪製土壤特性地圖。詳圖 48 所示，本主題圖為土壤腐蝕性，顏色愈紅的區域代表土壤腐蝕性愈高，新設管線應採外層耐蝕材料或防蝕保護。各類主題圖可用於推斷管道使用壽命、推估管道未來可能狀態，並作為管線外防蝕措施的合理建議，以減少爾後管線維護成本。隨著數據庫不斷累積新的採樣結果，土

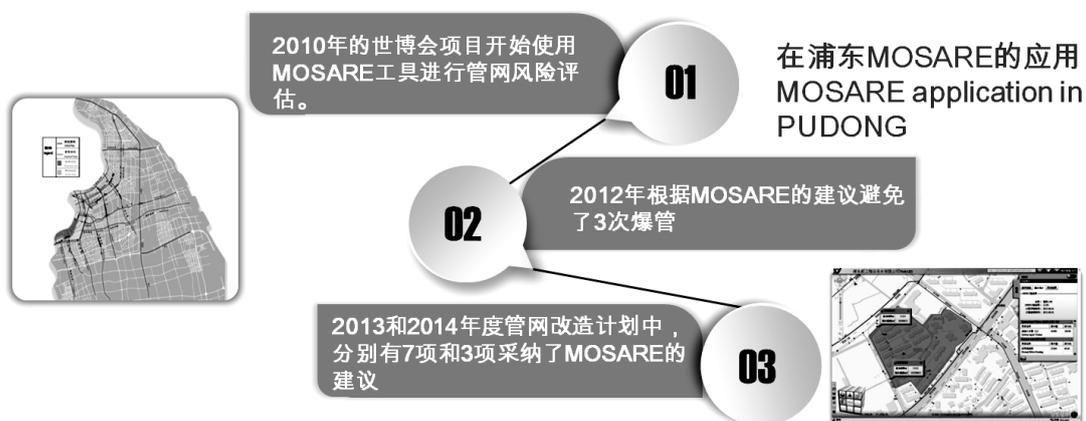


圖 47 上海浦東威立雅 MOSARE 模式之應用案例

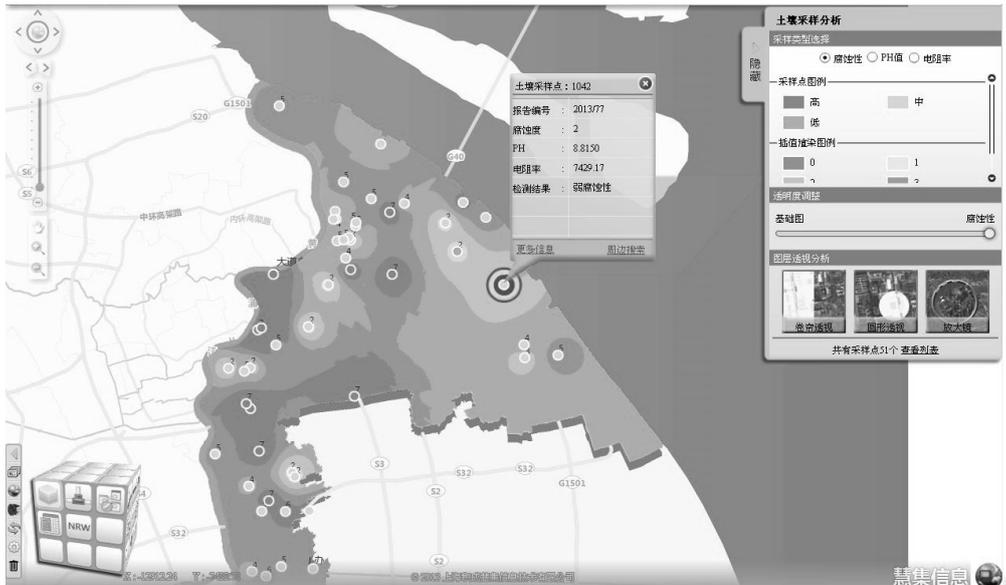


圖 48 上海浦東威立雅管道土壤取樣檢測數據庫

壤特性地圖愈來愈有參考價值。

雖然威立雅於檢修漏的積極作為，找出許多暗漏，但由轄區極高的 NRW 來看，管網復漏肯定十分嚴重，即便每年持續修漏，隔年肯定又發生暗漏，甚難僅透過修漏手段降低 NRW。因此，唯有採取較大規模的管網改造，將漏水嚴重的管線予以更換，才能逐漸降低產銷差。尤其是幾個超高漏水率的小區，更應全面式的更換管線為宜。

參考文獻

1.6th IWA-ASPIRE北京，Waterloss Control forum 會議資料，International Water Association，2015 年。

作者簡介

黃欽稜先生

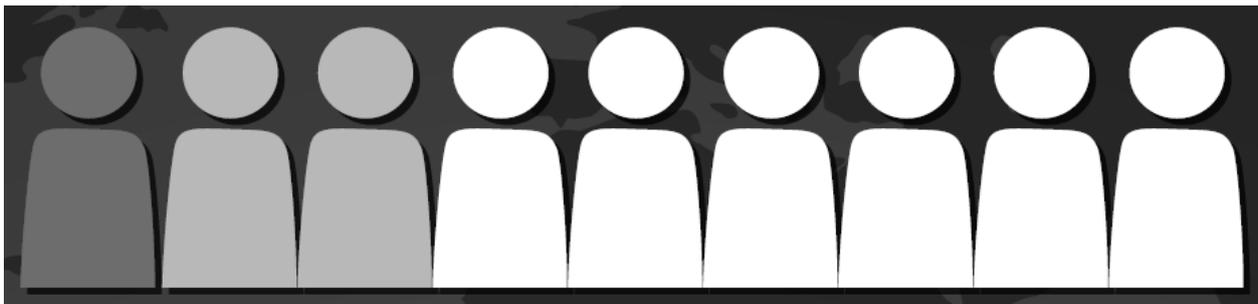
現職：臺北自來水事業處供水科 二級工程師

專長：管網改善、漏水控制、數值分析

「你知道嗎？」

水質 WATER QUALITY

本刊編輯小組編譯



One in nine people worldwide doesn't have access to improved sources of drinking water and one in three lacks improved sanitation.

全球有 1/9 人口無法取得獲改善的飲用水源，而 1/3 人口缺乏獲改善的衛生設施。

The major sources of water pollution are from human settlements and industrial and agricultural activities.

主要的水污染來源是從家戶、工業和農業等活動所排放。

80% of sewage in developing countries is discharged untreated directly into water bodies.

發展中國家的廢污水有 80% 未經處理直接排入水體。

Industry dumps an estimated 300-400 MT of polluted waste in waters every year.

每年估計有 300-400 噸的工業污水及廢料排入水體。

Nitrate from agriculture is the most common chemical contaminant in the world's groundwater aquifers.

全球地下水含水層的最常見的化學污染物是農業所使用的硝酸鹽。

APPROXIMATELY 3.5 MILLION PEOPLE DIE EACH YEAR DUE TO INADEQUATE WATER SUPPLY, SANITATION AND HYGIENE.

每年大約有 3.5 萬人死於供水水質及環境衛生條件不佳。

THE BIODIVERSITY OF FRESHWATER ECOSYSTEMS HAS BEEN DEGRADED MORE THAN ANY OTHER ECOSYSTEM.

淡水生態系統的生物多樣性，比起其他生態系統都喪失得多。