

## 自來水會刊第 30 卷第 4 期目錄



### 特 載

精實服務之理念與實踐—台水公司之類比應用……………陳福田……1

### 實務研究

澄清湖淤泥清理方案之研討……………楊品龍、曾浩雄……10

快組式村落型緊急淨水系統……………陳建宏、任維傑、周珊珊、王藝峰、楊其錚、謝明昌……15

### 每期專題

#### 自來水淨水污泥資源化再利用

淨水污泥資源化再利用現況及可行性評估……………王靜逸、袁如馨、吳美惠……25

淨水污泥產製輕質骨材之可行性研究……………

……………王順元、陳豪吉、顏聰、黃中和、林正隆、洪世政、吳美惠……37

淨水污泥輕質骨材混凝土之工程性質……………黃中和、陳豪吉、顏聰、王順元……52

### 一般論述

薄膜蒸餾技術於水處理中的應用……………黃盟舜、鐘琍菁、劉柏逸……63

簡易自來水淨水模組開發暨驗證……………黃杼毓、沈珊米、羅家康……72

面臨空前水資源危機之探討……………王銘博、朱健行、呂慶元……77

### 他山之石

第7屆臺、美、日自來水設施耐震對策研討會紀實……………林祖榕、朱聖心、林瑜禎 等……84

### 協會與你

中華民國自來水協會第17屆理、監事會第4次聯席會議紀錄……………99

中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法……………51

## 自來水會刊雜誌稿約

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

## 自來水會刊雜誌

**發行單位：中華民國自來水協會**

發行人：陳福田

會址：臺北市長安東路二段一〇六號七樓

電話：(02)25073832

傳真：(02)25042350

**中華民國自來水協會編譯出版委員會**

**主任委員**

黃志彬

**副主任委員**

吳美惠

**委員**

駱尚廉、葉宣顯、陳曼莉、陳錦祥、蘇金龍

張怡怡、林財富、周珊珊、蕭宏民、李丁來(兼秘書)

**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：吳美惠**

**執行主編：李丁來**

**編審委員**

鄭錦澤、黃建源、陳孝行、陳志銘、簡俊傑

洪世政

**執行編輯：林正隆**

電話：(04)22244191 轉 514

**行政助理：古蔡苓**

印刷：松耀印刷企業有限公司

地址：台中市北區自強街 50 號

電話：(04)23607717

# 精實服務之理念與實踐 — 台水公司之類比應用

文/陳福田

## 一、前言—不完美之消費世界

數年前，美國《商業週刊》指稱，服務是下一波經濟浪潮的推手，「服務經濟」時代已飄然而至！易言之，服務已主宰我們的經濟，不管是製造業或服務業，服務增值儼然成為企業發展的必要手段。今日，顧客要求的不只是「財貨」(Goods)價值，更企求「服務」(Service)價值和值得回味的消費經驗。

遺憾的是，企業的服務活動經常存在許多不必要、沒有價值的步驟，導致顧客費時等待，不滿意、抱怨聲此起彼落。近年來，企業為了改善上述「服務不精實」的現象，紛紛將「精實」(Lean)思想導入服務工作，設計流暢的服務程序、培養員工良好的服務態度，期使顧客穿越一個愉悅的消費旅途。

台水成立之初，肩負提高全省自來水普及率之重大使命，投入大量人力、物力於工程建設，專注「內部生產效率」之提升，期求民生、工業用水「量」之滿足。晚近，「服務經濟」蔚為風潮，消費者意識抬頭，用戶要求更高的服務品質。是故，本公司逐漸改變根深蒂固的「生產導向」思維，轉而採取「生產服務化」之經營策略，致力服務品質之提升；尤其是，囿於國營事業體制僵化，諸多繁文縟節貶抑用戶服務品質，亟須研思有效作為，落實「精實服務」應是一劑良方。

本文之作，前以「不完美之消費世界」啟言，旨在彰顯「生產導向」之遺憾，後以

「愉悅之消費旅途」結語，旨在隱寓「精實服務」之價值。內文首依學理剖析「精實生產與精實服務」之差異；次就實務觀點，分由「創新服務流程」、「精進服務人力」、「善用資訊科技」、「改善實體環境」、「建立精實文化」，試抒本公司落實精實服務、提升服務品質之方略。茲勾勒本文觀念架構如圖 1。

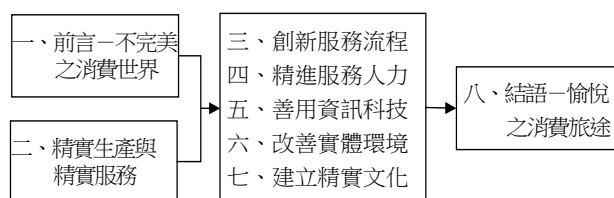


圖 1 本文觀念架構

## 二、精實生產與精實服務

### (一) 精實生產

「精實」思維濫觴於「豐田式生產系統」(Toyota Production System, TPS)。1950 年代，日本豐田汽車公司在副總裁大野耐一(Taiichi Ohno)的領導下，推動豐田式生產系統，其有別於美國福特汽車的「大量生產」，係以滿足日本特殊市場的「少量多樣」生產方式，強調「生產之零浪費」，並持續進行改善活動。TPS 不僅成為彼時製造管理的最佳實務(Best Practice)，引領豐田汽車穿越困頓、泡沫化經濟的時代，四十餘年來依舊獨領風騷，不曾因環境更迭而銷聲匿跡。

美國麻省理工學院兩位研究教授 Jim Womack 與 Daniel Jones 調查全球汽車產業，於 1990 年出版《改變世界的機器》(The Machine That Changed the World)乙書，以日

本豐田生產系統為主幹，衍生發展出「精實生產」(Lean Production)之理論與作法，將「扎實、沒有贅肉」(Lean)的意涵，灌輸企業園地，務求資源之零浪費、流程之運作順暢，即以最小的投入創造最多的利潤。該書的問世讓美國從 80 年代「日本第一」的反省與迷思中，彷彿為相繼失利的許多市場找到了解藥，一時洛陽紙貴。

「及時化」、「自働化」為豐田模式(The Toyota Ways) 兩大支柱，亦係「精實生產」之中心思想，茲詮釋如下。

### 1.及時化(Just in Time, JIT)

及時化係將適質、適量之原料，在適當時間，送至適當地點，務求降低庫存、追求零庫存。其相關作法如下。

- (1)生產平準化：調整需求間之起伏，期使需求保持平穩。如此，可以使生產排班更易、變化起伏減緩，由而提升設備使用率。
- (2)看板管理：過去以生產排程報表傳遞過時資訊，豐田模式改以看板(Kanban)傳遞即時資訊。
- (3)拉式生產：傳統的推式(Push)生產，係依預測的生產排程進行生產，因此容易因需求變動，造成庫存；豐田模式強調「拉式」(Pull)生產，即在確認顧客需求量後才進行生產，亦即排程中每項作業程序之備料皆源自顧客實際需求。
- (4)重視協力廠商的合作與輔導：與特定廠商合作，給予長期合約，以降低供應商庫存之風險，促使供應商願意小量、適時供貨。

### 2.自働化(Autonomation)

自働化並非自動化(Automation)，係指具有「人智」的自働化。亦即當自働化機器一旦異常，不僅其具有自行判斷好壞的能力，亦且自動停止操作，以防止大量不良品的繼續生產。

自働化之成效有賴下述配套措施。

- (1)目視管理：是指利用視覺化工具，如看板、標示、樣品、顏色及圖表等，進行「看得見管理」、「一目瞭然管理」，加速對現場問題的反應速度。
- (2)防呆裝置：即設計一種能自動摒除錯誤的裝置，以便隨時發現異常並予以排除，俾能製造百分之百的良品。
- (3)自動停止裝置：當裝置錯誤、不當或其他異常，則機器停止運轉。

茲繪示「豐田式生產系統的整體架構」如圖 2。

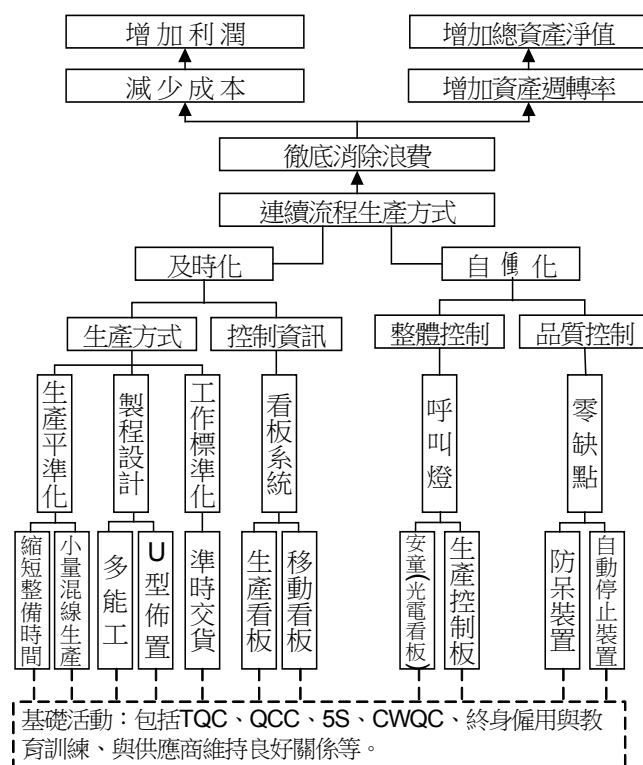


圖 2 豐田生產系統的整體架構

豐田式生產系統或許不見容自來水事業的生產型態，諸如「大量標準化生產」與豐田模式「少量多樣生產」迥異；自來水事業面對的是極端不穩定的水資源供應，因此必須「充實備援備載能量」，則與豐田模式所強調的「及時、零庫存」不同，惟豐田生產系統標榜的「消除浪費、持續改善」精神，亦係自來水事業追求永續發展之所必備。

## (二)精實服務

顧客的不滿意並沒有因「精實生產」的普及而得到化解。許多廠商在這股豐田旋風的影響之下，大刀闊斧地進行精實生產革命，理論上，現代消費者的消費方式應該是變得更好、更方便，而消費者本身也應更加滿意才對，然而，事實上卻非如此。以往精實生產者太過專注於「多樣少量」生產，並提供客製化商品讓顧客選擇，惟卻忽略了消費者身陷於複雜而錯誤的供給連結；其結果是，消費者無法忍受生活被過多的選項或等待所切割，導致商品本身的價值不如消費過程所浪費掉的時間價值。

服務跟生產一樣，經常存在許多不必要的浪費，包含提供顧客不需要的服務浪費、等待的浪費、運輸的浪費、延遲交付的浪費等。在 2005 年，Jim Womack 與 Daniel Jones 於彼等合著《精實服務》(Lean Solution)乙書中，進一步將精實思維由生產伸展至服務工作，深入解構製造商較少注重的「消費流程、服務價值的提供」，強調消費應像生產一樣，「精實」不浪費。

### 1.中心思想

精實服務旨在「從客戶端出發，透過顧客的眼睛來確認價值，並且避免浪費。」這句話點出精實的兩個關鍵字：「價值」與「浪費」。不能增加顧客價值的活動，就是浪費，唯有充分了解顧客的價值，才能分辨何謂浪費？何謂價值？進而將資源投注在提升顧客價值的活動與流程上，減掉服務流程中的“贅肉”。易言之，「精實服務」強調用更少的設備、更少的時間空間，使服務迎合顧客所要的價值。

生產製造與顧客服務性質有異。生產活動中的員工大部份時間都是與機器設備打交道，因此變數少，流程相對比較容易控制；但是，服務工作直接與人打交道，變數較多，服務流程較難標準化。因此，製造活動中的精實方式不見得全盤適用服務流程，亦即顧客服務首重「人性」，有時候必須犧牲效率來造就「彈性」，冀能提升顧客滿意度。

### 2.程序與要素

精實生產標榜「消除浪費、持續改善」的精神，以及落實精實思想的工具、方法，諸如「拉式管理」、「看板管理」、「多能工」、「5S 管理」、「品管圈(QCC)」等，亦適用於「精實服務」，雖然標的不同，惟具異曲同工之效。

其中，Jim Womack 與 Daniel Jones 援引豐田公司「消除浪費、創造獲利」的有效方法，提出「價值溪流」(Value Stream)的概念，茲循其程序說明如次。

- (1)價值(Value)之界定：依顧客的角度，審視產品設計、生產製造、行銷推廣、維修服務等價值活動，同時透過不斷的對話、溝通，以確認彼等活動之價值。
- (2)價值溪流(Value Stream)：按照顧客的觀點，繪製顧客消費的流程圖，找到此流程有價值的活動，並以刪除、簡化、合併等方式，排除沒有價值的浪費。
- (3)暢流(Flow)：刪除明顯的浪費以及無附加價值的程序之後，開始設法增進消費旅程的流暢性，讓顧客接受服務時，肯定各種活動都是連續的價值溪流，沒有令人不愉快的遲滯或瓶頸。
- (4)拉式(Pull)管理：拉式管理係依顧客期望的方式、期限及地點來提供服務，而非由服務者依據自己的方便來進行服務。企業的服務應與顧客的需求直接應對，即時反應顧客的需求，消除過早及過量的服務投入。
- (5)止於至善(Perfection)：一旦價值、價值溪流、暢流，以及拉式思考都已建立，便重複上述步驟，找出消費流程中「隱而難見」的浪費，並且尋求更加價值的服務方法，冀期止於至善(Perfection)，達到供需雙方的零浪費。

綜上概念，Jim Womack 與 Daniel Jones 指稱，精實服務的落實須兼顧如下四項要素。

- (1)顧客要素：創造顧客價值。
- (2)流程要素：向顧客傳遞價值的渠道。
- (3)界面要素：顧客服務所在的環境、背景以及整合流程。

- (4)員工要素：傳遞服務的媒介。

本文就「流程要素」研提「創新服務流程」(三)；就「員工要素」研提「精進人力素質」(四)；就「界面要素」研提「善用資訊科技」(五)、「改善實體環境」(六)；就「顧客要素」研提「建立精實文化」(七)，以就教有方，冀期拋磚引玉。

### 三、創新服務流程

服務作業流程主宰消費者對產品品質的感受，先讓員工擺脫慌亂、無效、耗時的工作流程，才能開啟顧客愉悅的消費旅程。因此，精實服務之推動常從改善作業流程著手。

試舉一例，說明改善服務流程所帶來的實質效益。2007 年，速食業龍頭麥當勞啟動一場服務流程的精實變革。以往，麥當勞的服務流程是「推式管理」，也就是先預估在某個時段，有多少客人進來，會點多少商品，事先做好，保存在中央輸送槽，如沒賣出就丟棄。麥當勞啟動「為你現做」(Made for you)的「拉式管理」流程後，現在場景不同了，中央保溫台消失，當顧客說出自己想要的餐點時，廚房就接獲指令開始製作，不僅採用「多對一」櫃檯服務，並具備「科技化備餐」系統，讓點餐、備餐、送餐之整體流程速度更快，顧客在旁邊只需要等待 50 秒，就可以拿到剛做好的食品，降低了食材耗損的浪費，也為了讓客人吃到更新鮮的產品（流程改造前、後比較如圖 3）。如此，良好的顧客體驗提升了顧客滿意度，亦使銷售業績逐步攀高。

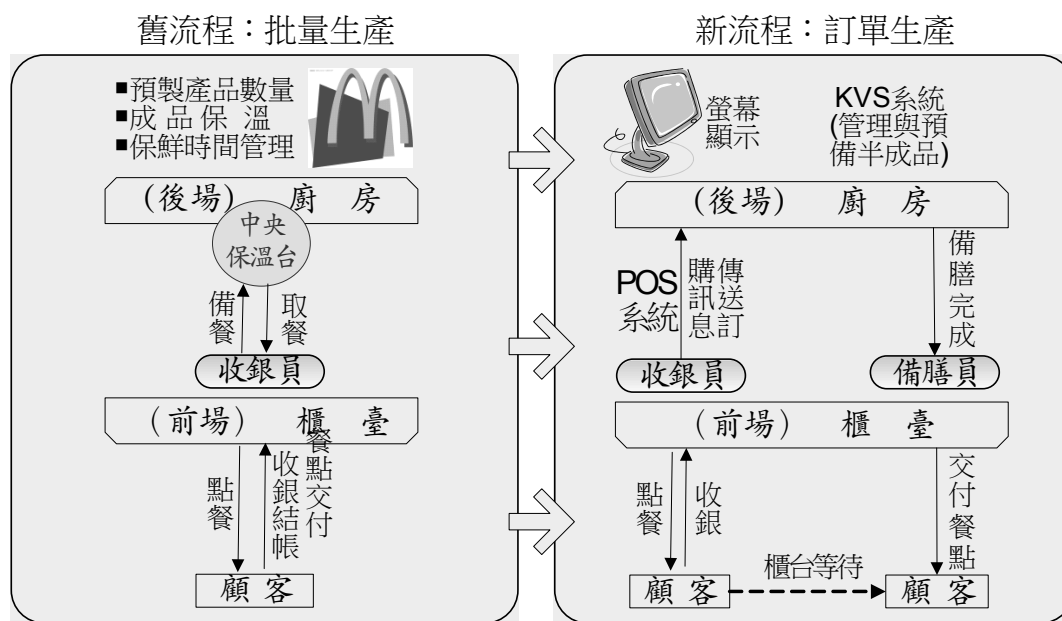


圖 3 麥當勞服務流程改造前、後比較圖

近年來，本公司積極提升為民服務品質，不斷地改善、創新服務流程，諸如推出「一處收件，全程服務」、「繳費管道多元化」、「跨機關合作」、「得來速」等，免除民眾往返奔波，創造用戶價值。

惟環境在變、人力在變、客戶需求在變，標準化流程如果多年不變，或將流於僵化、抱殘守缺。因此，本公司秉持前揭五項精實程序，循「價值之界定→價值溪流→暢流→拉式管理→止於至善」等步驟，持續改善服務流程，找出服務歷程中「隱而難見」的浪費，冀期「止於至善」。

值得一提的是，「現場現物」管理務求落實。現場主管必須脫下制服，戴上消費者的帽子，走進消費的現場及情境，循著消費動線走一回，追蹤用戶的消費旅程，條列顧客經歷的過程，以及其所花費的時間和當時的感受；進一步分析用戶的消費旅程，找出關鍵價值活動，並消除不具價值的服務活動。

#### 四、精進服務人力

多年來，國營事業因體制僵化、競爭壓力小，致部份員工「等因奉此、但求無過」，服務觀念保守，不僅造就國營事業難以突破現狀，也是落實顧客導向服務理念的絆腳石。

經濟部 施部長於 100 年 10 月 27 日第 1061 次業務會報裁示「台水公司處理民眾反應用水問題，雖設有 1910 客服專線，但反應管道並非單一，各區處受理第一線人員服務態度非常重要。」故提升軟硬體管控機制外，必須加強同仁服務訓練。

服務工作以人為本，主要的服務流程幾乎都需要由人來執行。以企業的角度來看，只有站在第一線，才能聽見顧客的聲音；就顧客而言，第一線才是創造感動與體驗的窗口；對於從事第一線服務的員工來說，第一線服務關鍵的瞬間，才有機會發現自己的影響力以及享受工作帶來的價值。茲策劃本公司未來努力作為如下。

### (一)服務人力之篩選與訓練

一個適任的客服人員，先天的「性格因素」與後天的「教育訓練」決定其工作績效。當性格、能力與工作匹配時，工作者的工作滿意度及生產力會提高；而高滿意度的員工才會創造高的顧客滿意度。

因此，持續的教育訓練，培養「多能工」人力，並落實「賦權」第一線員工。當員工覺得自己受到公司信賴，在面對問題時，才會採取更負責的態度為顧客服務。另，並非有能力的員工都適任服務工作，是故，第一線員工之篩選除了考量其專業能力之外，也必須衡酌其性格特徵，篩選有高「情緒穩定性」(Emotional Stability)、高「勤勉審慎性」(Conscientiousness) 與高「親和性」(Agreeableness)之員工，才能獲致高工作績效，從而贏取高顧客滿意。

### (二)用「心」服務用戶

標準化服務流程可確保服務品質不因人而異，並消除時間浪費、資源浪費。然而，當公司一味以傳統教育訓練、客戶服務準則或手冊等僵化的規矩來制約員工時，一旦員工只懂得照本宣科做事，就會降低提升顧客滿意度的彈性。就像便利店的服務生，公式化地說出「歡迎光臨」，但顧客並不會因此特別感激他，這種表面工夫的待客行動，其實是害多於益。

第一線員工除須具備知識、禮貌，還要多一份「心」，設身處地為顧客著想，要具有「捨不得您多煩一回」、「捨不得您多等一秒」

的同理心。有些後臺的作業可以標準化，但是前臺與客戶直接面對的服務則宜加入靈活性與彈性。因此，也必須加強服務的彈性化，給予第一線服務人員足夠的權限與訓練，當問題發生而情況超出標準規範時，服務人員能即時反應、靈活變化，於關鍵時刻以彈性的作法解決顧客問題、滿足顧客需求。

### (三)供應商之輔導與合作

供應商與外包廠商是企業能力的延伸，直接影響服務的品質，推動精實服務的企業要將其精實理念與作法延伸至供應商，方能確保整體服務價值溪流的運貫性。

## 五、善用資訊科技

目前，已有許多資訊科技工具可改善消費流程，加強流程（系統）間之整合。在提供及時服務方面，自動化(Automation)扮演重要的角色，例如銀行的自動提款機可提供全天候 24 小時銀行的基本服務；廠商改以電子資料交換(EDI)和網際網路等訂單處理方式，取代以書面填寫採購單的繁冗作業，致能有效降低採購成本。

本公司「自來水客服中心」(Call Center)於 99 年 6 月 15 日正式上線運作，開啟本公司便民服務新紀元，提供用戶 24 小時全年無休之服務管道。為持續「強化客服中心功能」，茲策劃本公司未來努力作為如下。

### (一)行銷與宣傳規劃

1910 客服專線分階段於水費帳單及收據列示，逐步以 1910 取代各服務(營運)所之服務電話，將全台用戶納入客服中心服務。

## (二)語音滿意度調查

客服中心已具備語音水費查詢、用戶申請、帳戶服務及各項異動服務簡易查詢事項，未來將由語音自動外撥進行滿意度調查，以收集客戶 IVR 回應，做為改善服務品質之依據。

## (三)持續委外營運管理

持續督導客服中心整體委外服務水準，以服務水準(15 秒內接聽)85%以上之服務績效指標(KPI)，並加強委外營運承商加強值機員在職訓練，充實專業知能，確保話務品質。

## (四)加強資料分析

透過客服中心每月營運分析及問卷調查，剖析用戶反映意見，有效掌握用戶需求與期待，以改進各項服務措施。

## (五)落實後送管理機制

落實區處訊息登錄、最新訊息回報及提高後送案件處理時效，除加強推動責任中心考核機制外，並加強教育訓練及落實「客服中心後送案件標準作業程序及管控機制」。

## (六)介接地理圖資及產水監控系統

結合本公司地理資訊系統(GIS)及產水監控系統(SCADA)，將訊息傳遞後端作業，縮短服務流程。

## 六、改善實體環境

服務場所之實體設備、設施構成顧客對企業的第一印象。規範服務現場之物品、設備及人員，營造一目了然的作業環境，培養

員工良好的作業習慣，可獲致如下良好效果，涵括(1)顧客可以體驗到愉悅的服務，滿意度自然隨之提升(2)員工有安全與舒適的作業環境(3)建立標準化的作業程序，提升效率與生產力(4)預防與持續改善，以實現對顧客的承諾。

改善實體服務環境，涉及空間、路線、聲光等諸多面向之改善。本文僅就本公司現階段亟須改善的重點，分由「落實 5S 管理活動」、「實體設施改善及改建」，試抒芻議如下。

### (一)落實 5S 管理

5S 活動是邁向精實服務的現場管理活動，雖然老生常談、耳熟能詳，惟常流於形式、止於口號，而未具體落實。實則，透過 5S 規範現場、現物，物品放置井然有序，通路暢通無阻，到處都有標示，清潔而明朗的服務環境除有助於員工士氣之提升，亦可提高顧客滿意度。

5S 係取自於「整理」(Seiri)、「整頓」(Seicon)、「清掃」(Seiso)、「清潔」(Seiketsu)、「修身」(Shitsuke) 等五個名詞之日文羅馬拼音第一個字「S」之簡稱。5S 是將工作現場區分為「要用」與「不要用」的東西，將要用之東西透過定位標示擺放整齊、易於取用；將不要的東西予以排除、丟棄，以保持工作場所無垃圾、污穢之狀態，並保持現場乾淨、美觀。透過上述「整理、整頓、清掃、清潔」之活動，「教養」員工摒除陋習，養成良好之習慣，由而提升人的品質。

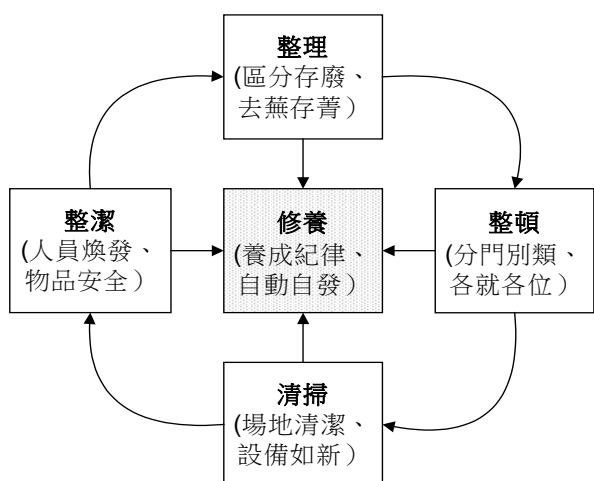


圖 4 5S 管理架構圖

## (二)實體設施改善及改建

本公司成立迄今，已將邁入四十不惑之年，各單位辦公廳舍及營業場所歷經風化侵蝕，其外牆及屋頂結構常見龜裂、漏水，外觀老舊。多年來，囿於經費不足，因此遲未改善，有損國營事業形象。另，本公司目前仍有部分辦公空間狹小，洽公民眾之汽、機車無處停放，時有違規停車遭受拖吊情事，影響用戶服務品質。

為改善現有窘況，亟須分年編列經費，逐步改建本公司老舊營業及辦公廳舍，並改善營業廳、服務櫃台空間環境，冀期營造令人愉悅之消費旅途。

## 七、建立精實文化

精實管理的精神在於「去蕪存菁、止於至善」，永無止境地運用價值溪流概念，找出消費旅程中「隱而難見」的浪費，並且尋求更有價值的工作方法。亦即，建立精實服務文化是要培養企業持續改善服務流程的能力，實現「顧客導向」、「消除浪費」之理念。

要落實精實服務文化，服務現場的主管須以身作則、身先士卒，親臨現場、親自體驗，並不斷地灌輸服務人員正確的精實服務觀念、行為及態度，逐步落實精實服務文化。另，透過「提案改善制度」與「自願式工作圈」，將精實文化融入日常工作中，激勵員工不斷地省思與持續改善，茲分述如下。

### (一)提案改善制度

鼓勵同仁「一邊工作，一邊思考」如何「讓工作更好」。讓全公司每位成員，時刻用心於發掘服務歷程中可能隱藏的問題，透過提案改善制度，將每個人的智慧與潛力，淋漓盡致地發揮。

### (二)自願式工作圈

由共同工作的夥伴組成自願式的工作圈，在「組織學習」的氛圍下，持續不斷地針對特定問題、作業流程或其他事項尋求改善之道。

## 八、結語—愉悅之消費旅途

豐田的成功來自創辦人認為「人力有無限可能性」的信念，以及數十年如一日貫徹到底的決心與毅力。其最大的動力與關鍵因素在於不斷激發員工潛力，不斷追根究底找出真正原因，以及「現地現物」親臨現場即時解決問題的行動方針。

「精實」思維應用於服務工作，不但可消除企業的浪費，也提供顧客所需的服務價值，由而厚植了企業競爭力；持續改善企業的服務流程，促使組織成為精益求精又具實

踐力的精實組織(Lean Organization)。「精實服務」就像一顆小石頭投入平靜的湖心，激起新服務文化的陣陣漣漪。

時代巨輪無情地向前滾動，唯有掌握時代脈動、與時俱進，企業方能不被時代洪流所吞噬，反而歷久彌新。身處服務經濟時代，本公司當跳脫傳統的「生產導向」經營思維，將「精實服務」理念嵌入每位員工的心中。申言之，本公司當秉持「沒有最好，只有更好」之精神，鼓舞員工以此為動力、以此為榮耀、以此為契機，讓「以客為尊」之理念不再只是空泛的口號，而將之昇華為「感動顧客」之「品牌」價值，亦讓用戶穿越一個「愉悅的消費旅途」。

## 作者簡介

---

### 陳福田 先生

現職：台灣自來水公司總經理

專長：工程管理、策略管理、績效管理

## 參考文獻

- 1.朱宗緯，”淺談精實服務之應用”，品質月刊，民國99年6月。
- 2.葛晶瑩，”麥當勞為你現做－50秒點餐革命”，能力雜誌，民國97年2月。
- 3.褚耐安譯(Jim Womack、Daniel Jones原著)，”精實服務”，經濟新潮社，民國96年1月。
- 4.劉明德、梅國忠，”精實生產轉化為精實服務”，品質月刊，民國99年10月。
- 5.蕭亞洲，”由5S到精實服務－服務業應有規範的建立”，品質月刊，民國100年4月。
- 6.Carman, J.U., ”Consumer Perceptions of Service Quality : An Assessment of the SERVQUAL Dimension”, Journal of Retailing, 1990.
- 7.Wakefield. Robin L., ”Measuring Service Quality : A Reexamination and Extension”, The CPA Journal, 2001.

## 澄清湖淤泥清理方案之研討

文/楊品龍、曾浩雄

### 一、高屏溪攔河堰原水概況

台灣地勢陡峻；河流短急，九二一大地震過後，因山土鬆動，造成水庫泥沙淤積相當嚴重。依據審計部去(99)年度政府決算報告指出，全國 40 座水庫每年淤積量約 1,849 萬立方公尺，有 12 座水庫淤積量已超過水庫設計容量的 40%，致其蓄水量更加不敷需求。另依黃松清之「河床下以滲濾管取水之水質初步探討」<sup>[1]</sup>之統計，民國 93 年 1 月至 95 年 10 月間，台灣自來水公司第七區管理處坪頂給水廠取自高屏溪攔河堰原水之濁度，經換算其年平均濁度為 840 NTU。惟經歷 98 年 8 月 8 日莫拉克颱風以後，位於該廠上游之高雄給水廠 99 年原水年平均濁度飆高達 3,351 NTU (每 2 小時登錄一次)，99 年 5 至 10 月的月平均濁度達 4,000 至 8,000 NTU 之間。但對照 99 年坪頂給水廠，其原水之年平均濁度則只為 1,224 NTU，年平均濁度較莫拉克颱風之前高出 45.7%[(1224-840)÷840×100%]。

### 二、澄清湖淤泥估算

目前澄清湖水庫抽自高屏溪攔河堰之進水量(Q)為 40 萬 CMD，依日本水道顧問公司計算污泥量：假設  $Q_s$  為污泥乾固體重(T/day)；A 為混凝劑加藥量(mg/L)。而月平均濁度 Tu 以 1,224 NTU 計。

$$1. Q_s = Q \times (T_u \times f_1 + A \times f_2) \times 10^{-6} \quad [2] \quad (1)$$

$$f_1 = \text{SiO}_2 / T_u \times S.S. / \text{SiO}_2 = 1.25 \times 1.2 = 1.5 \quad (2)$$

$$f_2 = (\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 濃度}) \times 2(\text{Al}(\text{OH})_3 \text{ 分子量}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 分子量}) = 0.07 \times 2 \times 78 / 102 = 0.107 \quad (3)$$

由於該原水至澄清湖入水口並不加任何藥劑，故  $A=0$ ，以此帶入(2)式，則  $Q_{S1224} = 400,000 \times (1,224 \times 1.5) \times 10^{-6} = 734 \text{ T/day} \quad (4)$

2. 由於澄清湖給水廠與坪頂給水廠之水源同樣來自高屏溪攔河堰，平均進水濁度(Tu)以 1,224 NTU 計算時，由(4)式得知澄清湖每日會產生 734 噸淤泥(砂)。澄清湖自其原水入水口至淨水處理廠進水口可視同沉澱池，假設懸浮物固體有 76% 為無機固體其比重為 2.557；另外 24% 為有機固體其比重為 1.096。依理論沉澱池換算約淤存 51.0% 為無機質<sup>[3]</sup>，因此沉積於進水流道底砂泥量為  $734 \text{ T/day} \times 51.0\% = 374 \text{ T/day} \quad (5)$

澄清湖給水廠每年會產生沉積底泥量為  $374 \text{ T/day} \times 365 \text{ day/Yr} = 136,510 \text{ T/Yr} \quad (6)$

由 T 換算  $\text{m}^3$  時，因  $\text{SiO}_2$  占六成(詳如表 1)故須除以其比重 1.25<sup>[2]</sup>。故其泥量為： $136,510 \text{ T/Yr} \div 1.25 \text{ T/m}^3 = 109,000 \text{ m}^3/\text{Yr} \quad (7)$

表 1 高屏溪底泥化學成分分析結果表

檢驗項目	檢驗結果	檢驗項目	檢驗結果
SiO <sub>2</sub>	60.47%	CaO	1.38%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.35%	TiO <sub>2</sub>	0.84%
Na <sub>2</sub> O	1.30%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.06%
K <sub>2</sub> O	3.30%	燒失量	2.85%
MgO	2.58%	Total	97.15%
含水率(100°C之重量損失率)			25.70%
可燃份(265°C之重量損失率-含水率)			2.85%
灰份(100%-265°C之重量損失率)			71.45%

送樣日期：96 年 5 月 22 日；報告日期：5 月 25 日

### 三、澄清湖沉積底泥清理概況

100 年 3 月 15 日公開招標之澄清湖水庫

淤砂/泥清理工程(其施工情形如圖 1~3)時，其決標金額 17,843,000 元，依契約規定其處理淤砂/泥量為 49,000m<sup>3</sup>，並可利用小搬運將挖出淤砂/泥暫存於距離 3 公里外之澄清湖園區內，則每 m<sup>3</sup> 淤砂/泥之處理金額為： $17,843,000 \text{ 元} \div 49,000 \text{ m}^3 = 364 \text{ 元/m}^3$  (8)

另有一件於 100 年 5 月 11 日公開招標之澄清湖水庫淤泥搬運工程(由澄清湖暫存區移至南星計畫區)，其決標金額為 23,880,000 元；處理量為 12 萬 m<sup>3</sup>。經換算其處理金額為： $23,880,000 \div 120,000 \text{ m}^3 = 199 \text{ 元/m}^3$  (9)

從 100 年 3 月及 5 月公開招標兩項淤泥清運工程之決標金額而言，其總處理金額平均為  $364 \text{ 元} + 199 \text{ 元} = 563 \text{ 元/m}^3$  (10)

由此可推估澄清湖廠每年所產生沉積底泥量之處理費用為： $109,000 \text{ m}^3/\text{年} \times 563 \text{ 元/m}^3 = 61,367,000 \text{ 元/年}$ 。 (11)

#### 四、降低澄清湖淤泥清理費用之構想

降低澄清湖淤泥清理費用之基本構想，是由高屏溪攔河堰抽上來的原水，藉由在湖中設置之固定單軌刮泥機收集淤泥，經螺旋式之泥水分離機後，輸送到儲卸槽，在此脫水後再由槽車運至南星計畫區填置(圖 5)。

由此可以省略挖土機兩次挖移動作，從此每一次抽泥動作，可用一台車可載運 14m<sup>3</sup>，以來回行程，加上作業時間約 2 小時(單程約 30 公里)計算，可謂省時又省力。由於高屏溪攔河堰地表水於豐水期期間，屬於含無機顆粒的砂質比例非常高(如表 1 顯示)，作者曾經取高度混濁底泥之水樣加以測試，結果採樣瓶若靜置沉澱後，去除上層透明液，則其含水率均在 70%以下，符合清淤外送載運標準。所以設計採用砂水分離機後，可以使砂水充分分離，讓清除之淤砂含

水率在 70%以下，因此不需再俟曬乾即可外運。



圖 1 澄清湖入水口照片



圖 2 鏟底泥挖土機照片



圖 3 暫存區曬乾後鏟移照片

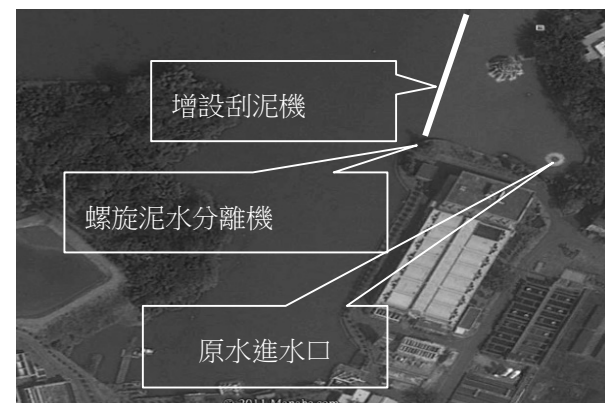


圖 4 澄清湖鳥瞰位置圖(Google)

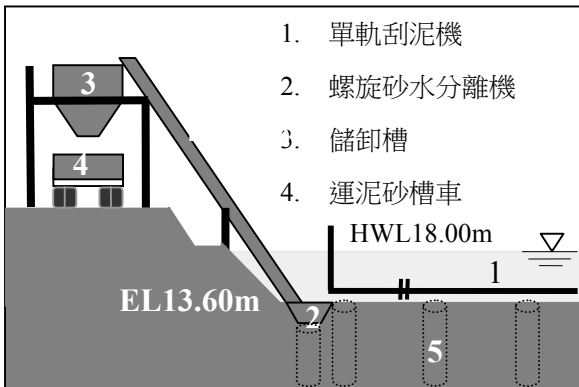


圖 5 澄清湖底泥清理基本構想側面示意

本方案可在目前隔流幕之東側 5m 處，現有兩座湖水入口之北側(詳如圖 5 所示)利用水中工作船進行水中打樁(頂部控制在 EL: 13.6m)。全長 300m 每隔六米打入一支 300 mm  $\phi$  RC $\times$ 6m 之水泥基樁(第二排則打在第一排之東側，相距 10m)，完成後將其上部打除 20cm，然後設置 150 $\times$ 75 $\times$ 20 $\times$ 3.2mm C 型不銹鋼箱型組立之固定鋼軌架座 ( $Z=97.8\text{cm}^3$ )於其上方，並以水中早強混凝土固定之。固定後之鋼軌架座上方再加設 6m 長 $\times$ 25.4mm 鋼軌 50 支全長 300m，以利單軌刮泥機在鋼軌上自由行走，藉以免除傳統挖泥方式，需於刮泥機下方鋪設鋼筋混凝土，始能固定刮泥機之穩定性。但為增加其固定性，雙排串聯捲揚機之間用鋼軌座架加以連結在基樁頭上。刮泥機台車重量為 2.22 噸，加上附著於其上之淤泥約 0.7 噸，合計每支鋼軌座架承受 2.92 噸之載重(不計鋼軌座架及軌道之自重與浮力)。澄清湖水庫之最高水位 HWL: 18: .00 m，最深湖底 EL12.7m。而基樁打入軟泥中 5m，每支之支撐力至少有： $2 \text{ 公噸}/\text{m}^2 \times 5\text{m} \times \pi \times 0.3\text{m} + 1.3 \times (0.3\text{m})^2 \times 3.14/4 = 9.70 \text{ 公噸} > 2.92 \text{ 噸}$ 。OK (12)

在基樁上兩端都固定之鋼軌座架，其所產生之最大正負力矩為  $+/-M_{\text{max}} = PL/8 = 2.92\text{t} \times (6\text{m} - 0.3\text{m}) \div 8 = 2.08\text{t}\cdot\text{m}$ 。其所受之彎曲應力

$$t = M/Z = 2.08\text{t}\cdot\text{m} \times 105\text{kg}\cdot\text{cm} / \text{t}\cdot\text{m} \div 97.8\text{cm}^3 \\ = 2,127\text{kg}/\text{cm}^2 < 2,520 \text{ kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{OK} \quad (13)$$

施工時中必須先打鋼板樁圍堰，以阻斷水流，並將堰內淤泥刮離，以利單軌刮泥機軌道之施作。設置之單軌式刮泥機，一端靠近截流幕鋼板樁；另一端採開放式。澄清湖水庫平時為維護觀光景色，水面均維持在 WL16. 40m 上下，施工中若因水位太高，可降低水位，再以推土機推開施工區內之淤泥，以節省為堰阻水費(但仍暫予估列)，此時若影響其出水量，可改由他場支援供水。

至於計算處理 400,000CMD 之沉澱能力，可由設刮泥機流道有效容量計算之：

$$300\text{m} \times 20\text{m} \times (\text{水深 } 16.4\text{m} - 13.6\text{m}) = 16,800\text{m}^3 \quad (14) \\ \text{設刮泥機流道滯留時間為 } 16,800\text{m}^3 \div 400,000 \\ \text{m}^3/\text{day} \times 24\text{hr}/\text{day} = 1.01\text{hr} \cdot \quad (15)$$

$$\text{設刮泥機流道表面負荷率：} V_s = 400,000\text{m}^3/\text{day} \\ \div (20\text{m} \times 300\text{m}) = 67\text{m}/\text{day} = 0.078\text{cm}/\text{s} \cdot \quad (16)$$

$$\text{設刮泥機流道水平流速：} 400,000\text{m}^3/\text{day} \div \\ (20\text{m} \times 2.8\text{m}) \div 1,440\text{min}/\text{day} = 4.96\text{m}/\text{min} \\ = 8.27\text{cm}/\text{sec} \cdot \quad (17)$$

$$\text{設刮泥機流道去除顆粒之粒徑：} \\ V_s = g/18 \times (S_s - 1) d^2 / \nu \rightarrow d = \{0.078 \div 981 \times 18 \div (2.65 \\ - 1) \times 0.010105\}^{1/2} = 0.003\text{cm} = 0.03\text{mm} \quad (18)$$

$$\text{Re} = V_s \times d / \nu \\ = 0.078 \times 0.003 \div 0.010105 = 0.02 < 0.5 \cdot \text{OK} \quad (19)$$

經(12)~(17)式計算結果，單軌刮泥機須採雙排三台串聯，單軌刮泥設計速度離砂水分離機越近，刮泥板移動速度越快。最重要的是豐水期可以調快單軌刮泥機之往返時間，配合濁度增加時，可以增加清淤量，這些相呼應之動作，可由線上濁度偵測儀之數據，透過程式邏輯控制器(PLC)加以調控，可機動性調整處理速度，降低高濁度所帶來之淤砂滲入廣大湖面。儲卸槽之淤泥可依其荷

重數據，連接警示系統加以控制避免溢流，因此具備有延長澄清湖全面疏浚期限之功效。

## 五、工程費用概估

本方案之設備及其造價如下：

- (一)水中工作船一艘：200,000 元。
- (二)圍堰：6,000 元/m×500m=3,000,000 元
- (三)基樁：採用 0.3m× $\phi$ 6m 長之水泥樁，插入軟泥中 5.1m。6 台捲揚機下方各鋪 5 支及螺旋機下方 20 支，其造價為：14,000 元/支×(300m/排÷6m/支×2 排+6 台×5 支/台+20 支)≐2,100,000 元。
- (四)第一排水泥樁周圍拋石：50,000 元。
- (五)單軌刮泥機(2.3KW×100m 長×10m)，造價為 6 台×3,000,000 元/台≐18,000,000 元+軌座 175 元/kg×16kg/m×720m≐200 萬元。
- (六)螺旋式砂水分離機 7.5KW×15m 長。造價為 200,000 元/台×8 台≐1,600,000 元。
- (七)不銹鋼儲卸槽(含震動機 1KW 及電動閘)其大小為：15m 長×2.4m 寬×1m 高。其造價為 3,500kg×800 元/kg≐2,800,000 元。
- (八)機電控制設備之造價為 3,000,000 元。
- (九)工程設計、鑽探、監造及雜項費用(含加強基樁固定性所需之橫向鋼軌)：以上述工程費之 10%計約為：3,250,000 元。
- (十)假設工程(搭架、圍水、擋土、點井、安全措施等，就以上合計之 0.1%計=325,000 元總工程費：合計約為 36,325,000 元。

## 六、淤泥清理年費分析

- (一)折舊費：1.基樁：210 萬元×1/50 年=4.2 萬元/年。2.圍堰：300 萬元/年。3.機電工程(1,800+200+160+280+300)萬元×1/20 年=137 萬元/年。4.工程設計費等：325 萬

元/年。小計 7,662,000 元。

- (二)機電工程維護(單軌刮泥機、砂水分離機…等)：(1,800+200+160+280+300)萬元×3%/年≐82,000 元/年。
- (三)利息：36,000,000 元×1%/年=360,000 元/年。
- (四)人工費：增設刮泥機、螺旋式砂水分離機及卸儲槽，可設計為自動操控設備，因此可借由既有人力於控制室加以監控，至於卸載外運之人力，亦可由現有澄清湖給水廠現有員工兼顧之，故所需之人工費不需另予加計。
- (五)動力費：經實際製造廠商之核算，整套設備需 6 台單軌刮泥機(2.3KW)、8 台螺旋式砂水分離機(7.5KW)及 2 台震盪機(1KW)，合計 75.8KW。其年固定電費及流動電費為 75.8KW×(186 元/KW/月×12 月/年+8hr/day×365day/年×1.07 元/KW/hr)×70%≐615,000 元/年。
- (六)土方運費：運土車租金 10,000 元/day，澄清湖至南星計畫區來回行程以約 120 分鐘計算，每日來回可運 4 車(每車可運 14m<sup>3</sup>)，折 109,000m<sup>3</sup>/年×10,000 元/day÷4 車/day÷14m<sup>3</sup>/車=19,500,000 元/年。
- (七)管理費、雜項(空污費等)、稅捐利潤及工程預備費共約 20%≐562240 元/年(28,112,00 元/年×20%)。
- (八)物價波動準備金(5%)=140560 元/年(28,112,00 元/年×5%)。
- (九)合計約 29,625,600 元/年。每年發包清除 109,000m<sup>3</sup> 淤砂，則清泥 1m<sup>3</sup> 之成本約為 271 元 (29,625,600 元/年÷109,000 m<sup>3</sup>/年)。

## 七、效益評估

今(100)年兩次公開招標之清淤工程，其

得標單價合計為 563 元/m<sup>3</sup>，故此後每年可省清淤發包金額約(563-271)元/m<sup>3</sup>×109,000m<sup>3</sup>≐31,828,000 元。

由於澄清湖區內周邊 3 公里內，已經沒有暫時存底泥之空間，100 年 5 月招標為底泥/砂需運至 30km 南星計畫區(199 元/m<sup>3</sup>)，由於運輸距離與運費、油價及處理淤泥成本具有密切相關性。國際油價逐年升高之趨勢，相對的其淤泥處理費也會水漲船高。南星計畫區每天所需之行車次數為：30 分+45 分×2=120 分→4 車/day。

運費：10,000 元/day÷(4 車/day×14m<sup>3</sup>/車)+0 元/m<sup>3</sup>≐179 元/m<sup>3</sup>。

另經評估底泥(砂)運至澄清湖鄰近 6 公里政府立案土石方處理場需費時：30 分+15 分×2=60 分→8 趟/day。運費：10,000 元/day÷(8 車/day×14m<sup>3</sup>/車)+60 元/m<sup>3</sup>≐150 元/m<sup>3</sup>。因此運至政府立案土方場處理，雖然每立方公尺需加付 60 元，由於距離較近，故可增加來回運輸次數，兩相比較後，運往南星計畫區每年仍尚可節省約(179-150)元/m<sup>3</sup>×109,000 m<sup>3</sup>≐316 萬元。

## 八、結語與建議

由於澄清湖觀光區屬於國際級觀光勝地，也是高雄地區重要自來水處理廠之蓄水及沉澱設施，其每年所產生的底泥，早已讓承辦人員傷透腦筋。歷年來曾經試過多種方式予以磨合，但仍然無法獲得很滿意的結果。最主要的是因它尚涉及清除淤泥堆置等問題，多少會產生有礙觀光區觀瞻上的困擾，例如民國 91 至 94 年間澄清湖全面清淤，雖共清淤 115 萬立方公尺，為該水庫自民國 41 年設立以來首次全面放乾以機械方式開挖<sup>[4]</sup>，主要目的是為清除淤積多年的底泥，

所釋放出營養鹽，以免導致水庫水質優養化及其惡臭等造成二次污染原水引起水質不佳及淨水困擾等問題。同時無形中也增加不少蓄水容量。但因當時施工期太長造成連續 4 年湖光景色頓失，相對使澄清湖觀光收入巨幅銳減。

台水公司如能採用本模式，在工程建設完成後，可以擺除清淤泥工程與觀光方面的衝突，每年又可節省一筆可觀的淤泥/砂之清理費約 3,200~3,600 萬元，一舉兩得。此方式應用成功後，如再經進一步修正改善，可以推廣應用於全國水庫的長期清淤工程，有效解決以往水庫清除底泥成果不佳之困境。

## 參考文獻

- 1.黃松清，「河床下以滲濾管取水之水質初步探討」，碩士論文，第2頁，國立屏東科技大學土木工程系，屏東(國96年)。
- 2..中華民國自來水協會，「自來水設施操作維護手冊」，台北，第596、599頁(民國84年)。
- 3.Ronald L. Droste，林正芳等譯，「水及廢水處理理論與實務」，六合出版社，台北，第281、408頁 (民國91年)。
- 4.陳金花、歐麗苓，「澄清湖底泥清除對水庫水質影響之探討研究報告」，台水第七區管理處檢驗室，第2頁(民國96年)。

## 作者簡介

### 楊品龍先生

現職：尚潔環境工程公司工程師

高雄應用科技大學機械所博士班研究生

專長：淨水設備改善

### 曾浩雄先生

現職：尚潔環境工程公司技師

專長：自來水工程

# 快組式村落型緊急淨水系統

文/陳建宏、任維傑、周珊珊、王藝峰、楊其錚、謝明昌

## 一、前言

人不定勝天，天災人禍無可避免，於災難發生時，往往無法獲得潔淨安全的飲用水，迄今世界上有超過一半以上的人口因為飲用水受到污染而罹病，每天超過 6,000 人因無潔淨水可用而死亡，故可見緊急淨水處理技術之重要性。台灣颱風發生頻率極高、區域降雨不均、坡陡流急，颱風過後原水水質常發生高濁度的情況，導致部分區域停水、限水或減壓供水，此外，於山區的簡易自來水系統，更無法有效難處理高濁度水體，因而偏遠地區或山區的村落，於大雨過後的水質濁度常偏高。

有鑒於此，經濟部水利署防災中心，特別成立「研發村落型緊急供水技術之研究(1/2)-綠能快組式之高濁度原水淨水系統」計畫，與工研院合作，研發一種可於現場快組(一小時內組裝完成)、可高效處理高濁度水體(大於 500 NTU)、可方便套裝模組運輸(單一套裝式淨水模組<50 kg)的村落型緊急淨水系統，於平時，可作為簡易自來水系統，於災期，則作為緊急淨水裝置，提供缺水地區或救難中心應用。

## 二、研究背景與目的

傳統之淨水技術、供水技術並無法直接應用於緊急、救災之需求，因傳統淨水、供水技術，其缺點為(一)設備較重甚或不可搬運，不利於運輸。(二)系統組裝及試車時間長，且試車期間長。(三)不適用於高濁度水處理。(四)需大量用電，故基於這些原因，

致使傳統淨水技術無法滿足緊急用水之水質需求。

緊急淨水設備的水源多為高濁度水，於颱風期間台灣地區濁度高於上萬 NTU 甚為常見，而傳統淨水設備僅可處理小於 500 NTU 的原水，故傳統淨水技術無法處理高濁度水源。此外，考量到緊急災難發生時，多為交通中斷導致傳統大型水處理系統無法運送的情況，因而需研發一種質輕且小型的套裝淨水模組，可方便運送於災區，並進行快速組裝，快速供水。

另外，因台灣多處地質鬆軟，故降雨期間亦產生泥沙含量高的高濁度水，含有小於  $1\mu\text{m}$  的微小顆粒，故若僅以傳統淨水技術處理，如水漩機，則無法有效去除，並會導致淨水系統損害。且現有處理技術多為大型化設備，如法國 Actiflo 及具漩流結團絮凝器，並不適用於機動式救災淨水系統。

因此本研究之目的在於使村落型緊急淨水系統具有高機動性、快速組裝、可去除高濁度原水之特性與功能，以克服災難期間所面臨的窘境，包含系統可於處理高濁度水源、對外道路中斷不易搬運、時效緊迫(快組設計)等情況下使用，並可依現場環境條件，選擇適當供水水量規模之村落型緊急供水系統進行單獨或並聯應用(增加水量)，以快速解決災民及災區無法正常用水的問題。因此，未來當國內外發生災難，導致災民面臨到無乾淨用水問題時，則可應用本研究之技術與系統，進行人道救援，或於偏遠山區建置本系統作為簡易自來水，解決大雨

過後的高濁水問題，此外，偏遠地區的傳統簡易自來水系統，常因原住民部落之居民不喜水中氣味，或簡易自來水系統設計、操作不當，而導致水中菌數過高，而村落型緊急淨水系統，除了可高效處理高濁度水體外，並可有效確保水中總菌數或大腸菌數符合飲用水水質標準。

### 三、系統設計與單元功能說明

本研究將村落型緊急淨水系統，取名為 Q water，如圖 1 所示，所謂的 Q，代表著 Quickly(快組)、Quality(優質)及 Quantity(豐沛)，Q water 可由兩個民眾於 20 分鐘內組裝完成，是謂快組；Q water 可處理高濁度原水，出水並符合飲用水標準，是謂優質；Q water 小體積大產量，於 2.5 立方米左右的空間下可產水為 15 CMD，並可進行並聯增加出水量，是謂豐沛。Q water 各套裝式淨水單元說明如下：

#### (一)系統程序

系統包含高效率傾斜板沉澱單元、軟質多孔性擔體單元、超濾膜單元、殺菌單元等四道淨水單元。第一道程序會先進行沉砂，將大尺寸固體物移除，接著去除大粒徑的砂及泥沙，所述大粒徑為粒徑大於  $10\ \mu\text{m}$  之固體物；第二道程序則針對小尺寸粒徑顆粒進行處理，並可同時些許進行有機污染物之降解；第三道程序則進行極小尺寸懸浮顆粒的固液分離、大分子有機物濾除及細菌濾除等，最後則進行殺菌處理，整體淨水流程如圖 2 所示。

#### (二)傾斜版沉澱池

主要係針對粒徑大於  $10\ \mu\text{m}$  的砂土進行固液分離，為能有效增加沉澱面積以提升

沉澱效果，增設一傾斜板或傾斜管，其中，傾斜板或傾斜管或一可拆卸式套件，可於槽體內進行抽換，傾斜板或傾斜管上方並設有溢流堰，作為整流之用。

#### (三)軟質多孔性擔體過濾池

為一種以採用多孔性泡棉或不織布擔體作為反應槽介質之處理單元，主要係針對粒徑大於  $1\ \mu\text{m}$  的懸浮固體物及進行處理，由於其具有可壓縮的多孔性 PU 泡棉或不織布擔體，可藉由堆疊多顆擔體形成一種濾床型態，藉以去除懸浮固體物。其中，擔體濾床下方設有一可拆卸式底板及一曝氣系統，且擔體濾床上方設有一可卸除式上蓋，以避免擔體上浮而流出，上蓋上方並設有溢流堰，作為整流之用。此外，軟質多孔性擔體，為一種輕質材料，故方便運輸及攜帶。

#### (四)超濾膜

主要用以去除粒徑大於  $0.1\ \mu\text{m}$  的微細顆粒、細菌、腐植質、固體物有機物等污染物，其過濾方式是以濾膜兩側的壓力差為驅動力，濾膜為過濾介質的篩分過程，型態為中空纖維膜。超濾膜單元操作必須施加一操作壓力，該操作壓力一般在  $0.1\sim 0.6\ \text{MPa}$  之間，此外，超濾膜與槽體本身可進行拆卸，薄膜下方並設有曝氣系統，而於加壓驅動力上，除以抽水機進行抽水外，另一個主要功能特徵係得利用水體自體重力進行過濾出水，且其薄膜出水口及液面至少須有 15 公分之差。以上之機構則形成一種超濾膜套裝淨水單元，具有方便進行維護、操作、組裝、運輸及量產之特性。

#### (五)殺菌單元

主要用以去除水體中細菌，係利用短波長  $254\ \text{nm}$  的 UV 燈進行殺菌，或利用氯錠、

次氯酸鈉等加藥手法進行水體殺菌。

### (六)快組式系統平台

以上四種套裝式淨水單元，各淨水單元均設有一入水口、出水口及排泥口，水路管口及水管連接上的設置為可快速拆卸或組裝的架構，非為固定式，而連接四個單元的水管管路，彼此間則以一或數個橫桿，將多個水管管路整合固定成一個管架模組套件。此外，此管架模組套件上，並設有一個電路開關系統，與系統上之泵浦電線、UV 燈電線可進行快速簡易插線連接，並設有控制系統運作開關。

此外，傾斜板沉澱單元、軟質多孔性擔體單元、超濾膜單元及殺菌單元等四個套裝淨水模組之槽體，為強化槽體整體的結構強度，避免槽壁變型，並能減少組裝程序，故於兩兩相鄰的淨水模組槽壁上，設置有數個支撐橫柱或縱柱，當兩個槽壁相靠時，兩個槽體間的支撐橫柱或縱柱則可抑制淨水模組槽壁變形，此為一種支架與槽體整合為一體之新型態設計。

此快組系統並設有可移動平台，係由數個支撐框架、支撐桿材、支撐板、輪胎所建構，此平台得以各個零件進行快速進行組裝與建構，茲以方便攜帶各零件至現地進行快數組裝。

而淨水套裝模組、管架模組及可移動平台，可於一小時內可快速組裝整合成一種淨水系統，圖 3 為 Q water 之整體設計示意圖。

### 四、Q water淨水模廠建置

本研究於桃園縣復興鄉羅浮村之羅浮國小內，建立兩套 15 CMD 之 Q water 示範模場，共計 30 CMD 水處理量，如圖 4，於平時，可替代既有簡易處理系統，使出水濁度及菌數符合標準，使該地師生及居民有更潔淨的水可使用；於災難時，可作為緊急供水之用，有效處理高濁水進行處理，提供給所需要的災民使用，若災期時間長，並可移動及組裝系統於臨近溪流旁，進行淨水處理。另一方面，因設於羅浮國小內，並兼具教育意涵。

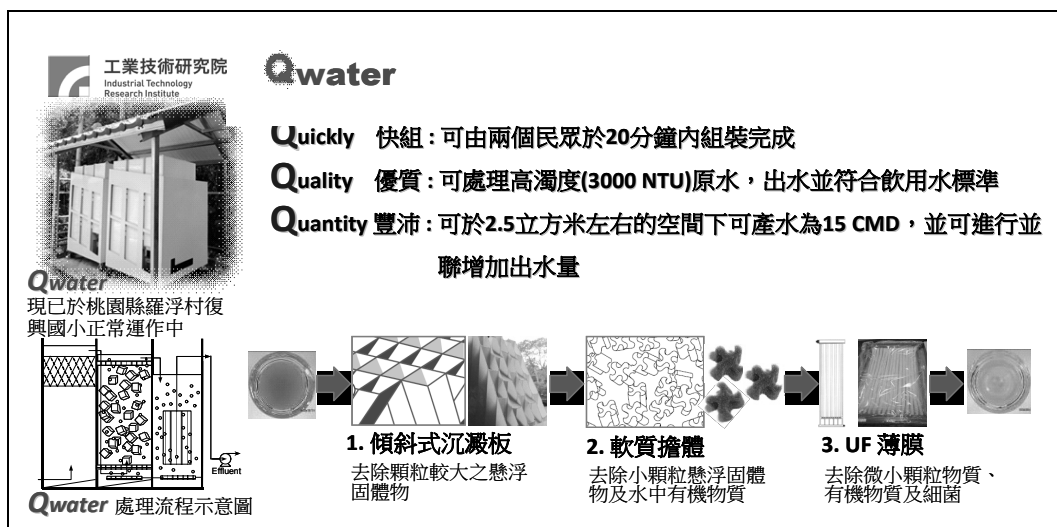


圖 1 Q water 介紹與功能說明

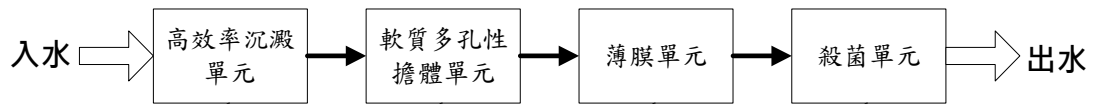


圖 2 Q water 淨水流程

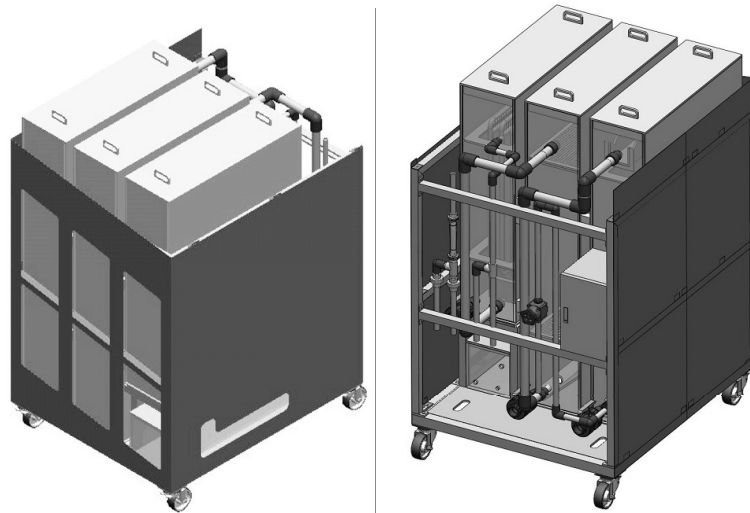


圖 3 Q water 之整體設計示意圖



圖 4 桃園縣復興鄉羅浮村之 Q water 村落型淨水模組

## 五、Q water 效能驗證

為驗證 Q water 系統之效能，本研究進行兩部分的驗證，一為平時即固定一周取樣一次進行水質分析，另一為於系統內添加砂土，來檢視系統於長時間於高濁度(>1000 NTU 及 3000 NTU)水體下的淨水效能，說明

如下。

### (一) 平時運轉之淨水效能驗證

#### 1. 濁度

如圖 5 所示，原水濁度範圍大多為小於 10 NTU，屬正常濁度期間，其中幾個較高濁度點為雨天時特定採點，整體平均為 13.4



NTU，經過沉澱池處理後之平均值為 1.86 NTU，軟質擔體過濾槽出水為 1.72 mg/L，薄膜出水平均為 0.8 NTU。出水水質符合飲用水水質標準(<2 NTU)。

## 2. 總有機碳

如圖 6 所示，總有機碳(TOC)範圍大多為小於 2 ppm，飲用水水源水質標準(行政院環境保護署 86.9.24 環署毒字第 56075 號令發布)為 TOC 需小於 4 ppm 以下，較為適合作為自來水之用，由圖看來，僅有 9 月 16 日之水體之 TOC 稍微超過此標準，其他時間均符合標準。整體平均為 1.1 mg/L，經過沉澱池處理後之平均值為 1.2 mg/L，偶有上升之原因可能為受到沉澱池低部沉積污泥之影響，軟質擔體過濾槽出水為 1.1 mg/L，薄膜出水平均為 0.8 mg/L。

結果顯示，Q water 之軟質擔體部分，並

無曝氣且無植菌，主要為去除無機顆粒之物理性攔除為主要功能，但部分有機污染物仍有被擔體所吸附之可能，此外，從實驗數據的薄膜產水水質狀況看來，薄膜並無有機物降解功能，過濾時些微降低了總有機碳，係因固體性有機物及大分子有機物被攔除，且 UF 對溶解性有機物並無法去除，故去除效果有限。

## 3. 導電度

試驗結果如圖 7。原水之導電度平均值為 138  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、沉澱池出水之導電度平均值為 125  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、軟質擔體淨水槽出水之導電度平均值為 126  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、薄膜產水之之導電度平均值為 130  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。整體而言，因為 Q water 目前所選配的套裝淨水模組並無針對導電度、離子污染物進行去除，故從數據上看來導電度並無下降。

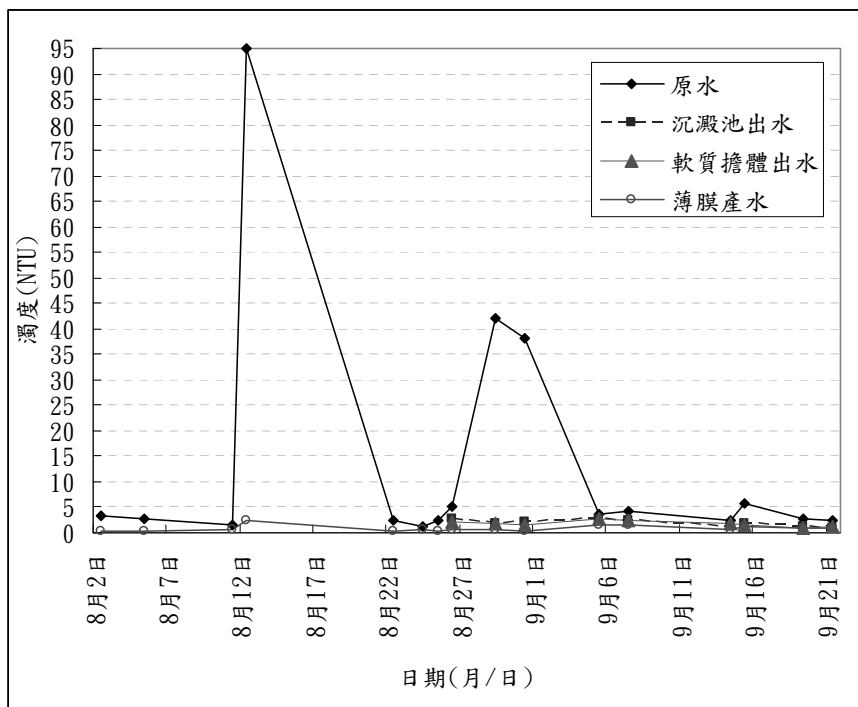


圖 5 正常濁度期間之濁度處理效能比較

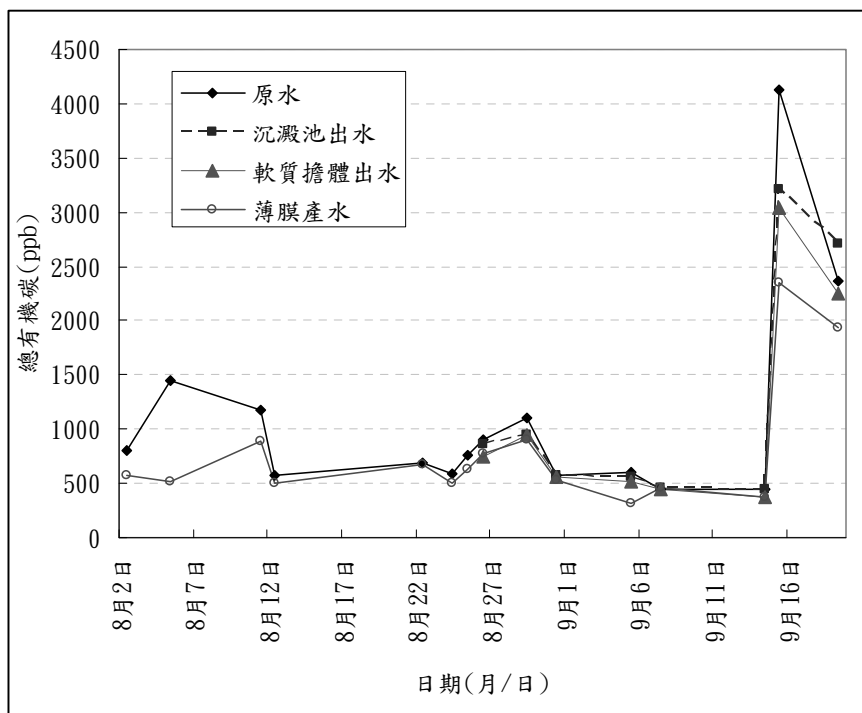


圖 6 正常濁度期間之總有機碳處理效能比較

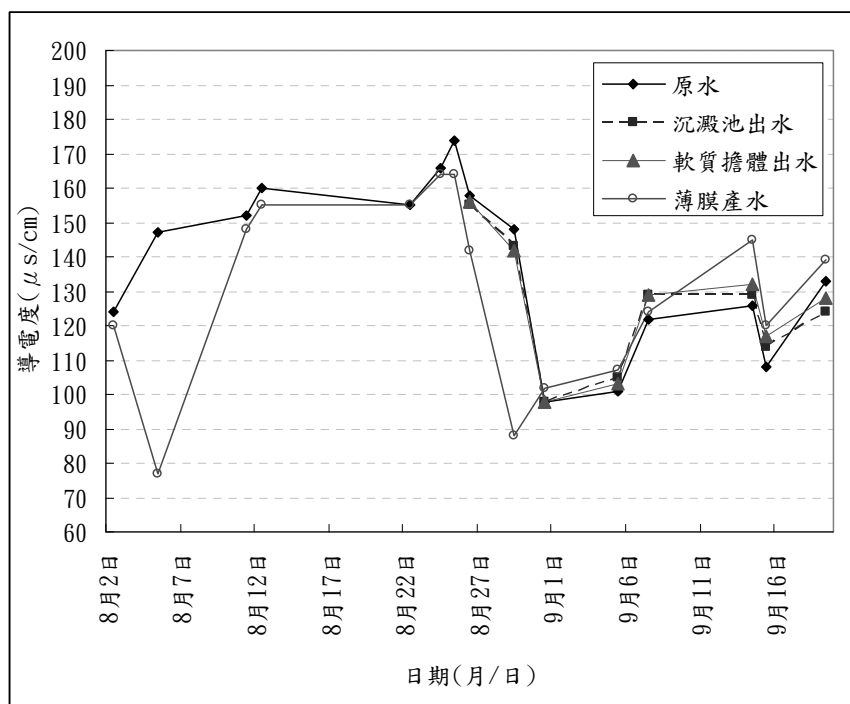


圖 7 正常濁度期間之導電度處理效能比較

#### 4.pH

原水、沉澱池出水、軟質擔體淨水槽出水、薄膜產水之 pH 值，座落於 6.10~7.90 之間，平均值為 7.45，均屬正常自來水水質範圍。

圍。

#### 5.總菌數及大腸菌數

本研究於 10/3 及 10/19 針對原水與出水之總菌數及大腸菌數進行測試，結果如表 1

所示，實驗結果顯示經過 Q water 淨水系統處理可完全抑制菌落的生長，總菌落數實驗：原水經處理後菌落數幾乎為零；大腸桿菌實驗：原水經處理後也幾乎沒發現到菌落之增長，其總菌落數及大腸桿菌生長結果皆符合飲用水水質標準（總菌落數 $< 100$  CFU / mL；大腸桿菌數  $< 6$  CFU / 100 mL），故證明 Q water 淨水系統具有良好去除總菌及大腸桿菌之能力。

## 6.排泥

羅浮國小之 Q water 淨水系統，完成試車與相關配套作業程序後，係從 8 月 2 日開始正式運轉，統計至 10 月底止，每日操作統迄今已約有 3 個月，所有系統均可正常且全自動操作，且目前操作情況迄今並無須排泥。

## (二)高濁度淨水效能驗證

### 1.高濁度驗證系統建置

本計畫於羅浮國小之 Q water 模廠，共建置兩套 15 CMD 系統，兩套於平時即能全自動進行運轉，然而，為了進行高濁度原水之效能驗證，其中一套並修改為可手動調控原水濁度之系統。

### 2.原水濁度大於 1000 NTU 之測試

如圖 8 所示，原水為高濁度(1000~3000 NTU)原水之測試，所有原水濁度範圍均大於 1000 NTU 但小於 3000 NTU，原水整體平均為 1819 NTU，經過沉澱池處理後之平均值為

726 NTU，軟質擔體過濾槽出水為 305 mg/L，薄膜出水平均為 1.28 NTU。出水水質符合飲用水水質標準( $< 2$  NTU)。

### 3.原水濁度大於 3000 NTU 之測試

如圖 9 所示，原水為高濁度( $> 3000$  NTU)原水之測試，所有原水濁度範圍均大於 3000 NTU，原水整體平均為 3292 NTU，經過沉澱池處理後之平均值為 1603 NTU，軟質擔體過濾槽出水為 742 mg/L，薄膜出水平均為 1.92 NTU。出水水質符合飲用水水質標準( $< 2$  NTU)。

## 4.討論

比較濁度 1000~3000 及大於 3000 NTU 兩組原水水質數據發現，如圖 10 及表 2，當原水濁度為 1000~3000 NTU 時，沉澱池及軟質擔體之濁度去除效能均較原水濁度大於 3000 NTU 為佳。此外，原水濁度大於 3000 NTU 時，進入薄膜槽的水體濁度為 742 NTU，而 1000~3000 NTU 時為 305 NTU，對 UF 薄膜而言，水體濁度愈高，將造成薄膜容易堵塞、操作時間縮短、使用壽命年限降低及反洗頻率增加，但深入的數據與評估，仍需長期驗證，然而，長時間處在大於 1000 NTU 的原水濁度條件下，對於天然水體而言是不可能的，因此，此次實驗證明，Q water 可有效處理高濁度原水，但使用期間與反洗次數，仍需評估。

表 1 總菌數及大腸菌數實驗

日期	編號	總菌(T) CFU/ mL	大腸桿菌(E) CFU/ 100 mL
100/10/03	原水	60	$5 \times 10^3$
	出水	1	3
100/10/19	原水	50	$2.7 \times 10^3$
	出水	2	5

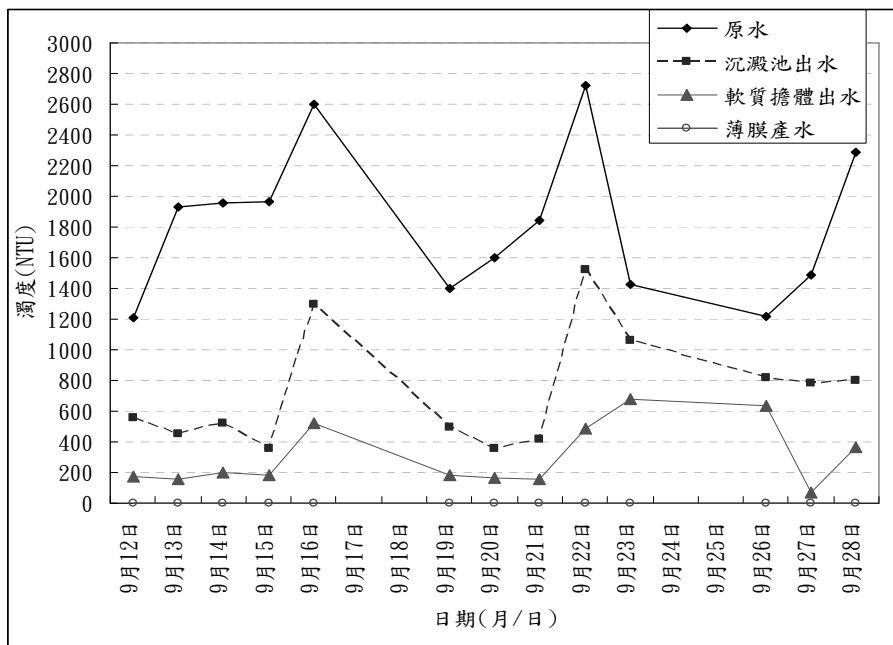


圖 8 高濁度(1000~3000 NTU)之濁度處理效能比較

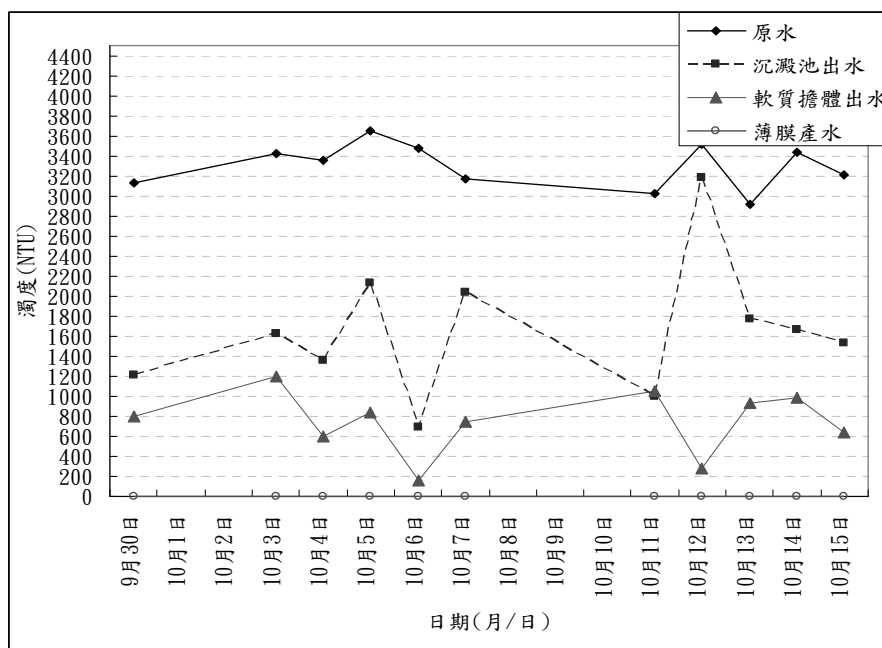


圖 9 超高濁度期間(>3000 NTU)之濁度處理效能比較

表 3 各淨水單元於高濁度原水處理之濁度去除率(%)比較

單元	原水	沉澱池出水	軟質擔體出水	薄膜產水
濁度去除率(%)				
濁度(NTU)				
1000~3000	-	60.1	83.2	99.9
>3000	-	51.3	77.5	99.9

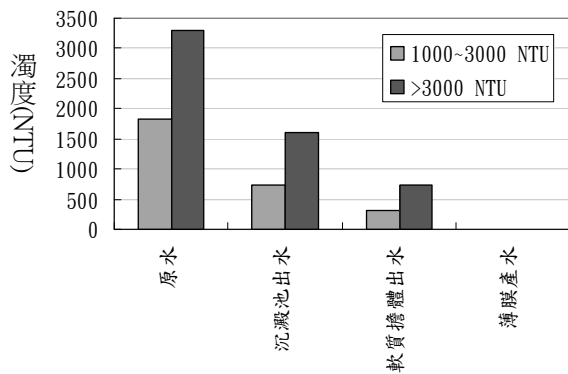


圖 10 高濁度期間(>3000 NTU)之濁度處理效能比較

而排泥部分，則為每天進行高濁度試驗後，進行排泥，排水量為槽體的 30% 左右。於試驗過程中，於某日忘記排泥，曾使原水入水口發生堵塞情況，因槽底底部排泥口於底部入水口之差距不大，導致底泥量過多而高程高於原水入水口，故發生無法進水情況，因此，於平時或高濁度期間，需特別注意排泥操作，避免底泥過高而影響操作。

## 六、結語

本研究已完成村落型緊急供水系統-Q water，具備 Quickly(快組)、Quality(優質)及 Quantity(豐沛)等特性，可由兩個民眾於 20 分鐘內組裝完成，並能處理 500NTU 以上的高濁度原水，出水並符合飲用水標準，此外，Q water 具備小體積大產量特性，於 2.5 立方米左右的空間下可產水為 15 CMD，並可進行並聯增加出水量，而單一套裝模組重量小於 40 kg，整體重量小於 260 kg。並於桃園縣復興羅浮村羅浮國小內設置一套 30 CMD 之模廠，並順利進行淨水效能之測試，於平時操作時(原水濁度小於 100 NTU)及高濁度原水(1000~3000 NTU 及大於 3000 NTU)等操作條件下，整體系統濁度去除率達 99.9%，產水濁度小於 2 NTU，總有機碳出水

平均濃度為 4 mg/L，總菌數小於 1 CFU/mL，大腸桿菌數小於 5 CFU/100 mL，均符合飲用水水質標準。

## 致謝

特別感謝羅浮村 廖國達村長於模廠選址、建置及與相關單位溝通等方面之熱情協助，並尤衷感謝羅浮國小 陳榮基校長及多位師長對本研究於模廠建置及營運操作之協助與配合，並感謝水利署防災中心及保育事業組提供資源與協助，使相關專利及成果得以衍生。

## 參考文獻

1. 洪仁陽、夏工傑、陳建宏、蕭碧蓮、周珊珊 (2010)，BioMF 薄膜技術在緊急救災用水之應用，中華民國自來水協會會刊，第 29 卷，第二期，第 35-44 頁。
2. 夏工傑、洪仁陽、陳建宏、周珊珊 (2009)，八八水災公用設施防救災措施及重建工程計畫-瑞峰國小緊急淨水系統之建置，工程，第 124-128 頁。
3. [www.veoliawaterst.com/actiflo/en/actiflo.htm](http://www.veoliawaterst.com/actiflo/en/actiflo.htm) 「VEOLIA」Actiflo™。
4. <http://www.rakuten.ne.jp/gold/t-tic/water/torayrom.html> 日本樂天淨水市場。
5. 張添晉 (2006)，羅浮簡易自來水水源取水工程改善方案，桃園縣政府環境保護局。
6. 鄒文源、張王冠、洪仁陽、吳漢松、莊順興，(1999) BioNET 生物程序處理自來水原水之研究，自來水會刊，第 18 卷第 4 期，22-33。
7. 洪仁陽、張王冠、鄒文源、張敏超、邵信、周珊珊 (2005)，多孔性擔體濾除高濁度原水前處理之研究，第二十二屆自來水研究發表會，第 345-351 頁。

- 8.周珊珊、洪仁陽、彭明鏡、陳誼彰、袁如馨、黃志彬 (2005), 高濁度原水混凝前處理模廠試驗研究, 第一屆永續水處理: 水資源及水質管理研討會, A5-3-1~14。
- 9.吳志超、周珊珊、洪仁陽、鄭世揚 (2007), 高濁度原水最適化處理技術之研究, 台灣自來水股份有限公司。
- 10.Chang M .C., Horng R.Y., Shao H., Hu.Y. J., (2006), Performance and filtration characteristics of on-woven membranes used in submerged membrane bioreactor for synthetic wastewater treatment, Desalination, 191, 8-15
- 11.Chung, L. C., Shao, H., Horng, R.,Y., Liang, T. M., Hu, Y. J., Huang, M. S., Liu, P. I., Chang, M. C., (2009), A Submerged Non-woven Sheet/Photocatalytic Reactor System for Removal of NP-9 in Water, IWA Specialist Conference on Oxidation Technologies for Water & Wastewater Treatment, Berlin, Germany.
- 12.Horng, R. Y., Chang, M. C., Shao, H., Hu Y. J., Huang, C. P. "Application of TiO2 photocatalytic oxidation and non-woven membrane filtration hybrid system for degradation of 4-chlorophenol", Desalination, 245, 169-182, 2009.
- 13.Mulder, M., (1996), Basic Principles of Membrane Technology, Kluwer Academic: Dordrecht, 564 pp, ISBN 0-7823-4247-X.

## 作者簡介

---

### 陳建宏 先生

現職：工研院綠能所水科技組 研究員

專長：水處理技術

### 任維傑 先生

現職：工研院綠能所水科技組 副研究員

專長：水處理技術

### 周珊珊 小姐

現職：工研院綠能所水科技組 組長

專長：水處理技術

### 王藝峰先生

現職：水利署保育事業組 組長

專長：水庫集水區治理保育、水源涵養與環境生態保護

### 楊其錚先生

現職：水利署水利防災中心 副工程司

專長：災害防救業務及專案執行

### 謝明昌先生

現職：水利署水利防災中心 主任

專長：災害防救業務執行、水利災害緊急應變體系建立

# 淨水污泥資源化再利用現況及可行性評估

文/王靜逸、袁如馨、吳美惠

## 摘要

本研究先對國內淨水污泥產生量、地域分佈與處置現況進行背景資料收集，並就淨水污泥再利用方式如再利用於培養土、與水泥與天然砂拌混 CLSM、燒結紅磚、人造骨材及作為水泥生料替代品，利用其中所含之豐沛殘餘凝膠羽作為廢水處理相關用途等，就生產技術、法規限制、產品市場規模以及經濟效益為考量基礎，以探討適合台灣自來水公司(以下簡稱台水)淨水污泥資源化之策略。淨水污泥再利用於紅磚、水泥與培養土產業為最可行之再利用方式，台水若能自行將淨水污泥資源化生產培養土，剩餘無法處理之淨水污泥再行交由水泥與磚窯業進行再利用，如此將能有效大幅減低淨水污泥處理費用，並落實污泥資源化永續利用之理念。

## 一、前言

我國自來水的供給主要由台灣自來水公司(以下簡稱台水)與台北自來水事業處(以下簡稱北水處)專責，台灣地區自來水普及率已超過 90%，台北市自來水普及率更達 99.5%，每日總出水量超過九百萬公噸以上。淨水場淨水過程中取用水庫或河川地表水水源，經過凝滲、沉澱及過濾等淨水程序，而產生大量淨水污泥。以台水所屬十二區處統計之淨水污泥產生量，民國 96 年淨水污泥年產生量約為 125,000 公噸，北水處轄下五座淨水場淨水污泥產量約 41,000 公噸，全台每年產生超過 16 萬公噸淨水污泥，

其產生數量主要分佈於西半部。

台灣早期淨水污泥處置多為直接排放回河川，當時觀念為淨水污泥來自於河川亦當回歸河川。其後由於環保意識抬頭，且法規認定淨水污泥為經過化學處理之事業廢棄物，因而禁止直接排放入河川水體中，需以符合環保署公告之水污染防治法與廢棄物清理法規定方式予以適當處置，此後淨水污泥之最終處置方式即改為以衛生掩埋為主。然而台灣地狹人稠，可利用之土地已相當有限，加以近年來民眾環保意識高漲，在掩埋場日趨飽和及新建掩埋場場址取得不易之情況下，以衛生掩埋方式處理淨水污泥更加難以執行，水公司所需支付代處理業者進行後續掩埋之每公噸淨水污泥代處理費亦提高至近 3,000 元，且少數地理位置較偏遠之淨水場，有時會遭遇無廠商願投標代處理之窘境，而使淨水污泥代處理費用更加高漲，無形中更加水公司經營的負擔。

國內外許多學者曾進行淨水污泥資源化技術之研究，已可實際應用之生產技術包含以高溫燒結方式製造紅磚、作為水泥黏土部分替代品生產水泥，混合土壤作為植物生長栽培介質或作為土壤改良劑使用等，仍在實驗室開發評估階段之技術有淨水污泥中凝膠回收、拌製控制性低強度回填材料、製造地工材料、直接或間接作為水處理用之凝膠劑或吸附劑等。經濟部工業局曾依據行政院環境保護署「全國事業廢棄物管制系統」之廢棄物申報資料，統計淨水污泥再利用產業每年約可創造兩億六千萬元產值。近

年來許多以淨水污泥作為主原料之園藝培養土製造業，與利用淨水污泥作為替代生產原料的水泥及磚窯等產業開始兼營淨水污泥代處理事業，參與淨水場污泥清運招標；由於其不需支付掩埋場進場費用，且標得淨水污泥亦可作為產品生產主原料或替代材料以降低本業生產之成本，因此投標金額比起掩埋代處理業者更具優勢，台水所需支付之每噸淨水污泥代處理費用更可壓低到 300 至 1,000 元。又經濟部工業局於民國 100 年 2 月 9 日修訂之「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」，「自來水淨水污泥」列為再利用種類編號三十九項之以水泥原料用途之再利用事業廢棄物；依據「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」第三條，可具備相關文件以個案再利用或通案再利用方式向經濟部申請許可，俟通過後將可以其他再利用方式進行淨水污泥再利用，目前已有廠商以生產紅磚、水泥及園藝培養土用途進行再利用且獲許可，也因此近年來台水公司與北水處淨水污泥後續處置均走向資源化再利用。

## 二、淨水污泥資源化再利用技術

淨水污泥資源化再利用技術，經本研究分析檢討後，分為 A.經簡單乾燥、破碎與造粒後即可拌混摻合料，作為培養土或公園綠地景觀工程覆土，或拌混水泥與砂作為管溝回填材料之再利用方式，B.需經高溫完全乾燥或經高溫熔融或燒結之土木建材資源化再利用技術，如作為水泥生料替代、燒結製磚與燒結輕質骨材粒料等，以及 C.利用淨水污泥中添加之混凝劑殘餘物質作為廢水處理用途等再利用方式，並詳述如後：

### (一)淨水污泥再利用於園藝培養土

近年來歐洲與日本等先進國家對於污泥的

最終處置，有越來越高的比例是傾向以土地施用的方式，日本許多縣市水道局與企業廳對於轄下淨水場產生之淨水污泥是以製成培養土產品販售進行再利用。大阪市水道局曾於 1996 年委託大阪府農業技術中心探討淨水污泥餅再利用於園藝用土，進行污泥餅性質分析與樹木及花草育苗的培育試驗，結果指出污泥餅雖含微量銅、錳與砷等重金屬，但不妨礙植物生長；樹木生長培育試驗則發現，污泥餅混合山土之比例達到 75 至 100%時，除不妨礙樹苗成長外，還可促進樹苗成長；植物花苗培育研究上，依植物花苗種類，污泥餅混合比率達到 10 至 50%之培育試驗結果，顯示可促進種子發芽與幼苗成長，故污泥餅適量施用對於植物生長是有助益的。日本兵庫縣企業廳於 2005 年 1 月以淨水污泥與真砂土混合進行植樹，經 22 個月後進行最終調查，發現淨水污泥添加量越高，對於苗木生長情況越好。此外該單位亦有以淨水污泥施用於水田中探討添加量對於玄米收穫量影響，發現適量施用淨水污泥於水田中可提升玄米之收穫量。

淨水污泥若欲以土地施用方式進行再利用，其將依用途與標示名稱不同，而受不同主管機關訂定之規範管理。作為公園、路樹與綠地之植栽覆土使用，主管機關為縣市政府工務局(處)，研究期間經洽詢台北市政府工務局公園管理處與高雄市政府工務局養護工程處，了解實務上僅要求植栽覆土為目視乾淨且無污染之土壤即可，無特別要求土壤標準，因此此種再利用方式僅需向經濟部申請個案再利用許可後即可為之。淨水污泥如作為土壤使用，主要管理法規為行政院環境保護署「土壤污染監測基準」與「食用

作物農地監測基準」；淨水污泥作為原料以生產培養土進行再利用，需依農委會於九十九年七月二十九日公告修正「各類肥料品目及規格」之「雜項有機栽培介質」規範，其中對「利用各種有機質材料經醱酵腐熟或其他物料經物理性狀調整後，製成有機土、泥炭土、培養土、栽培土、土壤改良劑或有機質栽培介質等，作為育苗、容器栽培或植物栽培介質使用者」訂定相關品質規範與限制，淨水污泥欲作為育苗、容器栽培或植物栽培介質，則需依照該規範辦理。由於淨水污泥屬事業廢棄物，依據該規範 4.5 條「利用或添加事業廢棄物為原料，應依「肥料登記證申請及核發辦法」第 5 條規定辦理」，但淨水污泥並不符合「來源出自農業生產、運銷、加工過程或利用農產品為原料所產生，未經化學處理，且可目視辨識為動植物性殘渣，並經農委會公告為可直接利用或添加為製肥原料者」之相關規定，且不為農委會公告之「可直接利用或添加為製肥原料之事業廢棄物種類及其限制事項」所公告之事業廢棄物種類項目，亦非屬主管機關事業廢棄物再利用種類及管理方式，因此僅可供作為景觀園藝用，不得栽植食用作物或施用於食用作物農地；並應登記品目，需經包裝或標示後，始得運銷，且不得以散裝方式販售。此外，本規範另對於砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛及鋅等八項重金屬訂定相關管制規範，其有害成分限值遠低於環保署「土壤污染整治標準」及「食用作物農地管制標準」相關標準，且有機質需 30.0% 以上，由於淨水污泥為無機污泥，仍需額外添加有機質材料調整。

## (二)淨水污泥再利用於水泥原料

淨水污泥作為水泥原料為經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式所列之再利用用途。淨水污泥在水泥的生產中，可作為水泥生料中黏土成分的替代品，但並非所有淨水污泥皆可作為水泥生料黏土成分的替代品。據本研究團隊過去的研究結果顯示，不同出處淨水污泥受到當地原水及處理方式的不同而有所差異，如高雄鳳山淨水場污泥由於水分與揮發性物質含量高，主要揮發性物質為含磷物質，其化學組成成分與水泥用黏土迥異且總含氮量過高，因而不適合作為水泥生料使用；直潭淨水場污泥，其主要成份以無機物為主，成份與水泥用黏土相似，且含氮量較低，因此適合替代黏土作為水泥生料，如依不同比率替代黏土作為水泥生料，研究結果顯示，含有淨水污泥之生料經燒結冷卻程序後所製成之熟料，在礦物生成上與純水泥相同並無差異，熟料中游離石灰含量隨著淨水污泥替代率的增加而減少；經 CNS 水泥漿體試驗也顯示，在不同替代率之下，水泥漿體皆能符合 CNS 卜特蘭水泥一型標準，且水泥漿體之抗壓強度隨著淨水污泥替代率的增加而提高，如圖 1 所示。各齡期強度以替代率 100% 時 (C100F) 的抗壓強度最高，純水泥 (C00F) 抗壓強度反而在各齡期中抗壓強度皆是最低。隨著養護時間增加，替代率 100% 時 (C100F) 的抗壓強度與純水泥抗壓強度之間差距也愈來愈大。第 28 天時純水泥漿體強度發展到 4667.14 psi，而淨水污泥替代率 100% 之同齡期水泥漿體其抗壓強度已達到 5604.10 psi，是純水泥時強度的 1.2 倍，兩者強度相差近 1000 psi。

表 1 行政院環境保護署與農業委員會頒定相關土壤重金屬標準

重金屬管制項目	環保署土壤污染整治重金屬標準(mg/kg)	環保署食用作物農地之管制標準值(mg/kg)	農委會肥料品目種類及規格-雜項有機栽培介質(mg/kg)
砷 (As)	60	未訂定	10
鎘 (Cd)	20	5	0.6
鉻 (Cr)	250	未訂定	30
銅 (Cu)	400	200	20
汞 (Hg)	20	5	0.2
鎳 (Ni)	200	未訂定	10.0
鉛 (Pb)	2000	500	30
鋅 (Zn)	2000	600	160

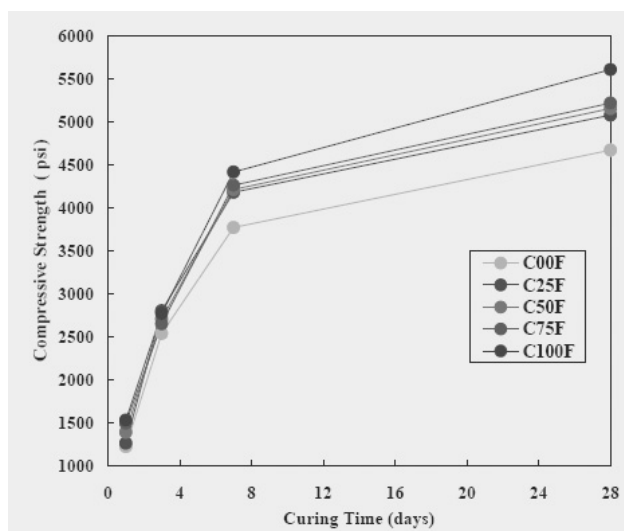


圖 1 不同淨水污泥替代率下水泥齡期抗壓強度變化

水泥早期強度的發展，主要是受水泥中矽酸三鈣多寡影響，而晚期強度則視水泥漿體中矽酸三鈣 (C3S)、矽酸二鈣 (C2S) 實際水化反應程度而定。藉由 Bogue 計算式計算結果可以初步推論，替代率 100% 時的水泥矽酸三鈣含量高於純水泥，因此在早期的強度上，替代率 100% 時的水泥漿體皆大於純水泥漿體。雖然細度的大小也是影響水泥早期強度發展的因素之一，然而在本試驗當中此一現象並不明顯。水泥漿體後期強度則受到矽酸三鈣、矽酸二鈣及游離石灰含量的

影響，在相同的矽酸三鈣含量之下，矽酸二鈣的多寡決定晚期強度的發展。經光學顯微鏡微觀分析結果，顯示淨水污泥在高替代率之下熟料中礦物的生成狀況，熟料中矽酸三鈣 (C3S)、液相 (透明帶有規則之紋理) 分佈狀況較為平均，且矽酸二鈣大都落於矽酸三鈣礦物之中，表示其易燒性較佳，鹼長石所造成的現象也較少，促使矽酸二鈣 (C2S) 在燒結的過程當中更容易與生料中的游離石灰反應，因此熟料中礦物的矽酸二鈣 (C2S) 含量較少，以矽酸三鈣 (C3S) 含量



為主。在先前的實驗及推算皆顯示本試驗中純水泥矽酸二鈣含量雖高於替代率 100%時之水泥，但由於矽酸三鈣本身在後期仍然會進行水化反應，兩者矽酸二鈣含量差異不大且游離石灰負面影響在三天之後產生影響，因此晚期強度仍以替代率 100%時的強度最強，且有拉大之趨勢。藉由實際抗壓試驗顯示，以淨水污泥作為水泥生料，並不會對水泥漿體產生負面的影響，反而有助於強度發展之趨勢。且經水泥係數(cement index)配比顯示，淨水污泥可完全替代黏土作為水泥生料，且熟料中礦物的生成不因淨水污泥的添加而有所改變，且在不同淨水污泥替代率下，所製成之波特蘭水泥皆可符合 CNS 波特蘭水泥一型標準，且水泥漿體之抗壓強度更優於純水泥<sup>[1]</sup>。

### (三)淨水污泥再利用於燒結製磚

淨水污泥利用燒結技術製成建築用紅磚，亦為行之有年的成熟應用技術，許多磚窯業者皆已進行實廠大規模量產。淨水污泥經與製磚用之黏土拌混後，即可將濕土胚加壓成型再經 24 小時風乾，疊堆於台車後，先經乾燥窯預熱再送入 870~995°C 之紅磚燒成窯進行燒結，冷卻後即成為紅磚。本研究團隊曾以 X 光粉末繞射儀 (XRD) 分析直潭淨水場淨水污泥，發現其組成與製磚用黏土類似 (表 2)，惟淨水污泥因凝劑添加而使熔點極高之  $Al_2O_3$  含量提升，可增強試體強度的  $SiO_2$  含量降低，因此淨水污泥的僅可作為替代材料，不適合直接做為製磚之原料。淨水污泥製成之磚體經由之毒性特性溶出程序 (TCLP) 分析結果而可得知，磚體之重金屬溶出濃度均遠小於法規標準，燒結磚體具有良好包封重金屬能力。

淨水污泥作為燒結磚體材料，隨著燒結溫度的提昇，燒結體之體積亦隨之縮小，外觀顏色亦逐漸加深，但其表面依然完整，無任何崩裂之現象 (如圖 2 所示)，且強度亦將隨燒結溫度而提升 (如圖 3 所示)。又淨水污泥燒結體在燒結溫度為 1,100°C、燒結時間 15 分鐘時，其燒結磚體亦可符合 CNS 規範之一級磚標準；混合污泥燒結體作為鋪路磚之混合污泥中淨水污泥比例達到 40~50% 時，可有效降低燒結體之軟化。當混合污泥燒結體在成型壓力為 220 kg/cm<sup>2</sup>，燒結溫度為 1150°C，燒結時間為 60 分鐘時，混合污泥燒結體符合鋪路磚之規範。證明淨水污泥燒結體可做為一般建築磚之使用<sup>[2-3]</sup>。

表 2 淨水污泥及磚用黏土之主要化學組成

	淨水污泥 (%)	水庫淤泥 (%)	磚用黏土 (%)
SiO <sub>2</sub>	52.750	66.435	61.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.150	15.726	16.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.750	6.135	9.27
K <sub>2</sub> O	3.690	3.820	0.14
MgO	1.860	1.734	—
Na <sub>2</sub> O	0.872	1.267	0.02
CaO	0.300	0.513	0.45

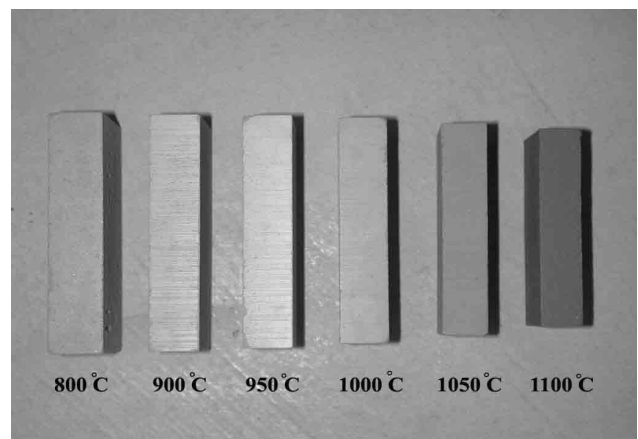


圖 2 淨水污泥經不同燒結溫度燒結之磚體外觀

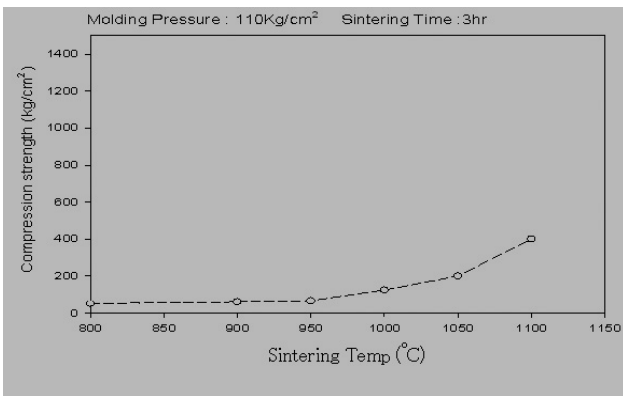


圖 3 淨水污泥經不同燒結溫度磚體抗壓強度

#### (四)淨水污泥再利用於燒結人造骨材

輕質骨材(LWA)具有質輕、耐久性佳、隔熱保溫性優及高抗壓強度等特質，最適宜使用於超高樓層建築與長跨距橋樑使用，可有效減輕結構物自重，具有隔音、隔熱及耐火等優點。

Riley<sup>[4]</sup>曾提出當無機污泥之  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和助熔劑 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等) 三大成分組成滿足一定比例，經定位可落於三相圖中虛線區間，其組成成分在高溫爐中將熔融生成具有一定黏稠度之高塑性流體，又鐵化物分解出的  $\text{CO}_2$  氣體，一旦與原料中的鹼性物質相結合後，就會產生碳酸鉀 ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) 和碳酸鈣 ( $\text{CaCO}_3$ ) 等，這些物質在  $1200^\circ\text{C}$  左右的高溫下分解出  $\text{CO}_2$  氣體，若該  $\text{CO}_2$  氣體未能穿透具有一定黏稠度的玻璃相熔融礦物，將在粒料中產生氣泡，使體積增加產生膨脹，使粒料成為具有中空孔洞之緻密骨材。內政部建築研究所曾委託中華輕質骨材混凝土推廣協會對於國內水庫淤泥再利用於產製燒結人造骨材進行研究，該研究針對國內北中南地區各選五座共十五座水庫開挖其底泥進行分析，發現台灣約有十座水庫底泥化學組成落在 Riley 三相圖中可

發泡區間<sup>[5]</sup>。而淨水污泥主要化學組成成分亦為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等，但可能由於鋁鹽混凝劑的添加，而致使  $\text{SiO}_2$  百分比低於水庫底泥， $\text{Al}_2\text{O}_3$  百分比高於水庫底泥。經本研究蒐集淨水污泥化學成分分析文獻資料，將百分比組成定位於 Riley 可膨脹發泡區間三相圖上，如圖 4 所示，可發現自來水淨水污泥  $\text{SiO}_2$  含量約為 51~55%，較不易進入可發泡區間，僅板新淨水場與直潭淨水場污泥化學組成落於 Riley 可膨脹範圍內，其餘淨水場污泥則較不適合利用燒結膨脹發泡機制生產輕質骨材料。

交通大學研究團隊<sup>[3]</sup>曾於 91 年以直潭淨水場淨水污泥為原料，經由人工搓揉造粒後於  $1000^\circ\text{C}$ 、 $1050^\circ\text{C}$ 、 $1100^\circ\text{C}$  燒結溫度製作人造骨材，其比重分佈於  $1.12\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.78\text{g}/\text{cm}^3$  間。其中以  $1100^\circ\text{C}$  燒結的骨材，其混凝土之 28 天抗壓強度可達到約  $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，符合結構用輕質混凝土的要求，如圖 5 所示。

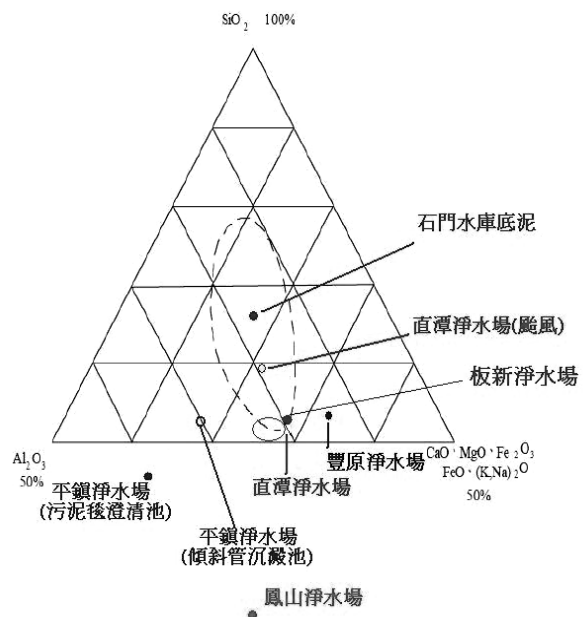


圖 4 國內數座淨水場污泥定位於 Riley 三相圖結果

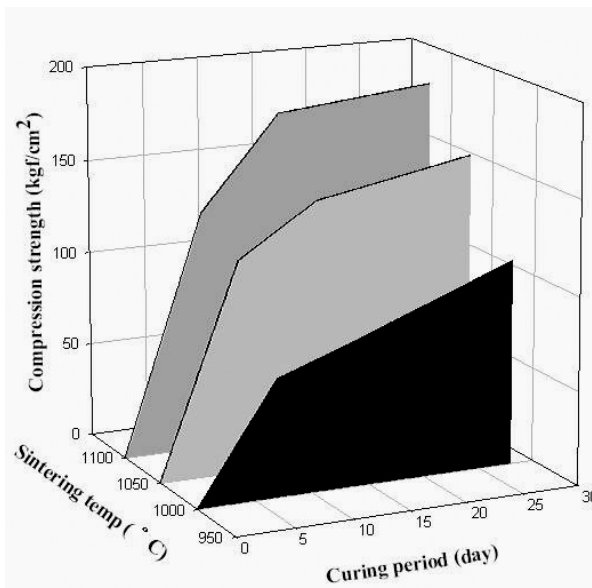


圖 5 不同燒結溫度製備人造骨材混凝土強度齡期發展

#### (五)淨水污泥再利用於管溝回填料

管溝回填料係指管線工程開挖後管溝周圍之回填料，包括覆於管線外圍之回填料、碎石級配料與控制性低強度回填料（Control Low Strength Materials, CLSM）等。控制性低強度材料（CLSM）為一種具備自我充填，28 天抗壓強度不超過 1200 psi（約 84 kg/cm<sup>2</sup>）之混凝土材料，以膠結料、水、砂及石，且兼具未來可以人工或機具方式再開挖的低強度水泥質材料，其組成材料與混凝土相類似，但對於組成材料的要求，卻無製造混凝土材料的嚴苛規定，因此除了使用砂石作為 CLSM 材料外，亦可使用如水泥窯灰及焚化灰、焚化底灰、廢鑄砂與廢玻璃等作為替代材料使用。

康與劉<sup>[6]</sup>曾探討以直潭淨水場淨水污泥作為管溝回填料以及 CLSM 替代材料之可行性，研究指出淨水污泥不論是粒徑分佈、阿太保液性限度與塑性限度試驗、含砂當量、加州承載比與 96 小時浸水膨脹率，皆不符

合台灣自來水公司自來水埋設工程施工說明書中對於回填料使用之規範要求，也確認淨水污泥無法直接作為管溝回填料。該研究亦參考日本大阪市庭瀆淨水場以及橫濱市小雀淨水場生產改良土之方式，以水泥及天然河砂作為改良材料，經過簡易拌混改質後養生 7 至 14 天即成淨水污泥改良土，其在粒徑分佈上經篩除較大顆粒後可符合規範，且含砂當量、加州承載比以及膨脹率大致可符合台灣自來水公司自來水埋設工程施工說明書之規範；該改良土經養護七日後替代骨材中細粒料使用，再加入天然砂與水泥共同拌製一般型與早強型 CLSM，其添加在工作性的表現上有正面幫助。CLSM 材料隨淨水污泥替代比例提高雖可提升材料自充填性，但亦造成延長初凝時間且降低抗壓強度發展之不利影響。以台北市政府工務局養護工程處訂定之 CLSM 材料規範，CLSM 之初凝時間需於 210 分鐘以下，12 小時之試體單軸抗壓強度需達 9 kgf/cm<sup>2</sup> 以上，對照表 3 可發現淨水污泥添加對於 CLSM 材料將會造成不利的影響，且 6% 之淨水污泥替代比率為可符合規範之最大添加量，但亦使 CLSM 材料品質大幅降低。該研究 28 天單軸抗壓強度為 4.6~25 kgf/cm<sup>2</sup>，與吳<sup>[7]</sup>的 28 天單軸抗壓強度研究結果 0.8-14 kg/cm<sup>2</sup> 接近。

交通大學研究團隊亦曾以新竹給水廠產生之淨水污泥，與河砂及水泥拌製 CLSM 試體，發現淨水污泥直接施用於 CLSM 的拌製有嚴重不利的影響，淨水污泥的添加可能因凝膠羽以及高黏土含量而使 CLSM 材料變的更加黏稠，在坍度以及流度的工作性表現上有嚴重負面影響。且淨水污泥以細粒料替代量 30% 添加，經過 14 天後進行單軸抗

壓試驗用的圓柱試體仍未硬固，且無法通過可繼續施工之落沉試驗，因此確認淨水污泥無法直接施用於 CLSM 的拌製。

而以某管線更換工程之開挖土石方與淨水污泥共同試拌 CLSM 發現，開挖土石方單獨使用即具有良好之自充填性與強度發展，其於 28 天抗壓強度發展恰剛好達到具有足夠強度及再開挖性之 21kgf/cm<sup>2</sup>(300 psi) 強度，可作為 CLSM 之材料。但混合淨水污泥後將隨添加量提升而延緩混凝土抗壓試體初凝時間，且會降低單軸抗壓強度之發展，與前人研究相符。

表 3 淨水污泥添加比例對初凝時間與強度發展影響<sup>[6]</sup>

CLSM 初凝時間(min)		CLSM 抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )			
污泥添加比例	細粒料率(S/A)		12 小時	7 天	28 天
	0.8	1.0			
0%	185	195	13.5	67	86.6
3%	195	210	11.5	61.6	79.3
6%	210	240	9.3	59	74.3
9%	240	285	7.5	55.6	67.3
20%	300	360	4.3	45	59.3

#### (六)回收混凝劑再利用於廢水及污泥處理

淨水污泥中由於其殘餘大量氫氧化鋁膠羽，而在廢水處理上有許多應用。如其可透過酸化、鹼處理、液態離子交換法等化學處理回收混凝劑，Bustamante & Waite<sup>[8]</sup> 研究發現鋁鹽污泥回收之混凝劑可有效將廢水中磷濃度自 9 mg/L 降至 1 mg/L。又淨水污泥中含豐沛的無定形結晶鋁或鐵離子，其被證實可促進吸附與沉澱，藉以固化污染物，尤其是磷，達到去除之功效，而可直接添加到污水處理系統，利用其中所含豐富殘餘混凝

劑作為廢水處理之混凝劑或吸附劑使用；亦可用以調理污水污泥以提升沉澱速度與脫水性，Lai & Liu<sup>[9]</sup>發現活性污泥在添加硫酸鋁淨水污泥後，將可作為 skeleton builder 使混合污泥結構更為堅固，使混合污泥更不可壓縮並表現出更好的脫水效率，其脫水性與沉降性均可獲得提升，且對於陽性聚電解質的添加劑量需求亦減少，而具有經濟效益，Owen<sup>[10]</sup>更指出英國有 24.6%淨水污泥是以排放至污水處理廠與污水污泥共同排放作為最終處置方式。

此外，淨水污泥由於富含可作為污水中污染物吸附劑的鐵、鋁以及鈣等殘留物，而被探討作為溼地構成介質的可能性。Leader<sup>[11]</sup>即證實以石灰及鐵鹽淨水污泥分別作為溼地構成介質，皆可有效去除生活污水與都市廢水中的污染物；愛爾蘭曾有多位學者進行以硫酸鋁污泥作為溼地構成介質之可行性進行探討，而發現其具有穩定的污染物去除效率，尤其是磷的去除<sup>[12]</sup>。

#### 四、淨水污泥資源化再利用綜合可行性評估

本節將就淨水污泥再利用方式如培養土、作為管溝回填材料、水泥原料替代、燒結紅磚、燒結輕質骨材粒料、與直接或間接應用於廢水處理等用途，由產業現況進行市場需求與經濟效益進行探討，以及就各用途進行產品生產技術門檻、現行法規規範等成本面向考量，進行綜合可行性評估，期能提供自來水事業單位之參考。

國內生產袋裝培養土之廠商與產品種類眾多，實際需求較無法確切考證。而以關稅總局資料顯示，96 年度共進口 7,146 公噸

經調配之植物生長介質，其中主要進口國家為荷蘭、德國、芬蘭、中國與越南等，總價值約為 3,600 萬元。以下記錄本研究與國內培養土生產廠商與園藝種苗行訪談的結果，其中新竹某實業公司負責人表示該公司生產之「新培養土」產品每個月約可銷售一萬至兩萬包，約 120 噸至 240 噸間，推估該公司一年銷售量約 1440 至 2880 噸；台北某園藝社生產之培養土多供應北部地區景觀工程覆土需求，96 年八月之單月出貨量為 3,000 立方米，因此可推估該園藝社一年銷售量約略為兩萬立方米以上，且公共工程如公園、景觀工程均會有大量景觀覆土需求。因此就市場需求而言，袋裝培養土進口量僅 7,146 公噸，其市場應無法完全胃納每年產生之 16 萬公噸淨水污泥，僅可作為部分淨水污泥再利用之用途。作為景觀覆土使用，依據都市計畫法第 45 條規定，公園、體育場所、綠地、廣場及兒童遊樂場，除具有特殊情形外，其占用土地面積不得少於全部都市計畫面積之 10%。依據內政部營建署民國 95 年營建統計年報，95 年底全國都市計畫面積為 47 萬 113 公頃，而公園用地僅佔 11,395 公頃，與綠地、廣場、兒童遊樂場及體育場等面積加總共計 15,565 公頃，僅占全國都市計畫面積之 3.3%，較 10% 規定尚不足 6.7%，可預見未來公園與綠地面積將因逐年擴建而提升，亦將提供更多之景觀覆土市場需求。

管線開挖工程為避免影響交通，而大多於深夜施工，早上七點恢復交通通行，因此施工期間數小時內必須完成路面切割、管溝開挖、更換管線、回填 CLSM 並等待強度發展至通過落沉試驗，方可繼續後續道路回鋪

工作，因此 CLSM 材料之選擇除自充填性外，初凝時間與強度發展亦為極重要之考量。以康之研究結果而言，淨水污泥無法直接作為 CLSM 材料，而需以水泥與砂進行固化改良，替代比例達 6% 時雖可符合台北市政府規範，但亦使原先材料初凝時間延緩 60 分鐘，並使 12 小時試體單軸抗壓強度折減 31%，在使用上仍多為負面影響，使 CLSM 成為次級品，與可直接使用之焚化底渣、爐石或開挖廢棄土石方相較，恐將不為具有市場競爭力之 CLSM 產品。

淨水污泥作為水泥原料為經濟部公告再利用事業廢棄物再利用第三十九項之管制方式，因此淨水污泥再利用於水泥與 CLSM 上符合法規規定。實務生產上，淨水污泥可替代黏土使用，製造一公噸波特蘭水泥約需要黏土 220 公斤。根據台灣水泥公司 96 年年報指出，水泥同業公會統計 96 年度會員公司於國內計生產水泥 1,896 萬公噸，而全年之國內水泥消耗量為 1,353 萬公噸，平均每人每年水泥消耗量為 590 公斤，因此若水泥產業均使用 1% 之淨水污泥作為黏土替代原料，則自來水公司與北水處每年產生之 16 萬公噸淨水污泥將可完全消耗，為具有足夠胃納市場之淨水污泥再利用方式。

淨水污泥可經燒結製造紅磚或輕質骨材。磚瓦產品曾是傳統建築物之主要建材，但隨著近年來製磚原料礦產量降低以及國內營造產業逐漸轉為鋼筋混凝土與鋼結構為主之產業型態，使紅磚需求大量減少，國內許多磚窯業者已被迫減產，或將生產線外移，磚窯產業逐漸蕭條。根據經濟部統計處資料顯示，國內紅磚生產全數為內銷使用，尚無外銷。以 95 年生產銷售量為基準，一

共銷售 1,430,682 千塊紅磚，銷售產值為 2,102,765 千元，平均一塊紅磚價格為 1.47 元，紅磚的市場價格會因地區而有不同售價，一般而言南部價格較中部地區高，而中部又比北部地區價格更高，根據市場訪價結果，於小盤零售商購置紅磚價格則為 3 元至 4 元不等。國內近七年紅磚生產銷售量 91 年下滑至近十億塊，近兩年則逐漸回復至 89 年十五億塊左右生產數量，約為 177 萬立方米，以龜山某磚窯廠 35% 之淨水污泥摻用比例計亦可完全消耗全國淨水污泥。

國內目前輕質骨材一年消耗量約為 10 萬立方米，而其產品售價約為 3,000 元/m<sup>3</sup> (不含運費)，因此推估輕質骨材產業全年產值目前約為三億元。但如以 Riley 三相圖進行淨水污泥產製輕質骨材可行性評估，由於淨水污泥之化學組成成分與原水水質有極大關係，僅部分淨水場產生污泥具有生產輕質骨材潛力，且其成分組成、燒結品質與市場經濟規模可能並不如石門水庫清淤底泥適合作為輕質骨材生產原料，而較不具有市場競爭力，如再考量燒結生產成本亦較天然骨材為高，因此此種再利用方式於天然骨材及輕質骨材市場上均可能無法成為具有商業競爭力之再利用方式，近年亦無廠商以淨水污泥實廠生產骨材販售。

淨水污泥再利用於廢水處理上，目前國內仍處於實驗室試驗階段，尚無實廠進行大規模應用。Petruzelli<sup>[13]</sup>指出自淨水場污泥回收之混凝劑可能不適用於飲用水處理上，且 Stendahl<sup>[14]</sup>提到每噸淨水污泥之總回收成本約為 371 美元(約合新台幣 11,000 元)，Horth<sup>[15]</sup>更進一步指出淨水污泥回收混凝劑另外一個潛在問題則為污泥酸化回收過

程中，積聚的重金屬可能成為除了溶出之鐵鋁外的額外回收產物，導致污染回收混凝劑；此外，由於環保署對於飲用水處理藥劑訂有嚴格管制標準，淨水污泥混凝劑回收恐無法符合相關規範；在經濟性、混凝劑純度以及重金屬疑慮下，都窄化了淨水污泥回收混凝劑的應用性。而排入污水處理系統或利用其殘餘之混凝膠羽作為廢水處理之混凝劑或吸附劑使用，以及混合活性污泥作為污泥調理劑使用，在英國已為成熟之再利用技術。英國 24.6% 淨水污泥以管線排放至污水處理系統中與污水共同處置，4.2% 淨水污泥以車輛運輸送至污水處理廠。依據英國將淨水污泥排放至污水處理系統共同處置之經驗，英國淨水污泥平均處理成本為 41.1 英鎊(約合新台幣 2,000 元)，且排放至污水處理系統需先經污水處理廠同意，但以管線排放至污水處理系統則不需支付任何費用；但若以車輛運輸至污水處理廠進行處置，則每公噸淨水污泥平均處理成本將提高至 161.7 英鎊(約合新台幣 8,000 元)，且淨水場周圍是否有意願接收淨水污泥之污水處理廠即成為此種處置方式最大考量因子<sup>[16]</sup>。我國目前尚無淨水場以淨水污泥排入污水下水道系統作為最終處置方式，且環境保護署目前逐漸推動廢棄物零排放，污水污泥未來也將逐年提高再利用比率，因此是否將淨水污泥排入污水處理系統與污水共同處置仍需邀集學者專家更進一步討論。

人工溼地為近年來行政院公共工程委員會大力推動之新興生活污水處理方式，除淨水功能外亦可提供民眾休閒遊憩場所，更兼具有教育意義。淨水污泥可作為人工溼地建構之介質，其可作為植物生長介質，亦可

過濾或吸附去除污水水體中 SS、BOD 與磷。但由於台灣地狹人稠，人工溼地僅可利用河堤外高灘地或疏洪道地區進行構建，且每當颱風來臨時極易遭受破壞，且維護不易，因此作為人工溼地建構介質用途僅可作為示範場址或學術試驗之少需求量之再利用方式。

## 五、結語

淨水污泥再利用於 CLSM 與輕質骨材均無法作為具有市場競爭力之產品，而在政策與經濟性考量下，回收淨水污泥中殘餘混凝劑或將淨水污泥與污水污泥共同處理可行性亦不高，加上台灣地狹人稠，亦無大量土地以構建人工溼地，因此，再利用於水泥、紅磚與土地施用用途，則為可行性最高之再利用方式。

台灣每年約 16 萬公噸淨水污泥產生量，以我國消費量而言，水泥每年約消耗 1,350 萬噸，紅磚 14 億塊，均為可完全胃納產生之淨水污泥之再利用方式；作為景觀覆土及培養土雖市場無法完全胃納，但仍為可行之處理方式，此三種再利用方式與現行再利用現況相符，惟台水與北水處每年均需給付再利用業者代處理費用。以台水為例，民國 90 年度給付予專業代處理廠商進行再利用之總費用為 7,611 萬元，至 96 年度更高達過 11,800 萬元，此逐年提升之淨水污泥再利用代處理費用支出更增添台水財政負擔。

淨水污泥經添加調整材料後即可成為培養土或景觀工程覆土，與水泥及紅磚產業相較為技術難度與投資成本門檻較低之再利用方式，若台水公司及北水處可自資將淨水污泥資源化再利用生產培養土或景觀工程覆土，將可有效降低支出之代處理費，產

品可用於自辦自來水工程綠化覆土或用於淨水場內部綠化使用，以增加綠色內涵；此外，由於台水部份淨水場因位置偏遠或淨水污泥產量較少而遭遇淨水污泥無廠商參與投標或代處理單價高昂之困境，如能適度將淨水污泥予以資源化再利用於生產培養土或景觀工程覆土，用於自辦工程或分送鄰近居民敦親睦鄰，剩餘無法處置之淨水污泥，再行招標委託水泥廠或磚窯業者進行再利用，則應可達到改善營運績效、並解決偏遠地區淨水場淨水污泥處置問題，進而成為循環型社會之一環，減緩地球暖化，塑造良好企業形象，以達到邁向綠色水廠之目標。

## 六、誌謝

本研究經費主要來自台灣自來水公司，在此表示感謝。

## 參考文獻

1. Cihpin Huang, Jill Ruhsing Pan, and S. Lin "Reuse of Fresh Water Sludge in Cement Making", Water Science and Technology, 2004.
2. Cihpin Huang, Jill Ruhsing Pan and K. D. Sun "Reuse of Water Treatment Plant Sludge and Dam Sediment in Brick-Making", Water Science and Technology, 44:10, 2001.
3. Cihpin Huang, Jill Ruhsing Pan, and Yaorey Liu, "Mixing Water Treatment Residual with Excavation Waste Soil in Brick and Artificial Aggregate-Making " Jour. of Environmental Engineering, ASCE, 2004.
4. Riley, C.M., "Relation of chemical properties to the bloating of clays", ACI Journal, Vol.34, No.4, pp.121-128, 1951.
5. 顏聰、黃兆龍，"水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣-分項計畫一：水庫

- 淤泥輕質骨材量產技術研究”，中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會，2003
- 6.康世芳、劉明仁，“淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水廠可行性評估”，期末報告，台北市自來水事業處，2001
- 7.吳平其，“控制性低強度混凝土配比試驗計畫”，台灣自來水公司南區工程處
- 8.Bustamante, H.A., and Waite, T.D. Innovative techniques for the handling and reuse of water treatment plant sludges, *Water Supply* 13(3-4), 233-238,1995.
- 9.Lai, J.Y., and Liu, J.C.(2004) “Co-conditioning and dewatering of alum sludge and waste activated sludge”, *Water Sci. Technol.* 50(9), 41-48, 2004
- 10.Owen, P.G.(2002) “Water-treatment work’s sludge management”, *J. CIWEM.* 16, 282-285,
- 11.Leader, J.W., Reddy, K.R., and Wilkie, A.C. Optimization of low-cost phosphorus removal from wastewater using co-treatments with constructed wetlands, *Water Sci. Technol.* 51(9), 283-290, 2005.
- 12.Babatunde, A., Yang, Y., and Zhao, Y. Towards the development of a novel wastewater treatment system incorporating drinking water residual: Preliminary results, In: *Proceedings of the 10th European Conference on Biowastes and Biosolids Management*, Yorkshire, UK, 2005.
- 13.Petruzelli, D., Volpe, A., Limoni, N., and Passino, R. Coagulants removal and recovery from water clarifier sludge, *Water Res.* 34(7), 2177-2182, 2000.
- 14.K. Stendahl, C. Faßmann, I. Fritzdorf and H. Ulmert (2006) "The REAL process – a process for recycling sludge from water works", *Water Science & Technology* Vol 54 No 5 pp 235-242
15. Horth, H., Gendebien, A., Agg, R., and Cartwright, N. Treatment and disposal of waterworks sludge in selected European countries, In: *Foundation for Water Research technical reports no.0428*, 1994.
16. Simpson, A., Burgess, P., and Coleman, S.J., "The Management of Potable Water Treatment Sludge: Present Situation in the UK", *J.CIWEN*, 206-263, 2002.

### 作者簡介

#### 王靜逸 先生

現職：中興工程顧問公司 環工一部 工程師

專長：自來水系統工程規劃設計

#### 袁如馨 教授

現職：國立交通大學生物科技系 教授

專長：環境生物科技

#### 吳美惠 處長

現職：台灣自來水公司水質處 處長

專長：水質管理

# 淨水污泥產製輕質骨材之可行性研究

文/王順元、陳豪吉、顏聰、黃中和、林正隆、洪世政、吳美惠

## 摘要

本文探討將臺灣自來水公司淨水場之淨水污泥，再製成輕質骨材的可行性。研究上，以 10 座淨水場的淨水污泥為樣本，先檢測其物理性質、化學及礦物成分等，之後進行實驗室內的輕質骨材燒製試驗，以及大型旋窯的輕質骨材量產試驗。最後，依據各項研究結果，評估淨水污泥產製輕質骨材之可行性。

在原料特性上，研究結果顯示，10 座淨水場污泥均為良好之輕質骨材製作原料。淨水污泥之顆粒粒徑細緻且具可塑性，適於造粒型輕質骨材之工藝製作。再者，污泥化學成分皆在 C.M. Rilcy 適宜熔液黏度範圍內，且含有綠泥石、伊利石及長石等適合燒製輕質骨材的礦物成分。

由實驗室的試燒分析可知，新山、板新、平鎮、豐原及南化等 5 場淨水污泥，其燒製成輕質骨材的可達顆粒密度範圍較大 ( $0.6 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ )，而適合以製造結構或非結構用之輕質骨材。新竹、林內、坪頂、拷潭及澄清湖等 5 場淨水污泥，其可達顆粒密度範圍較小且偏高 ( $1.2 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ )，則適於製造結構用輕質骨材。

量產試驗部分，本文選用新竹場淨水污泥進行旋窯製程之輕質骨材試生產，成功產製“結構用”及“非結構用”等兩類輕質骨材。輕質骨材產品的檢測結果顯示，於乾鬆單位重、有機不潔物及燒失量等項，皆能滿足 CNS 國家標準要求；而顆粒密度、吸水

率及筒壓強度，也能滿足一般商業規格。再者，於重金屬總量檢測及戴奧辛濃度等含量，皆滿足行政院環保署之土壤污染管制標準。故可總結出，本文研發之淨水污泥輕質骨材，為一具有高安定化及無害化的建築材料。

關鍵字：淨水污泥、輕質骨材、量產試驗

## 一、前言

淨水污泥為淨水處理過程中，經濃縮、沉澱、加藥混凝及機械壓濾後等工序產生之泥餅，屬於政府公告之「一般事業廢棄物」。根據，臺灣自來水公司及台北自來水事業處統計，國內之淨水污泥年總產量約在 25 萬公噸左右，其中臺灣自來水公司為最大宗，常年產量約在 18-20 萬公噸間<sup>[1]</sup>。

由於淨水污泥屬於公告之事業廢棄物不得隨意棄置，因此國內淨水場對於淨水污泥的處置，主要以提供業者進行再利用居多，小部分則逕行掩埋處理。而再利用方式中，以提供作為水泥原料、製磚及栽培土為主。

近年來，由於國內重大工程建設陸續完成，加以天然資源如粘土及頁岩等之取得不易，致使水泥及磚瓦等產業日趨萎縮，上揭業者對於淨水污泥之需求因而日益減少。另一方面，以往淨水污泥之處置費用較為低廉，相關之再利用或減量技術並未受到業界重視。因此如何有效去化淨水污泥並提升其再利用價值，成為臺灣自來水公司刻不容緩之要務。

臺灣位處環太平洋地震帶上，地震發生的頻率相當頻繁，除主體結構必須強調強度高且自重輕之外，對於非結構性構造物之自重減輕要求也相對提高。惟一般以普通混凝土所製作的結構性及非結構性混凝土構件或圬工單元製品，已漸無法滿足現今高層建築的耐震設計需求。因此，從生態環境維護及社會總體經濟效益面來看，積極開發質輕、耐震、隔熱、節能的新建材以取代傳統的建材，實扮演著相當關鍵的角色。

輕質骨材符合綠建材之定義，可視為一種生態（或再生、高性能）綠建材，先進國家對其產製技術已發展得相當成熟，可生產各種粒徑及各級顆粒密度的輕質骨材，以供產業界應用於製造各種輕質骨材混凝土（lightweight aggregate concrete）製品。這種輕質骨材混凝土，應用在結構性用途與非結構性用途上，可擁有諸多優點。

基本上，淨水污泥成分組成中含有大量自然界常見之矽、鋁、鐵、鈣等氧化物，即其化學成分與水庫淤泥相似，故具有製作輕質骨材之潛力。國內外已有學者專家利用燒製技術處理淨水污泥之先例，並印證其應用具有良好的成效<sup>[2-8]</sup>。

綜上所述，臺灣地區自然資源缺乏且廢棄物處置地日益難覓，淨水污泥應優先予以資源化利用，如此不僅可將之轉變為另一種資源，亦可降低國內環境的負荷。本研究即旨在針對淨水污泥進行輕質骨材研製之可行性探討，期能協助解決臺灣自來水公司淨水污泥之處置及再利用，最終希望將此環保新材料之研究成果，提供有關事業廢棄物主管單位參考。

## 二、實驗材料與方法

### (一)淨水污泥之採樣與基本性質分析

本研究從臺灣北、中、南等 3 區，選擇淨水污泥產出量較大之 10 座淨水場進行採樣，包括新山、板新、平鎮、新竹、豐原、林內、南化、坪頂、拷潭及澄清湖等，並個別進行基本性質之分析與調查。基本性質分析項目，包含灼燒減量試驗、顆粒粒徑分析、可塑性、礦物成分、比重分析、化學成分及三成分等。

### (二)實驗室輕質骨材試製

淨水污泥輕質骨材的燒製，先於實驗室內進行試燒，之後將技術轉移到量產工廠之生產上。實驗室之試燒，主要在測定各淨水污泥可製成輕質骨材之膨脹溫度區間及可達顆粒密度範圍，以供爾後商業燒製與量產之參考。

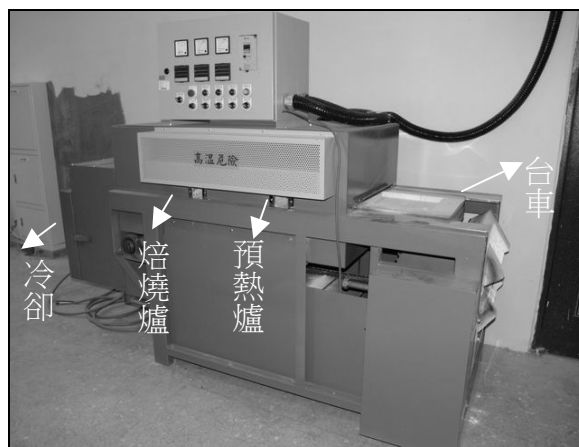


圖 1 兩段式輕質骨材燒成爐

另外，為模擬現行量產旋窯的燒製條件，於本研究中採用中興大學自行開發之輕質骨材燒成爐（圖 1），以兩段式快速升溫法進行試驗。燒製方式是將烘乾後的雛粒，直接置於已達設定溫度的預熱爐內進行預熱處理；待達成設定的加熱要求後，再控制台

車將其輸送至焙燒爐進行焙燒處理；燒成後，再送入冷卻室徐徐冷卻，即得試製樣品。

以下分述各工作之方法及內容：

1. 雜粒製作：以塑性造粒法製粒，將均化處理後之物料加入不等量的水進行拌和，拌和水的計量是以物料可具塑性造粒為準。拌和後的含水物料，以造粒機擠製成圓柱泥條，再由人工切割成直徑約 10 mm 及長度約 12 mm 的雜粒(圖 2)，並烘乾至衡重，此為試燒用雜粒。
2. 第一階段試燒—測定膨脹溫度區間及軟化溫度：燒製條件為固定預熱溫度 500°C 及固定預熱時間 10 分鐘；變化焙燒溫度 1000°C~1250°C 間及固定焙燒時間 10 分鐘。
3. 第二階段試燒—測定可達顆粒密度範圍：燒製條件為固定預熱溫度 500°C；變化預熱時間 7.5、15 分鐘；固定焙燒溫度（視各物料的軟化溫度而定）；變化焙燒時間 7.5、15 分鐘。



圖 2 雜粒

### (三)量產可行性評估

使用國內某家輕質骨材製造廠之旋窯，進行量產可行性評估。試驗目標為產製結構用及非結構用等兩類淨水污泥輕質骨材。量產試驗方式及流程如下（作業流程如圖 3 所示）：



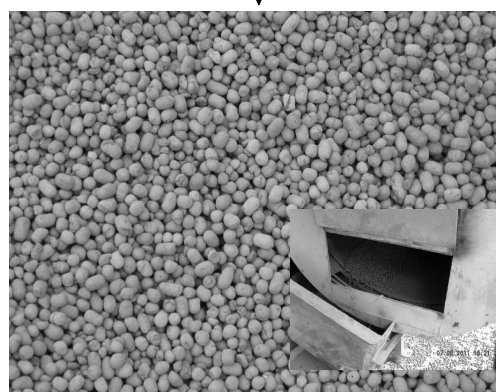
供料機供料及粗碎



混練及造粒



旋窯燒製



產品冷卻

圖 3 量產試驗作業流程

1. 供料處理：以刮運機將淨水污泥送至定量供料機中，利用其附屬之破碎機進行粗碎混合；本處理過程為連續投料。
2. 混練及造粒：經粗碎混合後之淨水污泥，以螺旋輸送帶送至混練機，進行均勻攪拌及混練（經 2 次混練機工序），以提高物料之均勻度及緻密度。經上述調製完成之物料即送入造粒機，擠壓造粒成大小、規格一致的雛粒（粒徑約 12 mm）。
3. 燒成：將雛粒經輸送帶送入旋窯內，燒成後即為輕質骨材成品。旋窯為可作 360 度旋轉之長圓柱形筒體，原料從入口進料至燒製完成須經過預熱區段及焙燒區段，其長度約各佔窯體二分之一。對於兩個區段的製程再說明如下：預熱段主要是烘乾雛粒，溫度約為 200°C~800°C，樣品滯留時間一般為 25-20 分鐘；焙燒區段之溫度則為 1,000°C~1,300°C，主要是提供較高溫度以燒脹雛粒，樣品滯留時間為 20-30 分鐘，其實際滯留時間，則可視產品及原料之特性調整，並由旋窯轉速進行控制。
4. 本次試驗中，燒製結構用輕質骨材的全部製程時間約 45 分鐘；燒製非結構用輕質骨材之製程時間約 40 分鐘。根據現場操作結果，燒製結構用之輕質骨材，需使用轉速較慢之預熱段（3rpm）及焙燒段（1.5 rpm），並採用較低之焙燒段溫度約 890°C（此為焙燒段末段測溫計顯示值，實際最高溫度約為 1,190°C）。而燒製非結構性輕質骨材，則需採用轉速較快的預熱段（3.5 rpm）及焙燒段（2 rpm），且焙燒段溫度較高，約為 920°C（實際溫度約為 1,220°C）。
5. 冷卻包裝：高溫燒成的淨水污泥輕質骨

材，經由冷卻窯利用鼓風機降溫，並進行包裝。

另為確保以淨水污泥製作之輕質骨材應用於工程實務上時，能符合相關規範要求，亦對其進行相關之產品性質檢測，包括顆粒密度、吸水率、鬆單位重、筒壓強度、有害物質、毒性特性溶出程序試驗（含王水消化）、氯化戴奧辛（PCDDs）及呋喃（PCDFs）同源物之濃度等。

### 三、淨水污泥之基本性質結果

#### （一）物理性質

淨水污泥之物理性質試驗，主要進行粒徑分析、土壤分類、可塑性及比重測驗。其中，粒徑分析分兩次取樣，各為枯水期（99 年 11 月）及豐水期（100 年 8 月）。10 種淨水污泥原料的顆粒粒徑分析結果如表 1 所示。由表列資料之中位粒徑分析可知，各淨水場污泥在豐水期時之污泥粒徑皆大於枯水期者，顯示於豐水期因進廠之源水濁度較高，致污泥之顆粒粒徑亦較大。另豐水期時，以平鎮淨水廠之污泥顆粒粒徑較大，其中位粒徑達 0.014 mm（定義為 50% 以上的顆粒粒徑小於 0.014 mm），而新山場污泥於枯水期時有最小之中位粒徑 0.002 mm。

就統一土壤分類而言，10 座淨水污泥試樣基本上皆屬粉土或粘土質沉積物（粒徑  $\leq$  0.075 mm 之成份佔總量 85% 以上），適於作為輕質骨材的粉狀原料。由於各場污泥粒徑細緻，材料本身具有較佳之分散度及均勻性，預期在高溫下可有較理想的燒製成效。再者，原料粒徑細緻的特質，除易於混和配料外，所製得之雛粒強度亦高，可使燒製而成之骨材，具有較好的內部孔隙結構及顆粒



強度。此外，原料的可塑性對於糝料製作有很大影響；一般要求，原料的塑性指數 (P.I.) 應大於 7 為宜。而 10 座淨水污泥，皆能滿足塑性造粒之要求。各場淨水污泥的比重約介於 2.6~2.75 間，與一般土壤的比重相近。

表 1 淨水污泥之物理性質

試樣	比重	塑性指數 P.I. (%)	中位粒徑 D50 (mm)		成分 (% wt.)							
					礫石		砂土		粉土		粘土	
					> 4.75 mm		4.75 mm - 0.075 mm		0.075 mm - 0.005 mm		< 0.005 mm	
					豐水期	枯水期	豐水期	枯水期	豐水期	枯水期	豐水期	枯水期
新山淨水場	2.60	9	0.009	0.002	0	0	9	1	58	25	33	74
板新淨水場	2.62	10	0.007	0.005	0	0	6	1	52	46	42	53
平鎮淨水廠	2.75	13	0.014	0.003	0	0	2	3	67	30	31	67
新竹淨水場	2.69	17	0.006	0.005	0	0	3	2	49	53	48	55
豐原淨水場	2.60	13	0.010	0.009	0	0	12	3	56	68	32	29
林內淨水場	2.75	11	0.005	0.004	0	0	1	1	38	47	61	52
南化淨水場	2.63	13	0.010	0.004	0	0	1	4	65	38	34	58
坪頂淨水場	2.7	27	0.008	0.007	0	0	4	2	78	68	18	30
拷潭淨水場	2.64	26	0.007	0.003	0	0	5	1	55	31	40	68
澄清湖淨水場	2.63	14	0.011	0.008	0	0	8	3	75	58	17	39

## (二)化學成分

10 座淨水場的淨水污泥化學成分分析結果如表 2 所示。各淨水場之污泥可燃分約在 4%~14% 間，揮發性固體量約在 3%~13% 間，都屬於環保署公告之 D-0902 無機性污泥（揮發性固體量需低於 30%）。

表 2 淨水污泥之化學成分

原樣名稱	檢測項目	單位	檢測值									
			新山淨水場	板新淨水場	平鎮淨水場	新竹淨水場	豐原淨水場	林內淨水場	南化淨水場	坪頂淨水場	拷潭淨水場	澄清湖淨水場
	水分	%	63.8	62.2	56.2	45.6	58.4	44.8	58.8	28.6	28.7	58.3
	灰分	%	28.2	26	36.8	46.6	30.8	51	30.9	67.6	58.3	30.7
	可燃分	%	8.04	11.9	6.96	7.75	10.8	4.26	10.4	3.77	13	11
	合計	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Na <sub>2</sub> O	%	0.17	0.12	0.31	0.10	0.08	0.14	0.14	1.99	0.15	0.27
	MgO	%	1.06	1.73	3.15	1.78	1.10	2.53	2.47	3.40	4.15	2.51
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	21.2	22.2	20.6	23.0	22.0	20.6	21.4	23.0	22.4	19.6
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	10.4	10.7	8.32	8.15	11.0	7.00	11.0	11.3	4.91	9.6
	K <sub>2</sub> O	%	0.79	0.83	2.08	1.55	0.79	0.86	1.42	1.14	1.03	1.10
	CaO	%	2.05	0.72	1.64	1.35	2.62	1.82	1.22	4.26	1.72	2.91
	SO <sub>3</sub>	%	0.09	0.17	0.17	0.05	0.11	0.16	0.14	0.08	0.10	0.39
	SiO <sub>2</sub>	%	64.3	63.6	63.8	64.0	62.3	66.9	62.3	54.8	65.6	63.7
	合計	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	揮發性固體量	%	7.84	11.2	6.78	7.41	9.53	4.24	10.3	3.45	12.9	11

備註：灼燒減量試驗，以可燃分計；組成分析為含水率、灰分及可燃分等三成分分析

由表 2 可知，10 個淨水場污泥的化學成分大致上相似，其中，主體成分為  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  約佔 8 成 (77%~88%)，另含高量的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4.9%~11.3%)，少量的鹼土屬助熔物 ( $\text{CaO}+\text{MgO}$ )，約 2.5~7.7%，微量的鹼金屬助熔物 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )  $\leq 3.13\%$  及硫化物 ( $\text{SO}_3$ )  $\leq 0.39\%$ 。

對於淨水污泥是否適合燒製成輕質骨材，可利用 C.M.Riley 建議之適宜熔液黏度化學成分三相圖進行初步評估，其分析結果如圖 4 所示。各場污泥之化學成分落點皆在 Riley 之三相圖上合適範圍內，因此當雛粒形成液相時，若有足量的氣體產生，應可於溫度  $1300^\circ\text{C}$  內，促使雛粒形成發泡膨脹的效果。綜合上述分析與討論可初步認定，以 10 座淨水污泥試樣進行輕質骨材燒製應能達成目的；而且因淨水污泥的粒徑細緻，預期於燒製時可有較佳的熱效率。

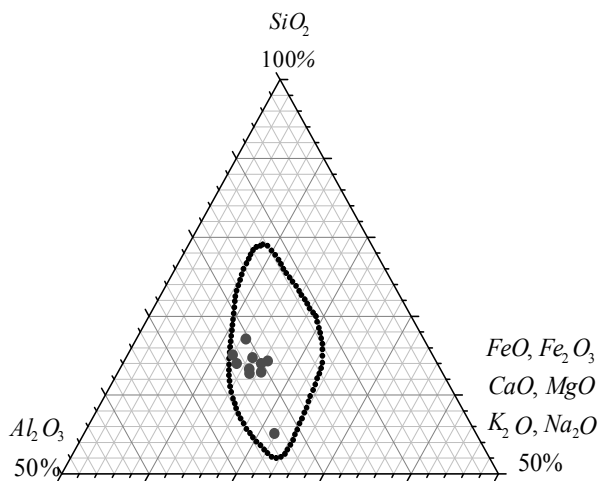


圖 4 試驗用淨水污泥化學成分三相圖落點

### (三)礦物成分

表 3 及圖 5 (新山場污泥試驗結果) 為 10 座淨水污泥試樣的礦物成分組成。由表中觀察可知，所有樣本皆含有石英 (Quartz) 的成分，以及含有綠泥石 (Chlorite)、伊利

石 (Illite)、長石 (Feldspar) 等粘土礦物成分。以上結果顯示兩個特點，一為台灣西部淨水污泥之礦物成分大致相同，二為淨水污泥具有燒製輕質骨材的潛力，因為通常用於燒製輕質骨材的膨脹性粘土 (Expanded clay)、膨脹性頁岩 (Expanded shale) 都是含有綠泥石、伊利石及長石等粘土礦物。

## 四、實驗室輕質骨材試製

### (一)第一階段試燒

表 3 淨水污泥礦物成分

試樣	石英 (Quartz)	綠泥石 (Chlorite)	伊利石 (Illite)	長石 (Feldspar)
新山場	✓	✓	✓	✓
板新場	✓	✓	✓	✓
平鎮場	✓	✓	✓	✓
新竹場	✓	✓	✓	✓
豐原場	✓	✓	✓	✓
林內場	✓	✓	✓	✓
南化場	✓	✓	✓	✓
坪頂場	✓	✓	✓	✓
拷潭場	✓	✓	✓	✓
澄清湖場	✓	✓	✓	✓

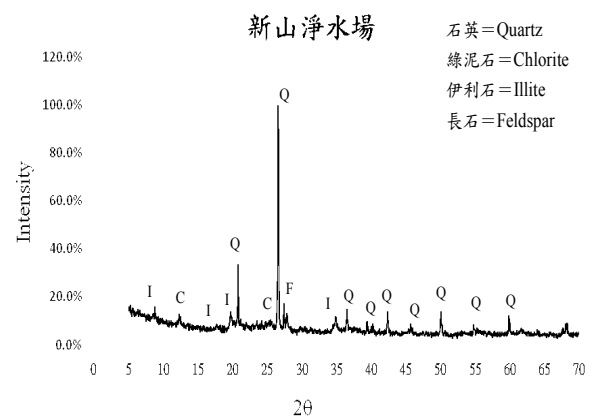


圖 5 淨水污泥 XRD 分析圖譜

第一階段試燒主要在研判燒製輕質骨材之可行性，並測定膨脹溫度區間及軟化溫度。經逐一試燒污泥試樣後，初步確定 10 場污泥皆可燒成輕質骨材。由表 4 之結果可知，10 場淨水污泥都適合作為輕質骨材用之原料，製成之骨材顆粒密度皆小於 1.8 g/cm<sup>3</sup>，涵蓋在合乎輕質骨材規範的密度範疇內。

表 4 第一階段試燒結果

試樣	焙燒段		浮粒率(%)	黏粒現象	顆粒密度(g/cm <sup>3</sup> )	體積膨脹率(%)
	焙燒溫度(°C)	持溫時間(min)				
新山淨水場	1275	10	0	×	1.29	104.4
	1250		0	×	1.31	103.2
	1225		0	×	1.34	101.0
	1200		0	×	1.38	97.7
	1175		0	×	1.42	95.3
	1150		0	×	1.47	91.8
板新淨水場	1275	10	0	×	1.28	104.2
	1250		0	×	1.31	101.5
	1225		0	×	1.34	99.2
	1200		0	×	1.42	93.9
	1175		0	×	1.50	88.7
	1150		0	×	1.63	81.6
平鎮淨水廠	1275	10	0	×	1.57	102.0
	1250		0	×	1.60	100.1
	1225		0	×	1.61	99.5
	1200		0	×	1.83	87.5
	1175		0	×	1.89	84.8
	1150		0	×	2.10	76.1
新竹淨水場	1275	10	100.0	○	—	—
	1250		100.0	×	0.65	224.9
	1225		100.0	×	0.71	204.2
	1200		100.0	×	0.73	198.7
	1175		100.0	×	0.87	167.4
	1150		7.7	×	1.10	132.7

豐原淨水場	1275	10	0	×	1.31	111.0
	1250		0	×	1.37	105.8
	1225		0	×	1.49	97.3
	1200		0	×	1.55	93.7
	1175		0	×	1.56	93.2
	1150		0	×	1.59	91.5
林內淨水場	1275	10	100.0	○	—	—
	1250		100.0	○	—	—
	1225		100.0	○	—	—
	1200		100.0	×	0.78	162.2
	1175		46.2	×	1.07	117.5
	1150		7.7	×	1.40	90.2
南化淨水場	1275	10	0	×	1.29	101.8
	1250		0	×	1.30	100.9
	1225		0	×	1.34	98.1
	1200		0	×	1.39	94.4
	1175		0	×	1.56	83.7
坪頂淨水場	1275	10	100.0	○	—	—
	1250		100.0	○	—	—
	1225		100.0	○	—	—
	1200		100.0	×	0.74	228.1
	1150		23.1	×	1.08	156.2
拷潭淨水場	1275	10	0	×	1.45	115.8
	1250		100.0	○	—	—
	1225		100.0	○	—	—
	1200		100.0	×	0.75	223.4
	1150		38.5	×	1.02	163.6
澄清湖淨水場	1275	10	0	×	1.35	123.7
	1250		100.0	○	—	—
	1225		100.0	○	—	—
	1200		100.0	×	0.73	181.8
	1175		53.8	×	0.96	137.7
1150	0	×	1.22	108.1		

備註：

- 1.浮粒率為可漂浮於水之粒料（顆粒密度 $\leq 1$  g/cm<sup>3</sup>）。
- 2.黏粒現象為物料軟化變形並形成粒料沾黏（○=有；×=無）。
- 3.符號—為粒料已沾黏或變形，無法檢測顆粒密度或體積膨脹率

對於膨脹溫度區間及軟化溫度之測定，本研究以試樣燒製後之浮粒率、體積膨脹率及黏粒現象（指物料軟化變形並形成粒料之沾黏性）作鑑別試驗結果列於表 4 內。依表中浮粒率及體積膨脹率之測定結果，可將 10 座淨水場污泥區分成低膨脹性及高膨脹性兩類。低膨脹性者（浮粒率=0%）包括新山場（最大體積膨脹率， $V_{max}=104.4%$ ）、板新場（ $V_{max}=104.2%$ ）、平鎮場（ $V_{max}=102.0%$ ）、豐原場（ $V_{max}=111.0%$ ）、南化場（ $V_{max}=101.8%$ ）。高膨脹性者（浮粒率=100%），包括新竹場（ $V_{max}=224.9%$ ）、林內場（ $V_{max}=162.2%$ ）、坪頂場（ $V_{max}=228.1%$ ）、拷潭場（ $V_{max}=223.4%$ ）、澄清湖場（ $V_{max}=181.8%$ ）。

本研究考慮以體積膨脹率大於 100% 為膨脹溫度區間下限，並以產生黏粒現象為軟化溫度上限，則 10 場淨水污泥之膨脹溫度區間及軟化溫度，如表 5 所示。觀察表中可知，低膨脹性者需較高之軟化溫度（ $> 1,275^{\circ}\text{C}$ ），以及較高之焙燒溫度（ $\geq 1,225^{\circ}\text{C}$ ）方能產生膨脹。而高膨脹性者，除新竹場之軟化溫度為  $1,275^{\circ}\text{C}$  外，其餘皆低於  $1,225^{\circ}\text{C}$ 。再者，高膨脹性者可於較低之焙燒溫度（ $1,150^{\circ}\text{C}$ ）下產生膨脹。綜上所述，若以不超過軟化溫度並低於商業生產最高溫度  $1,300^{\circ}\text{C}$  作為限制，則各場淨水污泥之最佳焙燒溫度建議如表 5 內之第四欄。

## (二)第二階段試燒

藉由第一階段之試燒試驗，已確定 10 場淨水污泥均可燒製成合格的輕質骨材。本（第二）階段的試燒試驗，目的在進一步對各場淨水污泥試製成合格輕質骨材的顆粒

密度範圍，從而評估各場淨水污泥輕質骨材可達之顆粒密度範圍，可作為日後生產時，製造各類別輕質骨材的參考依據。

表 5 各場淨水污泥之膨脹溫度區間及軟化溫度

試樣	膨脹溫度區間	軟化溫度	最佳焙燒溫度	備註
新山淨水場	$1,225^{\circ}\text{C} \sim 1,275^{\circ}\text{C}$	$> 1,275^{\circ}\text{C}$	$1,275^{\circ}\text{C}$	低膨脹性
板新淨水場	$1,250^{\circ}\text{C} \sim 1,275^{\circ}\text{C}$	$> 1,275^{\circ}\text{C}$	$1,275^{\circ}\text{C}$	
平鎮淨水場	$1,250^{\circ}\text{C} \sim 1,275^{\circ}\text{C}$	$> 1,275^{\circ}\text{C}$	$1,275^{\circ}\text{C}$	
豐原淨水場	$1,250^{\circ}\text{C} \sim 1,275^{\circ}\text{C}$	$> 1,275^{\circ}\text{C}$	$1,275^{\circ}\text{C}$	
南化淨水場	$1,250^{\circ}\text{C} \sim 1,275^{\circ}\text{C}$	$> 1,275^{\circ}\text{C}$	$1,275^{\circ}\text{C}$	
新竹淨水場	$1,150^{\circ}\text{C} \sim 1,250^{\circ}\text{C}$	$1,275^{\circ}\text{C}$	$1,250^{\circ}\text{C}$	高膨脹性
林內淨水場	$1,150^{\circ}\text{C} \sim 1,200^{\circ}\text{C}$	$1,225^{\circ}\text{C}$	$1,200^{\circ}\text{C}$	
坪頂淨水場	$1,150^{\circ}\text{C} \sim 1,200^{\circ}\text{C}$	$1,225^{\circ}\text{C}$	$1,200^{\circ}\text{C}$	
拷潭淨水場	$1,150^{\circ}\text{C} \sim 1,200^{\circ}\text{C}$	$1,225^{\circ}\text{C}$	$1,200^{\circ}\text{C}$	
澄清湖淨水場	$1,150^{\circ}\text{C} \sim 1,200^{\circ}\text{C}$	$1,225^{\circ}\text{C}$	$1,200^{\circ}\text{C}$	

本階段試驗採用的焙燒溫度，以表 5 中各組之最佳焙燒溫度作設定，並配合不同預熱時間 0 min、7.5 min、15 min。第二階段 10 場淨水污泥的燒製條件及試驗結果，如表 6、及圖 6 至圖 7 所示。觀察圖 6 可知，全部 10 場淨水污泥皆可燒製成顆粒密度小於  $1.8 \text{ cm}^3$  的輕質骨材，已滿足一般輕質骨材基本特性之要求。從圖 6 上還可發現，燒製時之預熱時間，對輕質骨材顆粒密度有所影響，

對任一淨水場污泥，其預熱時間愈長，製成之骨材顆粒密度有愈大之趨勢。至於各場污泥輕質骨材成品的體積膨脹率，則可由圖 7 比較出，製程中採用的預熱時間愈長，輕質骨材的體積膨脹率愈小。這種骨材顆粒的差別，也可由圖 8（註：各場趨勢同，本圖為拷潭場試驗結果為例）中比較出。

10 場淨水污泥試燒所得輕質骨材的吸水率如表 6 所示。由表列結果可看出，除豐原場之輕質骨材吸水率較大外（11%~19%），其餘各場吸水率皆小於 11%，適合應用於工程上。另外，預熱時間對骨材吸水率也有影響，對任一淨水場而言，製程的預熱時間愈長，燒成的輕質骨材吸水率愈低（15min > 7.5min > 0min）。形成這種現象的原因，主要為預熱時間的增加除有助於粒料物性均勻外，可相對增大熱焓，從而增加玻璃質厚度，使骨材表殼更為緻密而降低水分子的滲透性。

淨水污泥骨材雛粒經燒製後減輕之重量稱為燒失量，可作為輕質骨材燒出量之控制依據。本次試燒試驗中，各場淨水污泥雛粒經燒製後所得之輕質骨材燒失量，如表 6 及圖 9（各場平均值）所示。比較表中之焙燒溫度可知，使用較高溫度（1275℃）之新山場、板新場、平鎮場、豐原場及南化場，其輕質骨材有相對較大的燒失量（> 14%），其次為新竹場之 10.5%（焙燒溫度 1250℃），其餘淨水場之焙燒溫度為 1200℃者，有更小的燒失量，約介於 6.4%~8.2%間。此現象顯示，焙燒溫度愈高時，骨材之燒失量愈大。至於預熱時間的長短，對燒失量之影響並不明顯。

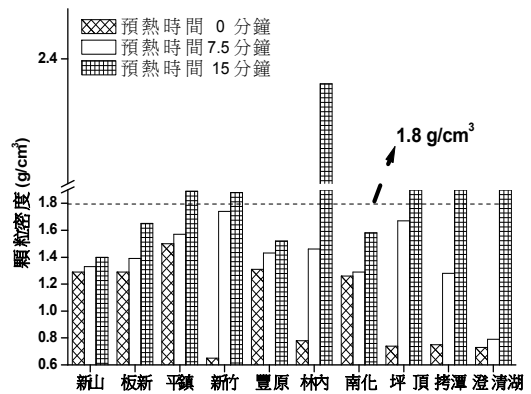


圖 6 各場淨水污泥燒製輕質骨材之顆粒密度

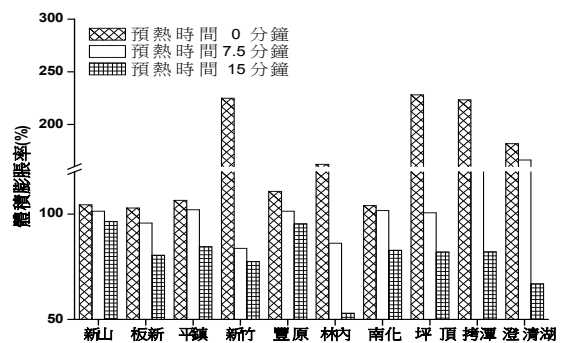


圖 7 各場淨水污泥燒製輕質骨材之體積膨脹率

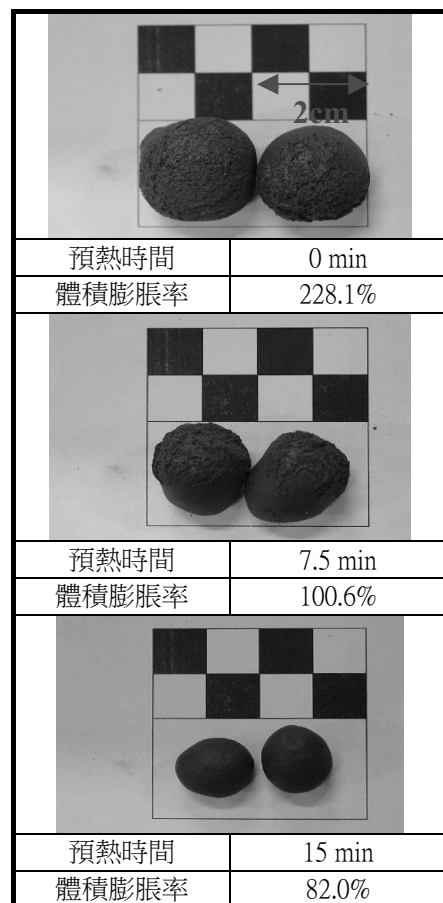


圖 8 預熱時間對體積膨脹之影響

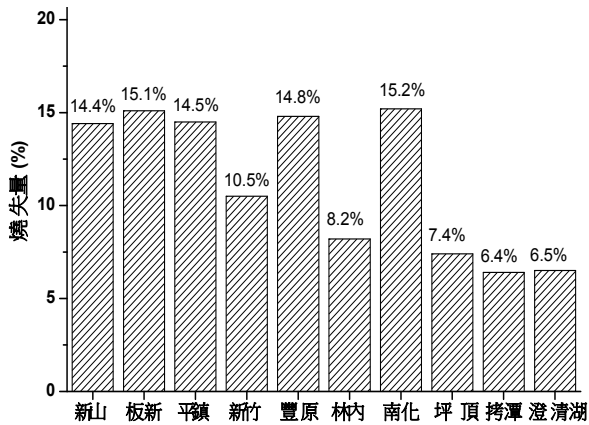


圖 9 各場淨水污泥燒製輕質骨材之燒失量

綜合以上結果與討論可知，焙燒溫度的高低及預熱時間的長短，皆對淨水污泥輕質骨材之物性有顯著影響。

基於第二階段之試驗結果可歸納整理出，以各場淨水污泥製作輕質骨材時，其可達之顆粒密度範圍如表 7 所示。一般結構用輕質骨材顆粒密度需求為  $1.2 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$  間；非結構用輕質骨材顆粒密度則需小於  $1 \text{ g/cm}^3$ 。在本次試驗條件下，依據各淨水場輕質骨材可達之顆粒密度範圍，得以同時產製結構用及非結構用輕質骨材的淨水污泥，有新竹場、林內場、坪頂場、拷潭場及澄清湖場等 5 座淨水場；只能生產結構用輕質骨材的淨水污泥，則有新山場、板新場、平鎮場、豐原場及南化場等 5 座淨水場。

### 五、量產可行性評估

量產試驗所用之淨水污泥，為採用新竹淨水場。選用此淨水場污泥之主要原因有二，一為從所有淨水場污泥的實驗室試製結果發現，新竹場淨水污泥屬於高膨脹性材料，能同時製作結構用與非結構用兩類輕質骨材，可滿足本研究驗證之需求。另一原因為新竹場鄰近試驗工廠，最具交通運輸之便利性。

表 6 第二階段試燒結果

試樣	預熱段		焙燒段		顆粒密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	吸水率 (%)	燒失量 (%)	體積膨脹率 (%)
	焙燒溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	持溫時間 (min)	焙燒溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	持溫時間 (min)				
新山場	500	0	1275	10	1.29	11.3	14.5	104.4
		7.5			1.33	10.6	14.0	101.4
		15			1.40	9.6	14.7	96.5
板新場	500	0	1275	10	1.29	11.3	15.2	102.9
		7.5			1.39	7.3	15.0	95.7
		15			1.65	3.7	15.0	80.5
平鎮場	500	0	1275	10	1.50	5.0	14.3	106.5
		7.5			1.57	4.5	14.5	102.0
		15			1.89	1.9	14.6	84.5
新竹場	500	0	1250	10	0.65	8.0	10.1	224.9
		7.5			1.74	1.7	10.7	83.8
		15			1.88	0.6	10.6	77.5
豐原場	500	0	1150	10	1.31	19.0	14.6	110.7
		7.5			1.43	15.0	15.2	101.4
		15			1.52	11.0	14.5	95.4
林內場	500	0	1200	10	0.78	1.2	8.4	162.2
		7.5			1.46	1.0	8.2	86.2
		15			2.38	0.3	7.9	53.0
南化場	500	0	1275	10	1.26	7.4	15.1	104.0
		7.5			1.29	4.9	15.3	101.6
		15			1.58	2.7	15.1	82.8
坪頂場	500	0	1200	10	0.74	3.7	7.5	228.1
		7.5			1.67	0.9	7.7	100.6
		15			2.05	0.1	7.1	82.0
拷潭場	500	0	1200	10	0.75	4.8	6.5	223.4
		7.5			1.28	1.2	6.1	130.5
		15			2.03	0.3	6.6	82.1
澄清湖場	500	0	1200	10	0.73	6.6	6.3	181.8
		7.5			0.79	4.2	6.8	166.2
		15			1.97	0.7	6.4	66.9

量產試驗製得之輕質骨材產品性質檢測結果，如表 8 所示。表中結果顯示，所產製之兩種輕質骨材在乾鬆單位重、有機不潔物及燒失量等項，皆能滿足國家標準要求。比較兩種輕質骨材之性質時可發現，結構用輕質骨材有較大之乾鬆單位重（726 kg/m<sup>3</sup>）及筒壓強度（122 kgf/cm<sup>2</sup>）；非結構用輕質骨材則具有較低之乾鬆單位重（518 kg/m<sup>3</sup>）及筒壓強度（66 kgf/cm<sup>2</sup>）。在有害物質檢驗方面，兩種輕質骨材除了無「有機不潔物」含量外（有機物板號數 1；淡黃色），材質也極為安定，並無燒失量的產生（燒失量 < 0%）。

另外，目前 CNS 國家標準並未訂定筒壓強度之標準值，若以一般商業產品要求，用於結構用者需大於 30 kgf/cm<sup>2</sup>，而本次試生產之輕質骨材則皆可滿足要求。又根據顆粒密度及 24 小時吸水率之檢測結果可評估出，以淨水污泥試生產之輕質骨材，皆能符合目前商業生產之通用規格。

此外，為確認本次試製所得之輕質骨材無環境危害風險，乃依據環保署公告之毒性溶出試驗方法，測定其重金屬溶出情形，檢測結果如表 9 至表 10 所示。由表中觀察可知，以新竹場淨水污泥試製之兩種輕質骨材，除滿足「一般事業廢棄物」認定之重金屬溶出標準值外（表 9），也符合「土壤污染管制標準」（表 10），而可應用於食用作物農地上。另表 11 為輕質骨材氯化戴奧辛及呔喃同源物濃度的檢驗結果，其濃度值（Total TEQ）亦皆滿足行政院環保署之土壤污染管制標準及有害事業廢棄物管制標準。

表 7 各場淨水污泥之可達顆粒密度範圍

試樣	可達顆粒密度範圍 (g/cm <sup>3</sup> )	工程應用類別
新山場	1.29~1.40	結構用
板新場	1.29~1.65	結構用
平鎮場	1.50~1.89	結構用
新竹場	0.65~1.88	結構用、非結構用
豐原場	1.31~1.52	結構用
林內場	0.78~2.38	結構用、非結構用
南化場	1.26~1.58	結構用
坪頂場	0.74~2.05	結構用、非結構用
拷潭場	0.75~2.03	結構用、非結構用
澄清湖場	0.73~1.97	結構用、非結構用

表 8 量產輕質骨材之性質檢驗結果

試樣	產品檢測項目					
	顆粒密度 (g/cm <sup>3</sup> )	24 小時吸水率 (%)	乾鬆單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	筒壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	有害物質	
					有機不潔物 (號數)	燒失量 (%)
結構用	1.35	6.9	726	122	1	-1.2
非結構用	0.98	7.7	518	66	1	-0.6
國家標準值	無規範值	無規範值	<880	無規範值	≤3	<5
一般商業規格	結構用 1.1~1.8	結構用 < 12	—	用於結構用筒壓強度 >30 較佳	—	—

表 9 量產輕質骨材之 TCLP 溶出檢驗結果

試樣名稱		淨水污泥輕質骨材		法規標準值
		結構用	非結構用	
檢測項目	單位	檢測值		
總銅	mg/L	0.035	<MDL	15
總鎳	mg/L	0.446	*0.015	1
總鉛	mg/L	<MDL	<MDL	5
總鉻	mg/L	<MDL	<MDL	5
六價鉻	mg/L	<MDL	<MDL	2.5
總砷	mg/L	*0.0007	0.124	5
總汞	mg/L	<MDL	*0.0003	0.2
總硒	mg/L	<MDL	<MDL	1
總鋇	mg/L	1.44	1.21	100

備註：

1. 檢測值標為“<MDL”低於偵測極限。
2. 檢測值前有“\*”表示該檢測值介於 MDL 與定量值（3.3 倍 MDL）之間，該值僅供參考。

表 10 量產輕質骨材之 TCLP 溶出檢驗結果—王水消化

試樣名稱		淨水污泥輕質骨材		法規標準	
		結構用	非結構用	一般管制標準值	食用作物農地管制標準值
檢測項目	單位	檢測值			
砷	mg/kg	2.58	3.99	60	—
汞	mg/kg	0.014	0.04	20	5
鎳	mg/kg	<MDL	<MDL	20	5
鉛	mg/kg	3.55	4.08	2,000	500
銅	mg/kg	12.1	12.6	400	200
鋅	mg/kg	4.56	2.68	2,000	600
鎳	mg/kg	22.6	30.6	200	—
鉻	mg/kg	0.01	32.0	250	—

表 11 量產輕質骨材之氯化戴奧辛及呋喃同源物濃度結果

檢驗項目	單位	淨水污泥輕質骨材	
		非結構用	結構用
		檢測值	
Total TEQ(PCDDs/PCDFs)	ng I-TEQ/g	0.014	0.011
2,3,7,8-TeCDF	ng/g	0.000627	0.000572
1,2,3,7,8,PeCDF	ng/g	0.001047	0.000828
2,3,4,7,8-PeCDF	ng/g	0.006708	0.005981
1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/g	0.007712	0.007019
1,2,3,6,7,8-HxCDF	ng/g	0.011020	0.009076
2,3,4,6,7,8-HxCDF	ng/g	0.045174	0.036289
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/g	0.000626	0.000741
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	ng/g	0.203202	0.149792
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/g	0.023137	0.016093
OCDF	ng/g	0.375687	0.198857
2,3,7,8-TeCDD	ng/g	0.000087	0.000082
1,2,3,7,8-PeCDD	ng/g	0.000454	0.000345
1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/g	0.000931	0.001115
1,2,3,6,7,8-HxCDD	ng/g	0.001607	0.001415
1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/g	0.001250	0.001155
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	ng/g	0.032347	0.022944
OCDD	ng/g	0.179891	0.108080
公告標準	ng I-TEQ/g	1	1

綜合以上分析與討論可知，淨水污泥為不含有害物質之廢棄物，而經高溫燒製成輕質骨材後，更是具有高安定化且無害化的建築材料。研究結果也顯示，淨水污泥具有開發成為輕質骨材主要原料的潛力。

## 六、結論

基於以上試驗結果與分析，綜合結論如下：

- (一)本研究採集新山、板新、平鎮、新竹、豐原、林內、南化、坪頂、拷潭及澄清湖等 10 座淨水場之淨水污泥為試樣。物理性質上，豐水期時之污泥粒徑皆大於枯水期，顯示於豐水期因進廠之源水濁度較高。各場污泥之比重約介於 2.63~2.73 間，與一般土壤的比重相近。再者，此 10 場淨水污泥試樣皆為粉土或粘土質的沉積物，適於作為製造輕質骨材的粉狀原料。
- (二)淨水污泥之化學成分分析結果為：各場污泥之可燃分約 4%~14% 間；揮發性固體量約 3%~13% 間，皆屬於環保署公告之 D-0902 無機性污泥。各場污泥之化學成分與含量均相似，主體成分為  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  約佔 80%， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  介於 4.9%~11.3% 間，餘為少量的鹼土屬及鹼金屬助熔物。
- (三)以 C.M.Riley 建議之適宜熔液黏度三相圖進行分析後發現，10 場淨水污泥試樣皆具有燒製輕質骨材之可行性。
- (四)10 座淨水污泥試樣皆含有石英、綠泥石、伊利石、及長石等粘土礦物成分，此結果顯示兩個特點：一為台灣西部淨水污泥之礦物成分相同，二為淨水污泥具有燒製輕質骨材的潛力。
- (五)由第一階段試燒結果發現，10 場淨水污泥皆適於作為輕質骨材燒製用之原料，骨材之顆粒密度小於  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ，涵蓋在合乎輕質骨材規範的密度範疇內。若依

浮粒率及體積膨脹率區分，則新山場、板新場、平鎮場、豐原場、南化場等 5 場污泥，適於製造低膨脹性輕質骨材；新竹場、林內場、坪頂場、拷潭場、澄清湖場等 5 場污泥，則適於製作高膨脹性輕質骨材。

- (六)新山、板新、平鎮、豐原及南化等 5 場污泥，其輕質骨材燒製之膨脹溫度區間為  $1,225^\circ\text{C} \sim 1,275^\circ\text{C}$ ，軟化溫度為大於  $1,275^\circ\text{C}$ ；新竹場污泥之膨脹溫度區間為  $1,150^\circ\text{C} \sim 1,250^\circ\text{C}$ ，軟化溫度為  $1,275^\circ\text{C}$ ；林內、坪頂、拷潭及澄清湖等 4 場污泥之膨脹溫度區間為  $1,150^\circ\text{C} \sim 1,200^\circ\text{C}$ ，軟化溫度為  $1,225^\circ\text{C}$ 。
- (七)第二階段試燒結果發現，輕質骨材燒製選用的預熱時間，對燒成骨材之顆粒密度影響甚大；預熱時間愈長，骨材顆粒密度愈大，體積膨脹率則愈小。再者，預熱時間愈長，燒成骨材的吸水率愈低。
- (八)10 場淨水污泥製造的輕質骨材，除豐原場者有較大的吸水率外（11%~19%），其餘各場的輕質骨材吸水率皆小於 11%，評估為可滿足一般工程使用上之需求。
- (九)由輕質骨材燒出量的分析發現，焙燒溫度愈高骨材燒失量愈大。焙燒溫度高（ $1275^\circ\text{C}$ ）之新山場、板新場、平鎮場、豐原場及南化場，其輕質骨材有較大的燒失量（ $>14\%$ ）；焙燒溫度（ $1250^\circ\text{C}$ ）其次的新竹場，燒失量為 10.5%；焙燒溫度（ $1200^\circ\text{C}$ ）更小的林內場、坪頂場、拷潭場及澄清湖場等，其燒失量約介於 6.4%~8.2% 間。至於預熱時間的長短則

對燒失量的影響並不明顯。

(十)依據各場燒成輕質骨材之可達顆粒密度範圍，可生產結構用 ( $1.2 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ ) 及非結構用輕質骨材 ( $< 1 \text{ g/cm}^3$ ) 的淨水污泥有新竹場、林內場、坪頂場、拷潭場及澄清湖場等 5 座淨水場；可生產結構用 ( $1.2 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ ) 的淨水污泥有新山場、板新場、平鎮場、豐原場及南化場等 5 座淨水場。

(十一)量產試驗製得之兩類輕質骨材，由產品性質之檢測結果顯示，乾鬆單位重、有機不潔物及燒失量等，皆能滿足國家標準要求，且符合目前商業生產之通用規格。另結構用輕質骨材有較大之乾鬆單位重 ( $726 \text{ kg/m}^3$ ) 及筒壓強度 ( $122 \text{ kgf/cm}^2$ )；非結構用則具有較低之乾鬆單位重 ( $518 \text{ kg/m}^3$ ) 及筒壓強度 ( $66 \text{ kgf/cm}^2$ )

(十二)量產之兩類輕質骨材，除滿足「一般事業廢棄物」認定之重金屬溶出標準值外，也符合「土壤污染管制標準」。另於氯化戴奧辛及呋喃同源物濃度的檢驗結果上，亦皆滿足行政院環保署之土壤污染管制標準及有害事業廢棄物管制標準。

(十三)淨水污泥為不含有害物質之廢棄物，而經高溫燒製成輕質骨材後，更是具有高安定化且無害化的建築材料。

## 參考文獻

- 1.顏聰、陳豪吉、王順元、黃中和，自來水淨水污泥再利用成輕質骨材之可行性研究，臺灣自來水委託研究報告，2011。
- 2.J.H. Tay, W.K. Yip, Sludge Ash as Lightweight

Concrete Material, J. Envir. Engrg. Volume 117, Issue 6, pp. 834-844, 1991.

- 3.C.R. CheesemanCorresponding, G.S. Viridi, Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash, Resources Conservation and Recycling, Volume 45, Issue 1, pp. 18-30,2005.

- 4.C.R. Cheeseman, G.S. Viridi, Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate Produced from Sintered Sewage Sludge Ash, Volume 45, Issue 1, pp.18-30, 2005.

- 5.周彩樓、尚琦、尹洪江，「淨水廠沉澱池淤泥超輕陶粒的研究」，熱固性樹脂（中國），第4期，第83-86頁，1999。

- 6.朱彬、王海亮、陸在宏，「給水廠脫水污泥燒結陶粒試驗」，給水排水（中國），第31卷，第2期，第35-36頁，2005。

- 7.賀君、王啟山、任愛玲，「給水廠及污水廠污泥製陶粒技術研究」，環境工程學報（中國），第3卷，第9期，第1653-1657頁，2009。

- 8.賀君、王啟山、任愛玲，「給水廠污泥製高強陶粒技術研究」，工業安全與環保（中國），第36卷，第11期，第51-52頁，2010。

## 作者簡介

### 王順元先生

現職：正修科技大學兼任助理教授

專長：輕質骨材產製暨混凝土工程、污泥再利用

### 陳豪吉先生

現職：國立中興大學教授

專長：土木工程、輕質骨材產製暨混凝土工程

### 顏聰先生

現職：國立中興大學名譽教授

專長：混凝土工程、鋼筋混凝土

**黃中和先生**

現職：大漢技術學院助理教授

專長：土木工程、輕質骨材產製暨混凝土工程

**林正隆先生**

現職：臺灣自來水公司水質處工程師

專長：淨水處理、水污染防治、廢棄物管理

**洪世政先生**

現職：臺灣自來水公司水質處組長

專長：淨水處理、水污染防治、廢棄物管理

**吳美惠小姐**

現職：臺灣自來水公司水質處處長

專長：水質管理

**中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法**

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

**一、目的**

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

**二、獎勵對象**

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

**三、獎勵金額**

論文獎每篇頒發獎金新臺幣貳萬元整，金額得視本會財務狀況予調整之。

上項論文獎金及評獎作業經費由本會列入年度預算籌措撥充之。

**四、評獎辦法**

(一)凡自上年度第二期以後至該年度第二期在本會「自來水」會刊登載之「每期專題」、「專門論著」、「實務研究」及「一般論述」論文，由編譯出版委員會於每年六月底前，推薦 6-9 篇候選論文，再將該候選論文送請專家學者審查 (peer-review)，每篇論文審查人以兩人為原則。

(二)本會編譯出版委員會主任委員於每年七月底前召集專家學者 5~7 人組成評獎委員會，就專家審查意見進行複評，選出給獎論文，報經本會理監事會議遴選核定後公佈。

**五、頒獎日期**

於每年自來水節慶祝大會時頒發。

六、本辦法經由本會理監事會審議通過後實施，修訂時亦同。

## 淨水污泥輕質骨材混凝土之工程性質

文/黃中和、陳豪吉、顏聰、王順元

### 摘要

本文利用新竹場淨水污泥燒製之輕質骨材為粗骨材，配以水泥砂漿，拌製結構用及非結構用輕質混凝土。其中，結構用混凝土考量中高強度等級，設計六組不同水灰比之混凝土配比，探討其工程性質。非結構混凝土方面，則採用單一粒徑輕質骨材，製作兩種無細混凝土，測試其性能，以驗證是否符合多孔隙混凝土或透水混凝土適用標準，以利推廣使用。

由試驗測試結果可得，淨水污泥輕質骨材拌製於結構用混凝土，可藉由強塑劑之添加來控制其工作性，便於現場施工作業。由新拌與硬固性質之實驗數據得知，淨水污泥輕質混凝土之工程性質可適合於一般輕質混凝土使用範圍。所製作之兩式無細混凝土試體，其平均透水係數分別為 0.85cm/sec 與 3.81cm/sec，亦符合透水混凝土之 0.01cm/sec 要求。對淨水污泥輕質骨材混凝土測出具有較低之熱導係數，顯示擁有良好隔熱性能。綜合而言，淨水污泥輕質骨材混凝土之各項工程性質良好，合適作為結構用或非結構用混凝土之工程建材。

關鍵字：淨水污泥、輕質骨材、混凝土、工程性質、綠建材

### 一、前言

本文所稱之淨水污泥產生於水處理過程中的固液分離程序。原水在淨水處理的混凝、膠凝、沈澱、過濾程序中，為去除水中微量之有機污染物、微細濁度或 SS，於混凝過程中常添加硫酸鋁或多元氯化鋁

(Polyaluminium Chloride, PAC) 等混凝劑，經由適當攪拌形成較大的膠羽；較重的沈降性膠羽在沈澱池中沈澱去除，而未去除的懸浮性膠羽及其他物質，則經由快濾池過濾去除。快濾池中之物質再經由反沖洗並透過污泥沈澱池重力沈降濃縮之後與沈澱池污泥合併處理，即為一般所稱淨水污泥，經脫水成為淨水污泥餅<sup>[1-4]</sup>。根據，臺灣自來水公司及台北自來水事業處統計，國內之淨水污泥總年產量約在 25 萬公噸左右，其中臺灣自來水公司為最大宗，常年產量約在 18-20 萬公噸間<sup>[5-6]</sup>。

淨水污泥若能資源化再生利用，如能燒製成輕質骨材作為建材使用，將是最佳處置方式，但國內外迄今未見有如此的研發與做法。由於自來水廠之原水，大多來自水庫，因此淨水污泥在材質上應相近於水庫淤泥，基於以往水庫淤泥燒製輕質骨材之經驗<sup>[7-10]</sup>，研判應可燒製成輕質骨材；而且以泥餅燒製輕質骨材之過程中，可直接造粒而省略一般岩石的碎化作業，對於未來國內發展輕質骨材混凝土，將為有利之條件。傳統輕質混凝土用於非結構體，如預鑄構件、隔間牆、帷幕牆等，隨著輕質骨材品質提升，可拌製強度較高之輕質混凝土後，已逐漸應用於結構構件之中，如橋樑、高樓建築等。輕質骨材可控制骨材顆粒之特性，更是無細混凝土之首選材料。

無細混凝土(No-Fine Concrete)主要採用狹窄級配之骨材粒徑，且不含或少量的細骨材，加上不足量之膠結漿體所組成的混凝

土，相較於一般傳統混凝土，含有大孔隙之特點，屬於多孔混凝土。此類混凝土富含孔隙，且孔隙間互相連通，水分可直接經由這些連續孔隙穿透混凝土，而能具良好之透水性，故亦稱之為透水混凝土。配合輕質骨材的使用，可使其更具隔熱、質輕、吸收水的特性降低混凝土單位重、增加植生能力、隔熱性能與透水等，並可將其應用於生態工法之建材或高性能透水綠建材。

所謂「高性能透水綠建材」係將孔隙率高、透水性良好之材料，運用於鋪面之面層與基底層，或作為雨水排水溝、雨水陰井及地下雨水排水管等設施之材料，使雨水通過此高滲透性之人工介質或設施滲入土壤，形成雨水還原於大地之功能，以達到基地保水之要求，使得公共排水設施的負擔減緩，降低都市中洪水規模。故高性能透水綠建材即為通過正式檢驗具高透水性且品質穩定的高性能材料。一般優良級配礫石之滲透係數  $k$  值約為  $0.01\text{cm/s}$ ，而為確保鋪面透水性之要求，將透水鋪面之滲透係數  $k$  值建議為  $0.01\text{cm/s}$ ，並以此值作為高性能透水綠建材之評估基準<sup>[1]</sup>。

台灣位處亞熱帶及環太平洋地震帶上，氣候炎熱潮濕且地震發生頻繁，且目前政府已逐漸限制河川砂石之開採，在砂石資源日益枯竭及講求節約能源等多重考量下，未來在尋求替代建材方案時，擁有質輕、耐震佳、良好隔熱性及吸音性、數量龐大且具環保概念的淨水污泥淤泥輕質骨材，不失為首要選擇。本文旨在針對淨水污泥燒製之輕質骨材，拌製輕質混凝土或無細輕質混凝土，探討其工程性質，以進行作為工程材料之可行性評估，以利推廣應用，期

落實國家永續發展之環境管理政策內涵<sup>[12]</sup>。

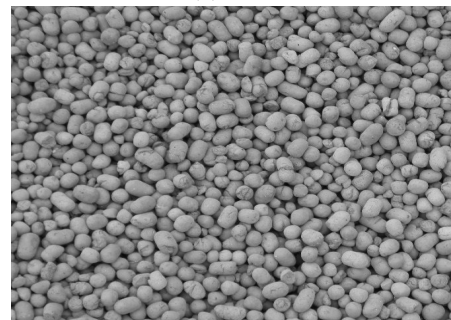
## 二、淨水污泥輕質骨材之特性

本文採集新竹場之淨水污泥作為原料，利用三奕科技公司之大型旋窯，進行輕質骨材之燒製，並將其定義為「淨水污泥輕質骨材」，燒製成品即於實驗室內進行性能測試，以驗證是否符合混凝土粗骨材之要求，並作為混凝土配比參考資料。

骨材外型如圖 1 所示，骨材雛粒為圓柱狀，經高溫膨脹後的輕質粗骨材成品略成橢圓體，骨材粒徑介於 #4(4.76mm) ~ 1/2"(12.5mm)，扁平率趨近零。依據結構用及無細輕質骨材混凝土所使用之骨材級配要求，將量產所得骨材級配分成兩種粒群，其級配如表 1 與表 2 所示。所有骨材呈光滑外表面，若經預濕作業後，黏土塊比例低於 2%，外表面將更加潔淨，合適作為混凝土用之輕質粗骨材。



(a) 雛粒



(b) 成品

圖 1 淨水污泥產製輕質骨材之雛粒與成品

表 1 結構用淨水污泥輕質骨材級配

篩號	停留重(kg)	停留%	累積停留%	過篩%	規範值
3/4"	0.0000	0.00	0.00	100.00	100
1/2"	0.1720	5.67	5.67	94.33	90~100
3/8"	1.5573	51.38	57.05	42.95	40~80
#4	1.2068	39.81	96.87	3.13	0~20
#8	0.0950	3.13	100.00	0.00	0~10
總計	3.0311				

表 2 無細混凝土用淨水污泥輕質骨材級配

篩號	停留重(kg)	停留%	累積停留%	過篩%	規範值
3/4"	0.0000	0.00	0.00	100.00	--
1/2"	0.0600	2.00%	2.00%	98.00%	--
3/8"	2.7473	91.57%	93.57%	6.43%	--
#4	0.1929	6.43%	100.00%	0.00%	--
#8	0.0000	0.00%	100.00%	0.00%	--
總計	3.0002				

表 3 淨水污泥輕質骨材之特性

項目		結構用	隔熱用	評估標準
外觀形狀		潔淨含黏土塊為 0%、橢圓形狀粒徑介於#8~1/2"		潔淨、黏土塊低於 2%，級配視配比要求
化學組成	毒性分析	TCLP 測試均符合標準值，骨材為無毒安定		不得影響人體安全
物理性質	乾鬆單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	720	520	低於 880
	顆粒密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1.35	0.98	無特別規定
	24 小時吸水率 (%)	6.9	7.7	無特別規定
力學性質	筒壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	120	65	無特別規定

淨水污泥輕質骨材性質之測試結果如表 3 所示。由試驗結果可知，經過旋窯高溫燒製後的淨水污泥輕質骨材，屬無機質材料，其 TCLP 溶出檢驗結果，可驗證淨水污泥為無有害物質之廢棄物，在經高溫燒製成輕質骨材後，更為具有高安定化及無害化之建築材料。

在物理性質方面，本研究產製之淨水污泥輕質骨材，其乾鬆單位重介於 520 kg/m<sup>3</sup> ~ 720 kg/m<sup>3</sup>，符合於 CNS 3691「結構混凝土用之輕質粒料」第 4.1.4 節與 CNS 14826「隔熱混凝土用輕質粒料」第 3.4 節，粗骨材乾鬆單位重不得大於 880 kg/m<sup>3</sup>之規定。由文獻可以得知<sup>[13]</sup>，一般天然常重粗骨材乾鬆單位重介於 1520 kg/m<sup>3</sup>~1680 kg/m<sup>3</sup>，則淨水污泥輕質粗骨材約降低 50%~60%。另比較骨材容積比重可知，輕質骨材比重介於 0.98~1.35，與一般天然骨材比重之 2.60~2.65，明顯降低許多，顯示本研究量產的淨水污泥輕質骨材具質輕之優勢。根據 24 小時吸水率之檢測結果可知，以淨水污泥試生產之輕質骨材吸水率介於 6.9%~7.7%之間，符合目前商業生產之通用規格。

輕質骨材之強度測試一般以筒壓強度為主；經實測結果可得，淨水污泥輕質骨材筒壓強度介於 65 kgf/cm<sup>2</sup> ~120 kgf/cm<sup>2</sup>。雖然目前我國國家標準 CNS 14779「輕質粗粒料之顆粒筒壓強度試驗法」尚未訂定輕質粒料的筒壓強度標準值，但若以一般商業產品要求，用於結構用需大於 30 kgf/cm<sup>2</sup>，則本次試生產之輕質骨材筒壓強度高出甚多，有利於中高強度等級混凝土之製作。

綜合而言，若以淨水污泥輕質骨材作為粗骨材拌製輕質混凝土，從其外觀形狀、化

學組成、物理特性與強度性質等各項特質初步評估，各項性能均符合於結構用或非結構用混凝土之輕質骨材的工程性能要求。實務上，人造輕質骨材也可配合產製技術，調整其骨材性質，進行客製化輕質骨材產出，以符合買購方對輕質骨材性質之需求。

### 三、混凝土試驗規劃與方法

#### (一)試驗材料

- 1.水：自來水。
- 2.水泥：台灣水泥，比重 3.15。
- 3.強塑劑：本研究為使工作性達到一定的程度，將用強塑劑 HI CON HPC-1000，其外觀為黑褐色，比重 1.1-1.2，氯含量 < 500ppm，pH=6.0-8.0，性質符合美國 ASTM C494 TYPE-G 規範。
- 4.細骨材：採用天然砂，SSD 比重 2.56，吸水率 1.33%，細度模數 F.M.=2.75。
- 5.輕質骨材：結構用淨水污泥輕質骨材，容積比重 1.35，吸水率 6.90%，級配為 #4~1/2"，符合 CNS 3691 規範。無細用輕質骨材，容積比重 0.98，吸水率 7.70%，鬆單位重 518kg/m<sup>3</sup>，級配為以 3/8" 為主，約佔總重量之 94%。

#### (二)混凝土配比

##### 1.結構輕質骨材混凝土配比

###### (1)混凝土配比設計條件

- a.坍度：12.0±2.5cm。
- b.水灰比：0.40~0.65。
- c.砂率：40%。
- d.單位用水量：168±10kg/m<sup>3</sup>。
- e.強塑劑用量：添加量為水泥重量之百分比，實際用量視試拌結果調整之。

(2)混凝土配比試算，並經過試拌後，決定配比如表 4。

表 4 結構用淨水污泥輕質骨材混凝土配比表

組別	空氣含量	設計坍度	水灰比	水量	水泥	砂	輕質骨材	強塑劑
SL40	2.00%	12	0.40	168	419	717	550	1.13
SL45	2.00%	12	0.45	168	372	732	562	0.97
SL50	2.30%	12	0.50	168	335	742	569	0.77
SL55	2.50%	12	0.55	175	318	738	566	0.70
SL60	2.80%	12	0.60	175	292	836	523	0.61
SL65	2.80%	12	0.65	175	269	845	528	0.54

##### 2.無細輕質骨材混凝土配比

###### (1)混凝土配比設計條件

- a.XA=0.99
- b.水灰比：0.30、0.35
- c.填漿率：35%與 70%
- d.混凝土單位重：800 ~ 1200 kg/m<sup>3</sup>

(2)混凝土配比試算結果如表 5。

表 5 無細淨水污泥輕質骨材混凝土配比表

組別	水灰比	填漿率	水量	水泥	輕質骨材
NL-L35	0.30	35%	81	270	513
NL-H70	0.35	70%	175	500	513

單位：kg/m

#### (三)試驗項目與方法

##### 1.結構輕質骨材混凝土

本研究探討之結構用輕質混凝土，採用淨水污泥輕質骨材為粗骨材，以天然河砂為細骨材，亦即砂與輕質骨材混合料，拌製所謂「砂—輕質混凝土」，並製成各種混凝土試體，透過實際測試，進行工程性質評估。

為瞭解結構用輕質骨材混凝土之工程性質，乃測試混凝土之新拌與硬固性能。於新拌性質方面，主要測試輕質混凝土工作性能，藉以瞭解是否可達營建工程之施工要求，試驗項目主要包含坍度、空氣含量、新

拌單位重、泌水特性、氯離子測試及凝結時間（初凝與終凝）等。結構用輕質骨材混凝土之應用，除了施工條件所需檢測之新拌性能外，在混凝土硬固後，測試硬固混凝土之單位重、安全性與耐久性則更顯重要，尤為建築材料適用性之重點評估項目。為此，針對所設計六組之淨水污泥輕質骨材輕質混凝土配比，製作試體，進行 28 天齡期的單位重、抗壓強度、劈裂抗張強度、長度變化與滲透性等測試。輕質混凝土性質的試驗方法，主要參考中國國家標準 CNS 規範進行性質的測試，各項性質測試之規範編碼彙整如表 6 所示。

表 6 結構用輕質混凝土性質測試項目與方法

項目		試驗規範
新拌性質	坍度	CNS 1176
	空氣含量	CNS 9661
	新拌單位重	CNS 11151
	泌水測試	CNS 1235
	氯離子測試	CNS 13465
	凝結時間	初凝 終凝
硬固性質	單位重	CNS 1231
	抗壓強度	CNS 1231
	劈裂抗張強度	CNS 3081
	長度變化(乾縮量)	CNS 3691
	滲透性	CNS 7332

## 2.無細輕質骨材混凝土

無細混凝土屬於多孔混凝土，主要特性為孔隙含量高，可增加透水性或降低單位重，而不著重於強度表現。為瞭解其性能，本文進行單位重、抗壓強度與透水係數的測試。其中單位重與抗壓強度測試方法參照結構用混凝土試驗規範（CNS 11231）進行，試體為直徑 15 公分，高 30 公分之圓柱試體。

為使淨水污泥輕質骨材混凝土得以符合高性能透水綠建材基準。本研究參考 CNS 14995「透水性混凝土磚」之定水頭試驗量測原理，測取材料之透水率（cm/s），其試驗設備示意如圖 2 所示。試驗的設定條件如下：

- 1.水頭高差 h:17 cm。
- 2.測定時間 t:30 sec。
- 3.試體面積 A:176.6 cm<sup>2</sup>。
- 4.透水長度 L:30 cm。
- 5.平均流量 Q:實際量測，單位為 cm<sup>3</sup>。

$$6. K_t = \frac{L \times Q}{h \times A \times t} \text{ (cm / sec) }。$$

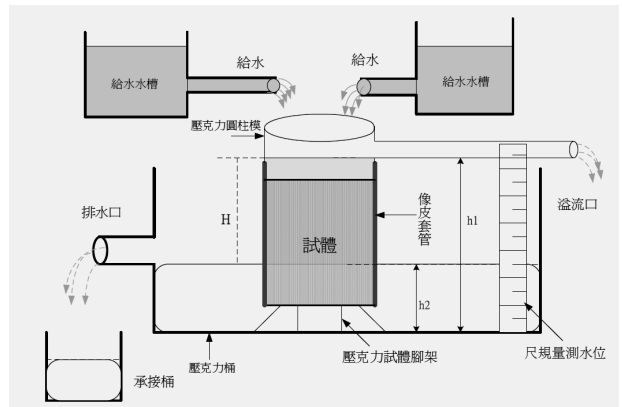


圖 2 混凝土透水係數試驗示意圖

## 四、結構用輕質混凝土之工程特性

### (一)新拌混凝土性質檢測結果與分析

淨水污泥輕質骨材混凝土依標準程序均勻拌和後，依序進行各項新拌混凝土性質測試，測試結果如表 4 所示。

表 4 結構用輕質骨材混凝土之新拌性質

輕質骨材混凝土新拌性質					
項目	坍度	初凝	終凝	空氣含量	新拌單位重
單位	cm	時:分	時:分	%	kg/m <sup>3</sup>
SL40	11.5	04:08	06:04	1.90	1800
SL45	12.5	04:28	06:52	2.10	1795
SL50	11.0	05:11	07:07	2.40	1790
SL55	13.5	04:08	06:44	2.60	1780
SL60	11.0	05:07	07:52	2.70	1775
SL65	11.0	05:28	07:51	2.70	1770

試驗結果顯示，淨水污泥輕質骨材混凝土的坍度值介於 11.5cm~13.5cm 之間，與目標坍度 12.0cm 相比較，實測值在試驗誤差 2.5cm 之範圍內，顯示利用化學藥劑之添加，對於低用水量(168kg/m<sup>3</sup>)之淨水污泥輕質骨材混凝土，能保持合適的工作性或稠度，有利於結構混凝土之施工要求。

混凝土凝結時間的測試方面，六組輕質混凝土配比的初凝時間為 4 小時至 5.5 小時，而終凝時間介於 6 小時至 8 小時之間，與常重混凝土者相近。一般而言，凝結時間與配比之水量、水泥量、及添加摻劑種類或用量等因素相關。本研究之混凝土配比，強塑劑添加量為水泥用量之 0.20%~0.27%，用量相對較低，對混凝土未發生延緩凝結的情況，而淨水污泥輕質骨材之添加，對混凝土凝結時間影響亦甚小。

然而淨水污泥輕質骨材拌和於混凝土後，對於空氣含量的增加與新拌混凝土單位降低有較顯著的影響。從試驗結果可以得知，空氣含量介於 2%~2.8%，略高於一般混凝土；新拌混凝土單位重則低於一般混凝土，約介於 1770 kg/m<sup>3</sup>~1800kg/m<sup>3</sup>。另外，本研究輕質混凝土配比設計乃採用較低水量，有效降低新拌混凝土的泌水量，使得六組的泌水量接近於零，換言之，可降低澆製時發生泌水的機會。

國家規範 CNS 12891 混凝土配比設計準則，於混凝土腐蝕防制中規定，不同型式構件之混凝土氯離子有最大含量之限制，預力混凝土為 0.15kg/m<sup>3</sup>，鋼筋混凝土則以 0.30kg/m<sup>3</sup> 為上限。為了探求淨水污泥輕質骨材拌和於混凝土時，對於氯離子含量是否有影響，乃於混凝土拌和後，依照 CNS 13465

試驗方法檢測氯離子含量，其檢測結果如表 5。由表中可得，各組混凝土實測氯離子含量為 0.013~0.024kg/m<sup>3</sup>，僅為規範最大含量之 10%，氯離子含量遠低於標準規定，表示均可應用於預力混凝土與鋼筋混凝土。

表 5 新拌輕質骨材混凝土之氯離子含量

組別	氯離子含量 kg/m <sup>3</sup>	備註
SL40	0.024	低於 0.15 kg/m <sup>3</sup> ，符合 CNS 規範規定
SL45	0.013	
SL50	0.013	
SL55	0.020	
SL60	0.014	
SL65	0.018	

由實驗測試可得，淨水污泥燒製而成之輕質骨材，對輕質混凝土之工作性包含拌和、澆製、飾平等，以及含氣量、單位重等性質，均在一般輕質混凝土範疇內。實務上，預拌混凝土之新拌性質仍需視添加之摻料而定，尤其是強塑劑的添加對各項性質影響為最大。因此，混凝土新拌性質，均須視所使用材料特性與藥性，經實際試拌，調整配比方可達施工之需求。

## (二)硬固混凝土性質檢測結果與分析

### 1.單位重與強度性質

淨水污泥輕質骨材取代天然粗骨材拌製為輕質混凝土，最大特色為大幅減輕混凝土單位重。為此，本研究針對六組不同水灰比之混凝土試體，進行 28 天齡期混凝土單位重之量測。

由實測混凝土試體之單位重數據可以發現，在淨水污泥輕質骨材加入後，混凝土單位重介於 1694 kg/m<sup>3</sup>~1740kg/m<sup>3</sup>，相較一般混凝土 2300 kg/m<sup>3</sup>，約可降低 22%~26%，顯

示淨水污泥輕質骨材確實可有效降低混凝土單位重，達到質輕的功效。

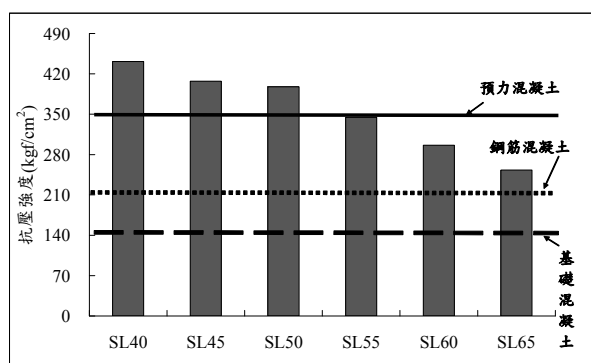


圖 3 淨水污泥輕質骨材混凝土之強度比較圖

圓柱試體以濕養法養護 28 天後，測試抗壓強度，試驗結果可繪圖比較於圖 3。由圖中可以發現，輕質混凝土之水灰比由 0.65 (SL65 組) 降低至 0.40 (SL40 組) 時，28 天抗壓強度由 250kgf/cm<sup>2</sup> 提高至 440kgf/cm<sup>2</sup>，顯示隨者水比降低抗壓強度逐漸增加，其趨勢與常重混凝土者相似。依營建工程上之應用，就淨水污泥輕質骨材混凝土之抗壓強度比較可知，一般基礎用混凝土強度多設定為 140 kgf/cm<sup>2</sup>，結構用混凝土強度要求為 210kgf/cm<sup>2</sup>，而預力混凝土多以 350 kgf/cm<sup>2</sup> 為設計強度。本研究拌製之六組混凝土強度分布在中、高等級，顯示六組配比強度，適用於一般結構用混凝土，甚至可以挑選低水灰比之配比，用於混凝土設計強度為 350 kgf/cm<sup>2</sup> 或 420 kgf/cm<sup>2</sup> 之高強度等級混凝土或預力混凝土。

依照 CNS 3691 規範規定，使用輕質骨材於結構混凝土時，其單位重與強度要求依不同單位重等級輕質混凝土，28 天抗壓強度與劈裂抗張強度有最小值之規定。六組混凝土所測得之單位重、抗壓強度與抗拉強度關係，與規範規定值如表 6 所示。

表 6 淨水污泥輕質骨材混凝土之強度與單位重關係

組別	單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		劈裂抗張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		實測值	規範值	實測值	規範值
SL40	1789	441	235	47	22
SL45	1755	407	208	42	22
SL50	1730	398	197	39	22
SL55	1714	345	190	34	21
SL60	1709	296	188	30	21
SL65	1694	253	181	26	21

由表中可以發現，單位重對應之規範抗壓強度介於 181 kgf/cm<sup>2</sup> ~ 235 kgf/cm<sup>2</sup>，而本研究之實測抗壓強度介於 250 kgf/cm<sup>2</sup> ~ 440 kgf/cm<sup>2</sup> 之間，每組配比強度均比規範值高出 1.5~2.0 倍，顯示已可符合結構用混凝土強度要求，也表示淨水污泥輕質骨材，相較一般輕質骨材，有較佳的骨材強度，可以拌製出高強度之輕質骨材混凝土，應用於高強度需求之工程混凝土上。在劈裂抗張強度方面也有相同的情形，實測值為規範值之 1.3~2.1 倍，顯示具有適當的抗張力強度。

## 2. 乾縮量

依照 CNS 3691 規範，量測結構用輕質混凝土之長度變化，可用以表示結構輕質混凝土的乾縮量。該規範規定之乾縮試體養護條件，則有別於常重混凝土者。其乾縮試體養護方式規定為試體澆製後之 7 天內，養護溫度為 24°C (23°C ± 1.7°C)、養護濕度: 100% (> 95%)，其後將試體移至 37°C (38°C ± 1.1°C) 之養護溫度，養護濕度 31% (32% ± 2%)，至 28 天量測其長度變化率，以作為混凝土試體之乾縮量。實驗室儀器的量測精度達 0.01%，7 天與 28 天齡期的實測乾縮值如表 7。



表 7 淨水污泥輕質骨材混凝土之乾縮量

齡期	7 天	28 天
SL40	-0.0020%	-0.0160%
SL45	-0.0030%	-0.0191%
SL50	-0.0046%	-0.0283%
SL55	0.0021%	-0.0171%
SL60	0.0026%	-0.0233%
SL65	0.0034%	-0.0411%
正值為膨脹、負值為收縮		

觀察實驗結果可得，輕質骨材混凝土配比之用水量為  $175 \text{ kg/m}^3$ ，水灰比為  $0.55 \sim 0.65$  者，其 7 天齡期有輕微膨脹情形；用水量  $168 \text{ kg/m}^3$ ，水灰比為  $0.50$  以下組別，自試體澆製後均即有收縮情形。反之，高水灰比、高用水量之輕質骨材混凝土，在早齡期可抑制混凝土收縮量，可能原因為輕質骨材吸收之水分，於早齡期可以釋出，補充混凝土乾燥蒸發之水量。

當齡期延長至 28 天時，各組混凝土均產生收縮情形，其中最大的收縮量為  $0.0411\%$ ，符合 CNS 規範規定「28 天乾縮值不得大於  $0.07\%$ 」。

### 3. 滲透性

混凝土滲透性試驗步驟參考 CNS 3763 所建議的方法，將試體置於  $70^\circ\text{C}$  的烘箱內充分烘乾至恆重，秤取乾重後，進行滲透水試驗。試驗時，將試體安裝於滲透試驗儀器，如圖 4。設定之水壓為  $3 \text{ kgf/cm}^2$ ，試驗時間 1 小時。然後量測滲水後之試體重量，其與乾燥重之差即為試體之總滲透水量。由試體之總滲透水量可判斷試體內之孔隙多寡；孔隙愈多者，滲透水量將愈多，也愈不利於混凝土之耐久性。

由實驗結果可得，淨水污泥輕質骨材混

凝土滲水量約在  $4.7 \text{ 公克} \sim 6.7 \text{ 公克(g)}$ ，隨者混凝土強度越高，滲水量約低。若在相同試驗條件下，一般  $210 \text{ kgf/cm}^2$  強度之混凝土，其滲透量約為  $6.0 \text{ 公克} \sim 7.0 \text{ 公克(g)}$ 。兩相比較可知，輕質骨材混凝土之防滲水能力，已可達常重混凝土水準，甚至高於一般混凝土，顯示淨水污泥輕質骨材混凝土有良好的耐久性能。



圖 4 淨水污泥輕質骨材混凝土之滲透試驗

## 五、無細輕質骨材混凝土之工程特性

### (一) 單位重與抗壓強度

本研究拌製兩組配比之無細輕質骨材混凝土，編號分別為 NL-L35 及 NL-H70。製作試體後，將之放入養生室，以濕治方式養護，待齡期達 28 天後，以  $70^\circ\text{C}$  的烘箱，將試體充分烘乾至恆重，並秤重，然後進行單位重與抗壓強度測試，其試驗方式均比照結構用輕質骨材混凝土。

無細輕質骨材混凝土單位重與抗壓強度試驗結果如表 8 所示。由表中數據可得，兩組混凝土單位重分別為  $872 \text{ kg/m}^3$  與  $1004 \text{ kg/m}^3$ ，為常重混凝土單位重  $2300 \text{ kg/m}^3$  之  $38\% \sim 43\%$ ，而亦低於多孔混凝土單位重之  $1400 \text{ kg/m}^3 \sim 2000 \text{ kg/m}^3$ 。顯示在單位重方面，由於輕質骨材的加入，使無細輕質骨材混

土更具質輕的效果，而有利於預鑄工程的吊裝等之施工作業。

表 8 淨水污泥輕質骨材混凝土之滲透性

	乾單位重 (kg/m <sup>3</sup> )	抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	28 天	7 天	28 天
NL-L35	872	22.8	33.2
NL-L70	1004	69.3	93.6

在強度性質方面，則因多孔的輕質骨材加入，使得抗壓強度明顯降低；28 天強度約介於 33kgf/cm<sup>2</sup>~94kgf/cm<sup>2</sup>，隨添漿率增加相對增加，其強度性質並未達鋪面承載 175 kgf/cm<sup>2</sup> 以上之要求，但仍可用於非結構或不承載重之構造物。若要符合高強度之鋪面混凝土使用，可考慮調整水灰比、填漿量，甚或添加部分細骨材，以提高強度。

## (二)透水性

兩組無細混凝土之透水試驗結果顯示，NL-L35 組 8 個圓柱試體的平均流量為 11323 cm<sup>3</sup>，計算之平均透水係數為 3.81 cm/sec；NL-H70 組的平均流量為 2570 cm<sup>3</sup>，計算之平均透水係數為 0.85 cm/sec。兩組配比之無細混凝土透水係數均高於 0.01 cm/s，符合高性能透水綠建材之基準<sup>[14]</sup>。另外，無細輕質骨材混凝土之透水係數，會受到配比填漿率的影響，當填漿率由 35% 提升到 70% 時，透水係數會大幅降低。換言之，吾人可以透過填漿率來調整孔隙量，從而改變無細混凝土之透水能力。

## 六、輕質混凝土隔熱性能評估

輕質骨材具有多孔特性，拌製於混凝土可有利於其隔熱性能。為此針對結構用及無

細混凝土，進行混凝土試體熱傳導性能之測定。試驗方法主要參考 CNS 7332 「隔熱材料之導熱係數測定法（平板比較法）」，將混凝土試體養生 28 天，再以 70℃ 的烘箱，將試體充分烘乾至恆重，於乾燥狀態下測試，採用熱導係數測儀如圖 5 所示。



圖 5 混凝土熱傳導測儀

混凝土熱傳導檢測的試樣，為長 25cm、寬 25cm、厚度 5cm 之方塊試體，待測之混凝土配比共有 8 組，包含結構輕質骨材混凝土 6 組、無細輕質骨材混凝土 2 組，每組檢測 3 個樣品，合計 24 個試體。經由安裝測試，獲得各組的實測熱傳導係數如表 9 所示。

由試驗結果可以得知，淨水污泥輕質骨材混凝土的熱導係數變動於 0.25~0.67 kcal/m.hr.°C；結構用混凝土則介於 0.59~0.67 kcal/m.hr.°C，無細混凝土則變動於 0.25~0.38 kcal/m.hr.°C。結構混凝土中單位重或強度低者（高水灰比者），其熱傳導係數亦隨之降低；無細混凝土則隨者著填漿率降低，增加空隙率，從而降低熱導係數，使之有利於隔熱性能。整體而言，結構輕質骨材混凝土因組成較為緻密，空隙較少，其熱傳導係數高於無細輕質骨材混凝土者。

一般建材之熱導係數彙整如表 10。將淨水污泥輕質骨材混凝土與之相比較時可以發現，結構用淨水污泥輕質骨材混凝土熱傳導係數  $k$  為  $0.78 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，低於一般混凝土之  $1.0 \text{ W/m} \cdot \text{K} \sim 1.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，顯示將其應用營建工程，可有效降低熱量傳導，達到隔熱效能。若採用無細輕質骨材混凝土，則其熱傳導係數降低至普通混凝土之 30%，可更具隔熱效率。由實驗數據，充分驗證了淨水污泥輕質骨材，再製成輕質混凝土產品，將具隔熱性能，而能達到保溫取涼的功效。

表 9 淨水污泥輕質骨材混凝土之熱傳導係數

	熱傳導係數 $\lambda$	熱傳導係數 $\kappa$
	kcal/m.hr.°C	W/m.K
SL40	0.67	0.78
SL45	0.64	0.74
SL50	0.63	0.74
SL55	0.60	0.70
SL60	0.59	0.68
SL65	0.59	0.69
NL-L35	0.25	0.29
NL-L70	0.38	0.44

表 10 各項建材之熱傳導係數

材料名稱	熱傳導係數 $k$ (W/m · K)	備註
銅	372.2	
鉛	203.3	
鐵	34.89	
花崗岩	4.220	
大理石	2.791	
砂岩	1.150~12.300	
磚	1.150	實心磚
玻璃	1.050	
混凝土	1.000~1.500	普通混凝土
水	0.667	靜水
木材	0.144	
石棉	0.038	
玻璃纖維	0.034	
聚乙烯	0.031	
空氣	0.024	靜態 10°C

## 七、結論

基於以上試驗結果與分析，可綜合出下列結論：

- (一)淨水污泥產製之輕質骨材，本身不含毒性物質且具安定性，各項性質均符合結構或隔熱混凝土用之輕質粒料標準。
- (二)以淨水污泥輕質骨材拌製砂-輕質骨材混凝土，可透過適當的配比設計，使混凝土具良好工作性，且抗壓強度可達  $440 \text{ kgf/cm}^2$ ，單位重低於  $1740 \text{ kg/m}^3$ ，乾燥收縮值低於 0.07%，且有低滲水量，成為具有質輕、高強度、高性能之優良輕質骨材混凝土。
- (三)以淨水污泥輕質骨材製作之無細混凝土 (No-Fine Concrete)，具有低單位重、低熱傳導係數，無析離現象(無坍度及無毛細水現象)，透水係數高達  $0.85 \sim 3.81 \text{ cm/sec}$ ，已達高性能透水綠建材之標準。不過，抗壓強度較低，尚不足  $175 \text{ kgf/cm}^2$ ，可考慮應用於低強度要求之構造物。
- (四)淨水污泥輕質骨材混凝土的熱導係數變動於  $0.29 \sim 0.78 \text{ kcal/m.hr.}^\circ\text{C}$ ，充分驗證了淨水污泥輕質骨材，再製成輕質混凝土時，具有優越的隔熱性能，可達到保溫取涼的功效。
- (五)以淨水污泥輕質骨材拌製的混凝土，經驗證可知，具有良好的工程性質，而可總結出，本文研發之輕質骨材適合應用為輕質混凝土之骨材。

## 參考文獻

- 1.林聖寰，「淨水污泥取代黏土作為水泥生料對卜特蘭水泥影響之研究」，國立交通大學環境

- 工程研究所碩士論文，2003。
- 2.歐陽嶠暉、許鎮龍、藍文忠，「都市污水處理廠之污泥處理與資源化再利用之研究」，第八屆下水道技術研討會論文集，第19-33頁，1998。
  - 3.紀宗男，「淨水污泥餅資源化應用於管溝回填材料之研究」，淡江大學土木工程學系碩士論文，2003。
  - 4.康世芳，「淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水場可行性評估」，台北自來水事業處委託研究計劃研究報告書，2001。
  - 5.顏聰、陳豪吉、王順元、黃中和，「自來水淨水污泥再利用成輕質骨材之可行性研究」，臺灣自來水委託研究報告，2011。
  - 6.朱進平、李篤中，「污泥處置(III)：污泥後處理」，國立台灣大學台大工程學刊，第83期，第59-81頁，2001。
  - 7.黃中和，陳豪吉，謝宗翰，「以台灣地區水庫淤泥燒製人造輕質骨材之研究」，第十八屆廢棄物處理技術研討會，2003。
  - 8.顏聰，黃兆龍，高健章等，「水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」，內政部建築研究所委託研究報告，2003。
  - 9.陳豪吉，黃中和，張明添，「水庫淤泥輕質骨材之產製」，中華輕質骨材協會會刊，創刊號，第17-26頁，2004。
  - 10.黃中和，陳豪吉，「以石材廢泥添加淨水污泥燒製輕質骨材之研究」，中華輕質骨材協會會刊，第七期，第15-25頁，2010。
  - 11.內政部建築研究所，「綠建材標章評定基準」，2007。
  - 12.行政院國家永續發展委員會，「永續發展政策綱領」，2009。
  - 13.顏聰，「土木材料」，個人發行專書，2011。

## 作者簡介

---

### 黃中和先生

現職：大漢技術學院助理教授

專長：土木工程、輕質骨材產製暨混凝土工程

### 陳豪吉先生

現職：國立中興大學教授

專長：土木工程、輕質骨材產製暨混凝土工程

### 顏聰先生

現職：國立中興大學名譽教授

專長：混凝土工程、鋼筋混凝土

### 王順元先生

現職：正修科技大學兼任助理教授

專長：輕質骨材產製暨混凝土工程、污泥再利用

# 薄膜蒸餾技術於水處理中的應用

文/黃盟舜、鐘珣菁、劉柏逸

## 摘要

由於薄膜蒸餾具備低溫熱源、常壓操作、初設成本低、分離效率高、水質接受度高及前處理需求低等優勢。近年來，以溫度差為驅動力的薄膜蒸餾技術已廣泛應用於脫鹽、淨水處理及濃縮程序中。但由於過膜通量低、熱能需求大、缺乏商業化薄膜及過膜傳輸機制複雜等缺點，使得薄膜蒸餾尚未能真正商業化應用。本文以直接接觸式薄膜蒸餾裝置進行蒸汽冷凝水的處理評估，分別採用 Sartorius 與 Millipore 所生產的商業化多孔疏水性薄膜，在不同的原水水質、溫度、流量及時間等參數條件下，對通量、產水量與產水水質的影響進行評估。由處理前後的分析結果發現，雖然薄膜蒸餾技術較不受進水品質的影響，但對於含油類的蒸汽冷凝水，建議先經由前處理將油類去除後，再進入薄膜蒸餾裝置，避免造成薄膜孔洞的阻塞。

## 一、薄膜蒸餾技術概述

近年來有機高分子薄膜已被應用於薄膜蒸餾(membrane distillation, MD)、氣體滲透、滲透蒸發、逆滲透、微過濾、超過濾、透析、電透析、薄膜萃取、薄膜吸收及薄膜氣提等先進的分離技術中。其中薄膜的分離技術是利用不同組成分在穿透薄膜速率上的差異來進行分離，而驅動物質過膜的方式則包括濃度差、電位差、溫度差或壓力差，最常見以濃度差為驅動力(driving force)的薄膜分離程序是透析技術，以電位差為驅動力

的薄膜分離程序是電透析技術，而以溫度差為驅動力的薄膜分離程序則是薄膜蒸餾技術，其中薄膜蒸餾是近年來廣受重視的技術之一。薄膜蒸餾具備有效利用低溫熱源、常壓操作、體積小、初設成本低、分離效率高、較不受進水品質(pH 與 TDS 濃度)影響及前處理程序需求低等多方面的優勢，使得薄膜蒸餾未來有機會取代傳統的蒸餾與逆滲透(RO)等技術，但目前仍處於理論與實驗室階段，尚未真正商業化應用。歸因於薄膜蒸餾仍有過膜通量低、易衰減、熱能需求大、缺乏專為薄膜蒸餾設計的商業化薄膜，且和壓力驅動薄膜分離程序相比，其過膜傳輸機制較為複雜等缺點，若能更深入瞭解高溶質濃度進料的熱、質傳機制，將有助於提升薄膜蒸餾技術的應用性<sup>[1,2]</sup>。

薄膜蒸餾技術廣泛應用在脫鹽、淨水處理及濃縮程序上，此技術於 1963 年 Bodell 首次以專利發表問世，且 Bodell 與 Weyl 積極將薄膜蒸餾技術應用在脫鹽程序上，Findley 於 1967 年發表首篇薄膜蒸餾論文探討薄膜熱傳與質傳現象，伴隨著高分子薄膜材料研發與製造技術的進步，直到 1980 年代初期，薄膜蒸餾技術於才逐漸受到矚目，相關的發表文獻也逐年增加。於 1985 年，Gore and Associates(USA), Enka AG(Germany) 與 Swedish Development Co.公司嘗試將薄膜蒸餾技術商業化，但尚未有研發出具工業規模的薄膜蒸餾程序，在學術領域方面，許多學者持續研究薄膜蒸餾技術中的薄膜材料、熱傳與質傳理論機制及處理操作條件，雖然薄

膜蒸餾技術已被熟知超過四十年並且已應用於脫鹽程序，但將其推廣至工業規模應用仍有許多待發展的空間，未來可透過調控薄膜的孔徑、孔隙度、厚度與材料微結構的設計，以提升薄膜質傳效率與薄膜分離效率，配合模組設計研發，可縮短薄膜蒸餾技術商業化的時程<sup>[3-11]</sup>。

## 二、薄膜蒸餾技術介紹

薄膜蒸餾是利用微多孔疏水性薄膜隔開高溫與低溫溶液，傳輸機制中，先使高溫進水溶液移動到疏水且非濕性的薄膜表面，以溫度梯度造成薄膜兩側流體接觸面的蒸氣壓差為趨動力，蒸氣分子經由薄膜孔洞由高溫側傳輸到低溫側，然後在低溫側凝結成液體，如圖 1 所示。

Lawson 和 Lloyd 將薄膜蒸餾裝置依其低溫產水端的技術差異分為直接接觸式薄膜蒸餾，如圖 2 (a)所示，空氣間隙式薄膜蒸餾，如圖 2 (b)所示，空氣掃掠式薄膜蒸餾，如圖 2 (c)所示，及真空式薄膜蒸餾，如圖 2 (d)所示，分別簡述如下<sup>[8,12]</sup>：

(一)直接接觸式薄膜蒸餾(direct contact membrane distillation, DCMD)

利用兩種不同的溶液直接接觸於薄膜兩側同向或逆向流動，藉由薄膜兩側的溫度差產生蒸氣壓差，驅動高溫液體的水分子於進水端蒸發，蒸氣通過薄膜並直接凝結在低溫溶液中，此種裝置簡單且操作方便，適合應用於脫鹽及水溶液濃縮等以水溶液為主的薄膜分離程序。

(二)空氣間隙式薄膜蒸餾(air gap membrane distillation, AGMD)

與直接接觸薄膜蒸餾不同之處在於薄膜與冷凝板間加入空氣間隙，進流水溶液在流動中產生的蒸氣透過薄膜直接凝結於冷凝板上，同時冷卻水在冷凝板的另一側流動帶走凝結熱，凝結後的滲透液可單獨收集，故其應用範圍較多包括製造純水、濃縮非揮發性溶質等。

(三)空氣掃掠式薄膜蒸餾(sweeping gas membrane distillation, SGMD)

進水溶液在薄膜一側流動，在另一側注入流動的氣體(通常用空氣或水蒸氣等)，將蒸氣帶走，帶離的蒸氣再經由分離器進行分離並通過外部冷凝，適合應用於溶質濃度低的溶液中。

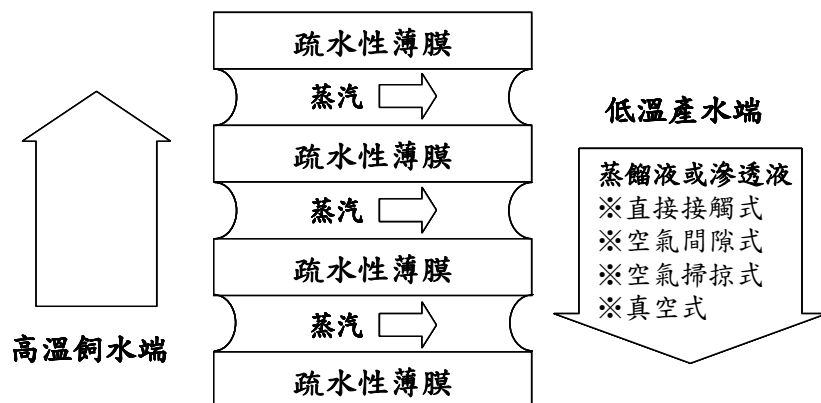


圖 1 薄膜蒸餾技術原理示意圖

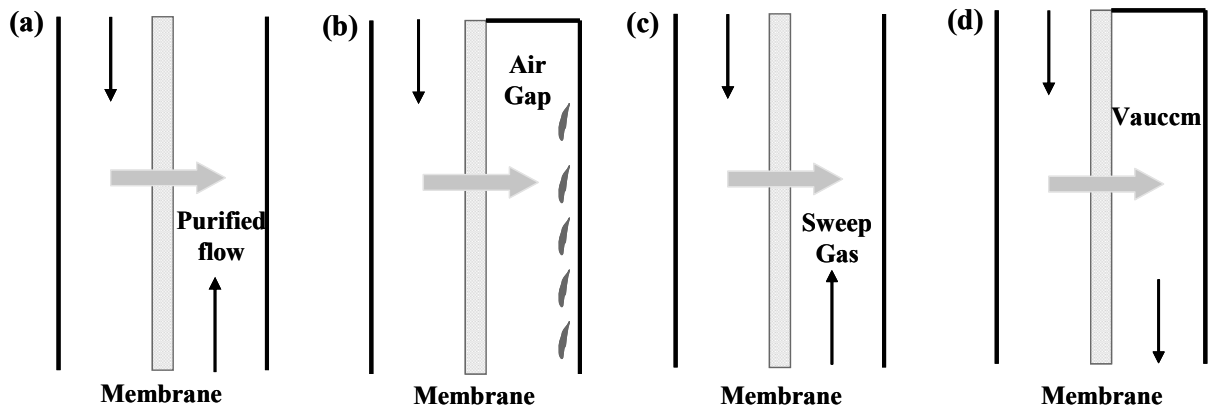


圖 2 薄膜蒸餾裝置示意圖

#### (四) 真空式薄膜蒸餾 (vacuum membrane distillation, VMD)

與空氣掃掠薄膜蒸餾相似，將流動氣體取代為真空狀態，使水汽分子更易進行傳輸，具有產水量較高的優點，過程中必須持續維持真空，較適用於有機揮發物或溶解氣體移除。

由於直接接觸式薄膜蒸餾的蒸氣冷凝程序是在模組內進行，操作較為容易，因此超過 60% 的薄膜蒸餾是使用 DCMD 系統，相較之下，空氣掃掠式與因真空式分別需加裝外部冷凝器與真空裝置，故系統設計較為繁複，成本亦較高。薄膜蒸餾裝置中分隔高、低溫溶液的薄膜屬於微孔疏水性高分子結構，其主要特性為液體無法透過而蒸氣可以穿透的半透膜，由於液體水分子本身的表面張力作用，使水分子被隔絕在薄膜單側，薄膜蒸餾即利用溶液分子在液汽介面達平衡的原理產生分離的效果，通常薄膜孔徑須在 0.1~0.5  $\mu\text{m}$  間，且薄膜疏水性要高，液體的表面張力要大。薄膜蒸餾常用的薄膜材料包括：聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF)、聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE)、聚乙烯 (polyethylene, PE) 與聚丙烯

(polypropylene, PP) 等，型式則有管式、毛細管式、中空纖維、捲繞式或平板式等。一般而言，薄膜蒸餾用薄膜特性上需具有低質傳阻力與低熱導性以減少防止薄膜兩側間的熱損，同時也要避免薄膜孔洞潤濕，同時可加強薄膜材料的疏水性，藉以維持高過膜通量。此外，薄膜材料須具熱穩定性佳及抗化學藥劑性高等特質，以應付極高低溫與高酸鹼度進料的環境<sup>[7,8]</sup>。

### 三、薄膜蒸餾技術應用

薄膜蒸餾技術以疏水性薄膜區隔兩相異溫度的液體，再藉由溫度差產生蒸氣壓差，使高溫飼水側的飽和蒸氣傳輸至低溫產水側而凝結產水，可用來產出高純度水，以及濃縮離子、膠體 (colloid) 或其他非揮發性水溶液，並可移除廢水中微量揮發性有機物 (VOCs) 與重金屬，其他領域如：脫鹽處理、水回用產業、食品業及醫藥業等皆可應用薄膜蒸餾技術。目前多數應用尚處於實驗室或小型模廠試驗階段，為求放大薄膜蒸餾技術規模達到商業化目標，尤其需要從實驗與模式化雙方面進行，重要研究議題包括：薄膜蒸餾單元的高耗能問題、熱回收、由於膜孔

濕潤及膜積垢導致長期操作的困難、缺乏特異性薄膜蒸餾薄膜與模組設計、與高投資成本等問題。其中改善薄膜蒸餾產品數量和質量以及降低耗能之方法包括：結合薄膜蒸餾單元與其他商業化程序例如蒸餾和壓力驅動(pressure-driven)薄膜方法、利用替代能源如太陽能 and 地熱、或回收核電廠產生的廢熱，以解決薄膜蒸餾單元的耗能問題。結合太陽能的低溫熱能與薄膜蒸餾技術已成為極具吸引力的構想，近年已有許多國家致力於太陽能驅動薄膜蒸餾海水淡化技術之開發，包括德國、北大西洋公約組織(NATO)、歐盟、義大利、荷蘭、日本、中國等，且部分計畫正進行示範裝置之運轉與測試<sup>[13-15]</sup>。

2006 年荷蘭 TNO 研究機構發表 Memstill® 薄膜蒸餾系統，如圖 3 所示，能有效解決現有海水淡化技術之低成本與環境衝擊問題。其優點包括：利用工業廢熱(< 90 °C)或太陽能作為熱源可降低耗能與運輸成本、不需添加化學藥劑、分離效果佳、及設備簡單且維修簡易，而其產水可作為工業製程用水(出水導電度 < 1 μS/cm)。目前已有兩個 1m<sup>3</sup>/h 規模試驗廠分別在荷蘭 Maasvlakte (E.on energy 公司)和新加坡(Keppel Seghers 公司)。荷蘭 TNO 推估 105,000 m<sup>3</sup>/d 規模海水淡化程序之產水成本，Memstill® 為 0.31 USD/m<sup>3</sup> 而傳統海水淡化技術為 0.63 USD/m<sup>3</sup>。此海水淡化技術成本將遠低於目前已商業運轉之成熟技術如逆滲透與多段蒸餾等，未來勢必成為海水淡化的主流技術之一<sup>[16,17]</sup>。

薄膜蒸餾技術可應用於海水淡化(如：逆滲透)中所產生高鹽度濃液(鹽鹵)的處理，由於薄膜蒸餾技術不受溶質濃度的影響，即使是近飽和的進流溶液皆可處理，故極有潛力

處理逆滲透所產出的濃液，可避免逆滲透濃液排放時對海洋生態造成的不良影響，若另於薄膜蒸餾濃液端搭配結晶化設備，更可有效回收固體。Mozia 等人探討直接接觸薄膜蒸餾結合光觸媒的可行性，結果發現 TiO<sub>2</sub> 光觸媒的濃度不會影響蒸餾液通量，且可去除廢水中的含氮染料。而 Cath 等人結合薄膜蒸餾技術與 NASA direct osmosis concentration(DOC)技術來處理太空船中的衛生與代謝廢水。再則，薄膜蒸餾技術除可用於分離苯與甲苯的溶劑蒸餾程序外，亦可應用在冶金業中濃縮廢酸鹼與鹽液，以及回收萃取稀土元素的酸液與金屬清洗酸液<sup>[18-20]</sup>。

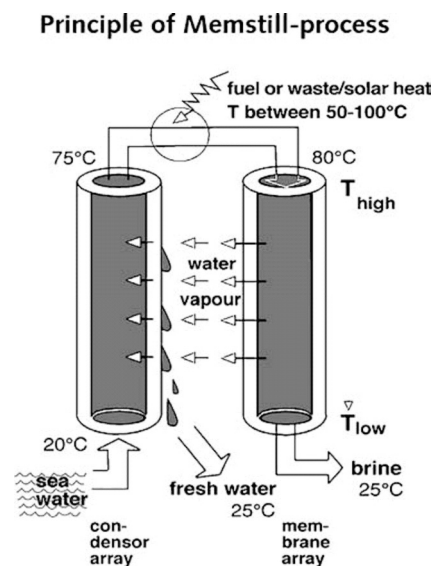


圖 3 Memstill MD 程序之原理<sup>[17]</sup>

#### 四、蒸汽冷凝水回收案例評估

由於鍋爐系統中的蒸汽冷凝水水質較為潔淨，且其溫度通常大於 60°C，可提供薄膜蒸餾技術所需的熱源，因此，冷凝水具有以薄膜蒸餾技術進行水回收的價值，再將處理後所獲得合乎水質標準的水回送至鍋爐系統，除可減少整體的用水量外，更可將所

產生的廢熱充分利用，但在輸送過程中可能會因為管線的腐蝕而受到鐵或油的污染。因此，本實驗先配置含鐵樣本液(10 ppm 的硫酸亞鐵水溶液)及含油/鐵樣本液(以 10 ppm 的硫酸亞鐵水溶液+0.1%的 92 無鉛汽油)，模擬實際的蒸汽冷凝水，模組中分別使用商業化多孔的疏水性薄膜(Sartorius 與 Millipore)，其孔徑為 0.2  $\mu\text{m}$ ，材質為聚四氟乙烯 (PTFE)，進行直接接觸式的薄膜蒸餾實驗，觀察油和鐵的去除效果。裝置中包含薄膜蒸餾實驗模組(處理面積為 49 $\text{cm}^2$ )、高溫側及低溫側溫度監控裝置與介面、高溫側及低溫側抽水機(流量設定於 140、160、180、200、220 及 240 ml/min)、控溫系統(加熱器溫度設定於 60 $^{\circ}\text{C}$  及 70 $^{\circ}\text{C}$ 、供應低溫產水槽循環水的冷凝機溫度設定為 4 $^{\circ}\text{C}$ )及秤重裝置，圖 4 為薄膜蒸餾處理評估裝置示意圖。

以單純 10 ppm 的硫酸亞鐵水溶液進行薄膜蒸餾處理所獲得的實驗結果，如圖 5 所示，隨著薄膜種類、溫度和流量的不同，當使用 Millipore 薄膜時，在任何溫度與流量的條件下，通量都較 Sartorius 為高。對於

Sartorius 和 Millipore 的薄膜而言，在 70 $^{\circ}\text{C}$  的條件下，通量都較 60 $^{\circ}\text{C}$  為高，且伴隨著流量增加，通量也相對的增加，在流量 240 ml/min 時，皆顯現出最高通量。如圖 6 所示，Millipore 和 Sartorius 薄膜在 60 $^{\circ}\text{C}$  的條件下，流量皆固定在 240 ml/min 時，隨著時間的增加，持續產出低導電度的水，稀釋原本冷凝量筒中的 RO 水，使導電度持續的降低並趨於穩定，整體導電度皆可維持在 2  $\mu\text{s}/\text{cm}$  以下。

以 10 ppm 的硫酸亞鐵水溶液加入 0.1% 的 92 無鉛汽油，進行薄膜蒸餾處理的實驗結果，如圖 7 所示，隨著薄膜種類不同，當溫度固定在 60 $^{\circ}\text{C}$  及流量固定在 240 ml/min 時，其處理通量也會有明顯的差異，當使用 Millipore 薄膜時，隨著時間的增加，通量都較 Sartorius 為高。如圖 8 示，隨著薄膜種類不同，當溫度固定在 60 $^{\circ}\text{C}$  及流量固定在 240 ml/min 時，其產水量也會有明顯的差異，當使用 Millipore 薄膜時，隨時間的增加，產水量都較 Sartorius 高。添加 0.1% 汽油時，通量與未添加差異不大，但若將添加量增加至 1%，則會造成阻塞而無法產水。

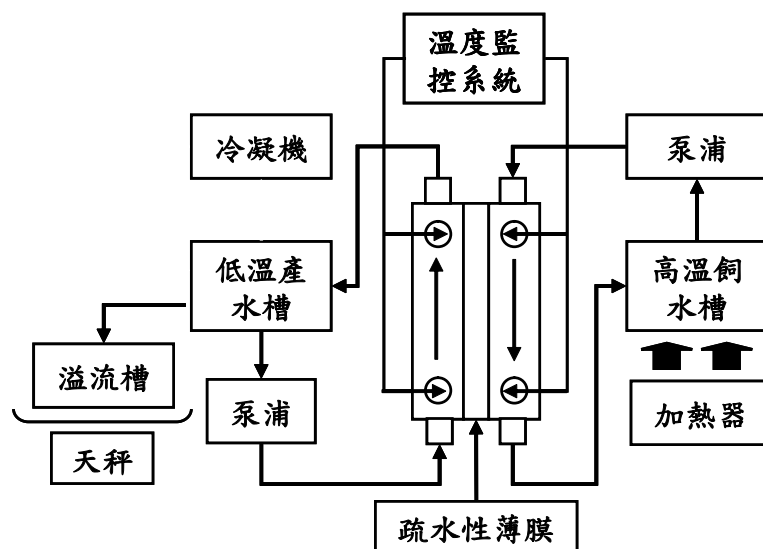


圖 4 薄膜蒸餾處理評估裝置示意圖

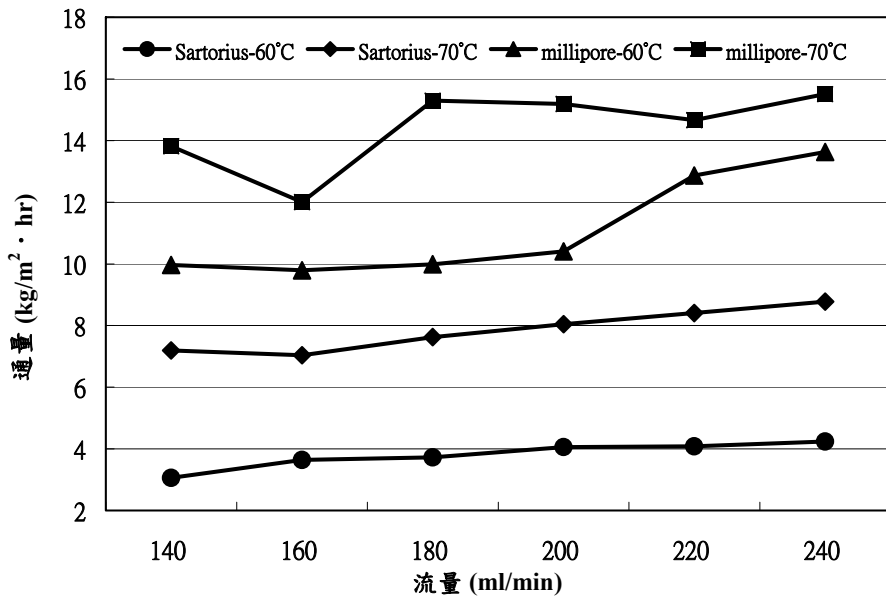


圖 5 薄膜種類、溫度與流量對通量的影響

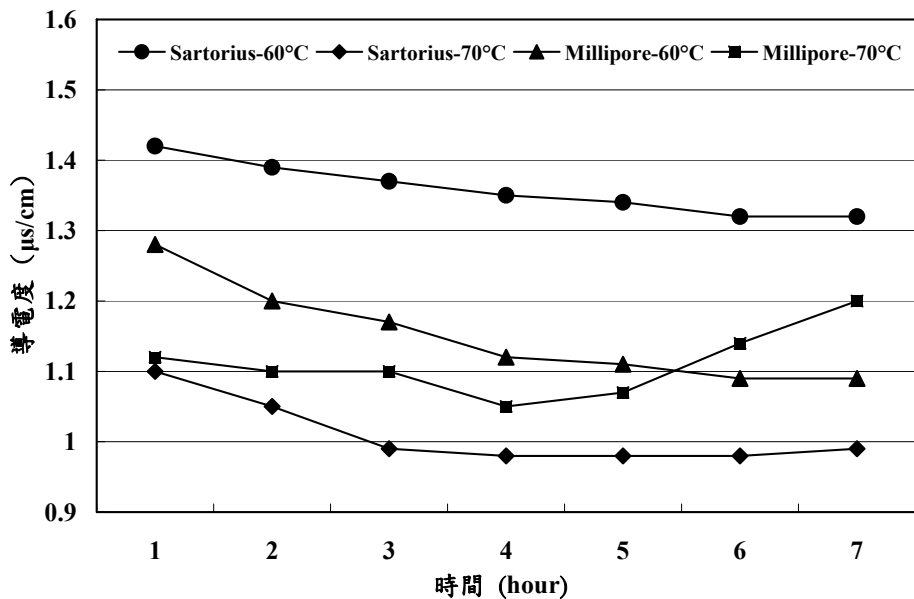


圖 6 薄膜種類、溫度與時間對導電度的影響

如圖 9 (a)所示，為實驗前之 Sartorius 薄膜的表面型態分析，由實驗後的分析中可以發現，不含汽油的硫酸亞鐵水溶液，實驗後會在薄膜表面產生結晶物，如圖 9 (b)所示。而含有汽油的硫酸亞鐵水溶液則會累積覆蓋在 Sartorius 的薄膜表面，如圖 9 (c)所示，

以及 Millipore 的薄膜表面，如圖 9 (d)所示，導致薄膜阻塞，使得通量與產水量降低。

如表 1 所示，經由薄膜蒸餾處理後確實可將水樣中的鐵離子與硫酸根阻隔於高溫進水側，不論是 Sartorius 或 Millipore 的薄膜材料，皆可以達到鐵及硫酸根的去效果。

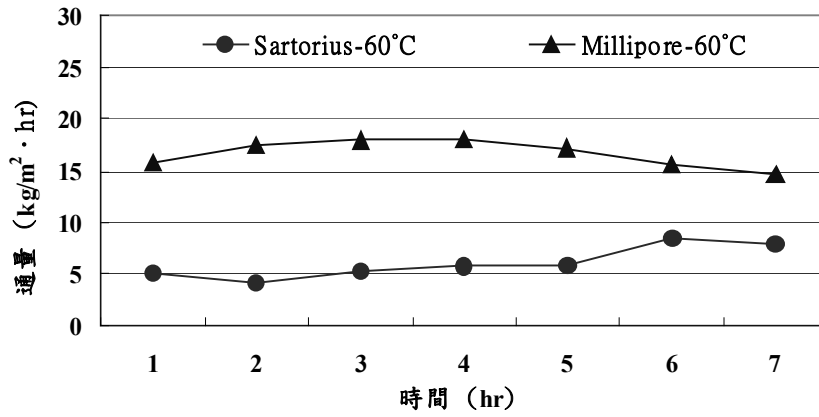


圖 7 薄膜種類與時間對通量的影響

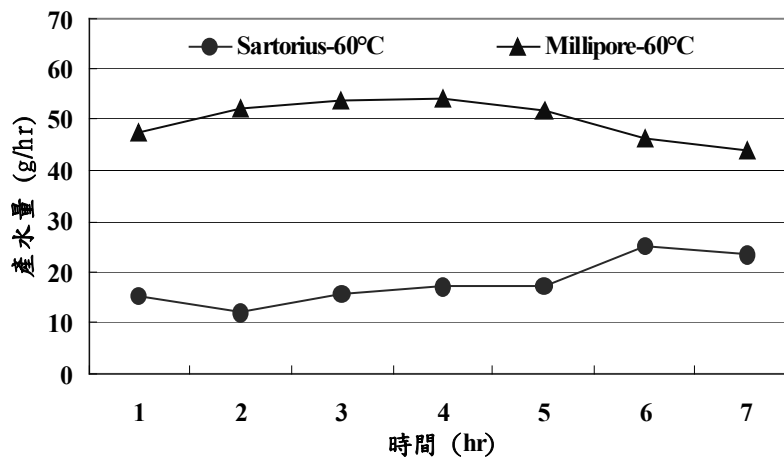


圖 8 薄膜種類與時間對產水量的影響

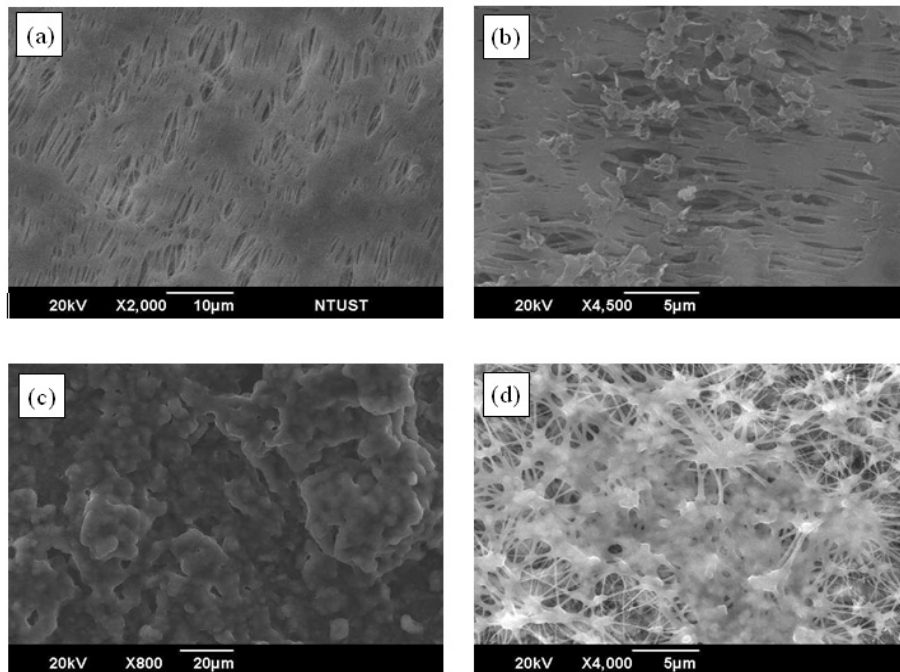


圖 9 薄膜表面型態 SEM 分析

表 1 薄膜蒸餾處理前後之水質分析

項目 \ 薄膜種類	硫酸亞鐵原液	處理後 (Sartorius)	處理後 (Millipore)
總鐵(mg/L)	8.4	0.01	ND
硫酸根(mg/L)	19.53	0.07	0.09

## 五、結論

由處理前後的水質分析結果發現，不論是 Sartorius 或 Millipore 的薄膜材料，經薄膜蒸餾技術處理後，可將水樣中大部分的鐵與硫酸根阻隔於高溫進水側，再將符合標準的產水回用做為鍋爐系統的冷凝水，可減少鍋爐的用水量。而含有油類的樣本液中的油則會累積覆蓋在疏水性薄膜的表面，當添加 0.1% 汽油時，通量與未添加差異不大，但當汽油含量達 1% 時，會造成無法產水。雖然薄膜蒸餾技術較不受進水品質的影響，但若鍋爐系統中的蒸汽冷凝水含有油類，建議先經由前處理將油類去除後，再進薄膜蒸餾裝置，避免造成薄膜孔洞阻塞，就案例而言，蒸汽冷凝水可利用本身所具有的熱源，提供薄膜蒸餾技術進行水的回收再利用，而結合廢熱或其他來源如太陽光，將是本技術擴大應用面及降低操作成本之必要手段之一。

## 誌謝

感謝技術處(經濟部)與煉製研究所(台灣中油股份有限公司)計畫支持。

## 參考文獻

- 1.Heru Susanto, Towards practical implementations of membrane distillation, *Chemical Engineering and Processing*, 50 (2011) 139-150.
- 2.Abdullah Alkudhiri, Naif Darwish, Nidal Hilal, Membrane distillation: A comprehensive review, *Desalination*, (2011) doi:10.1016/j.desal.2011.08.027
- 3.B.R. Bodell, Silicone rubber vapor diffusion in saline water distillation, United States Patent Serial No. 285,032 (1963).
- 4.B.R. Bodell, Distillation of Saline Water Using Silicone Rubber Membrane, US Patent 3,361,645 (1968).
- 5.P.K. Weyl, Recovery of Demineralized Water from Saline Waters, US Patent 3,340,186 (1967).
- 6.Findley ME. Vaporization through porous membranes. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 6 (1967) 226-37.
- 7.Mohamed Khayet, Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 164 (2011) 56-88.
- 8.K.W. Lawson, D.R. Lloyd, Membrane distillation, *J. Membr. Sci.*, 124 (1997) 1-25.
- 9.K.K. Sirkar, in: W.S. Winston Ho, K.K. Sirkar (Eds.), *Membrane Handbook*, van Nostrand Reinhold, New York, (1992) 899-904.
- 10.S.I. Andersson, N. Kjellander, B. Rodesjo, Design and field test of a new membrane distillation desalination process, *Desalination* 56 (1985) 345-354.
- 11.K. Schneider, W. Holz, R. Wollbeck, Membranes and modules for transmembrane distillation, *J. Membr. Sci.* 39 (1988) 25-42.
- 12.F.A. Banat and J. Simandl, Desalination by membrane distillation: a parametric study, *Separation Science and Technology*. 33 (1998) 201-226.
- 13.J. Walton, et al., Solar and waste heat desalination by membrane distillation, College

- of Engineering University of Texas, El Paso, (2004).
- 14.A. Kullab, A. Martin, Membrane distillation and applications for water purification in thermal cogeneration plants, Sep. Purif. Technol., 76 (3) (2011) 231–237.
15. 淡江大學能源與光電材料研究中心, <http://www2.tku.edu.tw/~epmr/prospectus.html>
- 16.G.W. Meindersma, C.M. Guijt, A.B. de Haan, Desalination and water recycling by air gap membrane distillation, Desalination, 187 (2006) 291–301.
- 17.J. H. Hanemaaijer, J. van Medevoort, A. E. Jansen, C. Dotremont, E. van Sonsbeek, T. Yuan, L. De Ryck, Memstill membrane distillation – a future desalination technology, Desalination 199 (2006) 175–176.
- 18.C.M. tun, A.G. Fane, J.T. Matheickal, R. Sheikholeslami, Membrane distillation crystallization of concentrated salts-flux and crystal formation, J. Membr. Sci. 257 (2005) 144–155.
- 19.L. Mariah, C.A. Buckley, C.J. Brouckaert, E. Curcio, E. Drioli, D. Jaganyi, D. Ramjugernath, Membrane distillation of concentrator brines – role of water activities in the evaluation of driving force, J. Membr. Sci. 280 (2006) 937–947.
- 20.S. Mozia, M. Tomaszewska and A. W. Morawski, A new photocatalytic membrane reactor (PMR) for removal of azo-dye acid red 18 from water, Applied Catalysis B, 59 (2005) 131-137.
- 21.T.Y. Cath, D. Adams, A.E. Childress, Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space II. Combined direct osmosis, osmotic distillation, and membrane distillation for treatment of metabolic wastewater, J. Membr. Sci. 257 (2005) 111–119.
- 22.S. Koonaphapdeelert, X. Tan, Z. Wu, K. Li, Solvent distillation by ceramic hollow fibre membrane contactors, J. Membr. Sci. 314 (2008) 58–66.

### 作者簡介

#### 黃盟舜先生

現職：財團法人工業技術研究院 綠能與環境研究所 研究員

專長：產業用水與廢水處理、機能材料開發與應用

#### 鐘琍菁小姐

現職：財團法人工業技術研究院 綠能與環境研究所 副研究員

專長：水及廢水處理材料開發與應用

#### 劉柏逸先生

現職：財團法人工業技術研究院 綠能與環境研究所 副研究員

專長：水及廢水處理程序設計與應用

## 簡易自來水淨水模組開發暨驗證

文/黃抒毓、沈珊米、羅家康

### 摘要

根據經濟部水利署簡易自來水場調查資料顯示，目前有半數以上之簡易自來水場無處理設備，故為改善國內簡易自來水場問題，提升簡易自來水品質，水利署乃規劃建置每日出水量達 50 噸/日以上之簡易自來水試驗模廠，並期透過本研究之實際模廠試驗，找尋最佳操作處理程序，以作為未來水場改善之參考。

### 一、簡易自來水試驗模廠規劃設計

簡易自來水模廠處理流程包括混凝、砂濾、UF 及 LPRO，各處理單元概述說明如下，模廠照片則如圖 1 所示。另配合簡易自來水場多位處於偏遠地區之特性，簡易自來水模廠亦規劃為可拆解式之處理設備方式進行模組組合，以增加其操作之機動性，更有利於後續試驗模廠移動時之方便性。

#### (一)慢混單元：

為解決高濁度取水水源之問題，模廠規劃設置一慢混單元，並採用硫酸鋁為混凝劑使用，配合攪拌機使用可增加沉降效果。

#### (二)砂濾單元：

砂濾單元乃利用其內裝的過濾材料清除水中所含之懸浮物、凝聚片狀物等，使出水達到降低 SDI 的效果；砂濾在經一段時間輸水過濾後，內裝濾材需進行反沖洗，反沖洗後即可再重新進行過濾。

#### (三)UF 超濾單元：

UF 膜過濾分子量約在 50,000~100,000 之間，但過濾所需的壓力較 RO 為低，水量則

較 RO 為大。此外，因 UF 膜具有對進水微生物、污垢幾乎完全免疫的特性，故極適合應用於 RO 的前置處理系統，用以去除水中的微生物及污垢，達到保護 RO 膜的目的。



混凝、砂濾、UF 及 LPRO 設備組裝前



混凝、砂濾、UF 及 LPRO 模廠貨櫃屋

圖 1 混凝、砂濾、UF 及 LPRO 試驗模廠

#### (四)低壓 RO 單元(LPRO)：

逆滲透法可以有效的清除溶解於水中的無機物、有機物、細菌、熱原及其它顆粒等，它可以排除細菌、病毒及各種溶解性離子等，且由於薄膜的孔徑僅有一億分之一釐米，目前僅水分子可以滲透薄膜，因此，如



果逆滲透前沒有作好前置處理則滲透膜上容易有污物堆積，例如鈣、鎂、鐵等離子，造成逆滲透功能的下降，故在低壓 RO 單元之前需要做好原水的前置處理。

## 二、簡易自來水試驗模廠試驗結果

本研究模廠試驗地點選定取用山泉水之南投縣仁愛鄉新生村簡易自來水場為主，有關模廠試驗結果，茲整理說明如後。

### (一)模廠操作處理試驗

有關各單元處理水質，如圖 2，pH 檢測結果可知，原水經過砂濾及 UF 處理單元後之水質 pH 並無太大變化，平均 pH 約 8.0；而經 RO 處理後之水質 pH 則略有下降之狀況，平均 pH 約為 6.6，其主要與 RO 過濾後之水屬於活躍的吸收媒介，與空氣接觸後更易溶解二氧化碳，因此呈偏酸性之狀況。

另於導電度部分亦有相同趨勢，如圖 3 所示，原水經過砂濾及 UF 過濾後，因無法過濾溶解水中之有機物，因此對水中導電度影響不大；而 RO 因可去除水中有機物，故其平均導電度已自原水之 134  $\mu\text{s/cm}$  降至 1.9  $\mu\text{s/cm}$ 。

於濁度檢測部分(詳如圖 4)，由於原水濁度(0.8NTU)原本即不高，經砂濾過濾後之濁度平均為 0.4NTU，經過 UF 及 RO 過濾後之濁度平均則為 0.3NTU 左右，顯示各單元對濁度之處理均有一定之效果。

在生物性檢測(大腸桿菌群與總菌落數)部分，如表 1 之彙整數據顯示，本地區之原水大腸桿菌群與總菌落數均超過自來水水質標準，砂濾因僅為過濾水中懸浮物、凝聚片狀物等物質，故其出水水質之生物性指標無法符合水質標準；經 UF 過濾及 RO 過濾後之水質則均能符合自來水水質標準，顯示

RO 處理單元實具有有效過濾水中微生物之效能。

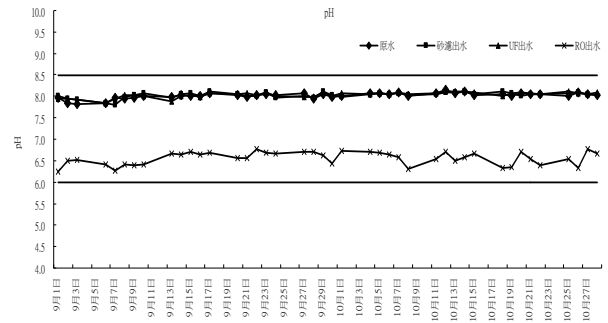


圖 2 簡易自來水模廠各單元水質 pH 檢測結果變化圖

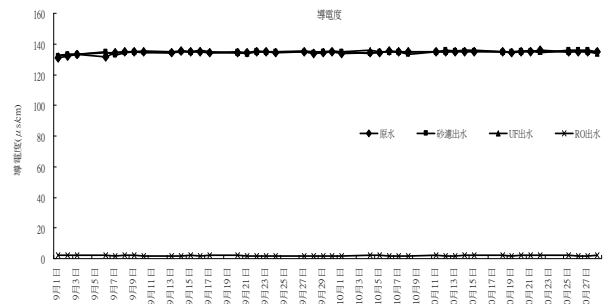


圖 3 簡易自來水模廠各單元水質導電度檢測結果變化圖

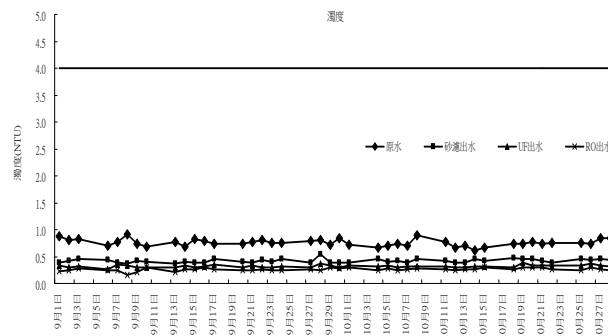


圖 4 簡易自來水模廠各單元水質濁度檢測結果變化圖

表 1 簡易自來水模廠各單元水質生物性檢測項目彙整表

處理單元	大腸桿菌群	總菌落數
	CFU/100mL	CFU/mL
原水	140	900
砂濾	120	790
UF	<1	<5
RO	<1	<5

各單元操作參數分析，由於各處理單元之操作壓力與產水量亦為模廠操作之重要分析資料，故於操作試驗期間亦記錄相關資訊，相關說明如下：

#### 1.操作壓力

根據操作紀錄之資料彙整分析可知，砂濾單元之操作壓力平均約在  $2.2\text{Kg/cm}^2$ ，操作期間之 $\Delta P$  不超過  $0.1\text{Kg/cm}^2$ ；UF 單元之操作壓力平均約在  $0.5\text{Kg/cm}^2$ ；RO 單元之操作壓力平均約為  $13.4\text{Kg/cm}^2$ ，平均 $\Delta P$  則為  $0.4\text{Kg/cm}^2$ ，且因原水水質非常乾淨，故操作期間造成過濾模組堵塞之機會不高，也因此各單元在試驗期間之壓力變化不大，如此亦表示對於乾淨水源之操作，其過濾單元需要反沖洗之時間區間可以拉長。

#### 2.產水量

根據紀錄顯示，砂濾平均產水量每小時約為 5.6 噸左右；UF 產水量每小時約為 3.9 噸；RO 每小時產水量平均則為 1.85 噸，約可符合計畫產水量每日 50 噸(約 2.0CMH)之要求。另 UF 之進水量與產水量差異不大，平均產水率約為 80%左右；而 RO 之進水量與產水量之差異則為 5.6CMH，產水率為 25%。如此顯示，由於 RO 膜之薄膜特性關係，在操作時需要較大之操作壓力，以使薄膜產生較高透過率及脫鹽率，惟在較大之壓力與較低的產水率結果來看，使用 RO 過濾所耗費動力能源亦相對較其他過濾單元多。

### (二)出水停留時間試驗

簡易自來水模廠雖可達到淨水處理之效果，惟出水後之出水停留時間與相關儲水

設施之潔淨度亦將影響後續使用水之品質安全。爰此，本研究亦分別進行 UF 及 RO 於加氯與不加氯之大腸桿菌群與總菌落數之生長情形，詳細資料如表 2 所示。

表 2 中，UF 及 RO 出流水於加氯之情況下，停留時間達 4 天均檢測不到細菌存在；RO 出流水在不加氯的情況亦檢測不到細菌生長之狀況，推測因與 RO 出流水已將水中有機與無機物濾除，形成細菌無法生長之環境，因而可維持較久之停留時間；UF 出流水(不加氯)因水中仍保有有機與無機物，故與空氣接觸後較容易有細菌孳生的反應。

### (三)初步經濟效益分析

有關未來簡易自來水模廠實際應用，其投入成本是否符合經濟效益仍為最佳處理流程之評估重點，爰此，本研究乃依實際操作現況進行模廠初步經濟效益分析，以確實瞭解實際應用成本。

由於本次試驗地點之原水水質狀況良好，故混凝單元並無啟用，因此該單元之相關成本亦不列入本次效益計算中。而在不考慮輸水與導水等管線與維護管理費用的前提下，本研究僅針對設備初設費用、各單元耗材費用與使用電費等類別，計算各項目每噸產水成本如表 3 所示。根據各分項成本加總後得知，本次模廠試驗初步經濟效益成本為每噸產水 23.3 元。此外，模廠如假設由 1 人專職看護，且專職人員每月薪資以 50,000 元之條件估算，其單場人事維護費用成本將高達 33.1 元/噸，總產水成本攀升至 56.4 元/噸。

表 2 UF 及 RO 單元出水停留時間試驗

停留時間(hr)		12	24(1 天)	36	48(2 天)	72(3 天)	96(4 天)
UF	大腸桿菌群 (CFU/100mL)	1.5*10 <sup>2</sup>	1.3*10 <sup>2</sup>	1.3*10 <sup>2</sup>	1.3*10 <sup>2</sup>	86	23
	總菌落數 (CFU/mL)	1.1*10 <sup>5</sup>	9.3*10 <sup>4</sup>	8.2*10 <sup>4</sup>	7.1*10 <sup>4</sup>	5.7*10 <sup>4</sup>	3.2*10 <sup>4</sup>
UF+氯	大腸桿菌群 (CFU/100mL)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	總菌落數 (CFU/mL)	<5	<5	<5	<5	<5	<5
RO	大腸桿菌群 (CFU/100mL)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	總菌落數 (CFU/mL)	<5	<5	<5	<5	<5	<5
RO+氯	大腸桿菌群 (CFU/100mL)	<1	<1	<1	<1	<1	<1
	總菌落數 (CFU/mL)	<5	<5	<5	<5	<5	<5

註：有效氯 2ppm。

表 3 模廠初步經濟效益分析表

品名	項目	產水成本(元/噸)	備註
簡易自來水模廠			
模廠設備費用：1,500,000 元			
初設費用	模廠設備	12.2	假設包含利息 5%與折舊 10%
耗材費用	砂濾桶濾料	2.9	假設 5 年更換
	UF 膜	2.3	假設 3 年更換
	濾芯	0.4	假設每月更換 2 支
	RO 膜	0.9	假設 3 年更換
電費	4.6	假設運轉 24 小時	
平均每噸產水成本		23.3	—

註：本表僅依目前設施現況進行實際設備、耗材等項目進行比較，不考慮輸水與導水等相關費用。

**(四)結論**

綜合上述，由於影響模廠之產水成本主要為產水量與維護費用，而由於模廠產水量不大(50 噸/日)，故在相同耗材與電費的耗費

下，產水量越小，其產水成本越高，反之水量越大則成本越低；此外，專人專場照料亦為成本上升之主要因素。而根據上述試驗結果分析，初步分析模廠優缺點如下：

(一)優點：具多道過濾單元，可有效處理原水達飲用水標準等級之出水水質(透過 RO 確實去除水中有機與無機物質)。

(二)缺點：設備體型大、操作產水成本高，且需專業人員維護。

未來如需使用模廠進行操作時，在模廠設備全自動化之規劃下，應以一人負責多場之維護較能降低成本壓力；此外，因應各水場不同特性，選擇適合之操作處理程序，亦可降低操作成本，如此才能在符合經濟條件之考量下，確實達成水質提升之目標。

### 參考文獻

- 1.新簡易水道Q&A，日本全國簡易水道協議會，80年7月。
- 2.簡易水道施設基準檢説，日本全國簡易水道協議會，80年11月。
- 3.經濟部水利處「台灣省簡易自來水場改善規劃總報告」，三冠工程顧問股份有限公司，88年12月。
- 4.經濟部水利處『「簡易自來水業務興辦作業規劃」委託技術服務契約書』，萬銘工程科技股份有限公司，89年8月。
- 5.經濟部水利處「簡易自來水業務興辦作業規劃—簡易自來水場基本資料調查結果彙編(南中區)」，萬銘工程科技股份有限公司，89年10月。
- 6.經濟部水利處「簡易自來水業務興辦作業規劃—簡易自來水場基本資料調查結果彙編(北東區)」，萬銘工程科技股份有限公司，89年10月。
- 7.經濟部水利處「簡易自來水興辦管理自治條例(範本)及簡易自來水管理系統使用手冊」，萬銘工程科技股份有限公司，90年3月。
- 8.行政院環境保護署「公共給水水質資訊系統建置暨簡易自來水水質安全管理策略計畫(2/3)」，京華工程顧問股份有限公司，99年12月。

### 作者簡介

#### 黃抒毓小姐

現職：京華工程顧問股份有限公司計劃副理

專長：環境工程

#### 沈珊米小姐

現職：京華工程顧問股份有限公司專案工程師

專長：環境工程

#### 羅家康先生

現職：京華工程顧問股份有限公司協理

專長：環境工程

# 面臨空前水資源危機之探討

文/王銘博、朱健行、呂慶元

## 摘要

水資源為支撐三大支柱經濟、社會、環境永續發展不可或缺的要素；第 3 屆世界水資源論壇部長宣言，更明載：「水是永續發展的驅動力」。近年來由於水資源發展、自來水普及，民眾已可使用安全、方便、價廉及潔淨之自來水，但因如此，水之珍貴及稀少性反被一般人所忽視。臺灣目前之安居樂業應歸功於水利界之前輩、先進在過去百年之努力，惟因近十餘年來環保意識提高，使得水資源開發工作變得越來越困難，是為水資源一大危機。

## 一、前言

就水資源事業趨勢，全球氣候變遷衍生氣候異常；乾旱洪水發生頻率有逐年上升之趨勢；可用水源日益減少，用水危機日益嚴重；為遏阻全球水源短缺、破壞、污染的現象蔓延並造成急遽惡化的空前危機趨勢，地球高峰會議通過 21 世紀議程提出未來的水資源應用：

- (一)將各行各業用水計畫整合到國家經濟、社會發展架構中，實施整合性之水資源經濟管理。
- (二)運用先進資料科技，建立完善之國家水資源資料庫，確立危機管理意識，以評估及預測可用的水量與水質。
- (三)飲用水水質之良否攸關全球人類健康，避免水質危機，與國家之經濟發展有密不可分之關係，為全世界須努力達到的目標。

(四)重視水資源之科技研究、監控與資訊交換，尤其是全球氣候變遷對水資源管理之影響與危機對策之研究，研發新的水資源技術。

## 二、全球氣候變遷趨勢

對於極端氣候發展的研究必須是具有充分說服力的證據，方能做為極端氣候長期變化的佐證，這是氣候變遷無法改變的限制。有關事件極端性的判定準則和分析極端事件隨時間變化，因有相當成熟的統計可以選用，是研究難度較小的部份。極端旱災仔細探討仍有跡可循，在台灣冬、春季節，若是無東北季風及鋒面帶來季節雨，無雨灌溉則可能有小旱跡象；梅雨季節國曆 5 月直到 6 月如無大型鋒面雨降臨，且無午後雷陣雨滋潤則有中旱可能，必須按照用水計畫實行節約用水。7、8 月若無颱風帶來充分雨量，或無裙帶掃過帶來西南氣流，則可能帶來旱災；若適時適量降下甘霖，則可解大旱；但若逢旱季久未下雨，突然颱風帶來豪雨，可能形成土石流、沖斷橋梁、水庫貯水濁度高漲，反而影響有效供水，因此極端氣候及極端旱災反成為常態現象，全然而言實非好現象。

氣候極端事件是以氣象要素符合統計極端性為定義，必須是較少發生的特殊現象，通常發生機率不能高於 10%，不僅有可能造成自來水無法適時適量的供應，且有可能造成自來水安全性及穩定度接受嚴重打擊。雨量強度增強和乾旱現象加劇，並同時

在地球不同區域頻繁出現，令人擔心的氣候變遷發展趨勢。陸地和海面上的溫度都升高，使地面和海面的水蒸氣增多，增加了大氣的水分供應量；更多的雨並不等於更多可用的水，而科學家也擔心未來大氣對流系統變得更強更集中，會造成許多地方旱期延長，雨期縮短，就如同 2009 年之八八水災帶來居民慘烈之犧牲，令人遺憾。

北極冰原面積以每 10 年 9% 速度減少，Muir Glacier, Alaska 冰川的流失嚴重，冰河與南極等地冰融、海水熱膨脹、溫度增加、蒸發散量增加及水溫增加；導致海平面上升、颱風強度增強、降雨量變化、豪雨與乾旱頻度增加、用水需求變化、溶氧降低有機分解增加；如此將導致河川流量增加、水源運用時空特性改變、水量水質特性改變，如此將衍生暴潮及海岸侵蝕，而洪峰量、土石流災害增加，亦造成缺水危機增加，及水資源環境惡化；在台灣已顯現極易造成極端洪旱災之機率，是為生態環境之危機，必須謹慎探討。

### 三、台灣地區水資源環境

台灣四面環海，位於東亞季風區，同時具有亞熱帶及島嶼兩大特性。受到季風、梅雨颱風影響，先天水環境空間分布不均；山區最高超過 8,000mm/年；平時最低不及 1,200mm/年。豐枯水年之降雨量差異達 1,500mm，季節性豐枯比南部達 9：1。平均年降雨量高達 2,500(mm/年)，為世界各國平均(973mm/年)之 2.6 倍。但因地狹人稠平均每人每年分配之水量僅約 4,074(立方公尺/人/年)，低於世界平均值之 1/5，2002~2003 年夏季旱期基本上是靠農業休耕，移撥灌溉用

水與民生工業用水短暫限水度過，而付出頗高之經濟與社會成本。

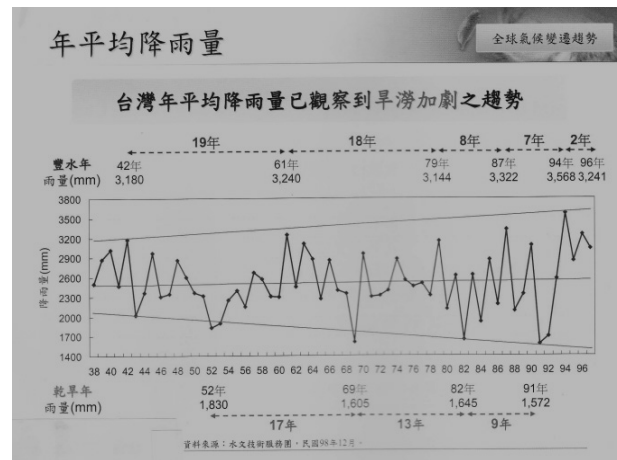


圖 1 臺灣觀察到旱澇加劇之趨勢

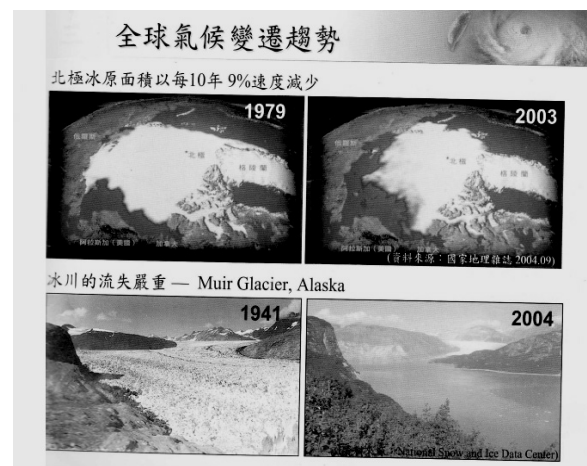


圖 2 全球氣候變遷趨勢

#### (一)地文現況

台灣本島南北縱長 394 公里，東西最大寬度處約 144 公里，地質屬沉積地質，由於台灣中央山脈南北走向，地勢陡峭、河短流急及降雨豐枯不平均，逕流時間短減少可利用水源。由於山嶺橫互，以及多高山丘陵、少平原的特殊地形，形成河川短、坡陡、流急、土壤沖刷性強的特性，造成含砂量高、集水不易，使得在颱風季期間容易發生水災。此外，長期性的雨量分布不均，和全球氣候變遷，也導致在枯水季容易發生旱災。

台灣地區年平均降雨量 2500 毫米、為世界平均值之 2.6 倍，但每人每年平均所分配的雨量卻不及世界平均的 5 分之 1。

## (二)水文現況

台灣因為經濟活動頻繁，山坡地人為不當之開發行為，破壞水土保持及污染水源，致減少水源涵養功能、降低河川天然自淨能力，嚴重影響自來水之水源、水質、水量，

因此強化水源管理、維護及保育工作，是為當務之急，水資源環境現況分述如下：

- 1.每人分配之年平均降雨量偏低
- 2.水文不確定性高
- 3.集水區上游山地質地條件不佳
- 4.颱風暴雨侵襲成災

## (三)水資源供需統計

表 1 近五年水資源供需統計表

單位:百萬立方公尺

年度	94	95	96	97	98
供水來源					
總供水量	17,958.49	17,411.73	18,576.71	17,984.95	19,069.05
地面水	12,428.95	11,894.94	12,742.07	12,152.19	13,252.44
河川引水量	7,812.70	6,726.39	8,391.05	8,724.60	8,363.15
水庫供水量	4,616.25	5,168.55	4,351.02	3,427.59	4,889.29
地下水	5,529.54	5,516.37	5,834.19	5,831.93	5,815.88
其他	0.00	0.42	0.45	0.83	0.73
總用水量	17,958.49	17,411.73	18,576.71	17,984.95	19,069.05
農業用水	12,881.53	12,238.37	13,359.04	12,960.11	14,147.57
灌溉用水	11,137.22	10,549.38	11,666.50	11,212.18	12,705.56
畜牧用水	111.15	111.09	104.83	101.16	100.45
養殖用水	1,633.16	1,577.90	1,587.71	1,646.77	1,341.56
生活用水	3,532.42	3,597.61	3,573.43	3,357.30	3,370.13
工業用水	1,544.54	1,575.75	1,644.24	1,667.54	1,551.35

## 四、永續水資源

地球的人口與科技發明在上一世紀隨著工業革命，已有突出的成長，也因此使得全球農業、工業和生活用水需求上升了 5 倍以上。按如此的需求增長率繼續下去，地球上目前可以用經濟的手段所獲得的淡水量終將不敷使用。

根據前述永續的水資源或許可以被定

義為：

- 在不危害到未來世代用水需求和生活環境的情況下能夠滿足現有需求的水資源經營。

由這個概念可以明顯看出，要達到永續水資源的境界，我們不僅要量入為出，確保未來世代仍有足夠又安全的水資源可用，也要避免過度運用工程科技漫無止盡地開發

水資源而遺禍子孫。如此將造成空前之水資源危機。

台灣的降雨在時間分布上極為不均勻。南部地區 90% 的降雨都發生在每年 5 月至 9 月期間，北部降雨也將近 65% 發生在 5 月至 9 月期間的雨季或豐水季。因此，除了總供應量要足夠之外，如何盡量將豐水季的降雨和逕流貯蓄起來以滿足旱季(或枯水季)各標的需求是台灣水資源經營的一項重要挑戰。即使我們對淡水水資源的需求不再繼續成長，臺灣水資源供需的平衡仍是極為脆弱，過去平均約每五年到十年因區域氣候異常，造成乾旱少雨或降雨時空分布上微小之變化，即會產生短期缺水或供水緊張的情況。而每次缺水都是仰賴農業用水有償的轉讓或過量抽取由前期降雨滲入山區及沖積平原的地下水而度過難關。工業用戶與一般百姓鮮有因乾旱而長期無水可用之窘境，所以皆以為台灣是不會缺水的。

隨著 1980 年代經濟的起飛，我們的工商百姓對於水資源的需求也隨之急速成長，使水資源的供應量一時趕不上需求量。在缺乏法治基礎的民主制度下，工商業發展賺錢發財重於一切氛圍快速影響了部份地區水資源的供需平衡。水利單位疲於奔命為這些新興用水大戶找水、運水或送水，但是卻不能改變水費結構以反應水源開發、保育與經營的成本。長期以來，水利單位似乎已習慣為了台灣的經濟發展到處找水，雖然在大部分時間均能滿足當代水資源的需求，但是恐怕也因此有部分地區已造成了可能危害未來世代水資源的後果，而嚴重違反了永續發展的要求。

## 五、邁向永續水資源

台灣要在未來達到永續水資源的境界，避免危機的產生，應朝至少三方向努力。

### (一)推動需求管理，爭取合理水費

我們今後一定要修正過去隨著工商業的需求而開發新水源的作法。水資源主管單位應明確訂出水資源分區可供應水量的限額，每五年修正一次，作為各標的用水計劃審核的依據，讓水資源分配利用的決策回歸水資源專業手中。

台灣自來水事業單位水價，選票政治駕凌專業，在政府長期補貼用水大戶，與百姓默不關心的多重原因下，已十多年未經調整。因水費多年無法反映成本，公營自來水公司以長期處於負債狀態，尤其以台灣自來水公司為最嚴重，若非政府的公共資源投入下，則根本無法從嚴重不足的售水收益中再提撥經費進行技術研發及汰換老舊設備，改善供水品質。

部份學者建議水事業應予以民營化經營，以較具彈性化管理，能解決負債狀態。然而水事業卻是不適宜，因水資源分配對民生經濟影響甚劇，民營化不是萬靈丹，屆時股權及利益，極易落於政客及財團手中。民營化後，董事會面對龐大管線老舊汰換及設備投資，在自負營虧下，根本無法執行，即使獲利亦被分割成財團利益。相對來說，公營自來水事業較亦能在嚴格的監督下善由新水費結構而增加的收益，提高服務品質、降低漏水率等專款專用作為，達到取之於民，用之於民。

現有長期的低水費政策也導致民眾普遍不知珍惜水資源，造成我國單位人口每日

用水量遠超過歐美日等先進國家，等同間接鼓勵浪費。水費適度提高不但可以由以價制量之手段有效達到節約用水的目的，也比較符合使用者付費之公意原則，並減少新水源開發的壓力。

應盡速擬訂每戶每月合理用水量並推動，據以收取自來水用水基本費用(其中應包括新水源開發、淨水、輸水管線維護更新、水源保育等費用)。對用水量超過基本用水量之大戶，則應重新設計累進費率大幅加收水費，以符合使用者付費的公平原則，並考慮推動旱季、雨季差別水價。

而亦可考量採用地域性質之自來水基本費率差額化，可由區域供需形式與經濟條件不同而有所差異訂定不同費率。只有如此，水資源的價值才得以適當地由水費反映出來，各行各業的用水量較易受到合理的市場規範。

## (二)改善河川水質，加強水庫保育

按環保署的河川水質標準，台灣目前仍有 45% 的河川下游河段是嚴重污染的。河川水質的嚴重已讓台灣傳統水源的開發陷於「上游水源開發阻力太大，下游水源又不能使用」的兩難困境；河川水質改善與水污染防治雖不是水利主管單位的權責，但是其改善和防治成效卻直接影響水資源開發管理。相對台灣現有的水庫應該都是國寶級的國家資產，要受到特別妥善的保護和照顧。如何讓水庫能夠長期運作下去，也是台灣水資源經營管理和永續發展的重要課題之一。

為了延長現有水庫的壽命，我們必須要再加強水庫集水區的水土保持工作，並嚴格管控集水區內各種開發行為，不但不能屈服

於關說，更要利用最新的偵測科技緊密追蹤防治成效，打擊違法。另一方面，我們應該持續在庫區抽砂，並採用空庫排砂，蓄清排混等各種可行作為來降低水庫淤沙量，以期至少能夠達到「近永續利用」的境界。水利界同仁必須認清唯有能夠合理反映水資源價值的水費，才會有蓬勃的水利產業，也才可能有永續發展的水資源。

## 六、自來水事業有效的作為

因近來的降雨不均，雨水並未有效落入水庫集水區，甚至雲彰地區因地層下陷嚴重，公部門已提出逐步封井等作為，在水資源反而減少下，僅能利用現有資源下，改善經營及管理方式。為因應降雨減少，影響台灣北部地區供水調配，因此北水處為例，其有效作為即逐步進行改善供水管網，並推動節約用水等因應，故仍能確保民眾用水無虞。主要方向為：維護水源安全；淨水管理；改善供水管網；降低供水風險，提昇備援備載，以建立容量備載與系統備援機制等作為。

在此提出北水處的部份經營績效數據及作為，供為參考。從相關數據可解讀出以北水處部份經營績效：

- (一)節約用水成效：在全力堆動節約用水下，即使用水人口數增下，每人日生活用水量逐步下降，每戶每月水費亦下降。
- (二)設備汰換成效：因管網老舊汰換、增設備援管線下，及整併給水量，雖然輸配水管長度增加，但給水管長度減小漏水量亦減少，配水量亦相對下降。
- (三)售水成本增加：但因而管線等設備的投

資情況下，售水成本亦年年增高。

(四)支援台水水量：水資源共享下，即使分屬不同之事業體，本 98 年雨量少情況下，給予台水水量支援，較各年為多，而未來淡水新市鎮開發後，用水量亦會增多。

在經營績效壓力下，最重要之水成本的增加，亦是自來水經營者之危機，對應於在水費不漲的情況下，如何維持良好供水品質及永續經營之未來課題。

## 七、水資源調配

2002 年桃竹苗地區發生嚴重枯旱，2003 年及 2004 年上半年台北、桃園、新竹、苗栗、嘉南更發生嚴重枯旱，除造成部份農業及經濟上損失外，且因實施分區輪流供水對民眾生活上亦造成極大不便。中央主管機關依此次枯旱運作協調經驗，檢討現有水源調度制度，建立災前各水資源調度區水源供需狀況之預警指標，並對應採取調度及節水措施，建構區域水資源調度機制，已達到災前預警及適時應變之目標。目前水利署已研擬「區域水資源調度機制」，整合各區水文、供水、用水、水資源設施及輸配水系統及水源供需模擬分析系統、枯旱預警作業系統及營運管理決策支援系統，並訂定水源調度標準作業程序，以加強區域水資源資訊之統一管理及統籌調度，並辦理分區及跨區聯絡供水工程計劃及地下水源涵養補注及聯合運用。

## 八、結論與建議

### (一)結論

1.為能面對因氣候變遷造成之水資源，達成永續經營；本研究經探討自來水事業，對

於管理面應推動需求管理，以企業服務回收成本，並獲得自來水法規定之盈餘報酬，才能追求社會福祉，服務人民。

2.為減少供水管網漏水，推動自來水事業主動漏水之有效管理，的確為降低供水風險之主要策略，更可從管網中找回漏損之水量，延續水生命。

### (二)建議

1.改善河川水質，加強水庫保育，台灣因工業化使得中下游污染十分嚴重，加上水污染防治與河川水質改善非水利主管單位的職權而隸屬環保署，使得水資源的永續利用更是面臨危機。水庫之管理應重「源」之確保，因此加強水庫集水區保育及治理，以恢復水庫集水區之水源涵養功能及水資源永續利用，實為政府施政之重要工作。

2.未來主要措施應為：①水庫分級②強化組織架構，建立預警協調機制③推動「水庫集水區整體治理方案」；另外配合措施為檢討相關土地使用管制規定，建立回饋機制，加強水庫淤積浚渫及排砂計劃，加強水質管理及水污染防治，強化水庫營運操作及供水緊急應變機制。

3.對於水源的質與量之確保，以落實「源」之確保；展望未來，臺灣地區「源」政策與措施需配合國土綜合開發規劃，並應在「節流與開源」及「保育與開發」間尋求平衡，以促進社會經濟繁榮且兼顧全民福祉，則空前之危機將化為轉機，有利水資源永續經營，國家社會、經濟、環境三面向永續發展。

表2 五年來經營績效概況比較表

項目	單位	民國95年	民國96年	民國97年	民國98年	民國99年
輸配水管長度	公里	3,570	3,554	3,635	3,682	3,724
用水人口數	人	3,853,890	3,852,826	3,850,709	3,842,058	3,855,609
每日配水量(含支援板新地區)	m <sup>3</sup>	2,625,317	2,556,978	2,462,888	2,520,061	2,418,428
每人每日生活用水量	公升	342	342	331	332	331
每戶每月水費	元	252.81	251.74	244.67	241.56	237.16
每度售水收入	元	8.009	8.063	8.210	8.108	8.194
每度售水成本	元	6.816	7.114	7.165	7.219	7.497
支援台水水量	千m <sup>3</sup>	114,332	108,013	103,153	133,835	114,165

## 參考文獻

1. 柳中明，全球氣候變遷之衝擊與調適策略探討，科技發展政策報導，2008年7月。
2. 楊錦釧等，氣候變遷下缺水風險與調適策略。
3. 郭翠玉，台灣氣候變遷調適政策綱領暨行動計畫，2010年7月。
4. 歐善惠、周乃昉，對「水源調配與水庫管理」之評論，2006年2月。
5. 經濟部水利署 2011.8.5 網頁資訊 <http://www.wra.gov.tw> 水資源供需統計表
6. 臺北自來水事業處 2011.8.5 網頁資訊 <http://www.twd.gov.tw> 五年來經營績效概況比較表。
7. 蔡勳雄，氣候變遷對水資源之衝擊與調適策略，2010年1月。

## 作者簡介

### 王銘博先生

現職：臺北自來水事業處供水科科长

專長：自來水供水管理、施工管理

### 朱健行先生

現職：臺北自來水事業處供水科工程員

專長：自來水規劃、供水調配

### 呂慶元先生

現職：臺北自來水事業處供水科幫工程司

專長：機電工程設計、工程管理

# 第 7 屆臺、美、日自來水設施耐震對策研討會紀實

文/林祖榕、朱聖心、林瑜禎、柯祖穎、許培中

## 一、前言

有鑒於自來水系統之重要性及近年國際間大規模地震對於都會區供水設施之破壞，美、日等先進國家對於自來水系統的耐震性能與震後應變研究一向不遺餘力。透過美國自來水協會研究基金會（America Water Works Association Research Foundation, AwwaRF）與日本自來水協會（Japan Water Works Association, JWVA）為平台，於 1999 年起，美、日兩國之專家學者每 2 年輪流主辦「美、日自來水設施耐震對策研討會」。且自第 3 屆起即有擴大參與之構想，連續邀請英國、臺灣等國之自來水協會人員或學者參加並發表論文，就自來水相關設施之系統效能分析、風險評估與管理、震後應變與恢復、震害經驗與防治技術等議題進行廣泛交流，其目的不外乎相互學習、精進職能之意。

有鑑於本研討會參與對象包含自來水協會研究人員、自來水事業單位之實務人員與學者專家，且歷屆美、日與會人員多為各地自來水事業單位之主管與資深工程師，實為自來水耐震研究與實務交流之一大盛會。今（2011）年 3 月 11 日發生規模 9.0 的東日本大地震（Great East Japan Earthquake），又逢日本於新潟主辦第 7 屆研討會，中華民國自來水協會與經濟部水利署、國家地震工程研究中心、國家災害防救科技中心、臺灣自來水公司及臺北自來水事業處，共同派員於 10 月 11 日至 15 日前往參與此屆研討會，及後續於 311 大地震後海嘯侵襲之仙台市進

行技術參訪，表 1 為研討會歷年舉辦之時間與地點。

表 1 臺、美、日自來水設施耐震對策研討會歷年舉辦之時間與地點

屆次	時間	地點
第 1 屆	1999	美國舊金山
第 2 屆	2001	日本東京
第 3 屆	2003	美國洛杉磯
第 4 屆	2005	日本神戶
第 5 屆	2007	美國奧克蘭
第 6 屆	2009	臺灣台北
第 7 屆	2011	日本新潟

## (一)第一日行程

我方代表由中華民國自來水協會許秘書長培中率領，成員包含經濟部水利署王藝峰組長；國家地震工程研究中心鍾立來博士、劉季宇博士及林祖榕博士；代表國家災害防救科技中心且任教於臺北科技大學的施邦築教授；任教於國立成功大學的蔡錦松教授；臺灣自來水公司的施澍育處長、李嘉榮經理；臺北自來水事業處工程總隊的副總工程司柯祖穎及朱聖心、林瑜禎工程司等。於 10 月 11 日上午搭乘班機自臺北抵達東京，中午並由日本自來水協會於銀座設午宴款待，下午再由東京搭乘新幹線列車抵達新潟，並下榻於旅館。

## (二)第二日活動（研討會第一日）

研討會舉辦地點是在新潟市的 Crosspal Niigata Community Center，距離下榻旅館僅需 5 分鐘行走路程。會議在新潟市副市長

Miyazaki 先生及日本自來水協會專務理事 Misono 先生致歡迎詞（如圖 1、2）後展開。並分別由日方 Kanazawa 大學的 Miyajima 教授針對 311 東日本大地震災害；美方自來水協會研究基金會的 Cline 女士針對自來水部門的企業永續計畫及我方水利署王藝峰組長針對臺灣地區自來水供水設施遭受地震災害風險管理的策略方針進行主題演講（Keynote Address）。



圖 1 新潟市副市長致歡迎詞



圖 2 日本自來水協會 Misono 先生致歡迎詞

緊接在主題演講後，隨即進行第一日的 4 個技術主題計有 22 篇論文發表及討論：第 1 個技術主題是地震風險評估及對策（Seismic Risk Assessment & Plan of Seismic Measures），我方由施邦築教授及施澍育處長進行論文發表；接著的技術主題是自來水供水設施的抗震加固（Seismic Reinforcement of

Water Supply Facilities）；第 3 個技術主題是自來水管線系統的耐震風險評估（Seismic Risk Analysis of Water Pipeline System），我方由劉季宇博士提出論文發表；第 1 日的最後 1 個技術主題是地震災後自來水供水系統的損害分析（Damage Analysis of Water Supply System after Earthquake），我方由施邦築教授及李嘉榮經理進行論文發表。

研討會的議程雖然安排的十分緊湊，但主辦單位在 Tea Break 的時間準備了豐盛的點心飲品，並由日本自來水協會所屬相關單位，對 3 月 11 日東日本大地震發生時自來水供水設施的受災情形，以壁報方式做了詳細的呈現，也提供與會代表在休息時間還能繼續進行意見交流及增進熟悉彼此的機會。

在第 1 天的論文發表及討論結束後，大家在暮色中返回旅館，日方主辦單位在旅館的餐廳準備了盛大的歡迎晚宴（如圖 3），豐盛的自助餐點、日式海鮮、麵食及師傅現場料理的握壽司，不僅使賓主盡歡，也一掃與會代表整天會議後的疲累。



圖 3 研討會第 1 日晚間的歡迎晚宴

### （三）第三日活動（研討會第二日）

本日繼續進行 5 個技術主題計有 20 篇論文發表及討論：第 1 個技術主題是地震災後復原及支援活動（Post Earthquake Recovering

and Support Activity)，我方由林瑜禎工程司及朱聖心工程司進行論文發表；第 2 個技術主題是抗震操作的改進技術 (Improvement of Seismic Resistant and Performance)，我方由蔡錦松教授進行論文發表；接著的技術主題是地震工程的研究探討 (Research and Studies of Seismic Engineering)，我方由朱聖心工程司提出論文發表；第 4 個技術主題是自來水管線更新及耐震設計 (Seismic Resistant Design and Replacement of Pipeline)，我方由林祖榕博士及鍾立來博士進行論文發表；本日的最後 1 個技術主題是綜合討論，針對 311 東日本大地震的受災情形，先由日本自來水協會針對協會在災區受災時的緊急維生供水及復舊所扮演之角色作一報告，再由東京都及大阪水道局說明東日本大地震發生時，所作的支援行動。綜合討論由日方東京市立大學的 Nagoaka 教授、美方洛杉磯市水能源部門的 Davis 先生及我方的蔡錦松教授共同主持(如圖 4)，由於此次地震不僅規模達 9.0 十分驚人，震後又引起海嘯侵襲，造成重大的人命財產損失。受災區域自來水設施的損壞與未損壞情形，及災後供水系統的復原工作、緊急維生用水的供應運作方式，都是臺、美代表關注及亟欲了解的課題，也造成討論發問欲罷不能的情形。最後是在主持人表示可以在晚餐繼續討論的情形下，才較預定時間延遲近 1 小時後結束本日的議程。

在結束了研討會的論文發表議程後，晚間大家驅車前往市區的日式餐廳，由美方及我方共同回請日方主辦單位。餐前並由美方領隊 Cline 女士及我方領隊許秘書長致謝詞，許秘書長並以美、日雙聲道語言方式致詞獲得全場熱烈回應。我方與美方與會代表

也以實際行動感謝日方主辦單位在此次會議的安排及招待。三方代表除繼續於席間討論未完的問題外，也分別學習以中、美、日、法、希伯來及台語彼此敬酒並致意並留下合影(如圖 5)。晚餐就在「乎乾啦」不絕於耳聲中熱切的結束，大家回到飯店休息準備次日的參訪行程。



圖 4 熱烈進行的綜合討論



圖 5 美與我方回請晚宴

#### (四)第四日活動 (技術參訪第一日)

早晨溫暖的陽光喚醒了我們，結束 2 天密集、緊張且充實的研討會後，今天開始有連續 2 天的技術參訪 (Technical Tour)，坐上巴士我們一行人朝著今天的目的地新潟市水道局信濃川 (Shinanogawa) 淨水廠參觀設施及防震管材實地示範展示，信濃川淨水廠為新潟市 11 座淨水場之一，位於新潟市中部靠北，於信濃川旁 (地理位置如圖 6 所



示)，我們很快到達目的地，一下車，印入眼簾的就是一台給水車及維生給水袋（如圖 7、8 所示）。給水車為 2 噸車種，不是很大，適合在小巷道間及受災嚴重區域道路搶通不寬敞的動線上作業，不致因為車輛太大無法進入災區，或致使需給水之民眾必須走很長一段路取水，另外因日本新潟冬天會下雪，雖雪季不長（1 年約 1-2 個月）但該給水車仍然直接加裝雪地防滑輪胎，而非因雪季短而只以需要時加裝鐵鏈因應。給水袋倒是令我們覺得很新鮮且有創意，以類似帆布材質之材料做成一個半圓型的袋子，其上以一支弧形鐵條做為支撐。布料質輕方便收納，平時不裝水，需要使用時可以連同送（給）水車一併運載至災區，相當便利，較鐵桶需專門配一台小貨車載運來的方便又經濟，架設好充滿水後只需在其後裝上一排水龍頭（如圖 9 所示），供水站就可以運作了，且便民度很高，光是看這兩樣設備，就可以看出日本人凡事注重細節、要求完美及持續研發的精神。

接下來輪到今天的重頭戲-防震管材介紹及操作方式演練，主要介紹 2 種目前日本廣泛使用的 PE（Polyethylene）管及 NS 管。



圖 7 緊急給水車



圖 8 維生給水袋



圖 9 接給水袋之水龍頭

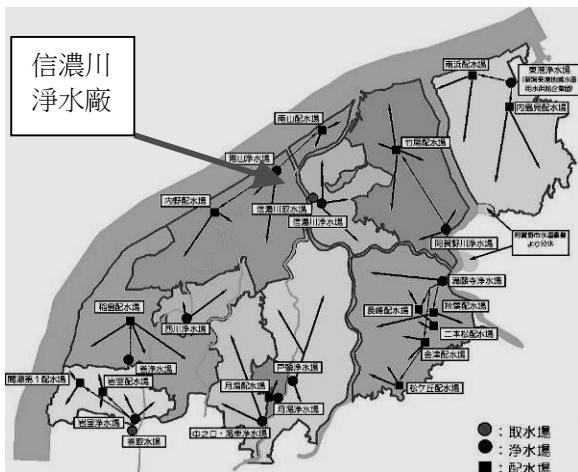


圖 6 新潟市配水系統圖

因著地理位置的關係，地震在日本的發生機率可說是相當的高，自 1995 年發生在兵庫縣南部規模 7.3 級的地震，至今年 3 月間震驚全球發生在日本東北外海三陸沖海床上規模 9.0 級且形成海嘯造成死傷慘重的大地震，統計在此期間發生規模 6.0 以上的地震就有 12 次之多，可說是相當頻繁。臺灣雖然發生具規模之地震的次數沒有日本的多，惟同屬地震帶的我們實不可以掉以輕

心，仍應本著有備無患，防範於未然的態度。

據展示人員表示，PE 管具有許多特性，耐震性、柔軟性、重量輕、耐蝕性等，雖然 PE 管在臺灣略有耳聞，惟百聞不如一見，經介紹者現場做了幾樣試驗，優點大大展現出來，著實讓與會者大開眼界。

此種特性的管材挺適合在彎曲的海岸線沿線或蜿蜒山路埋設，小角度的轉彎不需要彎頭輔助接管，PE 管可以逕行彎曲（如圖 10 試驗所示），且可以抗海水鹽分侵蝕及山區溫泉硫磺侵蝕。其耐震（如圖 11 試驗所示）耐壓（如圖 12 試驗所示）的特性更是適合地震帶，對於軟弱土層或易錯動土層埋設 PE 管實為不錯之選擇。

PE 管可以耐相當高的內部水壓，以現場所做的水壓撐破的破壞性實驗可知，其約可以承受  $68\text{kg}/\text{cm}^2$  的管內壓力（如圖 13、14 所示），且即使水壓將 PE 管撐破後，其破壞的狀況只是形成如魚嘴般的小口（如圖 15 所示）。



圖 10 PE 管可彎曲試驗

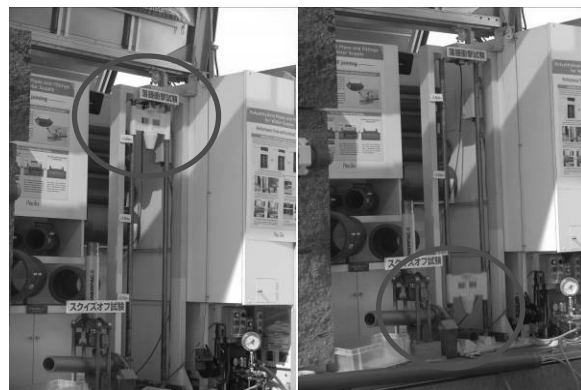


圖 11 PE 管落錘耐衝擊試驗



圖 12 PE 管耐壓試驗



圖 13 PE 管水壓試驗

依日方提供資料顯示，目前日本全國包含新潟、京都等已有 12 個都市採用 PE 管，且從 1998 年至 2010 年統計，共計埋設了 15,536 公里長的 PE 管，且每年以 PE 管為材料埋設的自來水管線長度是呈現成長趨勢，顯見 PE 管目前已成為日本主流管材，在地震發生時可將可能造成的自來水管線破壞率降到最低。



圖 14 管中注水加壓破壞實驗



圖 15 PE 管遭管內壓撐破後的情形（如魚嘴般的破洞）



圖 16 刮管器刮平管線接管處



圖 17 PE 管融接



圖 18 融化之 PE 冒出

PE 管的接管是以融接的方式操作，相當方便簡易，首先以刮管器(Peeling Tool)將欲連接之管線接頭處刮平（如圖 16 所示），刮平前先以麥克筆將需要刮平的範圍塗上記號，在刮平之部份塗上接合劑，再適當的將其插入電融接頭（Electrofusion coupler），並以夾具夾緊 2 邊管線，再將電焊機（Electrofusion control unit）之電線接上電融接頭之 2 個插座（如圖 17 所示），設定時間開始融接後，觀察融接線中間的小洞，當有融化後之 PE 由該洞冒出時（如圖 18 紅色圈圈所示），代表已接合完成，定時倒數融接時間只需約 140 秒，即可完成，在速度上稱得上快，且操作不難，其接合後的剖面圖如圖 19 所示。

日本另一種防震管材為 NS-type 接頭（joint）的 DIP，它與一般 DIP 的不同處在

於其特殊的接頭（如圖 20 所示），具有抗震功能，其橡皮膠圈裝在內部，不似 A、K 型管膠圈一部分露在外，主要是以壓圈的力量將鑄鐵管封住，不致漏水，惟目前  $\Phi 75\text{mm}$  至  $\Phi 250\text{mm}$  口徑在日本最新型已發展到 GX-type（如圖 21 所示），其膠圈仍然在內部，惟接頭卡榫設計不同，本次日本水道協會特地商請日本延性鑄鐵管協會（JDIPA）為我們示範 GX-type DIP 直管及彎管的組裝過程，並概略說明講解其特殊性及注意要點。

GX-type 接頭內有一鋼圈卡榫，附一個膠圈，準備接合之管有一圈凸出的鋼環（如圖 22 所示），其鋼圈強度非常大，接合後無法輕易脫出，協會許秘書長當場測試，完全無法拉動分毫（如圖 23 所示），且日本 DIP 協會所公佈有關 GX-type 的功能表現資料顯示（如圖 24 所示），其管線接合後可以支撐 450kN 的拉力，其力量相當於 30 部房車的重量，且以吊車吊起一長串連結完成之 GX-type 延性鑄鐵管時，仍可支撐彎曲力、剪應力…等，而不致脫落或斷裂，以展現其抗震能力。

大致了解 GX-type 的功能特性之後，日方代表接著展示在管線組裝方面的難易度及便利性。日本方面所派專任技師現場操作，首先將管線擦拭乾淨，再將膠圈裝入接頭內（如圖 25 所示），

由現場的操作可以看出這個步驟應該是個關鍵技術，要將之平均裝入接頭內是很重要的一環但確不是一件容易的事，需要技巧及熟練。將裝好後再以膠槌搥打平整，塗上專用潤滑劑後，將接管工具綁好準備接合的 2 支管後，開始扳動絞鍊，使 2 支管逐漸嵌入（如圖 26 所示），當聽到很響亮的”噹”



圖 19 PE 管接合後之剖面圖

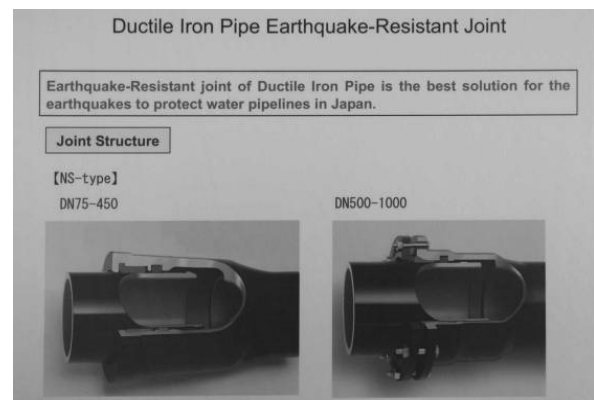


圖 20 NS-type joint

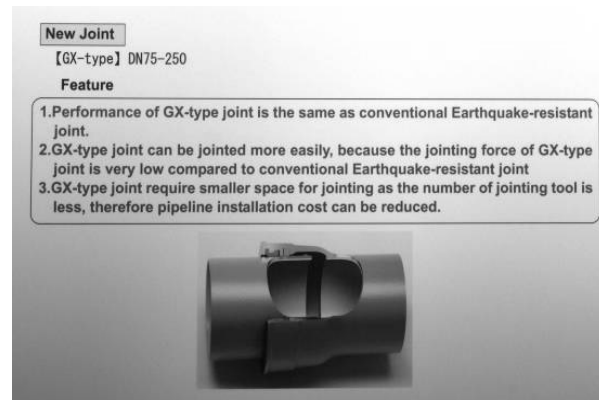


圖 21 GX-type joint



圖 22 GX-type 接頭一覽

一聲時，表示管線已經嵌入成功，凸出的鋼環已經通過卡榫鋼圈，此時若無特殊工具是無法拉開的，惟正確位置必須再前進約 6 公分左右，保持管線伸縮間距，當地震發生管線受到擠壓或拉扯時有空間可容納衝擊，日方很客氣的請參觀人員拉拉看，結果 2 位臺灣壯丁，非常努力的拉（如圖 27 所示），結果…想當然耳，當然是不動如山啦。



圖 23 測試接頭卡榫鋼圈強度

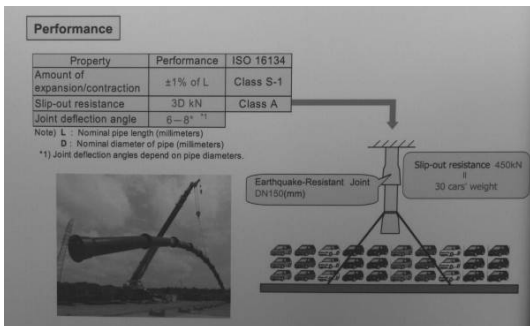


圖 24 日本 DIP 協會公佈 GX-type 功能展現資料



圖 25 膠圈裝入接頭情形



圖 26 管線接合工具及操作方式



圖 27 測試接合好的管線抗拉強度

彎管部分不似直管段以直接嵌入方式，其需要螺絲及壓圈幫助將膠圈固定密封（如圖 28 所示），惟只需 3 支螺絲（如圖 29 所示），且當螺絲鎖好後，壓圈是緊貼接頭邊緣，完全看不到膠圈露出（如圖 30 所示），相當整齊好看，想見密封度相當好。

看完日方安排的 2 種防震管材實地展示及演練後，接下來我們一行人就開始依導引

參觀新潟市水道局信濃川淨水廠的一些設施及構造。信濃川淨水廠的水源顧名思義來自信濃川，其取水口位置由廠區高處向下望即可看見約略位置（如圖 31 所示），整個廠區幾乎都以清水模外牆處理，簡潔有力。經過一般淨化程序後，較值得一提的是該廠加入高級淨水處理程序-活性炭處理，惟現場無法一窺全貌，只能觀看模型及處理過程說明了。

整個淨水廠除了極富現代感的設計之外，同時亦參與世界節能省碳的趨勢於濾水池上加裝太陽能板（如圖 32 所示），只是其太陽能發電的功率或能支應多少用電需求，可能是語言關係也可能是對方不想透露，目前沒有數據。



圖 28 彎管接管情形



圖 29 彎管壓圈只用 3 支螺絲固定

另一項較為震攝目光的設施為「高架配水塔」，一個高大聳立的圓柱體矗立在眼前（如圖 33 所示），以銀帶繞圈，越往上間隔越小，可見日本人對感官視覺的設計，設想十分周到。



圖 30 彎管裝設好後膠圈無露出



圖 31 信濃川淨水廠取水口位置



圖 32 濾水池上加裝太陽能板

高架配水塔主要目的是設計者希望以重力流的方式將經過層層過濾乾淨可飲用的水，在其頂部共分為內外 2 槽，各以 1 支  $\Phi 1000\text{mm}$  揚水管注入，再各經過 1 支  $\Phi 1000\text{mm}$  配水管線配送至供水區域（如圖 34 配水塔模型所示），而不是採取一直在管線加壓的方式輸出清水，當我們搭電梯到頂樓向周遭掃視後，我們發現他們如此做的原因是，其供水區為一望無際的平原，此高塔可說是居高臨下（如圖 35 所示）。

參觀完信濃川淨水廠的各樣設施後，我們回到同樣極富設計感的多功能會議室吃中餐，這個會議室是橄欖造型，在上述圖 32 可以尋得，中餐是日式便當，原以為不會是什麼大餐，但一打開餐盒卻再次看見日本人的創意及心思，一個 9 宮格便當確富含了 10 幾樣菜，真是營養健康又可口，此次參加研討會到此已讓我們真是收穫滿滿，下午將啟程前往今年（2011 年）3 月因日本東北外海 9 級大地震生成之海嘯重創之仙台地區。

一行人在中午用完精緻日式便當午餐後，隨即離開新潟市淨水場，乘坐巴士前往約 4 小時車程的仙台市。日本水道協會安排仙台的災區參訪行程，首站至仙台市水道局。抵達仙台市水道局已經是傍晚時分，初秋的仙台有一點涼意，沿路上的部分行道樹也轉為紅色，似乎預告秋天的來臨。抵達後一行人安排至二樓簡報室聽取簡報，如圖 36、37 所示。

此次簡報主要談及日本 311 地震後自來水設施的損壞狀況及恢復情形。整體而言，地震發生後不久，共有 437 件通報自來水管網損壞案例，平均而言，為每公里 0.1 件損



圖 33 高架配水塔



圖 34 高架配水塔模型



圖 35 由高架配水塔上望出



圖 36 仙台市水道局



圖 37 仙台市水道局聽取簡報

壞事件，但大型耐震 DIP 接頭並無任何的損壞情形發生。若又考慮供水設施的破壞，其通報件數為 1064 件，而且管徑小於 40 mm 管線損壞率最高，其中又以塑膠管 (VP) 和鉛管 (LP) 的損壞率為最高，初估整個管網維修費用約為 8 億日圓。總的來說，以日本 311 地震規模達 9 的地震而言，整體管線損壞率是相當低的，也證明日本在管線設計及

維護方面是投入相當大的心力與金錢。當地震發生後兩天，約為 230,000 戶(500,000 人)無水可用，占整體管線供水率的五成，換句話說在仙台市有一半的居民是呈無水可用的狀態。但是到 3 月 29 日後，除了海嘯侵襲的地區及一些需要長時間修復的管線，整體供水率已達 99.4%，這種修復的速度是相當驚人的。另外，一些緊急的供水設施，例如：有水車供水、設置供水站、醫療機構為供水主要優先地區等，皆在地震發生當時發揮最大的效用。其中在 3 月 31 日以前，由自來水協會組織及私人機構利用水車來運送自來水，最高載次為每天 75 車次，估計約 2800 人次受惠，總車次為 1055 車次。在地震發生當日，有 5 個緊急臨時儲水槽設立，共 19 個儲水槽遍布仙台市及 43 個帆布儲水槽設置在缺少供水設備的避難所。在地震發生後，日本仙台市水道局立即派遣 33 支隊伍進行調查，此外東京及北海道地區也皆派遣人員協助。簡報最後提及未來日本在面臨重大災害時其他所要因應事項的優先次序為：規劃管理油料運輸工作、改善加強大眾及政府之間的溝通管道、健全自來水各地組織之間的合作、運輸水源至年長者及行動不便之人士。

根據仙台市水道局所提供的資料所示，地震後下水道處理設施的災害調查共為五次。整個仙台市地震下水道處理設施損失金額，初估約 1 兆 297 億日圓，其中市有設施包含下水道、地下鐵、道路橋、學校、市營住宅等損失約 3,366 億日圓；私有設施損失約 1,446 億日圓；住家自宅損失約 2,609 億日圓；農業及養殖漁業損失約 729 億日圓；商業損失約 2,147 億日圓。整個災後預計修

復費用為約 1,500 億日圓，包含：自來水處理設備約 930 億日圓；淨水廠約 250 億日圓；管線修復約 320 億日圓。

另外，地震災後立即應對措施是非常重要的。在東日本 311 大地震發生後，日本即馬上進行災後修復調查。主要的修復調查工作為下列事項：1.管路調查，其中分為兩期調查。第一期調查在 3/12-4/13 之間，調查總長為 1,445 公尺；第二期調查在 4/12 之後，調查總長為 2,300m；2.主要中繼淨水廠的搶修，如：自然流放的第一南蒲生幹線(Φ 2,100mm)、加壓送水的第二南蒲生幹線(Φ 2,100mm)，必須達到流量每分鐘 318.72 m<sup>3</sup>之要求；3.主要壓送幹線(污水管橋，兩壓送管 Φ 1,100mm、Φ 800mm)的檢驗修理，在 4 月 1 日時兩壓送管即修復完畢；4.南蒲生污水處理廠修復；5.早期淨水簡易處理設施之設置；6.確保淨水廠的輸水機能；7.其他。而公共用水區域的水質安全，例如：1.沉澱、消毒步驟；2.把泥土、瓦礫移開以確保設備可以運作；3.最後沉澱池的泥砂清除；4.最高水質保證等也是列入震後重建之工作項目。南蒲生污水處理廠之放流水質以及水質檢測也必須達到標準值範圍。結束了仙台市水道局參訪後，已是接近晚餐時刻。一行人抵達位在市區的旅館休息片刻後，即到附近的購物商場享用當地著名的仙台牛燒烤套餐。

#### (五)第五日活動（技術參訪第二日及返程）

本日一早，在旅館享用完美味的早餐後，搭乘巴士前往南蒲生(Minamigamou)污水處理廠參訪。途中特地繞經海嘯侵襲之處，自 311 東日本大地震發生後至今近六個月，發現大部分災區已清理完畢，但仍有少數地震海嘯破壞所殘留的遺跡。污水處理廠位於離海邊

約 700 公尺處，東西向橫跨貞山嶺(即大隈之意)。此污水處理廠每日最大污水處理量為 398,900m<sup>3</sup>/日，處理人口為 716,192 人。在 311 大地震發生後，第一波海嘯於一小時後即到達，許多人員隨即跑上頂樓避難，親眼目睹污水廠受到海嘯嚴重的侵襲。靠近海邊及貞山嶺的東邊的區域，水位最高高度達為 10.5m，在貞山嶺的西邊區域，水位最高高度達 4m，許多的淨水設備皆被大海淹沒而無法運作。一抵達污水處理廠，隨即前往靠近西邊區域的廠區，雖然主體建築仍完好，但可以發現內部處理廠設備被破壞得相當嚴重，管線斷裂、扭曲，天花板塌陷，牆壁上整個混凝土塊剝落，嚴重者牆壁整個沖垮不見，如圖 38、39 所示，在者顯示當時海嘯威力是多麼驚人。一行人進入簡報室中聽取當時污水處理廠遭受海嘯侵襲的情況。

簡報中播放幾段當時海嘯來臨時污水處理廠當時的影片，相當震驚。由於污水處理廠主要建築物為鋼筋混凝土構造，樓層較高，且緊鄰貞山嶺。我們前往參觀時河川水位不高、水流平穩緩慢，如圖 40 所示。而海嘯來臨時，由污水處理廠制高點所拍攝的影片可看出，當時的情況有多麼緊急、可怕，影片中場區人員驚呼連連，還被濺起的水花打到，如圖 41 所示。



圖 38 仙台市污水處理場(照片一)



圖 39 仙台市汙水處理場(照片二)



圖 43 仙台市汙水處理廠遭海嘯嚴重破壞



圖 40 仙台市汙水處理廠旁的貞山岬



圖 44 遭海嘯破壞的淨水設備廠



圖 41 海嘯侵襲時河川的情況



圖 42 仙台市汙水處理廠聽取簡報

仙台市共有 50 座主要汙水加壓站，靠海岸的七棟加壓站皆被海嘯破壞，兩棟加壓站傾倒，附近的城鎮完全被劃為平地。由圖 42 顯示海嘯來臨時所有工作人員都站在樓頂避難，所見之處皆是湍急的海水。一些相關淨水設備也被滾滾海水破壞殆盡，如圖 43 所示。其中一棟靠近海邊淨水設備廠的一面牆剛好面向海嘯行走的方向，海嘯衝擊力之大將整面牆撞出一個高達 15 公尺大凹洞，整面牆嚴重龜裂，如圖 44 所示。淨水設備廠內部結構中，可看出鋼筋混凝土柱已呈現嚴重的挫屈而成為危樓，裡面設備也因海水浸泡過無法運作，如圖 45 所示。然而比起一般木造民房，淨水廠結構等重要基礎民生設備，多為鋼筋混凝土結構，其耐震性以及經得起海嘯衝擊的能力也比較高。相對的，在廠區的人員所得到的保護也較住在一般民宅的民眾要來得高。



結束仙台市汙水處理廠的參訪後，我們前往仙台市機場。當時日本 311 地震發生時，從新聞報導可見海嘯湧進仙台市機場(如圖 46 所示)的可怕景象仍歷歷在目。距海岸僅 1 公里的仙台機場，跑道幾乎完全被惡水淹沒，跑道被海水淹沒，飛機、汽車和巴士都被海水沖擠成堆，航班暫時取消，約 1100 人被困待援，一棟航站大廈還起火，當時海嘯湧進仙台機場高達兩層樓高，遮雨棚的左端仍有海嘯破壞的遺跡，如圖 47 所示。因為機場為主要基礎設施，有良好的耐震設計，機場所受的破壞比起一般住宅輕微許多。

前往機場時，沿路景像仍然是怵目驚心，一大片該在原地的房子，皆只剩下地面上的地基，若有幸能存留下來的，也只剩下空殼子，裡外皆殘破不堪，道路兩旁的圍欄，也被沖得東倒西歪，可以想像當時海嘯來臨時的威力有多大。

而大片農田因為海水浸泡過，也無法耕作。到現在仍然可見廢棄場堆著幾層樓高的廢棄車輛，偶而在田野中也可以發現零星的廢棄車輛，這讓人看到不禁為當時鬼哭神號的恐怖景象而感到悲淒。所幸，有些地區已有開始重建的跡象，讓我們在心裡默默地為當地居民祈福祝禱，希望當地居民可以從悲痛中堅強的站起來。圖 48、49 為目前仙台海嘯災區現狀。

結束仙台市機場的參訪後，一行人在中午前往仙台市車站跟日本、美國友人說聲珍重再見後，搭乘新幹線於下午 5 時左右抵達東京車站，再接火車至成田國際機場，經過 3 個多小時的飛行於晚上 11 點左右返抵桃園國際機場。



圖 45 淨水設備廠裡面的柱嚴重扭曲



圖 46 仙台市機場



圖 47 海嘯破壞痕跡



圖 48 海嘯破壞遺跡(一)



圖 49 海嘯破壞遺跡(二)

這一次由日本新潟市水道協會所舉辦台美日自來水研討會相當圓滿成功。在兩天的會議過程中，來自日本、美國、臺灣前輩專家針對自來水相關議題熱烈討論、交換意見，讓每位與會人士收穫良多。加上新潟市日本水道協會晚宴的盛情款待以及在小地方處處用心的日本精神，讓我們感動不已，相當值得學習。

而精心安排且派員全程陪伴仙台市的勘災行程以及新潟市自來水廠的參訪行程，皆讓我們印象深刻，也體會日本友人對於這次研討會的重視。下屆臺美日自來水研討會將在兩年後（2013 年）於美國奧克蘭舉辦，相約下次在美國和老朋友相會！

## 作者簡介

---

### 林祖榕女士

現職：國家地震工程研究中心副研究員

專長：結構耐震、管線耐震設計分析

### 朱聖心先生

現職：臺北自來水事業處副工程司

專長：自來水工程設計、施工、管考

### 林瑜禎先生

現職：臺北自來水事業處幫工程司

專長：自來水工程設計、施工

### 柯祖穎先生

現職：臺北自來水事業處工程總隊副總工程司

專長：自來水工程規劃、設計、施工、管考

### 許培中先生

現職：中華民國自來水協會秘書長

專長：自來水事業經營管理、行政管理；土木、衛工  
工程

## 中華民國自來水協會第 17 屆理、監事會第 4 次聯席會議紀錄

時間：民國 100 年 8 月 26 日（星期五）下午 3 時

地點：本會會議室(台北市長安東路二段 106 號 7 樓)

主席：陳理事長福田

出席理事：陳福田 胡南澤 郭瑞華 李公哲 王桑貴 賴文正 謝啟男 施澍育

吳振欽 蔡茂麟 高文浩 張明欽 謝堯煌 林連茂 吳陽龍 陳錦祥

黃志彬 駱尚廉 葉宣顯 王文龍 孫新惠 陳瑞忠 王池田

出席監事：李錦地 賴永森 張順莉 周盛華 林建財 呂崇德

請假理事：黃敏恭 籃炳樟 林 岳 王炳鑫 陳曼莉 吳美惠 陳宏濤

請假監事：廖宗盛 康世芳 楊豐榮

缺席理事：蘇金龍

列席人員：許培中 蔡麗嫻 李美娥 管惠嬋 謝雅婷 孫瑞嬪 施麗薰

記 錄：施麗薰

### 一、主席致詞：(略)

### 二、報告事項：

(一)祕書長綜合報告：詳如議程書面資料(略)

結論：洽悉。

(二)各種委員會工作報告：

諮議委員會報告：詳如議程書面資料(略)

結論：洽悉。

國際事務委員會： 報告人 主任委員 駱尚廉

本委員會正積極爭取 2014 年 IWA-ASPIRE 青年水專家 (YWP) 會議主辦權，並計劃於本屆東京 IWA-ASPIRE 理事會中提出計畫書，報告主辦意願，並進一步提出本協會之 YWP Chapter，相關事宜將列臨時提案詳細討論。

結論：洽悉。

會務委員會報告：詳如議程書面資料(略)

結論：洽悉。

編譯出版委員會： 報告人 主任委員 黃志彬

本會 100 年度「自來水協會會刊論文獎」推薦論文評選正著手進行中，但因初審費時

較久，明確名單預計將送交下次理監事會討論。

結論：洽悉。

(三)會務組報告：第 17 屆理、監事會第 3 次聯席會議決議案執行情形詳如議程書面資料(略)

結論：洽悉。

### 三、討論事項：

**第 1 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次

會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：本屆慶祝大會主題規劃案，提請討論。

決議：通過。

**第 2 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次

會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：為使本屆自來水節慶祝大會暨會員代表大會與自來水研究發表會，有共同主題標誌以彰顯其精神，研擬主題文宣 (logo)，提請討論。

決議：照案通過。

**第 3 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次

會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：自來水節慶祝大會暨會員代表大會與自來水研究發表會經費預算案，提請討論。

決議：1.配合 IWA-ASPIRE 青年水專家會議論文獎活動辦法，將 p.32 經費預算表論文組支出第 2 項-績優論文獎金修正如下：

(1)名額由 3 位增加為 4 位，其中 2 名為 35 歲以下年輕菁英或在校學生。

(2)獎金由 15,000 元調整為 20,000 元，即每人 5,000 元 $\times$ 4=20,000 元。

2.餘照案通過。

**第 4 案** 類別 會務 提案人：理事長 陳福田

案由：擬訂慶祝大會活動日程表暨典禮程序表，提請討論。

決議：通過。

**第 5 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次

會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：市政建設技術觀摩活動、論文發表會及晚宴規劃，提請討論。

決議：照案通過。

**第 6 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次

會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：自來水節慶祝大會國內、外來賓邀請案，國內貴賓部分敬請討論，國外貴賓擬請自來水協會理監事會建議，提請討論。

決議：1.國內部分貴賓名單依修正通過。

2.國外部分貴賓，請台水、北水各單位鼎力協助，於 11 月 17 日大會舉辦前有國外貴賓蒞臨貴單位指導時，煩請代本會口頭邀約，經理事長同意後正式邀請。

**第 7 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：有關專題演講建議人選，提請討論。

決議：通過。

**第 8 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：配合本次慶祝大會，邀請自來水業界廠商，於大會召開期間，同時展覽先進(新式)自來水相關設備及器材攤位，藉以增長會員見聞，提請討論。

決議：照案通過。

**第 9 案** 類別 會務 提案人：第 44 屆自來水節慶祝大會暨第 17 屆第 2 次會員代表大會籌備委員會主任委員 吳陽龍

案由：本年度會員、貴賓及理監事致贈紀念品案，提請討論。

決議：經全體出席理、監事討論通過紀念品選購如下：

會員紀念品：LED 手電筒組（100 元）。

貴賓、理監事紀念品：精緻米禮盒（3 斤，新臺幣 400 元）。

**第 10 案** 類別 會務 提案人：理事長 陳福田

案由：本會會務工作人員待遇擬依照行政院人事行政局核定公教人員待遇調整幅度 3% 調整，並自本（100）年 7 月 1 日起實施，請審議通過後發給。

決議：照案通過。

**第 11 案** 類別 會務 提案人：祕書長 許培中

案由：「2011 年 IWA-ASPIRE 年會」訂於 2011 年 10 月 2~6 日在日本東京舉行，本會已組團包括產、官、學各界人士共 73 人參加，其中符合補助人員共 48 人，估算約新台幣 2,475,422 元，該項經費擬動支本會 98 年度「基金-準備基金」辦理，提請討論。

決議：通過並據實核銷。

**第 12 案** 類別 會務 提案人：祕書長 許培中

案由：本會「2011 年 IWA-ASPIRE 年會」參展承租 3m×3m 攤位 3 個，所需經費包括攤位租金、展場佈置費、紀念品及翻譯人員費用估算共約新台幣 694,673 元，該項經費擬提理監事會通過後動支 98 年度「基金-準備基金」據實支付，提請討論。

決議：通過並據實核銷。

**第 13 案** 類別 會務 提案人：祕書長 許培中

案由：「2011 年第 7 屆台、美、日自來水設施耐震對策研討會」本會受邀組團赴日參加，經費不足 21 萬元，擬由本會 99 年度「基金-準備基金」項下支應，提請討論。

決議：照案通過並據實核銷。

**第 14 案** 類別 會務 提案人：諮議委員會召集人 陳福田

案由：本會本（100）年度各項表彰案，經本委員會審議結果，詳如說明，提請審定，俾於本（100）年度自來水節大會典禮中頒獎表揚。

決議：照案通過。

**第 15 案** 類別 會務 提案人：財務委員會主任委員 黃慶四

案由：為本會 101 年度事業計劃(工作綱要)草案及本會 101 年度歲入、歲出預算草案各一份，提請審議。

決議：審議通過。

**第 16 案** 類別 會務 提案人：會務委員會主任委員 許培中

案由：為申請加入為本會個人會員案，提請追認備查。(個人會員申請入會案名單如提案說明)。

決議：追認通過。

**四、臨時提案：**

**第 1 案** 類別 會務 提案人：理事長 陳福田

案由：擬新增本會抽水機認證及檢驗項目，以爭取抽水機廠商檢驗業務，增加協會檢驗收入，提請討論。

說明：1.經與抽水機廠商洽談後，對方已同意委託本會檢驗。

2.委請謝理事啟男協助，爭取抽水機廠商加入本會團體會員，並交由本會辦理抽水機檢驗業務。

決議：通過。

**第 2 案** 類別 會務 提案人：國際事務委員會主任委員 駱尚廉

案由：擬於本屆「2011 年 IWA-ASPIRE 年會」期間積極參與各項活動，以接洽、爭取 2014 年 IWA-ASPIRE 青年水專家（YWP）會議主辦權，提請討論。

說明：1.為有利爭取 2014 IWA-ASPIRE 青年水專家（YWP）會議主辦權，擬於本協會通過 YWP Chapter 如附件（請參閱第 6 頁），進一步活動資料將刊登在水協會網站上，提供會員參考。

2. YWP Chapter 包含內容如下：

(1)每年年會論文發表獎：學生或青年菁英保障名額 2 名

(2)技術參訪

(3)世界水（質）觀察日：

擬與環保署「世界水質監測日活動」合作，並已與主辦單位監資處副處長初步洽談，俟定案後將發函正式合作。

(4)技術演講與研習會

(5)學生會費：

因目前協會會費學生尚可負擔，因此暫不調整學生會費，如協會未來修改章程調高會費，將優惠學生維持原會費方案不加以調漲。

(6)青年水專家會議：

未來 YWP 相關活動資料，都將盡量發布在協會網站上提供會員參閱。

決議：通過。

**五、散會：**下午 5 時