Water Works Association
of the Republic of
China (Taiwan)

自来水

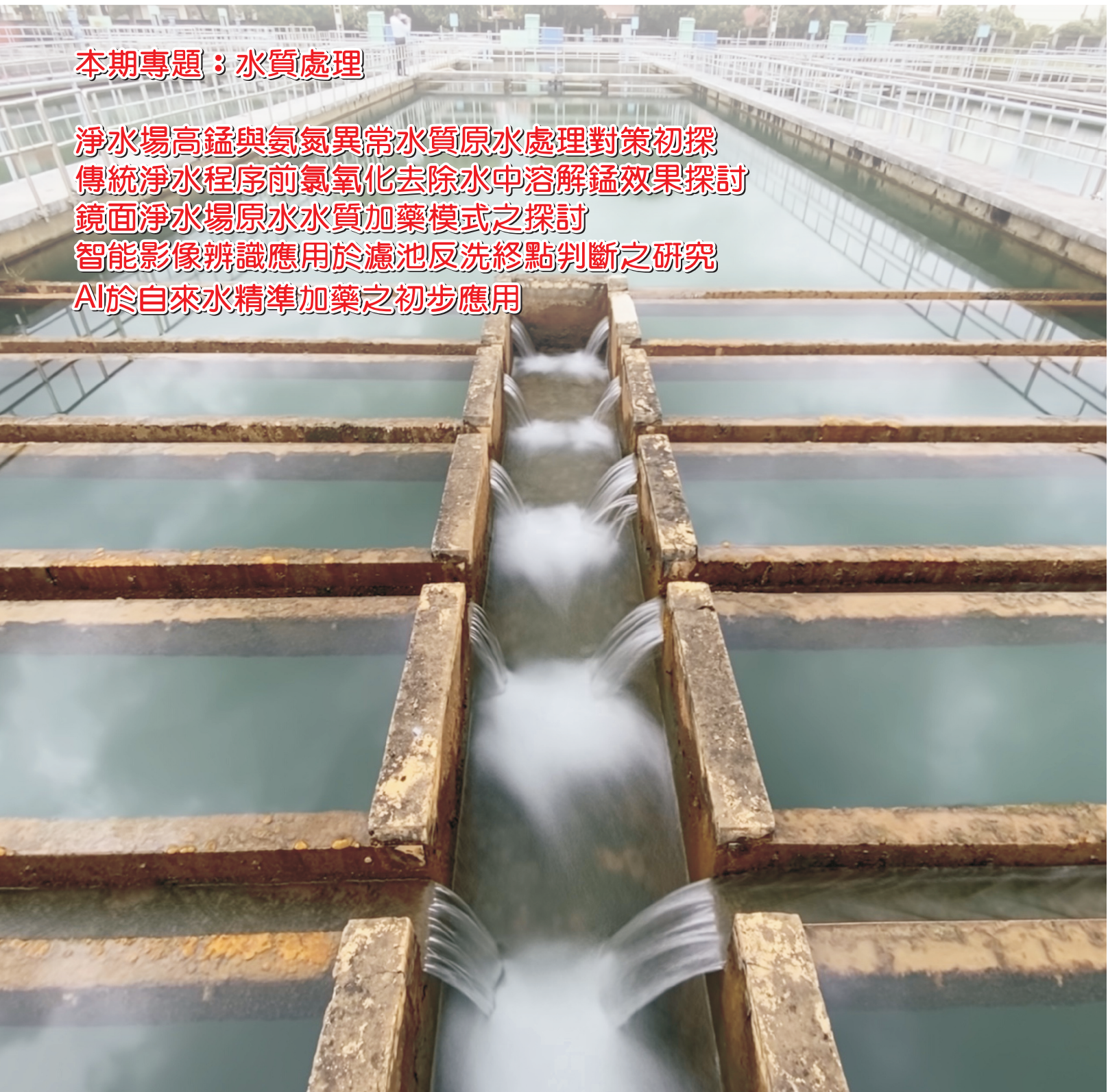
163

WATER SUPPLY QUARTERLY

Volume 41 NO.3 AUG 2022

中華民國自來水協會會刊

第41卷 第3期
2022年8月



本期專題：水質處理

淨水場高錳與氨氮異常水質原水處理對策初探
傳統淨水程序前氯氧化去除水中溶解錳效果探討
鏡面淨水場原水水質加藥模式之探討
智能影像辨識應用於濾池反洗終點判斷之研究
AI於自來水精準加藥之初步應用

自來水會刊第 41 卷第 3 期(163)目錄

實務研究

DIP粉體塗裝之雙酚A溶出試驗及結果探討……宋奕穎…… 1

結合遺傳演算法於水理模型校正之應用－以中和永和供水分區為例……

……朱撼湘、黃欽稜、黃裕泰、鍾育霖、許家成、鐘志忠……8

本期專題　水質處理

淨水場高錳與氨氮異常水質原水處理對策初探……

……陳毓霖、彭嘉貞、林秀雄、蔡利局、甘其銓、王睿騰……17

傳統淨水程序前氯氧化去除水中溶解錳效果探討……

……薛志宏、張美惠、張美鳳、陳宏奕、廖冠仲……25

鏡面淨水場原水水質加藥模式之探討……陳伊玟、吳政儒、鄭堡文、楊昭端、黃文惠……35

智能影像辨識應用於濾池反洗終點判斷之研究……吳志超、楊惠玲、賴思樺、陳劭瑜……43

AI於自來水精準加藥之初步應用 ……謝文彬、曾為恭、黃庭水、李丁來…… 50

一般論述

從E化導入探討精實管理與企業社會責任…鄭錦澤、陳永松、張育嘉、周麗娟、荀蕙苓……58

他山之石

日本推動低碳供水系統之探討……唐俊成、葉素柔、蔡文魁、李丁來……68

韓國首爾水務局自來水研習會簡介……林美良、顏銘宏……74

協會與你

歡迎投稿 111.112年「每期專題」…… 24

中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法…… 57

封面照片：經濟部水利署南區水資源局李明軒先生提供

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、每期專題、專家講座、一般論述、業務報導、他山之石、法規櫥窗、研究快訊、學術活動、出版快訊、感性園地、自來水工作現場、自來水廠(所)的一天、會員動態、協會與您等文稿。

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），前述二類文稿請檢附摘要。「每期專題」由本刊針對特定主題，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。「自來水廠(所)的一天」為提供自來水基層廠(所)的工作現況，增進社會各界對自來水服務層面的認識。「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、惠稿應包含 300 字以內摘要及關鍵字，每篇以不超過十頁為宜，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。投稿一經接受刊登，版權即歸本協會所有。

七、惠稿(含圖表)請用電子檔寄至 thomas7735tw@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，封面照片及文稿中之「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、本會刊於 110 年開始發行電子會刊，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、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列為技師執業執照換發辦法第四條第一項第六款之「國內外專業期刊」，適用科別為「水利工程科」、「環境工程科」、「土木工程料」。

自來水會刊雜誌

發 行 單 位：中華民國自來水協會
發　行　人：郭俊銘
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

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

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
葉陳蓌

委 員
陳明州、李嘉榮、康世芳、王傳政、武經文、駱尚廉、范煥英、洪世政、李丁來

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：曾彥中
電　　話：(04)22244191 轉 376

行政助理：黃香蘭

協力廠商：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)22386769

DIP 粉體塗裝之雙酚 A 溶出試驗及結果探討

文/宋奕穎

摘要

北水處使用 DIP 水泥襯裏已逾三十餘年，占配水管網中高達 93%，因北水處供應之自來水具腐蝕性(LSI 為負值)，容易造成水泥襯裏之石灰(氧化鈣)等鹼性物質伴隨碳酸鈣溶出至管內自來水，若於管網通水不良區域，容易造成 pH 值升高現象。

參考先進國家做法， 將 DIP 管內水泥襯裏再塗裝密封塗層或不使用水泥襯裏直接於 DIP 鑄鐵管進行粉體塗裝，除可避免鑄鐵管鏽蝕外，亦可避免水泥襯裏鹼性物質溶出，影響管網水質穩定性。一般而言，密封塗層及粉體塗裝物質多為環氧樹脂(epoxy)或聚氨酯類(PU)，其中又以環氧樹脂為主流。日本目前口徑 1000mm 以下直管，內襯採用環氧樹脂粉體塗裝；口徑 1000mm 以上直管，內襯則採用加密封塗層。

然環氧樹脂最讓國人擔心為，若長期與飲用水接觸是否會有環境荷爾蒙雙酚 A 溶出之疑慮，故本研究設置 DIP 管徑 200mm 直管 3 只，分別採用不同內襯形式，環氧樹脂粉體塗裝、加密封塗層及水泥襯裏，並採用美國國家衛生基金會 NSF 61 試驗，檢視各試體是否有雙酚 A 溶出之情形。

關鍵字：雙酚 A、粉體塗裝

一、前言

環氧樹脂的主要原料為雙酚 A（bisphenol A）或表氯醇（或稱環氧氯丙烷，epichlorohydrin），硬化劑可能為胺基（芳香族胺或脂肪族胺）或氫氧基化合物（酸酐），溶劑可能為酮類(如丁酮、甲基異丁酮等)。依據文獻指出，環氧樹脂與水長期接觸時，可能劣化溶出雙酚 A 及其衍生物，包括雙酚 A 二環氧甘油醚(bisphenol A diglycidyl ether)、雙酚 A 二縮水甘油醚(BADGE，bisphenol A diglycideryl ether)、雙酚 A 聚丙氧烯醚(bisphenol A-propoxylate)、雙酚 F(bisphenol F)、雙酚 F 二環氧甘油醚(bisphenol F diglycidyl ether)、雙酚 F 二縮水甘油醚(bisphenol F diglycideryl ether)、雙酚 A 聚丙氧烯醚(bisphenol F propoxylate)等物質，其中又以雙酚 A 最為主要溶出物質，含量也相對較高。雙酚 A 目前為國際間所關切之環境賀爾蒙，行政院環境保護署亦將其列為飲用水水質標準新興污染物管制項目之候選清單。

雙酚 A 是一種外因性內分泌干擾化學物質（ Envirnmental En-docrine Disrupting Chemicals），或稱為環境荷爾蒙 Environmental Hormones），其成分即使少量也可能導致健康危害。若長期暴露可能導致孩童青春期早熟、肥胖、糖尿病、過動症、記憶受損，也可能增加乳癌、睪丸癌、前列腺癌的發生率，這些健康上的影響，並非短時間就可看出，有時要到第二代甚至第三代才會出現，正因為它具有「延宕長期效應」，所以也被視為跨世代之「毒」。

臺北自來水事業處(以下簡稱北水處)為推動直飲政策及提供提供更優質之自來

水品質予用戶，經多年的研究與努力之下已開始計畫採用 DIP 環氧樹脂粉體塗裝管(簡稱 DIP 粉體管)作為未來主要採用之配水管，為評估環氧樹脂塗裝是否有溶出雙酚 A 的疑慮，爰進行本溶出試驗，以評估其風險。

二、雙酚A對健康之影響

(一)雙酚 A 簡介

雙酚 A，1891 年間由俄羅斯化學家 Aleksandr Dianin 首次合成出來。直至 1950 年，拜耳（Bayer）及奇異（GE）公司的化學家才發現在生產聚碳酸酯（PC）塑膠時，雙酚 A 可用來強化塑膠的防碎性與透明度，並是製造環氧樹脂的主原料之一。

雙酚 A（Bisphenol A，縮寫為 BPA），學名為 2,2-雙(4-羥基苯基)丙烷，簡稱雙酚基丙烷，丙二酚，是一種化工原料(圖 1)。由於雙酚 A 的結構類似雌性激素，被視為一種荷爾蒙干擾物或內分泌干擾物，故雙酚 A 被視為環境荷爾蒙的一種，會影響生殖系統。外觀在常溫下是白色固體，形狀有粉狀、粒狀、結晶狀和片狀等，熔點在 158 至 159℃。

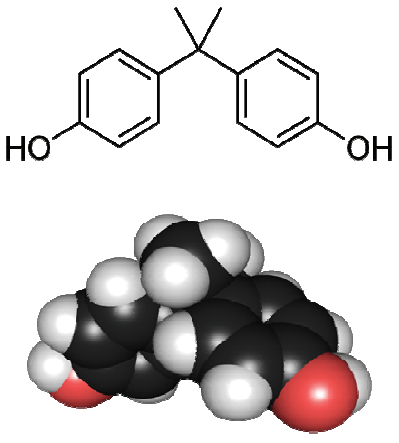


圖 1　雙酚 A 的結構式與立體結構圖

(二)雙酚 A 主要用途

雙酚 A 是一種高度量產的化學物質，應用範圍相當廣泛與普遍，用來製造聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)塑料、環氧樹脂(epoxy resins)與其他聚合性材料，也用於生產某些紙製品。PC 用於生產食品接觸材料而存在於盛裝食品與飲料的容器中，例如餐具(盤子與杯子)、微波器皿、廚具、飲水機，也可用來製造玩具與奶嘴。環氧樹脂則用於食物罐及飲料罐的內襯保護膠條，以及住宅飲用水儲存桶的塗層中；環氧樹脂塗料也用於製造地板、油漆、電子設備與電路板。

雙酚 A 大量應用於非食品相關的產品，包括環氧樹脂塗料、醫療器械、牙科密封劑、表面塗料、印刷用油墨和阻燃劑， 另一項更為普遍與廣泛的應用是製造列印收銀機收據的感熱紙，也作為與環氧基的地板，粘合劑，塗料，電子設備和印刷電路板的磨料。

上述由雙酚 A 製造和生產的環氧樹脂、聚碳酸酯、其它樹脂和橡膠化學品以及阻燃劑的中間產物，可能會通過各種廢棄物釋放到環境中。

(三)雙酚 A 對健康的影響

依據歐洲食品安全局(EFSA)的風險評估資料指出，一般人主要透過飲食、化妝品、感熱紙與塵埃四種途徑可能會接觸到雙酚 A。高劑量的雙酚 A 對動物的生殖系統有不良影響，在人體內則會干擾性荷爾蒙，造成其功能混亂，對乳腺、生殖、代謝、神經行為及免疫系統等仍存在一定健康影響。另有許多研究指出雙酚 A 可能影響腦部發展，包括對神經發展與基因表現及神經內分

泌等影響。

根據動物實驗顯示，雙酚 A 可能影響造血系統，動物親代在妊娠期間暴露雙酚 A，可能提高子代肝癌與乳腺癌的發生率。在極低的濃度之下(10 ppb 以下)會干擾小老鼠胎兒的生長，另外在細胞研究亦發現在濃度 1 pico-mole 及 1 nano-mole 極低濃度下，會造成細胞功能改變。

根據調查顯示，國人暴露之情況，成年人每日經由食物攝取到雙酚 A 平均含量為 25.88 ± 22.1 μg，其中每日由飲水攝取雙酚 A 之攝取量約為 5.63 μg/day；另塑膠瓶裝水之平均濃度 7.7 μg /L(檢出率 100%)，均較自來水之平均濃度 2.89 μg /L(檢出率 47%)，高出許多。

(四)國內外法規對雙酚 A 之規定

歐盟共同體食物科學委員會(European Commission cientific Committeeon Food) 規定，以聚合物(polymer)接觸食物，從聚合物釋放出的化學物質如雙酚 A 不得超過 3 mg/kg，每天可接受的攝入量(Tolerable Daily Intakes) 為每公斤體中每天 50 μg (50 μg/kg/day)。

我國「食品器具容器包裝衛生標準」第五條規定，嬰幼兒奶瓶不得使用含雙酚 A 之塑膠材質；PC 材質之食品器具、容器、包裝檢驗應符合第六條的規定，雙酚 A(嬰幼兒奶瓶除外)：0.6 ppm 以下。

行政院環境保護署將雙酚 A 為公告列管的第四類毒性化學物質(有污染環境或危害人體健康之虞者)，列管標號為 166-01 號，其管制濃度 (control concentration standard)為 30 % (w/w) 。

目前雙酚 A 的每日容許攝取量(Tolerable Daily Intake；TDI)為 50 μg/kg/day；歐洲食品安全局的專家在 2015 年 1 月 21 日公布考慮降低雙酚 A 的安全限量，將 TDI 降為 4 μg/kg/day (2015 年 3 月 11 日第 1.0 版)，專家並認為新的暴露評估結果顯示日常生活中暴露雙酚 A 的量，不致使人類有健康上的風險疑慮，包括未出生的小孩、嬰兒與青少年。

在飲用水方面，目前我國飲用水水質標準並未對雙酚 A 加以規範，國際現有飲用水目標值為 0.01~0.1mg/L (中國、日本)，健康參考水準則為 0.015 mg/L。

三、研究方法

(一)試驗裝置

本試驗計畫設置 DIP 管徑 200mm 直管 3 支，每支直管與套筒連接後，長均為 60cm，兩端分別以管塞密封，分別設置進水管及水龍頭，以便充填萃取試液及採集水樣(詳如圖 2)，3 支直管管材之內襯形式分別為：

1.編號 1：DIP 鑄鐵管搭配環氧樹脂粉體塗裝
2.編號 2：DIP 水泥襯裡+環氧樹脂密封塗層
3.編號 3：DIP 水泥襯裡管(對照組)

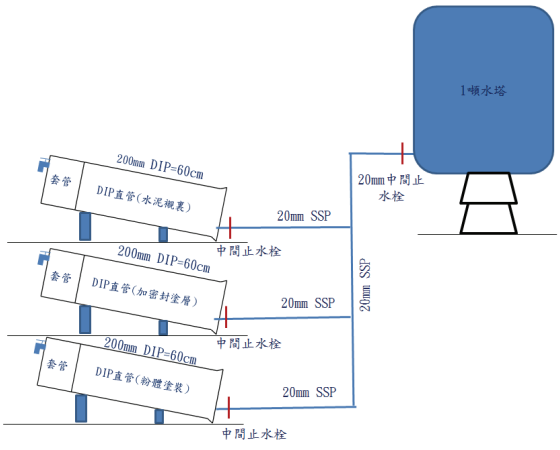


圖 2　溶出試驗之試驗規劃圖

圖 3　現場溶出試驗配置

另設置 1 噸不鏽鋼試液儲存筒 1 個，依需求配置進出水管，及各管材取樣水龍頭，如圖 2、3 所示，試驗前必須先以自來水充分清洗 DIP 管，以利進行試驗。

(二)萃取試液調配

因目標物為有機物，故製備 pH=8(含 100 ppm 硬度及 0 ppm 餘氯)之萃取試液，其製備方法如下：

1.取 $NaHCO_3$ 試藥 16.8 公克，配置成 2 公升溶液。

2.取 $CaCl_2$ 試藥 22.2 公克，配置成 2 公升溶液。

3.將 1、2 兩溶液加入試液儲存筒，加水稀釋至 200 公升，即為 pH 8 萃取試液。

4.上揭萃取試液，於每次試驗時，均重新配製。

(三)試驗步驟

本試驗依 NSF/ANSI 61 管材溶出試驗程序，並採用多點萃取法，分別於 3 支 DIP 直管注滿萃取試液，於室溫放置 24±1 小時，藉由取樣水龍頭以棕色玻璃瓶採集 1 公升萃取水樣，以備進行檢測分析(第 1 天)；再將管中剩餘萃取水充分排除後，重新注滿新配製的萃取試液，於室溫再放置 24±1 小時後，以棕色玻璃瓶採集 1 公升萃取水樣分析(第 2 天)，再將管中剩餘萃取水排除後，重新注滿新配製的萃取試液，如圖 4，重覆前步驟，於第 4、8、10、15 及 19 天取得萃取水樣分析。第 3、7、9、14 及 18 天萃取試液丟棄，程序如表 1 所示。

表 1　DIP 管材溶出試驗程序

日期	暴露時間	流逝時間	取　樣
11/6 (一)		0d*	於 3 支 DIP 管注滿萃取試液
11/7 (二)	24±1h	1d*	採集萃取水樣*3 支，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液；採集試液儲存筒水樣*1 支(空白)
11/8 (三)	24±1h	2d*	採集萃取水樣*3 支，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/9 (四)	24±1h	3d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/10 (五)	24±1h	4d*	採集萃取水樣*3 支(+品管 2 支)，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/13 (一)	72±1h	7d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/14 (二)	24±1h	8d*	採集萃取水樣*3 支後，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/15 (三)	24±1h	9d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/16 (四)	24±1h	10d*	採集萃取水樣*3 支(+品管 2 支)，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/20 (一)	96±1h	14d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/21 (二)	24±1h	15d*	採集萃取水樣*3 支，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液
11/24 (五)	72±1h	18d	排出萃取水丟棄後，重新注滿萃取試液
11/25 (六)	24±1h	19d*	採集萃取水樣*3 支(+品管 2 支)，管內萃取水排除後，重新注滿萃取試液

圖 4　注入萃取試液及取樣

(四)方法空白分析

於試液儲存筒注入萃取試液密封，於室溫放置 24±1 小時，以棕色玻璃瓶採集 1 公升水樣，進行方法空白分析。

(五)檢測分析作業

考量雙酚 A 之相關衍生物，行政院環境保護署許可之環境檢驗測定機構均未受理相關檢項分析，因環氧樹脂溶出物質以雙酚 A 為主(含量較高)，故本試驗採集萃取水樣僅分析雙酚 A 含量。

本試驗採集水樣檢測分析係委託行政院環境保護署許可之環境檢驗測定機構中環科技事業有限公司進行檢測，檢測方法依行政院環境保護署公告標準方法 NIEA W801.52B 水中半揮發性有機化合物檢測方法－氣相層析質譜儀法，主要檢測方式係水樣調整 pH 值後，以分液漏斗液相-液相萃取法或連續液相-液相萃取裝置，經二氯甲烷或其他溶劑連續萃取；或水樣以固相萃取材質吸附待測有機物，經適當溶劑沖提萃取；萃取液經去水、濃縮及定量後，以氣相層析質譜儀分析；萃取液中半揮發性有機化合物的定性分析，可以其滯留時間及數個特性離子的相對強度進行確認，定量分析則可採內標準品定量法，以待測物與內標準品的主要離子相對強度及所建立之檢量線來定量待測物。每批次樣品均進行品管樣品分析，包括空白樣品分析、查核樣品分析、重複樣品分析及添加樣品分析。

(六)數據評估

1.分析濃度正規化(Normalization)

將分析數據以下式進行正規化，正規化濃度=實驗室測出濃度×(SAF×VL)/(SAL×VF(static))

式中：

SAF：表管材實際暴露表面積

SAL：表管材實驗時暴露表面積

VL：表管材實驗室使用萃取水體積

VF(static)：表管材滯留狀況接觸萃取水體積。

2.多點萃取法結果計算

以「正規化濃度」對「流逝時間」作圖，稱為衰退曲線(Decay curve)，取「流逝時間」第 15 天數據為 Day1；以外差求得(或實際實驗)第 105 天數據，為 Day90。

Day1 數據不可超過「短期暴露值(STEL，short-term exposure level」；Day90 滯留(Statics)數據不可超過 MCLs 或「總允許濃度(TACs，Total allowable concentration) 」，NSF/ANSI 61 列出雙酚 A 之健康限值，詳如表 2。

表 2　NSF/ANSI 61 所列雙酚 A 之健康限值

化合物	總允許濃度 TAC or MCL	單一產品允許濃度 SPAC	短期暴露值 STEL
雙酚 A	0.1	0.01	0.2

單位(mg/L)

四、結果與討論

(一)檢測結果

溶出試驗萃取水樣經檢測，結果除編號 2 密封塗層管於流逝時間第 1 天及第 2 天檢出微量雙酚 A 外，其餘均未檢出，詳如表 3 及圖 5。ND 表示低於方法偵測極限。

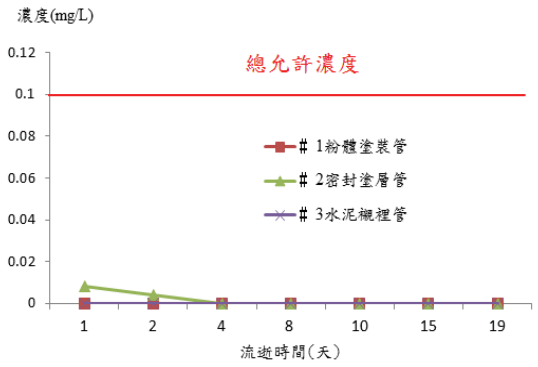


圖 5　三種管材溶出試驗雙酚 A 檢測結果

表 3　三種管材溶出試驗雙酚 A 檢測濃度

流逝時間(天)	粉體塗裝管	密封塗層管	水泥襯裡管
1	ND	0.00809	ND
2	ND	0.00387	ND
4	ND	ND	ND
8	ND	ND	ND
10	ND	ND	ND
15	ND	ND	ND
19	ND	ND	ND

(二)檢測分析品質管制

1.方法偵測極限

雙酚 A 檢測之方法偵測極限 MDL=0.00092 mg/L。

2.空白試驗

將萃取試液置於不鏽鋼試液儲存筒 1 天後，採集萃取水樣進行空白試驗，檢測分析結果雙酚 A 未檢出(ND)，顯示試驗過程及環境背景並無污染。

3.品質管制

雙酚 A 檢測之品質管制作業，包括空白樣品分析、查核樣品分析、重複樣品分析及添加樣品分析結果均符合檢驗品管範圍(表 4 至 6)，顯示檢測過程並無污染。

表 4　雙酚 A 檢測作業之品質管制數據(1)

品管項目	查核樣品分析	
	回收率(%)	品管範圍(%)
分析結果	96.5~114.3	50~130

表 5　雙酚 A 檢測作業之品質管制數據(2)

品管項目	添加樣品分析	
	回收率(%)	品管範圍(%)
分析結果	89.0~106.9	50~130

表 6　雙酚 A 檢測作業之品質管制數據(2)

品管項目	重複樣品分析	
	相對差異百分比(%)	品管範圍(%)
分析結果	2.8~6.0	30.0

(三)試驗結果探討

三種管材溶出試驗萃取水樣經檢測，結果除 DIP 環氧樹脂密封塗層管(編號 2)流逝時間第 1 天及第 2 天檢出微量雙酚 A 外，DIP 環氧樹脂粉體塗裝管(標號 1)及 DIP 水泥襯裡管(編號 3)，雙酚 A 均未檢出。

依 NSF61 管材溶出試驗程序「多點萃取法」數據評估方法，以「正規化濃度」對「流逝時間」作成衰退曲線圖，取「流逝時間」第 15 天數據為 Day1；以外差求得第 105 天數據，為 Day90。 Day1 數據不可超過「短

期暴露值(STEL)」;Day90 滯留(Statics)數據不可超過 MCLs 或「總允許濃度(TAC)」。經評估三種管材雙酚 A 溶出之健康風險如表 7，Day1 值均為 ND(未檢出) ，低於短期暴露值 0.2 mg/L，Day90 值亦均為 ND(未檢出) ，低於最大容許值 0.1 mg/L，顯示三種管材雙酚 A 溶出，尚無健康風險疑慮。

表 7　三種管材雙酚 A 溶出之健康風險評估

管材	Day1	短期暴露值 STEL	Day90	最大容許值 MCL
粉體塗裝管	ND	0.2	ND	0.1
密封塗層管	ND	0.2	ND	0.1
水泥襯裡管	ND	0.2	ND	0.1

單位(mg/L)

五、結論與建議

(一)對於環氧樹脂用於飲用水有雙酚 A 等環境荷爾蒙溶出的憂慮，歐美及日本各國在環氧樹脂塗料使用於飲用水有嚴謹的規範，相對於國外標準中動輒有十種到數拾種檢驗項目，而國內 CNS 13273 G3254 國家標準中僅規定 8 項溶出試驗(酚類檢測為其中一項)，顯得 CNS 檢驗項目較為不足。

(二)本研究採用美國國家衛生基金會 NSF 61 試驗方法，測試 DIP 粉體管是否溶出雙酚 A，試驗結果顯示溶出雙酚 A 零檢出。

(三)依據 NSF61 管材溶出試驗程序，以多點萃取法針對 DIP 環氧樹脂密封塗層管及 DIP 粉體管進行雙酚 A 溶出試驗。Day1 值均符合 NSF61 建議的短期暴露值(STEL)，Day90 值亦均符合最大容許值(MCL)，顯示尚無健康風險疑慮。

(四)環氧樹脂密封塗層管於流逝時間第 1 天及第 2 天檢出微量雙酚 A，惟均低於 NSF61 建議的短期暴露值(STEL)、單一產品允許濃度(SPA)及總允許濃度(TAC or MCL)，若使用環氧樹脂密封塗層之管線，建議於管線鋪設通水前，應充分進行洗管排水，以確保飲用水安全與品質。

(五)依 JDPA T 47 所示，溶劑型塗料(環氧樹脂密封塗層管使用的塗料)若在硬化乾燥不完全的情形下，其臭味與味道會給予水質不良的影響。

參考文獻

1.Water quality deterioration from corrosion of cement - mortar linings.

2.NSF/ANSI Standard 61, 2016.

3.張美惠,硬質PVC管及PVC軟管揮發性及半揮發性有機化合物釋出研究, 中華民國自來水協會自來水會刊106年8月第36卷第3期。

4.Bisphenol A in relining of water pipes, International Chemical Secretariat.

5.Drinking water contaminants from epoxy resin-coated pipes: A field study, Water Research 103(2016) .

6.Investigation of the effect of Water Quality, Lime and Calcite Dosing on Pipelines

7.維基百科

作者簡介

宋奕穎先生

現職：臺北自來水事業處東區營業分處

專長：自來水工程設計、施工及工程預算單價編列。

結合遺傳演算法於水理模型校正之應用—以中和永和供水分區為例

文/朱撼湘、黃欽稜、黃裕泰、鍾育霖、許家成、鐘志忠

摘要

水理分析對於供水調配有極大的助益，北水處目前已有自動化模型轉製作業工具，其轉製模型已具備基礎的可靠度，若要落實於實際運用，就必須要有足夠數量實際量測資料及校正工具，透過實際資料驗證及相關參數的校調，來提高模型的正確性。

但目前除商業軟體外，並無適當工具可使用，唯價格昂貴且無法依使用需求進行調整，例如：管線空間分組，因此本研究結合遺傳演算法(GA)和水理分析函式庫(EPANET.dll)，經由精英選擇、世代交配及定額突變率，來進行粗糙係數(ROUGHNESS)的調整，再經由遺傳演算法不斷迭代，去找出符合實際量測值的最佳化解，其研究結果顯示模型於校正前後 0~10%誤差率可提升 21%，並與 24 小時監控點的資料進行比對，其誤差平均值僅為 7.63%，顯示其校正結果非常良好，可大幅增進模型的可靠度。

關鍵字：粗糙係數、水理分析、模型校正、遺傳演算法

一、前言

自來水系統是都市最重要的維生管線，一旦受損，居民生活及工商業活動會受到極大的影響與損失。面對氣候異常變遷，氣候差異性已日漸趨向極端化。如何降低颱風強降雨及地震對市民供水的威脅，是自來水事業單位刻不容緩的工作(陳明州等，2019)。因此必須依賴水理分析進行現地模擬作業，管網水理分析可提供即時掌握供水分區內特定管段在特定時間之水壓、流量，遭遇突發狀況或需進行供水調配調整作業時，可作為現場或監控中心供水調配重要參考資訊，另準確的水理分析模型亦可提供管網內漏水管段之研判，有助於提升管網維護效率(鍾育霖，2021)。

Stefano (2016)調查 SCADA 數據發現水泵過大（Oversized）的問題嚴重，全速運轉能量轉換效率多低於六成。故採用遺傳演算法（Genetic Algorithms, GA），可很快收斂到極值，得到最優化的水泵狀態。節能效果估算：以 GA 的最優解去運轉，不但管網水壓都在 25m 以上，而且變頻水泵最高可省 18.9%電力、定速泵最高省 30.2%電力，優化後，全年米蘭水公司可省下 684 萬度的電力，約為 126 萬美元。Zheng-Yi Wu(1998)則進一步探討 GA 套用在管網計算上會遇到的課題提出更完整可行的方法，主要探討應用於大範圍管網所會遇到的效率問題，該論文透過改良的 Messy GA 方法先透過提升初始化個體的機制使遺傳演算法能更快達到收斂，再以更有效率的運算架構加強大量個體初始化的效率；另外，在 GA 選擇及交配的的階段，該文獻提出了以一套自行演化及自適應的方法，解決過去基因演算法迭代階段常常因隨機數不佳而無法快速找到最佳子

代使演算法耗時更長之問題，使 GA 在自來水管網的應用能更有效率的應用。

但針對模型校正，目前 EPANET 內，並無相關功能可使用，必須依賴外掛套件進行作業，對於一般使用者而言非常的不方便，若要採用商業軟體則是非常昂貴。因此本研究結合遺傳演算法(GA)和水理分析函式庫(EPANET.dll)，來找出符合實際量測值的最佳化解，其校正結果非常良好，可大幅增進模型的可靠度。

二、研究方法

(一)遺傳演算法介紹

最佳化演算法要能處理的問題非常廣泛且沒有一致性，最佳化演算法要能做得好，首先必須要能清楚的了解每個最佳化演算法的特性。依循著演算法的特性就會知道什麼樣的問題用哪種最佳化演算法才適合。遺傳演算法（Genetic Algorithms, GA），是一種應用自然界中淘汰和演化的觀念所發展出的演化搜尋法。遺傳演算法的理論基礎乃根據 1859 年達爾文的「進化論」所發展出的「物競天擇，適者生存」的演化及淘汰觀念。所有物種在自然環境的考驗下，適應性強的物種逐漸生存下來，而適應性差的便逐漸被淘汰。密西根大學 John Holland(1975)所提出，並由學生應用於工程問題上。透過逐漸淘汰掉適應能力較差的物種，反覆地進行世代繁衍，以逐步地獲得適應環境的個體，也就是最佳解。

遺傳演算法的基礎架構，共包含以下幾個要素，作業流程如下圖 1：

- 族群(Population)：問題候選解集合
- 染色體(Chromosomes)：該問題其中一個候選解
- 基因(Gene)：染色體中的元素
- 適應函數(Fitness function)：用來計算個體的適應程度
- 選擇(Selection)：篩選出適應度較好的個體
- 交配(Crossover)：將父母親的基因進行互換
- 突變(Mutation)：於某些新個體的基因進行變動

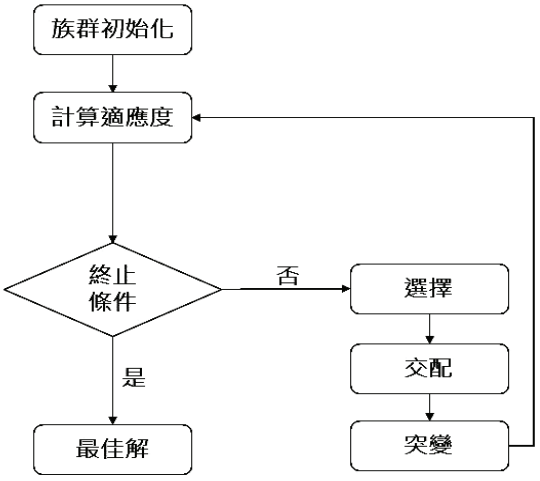


圖 1　遺傳演算法作業流程圖

(二)管線粗糙係數校正作業流程

整體計算架構包含資料前處理，首先從研究區域之空間資料庫轉換為初始水理模型，第二步則是在此模型中，以理論經驗公式計算一組初始化粗糙係數 C，並且進行管網設定，第三步進入校正流程則是透過遺傳演算法及 EPANET.dll 改正 C 值以使模擬壓力 P 值與實測壓力差異最小化，最後產出校正後的 INP 檔案，整體構想如下圖 2 所示。

遺傳演算法校正目標函式如下公式 1：

$F(x) = \min \left(\sum_1^n (P - \Delta P)^2 \right)$ ---公式 1

F(x)：水壓差方和值最小化

$\Delta \boldsymbol{P}$：實際量測值

$\boldsymbol{P}$：模型預測值

P 則是不斷透過管線摩擦係數調整，代入 EPANET.dll 進行運算所得結果。

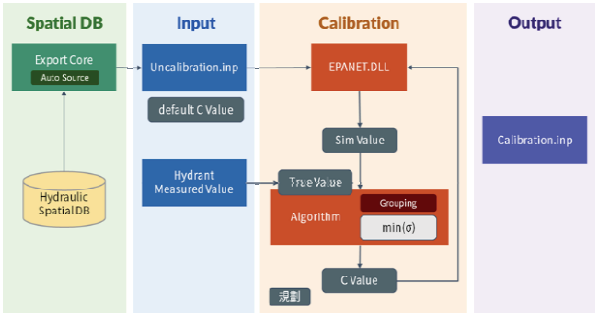


圖 2　模型校正作業流程圖

(三)遺傳演算法運算流程

本研究所設計的遺傳演算法運算，共分成三個階段，包括資料準備、分析計算及結果儲存等，流程如下圖 3，細部內容分述如下：

1.資料準備

計算前必須取得二項資料，一個是初始化的模型資料(input.inp)及水壓量測值(observation.csv)，會先進行資料檢視是否正確，如有錯誤，會退出運算程。接著會載入 INP 檔案的管網資訊，取得管線的粗糙細數及管徑資料，並將其轉換成水理運算所需的管線摩擦細數(C)，使用者並可決定是否需要依粗糙細數及管徑資料進行分組。

2.分析計算：

第二階段則是進入分析階段，首先會進行遺傳演算法初始化，接著更新管線摩擦係數，接續辦理水理分析，計算壓力差值百分比，若無則計算適應度，進行菁英選擇、篩選、交配、突變，產生下一世代，儲存最佳解的 inp 檔案。

3.結果儲存：

第三階段則是結果儲存階段，會產製報表、擬合曲線圖及統計圖。

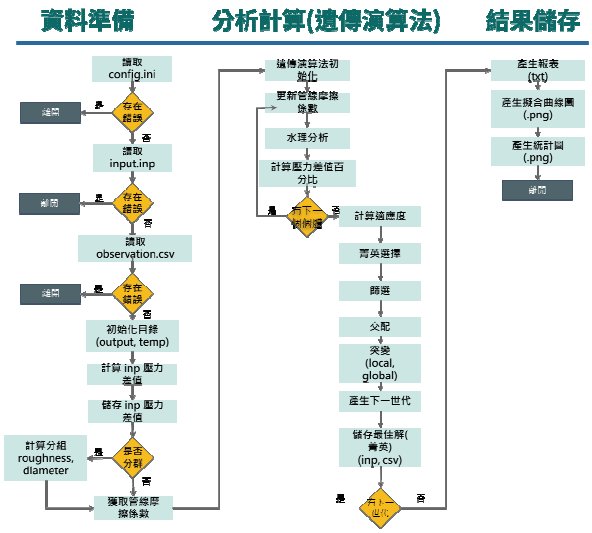


圖 3　遺傳演算法運算流程

(四)遺傳演算法執行介面設計

為使整體運作更為簡易及流暢，設計使用者操作介面，建立以遺傳演算法為基礎校正軟體(本研究簡稱 WaterCali)，具免安裝以及操作簡便直觀之優點，介面操作如下說明：

1.介面設計

WaterCali 開啟後如圖 4 所示，介面分為五大區，資料輸入區、基因演算法參數設定區、管線分組設定區、校正結果顯示區與功能鍵區。

2.校正結果資料檢視

校正完成後，可至 data:\output 資料夾檢視成果，WaterCali 將自動生成該次校正結果之資料夾，如圖 6，包含校正過程中各個世代的壓力資料(如圖 7)與 inp 檔案，以及將校正成果繪製成統計圖。

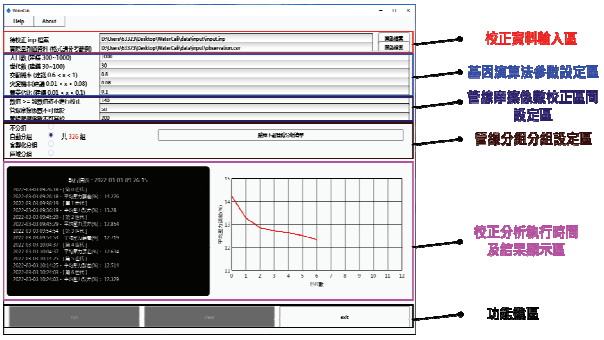


圖 4　WaterCali 使用介面

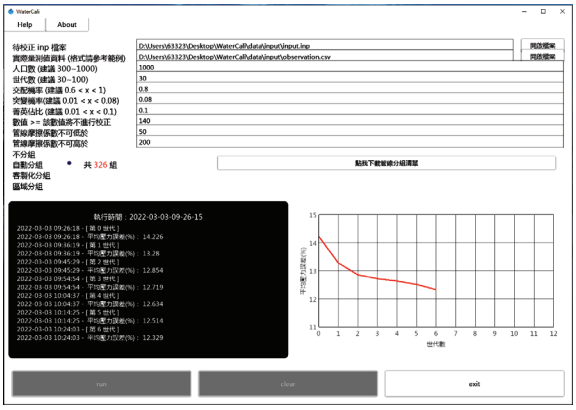


圖 5　WaterCali 運行中示意圖

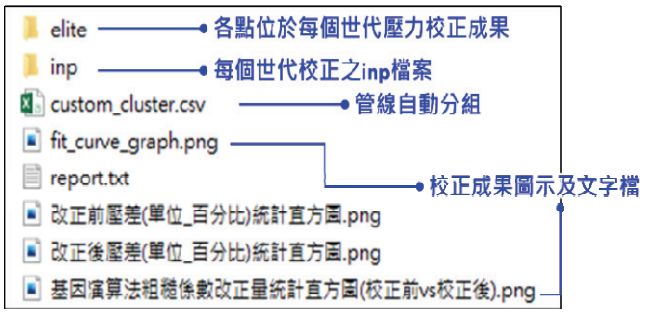


圖 6　WaterCali 產出範例圖

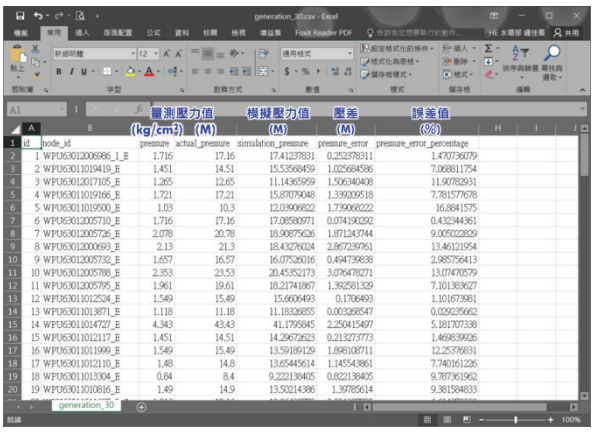


圖 7　WaterCali 計算結果圖

三、研究成果

(一)中和永和供水分區簡介

中和永和供水分區以中和加壓站為主要供水設施，區內輸水管線出加壓站後沿秀峰街40巷(Φ1350mm)及秀峰街(Φ1000mm)布設，之後管線沿景平路　中和區中正路向西布設，路徑上分別於永和區中正路（Φ900mm）往東北分支銜接至永和路二段（Φ700mm）、安樂路（Φ800mm）往南分支、景新街（Φ900mm）往西北分支、景平路（Φ800mm、Φ600mm）往西北分支及中和區中正路（Φ700mm）朝北延伸，銜接至中山路一段及二段之管線(Φ600mm)，形成環形供水迴路，如圖 8。

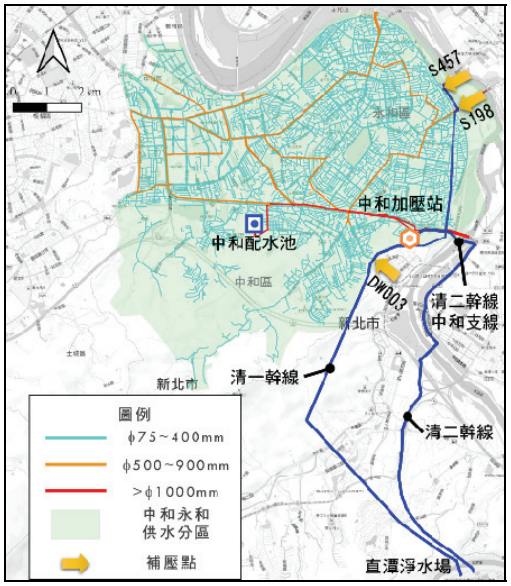


圖 8　中和永和供水分區範圍及管線分布圖

(二)模型建立

使用者於北水處現有的 WISE(Water Intelligent System of enterprise)平臺上，框選出的範圍即為中和加壓站中和線之供水範圍。框選出範圍後，程式會抓取框選範圍內的所有輸配水管，如下圖 9。

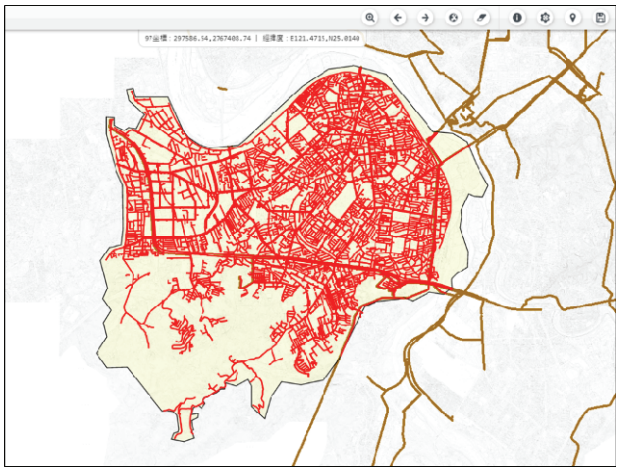


圖 9　框選範圍追蹤輸配水管

經由處理與計算，系統平台會產出一壓縮檔供使用者下載，其中包含框選區域內管網的 INP 檔案，以及框選區域內的場站資料文字檔(.txt)。場站資料為預先儲存於資料庫中的加壓站、配水池等基本資訊。在被框選到後便會以文字檔方式產出，提供使用者進行管網參數的設定，如圖 10。

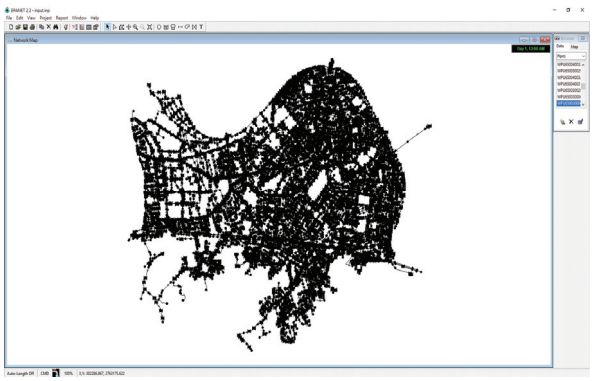


圖 10　中和永和供水分區 INP 檔開啟範例圖

(三)水壓量測

1.量測數量與位置

依據過去實作經驗，本研究實測數量設定為 140 顆，應可平均分配於供水分區內瞭解其供水壓力分布狀況。而為了能將現場量測與模型校正的效能最大化，選定結果如圖 11。

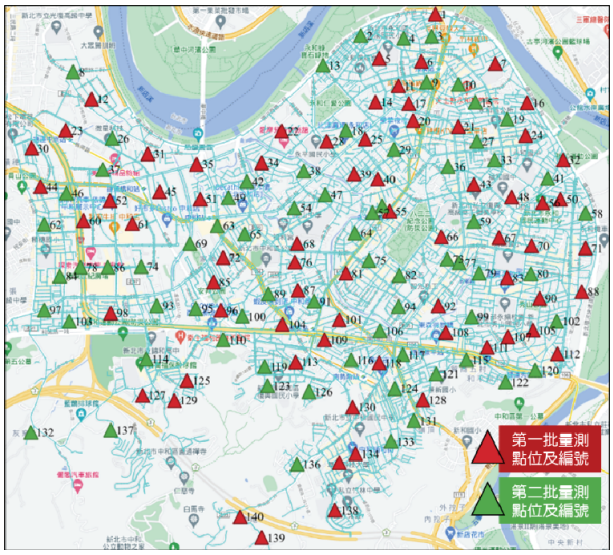


圖 11　中和永和供水分區量測點位分布

2.量測結果分析

以兩批次 140 點次量測結果平均值，繪製水壓量測等壓線結果，如圖 12 所示，於國道 3 號以南、台 64 高架以西、中山路一段 60 巷及民樂街等區域，水壓低於 1.0 kg/cm^2，上述區域主要為供水系統邊界或是地表高程較高之處，其餘水壓分布結果，皆大於 1.0 kg/cm^2，鄰近中和加壓站之管網水壓量測值最大可達 1.8 kg/cm^2。

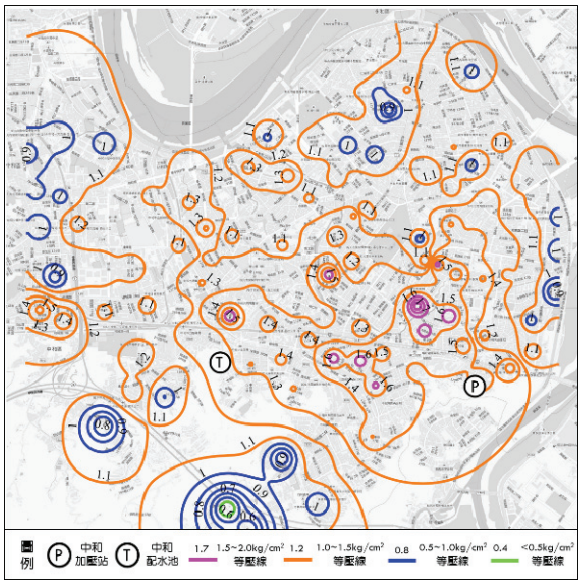


圖 12　水壓量測平均值等壓線分布

(四)校正分析

1. SCADA 資料處理作業流程說明

水理模型校正作業中，需處理大量的 SCADA 資料，包含加壓站運轉壓力、流量等資料，以及監控點的流量或壓力資料，故整理 SCADA 資料之作業流程，說明如下：

(1)收集加壓站資料：依據欲進行校正之區域收集相關所需之加壓站資料，資料間隔建議每分鐘一筆為主，以利後續資料選取及整理。

(2)計算管網實際需水量：可使用 Office Excel 軟體進行資料計算與彙整，將需彙整計算之資料共同匯入後，以其內建之公式進行運算。

(3)決定最大需水量之時間點：延續上步驟之計算成果，取得資料中最大值者，即可完成水量修正，並以其對應之時間點作為單時段模擬之依據。

(4)撈出該時間點下，所有加壓站、監控點之資料：因已找出單時段模擬之依據，將建立該時間點下之情境，故需要將所有所需資料建置到模型內，即包含加壓站的進出流量與壓力，另將該時間點之監控點壓力列出，可與模型建立成果比對，進而調整模型。

2.校正前模擬結果

如下表 1 統計結果可得知，在利用 WaterCali 校正模型前，中和永和供水分區 140 點水壓量測點中有 64 點壓差在 0.1 kg/cm^2 以下，44 點在 0.1~0.2 kg/cm^2 之間，18 點在 0.2~0.3 kg/cm^2 之間，8 點在 0.3~0.4 kg/cm^2 之間，6 點在 0.4 kg/cm^2 以上。

而壓力誤差在±20%內的點位共有 112 點，占總數 80.0 %。另由壓差分佈點位圖 13 可看出，與實際量測壓力差值較大之區域，主要分布在管線末端之區域，如下圖 13。

表 1　中和永和供水分區校正前壓差統計表

壓差(kg/cm^2)	數量	占比(%)	誤差(%)	數量	占比(%)
<0.1	64	45.7	<10%	57	40.7
0.1　0.2	44	31.4	10%　20%	55	39.3
0.2　0.3	18	12.9	>20%	28	20.0
0.3　0.4	8	5.7	20%以內小計	112	80.0
>0.4	6	4.3			

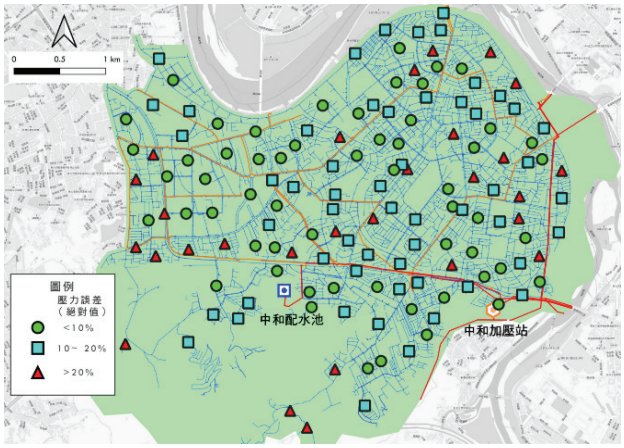


圖 13　中和永和供水分區管網校正前壓差分布

3.校正後模擬結果

中和永和供水分區校正後模擬結果如下表 2，校正後之壓差統計結果可發現，140 點水壓量測點中有 75 點壓差在 0.1 kg/cm^2 以下，39 點在 0.1~0.2 kg/cm^2 之間，18 點在 0.2~0.3 kg/cm^2 之間，1 點在 0.3~0.4 kg/cm^2 之間，7 點在 0.4 kg/cm^2 以上。而誤差在 20%內的點位共有 114 點，占總數 81.4 %，且其中誤差小於 10 %從 57 點增加至 70 點，顯示整體供水分區壓差有明顯改善，如圖 14 所示，各點位壓差絕對值與誤差往較低區間靠攏，唯誤差較大之點位仍多維持在管線末端之區域，如圖 15。

另外校正後結果在地勢較高之處，分布如圖 15 所示，最小壓力為-2.27 kg/cm^2，位於

興南路二段 34 巷，列為後續情境項目評估改善措施。

表 2　中和永和供水分區校正後壓差統計表

壓差(kg/cm²)	數量	占比(%)	誤差(%)	數量	占比(%)
<0.1	75	53.6	<10%	70	50.0
0.1　0.2	39	27.9	10%　20%	44	31.4
0.2　0.3	18	12.9	>20%	26	18.6
0.3　0.4	1	0.7	20%以內小計	114	81.4
>0.4	7	5.0			

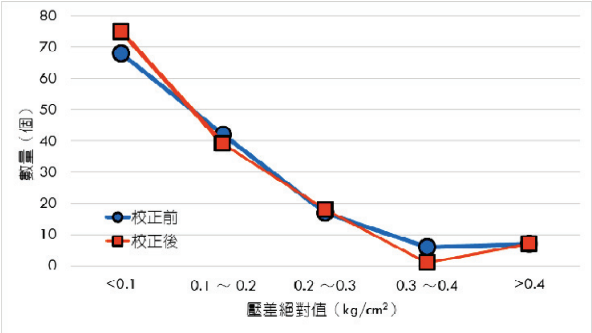


圖 14　校正前後模擬與實際壓差變化圖

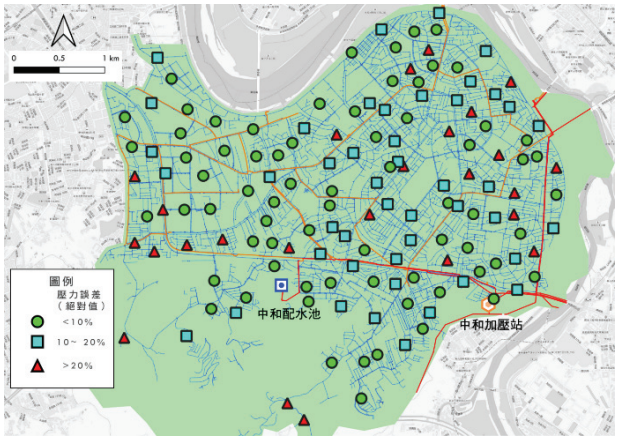


圖 15　校正後壓差分布圖

(五)模型驗證

1.商業軟體分析比較

本研究除採用 WaterCali 進行校正以外，為確認校正成果正確性，以相同校正條件，運用 WaterGEMS 進行校正，條件設定說明如下：

(1)管線分組：以管徑及管線摩擦係數分組，共計 312 組。

(2)管線摩擦係數上下限範圍：50 ≤ 管線摩擦係數 ≤ 150。

(3)管線摩擦係數每次校正變動值：2.5。

(4)管線摩擦係數排除條件：管線摩擦係數大於 140 不校正。

以 WaterGEMS 校正後與 WaterCali 比對，校正結果如表 3，誤差在 20%內的點位為 112 點，為占總數之 80.0 %，其中誤差小於 10 %維持在 57 點，可以發現 WaterCali 可以得到更好的成效。

表 3　不同軟體壓差分析比較表

WaterGEMs			WaterCali		
壓差	數量	占比(%)	壓差	數量	占比(%)
<10%	64	45.7	<10%	71	50.0
10%~20%	48	34.3	10%~20%	45	31.4
>20%	28	20.0	>20%	24	18.6
<20%總計	112	80.0	<20%總計	116	81.4

2.模擬與監視點 SCADA 監測壓力比較

依據前節分析結果，模型校正前壓差偏高之區域集中於地勢較高或管線末端，為評估水理模型建置可靠程度，另將模擬結果與監視點比較，如表 4 所示，並以動態時段進行比較，模型於校正後所有監視點誤差 <20%，顯示模型具有一定代表性。

表 4　校正結果與監視點比較表

監視點	監測壓力	校正前		校正後	
		模擬壓力	差異百分比	模擬壓力	差異百分比
	kg/cm²	kg/cm²	%	kg/cm²	%
S412	0.14	0.06	57.14	0.15	9.74
S429	1.13	1.26	11.50	1.14	0.67
S430	1.05	1.1	4.76	1.05	0.39
S431	0.58	0.66	13.85	0.69	18.17
S432	0.78	0.85	8.97	0.88	12.36
S433	0.93	0.75	19.35	0.78	16.41
S434	0.74	0.78	5.41	0.74	0.02
S435	1.14	1.01	11.40	1.03	10.03
S436	0.98	0.98	0.00	1.03	5.32
S441	0.84	0.73	13.10	0.69	17.62
S447	0.92	0.81	11.96	0.79	14.05

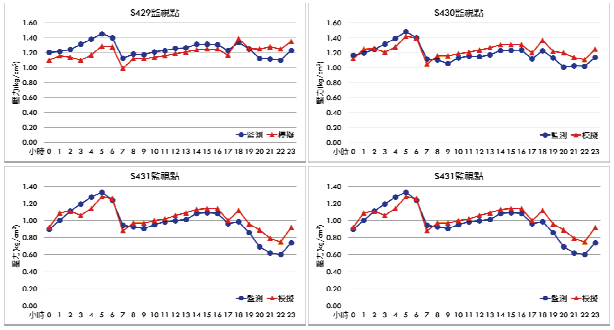


圖 16　監視點多時段動態壓力比對分布圖一

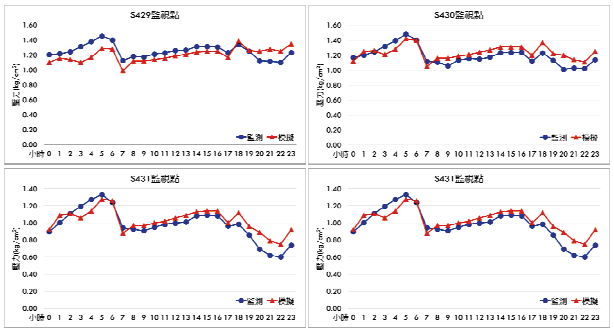


圖 17　監視點多時段動態壓力比對分布圖二

四、結論與建議

因此本研究結合遺傳演算法(GA)和水理分析函式庫(EPANET.dll)，經由精英選擇、世代交配及定額突變率，來進行粗糙係數(ROUGHNESS)的調整，再經由遺傳演算法不斷迭代，去找出符合實際量測值的最佳化解，其計算成果可於作業中提供可視化介面(User Interface)，計算過程亦會產製統計圖表，並將其計算方法套用於中和永和供水分區進行驗證，其研究結果顯示模型於校正前後 0~10%誤差率可提升 9.3%，並與 24 小時監控點的資料進行比對，其誤差平均值僅為 7.63%，顯示其校正結果非常良好，可大幅增進模型的可靠度。

參考文獻

1.陳明州、鄭答振、黃欽稜、陳韋嘉、張瑛興、李鴻利、謝連達(2019) 臺北自來水管網水理分析應用之規劃發展，中華民國自來水協會108年度研究計畫

2.臺北自來水事業處(2019) 管線資訊數化及空間資料庫建置規範報告書。

3.臺北自來水事業處(2019) 空間資料整理成果報告書。

4.薛志宏、張凱迪、李佳陵(2021)以EPANET模擬分析供水管網水質－以北水處內湖分區為例，自來水會刊第 39 卷第 3 期

5.鍾育霖(2021) 供水調配水理演算之應用-以東湖地區為例，自來水會刊第 40 卷第 1 期

6.https://plus.maths.org/content/daniel-bernoulli-and-making-fluid-equation

7.Quentin B. Travis. “Relationship between Hazen – William and Colebrook – White Roughness Values.” Journal of Hydraulic Engineering Volume 133 Issue 11, November 2007.

8.Introduction, Theory, History and Basics of Water Distribution System Modeling. EWRI World Environmental and Water Resources Congress. Minneapolis, June 5, 2018

9.Malcolm S. McIlroy. “Direct-Reading Electric Analyzer for Pipeline Networks.” Journal (American Water Works Association), Vol. 42, No. 4, pp. 347-366. April, 1950.

10.Lindell Ormsbee. “The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age.” 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio. May, 2014.

11.https://www.geeksforgeeks.org/program-for-newton-raphson-method/

12.https://www.youtube.com/watch?v=M8f1FNgeq7o

13.Dandy, G.C., Simpson, A.R. and Murphy, L.J. (1996). “An improved genetic algorithm for pipe network optimisation.” Water Resources

Research, Vol. 32, No. 2, Feb., 449 – 458.

14.H. Monsef, M. Naghashzadegan, A. Jamali, R. Farmani. “Comparison of evolutionary multi objective optimization algorithms in optimum design of water distribution network.” Ain Shams Engineering Journal. 10 (2019) 103-111.

15.https://www.hazenandsawyer.com/work/projects/dbp-for-nyc/

16.https://ascelibrary.org/cms/attachment/e951abc5-ab90-4b02-ac19-20085a2a1e1e/2.jpg

17.U.S Environmental Protection Agency. (2018). “Deployment of Real-Time Analytics and Modeling at the City of Flint, Michigan Water System.” (Technical Brief), EPA/600/S-18/353.

18.Jacek Błaszczyk, Krzysztof Malinowski, Alnoor Allidina. (2014). “Optimal Pump Scheduling by NLP for Large Scale Water Transmission System.” Proceedings 28th European Conference on Modelling and Simulation. Brescia, Italy.

19.Stefano Mambretti, Enrico Orsi. (2016). “Optimizing Pump Operations in Water Supply Networks Through Genetic Algorithms.” Journal AWWA, February 2016 108:2. American Water Works Association.

20.Toru Nagatani, Koji Yasuhara,Kouichi Murata, Mariko Takeda, Toshiko Nakamura, Tomohiro Fuchigami, Katsuhiko Terashima. (2006). “Residual Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System.” The 7th International Symposium on Water Supply Technology, Yokohama.

21.Jae Chan Ahn, Su Won Lee, Kevin Y. Choi, Ja Yong Koo. “Application of EPANET for the Determination of Chlorine Dose and Prediction of THMs in Water Distribution System.” Sustain. Environ. Res. 22(1), 31-38 (2012).

22.PREPARED. (2014). “Bacterial growth model in the drinking water distribution system- an early warning system.” Report number: PREPARED 2014.023. Deliverable number: D4.4.1~D4.4.4.

23.I Fisher, G Kastl, A Sathasivan. (2019). “Cost-Effective Chlorination Strategies for Drinking Water – Meeting chlorination disinfection goals in drinking water distribution systems.” Water e-journal ISSN 2206-1991. Volume 4 No 1.

作者簡介

朱撼湘先生

現職：臺北自來水事業處技術科科長

專長：管網規劃、施工管理、自來水工程計

黃欽稜先生

現職：臺北自來水事業處技術科一級工程師

專長：數值分析、漏水控制、水理模型

黃裕泰先生

現職：臺北自來水事業處供水科一級工程師

專長：自來水管線設計及漏水防治

鍾育霖先生

現職：臺北自來水事業處供水科三級工程師

專長：自來水管線施工監造及設計

許家成先生

現職：台灣世曦工程顧問股份有限公司

專長：數值分析及 GIS 系統設計

鐘志忠先生

現職：國立中央大學土木工程學系副教授

專長：自來水防災工程監測及電機整合

淨水場高錳與氨氮異常水質原水處理對策初探

文/陳毓霖、彭嘉貞、林秀雄、蔡利局、甘其銓、王睿騰

摘要

當高錳、氨氮異常水質原水發生時，淨水場一般藉由提高氧化劑(多為 NaOCl)劑量，用以降低總錳及氨氮濃度，惟水體中高劑量次氯酸鈉之添加，除增加操作負擔外，亦會提高消毒副產物生成潛勢。為提升含高錳與高氨氮異常水質原水之處理成效及避免消毒副產物生成，本研究乃配製高錳及高氨氮原水，改變不同處理條件並利用瓶杯試驗，探討淨水場面對異常水質時較佳的處理對策。

實驗結果顯示，NaOCl、$KMnO_4$ 與 ClO_2 三種氧化劑中，氨氮去除效果以 NaOCl 最佳，$KMnO_4$ 則為除錳之最適氧化劑。據此，將 $KMnO_4$ 與 NaOCl 組合，可同時去除異常原水中大部分之總錳與氨氮。另外，於快濾單元前增加中段加氯點，並以(錳砂+石英砂)作為過濾程序之濾料，可進一步提高除錳與除氨氮之效能。

本研究建議處理異常原水的操作條件為添加 $KMnO_4$ 搭配 NaOCl 之組合氧化劑($KMnO_4$＋NaOCl)進行前氧化，經 $FeCl_3$ 混沉處理後，於快濾前增加中段加氯點，提高水中餘氯濃度，再以石英砂搭配錳砂之濾料組合過濾。於此條件下，過濾出流水濁度可降至 0.23 NTU(去除率約 96%)、總錳降至 0.018 mg/L(去除率約 98%)、氨氮降至 0.31 mg/L(去除率約 68%)，而總鐵則降至 0.02 mg/L 以下(N.D.)。過濾後出流水氨氮尚未符合飲用水水質標準，可提高中段加氯劑量或調高錳砂/石英砂比例，進一步提升氨氮去除率。

關鍵字：異常水質、NaOCl、KMnO4、除氨氮、除錳

一、前言

臺灣所供應自來水其水源約有 6-7 成來自水庫水，這些水庫約有 1/3-3/4 曾發生優養化現象，尤其於枯水期，因乾淨雨水及地下水補注量少，致使水中藻類濃縮，增加沉降至水庫底層的藻類數量與死亡藻類降解所消耗氧氣量，底層因而形成厭氧之還原狀態，庫底土壤與沉積物中的鐵、錳等礦物乃還原成溶解性 Fe^{2+}及 Mn^{2+}進入下層水體中，導致淨水場於枯水期由低水位所取原水，出現高 Fe^{2+}及 Mn^{2+}濃度之異常水質狀態；此異常水質樣態於國內外均曾有類似情形發生[1-2]。再者，於枯水期後緊接之汛期，水庫亦容易因進流沖刷，使得淨水場原水之 Mn^{2+} 濃度異常。當溶解性錳含量增加時，將加重淨水操作之負荷，甚至於配水系統出現紅水現象，影響自來水之感觀及適飲性；錳之飲用水水質標準為 0.05 mg/L。

此外，水庫原水亦存在氨氮的問題；水中氨氮是指以游離氨(NH_3)和銨離子(NH_4^+)形式存在的氮。水庫中氨氮主要是含氮有機物被微生物分解產生，含氮有機物來源包括魚蝦排泄物、死亡動植物、人類生活污水或雨後隨地表逕流水流入水庫的含氮肥料。水中氨氮含量過高會導致水體優養化，危害水中生物；氨氮之飲用水水質標準為 0.1 mg/L，為

符合標準，含高濃度氨氮原水將增加淨水成本，且縱使原水或飲用水中之氨氮濃度一般對健康影響不大，經加氯消毒後，產生之二氯胺或三氯胺亦可能引起臭味問題，有礙其適飲性。

原水中的錳於淨水場一般可利用氧化劑(前氧化，如曝氣或加 NaOCl)將其氧化成不溶性顆粒，再經混凝沉降與快濾等程序而去除；至於水中氨氮，亦可利用不同氧化程序、生物處理或離子交換等方法降低其濃度。針對原水中錳及氨氮主要之處理技術，茲簡述如下：

1.錳處理技術

Mn 相對穩定，依范姜瑄研究[3]指出，經前氧化作用可將 Mn^{2+}轉化成不溶性 MnO_2，再經混沉、過濾等程序，可使其自原水中分離。前氧化所使用之氧化劑，包括氯氣、次氯酸鈉、高錳酸鉀與二氧化氯等；高錳酸鉀氧化 Fe^{2+}與 Mn^{2+}過程如下：

$$3Fe^{2+} + KMnO_4 + 7H_2O \leftrightarrows 3Fe(OH)_3 + MnO_2 + K^+ + 5H^+$$

$$3Mn^{2+} + 2KMnO_4 + 2H_2O \leftrightarrows 5MnO_2(s) + 2K^+ + 4H^+$$

二氧化氯在 pH 值大於 7 以上對於氧化鐵、錳條件較適合，在 pH 值 8~9 有較佳效果。

$$Fe^{2+}_{(aq)} + ClO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)} \leftrightarrows Fe(OH)_{3(s)} + ClO_2^-{}_{(aq)} + 3H^+_{(aq)}$$

$$Mn^{2+}_{(aq)} + 2ClO_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \leftrightarrows MnO_{2(s)} + 2ClO_2^-{}_{(aq)} + 4H^+_{(aq)}$$

過濾之濾料則可使用活性碳、石英砂或錳砂。文獻顯示，前述氧化劑中以高錳酸鉀氧化 Mn^{2+}的效果最好[3-6]，過濾之濾料則受助催化與吸附作用，以錳砂最佳[3, 7]。依化學計量關係，氧化 1 mg/L Mn^{2+}所需次氯酸鈉及高錳酸鉀之理論劑量，分別為 0.65 mg/L (as Cl)及 1.92 mg/L。

2.氨氮處理技術

目前淨水場去除水中氨氮的方法以折點加氯法[8]及生物處理法[9]較為普遍，尤其是折點加氯法。氯與氨反應形成一系列氯化氨化合物，稱為氯胺(chloramine)，包括一氯胺(monochloramine，NH_2Cl)、二氯胺(dichloramine，$NHCl_2$)與三氯胺(trichloramine，NCl_3)，其形成方程式如下：

$$NH_3 + HOCl \rightleftarrows NH_2Cl + H_2O$$

$$NH_2Cl + HOCl \rightleftarrows NHCl_2 + H_2O$$

$$NHCl_2 + HOCl \rightleftarrows NCl_3 + H_2O$$

水中氯與氨反應除形成氯胺外，亦可能將 NH_3 氧化成 N_2，如下反應式：

$$2NH_3 + 3Cl_2 \rightleftarrows N_2 + 6H^+ + 6Cl^-$$

$$2NH_4^+ + 3HOCl \rightleftarrows N_2 + 3H_2O + 3HCl + 2H^+$$

針對折點加氯程序，乃是於含氨氮原水中投加過量的氯或次氯酸鈉，以將水中氨氮氧化為氮氣而去除，處理成效可達 90%~100%，惟操作費用高，副產物氯胺類和氯化烴(如氯化甲烷類)且有危害人體健康之虞。移除水中氨氮之理論 Cl_2：NH_3-N 質量比為 7.6：1 (莫耳比 1.5：1)，但實際上可能需要高達 8：1 至 10：1。

由上所述，因水庫於枯水期採低水位取水及汛期進流沖刷等因素，恐導致淨水場原水中之鐵、錳與氨氮濃度偏高。又目前除錳與除氨氮之技術，仍偏重使用氯系氧化劑，非但除錳效果欠佳，於總錳濃度較高而需添加高氯量時，亦恐增加生成消毒副產物

(DBPs)潛勢，影響飲用水安全。鑑此，本研究乃藉由改變不同操作條件(氧化劑種類、添加劑量，以及濾料組成等)之瓶杯試驗，評估去除鐵、錳與氨氮之較佳操作條件與策略，俾提升淨水場操作效能，提供民眾更優質的飲用水。

二、研究方法

本研究採用南部水庫之原水作為配製水樣來源以進行實驗室試驗評估，而為模擬異常原水水質，乃於原水中添加氯化亞錳($MnCl_2$)及氯化銨(NH_4Cl)，使水中之總錳及氨氮濃度約為 1.0 mg/L。再者，實驗室規劃以三種氧化劑進行測試，分別為次氯酸鈉(NaOCl)、高錳酸鉀($KMnO_4$)及二氧化氯(ClO_2)，並搭配 $FeCl_3$ 進行混凝沉降之瓶杯試驗，$FeCl_3$ 之加藥量則依原水濁度而定。

本研究相關試驗流程如圖 1 所示，其中快濾單元所使用的濾料分別為(1)石英砂、(2)錳砂+石英砂及(3)活性碳+石英砂，濾速則控制其表面負荷約為 8 cm/min。又為評估本研究之操作成效，須針對水中濁度、鐵、錳與氨氮等項目進行檢測分析，各水質項目之檢測方法及分析儀器如表 1 所示。

三、結果與討論

(一)不同氧化劑與不同添加劑量之成效

1.濁度去除評估

由表 2 結果可知，使用不同氧化劑與不同氧化劑添加劑量，與濁度去除成效並無明顯關聯，濁度去除乃是以混凝沉降為主，經 $FeCl_3$ 混凝沉降後，上澄液濁度均能小於 2 NTU。

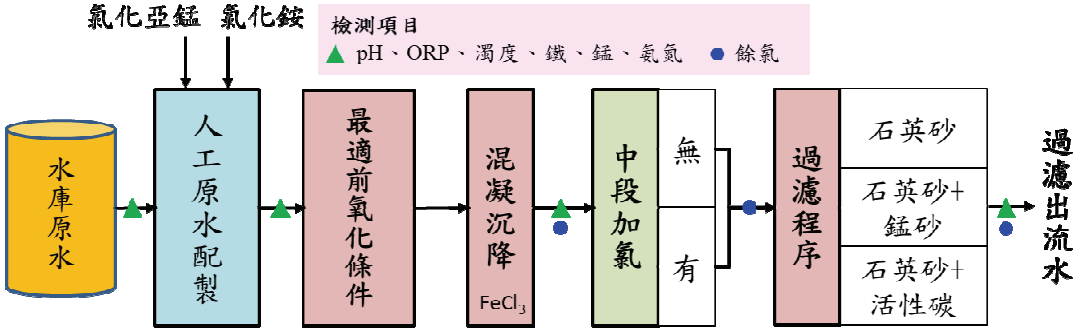


圖 1　實驗室評估測試流程

表 1　各水質項目相關檢測資料一覽表

項目	分析儀器廠牌(型號)	分析方法	偵測範圍
濁度	HACH(2100Q)	NIEA W219.52C	0～1,000 NTU
錳	HACH(DR 1900)	HACH 9000 德國標準方法 DIN 38406-2	0.010～2.000 mg/L
氨氮	HACH(DR 1900)	EPA (Method 350.1) Nessler Method 納氏比色法	0.02～2.50 mg/L
餘氯	FCL30	應用三電極原理	0～10.0 mg/L

表 2　不同氧化劑與添加劑量對濁度移除成效

氧化劑種類	原水濁度(NTU)	不同倍率理論劑量之濁度(NTU)					
		0	一倍	二倍	三倍	四倍	五倍
NaOCl	7.06	0.96	0.96	0.99	1.03	0.97	0.98
$KMnO_4$	11.3	1.01	2.17	1.34	1.32	1.43	1.71
ClO_2	6.55	0.96	0.55	0.52	0.52	0.54	0.53

2.錳去除評估

圖 2 為三種氧化劑於不同添加劑量時，對於總錳去除效果的比較。結果顯示，單純利用 $FeCl_3$ 混凝，僅能移除 Mn^{2+}與溶氧所形成之 MnO_2，除錳效果有限。若添加氧化劑，則三種氧化劑中以 $KMnO_4$ 除錳效能最佳，其次為 NaOCl，ClO_2 效果最差；添加 ClO_2 時，某些劑量下甚至反降低混凝之除錳成效。又 $KMnO_4$ 除錳效能於二倍理論劑量時最佳，可達 100%；高於二倍理論劑量時，因缺少 Mn^{2+} 將 $KMnO_4$ 還原為 MnO_2，殘留之 $KMnO_4$ 反使總錳去除率降低。

3.氨氮去除評估

圖 3 結果顯示，三種氧化劑中以 NaOCl 對於氨氮去除效果最佳，且去除率隨添加劑量增加而上升，於五倍理論劑量時可達約 70%。至於另二種氧化劑，$KMnO_4$ 於五倍理論劑量時去除率為 40%，成效有限，且如前述會增加殘餘總錳濃度；又 ClO_2 於添加 5 倍理論劑量時，去除率僅約 15.8%，顯示 ClO_2 無助於氨氮去除，較低劑量時甚至會抑制混凝沉降去除氨氮的成效。

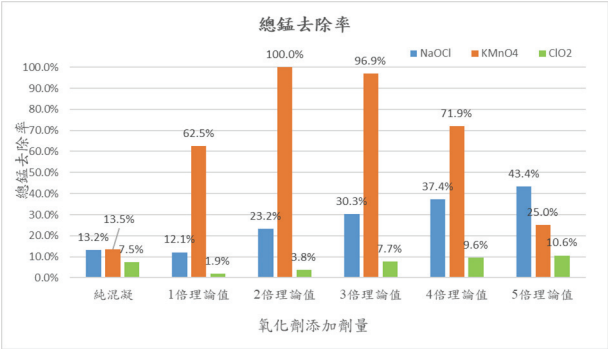


圖 2　不同氧化劑與不同添加劑量對於總錳去除效果比較

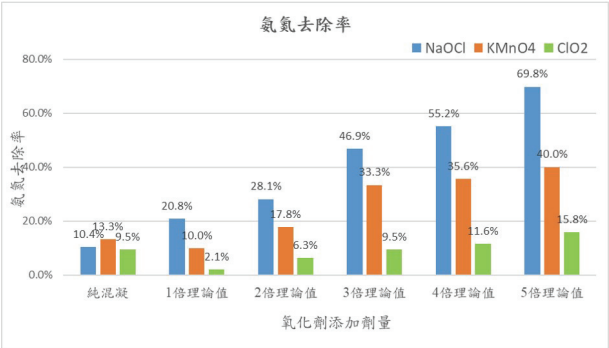


圖 3　不同氧化劑與不同添加劑量對於總錳去除效果比較

(二)不同氧化劑組合除錳與除氨氮成效

一般淨水場於高鐵/錳、氨氮之異常水質發生時，會於調節池及分水井前增加兩道預備加氯(多為 NaOCl)之加藥點，用以降低水中高濃度之錳及氨氮。依本研究前述實驗結果，除錳效果 $KMnO_4$ 優於 NaOCl，而除氨氮則以 NaOCl 為最佳。據此，為提升含高錳與高氨氮異常水質原水之處理成效，本研究乃將 $KMnO_4$ 與 NaOCl 組合，並搭配混凝沉降程序，進一步評估總錳與氨氮之去除成效。又雖然在前述試驗中，顯示添加 $KMnO_4$ 二倍理論劑量對於除錳有最佳效果，然而考量實場操作時藥劑的花費與處理後水質色度，而且後段操作程序仍有快濾單元可將殘留錳去除，乃採用一倍 $KMnO_4$ 理論劑量與不同劑

量之 NaOCl 組合進行試驗。

表 3 為使用 $KMnO_4$ 及 NaOCl 組合氧化劑，搭配混凝沉降之瓶杯試驗結果。由實驗結果可知，固定 $KMnO_4$ 劑量(一倍理論值)與不同 NaOCl 劑量組合，對於總錳去除率均無明顯差異，約維持在 75.5~77.6%左右，此去除率較單獨使用 $KMnO_4$ 時略高(上澄液再經 0.45 μm 濾膜過濾後約 72%)，顯示當 $KMnO_4$ 與 NaOCl 同時存在時，$KMnO_4$ 為主要除錳成分，因此 NaOCl 劑量的增加並不影響總錳去除率。又氨氮去除率則隨 NaOCl 劑量增加而提升，一倍劑量時約 23.7%，至 5 倍劑量時約 66.7%；雙氧化劑組合與單獨使用 NaOCl 處理時去除氨氮成效相近，亦即除氨氮主要藥劑為 NaOCl。

綜此，以 $KMnO_4$＋NaOCl 組合處理含高錳與高氨氮原水時，二種氧化劑並無加乘作用，但可發揮各自功能，同時去除原水中大部分之總錳與氨氮。相較一般淨水程序中以高氯除錳與除氨氮，此一氧化劑組合可提高除錳效能，亦可減少 NaOCl 用量，降低採高氯法時生成 DBPs 之潛勢，實為可採行之操作策略。另外，表 4 結果顯示氧化劑組合與濁度及總鐵的去除無明顯關聯。

(三)沉澱後中段加氯搭配錳砂濾料除錳之可行性評估

本研究旨在擬定處理異常水質中鐵、錳與氨氮等成分之操作條件與策略，由前述試驗結果可知，當原水中氨氮濃度達 1 mg/L 時，即使添加五倍理論劑量的 NaOCl，前段加氯後殘留的氨氮仍有約 0.3 mg/L，高於飲用水水質標準 0.1 mg/L。有鑑於此，為達實場去除氨氮的目標，除前段加氯外，擬於混凝沉降及快濾單元間增加中段加氯點，評估進一步降低水中氨氮濃度之可行性。再者，對於藥劑添加劑量的選擇，由於快濾單元亦具除錳功能[3, 7]，而且中段加氯與後加氯仍可去除氨氮，考量操作費用與 DBPs 生成潛勢，乃以 $KMnO_4$＋NaOCl(一倍+四倍)理論劑量之組合作為前氧化試劑，並使中段加氯的水中餘氯值控制在 0.5 及 1.0 mg/L (as Cl)之條件。

表 3　$KMnO_4$＋NaOCl 搭配前氧化經混凝沉降後之處理效果

項目	單位	人工原水	理論添加劑量 $KMnO_4$(mg/L)+NaOCl(mg/L as Cl)				
			1.92+0.65	1.92+1.30	1.92+1.95	1.92+2.60	1.92+3.25
			(1+1)	(1+2)	(1+3)	(1+4)	(1+5)
pH	-	7.92	6.92	6.97	6.96	6.93	6.94
濁度	NTU	10.6	0.92	0.95	0.98	1.00	0.98
總錳	mg/L	0.98	0.23	0.24	0.24	0.22	0.23
未濾除錳[註]	mg/L	0.87	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20
氨氮	mg/L	0.93	0.71	0.65	0.48	0.42	0.31

註：指經 0.45 μm 濾膜過濾後，濾液中所含總錳。

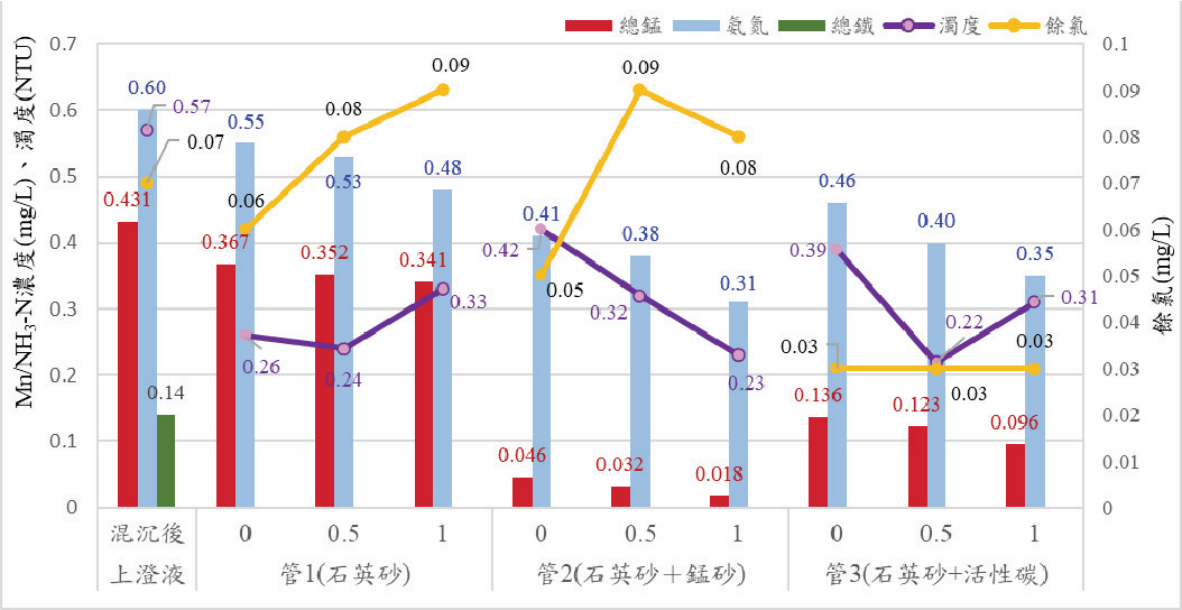


圖 4　有/無中段加氯搭配不同濾料組合對於水中濁度、鐵、錳及氨氮之處理效果

中段加氯搭配不同濾料之快濾單元，對於水中總錳與氨氮的處理效果如圖 4 所示，由圖可知，不論何種濾料組合，中段加氯皆可進一步降低快濾單元出流水中總錳及氨氮濃度，且隨中段加氯水中餘氯量增加，殘餘總錳及氨氮濃度皆愈低。又在不同濾料組合中，以石英砂搭配錳砂之過濾組合對於除錳效果最佳、石英砂搭配活性碳之組合次之、單純石英砂之效果最差，且無論是否中段加氯，石英砂搭配錳砂之過濾出流水均能符合錳含量≦0.05 mg/L 之飲用水水質標準，推測與錳砂可吸附 Mn^{2+}及催化 Mn^{2+}的氧化反應有關[10]。另在氨氮方面，當中段加氯量達 1.0 mg/L 時，石英砂搭配錳砂組合出流水的濃度仍有 0.31 mg/L，尚無法符合 0.1 mg/L 之飲用水水質標準，不過本試驗快濾單元出流水中餘氯量均低於 0.1 mg/L，相較飲用水水質標準對於自由有效餘氯的要求(0.2~1.0 mg/L)尚有餘裕，因此可再提高中段加氯量或是後加氯量，俾使氨氮濃度能符合標準。

(四)高錳與氨氮異常水質處理之操作策略研擬

依據前述結果，去除原水中鐵、錳與氨氮的前氧化最佳操作條件為一倍理論劑量 $KMnO_4$ 與四倍理論劑量 NaOCl 之組合，於此前氧化操作條件下，再經 $FeCl_3$ 混凝沉降，則上澄液濁度去除率約 90.6%(殘留 1.0 NTU)、總錳去除率約 77.6%(殘留 0.22 mg/L)以及氨氮去除率約 54.8%(殘留 0.42 mg/L)；不過，由於使用 $FeCl_3$ 作為混凝劑，因此總鐵濃度自 0.02 mg/L 增加至 0.16 mg/L。

混凝沉降處理後之上澄液，於進入快濾單元前，本研究建議可增加中段加氯之步驟，增加上澄液中餘氯濃度以提高殘留氨氮之去除率。目前較佳之中段加氯餘氯量為 1.0 mg/L(as Cl)，快濾池濾料則是採用石英砂搭配錳砂之組合成效最好。最佳濾料組合條件

下，可使快濾單元出流水的濁度降至 0.23 NTU、總錳降至 0.018 mg/L、氨氮降至 0.31 mg/L，而總鐵則可降至 0.02 mg/L 以下。

由於快濾單元出流水的氨氮仍未符合飲用水水質標準，且出流水餘氯量<0.1 mg/L，若要去除更多氨氮，除可藉由後段加氯再予去除外，亦可增加中段加氯量以提高過濾前之餘氯值或提高錳砂/石英砂比例，對於氨氮去除應可進一步提升。

四、結論與建議

(一)NaOCl、$KMnO_4$ 與 ClO_2 三種氧化劑中，總錳去除率以 $KMnO_4$ 最高，氨氮去除則以 NaOCl 效果最佳。

(二)為降低異常水質中之高錳與高氨氮，淨水流程之前氧化藥劑可採 $KMnO_4$+NaOCl 組合，如預備加氯單元改添加 $KMnO_4$ 並維持以 NaOCl 進行前加氯。再者，$FeCl_3$ 混凝沉降後，可於過濾前增加中段加氯點，提高水中餘氯濃度，進一步去除混沉上澄液中之氨氮。

(三)快濾單元可採用石英砂搭配錳砂之濾料組合，對於濁度、總錳與氨氮去除效果優於僅使用石英砂為濾料者。

(四)建議之操作條件為添加 $KMnO_4$ 搭配 NaOCl 之組合氧化劑(一倍+四倍理論劑量)進行前氧化，經混沉處理後，於快濾前增加中段加氯點，再以石英砂搭配錳砂之濾料組合過濾。於此操作條件下，過濾出流水濁度可降至 0.23 NTU、總錳降至 0.018 mg/L、氨氮降至 0.31 mg/L，而總鐵則降至 0.02 mg/L 以下(N.D.)。

(五)後續可進一步探討原水中總有機碳(TOC)含量與淨水時加氯量，對於 DBPs 生成潛勢的影響。

參考文獻

1.黃志彬，寶山原水含高藻及鐵、錳淨水處理操作最適化之研究，台灣自來水公司委託研究計畫報告書，2004。

2.Carlson KH, Knocke WR, Gertig KR, Optimizing treatment through Fe and Mn fractionation, J. Am. Water Works Assoc. 89(4), 162-171, 1997.

3.范姜瑄，水處理程序中錳去除之探討，國立成功大學環境工程學系碩士論文，2010。

4.Sundstrom DW, Klei HE, Wastewater treatment, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ., 1979.

5.黃志彬，傳統水處理程序因應含錳原水之操作應變方案，110年度台北自來水公司委託研究計畫報告書，2021。

6.Masschelein WJ, Chlorine Dioxide: Chemistry and Environment Impact of Oxychlorine Compounds, Ann Arbor Science, Ann Anbor, MI., 1979.

7.Engelbrecht RS, OConnor JT, Ghosh M., Significance and removal of iron in water supplies, Fourth Annual Environmental engineering and water resources conference, Vanderbilt University, Nashville, TN., 1965.

8.許國樑，折點加氯對氨氮分解反應時間及餘氯量影響之研究，自來水會刊第29卷第3期，P81-89，2010。

9.李丁來、陳郁仁、吳怡儒、張智華、黃良銘、葉宣顯、林財富，受污染原水供緊急備用民生用水水源之前處理技術應用，自來水會刊第32卷第3期，P47-58，2013。

10.陳琪婷，以二氧化錳催化降解水中氨氮之研究，國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文，2003。

作者簡介

陳毓霖先生

現職：嘉南藥理大學環境工程與科學系研究生

彭嘉貞小姐

現職：嘉南藥理大學環境工程與科學系大學生

林秀雄先生

現職：嘉南藥理大學環境工程與科學系兼任教授

專長：廢水高級處理

蔡利局先生

現職：嘉南藥理大學環境工程與科學系副教授

專長：水質異常改善研究

甘其銓先生

現職：嘉南藥理大學觀光事業與管理系教授

專長：淨水處理、水質異常改善研究

王睿騰先生

現職：中山大學海洋環境及工程學系博士候選人

專長：水質檢測分析

本刊 111.112 年「每期專題」

期別	主　題	子　　題	時程
41 卷 第 4 期	供水服務	1.提昇服務品質、2.資訊管理與應用、3.自動讀表技術應用、4.物聯網及 ICT 技術、5.節約用水及效率措施、6.可持續的水價、7.進階抄表管理系統、8.氣候變遷、9.抗旱期間供水服務與經驗。	11 月
42 卷 第 1 期	工程技術	1.工程規設、施工及計劃管理、2.智慧供水技術、3.管線免開挖更生技術、4.環境友善及先進水處理技術、5.創新水源開發技術、6.薄膜技術、7.新興污染物處理技術、8.新興技術。	2 月
42 卷 第 2 期	營運管理	1.供水設施營運操作、2.供水系統維護管理 3.管線失效故障分析、4.管線狀況評估、5.降低無收益水量、6.集水區保育治理、7.緊急應變及危機管理、8.管網建模及應用。	5 月

～歡迎各界就上述專題踴躍賜稿，稿酬從優～

傳統淨水程序前氯氧化去除水中溶解錳效果探討

文/薛志宏、張美惠、張美鳳、陳宏奕、廖冠仲

摘要

以杯瓶試驗探討不改變混凝 pH，不同濃度前氯下，不同濃度溶解錳原水之錳去除率，結果顯示，以增加前加氯將錳氧化成固體，以混凝沉澱過濾去除，效果不佳；氯錳質量比要大於 25，才能將原水中的錳，去除至低於飲用水水質標準限值(0.05mg/L)以下，且受限於飲用水水質標準自由餘氯上限值 1.0mg/L，前加氯氧化最高只能處理 0.065 mg/L 錳濃度的原水，效果非常有限。測試以淨水場降低處理水量，增進溶解錳之去除，效果亦極微。原水中同時含溶解性鐵，共沉作用有助提升錳之去除。加氯另一功效為老濾料表面錳固體沉積物自行催化作用，可能提升快濾程序去除錳之效率。

關鍵字：加氯氧化、溶解錳去除

一、前言

110 年 1 月，北水處發生供水區水黃事件，探究原因係因事件發生前期溫度驟降，水源上游水庫水體發生翻混現象，排放水含高濃度溶解錳，適逢南勢溪天然流量低，導致下游淨水場原水中溶解錳濃度過高，既有混凝沉澱過濾及加氯消毒程序，無法有效予以去除，錳穿透流入用戶端，致發生民眾抱怨水黃情事。

本研究希探討本處淨水場現有淨水程序，遇原水含不同濃度溶解錳時，以前加氯氧化及混凝、沉澱、過濾等處理程序，去除錳之效果與限制，以作為淨水場發生突發性含錳原水時，因應處理之參考。

二、文獻探討

(一)飲用水中錳的來源

飲用水中的錳，通常來自地面水或地下水，地下水通常較地面水含錳濃度高。天然水體中非人為污染來自地質影響。有氧水體高錳通常來自工業污染，而地下水或水庫湖泊缺氧環境，也會產生高錳狀況。

(二)水庫層化(Stratification)與翻混(Overturn)

湖泊水庫常作為飲用水源，水體之層化及翻混作用，影響水源中溶解錳濃度及淨水處理操作。

較深的水庫或湖泊，在溫暖季節，湖水不同深度會依溫度分佈呈分層狀態，稱之為「層化現象」。典型的水庫水體層化，分為表水層(Epilimnion)、變溫層(Metalimnion)及深水層(Hypolimnion)3 層。表水層溫度最高，位於水體表面；深水層溫度最低，位於最深層，接近庫底。

水庫層化發生的原因為水溫導致的水密度變化，溫度高的水密度低，較輕而浮於表面；溫度低的水密度高，較重則沉於底部，故又稱為熱分層(Thermal Stratification)。水庫在冬季時，由於全水體均為低溫狀態，一旦夏季陽光照射，熱輻射僅使表面水層產生升溫，溫度升高的水浮於表面，和底部受不到陽光照射的低溫水，產生明顯分層，中間則存在變溫層緩衝帶，分層水體間水是停滯(Stagnation)的，僅在自層中流動，不互相混合。層化之發生和水庫深度、水體表面積

及氣候條件有關，較淺的水庫通常不會發生層化狀況。

理想的層化現象的發生有其年週期性，表水層和深水層間之溫差越大，層化現象越穩定；但突發性的短期氣候條件，會影響分層狀況，例如，連續熱浪來襲，會使表水層厚度增加，固有的分層狀況改變；颱風暴雨致進流量增加，則視進流流向，破壞層化狀況。

一般而言，伴隨層化水庫的厭氧狀況水質問題有臭味(硫化氫)、鐵及錳釋出等。另也可能因表層水藻類死亡落底，使底泥累積大量的有機物(Organics)，另硝酸鹽亦會還原成氨而釋出，也有底泥中的磷等營養源因層化影響，而有濃度增高的現象。

理想的水庫層化之發生是季節性的，非層化季節會產生翻混。圖 1 的例子，夏冬兩季會產生層化現象；春秋兩季則會產生翻混現象。全球水庫之翻混現象，會隨水庫大小、蓄水深度、所處地理區域及氣溫狀況等而不同。

作為飲用水水源的水庫，應密切監測層化狀況，因氣候環境會造成層化狀況變溫層及深水層的移動或擴張，導致水庫放流水水質不佳，而影響下游淨水場的處理及河川生態。

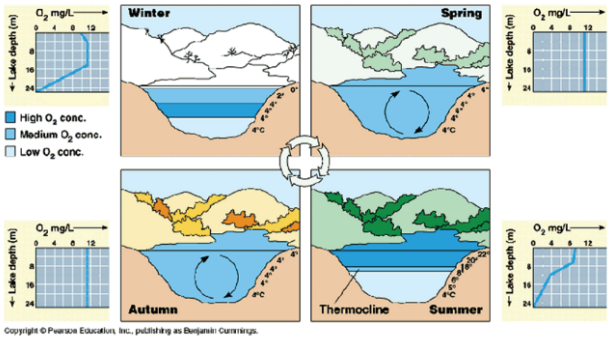


圖 1　典型水庫翻混現象示意圖[7]

(三)翡翠水庫之翻混模式

翡翠水庫翻混現象受到氣候事件的影響極大，如颱風暴雨高濁度及寒流等天氣事件，上游入流水溫會影響水庫水體之密度流狀況，而造成不同狀況之翻混。Fan(2008)於 2004 年 1 月至 2005 年 3 月，每週於翡翠水庫大壩，進行垂直深度採樣檢測，並結合氣象水文等資料進行分析，發現該研究期間水庫底層水溫為穩定低溫狀態，而表水則隨季節氣溫變化，層化現象(表水水溫和底層水溫出現明顯差異)出現於 2 月至 11 月，如圖 2 所示；因氣候事件驅動翻混水理模型，如圖 3 所示。大致而言，夏秋兩季的颱風，挾帶暴雨，水庫上游入流為，水溫較水庫水體表水溫度低，但比底層水溫度高，及溶氧量較底層水高的水，由於水溫導致之密度差異，會進入水庫水體中層，但不會使底部水溶氧增加。而冬季寒流發生時，東北季風帶來雨量，入流水溫較水庫整體水溫為低，因水之密度較高，故直接流入水庫底層，提升底層水之溶氧量。此水理模型可充分解釋北水處 110 年 1 月水黃事件之發生，由於當時寒流發生連續低溫，上游入流高溶氧水直接進入水庫底部，將原層化致厭氧狀況之底層水，往上推移，造成中層排放口排放的水為缺氧高溶解錳狀態。

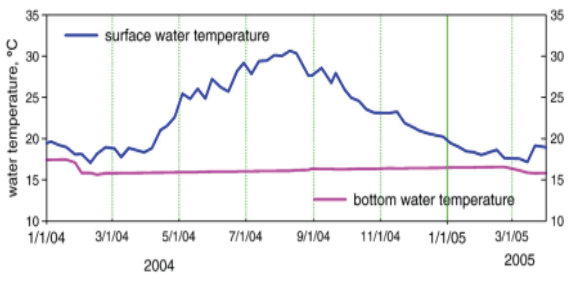


圖 2　翡翠水庫表水及底層水溫度變化[9]

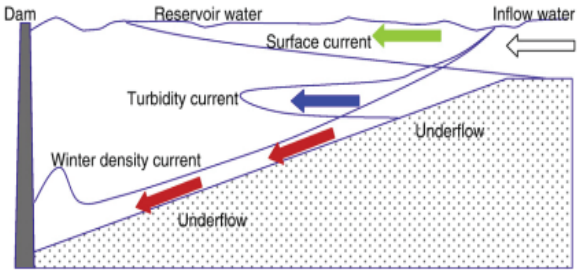


圖 3　翡翠水庫氣候趨動水理模型[9]

(四)錳對人體健康之影響

錳是人體存活成長的基本元素，因人體酶的作用需要錳或靠錳活化。錳存在很多一般食物中，故食物是人體最高的暴露途徑，一個成人每天從飲食中攝取 0.7~10.9 mg 錳，故不易產生錳缺乏症。每天從飲水攝取中攝取 20 μg 錳；從空氣中平均攝取 0.04 ng 錳。錳的不良健康效應來自過度攝入或暴露，文獻記載，因工作場所空氣中過高濃度的錳粉塵，會導致神經系統疾病，稱為「錳中毒(Manganism)」，產生類柏金森症狀(Parkinson-like Syndrome)，不可逆症狀包括衰弱、食慾不振、肌肉痠痛、肢體動作遲緩、面部表情僵硬等。

正常人攝入體內的錳，大部分會隨糞便排出，小部分則隨尿液排泄，但年幼、老人或有肝臟疾病的人，吸收錳狀況會較嚴重。目前無任何研究顯示錳會致癌，美國環保署(USEPA)針對避免錳產生神經性疾病，公佈飲用水終身健康建議值(HA)為 0.3 mg/L；同時公佈 1 日及 10 日急性暴露健康建議值為 1.0 mg/L；考量嬰幼兒吸收及排泄能力及母乳與奶粉含錳狀況，小於 6 個月嬰幼兒，10 日急性暴露健康建議值為 0.3 mg/L。

(五)飲用水水質標準錳之訂定

世界衛生組織依毒理資料每日最高容許攝取量(Tolerable Daily Intake ,TDI)為 0.06 毫克/每公斤體重，計算出健康允許濃度準則值(Guideline Value)為 0.4 毫克/公升，惟考量飲用水於此高濃度錳下，水色早已為消費者察覺，故建議仍以 0.05mg/L 為消費者可接受濃度。

美國環保署將錳訂於非強制性之國家二級標準，考量水色等美味(Aesthetic)問題，濃度限值為 0.05 mg/L。澳洲飲用水指引(Australian Drinking Water Guidelines)錳指引值依健康(Health)及美味(Aesthetic)分別訂定，分別為 0.5 mg/L 及 0.1 mg/L，並註明>0.1 mg/L 會導致味道(Taste)及染色(Stain)，最好低於 0.05 mg/L。歐盟飲用水指引(EU Drinking Water Directive)將錳訂為指標參數(Indicator Parameter)，參數值訂為 0.05 mg/L。我國飲用水水質標準，則將錳訂於「影響適飲性物質」，最大限值訂為 0.05 mg/L。

綜上，飲用水較不可能常態性出現高濃度錳的狀況，飲用水水質標準中錳之訂定，仍以適飲性為考量，普遍訂為 0.05 mg/L。

(六)飲用水錳之處理方法

1.錳化學(Manganese Chemistry)

要瞭解錳的處理應先瞭解錳化學，錳化學非常複雜，含有不同的氧化態，2 價錳和 7 價錳為溶解態；4 價錳為固體態，圖 4 錳的普爾貝圖(Pourbaix Diagram；電位-pH 圖)顯示，要將 2 價錳氧化成 4 價錳(即二氧化錳固體)，需較高的 pH 值，及正值且狹範圍的氧化還原電位，否則固態二氧化錳很容易又還原成溶解態。

自來水淨水場原水中最主要存在二價錳(Mn^{+2})，然隨著水中溶氧及 pH 的變化，亦可能存在膠體態及固體態錳，故去除處理程序可能結合氧化、吸附及過濾等。去除效果

會和水中錳的型態、濃度、水質化學及選擇的處理程序有關。

最常用於飲用水水源去除錳的方法有氧化過濾法(Oxidation/Filtration)及吸附氧化法(Adsorption/Oxidation)，前者為以強氧化劑氧化溶解錳成非溶解性者，再以物理性固液分離去除方式(如過濾)去除；後者為以濾料(如以綠砂(Greensand)被覆氧化錳)吸附溶解性錳，後再以氧化將溶解錳氧化成非溶解性。幾種常見錳去除方法如後。

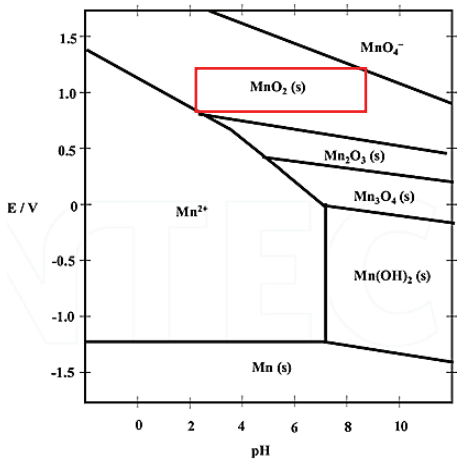


圖 4　錳之普貝爾圖[5]

2.原水控制法

地面水源(如水庫湖泊)控制進淨水場原水中溶解錳的濃度，可以氣曝(Aeration)方式為之，如水庫深水層因溶氧降低，底泥釋出溶解性錳，可以氣曝器(Aerator)將氧氣或含溶氧較高之表面水，打入深水層，使與之接觸，使溶氧增加，而降低溶解性錳的釋出。

3.化學氧化及物理分離法

使用氧化劑將水中溶解性二價錳，氧化成 MnOx(因氧化後可能產生 3 價及 4 價沉澱，故以此式表示)固體沉澱，然後再利用混凝沉澱等物理分離程序予以去除。此法去除的有效度與氧化劑的氧化能力有關，而氧化能力和水溫、pH、需氧化劑量(Oxidant Demand)、反應時間、水中帶電物質及水的鹼度等均有關。

化學氧化法使用氧化劑包括高錳酸鉀、二氧化氯、臭氧及氯等；使用氧化劑氧化錳時，可能產生小於 1 μm 之膠體顆粒，而較難以去除，故一般建議氧化劑添加於混凝程序前，以使產生之膠體顆粒能以後續之混凝沉澱及過濾程序予以去除。

氯以其經濟及方便加注，故常被使用；若有充足的加氯濃度及接觸時間，可有效氧化錳，但 pH<9.0 氧化速率不佳。以氯氧化 Mn^{+2}，需較長的接觸反應時間(2~3 小時)及較高的 pH(>8.0~9.0)才有效，但配合後端的吸附氧化程序，則能提升去除效果。加氯程序去除錳，若錳以硫酸錳存在，化學劑量(Stoichiometric Dosage)氧化每毫克 Mn^{+2} 需 1.3 毫克氯或 1.36 毫克次氯酸鈉。氯與氨反應生成之氯胺則對錳去除無效。pH 值對反應速率影響很大，相同二氧化錳生成狀況，pH=6.0 需約 12 小時，而 pH=10.0 僅約需幾分鐘。若原水中天然有機物及氨濃度較高，會需要較高需氯量，應考慮加氯導致之消毒副產物(如三鹵甲烷)增加問題。

文獻記載計算添加 1 mg/L 氧化劑，於 pH7.0 時，二價錳被氧化半衰期如表 1，可看出氯相對於其他氧化劑的氧化速率極慢。

表 1　不同氧化劑在 pH=7.0 氧化錳半衰期[6]

氧化劑	T1/2
Cl_2	3.5 天
$KMnO_4$	6 秒
ClO_2	3.5 秒
O_3	26.5 秒

4.吸附氧化(Adsorption/Oxidation)法

以氧化劑氧化水中錳產生自動催化反應(Autocatalytic Reaction)，機制有 3 步驟，第 1 步將二價錳氧化成 MnOx 固體，為速率最緩慢反應;第 2 步 MnOx 固體吸附(Adsorption)二價錳(Mn^{+2})，為最快步驟;第 3 步為氧化劑氧化 MnOx 固體表面吸附的二價錳，為表面催化氧化反應，為中等速度反應。

吸附氧化法係利用自動催化反應，基於過濾濾料表面，存在被覆(Coating)錳氧化物(MnOx)固體,此固體表面可吸附處理水中之溶解性錳，吸附之溶解性錳透過此固體表面之催化作用，使被吸附的溶解性錳，被氧化劑氧化成固體而予以去除。此法濾床操作一段時間後，必須透過反洗將被濾料吸附後氧化的固體清除，再使用過量之氧化劑使濾料表面吸附址再生(產生 MnOx)，故需於原水(過濾前)添加氧化劑，以維持錳氧化物之吸附址功能。吸附氧化法可將錳處理至 0.015 mg/L 之低濃度。

(1)綠砂(Manganese Greensand)

以綠剛石砂(Glauconite Sand)經處理後，表面合成一含錳物質薄層，經氧化劑氧化後後形成 MnOx，具有很強的吸附 Mn^{+2}能力，濾沙有效粒徑 0.30~0.35mm，較石英砂細，過濾時產生的過濾水損較高，一般用於加壓過濾(Pressure Filtration)，處理地下水源中的錳。

(2)傳統濾料被覆錳氧化物(MnOx(s)Coatings on Conventional Filter Media)

傳統濾床使用無煙煤和石英砂為濾料，會吸附水中 Mn^{+2}，透過加氯氧化產生 MnOx 固體表面，反洗操作僅洗掉部分固體,濾床表面維持餘氯 0.5~1.0 mg/L 及 pH 6.0 以上，即可使之再生，產生像綠砂過濾一樣去除錳的效果，稱為天然綠砂效應(Natural Greedsand Effect)。此效應連續操作，可將濾前水錳濃度由 0.5 mg/L 降至 0.015mg/L 以下。此法錳去除發生在濾床上層濾料，且去除能量會隨使用時間之增加而降低，需以更換濾料或加注強氧化劑再生。

Knocke(1991 年) 使用濾料進行管柱試驗，結果顯示，較老化(Aged)的濾料，已發展出 MnOx(s)表面被覆(Coating),有助於催化二價錳的去除。未加氯狀況下，Mn^{+2}之吸附成一次衰減方程式。當水溶液 pH 增加，Mn^{+2}之吸附量明顯增加；濾料表面 MnOx(s)濃度越高，吸附能量越高，吸附速率越快。加氯狀況下，自由餘氯會促進被濾料表面吸附二價錳的氧化，再生濾料表面錳吸附址，增進濾料表面再吸附二價錳的能力。故餘氯在濾料吸附二價錳有明顯角色，會連續再生濾料表面 MnOx(s)表面塗層。

Jones(2012)利用管柱測試及電子顯微鏡觀察(如圖 5)，希瞭解濾料上除累積 MnOx(s)外，鋁的累積是否會對錳之去除造成影響，結果顯示，披覆物質中鋁和錳約存在相當莫爾的量，鋁的累積藉溶解鋁被 MnOx(s)吸附，及膠體及顆粒鋁沉澱於表面沉積兩種機制形成；錳累積同時發生明顯鋁的累積，於濾料介質上鋁的累積對錳溶解錳之去除，無明顯影響。

Goodwill(2006)研究 9 個實際地面水源淨水場濾料狀況，以瞭解濾料特性對溶解錳去除之影響。發現濾料去錳效果與濾料上披覆之氧化錳質量成正比，但每克濾料約 15 毫克披覆以下，去除錳能力和濾料披覆質量成正比；但每克濾料超過 20 毫克披覆，則去

除效果不隨之提升，如圖 6。濾料上披覆之氧化錳質量越高，濾料表面積越高。濾料上披覆錳氧化物量與濾料種類無關。

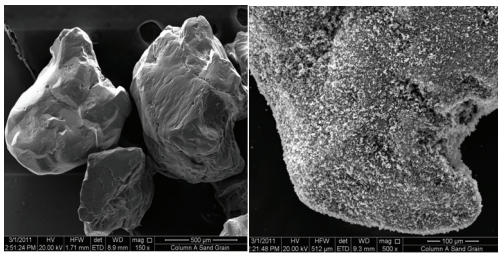


圖 5　濾料掃描電子顯微鏡(SEM)影像(左為原石英砂濾料，右為吸附溶解錳後)[12]

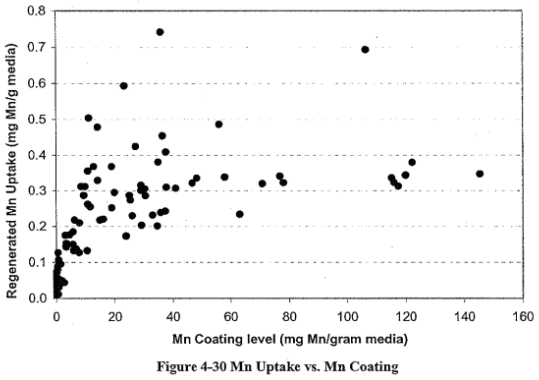


圖 6　濾料披覆與加氯再生後除錳(毫克錳/克濾料)之關係[11]

三、研究方法

本研究以長興淨水場原水，添加不同濃度二價錳(以固體硫酸錳配製)標準溶液，作為試驗原水，以不同前加氯濃度及添加現場混凝劑，在不改變原有混凝 pH 值下，於不同前氯接觸時間，進行杯瓶試驗，以瞭解不同濃度含錳原水，於不同前加氯濃度之氧化去除效果，與沉澱水自由餘氯維持與濁度去除狀況。

(一)前加氯氧化試驗

以杯瓶試驗試驗加氯氧化沉澱去除溶解錳之效果及餘氯消耗狀況，有助於瞭解加氯氧化去除錳時，在何種加氯濃度下，自由餘氯會超出飲用水水質標準上限值 1.0mg/L，實驗步驟如下：

1.以長興場原水分別添加 0.00、0.05、0.10、0.20、0.50、1.0 mg/L 二價錳溶液為試驗原水，每瓶均先取樣檢測溶解錳濃度，添加淨水場現場使用 PACl 混凝劑量(8 mg/L)及前加氯濃度(1.0 mg/L)，以淨水場實際混沉條件(快混 120rpm 7min；慢混 30rpm 25min；沉澱 180min)，進行杯瓶試驗，取沉澱水上澄液測濁度、自由餘氯、pH；另取沉澱水上澄液另以 0.45 μm 濾紙過濾後，濾液檢測錳濃度。

2.同 1 步驟，前加氯濃度分別變更為 1.3 ppm、1.5 ppm、2.0 ppm 及 3.0 ppm，進行相同條件杯瓶試驗試驗及取樣檢測。

(二)降載處理試驗

以長興場原水分別添加 0.00、0.05、0.10、0.20、0.50、1.0 mg/L 二價錳溶液為試驗原水，分別以前加氯濃度 1.3 ppm 及 2.0 ppm，及以表 2 加氯接觸時間，進行杯瓶試驗。沉澱水上澄液檢測濁度、自由餘氯及 pH，混凝水(慢混後)及沉澱水上澄液另以 0.45 μm 濾紙過濾後，檢測錳。希瞭解降低處理水量(即增加接觸時間)，是否有助於溶解性錳之去除。

表 2　降載處理試驗杯瓶試驗接觸時間

組別	快混(分)	慢混(分)	沉降(分)	總接觸時間(分)
1	10.5	37.5	270	318 分 (5.3 小時) (降 1/3 處理量)
2	14	50	360	424 分 (7.1 小時) (降 1/2 處理量)

(三)鐵錳併存原水試驗

實際水黃事件發生時，原水中約含有 0.3ppm 的溶解性鐵與錳並存，為瞭解溶解鐵的存在，是否有有助於溶解錳的去除，及鐵本身之去除效果。以長興場原水分別添加 0.00、0.05、0.10、0.20、0.50、1.0mg/L 二價錳溶液，且均加入 0.3 ppm 的二價鐵(以硫酸鐵固體配製)為試驗原水，先檢測鐵及錳濃度；溶解性二價鐵和氯之氧化反應為 $2Fe^{+2}+Cl_2+6OH^-\rightarrow 2Fe(OH)_3+2Cl^-$，故化學計量上 1 ppm 鐵會消耗 0.64ppm 的氯，若原水中含有 0.3 ppm 鐵，則理論上會消耗 0.192(約 0.20) ppm 的氯。故分別設計以前加氯濃度 1.3 ppm 及 2.0 ppm，經杯瓶試驗混沉程序(快混 120rpm 7min；慢混 30rpm 25min；沉澱 180 min)，沉澱水上澄液檢測濁度、自由餘氯及 pH，另以 0.45 μm 濾紙過濾後，檢測鐵及錳，以瞭解鐵錳之共沉去除效應。

(四)水質分析方法

本研究測定鐵、錳、濁度、自由有效餘氯、pH 等水質項目，均依我國環保署公告之檢驗方法進行檢驗。

錳、鐵檢測水樣均先以孔徑 0.45 μm 之濾紙過濾後，加入超純硝酸使水樣 pH 值小於 2，再以感應耦合電漿原子發射光譜儀檢測溶解性錳鐵。錳、鐵之方法偵測極限分別為 1.81 μg/L 及 0.26 μg/L。

四、結果與討論

(一)不同濃度溶解錳原水加氯氧化結果

不同濃度溶解錳原水，以不同濃度前加氯氧化，模擬於長興淨水場實際混凝沉澱滯留時間(總滯留時間 212 分鐘，約 3.5 小時)下，進行杯瓶試驗，混凝時 pH 值由加氯 1.0mg/L 時之 7.3 略提升至加氯 3.0 時之 7.6，溶解錳去除結果，如圖 7 結果所示。可看出前氯 1.5 mg/L 以下，溶解錳去除率約 10%以下。加高前氯濃度至 2.0~3.0mg/L，對 200 μg/L 以下濃度溶解錳去除有幫助，100 μg/L 以下錳去除率可提升至 15~30%，200 μg/錳去除率僅可提升至約 15%，500 μg/L 以上錳去除則幾乎無效。原水中錳濃度越低，隨前加氯濃度增加而增加去除率之效果越明顯；錳濃度越高則無此效應；且即使低濃度 50 μg/L 錳，在前加氯增到 3.0 mg/L，也僅有約 30%去除率；100 及 200 μg/L 錳，僅有約 20%去除率，難以去除到水質標準限值(0.05 μg/L)以下。故在淨水場日常操作混凝 pH 值下，較高濃度錳(≥100 μg/L)原水，以增加前加氯將錳氧化成固體，予以混凝沉澱去除，是無效的策略。

將沉澱水錳濃度對氯錳質量比(Cl/Mn)作圖，如圖 8 所示，呈現乘冪關係，相關性佳，顯示氯錳質量比要大於約 25，才能將原水中的錳，去除至低於飲用水水質標準限值(0.05mg/L)。

(2)氧化耗氯及沉澱水餘氯狀況

實驗結果顯示，以氯氧化錳之耗氯濃度，隨原水中溶解錳的濃度增加，並未有增加的狀況，反而有略微降低或持平之狀況，耗氯濃度約在 0.2~0.4 mg/L 之間，耗氯最高者為原水錳 100 μg/L 以下之低濃度狀況，此與去除率顯現結果相符。

不同前加氯濃度，氧化 50~1000 μg/L 溶解錳，混凝沉澱後，沉澱水餘氯狀況，如表 3 所示，前加氯 1.3 mg/L 以上濃度，沉澱水餘氯(及出水餘氯)即有可能超過飲用水水質標準自由餘氯上限值 1.0mg/L。對照圖 7，前氯濃度 1.3 mg/L 以下，不同濃度溶解錳下，最高僅有約 10%去除率，且發生在溶解錳 50~100 μg/L 下，去除效果不佳。

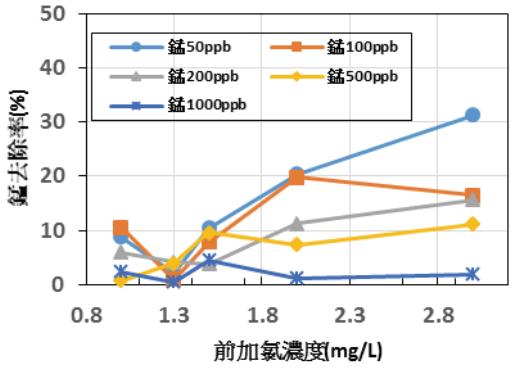


圖 7　前加氯濃度對對不同濃度溶解錳去除率之影響(pH 7.3~7.6)

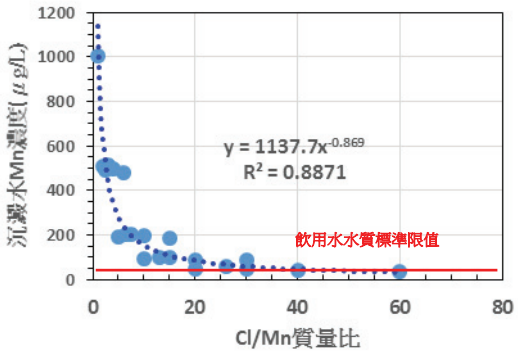


圖 8　氯錳質量比對沉澱水溶解錳濃度之影響(全載處理水量，pH 7.3~7.6)

(3)以降低處理水量去除原水中溶解錳

高濁度原水處理有降低處理水量之應變作法，探討對溶解錳之去除是否有效。以杯瓶試驗模擬長興場降低 3 分之 1 處理水量，加氯氧化混凝沉澱總滯留時間 318 分鐘，約 5.3 小時；及降低 2 分之 1 處理水量，加氯氧化混凝沉澱總滯留時間 424 分鐘，約 7.1 小時，沉澱水錳濃度對氯錳質量比之結果，如圖 9 所示。可看出在 pH 7.2~7.3 下，不論全載或降載處理，沉澱水錳濃度要低於飲水水質標準限值，氯錳比均須達 25 以上。降載 3 分之 1 對沉澱水錳濃度之降低能力，在氯錳質量比 10~40 之間，增加約 10.0~17.0 %；而降載 2 分之 1 下，增加約 17.8~22.6%，均極為有限。若處理含 0.3 mg/L 溶解錳的原水，在添加前氯 12 mg/L(氯錳質量比 40)，降載 3 分之 1 之狀況下，沉澱水中錳才僅能處理到 0.25mg/L；而降載 2 分之 1 狀況下，沉澱水中錳僅達 0.23 mg/L，均超過飲用水水質標準限值 0.05 mg/L。故在不調高混凝 pH 值下，淨水場降低處理水量，以求增加溶解錳的去除，不是一個有效的策略。

表 3　不同前加氯濃度沉澱水餘氯狀況

前氯 (mg/L)	1.0	1.3	1.5	2.0	3.0
沉澱水餘氯 (mg/L)	0.2 | 0.4	1.0 | 1.1	1.2 | 1.3	1.4 | 1.6	2.3 | 2.5

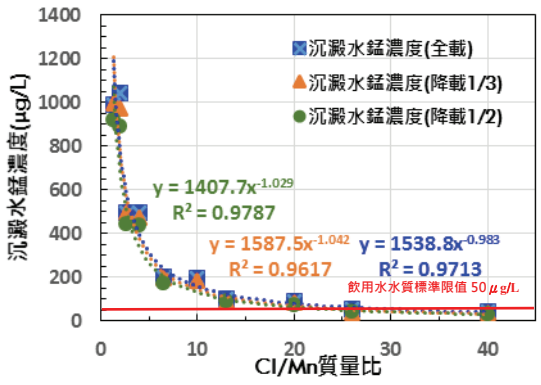


圖 9　降低處理水量對加氯氧化沉澱水錳濃度之影響(pH 7.2~7.3)

(4)原水中同時含溶解性二價鐵

對溶解錳去除之影響模擬水黃事件發生真實原水狀況，不同濃度含錳原水中，均添加0.3 mg/L 二價鐵(Fe^{+2})，於前加氯 1.3 mg/L 及 2.0 mg/L 狀況下，以 PACl 為混凝劑，進行杯瓶試驗，希瞭解原水同時存在溶解性鐵及錳，是否發生共沉(Coprecipitation)效應，而有助於溶解錳之去除。試驗結果如圖 10。圖中比較含鐵與不含二價鐵原水之錳之去除率，顯示含二價鐵原水，在不同錳濃度狀況下，均呈現提升錳去除率之現象，且錳濃度越低提升越多，前氯濃度越高亦提升越多。0.1 及 0.2 mg/L 錳的狀況，前加氯 2.0 mg/L，混凝沉澱後，沉澱水溶解錳可處理至 0.06 及 0.15 mg/L。推論原水同時含鐵及錳，前氯氧化及混凝過程透過氫氧化鐵的產生，可對二價錳離子產生吸附，而一併共沉去除。

前述前加氯與混凝沉澱過程，由於鐵的氧化速率極快，鐵的去除率可達 96%~100% ；pH 維持在 7.4；於前加氯 1.3 mg/L 時，沉澱水餘氯約 0.5 mg/L；前加氯 2.0 mg/L 時，沉澱水餘氯約 0.9~1.0 mg/L；沉澱水濁度均在 1.0 NTU 以下，可維持很好的濁度去除及自由餘氯維持狀況。

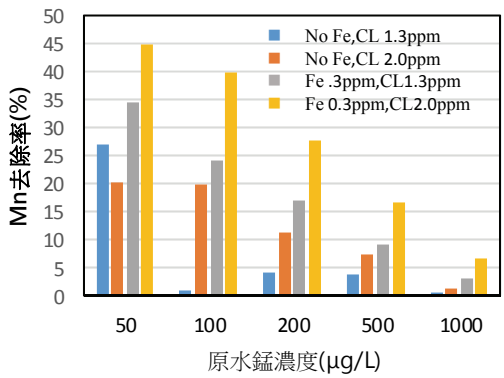


圖 10　原水中同時含鐵於不同前氯下對錳去除之影響(pH 7.4)

五、結論與建議

含溶解錳原水之加氯氧化去除，由實驗結果，得到以下結論：

1.原水中溶解錳以前加氯氧化及混凝沉澱過濾去除方式，由於在一般中性水質下，氧化速率很慢，以杯瓶試驗長興場混沉接觸時間(約 3.5 小時)，加氯量要達氯錳質量比 25 以上，沉澱水錳濃度才可能低於我國飲用水水質標準限值 0.05mg/L(50 μg/L)以下。

2.在 1.0~3.0 mg/L 不同濃度前氯氧化下，耗氯濃度並未隨原水中錳濃度(50~1000 μg/L)增加而增加，反而持平或略減。而前氯添加濃度達 1.3mg/L 以上，沉澱水餘氯即有可能超出我國飲用水水質標準自由餘氯上限值(1.0 mg/L)，故前加氯受限於飲用水水質標準餘氯上限值，前加氯氧化最高只能處理含 0.065 mg/L 錳濃度的原水，效果非常有限。

3.以降低處理水量，增加氧化接觸時間，增進錳的去除，在降低 3 分之 1 處理水量(混沉接觸時間 5.3 小時)及降低 2 分之 1 處理水量(混沉接觸時間 7.1 小時)下，溶解錳去除增進效果極微，並非一個有效的應變處理策略。

4.原水同時含溶解性鐵及錳時，鐵的存在有助於錳去除率之提升，適當加氯狀況下(2.0 mg/L)，鐵可在淨水程序幾乎完全去除，沉澱水自由餘氯可落於水質標準限值內，0.1mg/L 錳可處理至 0.06 mg/L，接近水質標準限值。

5.既有傳統淨水程序，在不改變混沉 pH 及另添加額外藥劑狀況下，前氯氧化及增加接

觸時間(降低處理水量)，對溶解錳之去除效果極有限，最高可去除原水中約 0.1mg/L 錳，以達符合飲用水水質標準自由餘氯目標。惟快濾池或可成為最後一道處理防線。以文獻提及傳統濾床老濾料(無煙煤或石英砂)之吸附氧化(Adsorption /Oxidation)法，可產生天然綠砂效應(Natural Greensand Effect)，去除錳效果良好。或可為傳統淨水處理去除溶解性錳之有效可行方案，惟需進一步試驗。

參考文獻

1.Wong Joseph M.,Chlorination-filtration for iron and manganese removal,J.AWWA,1984.

2.Knocke Willion R. et al.,Removal of soluble manganese by oxide-coated filter media:sorption rate and removal mechanism issues 83:08，J.AWWA,1991.

3.Water quality & treatment A handbook on drinking water,6th edition,AWWA,2011，p.7.31~7.37.

4.Hao Oliver J.,et.al.,Kinetics of manganese (Ⅱ) oxidation with chlorine., J.Environ.Eng. 1991 .117:359-374.

5..Manganese in drinking water document for public Consultation.Health Canada.,2016.

6.Allard S.et.al.,Oxidation of Manganese(II) during Chlorination:Role of Bromide .Environment Science & Technology,2013.

7.Seasonal Lake Stratification ,Water Quality Assessments – A Guide To Use of Biota, Sediments And Water in Environmental Monitoring. Second Edition,1992 .

8.Drinking Water Health Advisory for Manganese，EPA-822-R-04-003,USEPA,2004.

9.Cheng-Wei Fan & Shuh-Ji Kao, Effects of climate events driven Hydrodynamics on dissolved oxygen in a subtropical deep reservoir in Taiwan.,393, J.Science of Total Environment.,2008.

10.Hamilton Geoff et.al.,Filtration and Manganese Removal. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA.,62.7,2013.

11.Joseph Goodwill, Characterization of Manganese Oxide Coated Filter Media., University of Massachusetts – Amherst,2006.

12.Andrew Jones, The Role of Aluminum within MnOx(s)-Coated Filtration Media in Drinking Water Treatment., Virginia Polytechnic Institute and State University,2012.

作者簡介

薛志宏先生

現職：臺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

張美惠小姐

現職：臺北自來水事業處二級工程師

專長：淨水處理、水質檢驗

張美鳳小姐

現職：臺北自來水事業處三級工程師

專長：水質檢驗

陳宏奕先生

現職：臺北自來水事業處四級工程師

專長：水質檢驗

廖冠仲先生

現職：臺北自來水事業處四級工程師

專長：水質檢驗

鏡面淨水場原水水質加藥模式之探討

文/陳伊玟、吳政儒、鄭堡文、楊昭端、黃文惠

摘要

鏡面淨水場原水存在有高有機物、高錳等水質問題，高濃度有機物不僅會引起水中色度、外觀與適飲性，更會增加混凝劑之使用劑量，影響淨水操作效能，也降低水中錳、氨氮去除率；有機物經加氯消毒後，也易生成總三鹵甲烷等消毒副產物，影響飲用水安全。本研究計畫以瓶杯試驗進行加強混凝、調整混凝劑與前加氯濃度及原水加酸測試，配合淨水操作程序改善，強化處理效能，探討總有機物、錳、氨氮之去除率；基於「水安全」之風險管理，亦針對總三鹵甲烷生成潛勢及加強混凝後所增加清水鋁殘留風險進行評估；另以監測儀器與紅外線測定法進行總有機碳數據相關性研究，希冀提供操作人員即時加藥參考。

研究結果顯示，提升硫酸鋁加藥量至 70 mg/L 時，原水錳去除率可達約 73 %，總有機碳去除率也可達約 25 %，配合前加氯 5 mg/L 時，氨氮去除率可達 93 %以上。在總三鹵甲烷生成潛勢試驗方面，總三鹵甲烷由 60 μg/L 增加至 114 μg/L，上升約 90 %，存在超標之風險。本研究亦以監測儀器與紅外線測定法探討總有機碳數值相關性，雖然因數據不足以致兩組數據略有差異性，但數據趨勢仍呈現一致性，未來可以持續累積數據進行比對，有效預估總有機碳數值，提供操作即時加藥參考。

建議鏡面淨水場在監測總有機碳數值時，若發現有機物測值已接近法規值，淨水操作可以採用加強混凝方式，提升硫酸鋁加藥量，搭配串聯操作模式，並於前段加強混凝提高混凝劑量，前加氯移至中段流程，延長氧化反應時間，提高去除率。除了上述加藥操作模式之改變外，持續引入南化給水廠清水稀釋，以降低因加強混凝所增加之清水鋁之殘留風險及配水管網之總三鹵甲烷超過標準之風險。另適時排放鏡面水庫底層水，降低水庫原水有機物濃度，乃是最佳之改善策略。

關鍵字：總有機碳、錳、氨氮、總三鹵甲烷、加強混凝

一、前言

鏡面淨水場因集水區環境及出水量少等因素，加上其水源來自鏡面水庫屬優養化水庫，長期存在高有機物、高錳等水質問題。近 2 年該淨水場存在原水總有機碳超標之風險，109 年 2 月原水總有機碳 2.1 mg/L，109 年 5 月昇高至 4.8 mg/L，超出飲用水水源水質標準 4.0 mg/L，5 月 22 日一場豪雨，109 年 6 月再檢測總有機碳又降至 2.8 mg/L，唯 109 年 7 月再追蹤，總有機碳又再次昇高至 4.2 mg/L，再次超出飲用水水源水質標準，因此依飲用水水源水質標準第七條規定，啟動每十五日至二十五日檢驗一次，依檢驗之六次算術平均值判定該水源水質是否符合標準。經連續檢驗之六次算術平均值 2.8 mg/L，低於飲用水水源水質標準，仍可作為飲用水水源使用。110 年 4 月原水總有機碳

上升至 5.6 mg/L，連續 2 年於枯水期發生超標之況，顯示鏡面淨水場原水總有機碳超標可能成為常態。總有機碳為評估水中有機物之重要指標，高濃度有機物不僅會引起水中色度、外觀與適飲性，更會增加混凝劑之使用劑量，影響淨水操作效能，也降低水中錳、氨氮去除率，亦可能於加氯消毒後，增加總三鹵甲烷等消毒副產物之風險，影響飲用水安全性。

110 年 1 月台北市自來水事業處，發生因低溫引發翡翠水庫底層翻攪現象，使得原水含錳過高，且未能於淨水處理過程有效處理，以致用戶端出現超「錳」的黑濁自來水事件。鏡面淨水場曾於 106 年 4~5 月枯水期間，原水錳含量高達 0.402 mg/L，用戶端發生黑水事件，緊急暫停出水。鏡面水庫長期監測結果為優養化水庫，水庫底層因微生物分解作用，使其呈現厭氧狀態，並將 Mn^{4+} 還原成 Mn^{2+}，造成原水中錳含量大幅增加，如再遇原水含高有機物，影響前加氯之氧化作用，無法將錳離子完全氧化，穿透淨水單元之錳離子於管網中後氧化絮凝輸送至用戶端，「黑水」恐再現。

綜合以上因素，本研究以瓶杯試驗進行加強混凝、加酸測試，並找出合適前加氯濃度，以求降低水中總有機碳濃度，進而提升錳、氨氮去除率；總三鹵甲烷生成反應時間較慢，於配水管網中隨接觸反應時間持續增加，因此本研究也模擬配水管網反應時間，測定水中總三鹵甲烷含量，並進行總三鹵甲烷生成潛勢實驗，了解加氯消毒後總三鹵甲烷增加風險，以建立合適淨水操作模式，以提供操作單位淨水處理參考。

鏡面淨水場淨水流程是由水庫經重力流進入淨水場。如圖 1 所示，水處理系統共有兩線，處理流程包括：水躍池、膠羽池、沉澱池、快濾池及清水池等單元，以兩線並聯處理流程時間約 4 小時，若以串聯處理流程時間約 6~8 小時。淨水場使用之混凝劑為液體硫酸鋁，並使用次氯酸鈉氧化及消毒。當鏡面淨水場原水錳偏高時，為增加淨水流程沉澱時間，會採兩線系統串聯運作，其流程為：二期水躍池→二期膠羽池→二期沉澱池→一期膠羽池→一期沉澱池→快濾池→清水池。串聯運作時最高出水量為 1,800 CMD，不足水量由南化給水廠支援。南化給水廠清水由專管分別進入 300 m^3 及 1000 m^3 清水池內，再由抽水機輸送至配水管網。

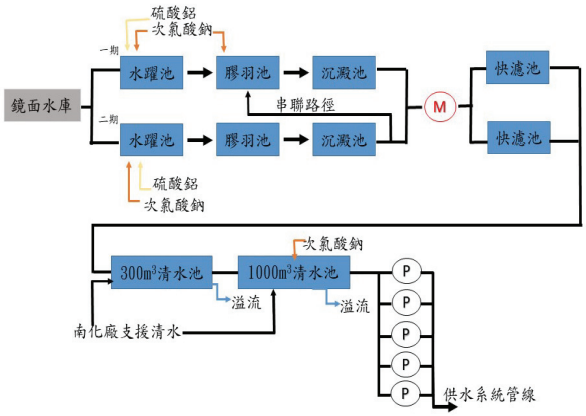


圖 1　鏡面淨水場淨水流程示意圖

鏡面淨水場近十年原水水質數據分析如圖 2 所示，在枯水期間因水庫進水量不足，優養化易發生，水庫中、底層原水錳升高，偶也發生氨氮偏高。水中錳含量過高時，可能會導致水中色度提升、產生金屬臭味，也會引起管線內壁沉積錳氧化物而降低輸水能力，影響用水品質，因此降低錳含量為淨水場操作重要目標[1]。

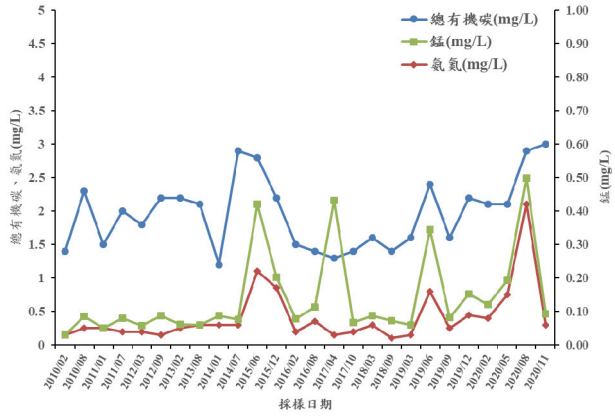


圖 2　鏡面淨水場水質數據變化趨勢圖

另一方面，當水庫水體周轉率減少時，經上游土壤中溶出或經生物分解之天然有機物(Natural organic matter, NOM)濃度也會增加，加上集水區盛行農作，經農藥或肥料釋出之人工合成有機物也可能被帶入水庫中，導致水體有機物濃度升高。由於存在水中之有機物質種類繁多，成分複雜，不容易詳細鑑定，故實務上常以總有機碳(Total organic carbon, TOC)、UV_{254}分析代表水體有機物濃度。總有機碳代表水中有機物所含碳素之量，是顯示水中有機物含量多寡之簡便有效的方法[2]，根據圖 2 也可看出當枯水期總有機碳濃度也有升高趨勢。水體中有機物過高時，會引起色度並影響水質外觀及適飲性，同時會增加淨水處理中混凝劑使用量，由於鏡面淨水場使用液體硫酸鋁混凝，若提高混凝劑用量，可能導致清水鋁有超過標準的風險。高濃度有機物也會消耗次氯酸鈉用量，降低溶解錳及氨氮氧化力，影響其去除率；有機物經過加氯消毒後亦會產生影響健康物質的消毒副產物，例如：總三鹵甲烷(Trihalomethanes, THMs)、鹵乙酸類(Haloacetic acids, HAAs)等，影響飲用水安全。

為有效去除水中顆粒固體及有機物，目前在自來水工程中常用之方法包括混凝沉澱法、薄膜分離法、生物氧化法、化學氧化法。其中混凝沉澱法是去除有機污染物去最常見的方法[3]，一般無機金屬混凝劑，如鋁鹽或鐵鹽，針對水體中大分子有機物(例如：腐質酸、黃酸)等主要是透過電價中和-沉降或吸附機構(Charge neutralization - precipitation)，小分子有機物多以吸附(Absorption)或共沉降形式(Coprecipitation)與膠羽作用(Flocculation)。

傳統淨水程序中之混凝主要用於去除濁度之膠體(Colloid)，加強混凝是指去除水中溶解性有機物，需在加量之混凝劑及低 pH 值水質條件下進行，根據國外飲用水處理通則(Total organic carbon guidance manual)加強混凝去除總有機碳之要求，如表 1 所示，當總有機碳濃度低於 4.0 mg/L，去除率應達 15 % ~ 25 %，若總有機碳達 4.0 mg/L，去除率應達 25 % ~ 35 %[4]。

表 1　加強混凝總有機碳去除率(%)之要求

原水總有機碳濃度 (mg/L)	原水鹼度(mg/L as $CaCO_3$)		
	0-60	>60-120	>120
>2.0-4.0	35.0	25.0	15.0
>4.0-8.0	45.0	35.0	25.0
>8.0	50.0	40.0	30.0

美國環保署為避免添加過量混凝劑，亦針對原水鹼度訂定最高之 pH 值要求，如表 2 所示，鏡面場原水鹼度約為 100~140 mg/L

時，加強混凝目標 pH 值要求約訂於 pH 7。

表 2　加強混凝之最大 pH 值要求

原水鹼度(mg/L as $CaCO_3$)	最大 pH 值
0-60	5.5
>60-120	6.3
>120-240	7.0
>240	7.5

二、研究方法

(一)總有機碳測定

本研究測定總有機碳使用紅外線測定法及監測儀器測定法。紅外線測定法依 NIEA W532.53C 過氧焦硫酸鹽加熱氧化/紅外線測定法檢測，監測儀器測定使用總有機碳監測儀器同步比對水樣總有機碳濃度。本處使用之廠牌型號為 Seres TOC Evolution Analyzers，其分析原理是將水中有機物氧化成二氧化碳並偵測二氧化碳濃度值。

(二) UV_{254} 值測定

UV_{254} 也是評估水中有機物濃度的常見指標，其原理為利用有機物分子結構內之苯環及共軛雙鍵，對於 UV 在波長 254 nm 時具有較強吸收值，因腐植質類較非腐植質類天然有機物有較多之苯環及共軛雙鍵分子結構，故具有較高之 UV_{254} 值，因檢測簡便快速，故常用於綜合性評估水中有機物濃度的指標[5,6]。本研究使用 PerkinElmer LAMBDA 25 UV/Vis Spectrophotometer 可見光/紫外光光譜儀執行 UV_{254} 值測定，檢測波長設定為 254 nm。

(三)加強混凝瓶杯試驗評估

本研究以瓶杯試驗進行加強混凝，以找出最適加藥模式。瓶杯試驗條件以鏡面淨水場現有操作模式模擬，分為兩組實驗進行，第一組試驗目標是找出最適混凝劑劑量，本研究依鏡面場瓶杯試驗條件進行，後續再靜置約 3 小時後，取原水、6 杯水樣，檢測錳、氨氮、鋁、總有機碳、UV254。第二組杯瓶試驗目標是最適混凝劑劑量後找出最適前加氯量，本研究以第一組試驗結果，固定最適混凝劑劑量，再分別添加 3、4、5、6、7 mg/L 之加氯量，加氯後每隔靜置第 2、3、4、5、6 小時後，檢測自由有效餘氯、總餘氯(結合餘氯=總餘氯-自由有效餘氯)，並在靜置第 6 小時後，檢測原水及各加氯量水樣之殘餘氨氮濃度。

(四)總三鹵甲烷測定與生成潛勢試驗

本試驗以原水，加入 70 mg/L 硫酸鋁混凝，依鏡面場瓶杯條件混凝靜置後，取上澄液加入 5 mg/L 加氯量，並靜置 6 小時，依環檢所公告之「NIEA W785.57B 水中揮發性有機化合物檢測方法－吹氣捕捉/氣相層析質譜」進行總三鹵甲烷分析。在總三鹵甲烷生成潛勢試驗方面，取鏡面場過濾水加入 8 mg/L 加氯量，分別在室溫下放置反應 7 天，確保水中自由有效餘氯仍有 1~5 mg/L，再進行總三鹵甲烷分析。

三、結果與討論

(一)決定最適加藥量之瓶杯試驗

本次取用之鏡面淨水場原水濁度為 6.48 NTU，pH 值為 7.84，依該場硫酸鋁混凝劑加藥曲線建議加藥量約為 16 ppm，為加強混凝，提高硫酸鋁加藥量依序為 20、30、40、50、60、70 mg/L，依瓶杯試驗，隨後取原水

及 6 杯上澄液分別量測濁度、pH 值、鹼度。模擬實場流程靜置後，續取原水及各杯上澄液，檢測錳、氨氮、鋁、總有機碳、UV_{254}。如表 3、圖 3 所示，硫酸鋁加藥量達 50~70 mg/L，錳去除率最高可達 75 %，然而氨氮去除率不佳，最高僅達 26.7 %。另以總有機碳、UV254 檢視水中有機物去除效果，由圖 4 可看出有機物濃度隨著加藥量增加而下降，當硫酸鋁加藥濃度為 70 mg/L，總有機碳去除效果可達 24.7 %。然而過量加藥導致殘餘鋁超標，因此後續再以原水調降 pH 值測試，試驗能否增加總有機碳去除率並降低硫酸鋁使用量。

表 3　鏡面淨水場加藥測試與錳、氨氮、有機物去除率

硫酸鋁加藥量 (mg/L)	20	30	40	50	60	70
濁度(NTU)	6.42	6.82	4.14	1.99	1.46	1.28
pH 值	7.59	7.45	7.32	7.22	7.11	7.05
總鹼度(mg/L)	102	99	93	88	82	80
鋁(mg/L)	0.90	1.19	1.12	0.92	0.71	0.56
錳去除率%	32.2	33.2	63.5	69.4	75.0	73.0
氨氮去除率%	15.6	6.7	15.6	24.4	26.7	24.4
總有機碳去除率%	4.3	6.1	11.9	13.5	17.0	24.7
UV254 去除率%	0.0	3.9	26.6	38.6	49.8	54.9

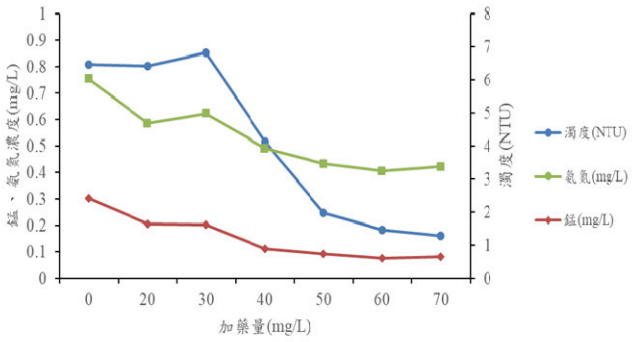


圖 3　鏡面淨水場加藥測試與濁度、氨氮、錳濃度變化

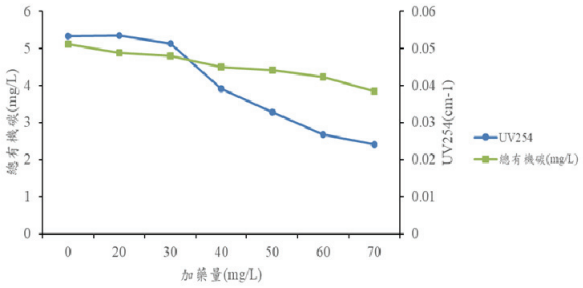


圖 4　鏡面淨水場加藥測試與有機物濃度變化

(二)最適前氯濃度試驗

以次氯酸鈉為前氧化劑，可以增加錳、氨氮去除率[5]，但在原水存在高濃度有機物情況下，有機物會增加前氯耗氯量，而降低錳、氨氮去除率。若直接提升前氯量，可能導致前氯過高，導致清水與配水端總三鹵甲烷有升高風險[7]。為避免添加過量前氯，本階段試驗取鏡面淨水場原水，加入不同濃度次氯酸鈉做前氧化劑，以決定前加氯最適加藥量。由圖 4 結果可知，鏡面淨水場原水於硫酸鋁加藥量為 70 mg/L，總有機碳去除率最高，故本試驗固定硫酸鋁加藥量為 70 mg/L，分別添加 3、4、5、6、7 mg/L 之濃度有效氯，為測定耗氯量及反應時間，各水樣經靜置 2 小時後，每小時檢測自由有效餘氯、總餘氯。試驗結果如表 4 與圖 5 所示，加氯量於濃度 4 mg/L 後過折點，各靜置時間之自由有效餘氯值差異不大。

表 4　鏡面淨水場加藥測試與錳、氨氮、有機物去除率

原水氨氮(mg/L)	0.45														
前加氯-加氯率(mg/L)	3			4			5			6			7		
加氯後間隔時間(時)	總氯	自由餘氯	結合餘氯	總氯	自由餘氯	結合餘氯	總氯	自由餘氯	結合餘氯	總氯	自由餘氯	結合餘氯	總氯	自由餘氯	結合餘氯
2	0.93	0.34	0.59	0.48	0.31	0.17	1.39	1.08	0.31	2.3	2.3	0.00	3.6	3.7	-0.10
3	0.81	0.71	0.10	0.33	0.13	0.20	1.10	0.91	0.19	2.00	1.78	0.22	3.0	3.0	0.00
4	0.78	0.68	0.10	0.28	0.11	0.17	0.98	0.77	0.21	1.91	1.61	0.30	3.0	2.9	0.10
5	0.75	0.68	0.07	0.22	0.10	0.12	0.87	0.75	0.12	1.77	1.53	0.24	2.7	2.1	0.60
6	0.75	0.66	0.09	0.23	0.06	0.17	0.76	0.54	0.22	1.64	1.46	0.18	2.7	2.6	0.10
殘留氨氮(mg/L)	0.13			0.06			0.03			0.02			0.02		
殘留氨氮去除率	71.1%			86.7%			93.3%			95.6%			95.6%		

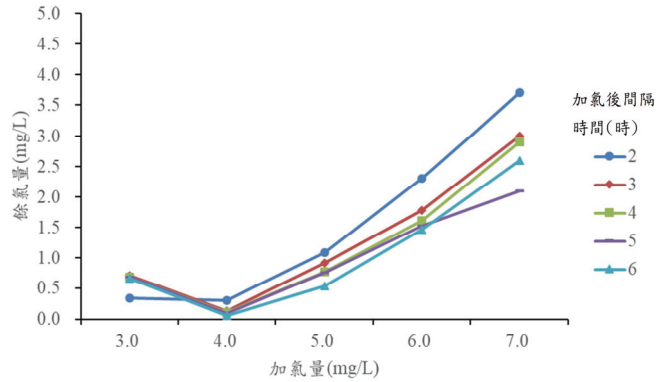


圖 5　鏡面淨水場加氯量與耗氯量變化

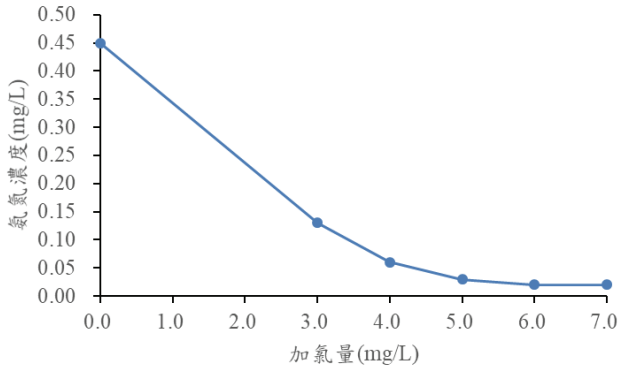


圖 6　鏡面淨水場加氯量與殘餘氨氮值變化

為檢視提高加氯量是否能提升氨氮去除率，本試驗以殘餘氨氮濃度比較前加氯氧化效果。原水氨氮濃度為 0.45 mg/L，待加氯並靜置 6 小時後取各組水樣測定殘餘氨氮值。由表 4 與圖 6 所示，當前加氯超過 5 mg/L，氨氮去除氯可達 93.3%以上。

(三)總三鹵甲烷測定與生成潛勢試驗

水中存有高濃度有機物時，經過加氯消毒易產生總三鹵甲烷等消毒副產物，為確認三、(二)建議之前氯濃度是否會導致總三鹵甲烷超過法規值，續以添加 70 mg/L 硫酸鋁、前加氯 5 mg/L 混凝處理之水樣，模擬配水管網反應時間靜置約 6 小時後，取樣檢測總三鹵甲烷含量，其檢測值為 0.0442 mg/L，符合飲用水水質標準 0.08 mg/L。

為了解總三鹵甲烷增加風險，本研究亦進行總三鹵甲烷生成潛勢實驗。取鏡面場過濾水添加過量次氯酸鈉(8mg/L)，在室溫下放置反應 7 天後，確保水中自由有效餘氯仍有 1~5 mg/L，並取樣檢測總三鹵甲烷含量。經檢測結果顯示，原過濾水總三鹵甲烷測值為 0.0600 mg/L，經加氯反應 7 天後之總三鹵甲烷測值為 0.114 mg/L，其生成率約 90%，顯示於配水管網中，水中高濃度有機物會與氯持續反應，增加總三鹵甲烷含量，因此建議須留意加氯量，於清水端引入適量南化給水廠清水進場稀釋，避免配水端總三鹵甲烷含量過高。

(四)總有機碳不同檢測方法之比對

由以上實驗數據得知，當原水存在高濃度有機物時，會影響混凝劑及消毒劑用量，因此監控原水總有機碳數值對於淨水操作相當重要。本處總有機碳檢測由七區水質課分工檢測，以環檢所公告之「NIEA W532.53C 過氧焦硫酸鹽加熱氧化/紅外線測定法」檢測。然而前述方法需耗時檢測，加上水樣寄送時間，往往需數個工作天才能取得總有機碳數據。對於淨水場而言，若能即時又快速掌握總有機碳濃度，便可精準調控加藥量，避免超量或不足加藥。為即時監測原水總有機碳，本處於部分淨水場裝設總有機碳監測儀器，為確認監測儀器之總有機碳數值準確度，本研究於 109 年 7 月至 12 月期間進行同步比對，分別送七區水質課以紅外線測定法檢測及自行以監測儀器檢測，比對總有機碳數值。表 5 為同一水樣以紅外線測定法與監測儀器數值變異數分析 F-test 檢定，結果顯示總有機碳檢測結果有差異，可能是分析數

據不足，導致兩組數據相關性較低。

若以數據變化趨勢分析，如圖 7 所示，兩種分析方法之數據趨勢具有一致性，雖然總有機碳監測儀器數值無法完全取代紅外線測定法，但可以透過監測儀器檢測總有機碳數值是否有上升趨勢，有利於淨水場同仁監控及預警。

表 5　總有機碳變異數分析 F-test 檢定結果

採樣日期	總有機碳(mg/L) 紅外線測定法	總有機碳(mg/L) 監測儀器	
1090706	4.6	4.10	
1090713	4.2	5.10	
1090803	2.9	4.60	
1090904	2.2	3.24	
1090922	2.6	2.64	
1091012	2.7	2.63	
1091102	3.0	2.51	
1091207	2.7	2.77	
F	4.28	臨界值	3.50
判別結果	F>臨界值，拒絕虛無假說(H_0)，兩組數據有差異		

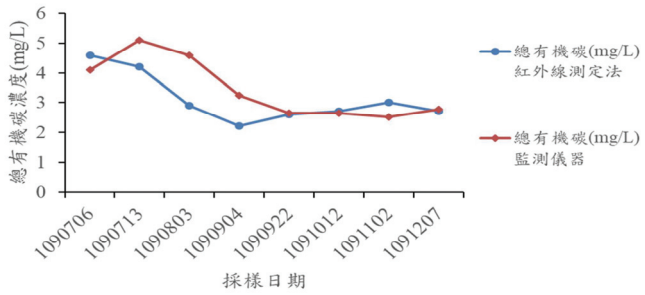


圖 7　總有機碳紅外線測定法與監測儀器數值趨勢

四、結論與建議

(一)本研究以鏡面場原水進行加強混凝瓶杯試驗，結果顯示以超量加藥之方式，提高硫酸鋁加藥量為 50~70 mg/L，對於錳、總有機碳去除率最佳。當硫酸鋁加藥量提高至 70 mg/L 時，錳去除率可達 70 %以上，總有機碳去除率亦約 25 %，符合表 2.1 對加強混凝總有機碳去除率之要求，UV_{254} 去除率亦可達約 55%，顯示加強混凝機制可降低原水高錳、高有機物問題。

(二)原水存在高濃度有機物情況下，有機物會增加前氯耗氯量而降低錳、氨氮去除率。為提高原水氨氮去除率，透過硫酸鋁加藥量 70 mg/L 先將污染物沉降後，再加入 5 mg/L 濃度次氯酸鈉，經靜置約 6 小時，氨氮去除率高達 93 %以上，顯示可以透過此分段加藥方式降低氨氮值。

(三)提高前加氯可能產生消毒副產物問題，透過總三鹵甲烷分析，經淨水處理之過濾水總三鹵甲烷檢測值為 0.0442 mg/L，低於飲用水水質標準 0.08 mg/L。總三鹵甲烷生成潛勢試驗結果顯示經加氯反應 7 天後，總三鹵甲烷增加 90 %，顯示若提高加氯量可能導致配水端總三鹵甲烷含量過高，淨水操作上仍須留意前氯濃度。

(四)鏡面淨水場每逢枯水期，原水易出現高濃度有機物，總有機碳濃度變化對於原水處理之混凝劑用量多寡相當重要，雖然根據本研究結果，淨水場使用監測儀器檢測數值無法完全取代紅外線測定法檢測法，然而此兩組數據之變化趨勢仍有一致性，淨水場仍可以透過監測儀器之數值掌握總有機碳濃度變化。因監測儀器能即時偵測總有機碳濃度，未來可以持續累積比對數據，再次分析監測儀器與紅外線測定法檢測法之相關性，期能訂出相關性公式，以由監測儀器數值推估總有機碳濃度，以利淨水場人員加

藥模式參考。

(五)為解決鏡面淨水場高錳、有機物等問題，根據本研究，建議鏡面淨水場於淨水處理流程改以串聯操作，延長淨水處理至 6~8 小時，採加強混凝方式，提高硫酸鋁加藥量，搭配於第二次沉澱前加氯之操作，可以有效降低原水錳、氨氮、總有機碳濃度，並引入適量南化給水廠清水進場稀釋，避免配水端殘餘鋁、總三鹵甲烷含量超過標準。

(六)鏡面水庫自 109 年 8 月至 9 月進行數次水庫底層水排放，排放後期間檢測總有機碳濃度也逐次降低(如表 5)，未再超標，表示排放水庫底層水有助於減低總有機碳濃度，建議密切監測原水總有機碳濃度，若發生水質持續惡化時，應調整鏡面及南化清水混和比，並適時排放底層水，避免水庫死水滯留。

參考文獻

1.藍宇震、吳英宏、鄭瑞琴，高錳酸鉀去除水中錳之試驗，台灣自來水公司，2013。

2.游育晟、陳乃菁、林正隆、王冠中、刁文儀，成功及七美淨水場水中總有機碳去除與總三鹵甲烷生成控制之研究，台灣自來水公司，2019。

3.李丁來，淨水程序中溶解性有機物之去除：生物濾床及污泥毯澄清池之操作評估，交通大學，2006。

4.葉宣顯等，本省自來水水源中溶解性有機物成份之分析及現有淨水程序對其去除效率之評估，成功大學環境工程學系87年度研究計畫，1998。

5.葉宣顯，異常水質加藥種子訓練班-去除水中總有機碳、錳及氨氮加藥策略探討及實務案例，台灣自來水公司課程講義，2020。

6.曾韋斌，以生物活性碳濾床方法去除水中微量有機物之研究，中山大學，2014。

7.異常水質處理通則及參考技術，台灣自來水公司，2018。

作者簡介

陳伊玟女士

現職：台灣自來水公司第六區管理處水質課工程員

專長：水質分析、水質管理

吳政儒先生

現職：台灣自來水公司第六區管理處水質課技術士

專長：水質分析、飲用水處理藥劑

鄭堡文先生

現職：自來水公司第六區管理處水質課工程師

專長：水質異常改善研究、水質管理

楊昭端女士

現職：台灣自來水公司第六區管理處水質課課長

專長：淨水處理、水質管理

黃文惠女士

現職：台灣自來水公司第六區管理處工安課課長

專長：水質分析、水質管理、淨水處理

智能影像辨識應用於濾池反洗終點判斷之研究

文/吳志超、楊惠玲、賴思樺、陳劭瑜

摘要

傳統快濾池反沖洗終點之判斷，除了極少數濾池具有反沖洗水濁度計外，僅能以反沖洗濁度歷線之量測來評估反沖洗時間之適切性，然而反沖洗濁度歷線有單點量測，無法代表整個濾池狀況，且鑒於一般水場在供水壓力下，難以定時進行濁度歷線檢定，本研究以建立即時濾池反沖洗終點判斷工具為目標，利用人工智慧影像辨識技術偵測濾池反沖洗表面水色變化，探究反洗過程表面水色變化、反洗廢水濁度與影像辨識結果之相關性，評估技術應用於反沖洗終點判斷之可行性。結果顯示水色與濁度具有顯著相關性，且影像辨識可成功應用在偵測濾池反沖洗過程水色由濁變清之過程，且約以反洗廢水濁度 30NTU 為界，區別水色混濁與水色清澈，並利用進一步利用反洗過程濾池清、濁區域佔比的變化，檢核實場反沖洗終點的適宜性，未來之研究將藉由更多實場濾池檢核，比對反沖洗水濁度歷線與反沖洗終點之水色清澈與混濁區域佔比，定義出反沖洗終點之清澈、混濁區域佔比，供未來作為線上即時偵測是否達反洗終點之判斷依據。

關鍵字：影像辨識、濾池效能評估、水洗清澈度、反洗濁度歷線

一、前言

在沒有反沖洗廢水濁度計之輔助下，濾池反沖洗終點之判斷，唯有仰賴傳統的反沖洗水濁度歷線之量測來協助判斷，每季確認一次反沖洗濁度歷線與反沖洗膨脹率可提供日常反沖洗操作之調整，然而在供水壓力之下，難以定時檢定濾池反沖洗時間之適切性，以致於現今各水場之反沖洗之操作時間長短普遍為固定值，鮮少更動。然而反沖洗時間不足，膠羽將於濾層中累積，終究導致效能惡化，反沖洗時間過長，亦不代表便能將濾池徹底洗淨，可能反而因無效反洗而導致水資源的浪費。

傳統反沖洗水濁度歷線之量測，程序為挑選反沖洗時單一反洗廢水出流點位，固定時間間格(如每分鐘)採集廢水，進行濁度量測，繪製成濁度歷線圖。受限於採樣方法，如圖 1 與圖 2 所示，圖 1 為阿卡諾式濾池，針對二側濾池之其中一側進行採樣，而圖 2 綠葉式濾池，亦僅能在多股反沖洗廢水中之一股採樣，濾池反沖洗過程，往往伴隨不均勻，如圖 1 所示，採樣點位於圖中較為清澈或較為混濁之一側，其分析結果截然不同。因以肉眼觀察，便可發現清澈與混濁之分布不均，本研究遂導入人工智慧影像辨識技術，期藉由反洗過程中全濾池之影像色彩變化，判斷反沖洗水之清澈與混濁變化與分布。

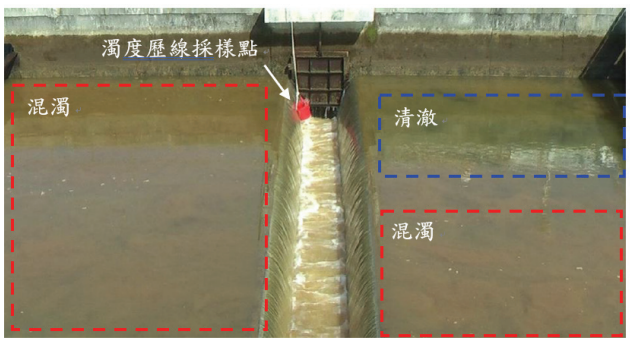


圖 1　阿卡諾式濾池濁度歷線採樣點

圖 2　綠葉式濾池濁度歷線採樣點

隨人工智慧技術發展，其應用於各行各業的範圍亦越來越廣，應用在飲用水淨水領域之研究亦愈來愈多，Li 等人之研究利用 Google Scholar 資料庫，以關鍵字「Artificial Intelligence」和「Drinking Water Treatment」進行搜索，發現近 20 年來發表的文章數量有上升的趨勢，且 AI 應用於飲用水處理領域主要集中在混凝、膠凝、消毒和膜過濾[1]，應用在濾池方面之研究仍甚少，相關研究集中在探討濾後水質預測，如 Chai 之研究，蒐集 Manheim 和 Britannia 水處理廠的數據，開發了人工神經網路(Artificial Neural Network，ANN)模型，輸入參數包括 pH 值、鹼度、溫度、混凝劑用量、助凝劑用量和流速，針對預設的濾後水顆粒計數，決定最佳的明礬、助凝劑劑量與濾速[2]。Tupas 的研究以整個淨水流程的數據進行 ANN 建模，輸入對過濾有顯著影響的 10 個參數，包括原水濁度、原水溫度、總硬度、總鹼度、再碳酸化出水 pH 值、明礬劑量、石灰劑量、PACl 劑量、聚合物劑量與總水量，結果顯示以 ANN 建立評估過濾性能的模型具有可行性[3]。

除了濾後水質之預測與達目標濾後水質對應的前端混凝處理條件之決定，迄今針對人工智慧應用於過濾單元之其他研究甚少，將影像辨識應用於淨水程序亦少見，與本研究較為相關之影像辨識技術多常見應用於果實成熟度之辨識，如 Baltazar 等人之研究，其利用影像辨識技術判斷番茄的成熟度。使用了 128 個番茄樣品，並使用色度計依顏色從綠色到紅褐色區分番茄成熟度，再利用影像辨識進區分番茄顏色特徵辨別成熟度，並提出了番茄成熟度測量和評估自動分類方法，其收集了 250 張圖像，利用支持向量機(Support Vector Machine，SVM)進行模式訓練，結果顯示成熟度分類準確率為有 84.8%~90.8%[4]。

由於觀察到濾池反沖洗過程，表面水色隨反洗之進行逐漸由濁變清之過程，水色由橘黃色轉變為藍綠色，判斷此顏色變化具有成為反沖洗廢水清澈程度辨識指標之潛力，並改善傳統濾池評估單點量測反洗濁度歷線不能作為完整濾池代表之限制，本研究期望藉由新興技術的發展，減少人力時間等成本，提升數據之代表性，即時反應濾池狀況並維持效能，並藉由自動化工具，取代傳統評估方法，降低管理成本。

二、研究方法

本技術應用於濾池效能評估主要希望取代反沖洗濁度歷線單點取樣方式，藉由比對濾池反洗程序中水面色彩變化與濁度關係，以人工智慧影像辨識技術判斷反沖洗終點適切性，相關研究方法說明如下。

(一)試驗水場基本資料與研究內容

本研究以鯉魚潭淨水場為主要試驗場別，該場以鯉魚潭水庫為原水，以 PACl 及氯化鐵混凝劑進行混凝，評估濾池形式為阿卡諾式濾池，濾料種類為無煙煤與石英砂，濾池反沖洗之啟動以定時或定水頭損失共同決定，濾程約 15~48 小時。

本研究分為二部分，首先探討濾池反沖洗表面影像水色變化、濁度及影像辨識結果等三者之關係，接續，利用本研究群所開發之濾池反沖洗影像分析辨識模組進行實場反沖洗測試，評估方法可行性。

(二)水質與影像收集

為探討反沖洗表面影像水色變化、濁度及影像辨識結果等三者之關係，本研究在快濾池水洗過程中採用固定點位，每分鐘取樣一次，採集水洗過程單一點位之濾池表面反沖洗廢水，進行濁度分析，如圖 3 所示，並搭配該位置影像色塊之取得，進行水色分析，以及後續影像辨識分析。

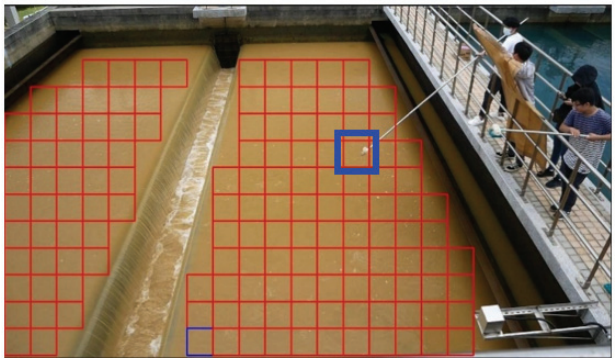


圖 3　濾池反沖洗水色、濁度、影像分析之單點位採樣

(三)水色分析評估方式

色彩分析一般常見者為 RGB 色彩模型，其是萃取紅、綠、藍三原色單獨進行分析，另一分析方法為 YUV 色彩模型，其中 Y 代表亮度，U 及 V 共同代表色度，不同 U 值與 V 值，決定色彩為粉紫色系、橘紅色系、綠色系或藍色系。而 YUV 值乃藉由 RGB 值以下列計算式計算而得[5]。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

$$U = -0.147R - 0.289G + 0.436B$$

$$V = 0.615R - 0.515G - 0.1B$$

表 1 為經由現場採樣所分析得之色塊、濁度、採樣當下照度及色塊之 RGB 與 YUV 值分析結果範例，為單一反洗操作、單一取樣點位、水洗過程中每分鐘採樣之數據。

表 1　水洗過程單一點位色塊、濁度及色彩分析結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
色塊												
濁度(NTU)	546	284	179	118	52.5	58.3	19.3	13.8	5.66	5.65	5.54	6.11
照度	22	21	20	19	18	17	17	16	16	16	17	17
R	192.71	184.61	179.01	175.66	154.08	159.17	139.06	121.56	106.08	101.76	110.76	108.76
G	166.09	157.58	154.33	152.76	141.25	146.82	142.53	135.56	127.82	125.41	132.92	133.06
B	131.04	122.43	118.57	117.42	105.56	113.89	121.89	118.56	118.09	119.54	126.31	129.29
Y	170.06	161.66	157.64	155.58	141.02	146.76	139.14	129.44	120.21	117.67	125.54	125.36
U	-19.195	-19.298	-19.221	-18.778	-17.448	-16.174	-8.491	-5.354	-1.048	0.915	0.376	1.928
V	19.881	20.136	18.753	17.615	11.456	10.893	-0.072	-6.91	-12.396	-13.959	-12.967	-14.567
備註	10/22鯉魚潭14號池											

(四)影像辨識流程

本研究所使用之影像辨識模組為團隊所開發，其工作流程圖 4 所示，將已錄製之反沖洗時濾池表面影像，經電腦擷取出不同反洗時間下的圖像，並將圖像轉換為 1280×720、解析度為 96 dpi 的尺寸，再將其進行像素網格化，每一網格皆代表一影像辨識位置，再由已訓練好之模組進行辨識。

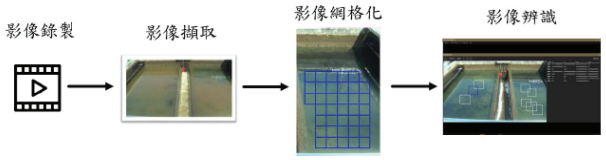


圖 4　影像辨識工作流程圖

三、結果與討論

(一)水色與濁度關聯性探討

收集如表 1 所示之水洗數據，為了解反沖洗過程之水色概況，以及反沖洗終點之水色變化特性，導入水洗廢水濁度小於 30NTU 為可以終止反洗之原則[6]，將所收集數據區分為小於 30NTU 及大於 30NTU 兩類數據，以 U 值與 V 值為座標軸製圖，分別將其所對應之 U、V 值繪製於座標圖，如圖 5 所示。圖中綠色圓點為大於 30NTU 的數據；灰色圓點為小於 30NTU 的數據，可見大於 30NTU 的綠色圓點普遍分佈於顏色呈現為橘紅色的第二象限；而小於 30NTU 的灰色圓點普遍分佈於顏色呈現為藍綠色的第三象限及第四象限。因此可以得知隨水洗時間增加，濁度大於 30NTU 往小於 30NTU，其水色變化為橘紅色往藍綠色方向發展。且濁度大於或小於 30NTU 大致為 V=0 之 U 軸為界，當濁度大於 30NTU 歸類為 V 大於 0 之暖色系；濁度小於 0 則歸類為 V 小於 0 之冷色系。

另以濁度小於 200NTU 之 156 筆數據，繪製濁度與U值關係圖及及濁度與V值關係圖，探討濁度與 U、V 之關係，如下圖 6 所示。隨濁度增加，V 值逐漸上升，顏色逐漸偏向暖色；隨水洗時間進行濁度逐漸降低，V 值亦逐漸降低，顏色偏向冷色。濁度與色度關係約略呈現為對數關係。取傳統濁度歷線評估準則，廢水濁度 30NTU 可停止反洗，由圖中可見濁度降低至 30NTU 時，V 值開始由正轉負。

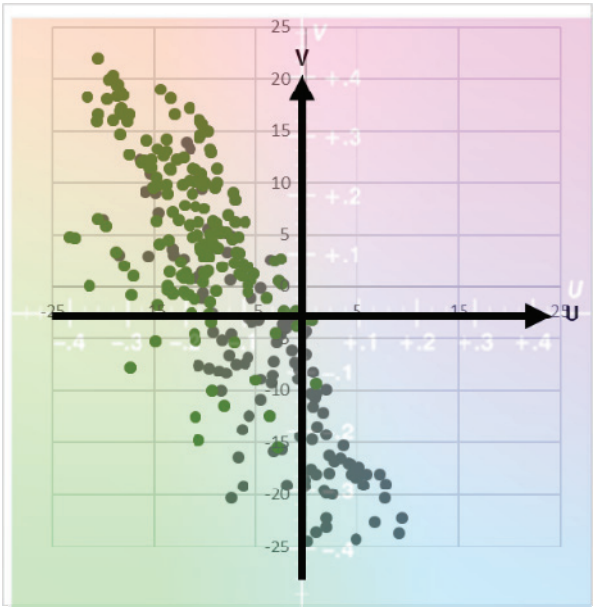


圖 5　濾池反沖洗水色變化之色彩象限圖

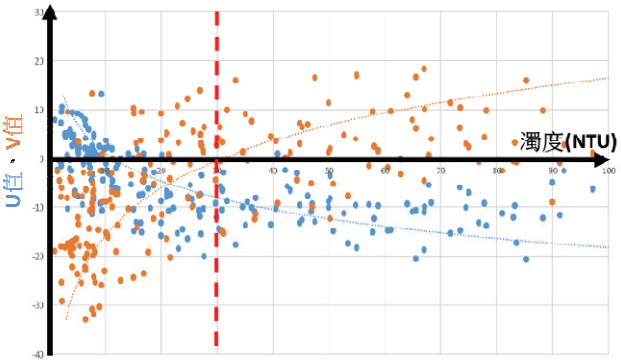
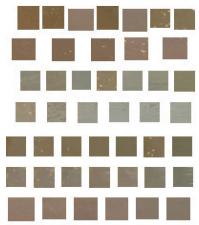
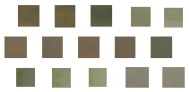
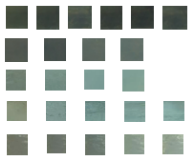


圖 6　濁度與水色 (U、 V)之關係分析

經上述結果說明，濁度與水色確實存在關係，取傳統濁度歷線可停止反洗之濁度 30NTU 為界，水色變化即為土黃色轉換為藍綠色期間。另觀察濁度與 V 值特性關係之取樣圖塊特徵如下表 2 所示。濁度大於 30 且 V 值大於 0 之圖塊，顏色普遍呈現土黃色；濁度小於 30NTU 且 V 值小於 0 之圖塊，顏色普遍呈現為藍綠色；濁度小於 30NTU 且 V 值大於 0 之圖塊，顏色呈現則為介於土黃色

與藍綠色之間，顯示該特性出現時為濁度 30NTU 轉換區間。

表 2　濁度 30 NTU 與 V 值特性對應之圖塊組

濁度>30NTU V>0	濁度<30NTU V>0	濁度<30NTU V<0
		

(二)水色與濁度統計分析

以統計方法定量分析濁度與色度關係，以上述小於 200NTU 之 156 筆數據，進行濁度與 U、V 之統計分析，結果如表 3 所示。濁度和 V 值、U 值關聯性分別為 0.586 及 0.425。相關係數 0.3 以下表示為低相關，0.3 至 0.7 屬於中等相關，0.7 以上屬高度相關[7]，因此濁度和 V 值、U 值皆屬於中等相關，而濁度與 V 值為正相關；濁度與 U 值為負相關。

表 3　濁度與 U、 V 值相關性分析

		V	U
濁度	Pearson 相關	.586	-.425**
	顯著性(雙尾)	.000	.000
	個數	156	156

*顯著水準為 0.01 時(雙尾)，相關顯著

綜上所述，濾池反洗的水色變化與濁度呈現顯著相關，其中濁度與 V 值在冷暖色的表現更為明顯，因此可藉由拍攝影像取得之 V 值推測出該區塊鄰近的濁度區間，以 V 值之正負為界，與現有反洗廢水濁度標準 30NTU 亦吻合。V 值大於 0，則濁度大於 30NTU，水色呈現為土黃色，可定義為「水色混濁」；V 值小於 0，則濁度小於 30NTU，水色呈現為藍綠色，可定義為「水色清澈」。

(三)水色與影像辨識探討

前述結果已說明濁度與色度 V 值存在相關性，且可以依色塊土黃色或藍綠色區分為「水色混濁」或「水色清澈」。本節將進一步確認以土黃色及藍綠色為訓練資料之辨識模組，是否能準確反應出水色狀況。影像辨識執行過程為，將反沖洗取樣位置之色塊輸入至影像辨識模組中，其辨識結果如下圖 7 所示，輸出結果呈現為 100%清澈，表示該色塊辨識結果有 100%信心歸類為清澈。

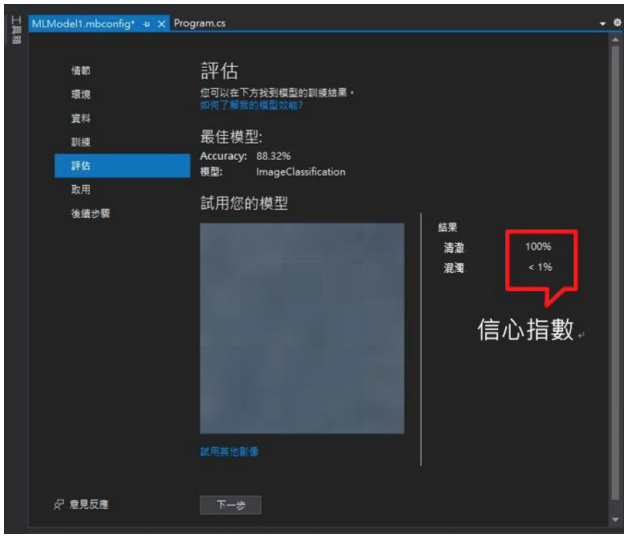


圖 7　單一圖塊影像辨識程式畫面

以 9 月 30 日鯉魚潭 13 號快濾池之反沖洗結果為例，下表 4 為反沖洗程序定點取樣之濁度歷線、影像辨識清澈度結果、色度分析，三種關係之平行比較。如表所見，5.5 分鐘至 6.5 分鐘時，濁度下降至 30NTU 以下，同時辨識結果也為 100%清澈，色度 V 值則由正轉負，三者關係轉變皆相同，表示此時間段內水色呈現為清澈狀態。

表 4　濁度與 U、V 值相關性分析 (110/9/30/鯉魚潭 13 號池)

水洗時間(min)		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5
截圖													
濁度		233	186	80.1	61.3	55.6	11.4	4.78	3.31	1.83	1.86	2.31	3.49
辨識結果	濁	100%	100%	100%	95%	72%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
	清	<1%	<1%	<1%	5%	28%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
清澈/混濁		混濁	混濁	混濁	混濁	混濁	清澈	清澈	清澈	混濁	清澈	清澈	清澈
V		24.82	23.66	17.53	12.29	8.97	-10.24	-13.48	-9.27	-6.37	-6.33	-8.62	-10.53

另以 10 月 22 日鯉魚潭 14 號快濾池之反洗結果為例，下表 5 為反沖洗程序定點取樣之上述三種關係之平行比較。如表所示，6 分鐘至 7 分鐘時，濁度下降至 30NTU 以下，辨識結果亦為清澈，色度 V 值也處於正負轉換處，三者轉變相同，表示該時間段內水色呈現為清澈狀態。

表 5　濁度與 U、V 值相關性分析 (110/10/22/鯉魚潭 14 號池)

水洗時間(min)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
截圖													
濁度		546	284	179	118	52.5	58.3	19.3	13.8	5.66	5.65	5.54	6.11
辨識結果	濁	100%	100%	79%	100%	84%	53%	<1%	2%	1%	<1%	1%	<1%
	清	<1%	<1%	21%	<1%	16%	47%	100%	98%	99%	100%	99%	100%
清澈/混濁		混濁	混濁	混濁	混濁	混濁	混濁	清澈	清澈	清澈	清澈	清澈	清澈
V		19.88	20.14	18.76	17.61	11.46	10.89	-0.07	-6.91	-12.40	-13.96	-12.97	-14.57

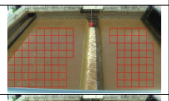
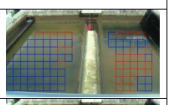
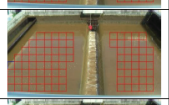
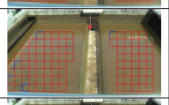
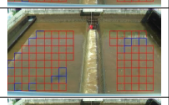
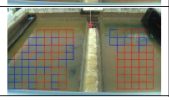
(四)影像辨識應用於反洗效能評估

將清澈度影像辨識模組應用於鯉魚潭淨水場快濾池之水洗程序，其水洗時程為 12 分鐘，表 6 為 9 月 30 日鯉魚潭 13 號池水洗過程取得之影像辨識結果。由表可見第五分鐘開始出現藍色網格；第七分鐘，濾池已有區域性清澈現象，清澈區域佔 48%；第八分鐘，左側濾池大部分區域已穩定為清澈狀態(86%)，而同為第八分鐘的右側濾池僅有 35%的清澈區域；直到第九分鐘，整體濾池達 89%的清澈區域。

由此可知 13 號濾池右側的反沖洗效能較差，10 分鐘後之水洗可能有浪費之虞。該濾池面積為 140m^2、水洗流速為 15m/hr，計算若在水洗 9 分鐘後停止反沖洗，該次反洗共可節省 105m^{3}的水量。

綜上所述，影像辨識技術可應用於辨識濾池反沖洗過程中濾池之水色清澈與否與分布，並藉由清、濁不均勻的分布，及早得知異常區域範圍，做進一步的調整與預防。

表 6　單一濾池水洗過程清澈度影像辨識

水洗時間	辨識結果	水洗時間	辨識結果
2 分鐘		8 分鐘	
3 分鐘		9 分鐘	
4 分鐘		10 分鐘	
5 分鐘		11 分鐘	
6 分鐘		12 分鐘	
7 分鐘			

四、結論與建議

國內外迄今鮮少將人工智慧技術應用於濾池處理程序，亦鮮少將影像辨識技術應用於淨水場，本研究率先探討影像辨識技術應用於濾池反沖洗終點之判斷。探究主題包括濾池反沖洗表面影像水色變化、濁度及影像辨識結果三者關係，以及影像辨識模組應用於實場反沖洗測試之可行性，獲得以下結論：

(一)濾池反沖洗之水色變化與濁度呈現顯著相關，且而影像辨識可成功用於區別水色混濁與水色清澈，並吻合現有反洗廢水濁度標準 30NTU 為界，研究結果證實水色、濁度及影像辨識在濾池反沖洗水之清、濁判定上，有一致之判定結果。

(二)影像辨識分析在實場反沖洗終點之判斷上確實具有可行性，其協助即時掌握反沖洗時之濾池表現，並明確定義出無效反沖洗持續時間，提供後續反沖洗操作調整，節省水資源。

針對未來可持續發展之工作，建議如下：

(一)目前影像辨識工具可定義出濾池反沖洗過程之清澈與混濁區域佔比，並評估現有反沖洗時間之適宜性，未來應進一步藉由更多實場試驗數據與反沖洗水濁度歷線進行比對，建議出最佳反沖洗終點之水色清澈與混濁區域佔比，成為影像辨識應用於反沖洗終點判定之明確依據。

(二)影像辨識可提供單一濾池於反沖洗中全濾池之影像，藉此得知反沖洗不均勻處，應進一步利用傳統濾池評估方式，針對不均勻之分布，分區探究其濾料厚度、濾料之膠羽蓄積狀況、以及濾料是否有結塊問題等，讓未來應用上，藉由影像辨識便可獲得初期濾料現況之相關資訊。

致謝

本研究感謝自來水公司提供部分研究經費支持，計畫名稱「濾池效能評估電子化偵測研究探討」，論文之部分研究成果節錄自該計畫相關成果報告。

參考文獻

1.Li, L., Rong, S., Wang, R., & Yu, S. Recent advances in artificial intelligence and machine learning for nonlinear relationship analysis and process control in drinking water treatment: A review. Chemical Engineering Journal, 405, 126673. (2021).

2.Chai, A. Application of neural networks to the modeling of water treatment particulate removal processes . National Library of Canada Doctoral dissertation. (1998).

3.Tupas, R. R. T. Artificial Neural Network Modelling of Neural Network Performance. M.Sc. Thesis University of Alberta .(2000).

4.Baltazar, A., Aranda, J. I., & González-Aguilar, G. Bayesian classification of ripening stages of tomato fruit using acoustic impact and colorimeter sensor data. Computers and electronics in agriculture, 60(2), 113-121. (2008).

5.Koju, R., & Joshi, S. R. Comparative analysis of color image watermarking technique in RGB, YUV, and YCbCr Color Channels. Nepal Journal of Science and Technology, 15(2), 133-140. (2014).

6.蔡先逸，淨水場快濾池效能提昇方法之研究，逢甲大學碩士論文，(2011)。

7.黃姵嫙，綠色招募活動對組織人才吸引力之影響：以個人組織配適知覺為中介變數與個人環保態度為干擾變數，東海大學碩士論文，(2018)

作者簡介

吳志超先生

現職：逢甲大學環境工程與科學系教授

專長：淨水技術與程序控制、環境資源與保育

楊惠玲女士

現職：逢甲環境科技與智慧研究中心副主任

專長：水處理、人工智慧於水環境之研究、環境教育

賴思樺女士

現職：專案助理

專長：水處理

陳劭瑜先生

現職：逢甲大學環境工程與科學系碩士二年級

專長：水處理

AI 於自來水精準加藥之初步應用

文/謝文彬、曾為恭、黃庭水、李丁來

摘要

自來水淨水程序與管理兩項關切議題：(1)監控感測器(sensor) 如何避免誤警報 (2)淨水處理如何精準加藥避免浪費，「AI sensor 精準防禦(AId)＋AI 精準加藥處理(AIpd)」，兩種技術組合，可解決 sensor 誤警報與加藥不準確問題，藉由 A 淨水場以概念驗證(Proof of Concept，POC)方式，測試化學混凝 sensor 準確率與加藥結果，AId 判斷感測器誤警報，發生率 0.642%，水質異常發生率 1.545%，總誤警報 2.187%，測試結果證實，若無 AId，自動化加藥與 AI 預測，皆受 sensor 誤警報影響，此外，AIpd 與現場加藥量比對，準確率 99%以上，以 A 淨水場規模 1 萬 CMD 推估，可有效節省混凝劑量 52.5 噸/年、乾基污泥量 36.5 噸/年、減碳量 11.7 頓/年，藉由此次 POC 結果，證實 AId 為重要關鍵系統，確保自動化與 AI 系統穩定性，提升自來水淨水場 AI 數位操作準確且安全。

關鍵字：提升飲用水質與安全、AI 精準加藥、誤警報 AI 校正、減少污泥、節能減碳水處理。

一 前言

Sustainable Develop Gods（SDGs） 6 倡議水資源安全與永續，也是台灣自來水事業單位與各縣市政府追求的目標，自來水事業單位致力於飲用水質管理與優化，如何把關飲用水安全與更精進飲用水水質，需要有效與精準合理使用水處理藥劑，如有準確 AI 技術輔助 sensor 判斷水質狀態，搭配精準加藥才有良好的水質，使飲用水水質及自來水事業數位轉型再「淨(進)」化，協助自來水事業朝 SDGs 智慧城市永續目標邁進，要達到上述目標，需解決目前水處理與管理兩項關切議題：

(一)Sensor 誤警報

水質感測器 sensor 為水處理或河川水質監測良窳與否最直接的「神經系統」，目前各國遇到最大問題點為水質感測器常發出誤警報（False Alarm），若操作不當與未妥適保養， 90%以上都會發生 sensor 異常（誤警報），但並非真正水質異常，例如 2020 年 2 月 19 日「柳川水位達黃色警戒！警報器響整夜擾人清夢」，台中柳川住戶怒被水位警報「轟炸 12 小時」事件，水處理單位與養殖業之監控設備，經常發生誤警報，造成水質監測系統成「放羊孩子」。

(二)無法精準加藥

淨水處理常以化學混凝藥劑處理原水中懸浮顆粒，進而降低濁度，但是受限既有定量加藥技術，對於原水水質變化大之時，常會有過量加藥或加藥不足的風險，例如化學混凝/沉澱系統加藥等，使用場域包含自來水淨水場、海水淡化廠、工業區污水處理廠、工廠廢污水處理設施、水資源中心等，發生案例如 2017 年自來水含鋁超標事件及 2019 年 4 度稽查台中火力發電廠發現排放的廢水懸浮固體超標等無法精準加藥事件。並且近幾年烏山頭、南化淨水場皆以水庫水為

原水，長久以來被視為係穩定的低濁度水源，然近年來每逢枯水期水位下降，底層水開始混濁，當雨季來臨，降下豪雨，必然發生混濁事件，耗氯物質同時升高，原水濁度回降速度亦難預估，此狀況已成週期性常態，不可忽視。

枯水期及豪大雨造成的濁度災情，對自來水淨水場首當其衝，無論取水量及加藥劑量的調整，都在考驗淨水操作人員的因應能力，且淨水操作人員應隨時查對瓶杯加藥曲線，是否已偏離並進行適時檢討修正，在發生原水濁度突增時方得因應[1]。有鑑於此，本次進行測試「AI sensor 精準防禦系統(AI Point Sensor Defense System, AId)＋AI 精準加藥處理(AI Point Precise Dosing System, AIpd)」，將可逐步改善該兩項關鍵問題，達到降低誤警報發生率與提升水質，並藉由此 POC 結果，供未來評估是否擴大導入自來水各型淨水場（包含海淡與取用原水直接加藥消毒），同時將此經驗分享給其他產業及其他國家參考。

二、 AI sensor 精準防禦系統＋AI 精準加藥系統測試

(一)淨水流程與 AI 加藥方法

本案以 A 淨水場(採傳統淨水處理流程～一次沉砂、二次沉砂、快混、慢混、沉澱、過濾、消毒)作為測試目標：

1.傳統淨化與加藥流程系統，如圖 1 所示，於沉澱池監控 pH、濁度，並反饋快混池之加藥量，淨水場操作人員需定時取水進行瓶杯試驗(Jar test)，決定加藥量，並更新加藥曲線，亦與沉澱後水質比對，再進行加藥微調整。

2.新型態 AI sensor 精準防禦系統＋AI 精準加藥系統[2]，如圖 2 所示，與淨水場原有淨水處理流程無縫接軌，藉由大數據收集水質與加藥狀況，AI 依據當時進流水質，自動預測加藥濃度與加藥結果，並自動更新與調整加藥曲線，搭配前端 AI sensor 精準防禦把關，判斷水質異常需調整，再連結精準投藥系統，節省藥劑及污泥產生量。

3.考量未來 AI 系統導入，採簡易且與原淨水系統無縫接軌，兼顧程控與資訊安全，測試時以獨立數據採集安全方式，無縫銜接化學混凝系統。

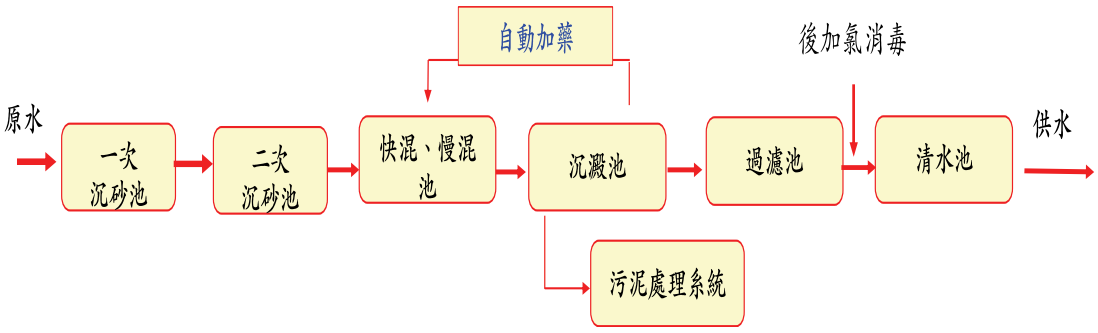


圖 1　傳統淨水處理流程

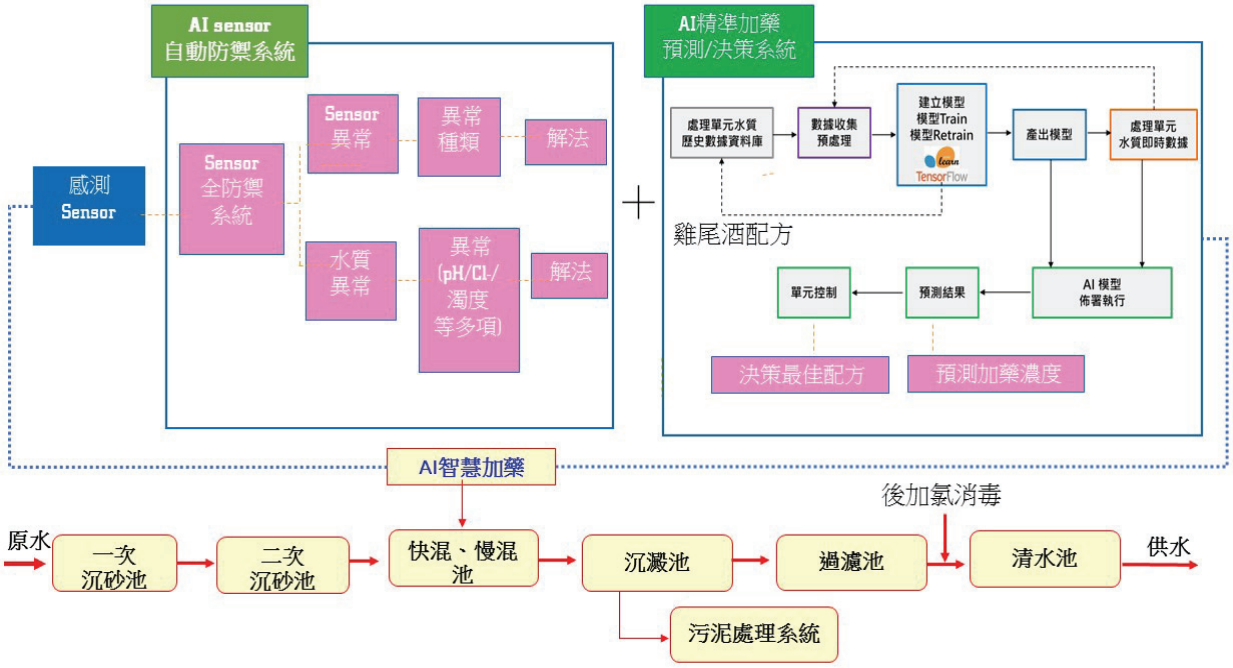


圖 2　AI sensor 精準防禦＋AI 精準加藥系統

表 1　A 淨水場水質 AI sensor 精準防禦系統監測警報情形

感測器	感測器預警(次)	系統警報
原水_A sensor (次)	20	21
一次沉砂池_B sensor (次)	0	16
二次沉砂池_ B sensor (次)	13	27
沉澱池_A sensor (次)	4	25
總監測水質比數 (20 分監測一筆)	5760	
感測器異常數	37	0.642%
系統警報 (水質需加藥調整數)	89	1.545%
總警報數	126	2.188%

(二)AI sensor 精準防禦系統測試

AI sensor 精準防禦系統演算法為「臥龍智慧環境公司」自行研發，依據系統與水質特性產生之「臥龍智慧環境演算法」，經由 AI sensor 精準防禦系統測試結果發現，總監測水質項目共四種，監測數量共 5,760 筆，感測器異常數（誤警報）共發生 37 次，誤警報發生率為 0.642%，系統警報（水質需加藥調整或預警）共 89 次（1.545%），總警報發生率為 2.188%，A 淨水場水質監測警報情形，詳如表 1 所示。

圖 3 為誤警報影響自動加藥系統與 AI

加藥預測系統，測試期間並無下雨(屬於進流水質穩定)A 圖中發現紅色方塊為誤警報，影響 B 圖自動加藥系統造成誤判加藥 （圖 B 水質與連動自動加藥系統監測時間為 20 分鐘一筆，其他監測時間為 5 分鐘一筆水質數據），所以 B 圖部份對於誤警報，並無連動自動系統，同時影響 C 圖 AI 精準加藥系統，以及影響 D 圖沉澱池水質，所以當 sensor 讀值作為控制元件時，誤警報將造成系統加藥異常。

另外，AI sensor 精準防禦系統＋AI 精準加藥系統導入後，如果是誤警報訊後，將不連動自動設備，將以 AI 預測當時水質取代原有 sensor 作為加藥判斷，此段時間可以讓操作者有時間保養或更換異常 sensor，此系統於降雨或水質變異大時更顯系統優勢，可發揮 AI 系統協助操作人員之功能。

(三)AI 精準加藥測試

A 淨水場原有加藥系統邏輯，係依照實驗室取原水 Jar test 結果建立加藥曲線，並依原水濁度變化對應加藥曲線，並回饋與連結自動加藥系統形成加藥網絡。目前以區間濁度為加藥量，並非實際濁度對應加藥量，為目前技術限制，但此次引進測試 AI 精準加

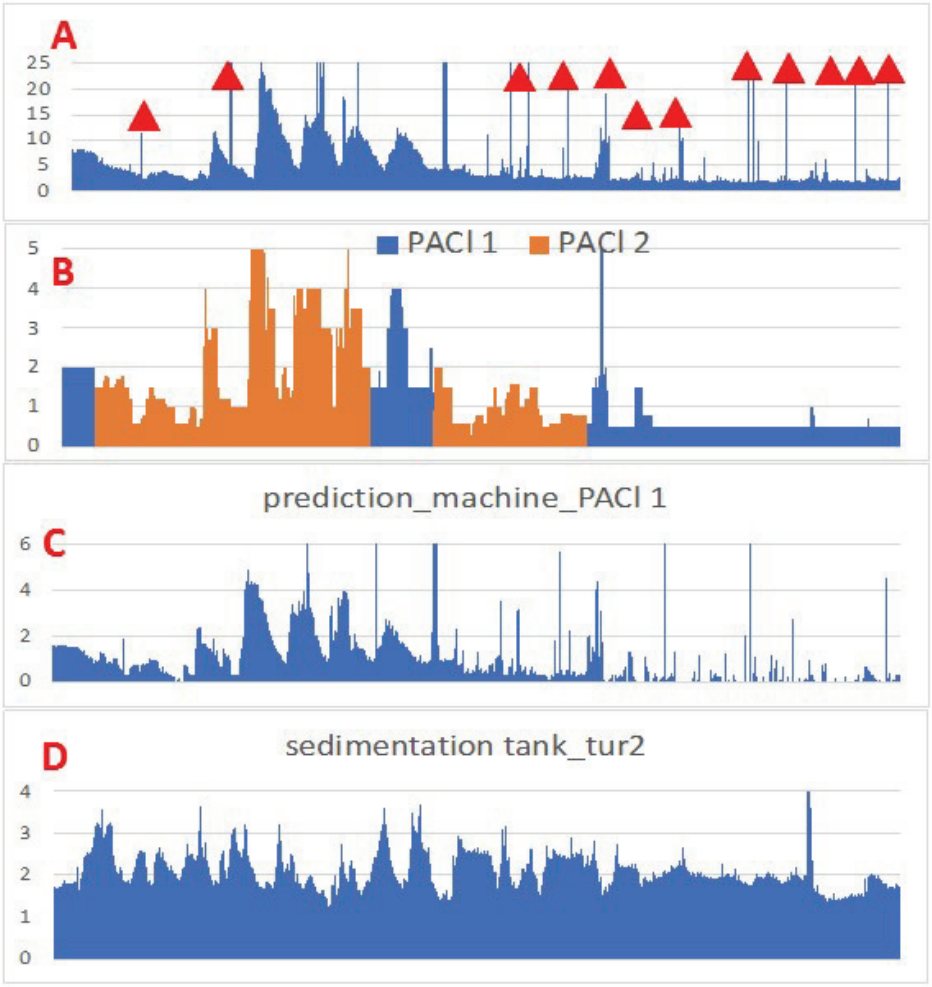


圖 3　誤警報影響自動加藥系統與 AI 加藥預測系統

藥方法後將可改善此技術限制，依據 A 廠提供 2021 年水質與加藥數據約 50,000 筆，藉由大數據分成訓練集 25,000 筆，驗證集 20,000 筆，測試集 5,000 筆，並導入「AI no code/low code 自動精準加藥平台系統」如圖 4 所示，系統自動產生 AI 建議模型，並產生化學混凝劑加藥預測與決策結果[3]，AI 精準加藥系統依據當時進流水質，自動產生預測加藥濃度與加藥結果連動加藥馬達，AI 系統自動更新與調整加藥曲線（Model retraining），如圖 5 所示，AI no code / low code 自動精準加藥平台系統，產生四種建議 model，其中以 A model 準確率高，A model score=0.9991、MSE= 0.068，Model B score=0.9897、MSE= 0.868，Model C score=0.9985、MSE=0.118，D score=0.8327、MSE= 14.11，本案測試選擇以 A model 為試驗 model。

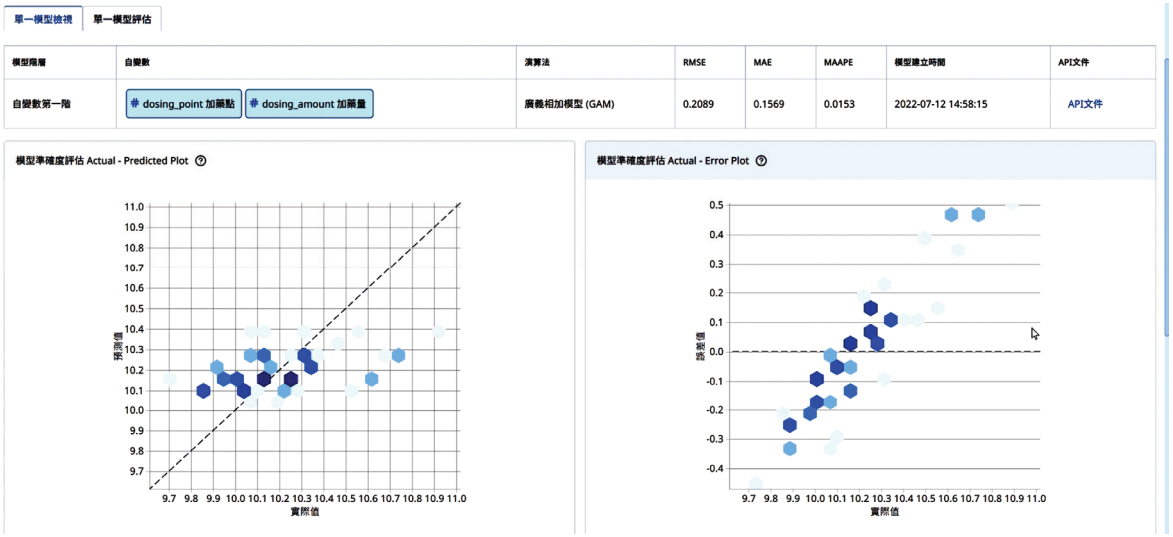


圖 4　AI no code / low code 自動精準加藥平台畫面

演算法	準確率
A	Score:0.999191 MSE:0.068242
B	Score:0.989706 MSE:0.868631
C	Score:0.998597 MSE:0.118319
B	Score:0.832741 MSE:14.11398

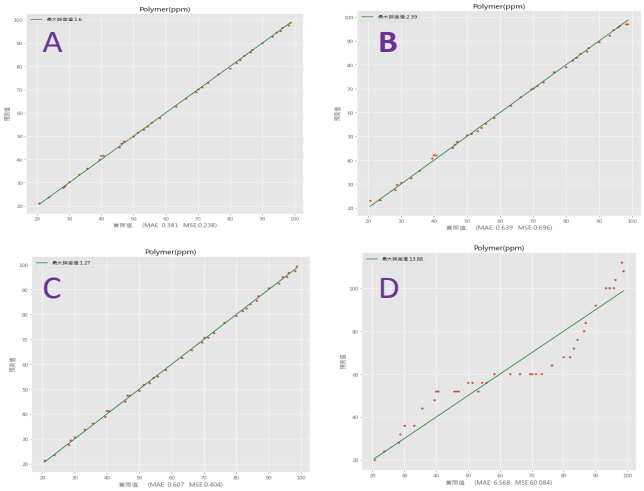


圖 5　AI no code / low code 自動精準加藥平台產生最佳 model

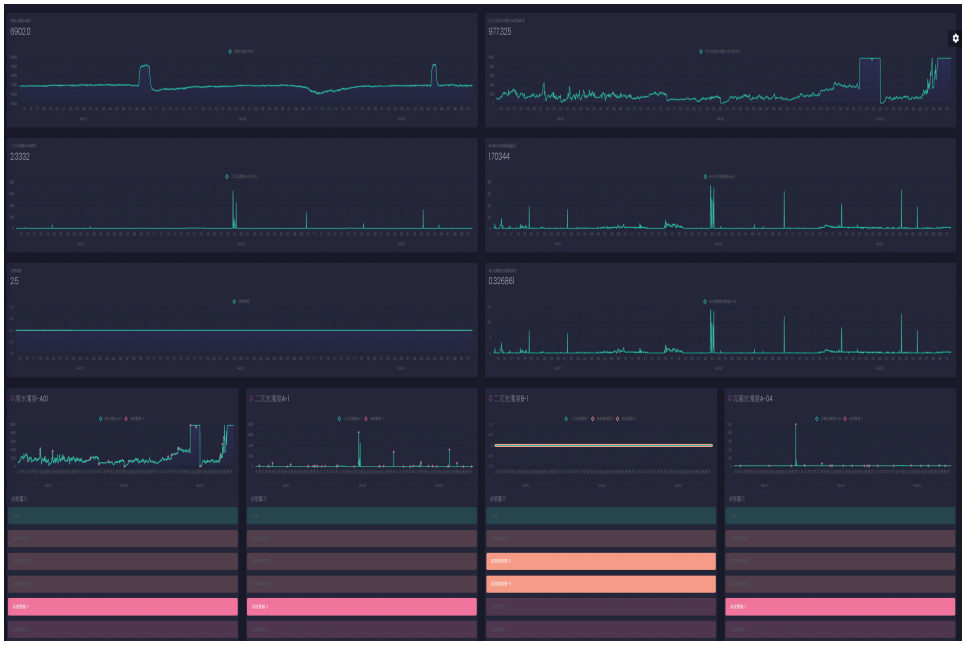


圖 6　AI 精準加藥與水質監測畫面

AI 精準加藥與水質監測畫面如圖 6 所示，功能包含水質監測、水質預警、誤警報警示、AI 化學混凝劑預測加藥量如圖 7 所示，未來可以將酸鹼加藥與 NaOCl 加藥量加入。測試中將 AI 精準加藥系統與 AI sensor 精準防禦系統，以安全裝置導入與連接 A 場水質監測設備，產生精準加藥預測與決策詳如圖 8 所示，PACl(多元氯化鋁) 1 與 2 為現場實際 PACl 加藥量，AI 預測加藥量為 pre_machine_PACl 1，經由測試結果發現 AI 預測加藥量約略低於原始加藥結果，例如平面區域堆疊圖現場加藥為 2.0 mg/L 持續一段時間，直到下一個水質濃度區間才調整 PACl 藥量，AI 預測 PACl 加藥量為 1.5mg/L，主要 AI 是以即時水質數據判斷精準加藥，所以 AI 加藥預測會優於目前傳統加藥方式，相對水質導電度與金屬 AI 濃度殘留及污泥量，將更趨近優化降低環境負荷。另外，AI 精準加藥系統，可以讓使用者設定所需水質，例如沉澱池水質濁度 2 NTU 或餘氯濃度等，AI 系統將自動預測前段混凝加藥與次氯酸鈉加藥量，使用介面與功能更友善，如圖 7 所示。

(四)AI 精準加藥導入效益估算

1.A 淨水場年產水量= 10,000 m^3/天 X 365 天/年＝3,650,000 m^3/年

2.假設 1NTU=1m g/L 懸浮固體物，則 A 場年平均減少懸浮固體物量＝3,650,000 ×10 mg/L/1000 L/m^3/1000 mg/g= 36.5 Ton/年

3.減少混凝劑 PACl 量：依據測試結果概估每天平均節省約 5L PACl 用量，節省藥劑量 5 L/天 × 24 小時/天 × 365 天 × PACl 密度 1.2(Kg/L)＝52,560 Kg/年

4.減碳年減少量(＝1*1,000 g*365 天/年/1,000 g/kg= 1,825 kg ×(1.694+1.542+ 2.841 +3.571)＝11,701 kg

圖 7　使用者可以設定所需水質介面

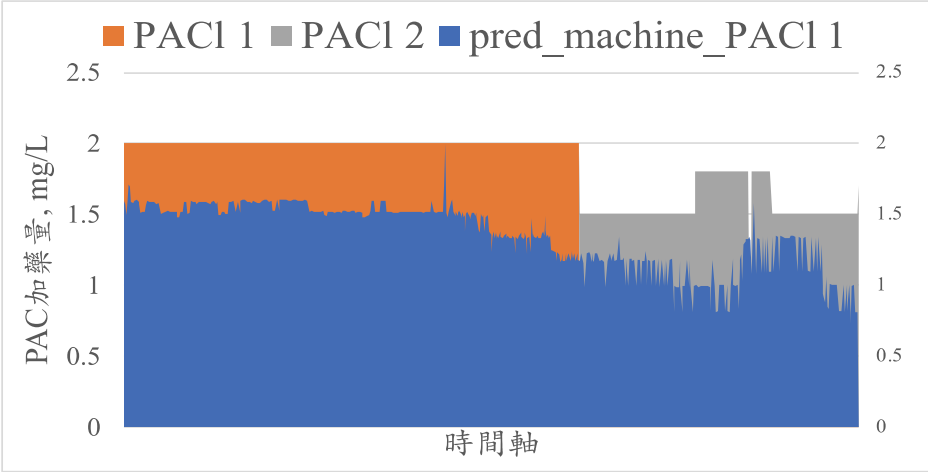


圖 8　AI 精準加藥量預測與現場加藥量比較

三、結論

以 AI sensor 精準防禦系統結合 AI 精準加藥系統測試淨水場誤警報與精準加藥結果：

(一) AI sensor 精準防禦系統：可以有效判斷誤警報與水質異常狀況，並且結合 AI 精準加藥系統準確維持良好水質。

(二) AI 精準加藥系統：將收集水質大數據以 no code/ low code 平台系統建立最適 AI model，同時使用者可以依照目標設定所需水質，AI 系統自動預測與決策加藥量，全自動化將為無人化自來水淨水廠起手式。

(三) AI 精準加藥系統：可以改善原有水廠依照濁度區間加藥問題，AI 精準加藥更準確加藥，可以有效降低加藥量與污泥量。

(四) AI sensor 精準防禦系統＋AI 精準加藥系統：誤警報發生時，因為 sensor 已經有異常，將以 AI 預測當時水質取代原有 sensor 作為加藥判斷，此段時間可以讓操作者有時間保養或更換異常 sensor，讓系統回復功能，讓使用者節省人力，才能使飲用水水質再「淨」化，自來水公司數位轉型再「進」化，把關人民飲用水安全，並協助政府 AI 人工智慧導入，達到 SDGs 智慧城市永續目標。

參考文獻

1.楊瑞芳、林信忠、楊昭端, 極端氣候與水處理用藥-以烏山頭、南化淨水場為例, 自來水會刊第 41 卷第 1 期(161) 2022, p1-7.
2.謝文彬、林庭瑋, 智慧水處理與水回收數位轉型新契機, 永續產業發展期刊 2021, p. 60-67.
3.Werner stumm, James J. Morgen, Aquatic Chemistry Third edition.

作者簡介

謝文彬先生

現職：AIpoint 臥龍智慧環境 執行長

專長：環境工程、AI 賦能水處理/水回收、水處理設備預防保養（PHM）、系統節能最佳化

曾為恭先生

現職：台灣自來水公司第四區管理處操作課長

專長：土木工程、自來水營運及操作

黃庭水先生

現職：台灣自來水公司供水處生產組長

專長：化學工程、淨水處理，自來水營運操作

李丁來先生

現職：台灣自來水公司副總經理

專長：環境工程、自來水規設、營管及漏水防治

中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法

中華民國 105 年 8 月 26 日第十八屆第八次理監事聯席會議審議通過

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」會刊論文中分「工程技術」、「營運管理」、「水質及其他」等類別，分別評定給獎論文，每類別以 2 篇為原則，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壹萬元整，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，每類別推薦 3-4 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：

1.評獎委員以無記名投票，每類別論文勾選至多 2 篇推薦文章，每篇以 1 分計算，取累計分數較高之論文，至多 2 篇，為該類給獎論文。

2.同一類別如有多篇文章同分無法選取時，以同分中專家審查總分數高低排序，分數再相同，則由評獎委員以無記名投票方式決定。

(三)選出給獎論文，報經本會理監事會議通過後公佈。

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。

從 E 化導入探討精實管理與企業社會責任

文/鄭錦澤、陳永松、張育嘉、周麗娟、荀蕙苓

摘要

從銜接行政院與臺北市政府發展理念，北水處持續推動水智慧城市等多面相主題智慧化導入；探討精實管理與培訓，採「複查及處理服務流程精進管理」雙主題分進合擊。首先獲致達成數位轉型遠距工作政策、其次在提升外部服務品質，如:用戶已繳費被停水件數降至 50%以下、與緊急或客訴案即時交付線上辦理每案處理時間減少 0.5-1 日等。最終在精進內部作業效率：提升作業效率縮減處理人時 6.37 萬小時、減少無效派工 2.13 萬件等。另於企業社會責任選題研議與實務認證課題探討，在 2020 年選定 14 項關注議題及 2021 年選定 15 項，並委由 BSI 國際組織進行查證與獨立保證。希兼顧所有利害關係人各階段動態需求，以利達成讓企業營運向上提升永續經營，以維持久的韌性。

關鍵字：水智慧城市原則、精實管理、企業社會責任

一、前言

為迎接數位浪潮，世界先進國家皆建立數位化推動策略，促進社會、經濟、政治與文化的轉變。綜觀先進國家數位政府的發展趨勢，以智慧政府、資料治理，強化國家發展動能，成為各國政府趨勢。「智慧政府」概念泛指各類改善政府對民眾、企業的服務作為，強調政府以「資料」為骨幹，善用臺灣科技優勢，強化政府效能與國家安全，串聯政府服務與民眾需求，優化決策品質。行政院於 106 年啟動「數位國家·創新經濟推動方案(2017 年至 2025 年)」共七大主軸計畫，包括基礎環境、數位經濟、網路社會、數位政府、智慧城鄉，以及數位人才、數位科技、法制環境等重要的配套措施，完善我國數位國家與創新經濟發展環境，作為產業創新的重要基礎。擘劃我國政府、產業、人才與社會發展之國家級數位轉型戰略[1]。

另行政院進一步於 108 年 6 月核定「智慧政府行動方案」，制訂「開放資料透明、極大化加值應用」等三大目標，明訂「極大化政府開放資料供加值應用」等 7 項推動策略；各級政府與事業機構為必須面對探討與因應的課題之一。臺北市以「政府即是智慧城市的平臺，城市即為生活實驗室」概念，引入民間業者的創意與資源，將智慧科技應用方案，落實為可解決城市問題的智慧城市方案，使臺北市成為宜居永續的智慧城市[2]。

自來水為民生必需品，從國際水協會訂定「水智慧城市原則」[3]，希基於城市的彈性規劃和設計，利用共同願景為基礎的協同合作，促使地方政府、水務專家和市民積極參與，共同面對城市水管理課題。在此願景下，臺北自來水事業處(以下簡稱：北水處)承擔質優量足、用戶滿意的企業使命，透過精實管理與企業社會責任的推動，更能體現直飲、效能、永續的台北好水，結合知識和能力與適當規劃與實施工具，讓北水處得以永續經營。

一般而言，精實的理念是藉由全體員工

共同持續性的改善，以降低企業營運管理成本，快速生產模式及快速回應市場需求為主要目標;它的核心思想是消除一切浪費(浪費指流程中沒有增值的活動),精益求精和持續改善。精實管理是源自於日本製造業中最受矚目的「豐田式生產系統 (Toyota Production System) 」[4]。現今面對日益競爭激烈與少子化的環境，尤其當產品與服務日趨成熟之際，精實(Lean)的需求就越來越迫切。借鏡國際案例,諸如:瑞典的經濟成長靠的不是瑞典人的加班，而是瑞典人懂得分配事情處理的優先順序，以及非常注重效率的工作態度。其政府制定相關政策，目前超過 80%醫院及 30%政府機構(稅務機關、社會保險局、移民局、警察局)，推動精實管理且具推行成效。像這樣增加工作效率的方法論，不管是在業界或者是學界一般稱作為「精實管理（Lean Management）」。簡單來說，精實管理是一門探討如何來增加工作效率，然後貢獻到顧客滿意度上的一個方法論。

臺北市政府主要係因應外部顧客(市民大眾)日新月異的需求，以及解決內部顧客(所有同仁)案牘勞形的困境。陸續辦理「推動精實管理專案」(105 年)、「擴大推動精實管理專案」(106-107 年)、「精實管理推動小組」(108-111 年)等專案，規劃辦理相關教育訓練、實作觀察、成果確認，協助各機關與事業機構公司等發展精實管理技術，進行流程改造，減少資源人力與時間的浪費，提高公共服務品質。北水處為配合「臺北市政府精實管理推動小組」執行，亦於 108 年 4 月 29 日訂定北水處精實管理推動作業,成立推動專案小組，以利推動所轄各單位就權管業務，運用精實管理檢討對內外部顧客無價值或低價值的冗事、繁瑣的大量作業，簡化或 E 化流程，消除浪費，增進價值及效率。

此外，北水處在推動精實之際，自 2017 年起也配合調整推動企業社會責任(CSR),提出企業社會責任政策及制度，在正直誠信、團隊合作、創新卓越、開放共享核心價值下，承諾從事合於道德及誠信的社會行為，以符合平衡環境、社會及公司治理之國際趨勢，改善員工、社區、社會之生活品質。依事業特性、相關產業趨勢，考量永續性脈絡、重大性、完整性及利害關係人包容性，進行利害關係人鑑別與溝通、蒐集並辨識利害關係人關注議題，選定重大議題；另須配合因應新的認證基準。

二、精實管理推動與培訓及認證探討

(一)精實文化思維與推動探討

精實是一種持續改善的心態主要在管理系統中，讓組織專注並賦與授權給各級人員消除浪費及創造顧客最大價值。精實管理概念起源 1940 年日本 Toyota 汽車工廠發展 TPS 系統，專注於改善與排除所有形式的浪費，改善必須重製的缺點、不必要的加工步驟、不必要的物料或人員移動、過長的等待時間、過多存貨和生產過量問題。精實管理(Lean Management)於製造業施行已久，21 世紀被導入服務業提升生產力，發展為企業利用精實工具進行營運面管理，著重簡化所有活動與作業的理念方法，以及消除浪費（無附加價值之作業）。精實思維著重在需求導向、減少浪費、創造價值，以及卓越與持續改善的文化。意即「使用最少資源盡可能做

到最好的水準」，達成企業長期的利潤與成長。目前已廣泛運用於服務業、銷售業、政府和其他非製造業。

精實管理與其他管理工具的主要差別包含:從顧客的角度看到價值、激勵組織內的同仁、佈署快速持續改善的落實架構、圍繞價值流的組織流程精簡、持續追求完美並以可視化管理加速改善效能。如何實現精實管理的價值，其方法包含：諸如:強調以「客戶價值」為核心：透過定期「流程檢視」，找出創造價值（企業、顧客及 員工）活動，消除無法創造價值的浪費。或者，打破傳統「由上而下」垂直管理模式：將產品或服務視為一條「水平價值流程」 (Value Flow)。亦有，強調持續改善：為達成最有效率的流程，強調不斷以最低成本、最及時生產，提供滿足客戶需求的高質量服務，促使企業獲利與成長。有關建立精實文化：考量配合員工發展的需要；諸如:在高階主管方面須考量精實思維(謙卑、尊重、好奇…)、設定關鍵績效指標(KPI)(含顧客和營運)、PDSA 科學化解決問題的能力、策略佈署、現場觀察的領導力。在中階主管方面除前述外，另需考量流程管理及指標。在基層同仁方面須考量辨識浪費與日常改善等。

精實管理導入執行步驟如圖 1 所示：依序為:成立精實管理跨功能團隊、定義改善問題與目標、分析現況價值流程(SIPOC) 、分析作業流程、作業流程特性要因分析與解構重點、策略選擇模式-優先矩陣(Prioritization Matrix) [5]。在成立精實管理跨功能團隊時，決策者的支持相當重要，此外尚須考量主要標的包含：首先：在專案選擇方面:提供團隊必要資源、保持團隊與其他利害關係者合作、減緩過程中影響達成目標的計畫和資源的改變、確保團隊所有人有能力且願意履行職務。其次：在專案支持方面，了解改善活動中需求，並提供團隊時間和充足預算，確保預定計畫成功；協助減少組織中障礙；鼓勵利害關係者參與。最後在專案結果方面:確保團隊改善活動執行不會造成目前實務運作過大影響；傳達支持與慶祝成功；將結果再運用於其他領域或流程改善；秉持持續改善思維；充分整合團隊成員技能。

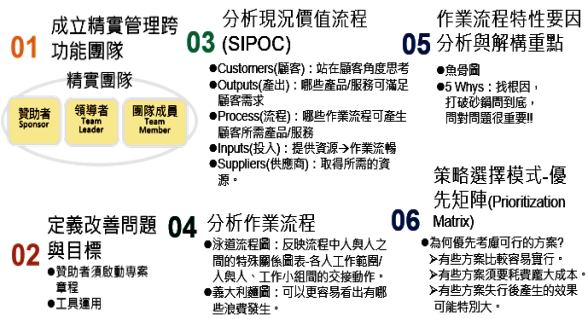


圖 1　精實管理導入步驟示意圖

(二)精實管理培訓及認證探討

臺北市政府（以下簡稱北市府）為全國第一個全面推動精實管理政府機關，歷經從 105 年起至 107 年期間導入，為賡續提供所屬各機關學習精實管理機會，深化精實思維，持續改善組織文化，增進行政效能及提升執行力，特成立北市府精實管理推動小組規劃於 108 年至 111 年執行精實管理全面推動專案[6]。其推動主要事項說明如后：

1.培育精實管理種子師資：為增進北市府同仁了解精實管理實務知能，培養與建立北市府精實管理種子師資，以持續深入內部

擴散運用，規劃辦理精實管理種子師資培訓課程，後續由此專案教育訓練分組（公訓處）另行通知各機關配合辦理。

2.認證精實管理優良改善團隊：為延續北市府 105 至 107 年精實管理推動成果，深化各機關精實管理能力，除此專案原示範機關以外，將針對北市 32 個一級機關辦理連續四回合（每一回合 5 梯次）認證精實管理優良改善團隊，各精實管理優良改善團隊應配合全程參與圖 2 之作業流程，並自行於機關內部進行實務運作[7]。

圖 2　優良改善團隊認證作業流程示意圖

筆者有幸受北水處之命接受北市府培訓為精實管理種子師資，以及擔任領隊率領精實管理優良改善團隊。此梯次共有臺北市政府社會局等 7 個機關組成精實管理優良改善團隊，其主題內容皆涉及不同程度的 E 化，以提升整體成效，並接受最終回合第一梯次評比，經台灣精實醫務管理學會林秘書長政逸等盡心指導，以及臺北市政府衛生局黃局長世傑等協助，終獲認證得第一名成績，謹將相關經驗為文探討，與知識管理分享。

在精實管理中需定義改善問題與目標，包含辨識的八大浪費：不良品浪費、生產過剩浪費、等待浪費、人才的浪費、搬運浪費、庫存浪費、動作浪費及額外的加工等[8]。此外，須傾聽顧客的聲音，包含：明確決定誰是目標顧客、找出目標顧客的需求、界定價值主張及方法、價值不在於做更多，而在於解決問題、首先要著重為顧客達成「什麼」，接著再探究「如何」達成。

此外，在精實管理中相當重要的一環，為分析現況價值流程 SIPOC[9]，主要流程包含:S(Suppliers:所需的資源應該從哪裡取得)、I(Inputs:提供哪些資源讓作業流程順暢，產出顧客所需的產品與服務)、P(Process:那些作業流程才能產生顧客需要的產品或服務)、O(Outputs:提供那些產品或服務才能滿足顧客的需求)、C(Customers:站在顧客的角度思考)[10]，如圖 3 所示；亦即繪製價值流地圖，其起源為美國品質大師戴明（W.Edwards Deming）提出的組織系統模型，用於流程管理和改進常用技術作為識別核心過程的方法。其主要意義包含:首先:利用 SIPOC 幫助我們瞭解從供應者到顧客間的流程關係、其次：提供我們對關鍵投入和產出更明確、最後在 SIPOC 強調「系統」與「系統目標」的密不可分。

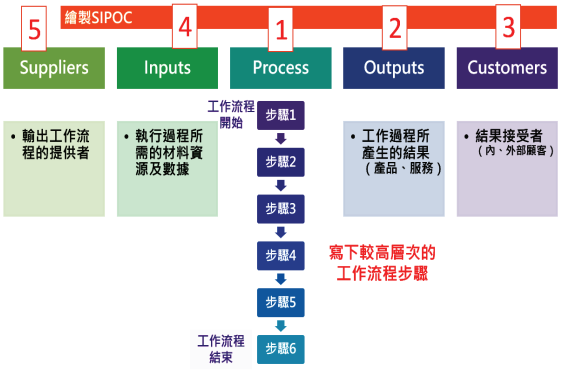


圖 3　現況價值流程 SIPOC 示意圖

運用 SIPOC 之優點甚多，主要包含：完整呈現跨越職能部門的價值流程活動、不論

組織的規模大小均可利用 SIPOC 的框架描述業務價值流程、提供組織完整的價值流程並可依流程增加細節、價值流程圖提供檢視的工作過程和流程問題、改善工作流程減少無價值的工作任務並縮短週期時間、利用流程分析發現「關鍵問題」提升生產效率與競爭力。繪製 SIPOC 須思考相關的面相包含首先為目的：為什麼會存在這個過程與目的是什麼？在輸出方面：此過程將帶來什麼產品或服務？另外在客戶方面：誰在使用這個過程的產品或服務？此外在過程方面：每項輸入需要發生什麼變化？其步驟為：1.P=找出過程的主要步驟 2.O+C =列出關鍵輸出與客戶 3.I+S 列出關鍵輸入與供應商。最後，在識別過程的起點與終點；並須注意相關過程的關聯性。精實管理探討過程時，經過相關分析，諸如:魚骨圖及 5Whys 尋找問題點，或可進一步配合做根本原因分析，此時有可能須修正原本設定的計畫標的。精實管理推動與運作模式調整如圖 4 所示。為什麼要做根本原因分析？首先在於發現問題或事件的根本原因、其次在於希完全了解如何解決，補償或從中學習、最後將分析所得的知識有系統地應用到預防未來問題或複製成功經驗。核心原則須考量:首先關注於矯正和補救根本原因，而不僅僅是處理症狀，但也不要忽視治療症狀對於短期緩解的重要性、其次根本原因可能（或經常）不只一個、最後聚焦於“HOW” and “WHY”，而不是 WHO was responsible”[11]。最後，藉由腦力激盪等選擇實施的策略與方案[12]，以及運用資通訊等數位工具視覺化管理維持改善。

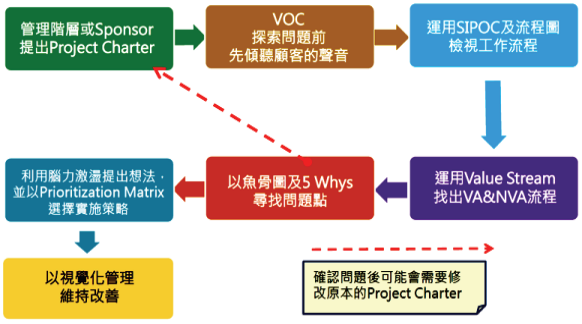


圖 4　精實管理推動與運作模式調整示意圖

三、精實管理專題案例探討

(一)推動緣由

在精實管理專題案例探討，經考量以往參加的經驗，與待精實管理探討的課題，本次改採「複查及處理服務流程精進管理」雙主題分進合擊，以提升成效。此外，于推動緣由方面：主要考量為機關層級平衡計分卡精實作業達成率之一環，包含:諸如:考量後疫情時代產業數位轉型政策白皮書及北市府持續推動 E 化政策檢討策進、另外考量零接觸服務為核心主軸，推行數位化變革、此外考量盤點與用戶互動接觸最多的 5 項用水服務擇自行催收複查每年約 7 萬次辦理，以期作業模式優化與 E 化減少移動降低接觸。基此，分別針對問題與機會、改善目標設定、改善對策影響、改善流程或範圍、改善規劃期程、團隊選擇等擬具改善計畫一透過流程精進達到縮減人時、遠距辦公 E 化等目標[13]。

(二)課題描述探討

在課題描述方面：須考量為什麼這是必須被解決或探討的課題？包括時間或地點等背景、預期目標與選定理由。其中本專題考量在顧客的聲音 VOC 方面，包含：首先在北市府的聲音：數位轉型遠距辦公零接觸

服務、另外在外勤人員的聲音：案件多：重覆派工重覆催欠致案件增加、攜帶不便整理麻煩查資料不方便、浪費時間等待協助或交通往返、找不到聯絡不到或用戶不配合：系統聯絡資訊不完整。此外在內業、管理人員的聲音：案件管理：回報系統、結案歸檔重工耗時，且全程人工管控，容易遺漏；人員管理：外勤同仁每日在外 4-6 小時，工作績效不易掌控及管理、最終尚有用戶的聲音：複查用戶：水表是水處裝的，有問題當然找水處；欠費用戶：我只是忘記、又不是故意欠費；沒收到通知就被停水。另在複查案件近幾年增加原因？包含：民眾用水意識抬頭用戶成案比例增加，及成案原因以水費異常增加幅度最大等。以複查問題檢討作業流程，進一步運用 SIPOC 分析，以利檢視相關浪費，發現主要包含加工浪費、生產過剩浪費、等待浪費、動作浪費與管理浪費等。

(三)設定改善課題的具體目標探討

在設定改善課題的具體目標方面：包含運用 5W2H 原則，指明「誰」在「多久」內，要做「什麼」?「在那裡」執行？「為什麼」這樣做？「如何」做？「花費」成本？可獲得「多少」成果等。其中有關如何做(How)：

1.規劃(Plan)：首先在需求訪談與界定；需求規劃與目標之關聯性。另外在分析現況及檢討流程:藉由資訊流、作業流與時間流等現況價值流分析，以複查問題檢討作業流程為例，每件作業時間 120 分，每批次作業時間 4.61～8.11 日。發現重工手寫、重覆填寫、動作浪費、人工管控費時、動作及等待浪費。此外在訪談業務相關人員(複查員、處理員、成案、派工及案件審查人員)，使後續系統功能符合各階段使用者需求。最後研擬具體改善方案及可行性分析。

2.執行(Do)：首先召集推動工作小組，進行分工作業。另外導入改善方案，建置用水複查及處理服務 APP、修訂相關作業流程。此外推動系統上線及辦理改善方案教育訓練及推廣。最後 APP 上線及持續優化。

3.查核(Check)：首先訂定評估指標及目標值。其次檢核評估指標及目標值，並定期性蒐集分析使用者評論與回饋，提出改善及優化方案。

4.行動(Action)：進行改善方案，持續精進流程及 APP 優化。

有關建置成本(How much)：於年度電腦軟體服務費預算內辦理採購。在改善目標：不受時地限制、即時查詢業務資訊，提升內部作業品質及外部服務效率；落實無紙化政策目標；結合 GPS 定位系統精進整體管理效率；全流程 E 化、縮短後續資料整理時間；人員績效管理可視化。

(四)解決對策探討

在解決對策方面：嘗試擬定矯正問題的行動計畫，透過問題要因分析，評比成本效益、風險後，條列式提出幾項有效的改善方法。諸如:以欠費催收改善對策 ECRS 為例如圖 5 所示，分別從減少(減少用戶客訴、繳費時間…等)、結合(流程合併，催繳欠費併提醒繳費…等)、重新安排(調整派工及完工作業方式，行動派工+行動回報…等)與簡化(簡化催繳作業流程，減少人工作業動作…等)面相展開。其後擬具:行動計畫：首先運用資訊科技提升效能，建置用水複查及處理服務 APP，突破必須在辦公室才能使用系統查詢

的不便性，可節省往返路程時間、提高整體處理效率，優化作業流程。其次分階段執行：第 1 階段(109 年 7 月-110 年 12 月)：先導入用水複查及處理服務 APP(手機或平板)，針對複查、中止。復水、催欠停水或註銷水籍拆表等案件，從成案、派工、現場執行及回報結案作業進行盤點及調整相關作業流程；對於現有系統面之資料，建置 APP 與相關系統(水費、AMR 自動讀表、櫃台無紙化、WEBGIS、家戶節水等)之介接，以提供即時資料查詢及回傳處理結果，並新增印表機，提供列印停水催收單功能。第 2 階段(110 年 11 月-111 年 12 月)：規劃複查案線上審核及陳核流程，落實全流程 E 化及無紙化目標；持續優化 APP 功能；如圖 6 所示。經綜整分析以複查執行成果為例：改善後價值流預估每件作業時間可節省 48 分鐘，每批次作業時間縮減 2.65～4.15 天。以欠費催收執行成果：改善後價值流每件作業時間節省 56 分鐘，每批作業時間縮減 5.7 天。

(五)整體預期效益評估

在整體預期效益方面，經透過複查及欠費業務轉型，現場作業雲端化、遠距工作績效管理，將滿足後疫情時代無接觸，或減少接觸成為生活新常態。主要效益包含；首先在配合達成市府政策：達成市府數位轉型遠距工作政策。其次在提升外部服務品質：繳費催欠零接觸複查案件少接觸、用戶已繳費被停水件數降至 50%以下、緊急或客訴案即時交付線上辦理每案處理時間減少 0.5-1 日。最後在精進內部作業效率：全流程 E 化落實無紙化減少用紙 13.74 萬張、提升作業效率縮減處理人時 6.37 萬小時、減少無效派工 2.13 萬件、精進後端管理即時掌控案件處理進度、改善技術士工作環境提升人員招考進用。

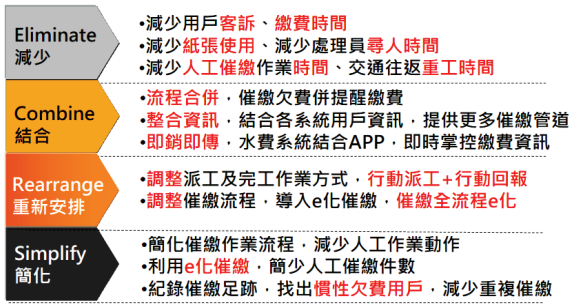


圖 5　欠費催收課題改善對策 ECRS 示意圖

圖 6　複查及催收作業數位應用系統

四、企業社會責任選題與認證探討

(一)企業社會責任報告選題探討

在企業社會責任報告與選題方面：企業社會責任 (簡稱 CSR) 概念的發展，應該根據經營願景、CSR 策略及目標來決定。永續發展或 CSR 報告書的內容研訂時，應該先考量出版型態，展現企業在 CSR 或永續發展議題上的創舉及特性，接著才進行內容與資訊支援體系的規劃。一般有以下四大步驟：第一步驟：定義申報方式、第二步驟：CSR 報告書的內容規劃、第三步驟：報告的製作、第四步驟：報告書的發行、發送與使用。臺北自來水事業處 2020 年企業社會責任報告書[14]，揭露 2020 年北水處各項重大議題及行

動方案績效資訊，包括 6 個章節：永續發展、企業經營、穩定供水、環境保護、友善職場、完善服務。依循全球永續性報導準則(簡稱 GRI)核心揭露項目及 2018 年新發布之特定主題準則「GRI303 水與放流水」和「GRI403 職業安全衛生」進行編製，揭露重大議題、目標、管理機制及執行成效，同時以具體目標及行動呼應聯合國永續發展目標(SDGS)。北水處取用水源、人力、土地設施等眾多社會資源，肩負大臺北民生與經濟發展的供水責任，從經濟、環境與社會三個面向訂定企業社會責任政策，致力提升水利用效能、減少能耗與排放、友善職場與社區，並以具體目標及行動呼應聯合國永續發展目標。積極實踐企業社會責任，以提供質優量足、用戶滿意的服務為使命，邁向直飲、效能、永續的臺北好水願景，打造臺北成為水資源永續的宜居城市。

有關 2020 報告書之重大主題擇定，首先盤點所有不特定實體或個人，分類探究是否顯著受到企業組織之【活動、產品或服務】所影響，以及其等行動同時也相對造成影響企業組織【推行策略】與【達成目標】能力，同時並參考相關行業之利害關係人群體，據以最後鑑別出 5 大類主要的利害關係人，包括用戶(顧客)、政府機關、社區居民、員工、供應商。接續再蒐集各利害關係人關注議題，依照 GRI 101 準則揭示，報告書報導內容應遵循涵蓋利害關係人包容性(合理期待與利益)、永續性脈絡、重大性及完整性 4 大原則，透過參考全數利害關係人各個構面特定對應的研討會議、陳情反映、問卷調查、現場服務及座談交流等溝通管道，逐一盤點前一年度相關資料所呈現態樣，共整理歸納出 26 項涵蓋所有利害關係人關注議題(如下圖 7)，按其關注程度比率進行排列如圖上橘色相對曲線，鑑別選出排名前 14 項關注議題為 2020 年重大主題；並經北水處高階主管及相關專業外部委員組成 CSR 推動委員會議審核確認。

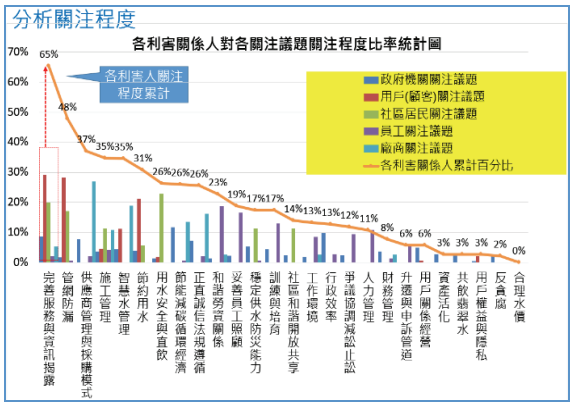


圖 7　各利害關係人對相關議題關注比率統計圖

另外參考各界回饋意見與內外部環境最新發展變革，同時參酌第三方公正專業單位查證建議，2021 年規劃報告書之利害關係人關注重大主題，共計選定 15 項，其中特別新增「後疫情時代數位轉型服務精實」1 項，其具體推動內容係依據臺北市政府發行後疫情時代產業數位轉型政策白皮書及其持續推動 E 化政策進行檢討策進，優先承接以市民為顧客直接相關之「零接觸服務」核心主軸，推行數位化變革，全面盤點出與用戶互動接觸最多的 5 項用水服務，進行作業模式優化 E 化，並兼顧民眾、員工及委外人員減少移動浪費與密切接觸風險目標，提供民眾方便免接觸的創新服務。此外，並以網站整合與介接台北通為主要服務入口，推動用水整合服務-智慧水管家系統，期盼透過簡

易便捷數位 E 化系統，提供免接觸、免抄表、免出門，E 指就搞定之各項新型態用水服務，徹底落實新冠疫情後疫情時代成功轉型案例。

(二)企業社會責任報告認證探討

在企業社會責任報告認證探討方面:獨立的企業社會責任/永續報告查證將提高利害關係人對北水處報告的可靠度，並增加組織企業社會責任/永續性計畫和成就的可信度。首先，企業社會責任/永續報告提供了公正的保證，能證明北水處的報告是準確、完整且切合實際的。投資人、顧客、員工及其他利害關係人將更信任報告的內容，且對與機構組織的所有互動更具信心，而高階管理層更能堅信地依此做出策略性的決定。其次，企業社會責任/永續報告查證能印證北水處組織之透明度，以及對永續經營的盡責態度。獲得查證的報告可受到評等及評比，而評等及評比的結果可為企業社會責任指數提供風險與績效基準。最後，獨立的永續性報告查證能展現組織在社會、環境及經濟績效層面提出的相關議題及風險。因為在企業社會責任上的領導地位，它將提升品牌信譽，且將協助獲得競爭優勢。同樣重要的是，查證過程可協助發現企業社會責任相關管理系統及流程可能需要改善的領域。同時，有助於確保組織持續遵循法規，及指出降低成本、提升效率以及進入新市場的可能機會。

基此，獨立的第三方查證為企業社會責任/永續性報告提供了客觀的驗證。通常會根據全球公認的全球報告倡議組織（GRI）準則以及 AA1000 保證標準等來進行相關評估[15]。藉由委請 BSI 著重於報告的四個關鍵領域：1.包容性：將評估組織制定明確的利害關係人參與流程，負責任地處理和回應利害關係人議題及對利害關係人的影響。2.重大性：將評估各項議題的優先順序，也會評估相對於組織和利害關係人的重要性。3.回應性：將判斷報告傳達提供足夠的證據對利害關係人關注做出有效的回應。4.衝擊性：鑑別並以平衡和有效之量測及揭露方式公正展現其衝擊，實現更有效之決策和結果管理。並於評估後製作保證意見聲明書，可證明對企業社會責任及永續經營的承諾。

五、結語

全球進入數位化時代，資通訊應用隨著數位經濟發展，更逐漸轉變為「創造公共服務價值」的發展目標，運用新興技術優化政府服務流程、創新為民服務型態，滿足民眾需求，成為推動智慧政府重要精進方向。特別是後疫情時代對於資通訊服務所面臨的衝擊，數位轉型智慧化將會繼續面對新的課題，因為新冠疫情出現後各企業組織開始採用一些新工具和新技術因應。

此外，運用數位化在精實管理培訓專案提升公共服務績效，亦是提升宜居永續的城市效能須探討與因應的課題之一。基此，北水處目前配合北市府政策持續辦理各項防疫措施外，進行全面盤點檢討制定整體各階段轉型計畫，除了複查及催收作業數位應用系統外，在數位轉型對應方面積極推動智慧水管理與服務開發諸如:智慧水表、用戶整合服務、智能客服、行動支付及服務等，納入精實管理概念，如圖 8 所示；並滾動調整修正，以提升整體成效。

另為維持組織永續經營，兼顧所有利害關係人各階段動態需求；據以選題與認證，以具體目標及行動呼應聯合國永續發展目標，積極實踐企業社會責任，以提供質優量足、用戶滿意的服務為使命，邁向直飲、效能、永續的臺北好水願景，打造臺北成為水資源永續的宜居城市。

圖 8　智慧水管理與服務示意圖

參考文獻

1.「服務型智慧政府2.0推動計畫 (110年至114年)」，國家發展委員會，中華民國109年8月。

2.「台北智慧城市」簡報，臺北智慧城市專案辦公室，北市府資訊局，2021年10月更新版。

3.鄭錦澤等，「從智慧城市發展談水智慧社區運用管理－以健康公宅等為例」，(2019，中華民國自來水協會會刊，第38卷，頁53-65。

4.湯皓宇，「精實管理入門概論」，臺北市政府公務人員訓練處，108年12月。

5.周德威，「精實管理入門&推動與運作模式解析」，臺北市政府研考會，108年12月。

6.「臺北市政府精實管理推動小組」專案計畫，臺北市政府研究發展考核委員會，108.02.26。

7.吳能鴻，「北水處推動精實管理三部曲」，臺北自來水事業處，108年7月25日。

8.郭建宏，「八大浪費辨識」，臺北市政府觀光傳播局，109年1月16日。

9.郭欣瑀、吳智維，「分析現況價值流程SIPOC」，政風處、地政局，109年1月16日。

10.趙康邑，「價值流地圖」，臺北市立聯合醫院。

11.許志敏，「根本原因分析」，北市府消防局。

12.阮嗣剛，「精實管理制定和實施對策」，台北捷運公司，108年12月9日。

13.「複查及處理服務流程精進管理」，臺北自來水事業處，110年12月6日。

14.「2020企業社會責任報告書」(核定版)，臺北自來水事業處，110年8月。

15.「ESG永續(CSR)報告書查證-Account Ability組織核定新版永續績效指南」，BSI。

作者簡介

鄭錦澤先生

現職：臺北自來水事業處處長室專門委員

專長：供水調度及管理、淨水處理、技術研發、工程規劃與管理、營業管理、圖資應用、採購稽核

陳永松先生

現職：臺北自來水事業處企劃科一級管理師

專長：企劃規劃、業務管理、營業管理

張育嘉小姐

現職：臺北自來水事業處東區分處二級管理師兼股長

專長：企劃規劃、抄表營業管理、研考服務

周麗娟小姐

現職：臺北自來水事業處企劃科一級管理師

專長：系統管理、用戶服務、抄表管理、研考服務

荀蕙苓小姐

現職：臺北自來水事業處陽明分處二級管理師兼股長

專長：企劃規劃、營業管理、研考服務

日本推動低碳供水系統之探討

文/唐俊成、葉素柔、蔡文魁、李丁來

摘要

近年氣候變遷導致世界各地災害頻傳，其主要原因歸咎於溫室氣體排放造成地球暖化的影響，為解決此一問題，全世界已有 130 多個國家宣示加入推動淨零排放的行列，並訂定分階段達成淨零排放目標，臺灣在 2021 年 4 月 22 日世界地球日蔡總統宣示，2050 淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標，故自來水業對於淨零減碳之推動，亦應加緊腳步，迎頭趕上。

日本自來水業透過促進節能、擴大再生能源導入、促進全體社會減碳等策略，並針對原水、淨水、供水系統與廢水處理、廢棄物回收再利用等處理流程研訂相關節能減碳措施，來達成 CO_2 削減量目標，與台水公司自行盤查碳排放量組成，發現由範疇 2 電力消耗的間接排放佔全體碳排放的的 99%以上不謀而合，日本自來水業推動二氧化碳削減之經驗，可作為國內自來水業推動淨來排放之參考。

關鍵字：淨零、CO_2、減碳

一、前言

根據科學家研究，現今氣候危機很大原因是人類工業革命產生大量的溫室氣體，造成了地球暖化，如果不遏阻地球升溫超過工業革命前 1.5℃到 2℃之內，地球很可能在 2100 年就不宜人類居住。為解決這問題，世界各國領袖自 1992 年在里約熱內盧召開的地球高峰會通過「聯合國氣候變遷綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)以來，即不斷提出各項環境保護公約，以抑制氣候變遷所帶來的巨大衝擊。

近三十年國際間因應氣候變遷相關方案蓬勃發展，國家/州/城市/企業/實體紛紛積極研擬/宣告減量目標，冀望藉由全面性方案規劃與執行，降低自身溫室氣體排放量，並透過購買碳額度或負碳排技術以達到所設定目標，作為對氣候科學最好的回應，其中「淨零排放」即為 2021 年全球最受矚目的關鍵議題，如何達到 2050 年的淨零碳排目標，也成為未來各國轉型的重要發展策略。

不少國家更已積極訂定減碳路徑，甚至研發新技術，來盡力達成淨零碳排的願景，臺灣在 2021 年 4 月 22 日世界地球日蔡總統宣示，2050 淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標，故有必要了解國際自來水業對於淨零減碳之推動情形，尤其是日本在淨零減碳方面所採取的措施，以供國內自來水事業單位之借鏡，供水業務各項作業對環境之主要影響如圖 1。

二、日本東京都水道局減碳推動情形

依據東京都水道局於令和 2 年(西元 2020 年)2 月公布「東京都水道局環境 5 年計畫(2020-2024)」所載，其在生產水的過程中，除了每年消耗約 8 億 kWh (1kWh=１度電)的能源，相當於東京約 1%的電力消耗外，還排放廢物等對環境產生了不小的影響。因

此，自 2004 年度以來，該局一直自行制訂環境計劃，並不斷努力減少對環境的影響。

在該計畫中，制定「CO_2 排放量的削減」、「健全水循環豐富綠色保護」、「資源永續利用」及「與不同主體的環境交流」等四個重要領域(如圖 2)，其中 CO_2 排放量的削減更列為首要基本方針，由此可見該局對於推動淨零減碳之重視。

由上開東京都水道局在推動的各項減碳措施觀之，其主力是放在降低能源消耗產生之碳排放量，此與台水公司初步盤查碳排放量組成，由範疇 2 電力消耗的間接排放佔全數碳排放的的 99%以上不謀而合，可知自來水事業在淨零減碳的措施研擬，主要還是要設法降低能耗產生之間接排放 CO_2 為優先考量。

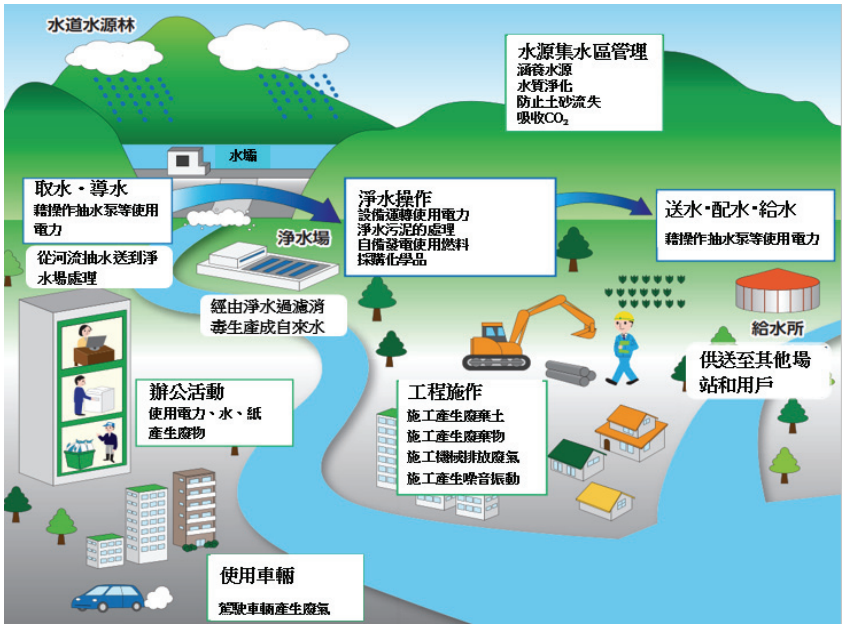


圖 1　供水業務各項作業對環境之主要影響[1]

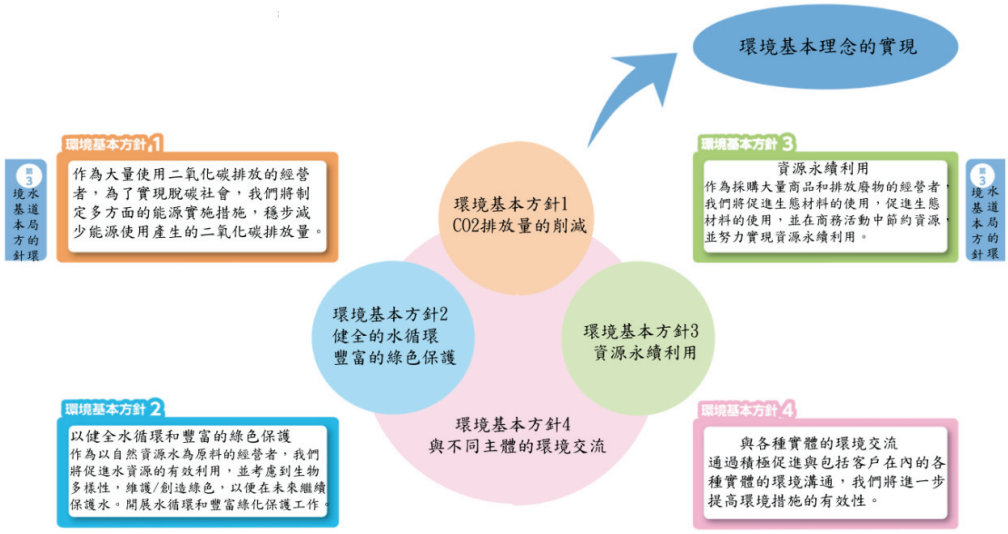


圖 2　東京都水道局環境基本方針[1]

表 1　東京都水道局削減 CO_2 排放量目標[1]

脫碳分類	減碳措施	2018	2024
減少二氧化碳排放量	太陽能發電設備容量	8,558kW	10,000kW
	小水電設施容量	2,281kW	2,500kW
應對 CO_2 減排義務	大型營業所 CO_2 減排率	15%	25%

表 2　東京都水道局削減 CO_2 排放量措施[1]

環境基本方針	實施策略	對應措施	目標
削減 CO_2 排放量	促進節能	與導送水管維護相關的能源效率提升	隨著導水管複線化和輸水管網路化，儘可能以節能模式實施運營。
		發電設備效率的提升	引進低 CO_2 排放量的發電系統設備，以提高常設發電設備的效率。
		引進直接供水泵設備	為有效利用供水站供水池入口壓力，安裝直接供水泵設備。
		引進節能泵設備	新建、更新泵設備時，將引進 20 台以上的節能型泵設備。
		高效能設備的更新	積極更新空調和照明等高效設備。
		減少辦公室活動用電量	將辦公室活動用電量控制在 2018 年用電量以下。
		提高供水操作效能	通過將水配送到能耗較少供水管線，並透過水庫適當控管水位來促進節能的水運營模式。
	擴大再生能源導入	太陽能光電設備的導入	於淨水場和供水站進行設置累計約 1 萬 KW 的太陽能發電設備。
		小水力發電設備的導入	有效利用配水池入口的未利用動能，累計引進小水力發電設備 2,500KW 以上。
	促進全體社會減碳	採購綠電	積極採購環保電力，如高比例的可再生能源使用。
		零碳排車輛的導入	原則上，將 100%引進電動機車，同時考慮到汽車的實際使用情況和市場趨勢，積極引進新一代的 ZEV 電動車。 此外，將在大高知水庫引進電力推進型環保作業船。
		推廣直接供水	促進直接供水的普及。

除上述各項 CO_2 排放量的削減措施外，東京都水道局在其他環境基本方針採取之對應措施如水源林的保護、水利設施的綠美化、防止漏水措施的持續推動、節約用水宣導、淨水場廢棄物再利用、辦公用紙減量及減少塑膠製品的使用等皆有助於減少 CO_2 排放量，由此可知東京都水道局對於淨零工作的重視。

三、日本減碳供水系統建設調查

日本現有水道事業計有：上水道事業(即自來水事業)1,355 家、簡易水道事業(即簡易自來水事業)5,133 家，根據厚生労働省令和 2 年(西元 2020 年)6 月公布之「脱炭素水道システム構築へ向けた調査等一式報告書」

(無碳供水系統建設調查)所示，日本國內自來水事業全年(2016 年)用電量為 73.3 億 kWh，佔日本總用電量的 0.8%，如要實現全球暖化對策計劃（2016 年 5 月 13 日內閣決定）中規定的 CO_2 減排目標，供水業務也需要積極努力。自來水事業通過實施環境措施，如更新節能設備和推廣可再生能源，穩步減少 CO_2 排放量，但尚不足以實現全球變暖對策計劃訂定的目標，故在辦理更新供水設施、整合和關閉供水設施等措施同時，將加強瞭解當前供水系統中的能源損失，並採取更有效的減少 CO_2 措施，包括利用水位位能、縮小設施（設施）規模，並整合到節能的供水設施中等策略，來進一步強化供水系統的減碳成效。

為了解日本自來水事業對於供水系統所採取各項減碳措施辦理情形，厚生労働省特別針對各自來水事業進行相關問卷及實地調查，其調查內容包含：(1)減少 CO_2 排放的措施、(2)案例研究的初步調查、(3)案例研究驗證、(4) CO_2 減排效果分析、(5) CO_2 減排潛力調查、(6)推廣方法評估等，茲節錄部分調查結果如表 3。

由上開調查內容來看，日本自來水事業淨零減碳主要策略聚焦在降低範疇 2「使用能源的間接排放」，另在無關投資的措施雖然有助於減少用電量產生的碳排放，但相較於有關設備更新投資等措施或有關投資審查供水計劃等的措施，減碳效果相對較差，因此如要達成一定比例的減碳成效，必要的成本投資仍不可避免。另如以各類減碳措施進行電力及 CO_2 削減潛力分析發現，逆變器(inverter)的導入、高效電機的導入、受水壓力的活用及通過受變電設備的更新等設備的高效率化可減排量約為總減排潛力的 41%，其餘 59%為優先從具有優良勢能的水源取水、供水區域的調整、合理的位能使用調整（供水設施合併、整合等）及水位位能的有效利用等。

另外本項調查報告亦舉出一利用勢能建設減碳供水系統實例—福島市自來水局廢止淨水場，改由其他水質較佳且地勢較高的供水系統供水，大幅削減能源使用量的案例。在 2007 年上半年之前，福島市自來水廠從阿武隈川取水，在渡利淨水場進行處理，然後輸送到各個配水池。但從 2003 年左右開始，陸續轉而使用福島地區供水公司的清水，自 2007 年起，大約 99%供水被取代，並且廢除渡利淨水場淨水處理，改以福島地區供水公司清水直接供水，用電量（電費）從 2002 年的 2,153 萬 kwh 到 2018 年的 74 萬 kwh，減少 97%，節電效果顯著。

其節電效果來自取消取水、淨水過程和供水過程中的泵設備，整個供水區域幾乎都改為自然流方式供水，由於福島地區供水公司提供清水，使得渡利淨水場淨水處理變得沒有必要，且因為它從含有城市廢水的河流中取水，水質不佳需使用整個淨水場的 1/4 能源進行污泥處理。福島市的自來水由福島地區供水公司集團提供，如表 4 所示。該集團從摺上川大壩取水，通過一條 9 公里長引水隧道，利用自然導水流至摺上川淨水場。原水監測水質良好穩定，活性碳、PACL 等化學物質用量很少。該集團向 3 個城市（福島市、伊達市、二本松市）和 3 個町（國見町、古織町、川俣町）供應自來水，約占福島市供水 70～80%，6 個地區供水年用電量

約 1,000 萬 kwh，其中包括 3 個城市 800 萬 kwh 和 3 個鎮 200 萬 kwh，約佔之前總用電量 2,700 萬 kwh 的 40%，即減少約 60%能源消耗。由本案例可知，經由供水區域的調整及改採水質較優良的自來水源，對於供水系統的能源消耗是有大幅調降之可能。

表 3　日本厚生労働省調查自來水事業 CO_2 減排措施的效果彙整表[2]

產水作業流程		實施內容	投資經費水準分類			影響
			1	2	3	
設備分類	減碳措施		非投資措施（運營方法審查）	投資設備更新等措施（現有設備更新）	投資供水設施等措施（設施整合）	
1. 取□・導□ 流程						
泵設備	1. 引入高效泵 2.引入高效能電機	在安裝或更新泵時，將配備與泵特性相匹配的高效電動機等，以提高能效，降低功耗。		◎		A
2. 沉澱/過濾流程						
混凝設備	1.快混裝置 2.提高慢混裝置的低速電動機效率 3.導入變頻系統驅動，改進傳動軸、物料和葉片結構	1.淨水過程中，用於快混和慢混所使用的機械攪拌器一般連續運轉，耗電量大。 2.安裝更新設備時，採用高效電動機和修改驅動系統（如以變頻控制轉速）降低功耗。		◎		A
加藥設備	1.引入自然流動方法以提高化學注入效率 2.根據原水質量自動化加藥控制	1.自然流動法利用高溫差注入藥品，由於不需正常運行注入泵，是耗電少的方式。 2.由原水自動控制加藥，適當注入，減少藥劑用量，並降低相關設備電耗。 3.仍需加強原水和淨化過程中的質量監控。		◎		B
3. 高級處理流程						
粒狀活性碳濾池	藉檢查反沖洗頻率和時間提高反洗效率	1.粒狀活性碳過濾池反洗是迴流清洗、表面洗或氣洗，通過迴流清洗進行，水泵和鼓風機等在洗滌中耗電量大。 2.檢查反洗頻率和時間等，減少水泵和鼓風機運行時間，以降低電力消耗。	◎			C
4.廢水處理流程						
污泥濃縮設備	通過調整操作時間和間隔來提高運行效率	對於污泥濃縮設備運行時間長、耗能大的污泥泵和刮泥機，濃縮池內污泥量由現場掌握監測，設定運行間隔。	◎			C
5. 送□・配□ 流程						
整個設施	提升防漏措施	1.通過防止漏水，可整體減少作為供水系統管理必要水量。 2.根據取水、導水、供水和分配，泵功耗、運行能量等與淨水處理和廢水處理有關的電力消耗，以及水淨化過程和排水過程所需運行能量等都可節省。			◎	D
6、綜合管理						
□ 務營運管理	引入可量化動力裝置和管道損失等的水運行系統。	1.功率單位是每單位量所消耗電量，功率單位越低，效能越好。 2.水利設施所消耗電力大部分是水泵設備所用電力，而因水量引起管道損耗變化對水泵功率影響很大。 3.通過引入可量化動力單元和管道損失運輸系統來實現節能。			◎	D
7. 其他業務部門檢查措施						
受電/變電/配電設備	藉採用自動電費改善裝置等來改善電費。	1.安裝自動功率調節裝置，將現有高壓超前電容器開關櫃改為高壓真空電磁接觸器，使調節裝置發出信號自動輸入/關閉。 2.安裝多個小容量超前電容器，通過自動功率調節裝置進行功率微調。		◎		A
備註：◎: 投資經費水準分類、A:引進高效設備、B: 有效利用勢能、C: 減少設備運行時間、D: 設施維護合理化。						

表 4　福島市供水區域調整後節電效果[2]

企業名稱	福島市自來水局
措施	取消淨水場，轉為接收清水
	利用水的接收壓力將水輸送到各配水池。
效果	減少 97%（福島市淨化後的耗電量：2,153 萬 kWh 改用清水接收後的耗電量：74 萬 kWh)

四、結語

近來陸續發生一連串氣候異常事件，僅在 2022 年上半年就發生諸多事件，例如印度北部嚴酷熱浪，出現近 50 度高溫(3 月最高平均溫度達攝氏 37.78 度、創 122 年來新高)、南非豪雨釀洪災，引發 60 年最嚴重土石流、巴西本年內已發生 4 次重大洪水事件、孟加拉及印度東北，遭遇世紀洪災(為 122 年以來最嚴重的洪災)、日本連續 9 天「猛暑日」，破 147 年高溫紀錄、澳洲雪梨暴雨成災 5 萬人被迫疏散、歐洲熱浪引發野火逾千人罹難、上萬人撤離家園等，在在顯示氣候變遷已經對你、我及後代子孫造成嚴重影響，各國政府對於淨零排放的推動，也較以往積極主動。

近年極端氣候導致旱澇不均，自來水事業亦深受其害。雖然自來水事業在碳排放方面的貢獻上，不如石化業的直接排放，也比不上科技業大量電力使用的間接排放，但仍應審慎以對，及早研究擬定相關淨零減碳措施。而根據台水公司初步盤查碳排放量結果來看，其主要碳排放量來源範疇 2 的外購能源(電力)使用間接排放，此與日本自來水業將供水系統各項節能措施列為主要淨零排放對策相呼應，雖然其採用之各項節能措施可能涉及水源是否充足及各自來水事業先天條件不一致等因素，導致無法全盤採用，但其實施的各項節能減碳措施，仍有相當多值得借鏡之處，企盼國內自來水事業對於碳淨零排放之推動，可以逐步落實，迎頭管上其他國際自來水事業，共同為地球及後代子孫營造一個永續發展的環境。

參考文獻

1.東京都水道局，「東京都水道局環境５か年計画 2020-2024 」，2020。 https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/suidojigyo/torikumi/kankyo/

2.日本厚生労働省医薬・生活衛生局水道課，「脱炭素水道システム構築へ向けた調査等一式報告書」（令和２年６月），2020 https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000701258.pdf

作者簡介

唐俊成先生

現職：台灣自來水股份有限公司工安環保處組長

專長：環境工程

葉素柔女士

現職：台灣自來水公司工安環保處工程師

專長：環境科學

蔡文魁先生

現職：台灣自來水公司工安環保處處長

專長：自來水工程規劃設計、工安管理

李丁來先生

現職：台灣自來水公司副總經理

專長：環境工程、自來水規設、營管及漏水防治

韓國首爾水務局自來水研習會簡介

文/林美良、顏銘宏

摘要

近來韓國首爾市政府協助該市相關產業之商機推廣，自來水僅是其中之一，其收益水量比 Revenue Water Ratio(RWR)一路從 1989 年的 55.2%提升至 2021 年的 95.5%，大幅提升了 40.3%，是其引以為傲之處，實現了與先進國家相同的收益比。

首爾水務局(Seoul Waterworks Authority)主辦之首爾自來水研習由韓國市政府自來水局委由韓國水務及廢水協會(Korea Water and Wastewater Works Association，簡稱 KWWA)舉辦，目的在與各國自來水界建立合作關係，彼此分享自來水技術及營運管理方面的資訊、知識及技術，內容包括首爾各水務單位的介紹、各國城市自來水現況發表及首爾市轄區自來水建設及管理單位的實地考察。

研習會自 2012 年開辦，各地代表來自亞洲、非洲及南美洲等地區，印尼、台灣、越南、尼泊爾、不丹、柬埔寨、斯里蘭卡、東帝汶及肯亞等進行相互交流。主要參訪韓國首爾市各大自來水營運單位，有首爾水務局、水研究所(Waterworks Research Institute)、污水處理及污水博物館、水務監控中心、水務設備管理中心、淨水場、首爾市政府、漢江管理等單位，提供系統性機會供各國學習韓國首爾市成功的自來水發展。

關鍵字：收益水量比 Revenue Water Ratio、首爾水務局、自來水研習會

一、背景說明

首爾水務系統分為「飲用水」與「廢水及下水道」兩大水務範疇，其中飲用水系統的主管機關為首爾水務局，下轄單位包括 1 處自來水事業總部、6 座淨水中心、8 座當地自來水服務處，1 座水資源管理中心，以及 1 座研究機構（首爾水研究所）。

透過首爾自來水研習會與各國自來水界建立可持續發的合作關係，彼此分享自來水技術及營運管理方面的資訊、知識及技術，也提供系統性機會供各國學習韓國首爾市成功的自來水發展、經營專業經驗，研討會內容包括自來水專家講座、各國城市自來水現況發表和相關機構和場所的實地考察。

研習會期間由首爾水務局委由韓國水務及廢水協會(KWWA)舉辦，安排各水資源相關領域之的講師進行演講授課及各城市代表上台簡報分享，結合課堂知識與實務經驗，使研習人員能更瞭解首爾市的政策。

二、各城市代表簡報分享

首爾水務局主辦的供水管理參訪工作坊中，來自各地代表及與會者，分別代表該國的某一城市，分享 10-15 分鐘有關用水與供水的簡報。

各城市報告的主題包羅萬象，這些成員有些來自首都或者供水設備已具有一定規模的大城市，也有些來自供水僅具基本雛形的偏鄉地區，簡單扼要說明所屬城市的供

水、售水現況、供水普及率、供水來源、管線長度、水價、水管理預算、水庫與加壓站數目等詳細水資訊，並在結尾時分享目前用水管理或營運所面臨的主要問題，以及希望或未來與韓國合作交流的相關可能性。

報告結束後約有 5 到 10 分鐘的討論時間，讓各城市代表與韓國官方代表及學者，藉由提問與分享等方式，提出見解與建議，除了比較與其他城市的異同之外，更能學習各城市的成功經驗。

各城市由於分別坐落於不同的氣候帶、不同的地勢地形等天然因素，或者受 GDP 與國家發展程度等人文因素，歸納與會者所代表的城市，皆面臨幾個共同的難題，包括：

(一)水價過低：導致經費不足，難以進行管線建設或汰換等工程與修復計畫。

(二)NRW(Non-revenue water)依然偏高：代表城市無論乾旱或半乾旱地區或者多雨地區，皆面臨高漏水率，如參加研習之越南寧平市(Ninh Binh) 36.84%、斯里蘭卡瓦里亞波拉市(Wariyapola) 27.25%、肯亞奈洛比市(Nairobi)38%、印尼泗水(Surabaya) 31.22%等高漏水率城市。

(三)水質疑慮：除了原水的純淨與否，管線的老舊程度也影響了最終用水戶是否能使用乾淨的水，因此提升水質是各國的主要目標之一。

(四)數據庫與科技：缺乏全面準確的數據庫以及分配網絡，數位系統是根據舊系統升級而來，必須有全國性的統籌規劃，來開發全面性的準確數據庫。

由於極端氣候的影響，乾旱或洪水等天災將導致未來的水資源管理面臨更嚴峻的挑戰，然而水管理者在政策的制訂上，同時受到政治、經濟等力度的影響，使得政策的執行大打折扣。藉由國際性平台經驗交流與分享，有助於各種學習與激盪，參考他人更先進的做法來達成自己的城市對於水管理的目標，並朝向永續水資源管理的方向，持續邁進。

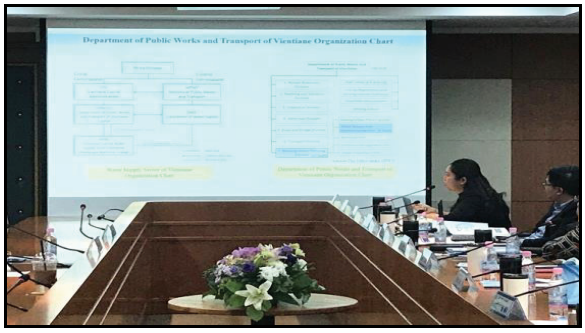


圖 1　各地區城市代表之城市簡報

三、研習會參訪行程

研習會安排參訪 10 個單位，依據功能可分為管理單位、淨水場與汙水處理廠、水資源教育單位及市政建設等四類，以下分別說明。

(一)管理單位

1. 首爾市政府水務局 (The Office of Waterworks, Seoul Metropolitan Government)

首爾市水務局成立於 1908 年，以”Arisu”為識別標誌，負責首爾市自來水供應，由一位副市長為主要督導，下設有總經理及管理、客服、生產、供水及設備管理等 5 個局、1 個研究中心、8 個供水服務所、6 個淨水中心及 1 個供水設備管理中心。首爾的自來水原水皆取自漢江(Han River)的表面水，由於漢江水質穩定，無颱風等天然因素造成濁度突增，影響處理效能之情形，但仍受季節因素影響的些微變動。

首爾市自來水每度美金 0.49 元，比哥本哈根及紐約分別便宜 5.7 倍及 6.4 倍，為世界第 6 低國家，但與台灣水價相較下，台灣仍是經營困難。

圖 2　2018 年世界各國水價　資料來源：IWA

儘管首爾水務組織水價仍較許多國家低廉，但堅持嚴格水質檢查，確保自來水安全生產。首爾的水質監測始於 1985 年，當時選定了 10 個監測項目並開始對自來水水質進行檢查，時至 2020 年，除了環境局所規定 60 個飲用水標準項目之外，再加上首爾市根據化學品種類和使用量，又增加包括了工業化學品、農藥、消毒副產品等 111 項水質監測項目，另外為因應氣候變化及工業進步而產生可能影響水質之副產物，首爾水研究所針對尚未列入法規中的新興污染物增列 160 項檢測項目，共計有高達 331 項水質檢測項目。

同時，Arisu 淨化中心正在使用自動水質測量系統對生產過程中的六個水質指標進行即時監控，確保生產安全的自來水。嚴格水質淨化流程提昇了 Arisu 的品牌優勢，並屢屢獲得國際獎項、認證，備受肯定：

(1)獲得 2009 年聯合國公共行政服務獎大獎。

(2)從 2010 年到 2012 年四次獲得國際水協會(IWA)認可的水務創新獎。

(3)榮獲 2010 年史蒂夫獎(Stevie Awards)最佳國際企業獎。

2.水研究所 (Waterworks Research Institute)

依據 2020 年資料顯示，水研究所擁有 5 項國家（際）認證，包括：飲用水質檢機構、國家認可的病毒檢測機構、國家認可的諾羅病毒調查機構、KOLAS(KOrea Laboratory Accreditation Scheme)韓國實驗室認可計劃（國際認可的檢測機構）及國家認可的原生動物檢測機構。另外整個研究中心有著囊括三大領域的實驗設備高達 697 台（表 1），設備齊全完善且多樣化。

表 1　水研究所主要實驗設備表

類別	主要實驗室設備	數量
水質分析領域	濁度計、餘氯計、吸光度計、離子色譜儀等	371
水研究領域	臭氧產生器、計算流體動力學系統、總有機碳計等	250
汙水研究領域	電感耦合等離子體、原子發射光譜儀、總氮分析儀等	76

水研究所研究目標及方向，期許為水資源綜合管理，整合型城市水管理、事前因應制度乾旱、洪水和水質變化預測系統、漏水預測、節能和生產系統、綠色基礎設施、人工智慧及大數據智慧水處理廠、智慧污水處理廠、智慧供應系統等目標，亦積極推動國際合作知識共享計劃、國際研究項目的聯合工作與國際組織如聯合國、世界銀行等合作等。

水研究所的組織架構下共有水質分析局及水道研究局 2 個局和 1 個未來戰略研究

中心，另設有總務部門人及非編制內人力，共計 105 名成員。

值得一提的是，為了提升研究的質量，水研究所 60%的成員擁有碩士或博士學位，可說是極具專業性的研究機構。

水研究所 2020 年度預算為 57.8 億韓元（約新台幣 1.35 億元），值得一提的是，其中研究預算共計約 9 千萬元（新台幣），占比高達總年度預算 67.16%（圖 3）是一個打造支持創新精神的機構。

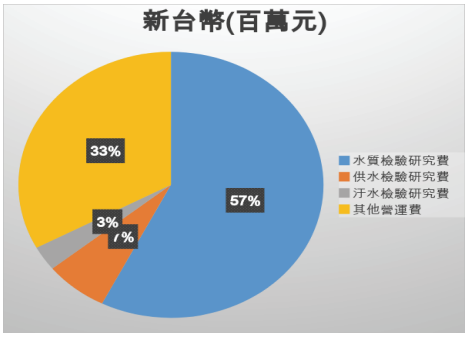


圖 3　首爾水研究所 2020 年年度預算占比圖

3. 首爾市水務監控中心 (Arisu Integrated Information Center)

Arisu 水務監控中心位於首爾市水務局的一樓，成立於 2011 年，主要功能為監控供水轄區內水量及淨水場運作等即時資訊，通過生產的運行計劃，降低優質自來水的製造成本，並提高管理水務訊息的監控，減少對市民的不便。

圖 4　首爾市 Arisu 水務監控中心

首爾水務監控中心之整體系統包括生產管理系統、供應管理系統、遠程監控系統、視頻監控系統及水質監測系統，概述如下：

(1)生產管理系統：主要功能包括需求預測（水庫的運作水位及需求預測）、生產計畫（淨水中心的生產計畫、生產績效與計畫的比較分析）及抽水站操作計畫（供水泵浦的運作計畫及性能對比分析）；自來水的生產成本轉化為足夠的能量，節省下來的費用用於修正生產流程。

(2)供應管理系統：主要功能包括方塊式管理（方塊式訊息管理、每個方塊的事故紀錄）、管線網絡分析（線上及情境模擬）；該從系統整體上查閱管線的長度、高度、泵浦特性、水流量數據、管線壓力和供水管網，系統開發以準確計算水流量的數學 Kanbo 分析程序。

(3)遠程監控系統：主要功能包括中心監測（監測水務設施的整體狀況及淨水中心的主要部分）、流程監控（監測每個淨水中心、水庫和泵浦站的流程）；監控 6 個淨水中心及 8 個供水服務所運作，設施使用超過 82,500 台儀器來比較分析統計數據，收集和彙集成的 DB(Database)數據傳輸可以對自來水進行質與量檢查。

(4)視頻監控系統：系統以 690 個高質量視頻資訊組成，主要功能包括 CCTV 監控（整體及每組 CCTV 監控）、視頻會議。監控系統也可以用作管理單位辦公室的安全系統，在出現異常情況時，可以透過視頻會議即時進行檢討與回應。

(5)水質監測系統：以測試 pH、濁度和餘氯

為主，水樣數據從放置在供應鏈和生產領域中的測量儀器自動發送，如水位低於或超過水質標準的參考值，可提前預防水質事故，及時警示管理者。

4.水務設備管理中心 (Waterworks Equipment Management Center)

首爾水務局於 2007 年整合了原有的科技研究所及材料部門成立設備管理中心，在編制上共可分為行政、材料及水表等三個部門，其中材料部分主要負責材料發放、管理、檢驗及採購等，水表部門則負責水表採購及大型水表之檢驗及水表問題之處理。

首爾市水務設備管理中心倉儲空間共有 30,917m^2，有主要行政大樓、水量計測試房及 2 間儲存倉庫；水量計測試廠計有 15 組小型、3 組大型水表及 3 組水表耐久性測試機組，頗具規模。

圖 5　水量計測試廠機組

水務設備管理中心為了確保材料的供應流程能有效率地運作，每月都會進行庫存破損品的修復及所有員工和進出人員的安全培訓，每天進行庫存量的全面性檢查，並確保庫存的數量最少要足以能供應 3 天以上的使用量。

5.漢江 (Han River Cruise) 管理介紹

根據記載，首爾最早使用自來水的紀錄始於 1908 年 9 月 1 日，由 Ttukdo 第一座淨水場從漢江取水後淨化處理，並以 1 萬 500（m^3/天）的供水量供應首爾地區 12 萬 5 千名居民使用，時至今日，已有一百多年的歷史。根據 2021 年統計資料顯示，首爾的供水人口總數為 973 萬 6,027，供水率高達 100%，而供水量為 280 萬 4,078（m^3/天）。

漢江的水質也已經控制在低度污染的程度，完全聞不到異味，而且漢江在流經首爾市區並無受潮汐影響的問題，因此，本身在發展藍色公路遊程上已具備很好的基本條件。

(二)淨水場及污水處理廠

1.桂水淨水中心 (Guui Water Purification Center)

首爾市共有 6 個大型淨水中心，桂水淨水中心位於首爾東部的廣津區和東大門區，日提供了 50 萬噸(500K ton/day)自來水，主要設施：淨水操作設施、中央監控設施、水質研究設施。淨水中心最初是在日本殖民時期建立的，到 1980 年代中期，其設施已擴大四個淨化場，大幅增加自來水供應。

桂水淨化中心的第一座淨水場是最古老的快速濾池，第二座淨水場的高速率混凝槽是其建造時最先進的設施，是在朝鮮戰爭後由美國陸軍工程兵團協助建造的。第一座和第二座雖已於 2002 年退役，但兩者均已保留為已註冊的文化資產，由於歷史學家和市民的保護，桂水淨水場一直保持其原始形態。

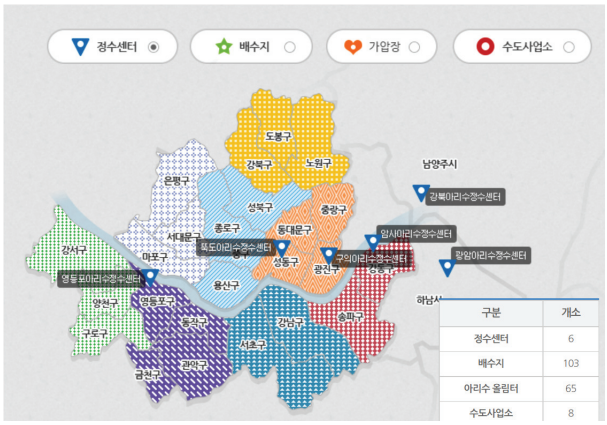


圖 6　首爾市自來水淨水中心示意圖

首爾自來水廠的目標是供應安全、乾淨的自來水，近來增加高級淨化系統（如將臭氧氧化和顆粒活性碳處理加入水處理流程中）、擴大水庫以建立穩定的供水系統、建立一個不間斷及 24 小時水源監測的供水系統。

從供水水源到家庭水龍頭，首爾的自來水在整個系統中都擁有細緻的水質管理和嚴密的危機管理。由於精心的管理和持續的創新與努力，Arisu 被譽為世界級自來水。

2.Jungnang 污水處理廠 (Jungnang Sewage Treat-ment Plant)

首爾市共有 4 座污水處理廠，有兩座為首爾市政府自行負責營運，包括 Jungnang 及 Nanji 污水處理廠，另外兩座則委託民間公司營運，包括 Tancheon 及 Seonam 污水處理廠。首爾最早建立的 Jungnang 污水處理廠位於漢江支流中南川，處理廠面積約 80 萬平方公尺，每天污水處理能量約為 1.59 百萬噸。1976 年開始第 1 期設備運轉，1988~1997 年分別完成了 2~4 期。

首爾的污水處理系統，新開發的區域接管率都很高，但是一些老舊的市區雨污水混接的情況就比較嚴重，因此在颱風暴雨期間，污水處理廠會因為湧入的水量過大而停止運作，讓水直接排入漢江，而造成水質的污染。不過實際觀察結果，平日漢江的水質聞不到臭味，顯然首爾市在污水處理及河川污染防治方面，已有相當良好的成效。

污水處理廠利用最大化永續能源利用執行方式，充分利用地下、地面、地上空間，結合太陽能板發電，提供初沉池作業所需電力，除去漂浮性與沉澱性固體後，將去除之懸浮固體物及污泥經刮泥機收集，利用污泥泵抽送到重力式濃縮，進入下一汙水處理階段。

圖 7　污水處理廠結合太陽能板發電

(三)水資源教育單位

1. 首爾污水處理博物館 (Seoul Sewage Science Museum)

首爾市政府將每天將 25 萬噸污水轉移到地底下的廢水處理廠處理，在廠上方建設了韓國首座展示下水道百年歷史的展覽館。從 1976 年開始負責整治江北、蘆原區等 10 個自治區的生活污水淨化的國內一號污水處理廠，已變為污水處理博物館，經重新規劃後，原有的汙水處理地下化，地面空間則成了下水道科學館、水循環主題公園等市民專屬的展示及體驗空間。而污水處理設施可阻斷異味，經過妥善處理變成乾淨的水，

一部分亦再利用於公園的蓮花池等處。

「首爾廢水處理博物館」館內許多展示廳與教育項目，不僅是寓教於樂的科學館，也兼具環境教育及文化設施中心之功能。

2. 自來水博物館 (Arisu Water Supply Museum)

Ttukdo 淨水廠是韓國第 1 座淨水場，是日據時期建造的慢濾水場，目前新的 Ttukdo 淨水場和自來水博物館就位於舊廠廠址內，於 2008 年成立。自來水博物館包括了 6 個區域：主建物區❹、慢濾場區❺、現在與未來區❻、水及環境展示區❷、戶外設備展示區❽及戶外體驗區❼等。

主建物區是 1 棟磚造建物，建於 1907 年，1908 年啟用，作為原水抽水站，內部陳列了當時使用的抽水機設備及首爾地區自來水工事設計圖，慢濾廠區的結構體是韓國現存最早的鋼筋混凝土建築物，慢濾設施則從 1908 年使用至 1990 年，展示著有關大韓民國近代上水道歷史的起源，即蠶島水源地第一淨水場的故事及相關遺物。

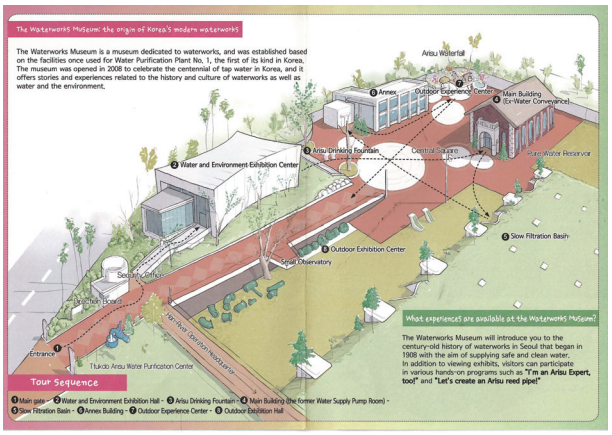


圖 8 自來水博物館位置示意圖

這是韓國自來水首座水源地設施，具有深遠意義，其中部分設施是英、美製品。竣工當時的一天淨水量是 12,500 噸，可供 16 萬 5,000 名首爾市民使用，占當時供水率的 32%。

自 2001 年起開始首爾市 Arisu 品牌瓶裝水製造工作，每年可生產達 2,100 萬瓶瓶裝水，每日產能為 8 萬 6400 瓶，惟因法令限制販售，2012 年實際產量為 780 萬瓶，瓶裝水工廠員工共計 9 名，其中 6 名為職員，3 名為約僱人員。根據資料顯示，Arisu 瓶裝水曾因亞洲其他國家之需要，運送至國外支援數目共計 1,650 萬瓶，其中包括 2008 年北京奧運、汶川大地震，2010 年上海世界博覽會、2011 年日本 311 大地震及台灣風災期間之支援用水，並於 2012 年 8 月 17 日取得 NSF(美國全國衛生基金會，National Sanitation Foundation)認證，從這些數據及持續國際奧援，不難看出韓國正傾全力積極站上世界舞台。

(四)市政建設參訪-首爾市政廳 (Tour to Seoul City Hall)

首爾於舊市政廳旁新建新市政廳，於 2012 年 10 月竣工啟用，舊有市政廳轉型為博物館及圖書館使用，以及供市民和遊客放鬆身心的地方，新舊市政廳融合的很好。新市政廳是新式綠建築的指標，建築外牆是以透光性強的玻璃帷幕，強調結合生態環保節能，外觀亦頗具現代感，內部更是如一座小型的室內叢林，到處綠意盎然，是一座成功的綠建築。

綠牆是首爾市政廳大樓中最受歡迎的景點。這個垂直的花園佔地 1516 平方米(約足球場大小)，從一樓到七樓一直沿內壁向上爬，它被吉尼斯(the Guinness World Records)

世界紀錄命名為世界上最大的垂直花園。

首爾市民大廳位於首爾市政廳的前兩層，是市民之間的空間，這裡舉辦音樂會，集市，藝術市場、婚禮、會議、講座、講習班和展覽。其中一個展示廳用於展示在施工期間發現的 Gungisi 文物，包括用於保存在朝鮮時期製造和儲存武器的 Gungisi 軍械。

深感到城市行銷真的無所不在，城市的功能越來越重要，與市民越來越接近，有人說在國際間【城市行銷】比【國家行銷】更讓人印象深刻，城市有很多資源可以塑造行銷，就如同對大部份的外國人而言，台北就代表台灣，首爾就代表韓國，城市行銷是一門刻不容緩的顯學，首爾在這方面算是箇中翹楚。

四、韓國及首爾的新印象

韓國政府近來積極出資邀請世界各國派員前往參與各式課程，韓國之對外業務發展，透過積極方式地進行著。近年來首爾市政府非常有計畫性地舉辦各種國際交流活動，一方面讓受邀的城市代表在參訪過程的各項活動中，彼此有互相交流的平台，另一方面藉此機會向各國代表宣揚首爾這個具有六百年歷史的文化古城，以及其近年來在市政建設上的進步。

研習經驗非常難得，雖只有 5 天，收獲豐富，韓國首爾市的【城市行銷】確有其獨到之處，參與的各城市代表皆對首爾留下了正面良好的印象，然而此行的實質觀摩作用並不大，主要的意義還是在於彰顯首爾市政府在國際化上所能展現的軟實力及企圖心。對首爾市在各方面的建設成果感到驚豔，在許多層面確實是值得參訪學員的城市學習對象。

五、結論與建議

近年各國水務管理局努力經營，揚棄私營水務管理帶來的問題，如缺乏基礎建設投資、水價價格上漲，對環境的破壞等，首爾水務局成立 1908 年，至今已有 115 年歷史，近年來努力大幅提升用水服務品質，2019 年 11 月起 COVID-19 疫情傳播造成全球經濟嚴重衝擊，並未因此停下腳步，更加強創新水管理的強度及寬度。對於挑戰並致力發展具責任性和有效性的水務工作，不遺餘力，無疑是自來水事業焦點領域。

(一)提昇服務品質加強創新水管理的強度及寬度

1.首爾市自來水「Arisu」是領先全國獲得自來水領域第一個食品安全管理系統（ISO22000）國際認證的安全飲用水，市民可直接確認自家自來水水質並安心飲用。

圖 9　自來水水質檢測設備

2.首爾市政府 2022 年 4 月公布「2040 首爾自來水改善基本計畫」，以因應氣候變化時代提前為飲用水做準備。

「自來水改善基本計畫」是根據《自來

水法》第四條，每十年建立一次的法定計畫，為首爾市自來水政策最基本的綜合計畫。為聆聽各界意見，組成了包含自來水及相關領域專家與市民團體等 53 人在內的顧問團、由職員構成的特別專責小組 Task Force (TF)。

將「與市民溝通的高品質智慧型阿利水」設定為本次基本計畫之願景，依據未來首爾市自來水需求的預測樹立供給計畫、有系統地進行自來水管整備、確保永續淨水中心功能性、構建基於主要幹線供水系統之具體自來水供給體系、供水分區管網及各分區即時水質資訊。

3.首爾市將透過阿利水地圖提供水質資訊，以便市民更加便利地查詢自來水相關資訊。2019 年 2 月起，市民可透過官方網站查閱地圖，在地圖中選擇社區位置，即可查詢水質狀態、供水分區管網及各分區即時水質資訊、施工資訊、公園飲水台位置等。

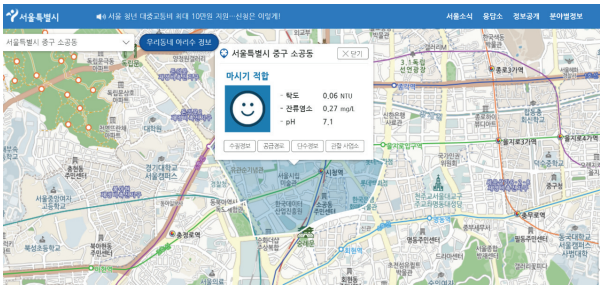


圖 10　首爾市中區小公洞水質示意圖 (2022/5/22)

(二)首爾水研究所 (Waterworks Research Institute)之國內外合作模式

1.水研究所擴展水務機構間合作

除了水研究所本身的研發能力之外，也積極的與國內各研究機構合作。由於水管理框架法於 2018 年起的實施，需要進行全面的水管理研究，以改善漢江水源的水質並提高自來水的可靠性，然而要提高水質，便需要提高公眾意識，讓整個社區意識提高，才能共同保護漢江的水質。因此首先成立漢江流域研究所理事會，透過機構間信息交流和共同合作政策制定，參與的機構包括首爾水研究所、漢江水環境研究所、首爾健康與環境研究所、京畿道、江原道、忠清北道健康環境研究所，另外水循環安全局、漢江事業本部、漢江流域環境廳、韓國水資源公社(Korea Water Resources Corporation，簡稱 K-water）也將加入。

此外，更將擴大到全國水道研究機構之合作，共同合作漢江水質保護、水生生態系統聯合研究、及水資源政策建議諮詢，以發展並制定供水政策方向，及分享最新分析方法和水處理技術信息。

2.與民營優秀技術試驗台 test-bed 聯合研究

水研究所針對水質分析技術、工藝技術、材料、AI 自動化技術、能源領域等各種項目，提供技術控股公司與研究人員共同開展研究合作並取得驗證。實際推行方式為水研究所先選擇需求的任務，再邀請民間廠商參與研究競賽，透過相關部門成立的審議委員會進行適用性審查後，簽訂協議及驗證管理方式，最終經過成果審核與評估後，出具檢驗證書。

3.建置供水綜合示範工廠

為了發展可持續水技術，水研究所目前進行中的建設供水綜合示範工廠，目的為提供專業人員和專業設施，為每個研究項目提供新技術的示範和監控之專業場地及研究

人力。選定的地點在首爾 6 座淨水中心其中的江北淨水中心內的閒置土地，建築總面積約規劃為 6,600 m^2，設計出水量約為 2,400 m^3/day，主要的設施包括淨水流程設備、管線管網、廢水處理、設備性能評價廠房（圖 12），預計於 2020~2030 年耗資 98 億韓元（約 2.3 億新台幣），總體性規劃逐步安裝擴充各項設施，共同研發國家項目及私人合作項目，從基本水利規劃，到培訓中心建設基礎及詳細設計服務內容，以至於示範工廠的建設，到示範工廠的運行。

圖 11　江北淨水中心內規畫為供水綜合示範工廠

韓國首爾水務局自來水研習的經驗，值得借鏡參考，首爾市藉由全方位的自來水研習會，透過系統性的介紹及推展，並以創新作法嘗試各種水方案及水處理，藉由國內外知識共享與合作，建立意見交流與知識激盪的平台，來達到持續精進與永續環境的綜效。就研習的必要性而言，積極發展自來水建設的國際合作推廣，可提升自來水事業單位的水管理與水技術能力，藉由文化與技術的交流，預為因應可能出現的水資源挑戰及提供最適解決方案。

參考文獻

1.水利署水利規劃試驗所楊松岳第 7 屆世界水論壇及辦理專題研討會報告
2.韓國水道法第33條第2項https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=216343&efYd=20210401&ancYnChk=0#0000
3.通過互聯網直接申請清洗和水質檢測結果的系統https://arisu.seoul.go.kr/wttnk/info/sysInfo.do
4.(Book) Seoul Waterworks Workshop, 2019
5.首爾市政府官方網站 https://tchinese.seoul.go.kr/
6.首爾市水務局官方網站 https://arisu.seoul.go.kr/
7. 首 爾 市 議 會 會 議 記 錄 https://ms.smc.seoul.kr/kr/assembly/main.do
8.ARISU水務監控系統https://www.seoulsolution.kr/en/content/arisu-integrated-information-center

作者簡介

林美良女士

現職：台灣自來水公司營業處業務組組長

專長：自來水營運規劃、業務管理

顏銘宏先生

現職：台灣自來水公司工務處研發組工程員

專長：自來水工程規劃與營管、環境工程