# 主編的話

近年來由於氣候變遷所導致極端氣候事件，無論是大型豪雨洪患或大規模乾旱事件，均使全球氣候災民與災情快速攀升與加劇，臺灣亦受到嚴重衝擊而使得國內旱澇頻傳。在全世界聯手共同集思廣益，積極尋求氣候解決方案中，下水道建設轉型被視為重要選項之一；污水下水道若能轉型為能資源回收中心，則有助於大幅提升氣候變遷韌性。在資源方面，可透過雨水下水道的整合應用，強化暴雨承受能力而降低洪患發生風險；而再生水廠的建設可提供多元供水選項，於旱象時維持工業用水之穩定供應；另透過資源回收再生技術應用，可回收污水中有價物質，降低自然原物料之開採及進口需求。在能源方面，污水處理程序與所產生污泥均蘊藏大量能源回收之潛力，若能妥善加以運用，除了可降低污水處理之能源需求外，甚至可發展生產沼氣發電或是氫能清潔能源而成為再生能源供應中心，對於推動國家淨零路徑之政策具極大助益。未來以系統思維建立能資源整合型的下水道系統，已是下水道建設發展大趨勢，本期期刊冀望能透過分享國內外能資源再利用推動情形與最新技術，提供予產官學研各界參考，拋磚引玉鼓勵創意激盪與資源投入，以逐步在各自專業領域中共同落實推動新世代之下水道建設，攜手因應氣候變遷對都市環境之影響。

受到氣候變遷衝擊因應需求與能資源再利用國際大趨勢影響下，臺灣污水下水道建設也正逐步轉型為永續水資源回收中心，期刊特邀請內政部營建署下水道工程處曾淑娟處長分享「永續水資源回收中心發展願景」一文，說明臺灣接軌國際永續發展趨勢，如借鏡日本經驗嘗試創造身兼節能、創能及資源循環再利用多元功能之新型態永續水資源回收中心，並建立永續水資源回收中心之評估指標，以系統性協助水資中心提升營運成效，加速轉型以打造永續經營型水資源回收中心。

日本在全球下水道能資源技術發展上具領先地位，其發展歷程與成果值得我國借鏡與學習，因此特邀請臺灣水環境再生協會前會長張添晉特聘教授，撰文「日本都市污水處理廠能資源整合經驗分享」，分享日本水資源回收中心轉型為能資源回收中心之最新發展情形，新型態中心將可發揮節能、創能及資源循環再生高附加價值資源再利用的功能，進化成為未來智慧城市之核心。日本在 2011 年成立「下水道革新性技術事業」(B-DASH project) 計畫，並聚焦於能源化、材料化、肥料化與創新應用技術研發應用，藉由日本亮點研究成果分享，可做為我國水資源回收中心創新技術之參考。

為打造永續水資源回收中心的目標，需要先進能資源技術研發應用之支持與推廣。在國內之能資源技術研發與應用已有初步成果，可作為未來本土技術商業化應用與實廠規模應用之基礎。在資源再利用技術面向，生活污水其實蘊含大量磷資源，加上磷資源具不可再生且臺灣無自產磷礦等因素，為了確保糧食安全國內需要發展穩定磷資源供應之機制。生活污水磷回收技術已漸趨成熟，且國外已有多例實廠成功案例，特邀請國立

# 主編的話

中央大學環工所莊順興所長分享「公共污水處理廠磷資源回收再利用之潛力及技術介紹」專文，瞭解全球重要先進磷回收技術，並評估臺灣磷回收潛力高達約 5,000 公噸/年，未來在搭配適當技術應用與完善法規配套下，極具發展潛力。

在能源再利用技術面向，節能減碳邁向淨零路徑已是全球化趨勢，為瞭解國內最新相關技術發展情形，期刊特邀請中原大學薄膜技術研發中心莊清榮副主任撰寫「薄膜蒸餾技術與其應用」一文，分享薄膜蒸餾技術最新應用發展，該技術可成功大幅降低污水處理能耗需求，並可於廢污水處理「零排放」目標扮演關鍵角色。另也邀請中興大學生物產業機電工程學系施武陽教授撰文「水回收處理與能資源利用」，分享應用導入智慧化環境監測分析技術，協助處理系統有效降低水處理能耗，發展水資源中心智慧水務之應用實際案例。而在國內含氮廢污水處理標準逐步加嚴的需求下，水處理技術勢必隨之升級，期刊特邀請國立臺灣大學環境工程學研究所侯嘉洪教授撰寫「新世代生物除氮技術-膜氧傳輸生物膜反應器」一文，分享具低耗能、低污泥量、高效率、高便利性特點的膜氧傳輸生物膜反應器技術，以作為臺灣未來水處理技術升級之參考。

國內在能資源再利用國際趨勢影響下，已投入大量資源以加速下水道建設，現階段已獲得許多重要成果與經驗，可作為後續推動之參考與傳承。如強化污水廠污泥之去化與應用，本期期刊特邀請內政部營建署下水道工程處郭學文課長分享「我國公共污水處理廠污泥減量與再利用現況」一文，在積極推動污泥燃料化、材料化及肥料化等多元資源化應用下，目前已進行宜蘭縣及臺南市示範驗證案，在累積實場應用案例下已逐步建構下水污泥資源循環經濟，可促動全國公共污水處理廠邁向永續發展。此外，期刊特邀請臺北市政府工務局衛工處程培嘉處長分享「臺北市污水下水道建設運營經驗分享與展望」一文，瞭解臺北市用戶接管率已達 81.01%為全國之冠，並透過新型契約與獎勵機制等精進措施，持續協助提升污水處理效能。另邀請高雄市政府水利局蔡長展局長撰文「高雄打造 4 座再生水廠，穩定產業成長需求」，分享高雄再生水建設之重要成果，未來預計每日可供再生水達 21 萬噸，並搭配智能營管技術，可提供穩定高品質水源以吸引廠商投資進駐，創造在地就業機會及地方經濟發展，為臺灣成功推行水資源再利用重要示範案例，可作為後續各機關推動再生水之重要經驗參考。

目前正處於下水道建設轉型升級的關鍵時刻，本期下水道·水再生期刊統整國內外能資源關鍵先進技術最新發展狀況，也擘劃出我國能資源回收中心之發展願景，期望藉由本期刊之分享與推廣，可以吸引更多產官學研各界的跨領域投入與參與，以推動國家能資源技術與建設之發展，共同加速下水道建設之升級，提升臺灣氣候變遷之整體韌性。

**主要編輯　張添晉**

# 目錄

# 永續水資源回收中心發展願景

曾淑娟[1]、郭學文[2]、李國豪[3]、蔡任斌[4]、許國恩[5]、朱敬平[6]

**摘要**

隨著第六期下水道建設之推進，預計至 115 年我國公共污水下水道普及率提升至 46.5%，另因應全球氣候變遷之影響，污水下水道建設已由以往營建工程觀念，提升轉換為環保永續經營之新思維，污水下水道核心之污水處理廠除擔任污水處理角色外，應接軌國際永續發展之趨勢，以及國家循環經濟及淨零碳排等政策，有效整合污水處理廠能資源以及廠址周圍社會經濟連結，創造具節能、創能及資源循環再利用等附加價值之新型態永續水資源回收中心。本文綜整現有國內外公共污水處理廠推動具永續發展內涵之作為，提出永續水資源回收中心之要素及量化之指標構想，促使水資源回收中心達永續經營。

1.內政部營建署下水道工程處 / 處長
2.內政部營建署下水道工程處 / 課長
3.內政部營建署下水道工程處 / 幫工程司
4.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 助理研究員
5.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 組長
6.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 副主任

## 壹、前言

我國逐漸邁入已開發國家之林，下水道普及率持續增長，至 111 年 8 月公共污水下水道普及率已達 40.75%，預計至 115 年提升至 46.5%，另截至 111 年 10 月運轉中公共污水處理廠計 77 座，其中約 65%營運年期已大於 10 年，適逢國際永續發展思潮，以及政府推動國家淨零碳排轉型之時局，污水下水道建設思維將由傳統工程建設之污染管控翻轉為減碳創能之永續管理，爰營建署推動公共污水處理廠轉型為永續水資源回收中心（以下簡稱為永續水資中心），力促使污水處理廠達永續營運。

## 貳、永續水資中心發展契機

聯合國世界環境與發展委員會(World Commission on Environment and Development, WCED)於 1987 年提出「永續發展」的意義在於：「滿足當代需求的同時，不損及後代子孫滿足其自身需求」，此外，聯合國於 2015 年通過 2030 永續發展議程 17 項永續發展目標(sustainable development goals, SDGs)，其中與公共污水下水道永續營運管理及循環共生、韌性智能、節能減碳、能資源循環再利用等具高度關聯性之目標，包含 SDG6 淨水與衛生、SDG7 可負擔能源、SDG9 工業、創新基礎建設、SDG11 永續城市、SDG12 責任消費與生產、SDG13 氣候行動和 SDG17 全球夥伴等 7 項，如表 1 所示。前述永續指標一般涵蓋環境、經濟及社會等三面向之共榮發展，藉由整合能資源及周遭社區連結，達

表 1　聯合國 2030 永續發展目標中與公共污水處理廠具高度關聯性者

| 核心目標 | 內涵 |
|---|---|
| 6 淨水與衛生<br>淨水與衛生 | ● 提高水資源回收率與安全再利用率<br>● 全面實施水資源管理<br>● 保護及恢復水生態系統 |
| 7 可負擔能源<br>可負擔能源 | ● 大幅增加再生能源比例<br>● 加強國際合作，提升清潔能源研究與技術 |
| 9 工業、創新基礎建設<br>工業、創新基礎建設 | ● 發展高品質、可靠、永續、具韌性的基礎設施 |
| 11 永續城市<br>永續城市 | ● 減少災害的死亡及受影響人數<br>● 減少災害造成的 GDP 直接經濟損失 |
| 12 責任消費與生產<br>責任消費與生產 | ● 透過預防、減量、回收和再利用，減少廢棄物產生 |
| 13 氣候行動<br>氣候行動 | ● 將氣候變遷措施納入國家政策、策略與規劃之中 |
| 17 全球夥伴<br>全球夥伴 | ● 以夥伴關係的經驗和籌資策略為基礎，鼓勵和促進有效的公共、公私營和民間社會夥伴關係 |

成節能、創能及資源循環利用等附加價值之永續水資源回收中心，此係為新世紀推動公共污水處理廠維運管理及轉型之方向。

我國污水處理廠接軌國際趨勢，已陸續推動水資源、能源及資源循環再生或經濟及社會連結等，並發展污水處理廠碳盤查之技術與政策，分述如下：

一、水資源再生利用

全球水資源分配不均，污水再生利用已為全球趨勢，我國持續推動再生水供應工業區使用，鳳山水資源回收中心已於 108 年 8 月 23 日全期正式營運，其三級處理程序採快濾、UF 及 RO 程序，再生水產量達每日 4.5 萬噸，供應鄰近臨海工業區，為我國水資源循環再利用之典範。我國現階段已核定 11 座再生水廠建設計畫，預計可供應每日 28.9 萬噸的再生水，另外也規劃擴大推動再生水計畫，初步評估併同既有案件增供水量以及新增的再生水案，預期未來每日可供應超過 50 萬噸之再生水予工業區使用，穩定國內產業用水需求。

除再生水供工業用途外，放流水回收再利用亦朝向多元用途的方向來進行，包含農業灌溉、景觀澆灌、非飲用水都市雜用等用途。其中農業灌溉部份是利用氨氮濃度小於 3mg/L 之放流水納入農田灌排系統，例如桃園市大溪廠及楊梅廠以專管直接將經處理之放流水排入農田，以做為農田之澆灌用水，也持續督促地方政府宣導大眾取用回收水，應用於非接觸人體之用水。

二、能資源循環再利用

公共污水處理廠除為都市污水之處理設施，亦可作為都市中資源循環設施及再生能源生產者，例如下水污泥經材料化、燃料化或肥料化等技術轉製為再利用產品，或利用污水處理廠所在區位及收受污水特性結合太陽能、沼氣、風力及微水力發電設施等產生能源，相關案例說明如下：

1. 下水污泥資源再利用

下水污泥富含有機物且具高熱值，屬有價值之再生資源，營建署為促進國內污泥資源再利用，於宜蘭縣及臺南市執行下水污泥再利用示範驗證計畫，其中宜蘭案係經過炭化加熱爐將下水污泥製成輔助燃料，臺南案則利用造粒燒結的方式材料化製成景觀粒料；並媒合亞洲水泥股份公司與花蓮水資源回收中心合作推動下水污泥作為水泥窯之輔助燃料；此外，營建署刻正辦理下水污泥應用 CLSM 之材料化示範案，金門縣和澎湖縣等離島區域亦推動下水污泥作為土壤改良劑之評估作業中。

2. 污水處理廠之能源利用

污水處理廠因占地廣大，可以設置太

陽能板，或利用氣候特性設置風力發電設施、以及利用放流水口與承受水體之高程差設置微水力發電設施；而污水處理廠產生之污泥含大量有機質，可通過厭氧消化產生甲烷氣體，進一步收集純化後，可作為沼氣發電之燃料。

我國現已有 17 座污水處理廠設有太陽能光電板，總裝置容量達 5,610 kW ；此外亦有 12 座污水處理廠設有厭氧消化槽，如圖 1，目前規劃提升現有污水處理廠之厭氧消化槽的沼氣利用效率，並推動廚餘與污泥共消化，在提高甲烷產氣量的同時，達到協助去化廚餘的效果。

三、公共污水處理廠的淨零碳排

依據我國環保署 2020 年國家溫室氣體排放清冊資料顯示，廢棄物部門排放之二氧化碳當量約占全國溫室氣體排放量之 0.9%，其中廢（污）水處理占各部門排放 66%，換算可知約占全國 0.6%之二氧化碳排放當量。營建署為掌握公共污水處理之碳排放熱點，自 106 年迄今完成 8 座污水處理廠組織型碳盤查，各廠設計

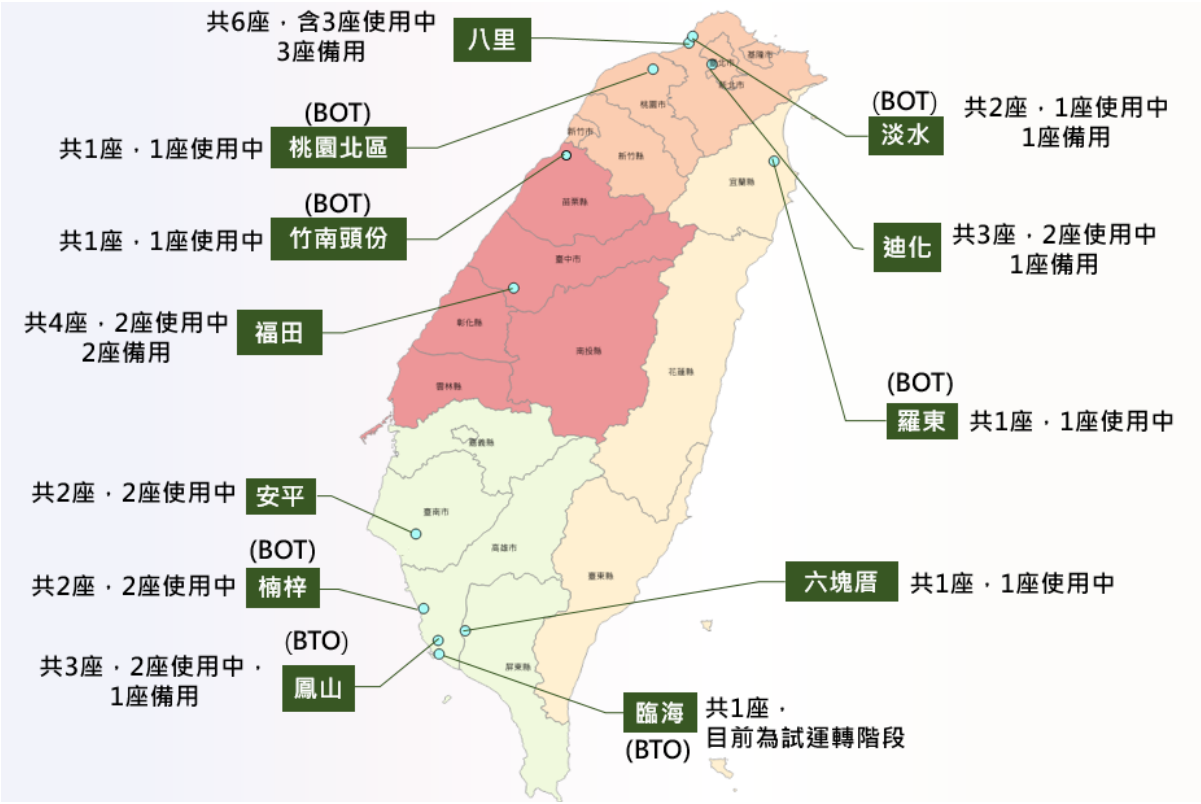



**圖 1　具厭氧消化槽之污水處理廠**

水量及處理流程如表 2，結果如圖 2 所示，其年碳排放當量介於 264-4,928 噸 $CO_{2e}$。公共污水處理廠之淨零碳排之路要從了解自身的碳排放來源做起，因此目前正研擬「公共污水處理廠溫室氣體盤查申報與管理作業要點」，供污水處理廠據以執行碳盤查作業，俾利掌握全國營運中污水處理廠碳排放量以利後續進行減碳作為。

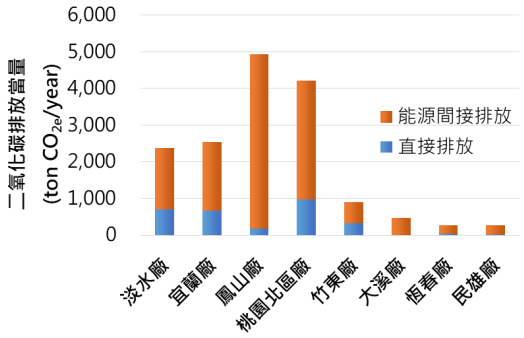



圖 2　歷年污水處理廠碳盤查結果

## 參、推動永續水資源回收中心

永續水資中心係整合水資源、能源及資源循環，並涵蓋環境、經濟、社會等發展面向之公共建設，其建構之要素如圖 3 所示，永續水資中心除應於精進污水處理能力之基礎上落實再生創能，積極促動廠內資源商品化、力求營運收支平衡，達成水資源、能源及資源循環跨域加值，並應重視社會鍵結與公眾服務，納入氣候變遷挑戰之配套機制與做法。為使永續水資中心的成效能藉由更直觀的量化數字與各界溝通，因此營建署研擬訂定永續水資源回收中心之量化指標，作為政策推展依據。說明如下：

**表 2　碳盤查污水處理廠基本資料**

| 廠名 | 設計水量(CMD) | 處理流程 |
|---|---|---|
| 淡水廠 | 56,000 | 標準活性污泥 |
| 宜蘭廠 | 30,000 | 標準活性污泥 |
| 鳳山廠 | 109,600 | MLE |
| 桃北廠 | 100,000 | TNCU(二期) |
| 竹東廠 | 10,500 | $A_2O$ |
| 大溪廠 | 3,750 | TNCU |
| 恆春廠 | 4,600 | 氧化渠 |
| 民雄廠 | 4,200 | 延長曝氣法 |

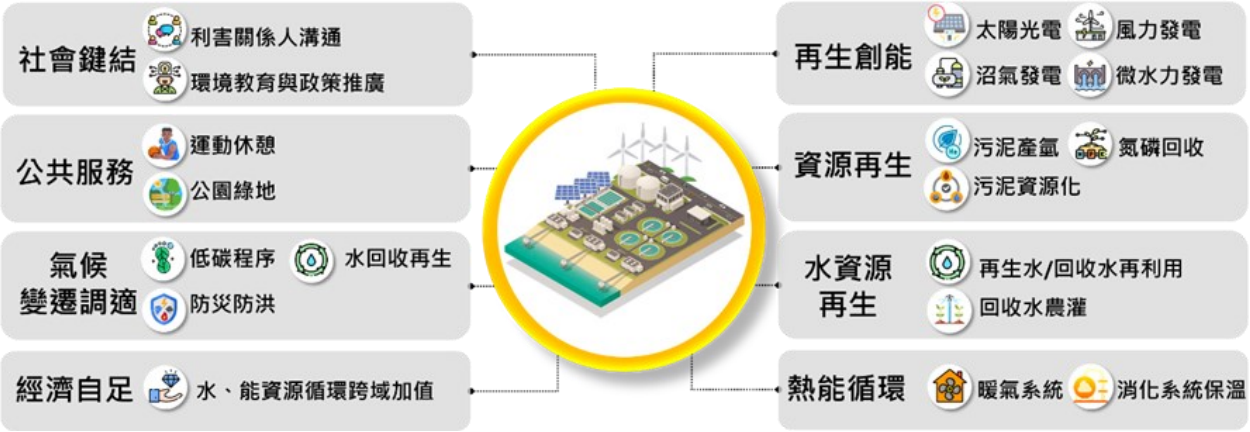



圖 3　永續水資源回收中心之要素

一、建構永續水資源回收中心評估指標

目前全球永續性報告協會及聯合國工業發展組織等之永續評估主要包含環境、經濟及社會等三面向，營建署為有效評估公共污水處理廠之永續營運成效，爰依該架構建立各面向之量化指標項目。各項目訂定原則參考聯合國環境署指標訂定建議，符合易於理解及交流、可反映重大衝擊/益處、可信賴及可取得數據、可觀察時間趨勢及可偵測其變化等 5 大原則。

二、永續水資源回收中心評估指標意涵

永續水資源回收中心評估指標之環境、經濟及社會三面向項目如圖 4 所示，其意涵分述如下：

1.　環境面向

由於污水處理係永續水資中心之核心業務，故首重環境面向之指標。環境面向重視資源節約、污染減量、再利用提升，其下分為水資源、能源、資源及減碳 4 項次指標。其中水資源次指標分為「放流水水質處理程度」、「水回收再生率」及「自來水使用量」，以彰顯永續水資源回收中心精進自身污水處理效能之努力，並呈現水資源有效利用程度與積極節水效果；能源指標係以「再生能源利用比率」進行評估，以彰顯能源自主性及減碳成效；資源指標係以「污泥資源化利用率」評估，以呈現污水處理廠之資源有效利用程度；而減碳次指標包含「綠建築與智慧建築達成率」以呈現污水處理廠之建築永續性及智慧化程度，並以「單位處理水量碳排量」次指標呈現溫室氣體之排放情形。

2.　經濟面向

永續水資中心評估指標於經濟面向著重水資源、能源及資源整合之跨域加值。其下分為三項指標，分別係「水資源循環跨域加值」、「能源循環跨域加值」及

「資源循環跨域加值」，以呈現污水處理廠之經濟發展度，藉以推動資源商品化，促動國內相關產業之發展，並達永續水資中心在營運上的收支自我平衡。

3.　社會面向

永續水資中心評估指標於社會面向之應用著重與利害關係人之互動溝通，並透過教育、敦睦鄰里，並積極因應氣候變遷挑戰，使污水處理廠在地永續經營。其下分為四項指標，分別為「辦理環境教育活動」、「資訊揭露及利害關係人溝通合作」、「回饋社區民眾開放空間」及「因應氣候變遷調適作為」等質化指標，受評估對象依指標定義項目達成次數，據以呈現永續水資中心與外界之教育訓練、資訊交流、資源共享與回饋，以及因應氣候變遷調適功能等要素。

三、永續水資源回收中心評估指標應用

永續水資中心評估指標推動後，營建署可利用指標量化數據結果，掌握各污水處理廠推動永續營運成效，促動節能減碳，據以研擬永續政策目標，並回饋至建設面推動永續水資中心；各污水處理廠亦可依評估之成效推動自身管理策略之精進，達成由下而上的自主永續發展作為，打造永續水資源回收中心。

## 肆、結論與建議

我國公共下水道建設不斷推進，隨國際永續思潮之發展，建構新型態之永續水資源回收中心已成為公共污水處理之發展目標。目前公共污水處理廠之水資源、能源及資源循環、環境教育、社會鍵結、經濟加值等成果分散於各計畫，且欠缺整合及持續更新之機制，未來推動永續水資源


圖 4　永續水資源回收中心評估指標

回收中心評估後，營建署將可有效掌握各污水處理廠推動永續營運之成效，並據以研擬政策目標，針對待精進之指標項目持續投入量能，提升既有污水處理廠於水資源、能源及資源循環利用，並促動環境、經濟及社會等面向之永續發展。此外，指標項目內涵亦可回饋至新設之永續水資源回收中心規劃，或作為各污水處理廠自主管理策略之精進參據，攜手共創水資源回收中心的永續未來。

## 參考文獻


1. 內政部營建署，全國公共污水處理廠資料管理系統 110 年度統計資料，2022。
2. 臺南市水利局，仁德水資源回收中心事業廢棄物再利用許可申請書（修正三版），2022。
3. 宜蘭縣政府，「下水污泥處理碳化示範驗證廠統包工程」成果報告書，2021。
4. 花蓮縣政府，內政部公共下水道污水處理廠事業廢棄物（有機性污泥）個案再利用許可申請書（定稿版），2020。
5. 金門縣政府，乾燥污泥再利用試驗結案報告（第一版），2022。
6. 全球永續性標準理事會，GRI 永續性報導準則，2020。
7. 內政部營建署，108-109 年度全國公共污水處理廠營運評鑑及碳排放調查計畫，2021。
8. UNIDO and UNEP, Enterprise-Level Indicators for Resource Productivity and Pollution Intensity, 2010.

# 日本都市污水處理廠能資源整合經驗分享

張添晉[1]、張廣智[2]、王立邦[3]、江謝令涵[4]

**摘要**

因應全球暖化與氣候變遷危機，全世界許多國家在經濟發展過程中，期望能達到減廢及能資源整合運用。水資源回收中心可扮演節能、創能及資源循環再生具附加價值再利用之角色，更可以是作為智慧城市的核心，國外水資源回收中心已逐漸朝向能資源整合方向規劃設計及維護管理，引進太陽能、風力、小水力及生物能源，將水中營養物質或污泥予以能源化、肥料化及材料化再利用，並從廢（污）水中回收有價之氮、磷與稀有金屬。

日本政府於早期規劃「生質能都市化」，並在 2011 年成立「下水道革新性技術事業」(B-DASH project) (Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High technology project)，各技術利用之用途分別聚焦於下列四項：能源化、材料化、肥料化與創新應用，藉由日本各水再生中心之亮點研究後期望可做為我國水資源回收中心創新技術之參考，以落實我國政府對於前瞻計畫之期許。

1.國立臺北科技大學 / 特聘教授
2.經濟部水利署 / 副總工程司
3.國立臺北科技大學 / 教授
4.中原大學 / 副教授

## 壹、前言

在擁有穩定經濟發展的情況下，污水下水道接管率與水資源回收中心之設立已成為城市發展之判斷依據。根據 2019 年 2 月統計，我國公共污水下水道普及率約為 35%，正處於快速發展階段，待未來普及率提升後，水資源回收中心在循環經濟中角色將大幅提升。一般而言，過去皆認為水資源回收過程係以電換水，雖能讓降雨分布不均之地區提供水量、水質穩定且環境負荷低之再生水，但水資源回收中心之高耗能仍有改善空間。有鑑於此，本文彙編藉蒐集日本水資源回收中心能資源整合技術及管理制度、日本國土交通省 B-DASH 示範項目及聚焦遍佈日本全國 28 座具代表性創新技術應用之水再生中心能資源整合相關資訊，多以代操作模式經營，市政單位本身投入人力極少，相當精簡，且代操作業者可將成本節省以增加公司利益作為減省能耗與提升能源自給之發展動力，間接促進水資源回收中心能資源整合效率提升，進而提供我國水資源回收中心參考，期望翻轉我國水資源回收中心以電換水之負面印象，並轉換為以綠電換綠水之新興觀念。

## 貳、日本水資源回收中心能資源合技術及管理制度

日本每年處理 146 億 $m^3$ 之污水（相當於 12,000 座東京大巨蛋體積），龐大污水處理量所消耗之電力約 70 億度，其排放之 $CO_2$ 約 621 萬噸，購電費用年約 1,100 億日圓佔整體維護管理費約 10 %，日本政府為節省污水處理所消耗之電量，研究各水再生中心能資源整合之可行性，經研究結果可了解污水處理中所產生之污泥作為燃料及肥料潛能極大，污泥固體物中有機成份佔 80 %，適合作為能源及農地利用，無機成份則可作為建設資材利用，日本污水下水道及其衍生之能源與資源如圖 1 所示。

## 參、日本國土交通省 B-DASH 示範項目

為了解日本政府針對污水下水道及水回收再生中心創新技術之投資，彙整日本國土交通省之污水下水道創新技術示範項目 B-DASH 內各技術使用用途如圖 2 所示，分析 B-DASH 內容並探究政府推動此政策之後續效應，最後設法將可行性技術轉移至國內擁有相似氣候及地理條件之水資源回收中心，以提升我國能源自給率。

## 肆、日本實廠成果研析

本研究參訪日本全國 28 座具代表性創新技術應用之水再生中心，整理水再生中心技術之特色，主要包括水再生中心能源創新技術（廢熱回收發電：如東京東部污泥處理廠、生質能發電：如惠庭市污水

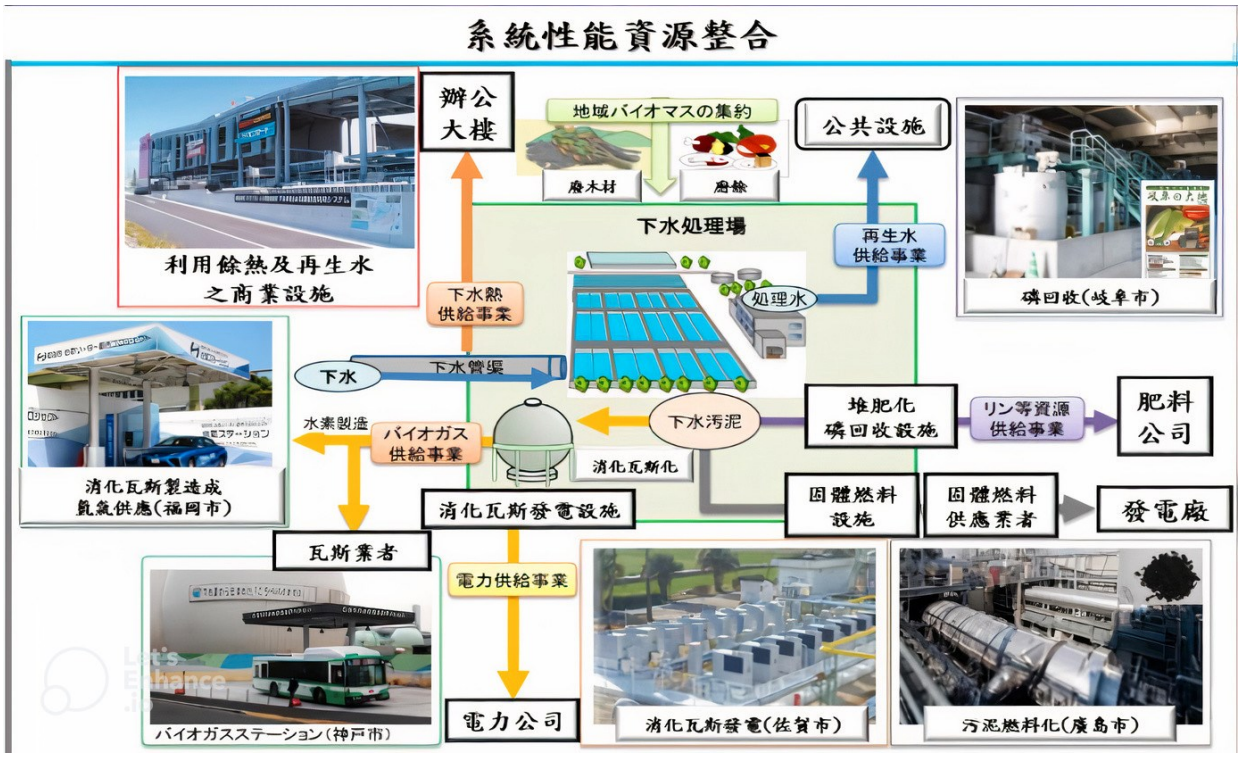
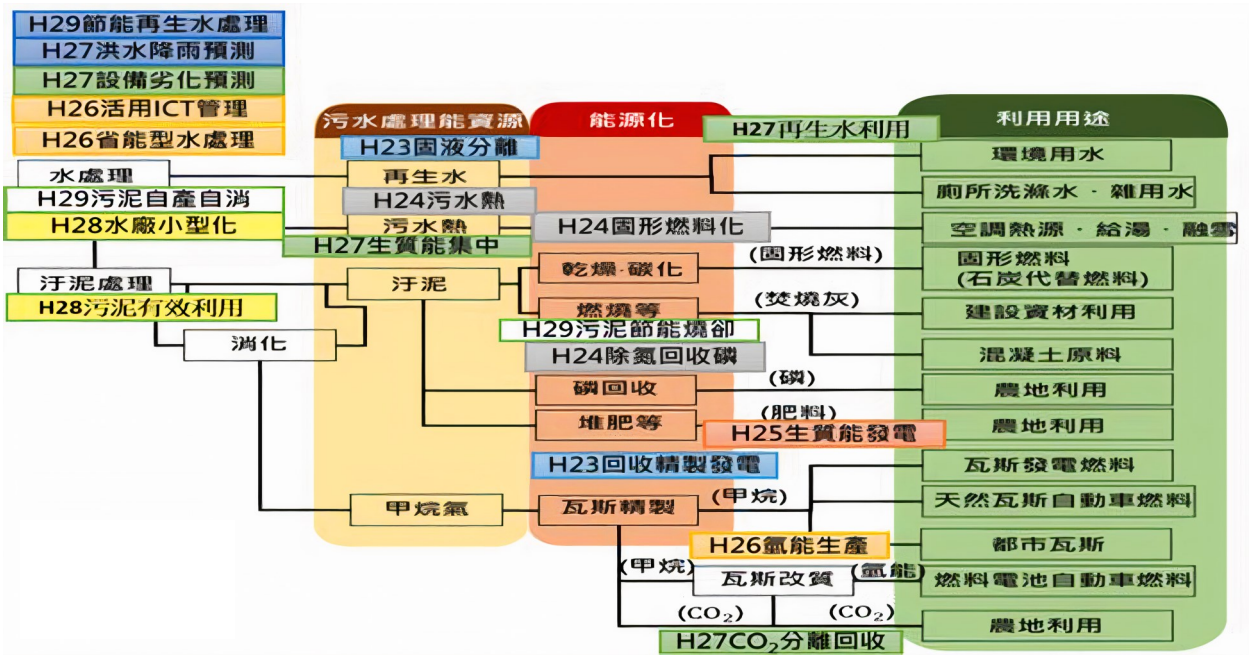



圖 1　污水下水道系統能資源整合利用




註:H23 為西元 2011 年，以此類推

圖 2　B-DASH 項目內各技術利用

終末處理廠、京都市鳥羽水再生中心）、水循環回收（京都市伏見水環境保全中心）、肥料化技術（北廣島污水處理中心）、二氧化碳分離技術（福岡市中部水處理中心）、ICT（福岡縣寶滿川淨化中心）、材料化（秋田臨海處理中心）具代表成果如下:

一、東京都東部污泥處理廠

1.　設施概要

位於東京都江東區新砂，該廠主要處理周邊 6 座水資源回收中心所產生之污泥，其中規模最大為砂町水再生中心及三河島水再生中心所產生之污泥，其處理方法為濃縮及脫水、碳化與焚化，該廠擁有蒸氣發電系統、污泥焚化爐及廢熱回收發電系統，該廠將相關設施所回收之廢熱作為再生能源，然而因源頭污泥品質不盡相同，故污泥處理步驟需依據污泥來源不同，來制定不同污泥處理程序，主要會透過污泥濃縮及脫水減量等程序，再送至碳化及流體化床焚化爐進行回收。相關廢熱回收流程如圖 3 所示。

2.　亮點研究

污泥焚化在日本是主要之污泥　處置方式，由於存在戴奧辛污染之隱憂，利用碳化技術處置污泥比焚化和熔融技術更有

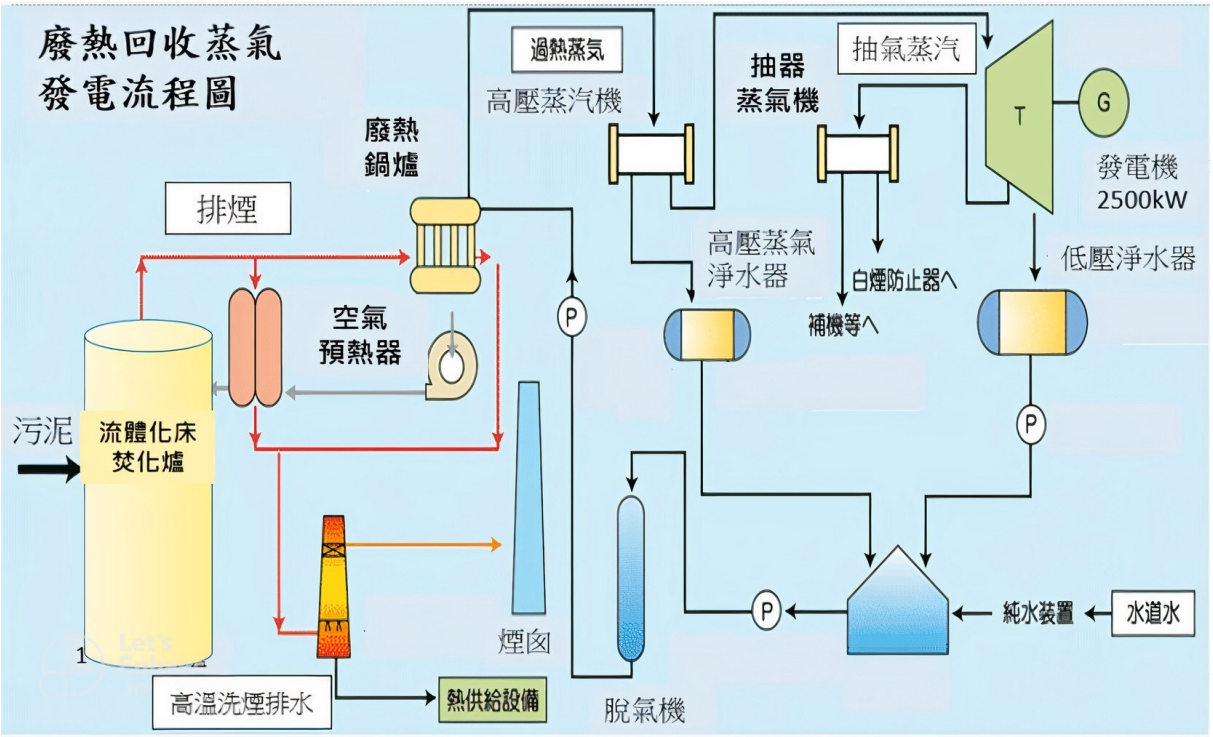



圖 3　廢熱回收蒸氣發電流程

優勢。一般而言，排氣量較少，碳化生成物擁有和木炭相似之特性，並具有廣泛且有效之利用途徑。

污泥碳化設備 DBO (Design Build and Operate)營運模式，以減少溫室氣體排放及促進污泥資源化作為廠內營運目標，東部污泥處理廠之關鍵設施，分別為：污泥濃縮設施、流體化床焚化爐（如圖 4）、污泥碳化爐（如圖 5）、焚化爐餘熱蒸氣發電、熱交換器及區域供熱與製冷。

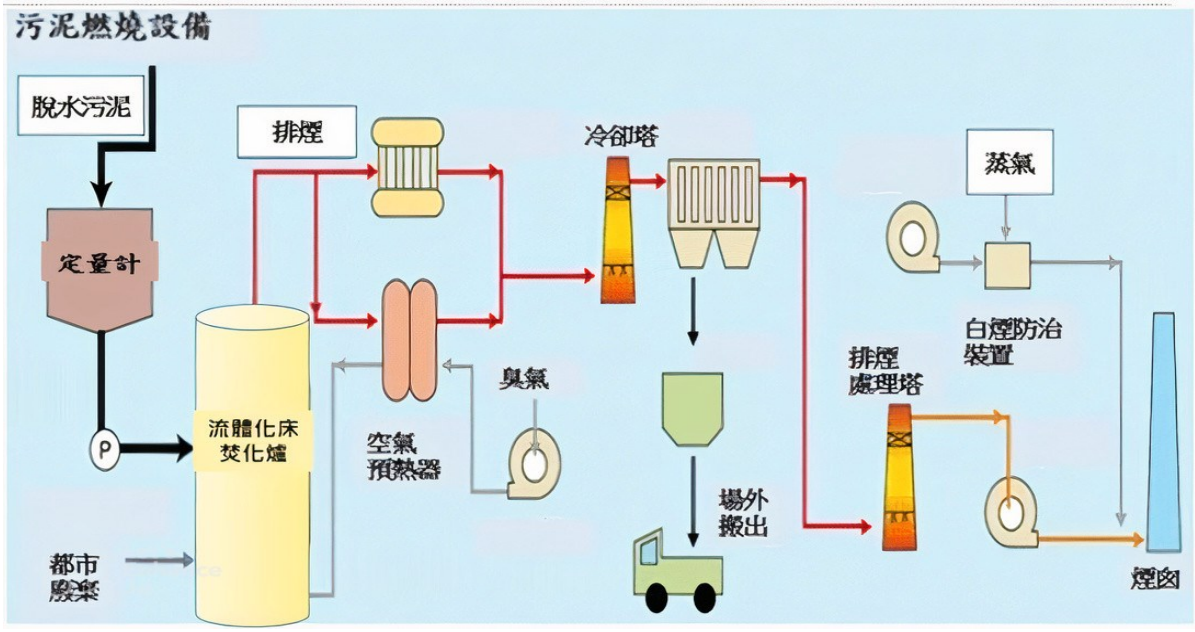



圖 4　污泥流體化床焚化爐操作流程

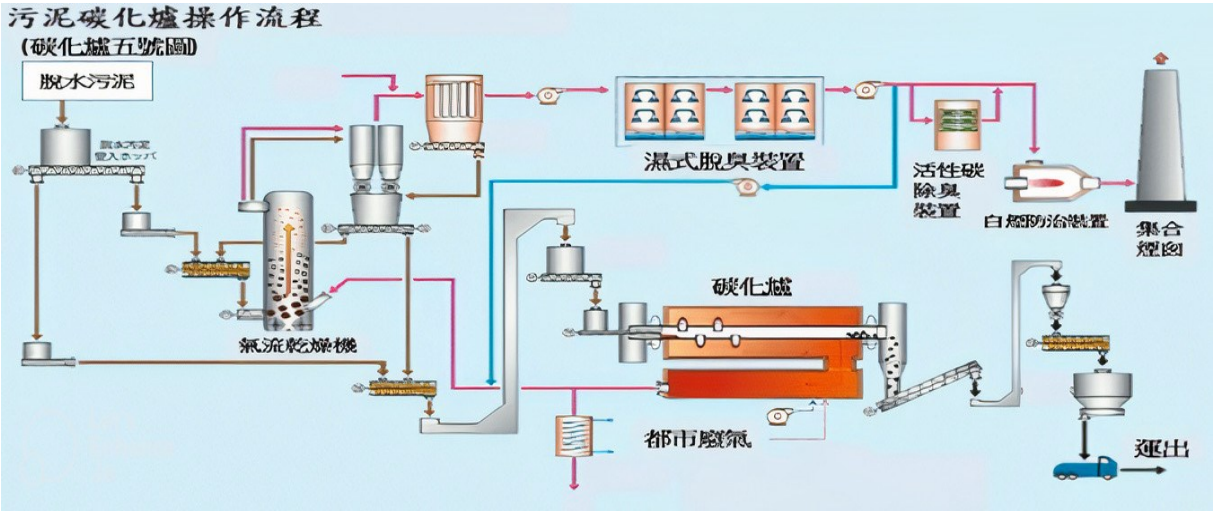



圖 5　污泥燃燒設備處理流程

二、惠庭市污水終末處理廠

1.　設施概要

位於北海道惠庭市中島松，緊鄰惠庭市廚餘糞尿處理廠。處理方式為標準活性污泥法，主要處理島松、惠野、黃金地區之生活污水，2018 年平均處理量為 31,437 CMD。目前有 4 套污水處理設施、5 套污泥處理設施（消化槽）。

2.　亮點研究

為了利用及活用家庭垃圾中約占 3 成之廚餘，回收其能源並延長衛生掩埋場壽命，實施「廚餘之生質瓦斯化事業」，收集後之廚餘，活用惠庭污水終末處理廠之既有設備，包括糞尿處理設施、而 2012 年開始運轉之廚餘處理設施，與污水污泥、糞尿淨化槽污泥進行共同處理，以增加生質瓦斯（甲烷）產量，並將該瓦斯利用於供應廠內設施之暖氣，利用於小型燃氣渦輪發電機(Micro gas turbine)進行發電提供廠內之補助電力。圖 6 為惠庭市污水污泥、糞尿、廚餘之處理流程圖。實施效益上除了減少 42 %之電力需求外，可減少 30 %溫室氣體，主要是二氧化碳減量。目前每年發出之電力大約是 138 萬度，每年產生之電力為惠庭污水終末處理廠帶來 2,200 萬日圓之效益。且除可延長

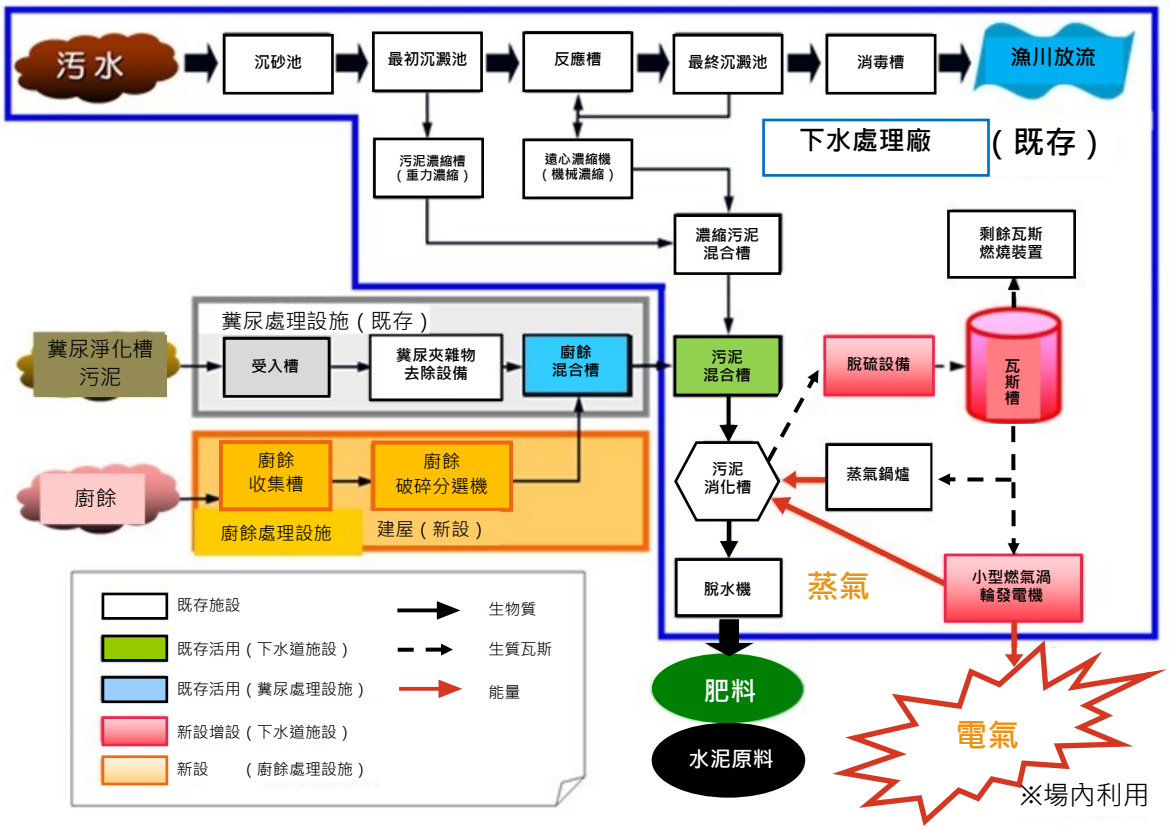



圖 6　惠庭市污水污泥、糞尿、廚餘之處理流程

衛生掩埋場壽命外，產生之生質瓦斯可供厭氧消化槽加熱使用，並可用於發電供廠內自用，進而間接減少溫室氣體排放，產生之效益極大。

三、京都市鳥羽水環境保全中心

1. 設施概要

不僅是京都市最大污水處理中心，更是西日本最大之污水處理廠，放眼日本屬於少見之大型污水處理中心。鳥羽水環境保全中心吉祥院分部於 1934 年竣工，處理廠面積為 29,220 $m^2$，處理能力為 74,000 CMD。處理後之放流水，其水質要求標準必須符合閉鎖型水域(大阪灣)之排放標準。

於 1997 年引進厭氧缺氧好氧法及急速砂濾法， 2013 年及 2015 年進行設施改建更新，引進階段流入式多段硝化脫氮法。處理區域內多為京都傳統產業染整工廠所排放之廢污水，要處理染整工廠之廢污水用傳統之標準活性污泥法無法滿足處理需求，因此在 1977 年引進氧氣活性污泥法。其後為了加強去除難分解性物質，在 1997 年引進臭氧處理。有了這些處理設施，讓西瀨川水環境獲得很大之改善。因此在 1998 年獲得建設大臣賞「IKIIKI 污水道賞」，2000 年獲得建設大臣賞「YOMIKAERU100 選」。

2. 亮點研究

為了維護關西地區 1,100 萬人自來水水源及防止大阪灣及瀨戶內海優養化，京都污水處理必須符合此要求，因此氮磷去除是一項重大之工程目標 。

(1)氮磷之去除:

為了維護大阪灣水質避免優養化，1997 年引進厭氧缺氧好氧法($A_2O$)及急速砂過濾法 。

(2)臭氧處理法:

利用臭氧處理難分解有機物及染整廢水的除色 。

(3)生質能氣體純化設備：

從 2014 年 10 月起針對厭氧消化所產生之氣體能夠做更有效之利用，進行設備改善工程興建兩座球形消化槽（圖 7）可以處理氣體達 600 $Nm^3/hr$。2016 年

圖 7 京都市鳥羽水環境保全中心之兩座球形消化槽

7 月開始提供京都市甲烷濃度達 97 %之氣體（取代從國外進口天然氣使用），對能源循環型社會建立助益甚大 。

(4)污泥減量

京都市脱水污泥產生量，每天約為 380 噸。水環境保全中心每天焚化污泥約 17 噸。產生之污泥焚化灰送至掩埋場掩埋，為延長最終掩埋場使用年限，不斷對焚化灰進行減量 。

(5)擁有全國最大之 120 m 紫藤棚回廊

京都市政府充分京都特色，在鳥羽水環境保全中心種植栽培紫藤花，全長 120 m，是日本最大之紫藤花觀賞區 。

四、京都市伏見水再生中心水循環

1.　設施概要

從 1973 年 3 月開始營運，處理廠面積為 134,220 $m^2$，處理能力為 148,000 CMD。

2.　亮點研究

於 2005 年引進臭氧處理法，同年 12 月取得 ISO14001 認證，2010 年引進管理系統，同年引進階段流入式多段硝化脱氮法，2016 年分流系 1 ～ 3 號池設備更新，並引進階段流入式多段硝化脱氮法，針對污水道污水於放流前之氮磷等有機物進行高級處理（如圖 8），為維持伏見水再生中心鄰近河川良好之水質，該廠引進許多高級處理技術以維護環境，包括：(1)磷去除法、(2)氮去除法（利用階段流入式多段硝化脱氮法）、(3)磷與氮同時去除（利用厭氧缺氧好氧法）($A_2O$)。經過伏見水再生中心高級處理後之污水，經過處理後排放至宇治川之放流水水質之差異。不僅讓京都著名之宇治川景觀得到改善，也降低 $CO_2$ 排放量。處理後之放流水養金魚供外界參觀。

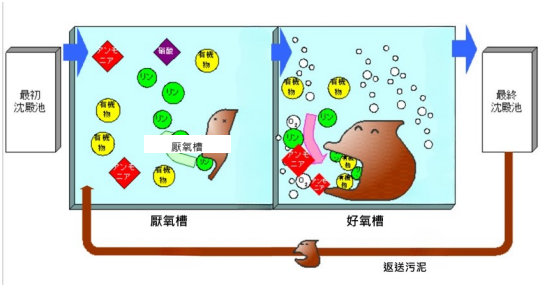



圖 8　AO 法流程

五、北廣島污水處理中心

1.　設施概要

位於北廣島市富岡，污水處理方式為標準活性污泥法，污泥處理方式為濃縮（含重力、機械）、消化、脱水、乾燥。

2.　亮點研究

主要特色為同時收受廚餘、糞尿及污泥，將其與污水污泥混合後，進行厭氧消化處理。然在家庭及事業（餐廳、超市、飯店、食品工廠等）之廢棄物中，廚餘佔了 30~40 %，因此有必要另外處

理。由於廚餘、水肥之主要成分皆為有機物質，故嘗試利用既有之污水污泥處理設施，與污水污泥進行共同處理。

圖 9 水處理流程及污泥處理系統將廚餘、糞尿及水肥與污水污泥處理產生之污水污泥混合後，進入厭氧消化槽進行厭氧消化，產生之消化瓦斯（甲烷氣）經脫硫後，儲存於瓦斯貯存槽，供厭氧消化槽加熱及乾燥機之燃料使用，剩餘瓦斯則以燃燒處理。目前每日產生 3,000m$^3$ 消化瓦斯，甲烷成分約 60%，其餘為二氧化碳。厭氧消化後之污泥殘渣，經螺旋脫水機脫水及乾燥機乾燥後，產生乾燥污泥，供農業及綠地之肥料使用。實施效益上隨著消化瓦斯產生量之增加，重油之使用量減少、二氧化碳削減（2017 年之二氧化碳削減量相當於 1,720 噸）、建設成本之減少及維護管理成本的減少（每年約減少 1 億日圓）。

六、福岡市中部水處理中心

1.　設施概要

福岡市共有 6 個水處理中心，污水道普及率高達 99.6 %，由於福岡市內無一級河流，且河流既短又急，保水能力差，水資源較日本其他地區相對缺乏。該市於 1978 年發生嚴重缺水問題，故於 1979 年啟動再生水事業，是日本第一個使用再生水的城市，目前福岡市再生水之供應場所數量居日本首位。

該廠採 AO 法（厭氧-好氧活性污泥

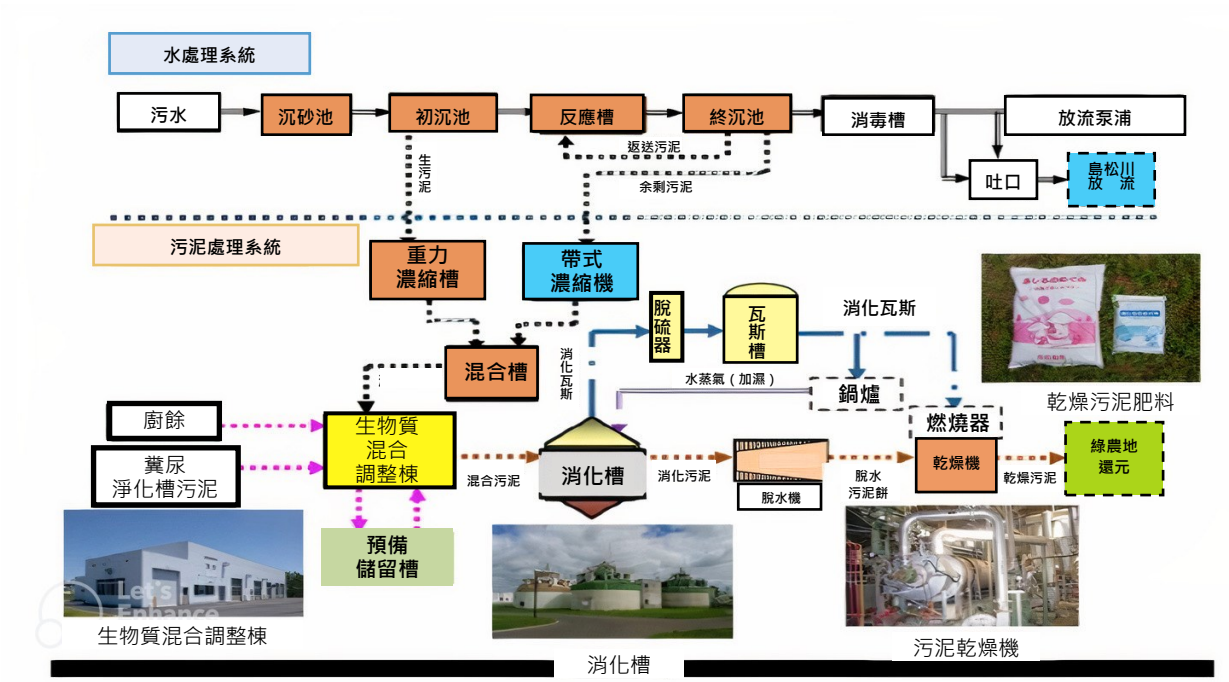



圖 9　北廣島污水處理中心水及污泥處理系統

法），目前平均日處理水量約在 20 萬 CMD 左右，其再生水處理能力為 1 萬 CMD，供應 1,020 公頃區域作為廁所沖水、公園或道路花木澆灌使用。

2. 亮點研究

為全日本第一座再生水處理中心，再生水主要用於沖廁用水，圖 10 為再生水處理流程。同時為 2014 年“污水道革新技術（B-DASH 項目）”之一環，為全世界第一座以污水沼氣產製氫能技術之示範廠。將污泥消化沼氣透過以下三步驟，分離及純化氫氣(1)沼氣透過膜分離裝置分離 $CO_2$，將 $CO_2$ 送入溫室種植蔬果，高濃度甲烷則進入產氫製程；(2)水蒸氣和甲烷在 900 ℃反應產生氫氣（蒸氣重整反應）$CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$；(3)利用吸附材料吸附 $CO_2$，產製純度達 99.999 %之高壓氫氣，作為氫動能車之燃料。有助於減少溫室氣體。圖 11 為沼氣產製氫能之流程 。

再生水處理方式是將生物處理後之污水再經混凝沉澱、前纖維過濾、臭氧氧化（除臭、脫色、殺菌）、次氯酸鈉消毒及最終纖維過濾等流程生物處理所產生之污泥經過濃縮消化後，添加凝集劑進行脫水，再委外焚化處理後再利用。於 1984 年開始使用污泥消化產生之沼氣發電，處理流程是將濃縮污泥放入加溫消化槽(約消化 30 天後產生之消化氣體經除硫後（$CH_4$ 約 60 %； $CO_2$ 約 40 %，每日約可產生 23,000 $Nm^3$），部分提供該中心自有燃氣發電機發電，可提供全中心 20 %之動力，大部分的沼氣則有償提供給

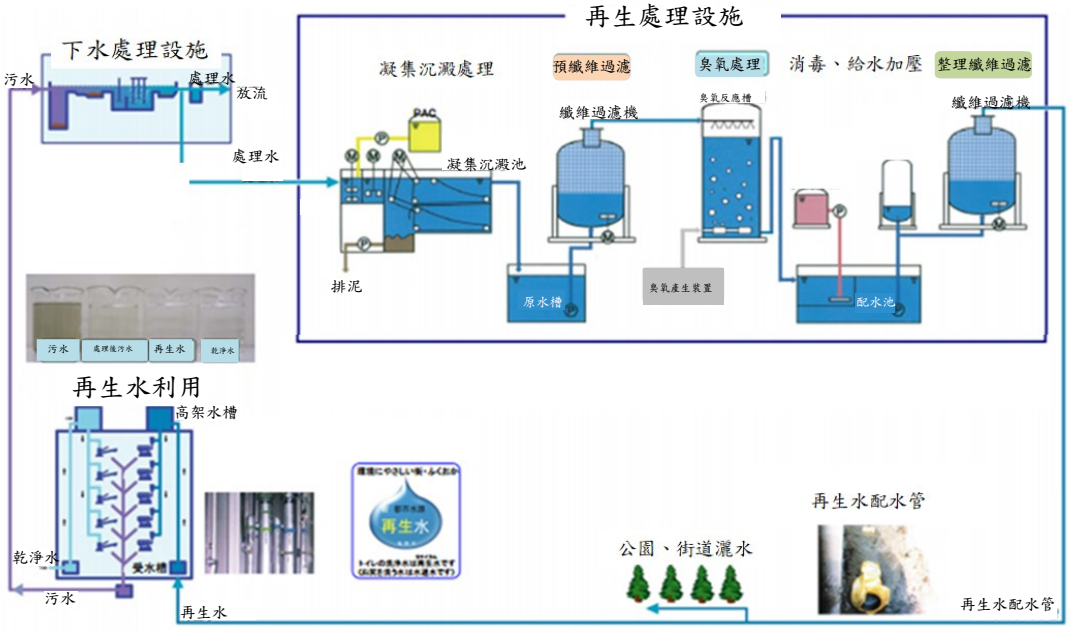



圖 10 再生水處理流程

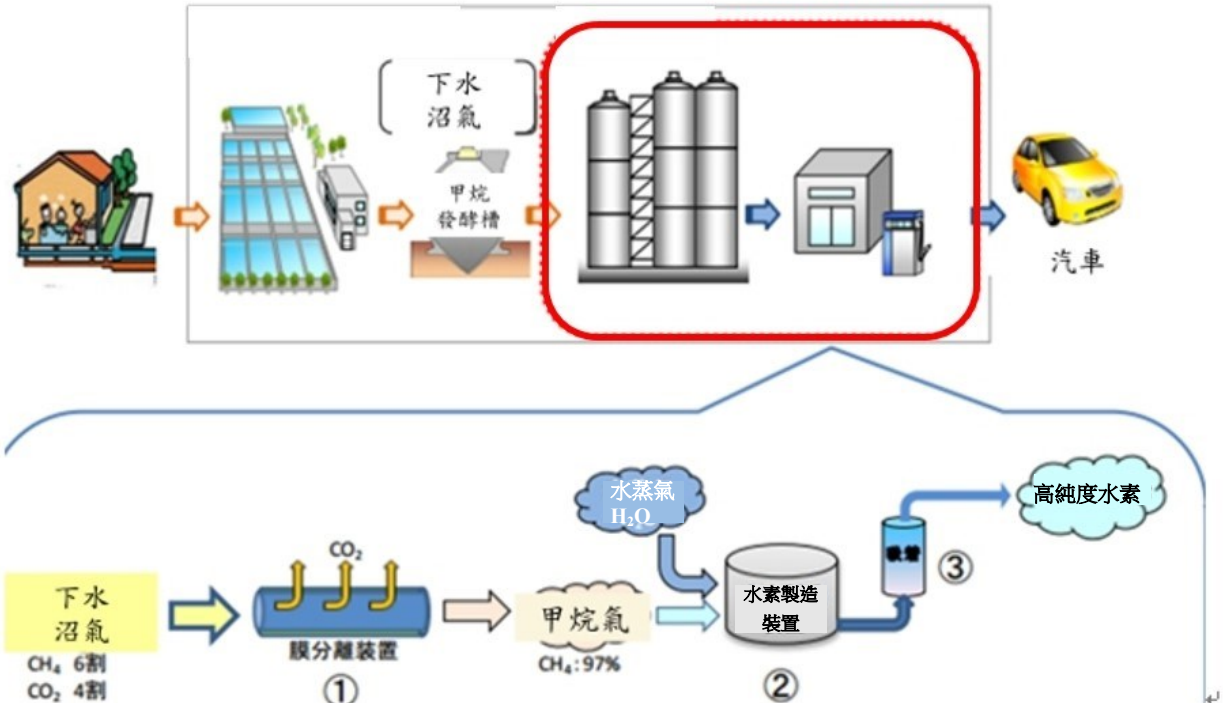



圖 11　污水沼氣產製氫能之流程

FIT 事業（販售電力），FIT 事業將沼氣以燃氣發電機發電後經由電網運輸出售給當地電力公司，一年總發電量約 710 萬度（約 1,570 戶一年用電量），可削減二氧化碳約 3,900 噸。

且所產生之氫氣潔淨能源應用於創新氫能電動車發展。甚至將分離後二氧化碳再應用於溫室栽培。最後亦應用 MAP 法可回收磷營養鹽資源如圖 12，進行回收再利用，成功進行能資源整合管理。其中 MAP 法為於回流水加入鎂，並透過合成顆粒形式之 MAP（磷酸銨鎂）回收磷資源再利用。

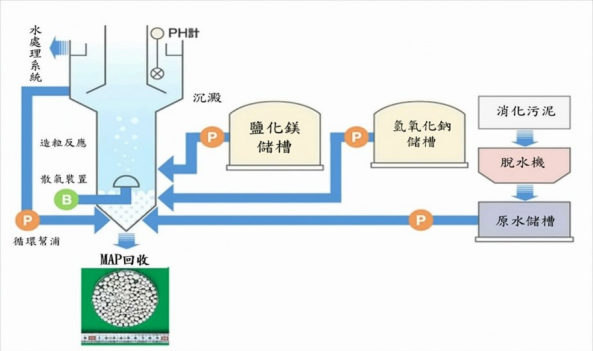



圖 12　MAP 法（除磷）示意圖

七、秋田臨海處理中心

1.　設施概要

位於秋田市臨海區域，屬於秋田市智慧都市施策之一環。導入 B-DASH 計畫為驗證之固液分離設備，使生物處理程序降低處理負荷，再將污泥送往同區域之污

泥再生處理中心，利用脫水設備生產污泥餅，提供附近造紙廠做為燃料或是肥料使用。其中，污泥再生處理中心利用日本環境省「循環型社會形成推進基本法」之補助金來更新舊有設備，採用先進技術和最新設備，將脫水污泥轉化為含水率 70 %以下之輔助燃料。

每日處理量為 175 CMD，主要處理方式為固液分離與稀釋排放法，污泥處理則以燃料化為主。由於人口老化與少子化，導致未來處理中心處理水量不足，因此本技術以提高水處理系統之運行效率為目的，除了處理生活污水所產生污泥之外，也加入糞尿等生活排泄物強化生產效能，圖 13 為糞尿與污泥處理流程。

2.　亮點研究

根據秋田縣統計，人口減少與老化之結果導致處理水量減少，因此秋田縣規劃將八橋處理區與鄰海處理中心進行整合，並導入「超高效率固液分離設施」與「軸滑動式螺旋壓榨脫水機」提升處理效率，預計在未來的 50 年能夠節省約 120 億日圓之修建與管理費用。單元及處理程序包括：

(1)超高效率固液分離設施

導入 B-DASH 計畫中之超高效率固液分離設施，將污水中大部分固體物質經預沉澱及高速纖維過濾等兩種高效率去除方式，使後段之生物反應槽污染負荷降低，送往脫水程序之剩餘污泥量減

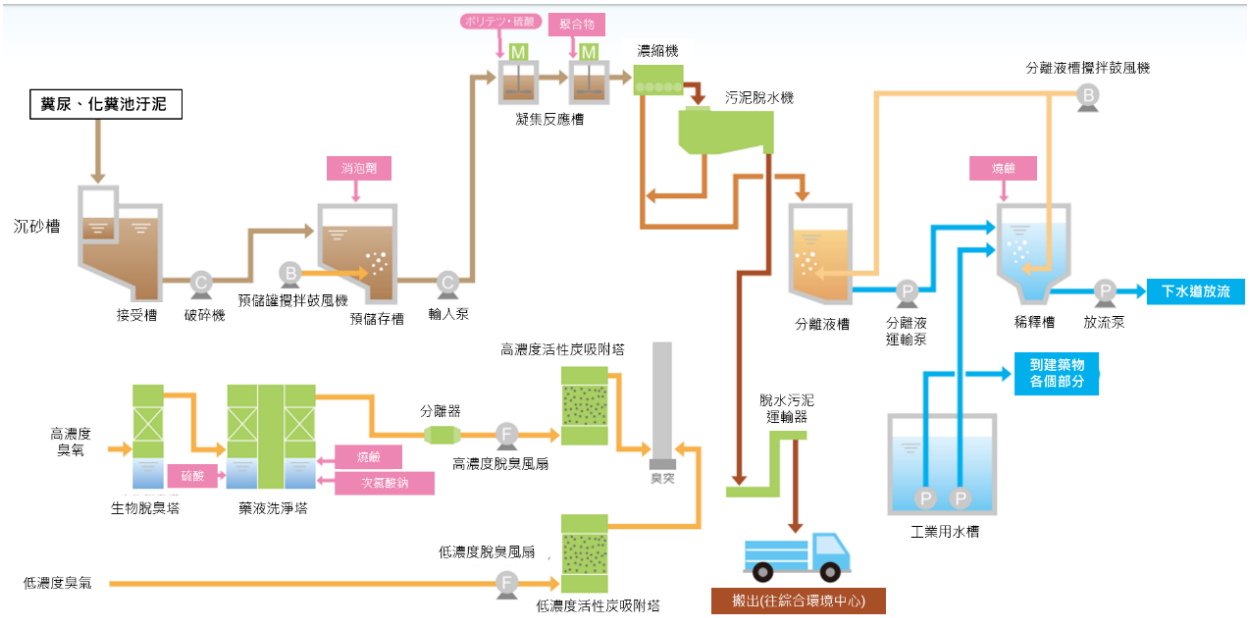



圖 13　糞尿與污泥處理流程

少，污泥處理效率上升，因脫水後之污泥比例增加，可以降低污泥處理成本。處理能力可達 15 萬 CMD，由於不需要初期處理，可節省建設費用 18 %，並增加沼氣生產量 14 %，如圖 14 所述，由臨海處理中心所產生之污泥被送至污泥再生處理中心，與生活排泄物共消化後產生污泥餅提供附近做為燃料或是肥料使用。

(2)軸滑動式螺旋壓榨脫水機

廠內透過使用軸滑動式螺旋壓榨脫水機做為改進之設備，將處理之糞尿直接進行脫水，並將脫水分離液稀釋後，排放至污水下水道。由於採用軸滑動式螺旋壓榨脫水機，殘渣與固體物同時脫水去除，因此可以省略預處理的步驟。

參與技術廠商 MEGAWATER 與秋田縣簽訂合作，除了參與鄰海處理中心與八橋處理中心之整合外，亦負責改善初沉池與開發超高效固液分離技術。將臨海處理中心與老舊之八橋終末處理廠進行整合，一方面提升處理水量，另一方面能夠節省老舊處理廠昂貴整修經費與管理費用，整合前後在整修費用與管理費用約可於 50 年間減少 120 億。為了處理整合後帶來之大量水量，MEGAWATER 引進 B-DASH 計畫中之超高效率固液分離設施，使用佔地更小、效率更高的方式進行 。

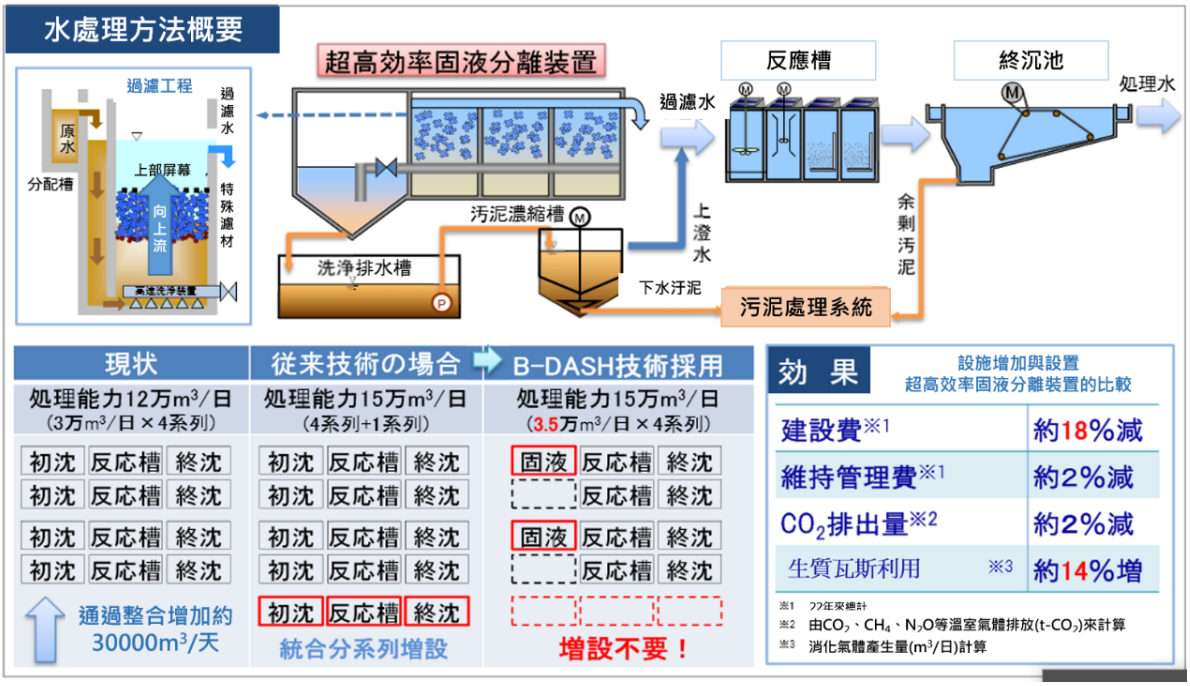



圖 14　污水固液分離前處理設施說明與優點

此外，透過縣市共同委託能夠有效的降低營運成本。各個市町透過秋田縣府統一委託外包廠商，與各市町機構獨自委外相比，統一外包能將其費用削減 16 % 。

八、福岡縣寶滿川淨化中心

1. 設施概要

位於福岡縣小郡市，主要處理小郡市及筑紫野市排放之污水。佔地約 5.2 公頃，採傳統活性污泥法為核心處理單元，計畫處理水量 31,000 CMD，目前處理污水量為 22,600 CMD，其水力停留時間約為 20 小時 。

2. 亮點研究

本淨化水中心配合日本政府之 B-DASH 研究補助計畫，於淨化中心建置一套 ICT（資訊和通信技術）監控設備，該 ICT 監控設備為日本國土交通省污水道革新之技術實證試驗。創新技術主要為「利用 ICT 控制過程和遠程診斷之高效水處理操作管理技術」，透過將反應池中之新型曝氣風量控制技術與遠程即時診斷技術提供的運作訊息相結合，同時實現降低水處理設施之能耗，並在維護和管理方面提高效率。整體技術概念如圖 15 。

控制之創新技術透過結合三個主要技術，「$NH_4$-N 感應器之曝氣量控制技術」、「控制性能改進技術」和「多變量過程統計監控（Multivariate Statistical Process Control ,MSPC）技術」，達到降低水處理能源消耗之技術 。

如圖 16，利用(1)「搭載 $NH_4$-N 感應器之曝氣量控制技術」本身為可運用既有設備維持水質又能降低能耗之曝氣量控制技術。此技術搭配(2)「控制性能改進技術」及(3)「多變量過程統計監控技術」後，針對年度流入水質變化、異常等，能夠提供更適當之處置，在尋求更穩定之水質表現、降低年度能耗等方面，可獲得加乘效果。圖 17 為 ICT 技術流程圖。

建置 ICT 監控設備於現有之污水處理廠，雖其初設成本較高，但利用 ICT 監控污水處理設施之水量和水質，根據數據的反饋檢視處理流程特定之異常現象，可立即推測原因，透過調整控制曝氣量等操作參數，使得放流水質穩定操控，且因精準控制操作參數，亦可使整廠耗能下降，達成節省能源之現代化處理廠目標 。

## 伍、結語

本文藉實際參訪彙編統整日本水再生中心之特色案例，簡要闡述特色案例之成果及再利用管道，以便我國未來不論再推動再生水使用、降低耗能及資源再利用最大化皆可作為參考。

所獲得之新興技術及管理模式經驗均具運用於實廠上之潛力，期各水資中心可

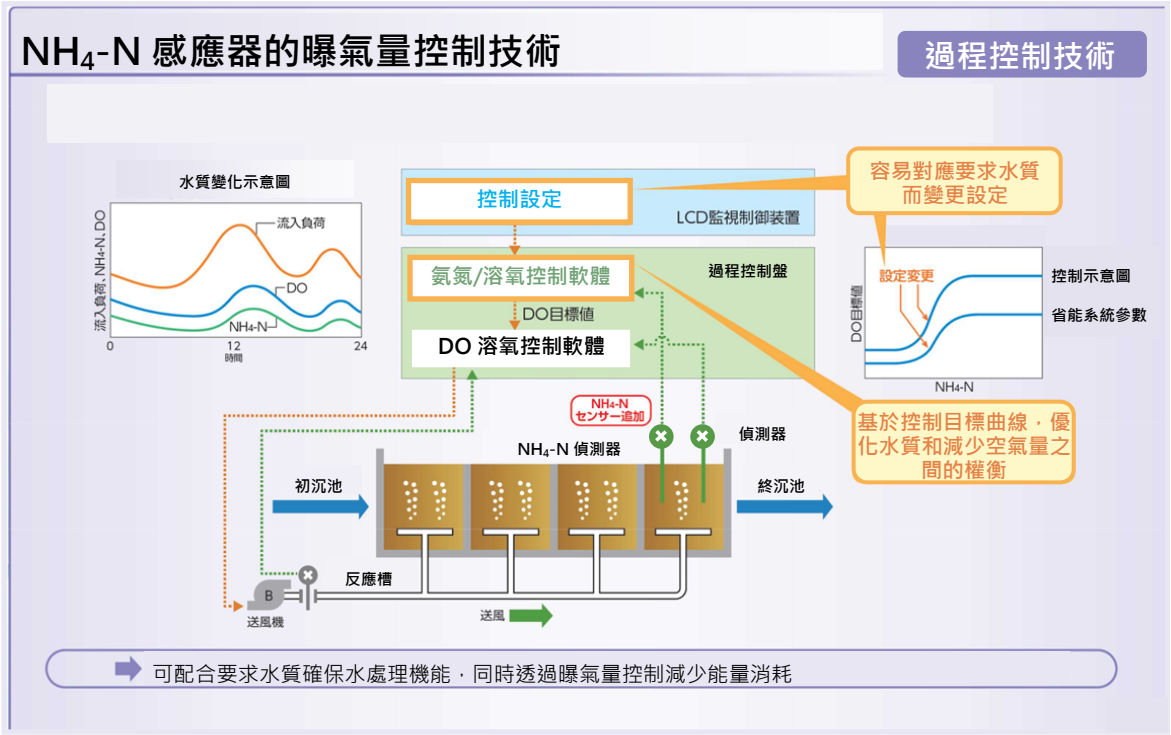



圖 15　氨氮控制技術概念圖

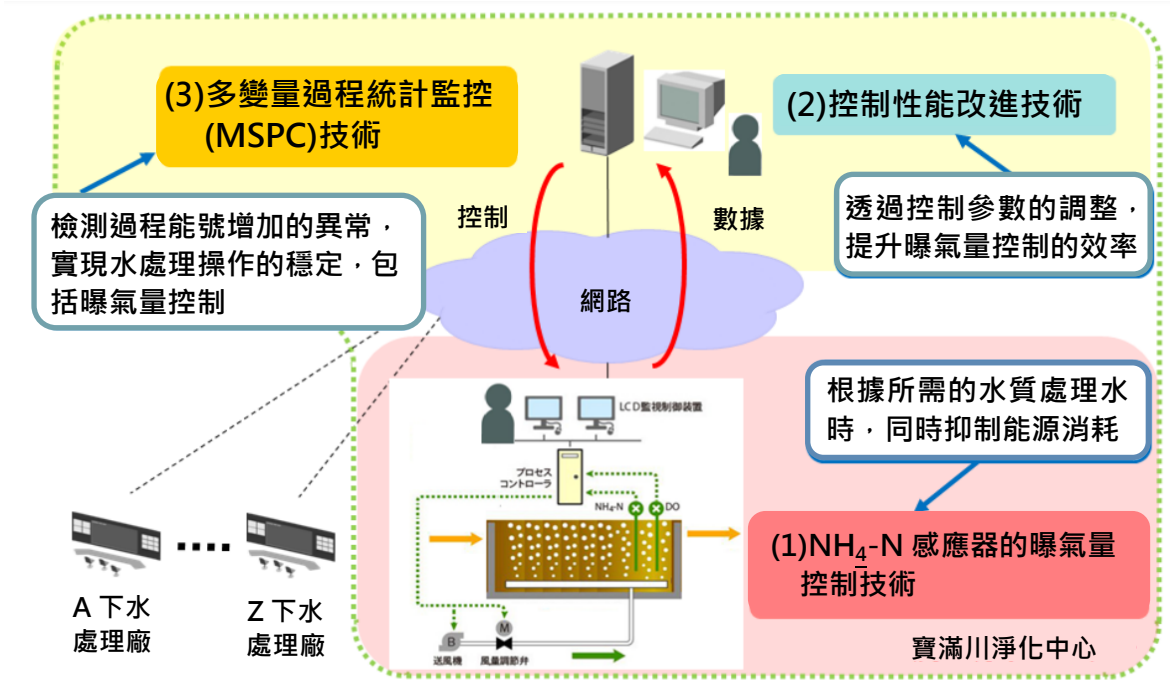



圖 16 ICT 整體技術概念圖

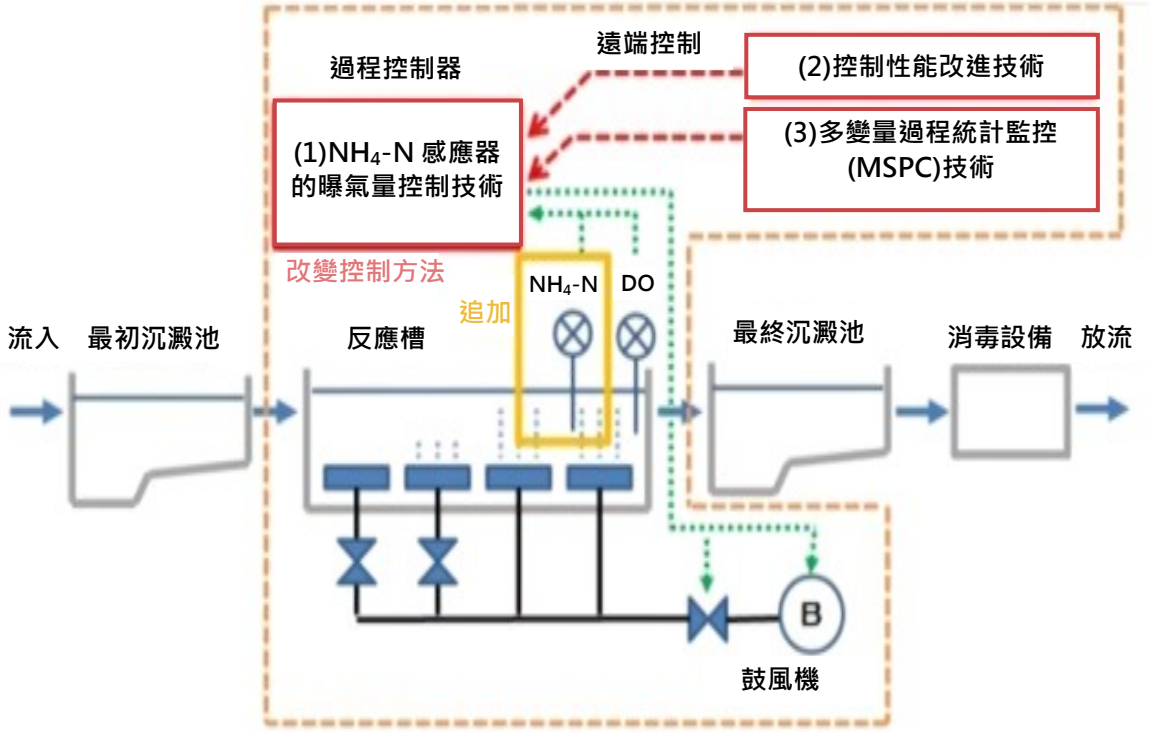



圖 17　ICT 技術流程圖

持續致力於節能、水資源應用、資源循環及能源利用等面向，或可促使完成我國首座完全能資源整合之水資源回收中心 。

## 參考文獻


1. 張添晉 樊國恕 游勝傑 王雅玢 施武陽 江謝令涵 王立邦 林獻山，日本水再生中心能源資源整合創新技術彙編，經濟部水利署，第 1-232 頁，臺北(2019)。

2. 行政院所屬各機關出國報告綜合處理要點-參訪日明淨化中心、福岡中部水處理中心暨參加，第 2018 年第 55 屆日本污水處理技術研討會(JSWA)及日本北九州下水道展覽。

3. “北広島市下水道事業の概要” ：平成 28 年度第 1 回下水道事業審議会資料

4. “恵庭市生ごみ･し尿処理場” ：恵庭市 生活環境部 廃棄物対策室。

5. 脱水･燃焼･発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システムの技術実証研究” ： B.DASH 国土交通省下水道革新的技術実証事業メタウォーター･池田市 共同研究体、平

成 27 年 7 月。

6. 惠庭下水終末處理廠網頁： http://www.city.eniwa.hokkaido.jp/www/contents/1545960314250/index.html。

7. “惠庭市生ごみ・し尿処理場”：惠庭市 生活環境部 廃棄物対策室。

8. 池田市上下水道部網頁： http://www.ikedashi.suido.jp/jigyo/gesuido/1418810446209.html。

9. ICT を活用したプロセス制御とリモート診断による効率的水処理運転管理技術実証事業。http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/gaiyou_tech/h26_toshiba.pdf。

10. 福岡縣寶滿川淨化中心。https://www.toshiba.co.jp/cs/topics/back-number/pdf/20150303.pdf。

11. 東京都下水道局。http://www.ges-ui.metro.tokyo.jp/index.html。

12. ICT を活用したプロセス制御とリモート診断による効率的水処理運転管理技術実証事業。http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/gaiyou_tech/h26_toshiba.pdf

13. 下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト＊）技術導入ガイドライン（案）の策定趣旨及び概要。http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/h30glsetsumeikai/H30glsetsumeikai00.pdf

# 公共污水處理廠磷資源回收再利用之潛力及技術介紹

莊順興[1]、林聖諺[2]、孫耀鴻[2]


## 摘要

在台灣並無自產磷礦，工業發展及農業肥料之磷需求大多是依賴進口磷資源。廢（污）水中的磷含量較高，能透過回收污水中的磷，來解決過度依賴進口之問題，磷回收資源包含磷酸鈣(CP)、羥基磷灰石(HAP)、磷酸亞鐵(IP)以及磷酸銨鎂(MAP)等，磷酸銨鎂的純度及適用於肥料的緩釋特性，被視為最佳的磷回收產物，於日本、美國及歐洲多個國家之污水處理廠已有許多成功案例。本篇乃介紹台灣公共污水處理廠回收磷資源之潛力、國外常用技術、MAP 結晶技術特性及對國內回收磷資源之展望，期待國內於回收法規制度完備下，建構完善之磷資源循環體系。



1.國立中央大學環工所 / 教授

2.國立中央大學環工所 / 研究生

## 壹、前言

磷是不可再生資源，全球認為主要磷來源為磷酸鹽礦，而台灣目前無自產磷礦，大多磷礦資源來自進口，隨著人口增加，糧食需求也隨之增加，科技發展需求等，磷資源的需求也逐步提高，若單單仰賴進口磷礦，則會有價格隨進口國浮動，進而提升成本，以及往往富含磷礦石國家位於高風險地區，若有戰爭或是其餘世界災害，台灣將面臨磷資源短缺之問題，是影響台灣發展的一大挑戰 。

每人每日平均污水量為用水量的 0.9 倍，因此會有大量的生活污水產生，且相比於天然水資源，污水中的磷含量較高，生活污水中人的排泄物含有高濃度的磷，代表著生活污水有著高度的磷回收潛力，因此若能將其污水中的磷回收再利用，是永續發展的方法，也是解決過度依賴進口磷礦的方法 。

藉由技術將含磷的污染物轉變成資源化的產物，是目前發展的趨勢，至今已有許多應用於污水處理的磷資源回收技術，主要分類為沉澱技術、離子交換技術及結晶技術，其產品有磷酸鈣(CP)、羥基磷灰石 (HAP)、磷酸亞鐵 (IP) 以及磷酸銨鎂 (MAP)，相比於其他產物，以磷酸銨鎂當目標產物回收磷為較佳選項，其原因為所回收之磷產物純度較高 。

本篇將針對污水中的磷、台灣磷資源的來源及去向、MAP 法回收磷的技術、國外實際發展磷資源再利用和國內磷回收的未來發展，加以介紹 。

## 貳、污水中的磷資源

### 一、磷流佈

臺灣於民國 110 年度臺灣所進口之磷化物，其總量為 33.6 萬噸，總價值約為新臺幣 108.4 億元，如表 1 所示。臺灣目前所進口各類別磷化物來自於四十九個國家，主要以中國、摩洛哥及約旦為主要進口國；分別約為 14.6 萬噸、6.8 萬噸與 5.3 萬噸，圖 1 為各國磷化物進口量之百分比，中國大陸、摩洛哥及約旦地區所進口之比例分別為 43 %、20 % 及 16 %，來自此三個國家之進口量，佔我國進口總量之 79%。

表 1 臺灣磷化物進口來源國(民國 110 年)

| 110 年 | | |
|---|---|---|
| 國家 | 價值 (新臺幣千元) | 重量 (公噸) |
| 中國大陸 | 5,949,071 | 145,291 |
| 摩洛哥 | 316,539 | 67,996 |
| 約旦 | 297,990 | 53,250 |
| 菲律賓 | 349,972 | 21,465 |
| 越南 | 1,028,140 | 13,338 |
| 日本 | 961,956 | 9,001 |
| 德國 | 529,536 | 6,692 |
| 其他 | 1,405,495 | 18,924 |
| 總計 | 10,838,699 | 335,960 |

資料來源:財政部關務署

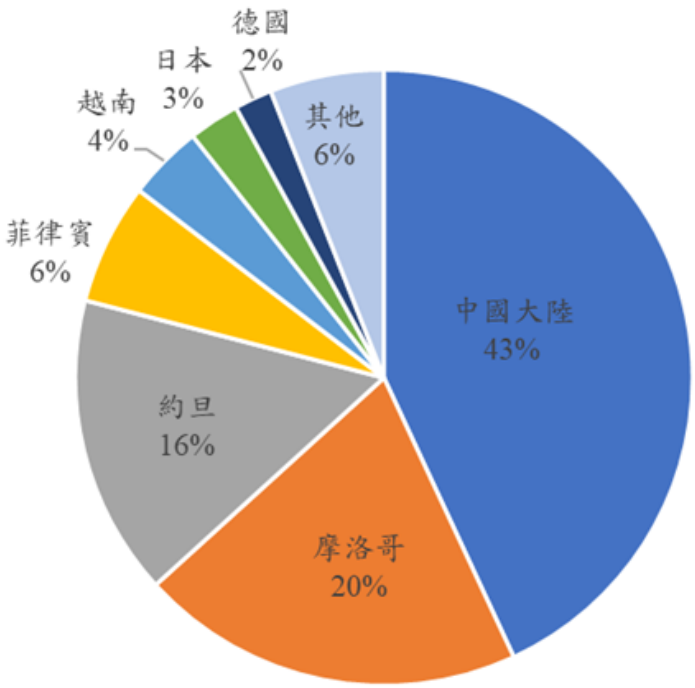



圖 1　民國 110 年各國磷化物進口總量所占百分比

為了解台灣所進口之總磷量，將進口之 33.6 萬噸磷化物，依進口及使用類別粗略分為三類，分別為(1)磷酸肥及複合式肥料、(2)磷礦石粉、(3)磷化合物 。

依據行政院農業委員會之肥料產銷調查資料，台灣進口磷化物中，約有 6.3 萬噸的複合肥料和過磷酸鈣肥及 12.1 萬噸磷礦粉被歸類於肥料類，其為製造肥料及飼料添加劑使用。於進口磷化物總量扣除磷酸肥及複合式肥料、磷礦石粉之進口量，則磷化合物進口量約為 15.2 萬噸，約佔進口總量 45 %。其中磷化合物為高單價磷化物，一般分佈於化工、輕工業和食品業中用以當作各種界面活性劑，或者用於有機農藥、清潔劑、醫藥用品、實驗藥劑及電子業的生產原料。歸納進口磷化物之用途流向如圖 2 所示 。

依據圖 2 所整理之進口磷化物類別略分為基準，估算台灣於 2021 年所進口磷化物之磷含量。而為估算下水道系統中磷含量分佈，將參考內政部戶政司民國 110 年台灣總人口數約為 2,338 萬人，並假設每人每日污水量，配合內政部營建署用戶接管普及率及污水處理率來估算。在此僅統計化學磷肥及磷礦石粉之含磷量，其他磷化合物於工業製程使用後排入工業廢水中。各項估算基準說明如下：

化學磷肥中的過磷酸肥，進口量依據農糧署農業資材組 2021 年統計報表，無過磷酸肥進口；含磷量計算依據農糧署農

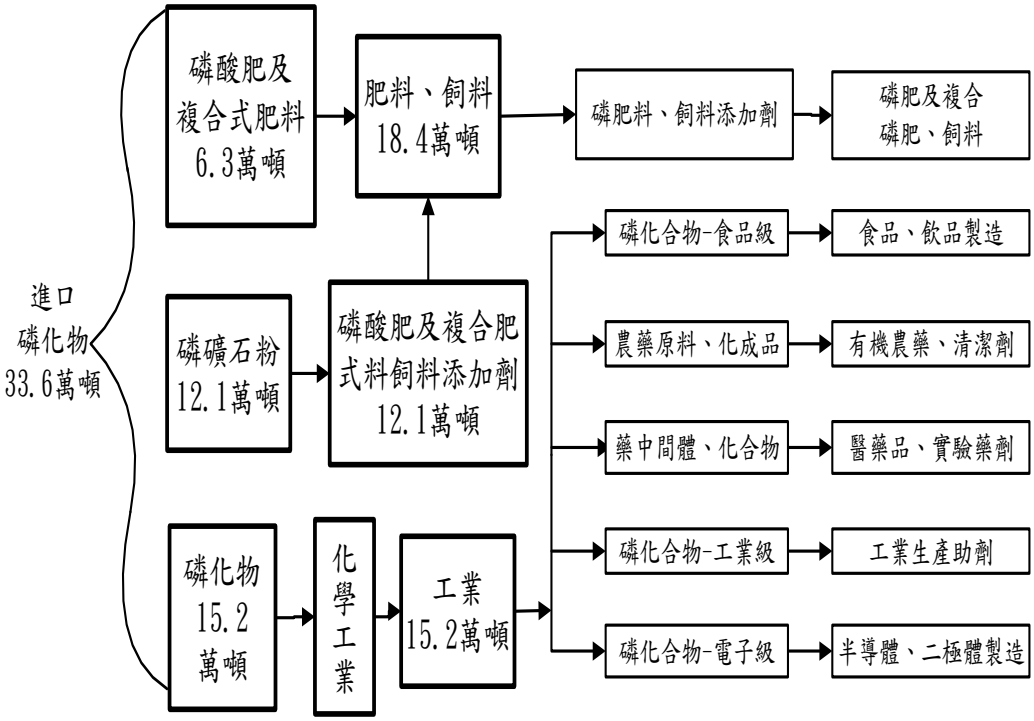



圖 2　進口磷化物之流向

業資材組統計報表以磷成份所佔比例 0.18 作為推估係數。複合肥料進口量依據農糧署農業資材組於 2021 年統計報表，進口量為 63,000 噸；含磷量計算依據農糧署農業資材組統計報表以磷成份所佔比例 0.079 作為推估係數，因此化學磷肥之含磷量為 4,988 t-P/年。

磷礦石粉進口量依據農糧署農業資材組於 2021 年統計報表，進口量為 121,444 噸；含磷量計算參考自然資源學報第 20 卷第三期，目前世界磷礦的品位在 5 %~40 % ($P_2O_5$)之間，大部分國家的磷礦品位都在 30% ($P_2O_5$)左右。採平均值 30% ($P_2O_5$)估算磷含量，因此磷礦石粉之含磷量為 15,907 t-P/年 。

生活污水之估算，人口數依據 2021 年年底，內政部戶政司戶口統計資料分析結果，估算基準 2,338 萬人；用水量依據水利署各項用水統計資料庫查詢，2021 年自來水生活用水量統計資料，每人每日污水量估算基準 282 升；依營建署之「污水下水道設計指南」內容，每人每日污水量與生活用水量比值一般介於 0.8 至 0.9 之間，本篇每人每日污水量以 0.9 估算；污水處理率依據民國 110 年 6 月底，內政部營建署用戶接管普及率及污水處理率統計資料，估算基準 67.84 %，生活污水產生量為每年 2,165,853,060 立方公尺，生活污水處理量為每年 1,469,314,716 立方公尺，直接排放量為每年 696,538,344 立方公尺。

若直接排放濃度以正磷酸鹽磷濃度 5mg/L 為估算基準，直接排放之磷量為 3,483 t-P/年。進流污水處理廠及建築物污水處理設施，進流水磷濃度以正磷酸鹽磷濃度 5mg/L 為估算基準，進流水之磷量為 7,347 t-P/年；放流水磷濃度以正磷酸鹽磷濃度 2mg/L 為估算基準，排放至承受水體之磷量為 2,939 t-P/年。將以上資料整理至圖 3 。

## 二、污水廠回收磷之潛力

水質水量統計數據呈現 2021 年 1 月至 4 月每日水質水量平均值及最大最小值，評估全國各污水廠回收磷之潛力，以

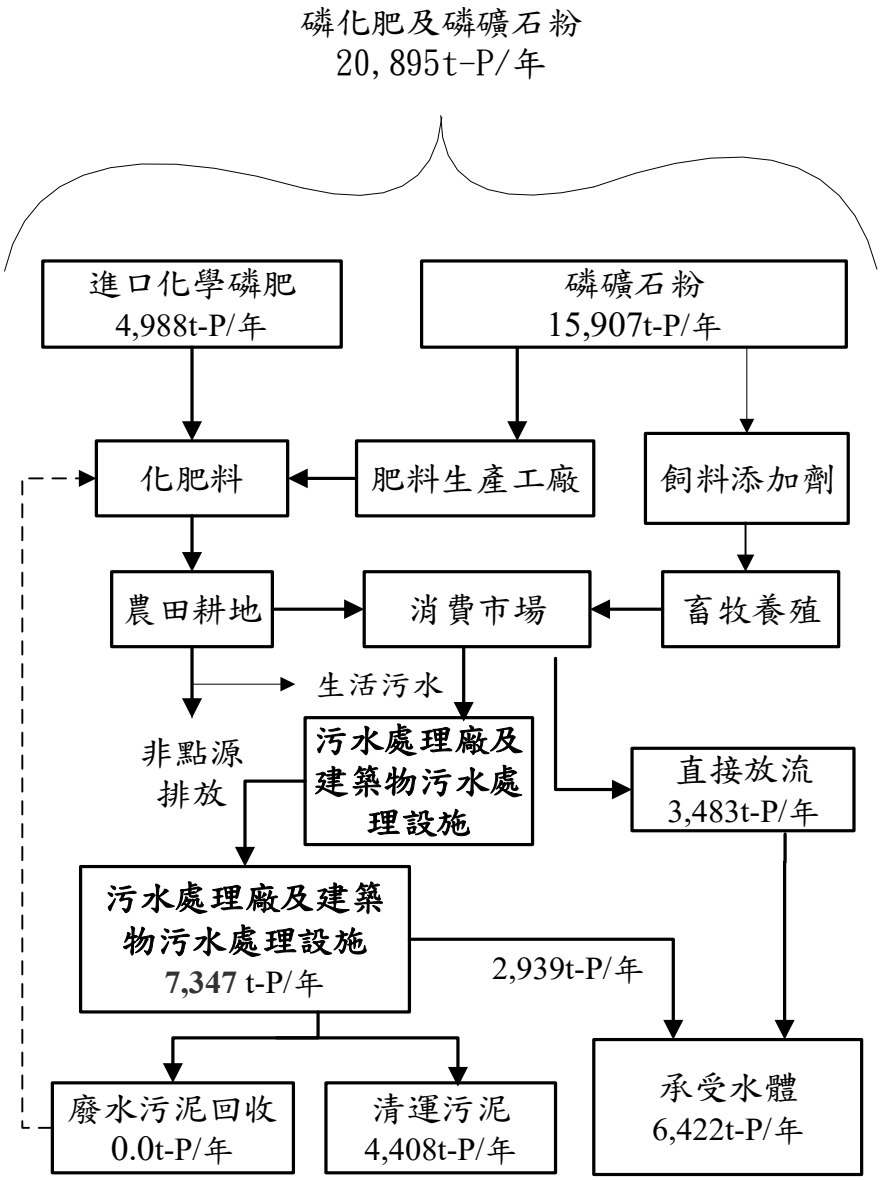



圖 3　國內磷之使用量與下水道系統之磷量

處理水量大於 20,000 CMD 之污水處理廠估算進流水每年之磷含量，詳細資訊呈現於表 2，資料來源營建署全國公共污水處理廠資料管理系統 。

表 2　全國公共污水處理廠磷進流量

| 所在縣市 | 污水處理廠名稱 | 主要處理程序 | 實際處理水量(CMD) | 進流水水質(TP)(mg/L) | 進流水(tons-TP/year)平均值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 臺北市 | 內湖 | VIP/階梯曝氣法+砂濾* | 199,842 | 3.9(2.4~5.6) | 284.48 |
| 臺北市 | 迪化 | 三段式 AO+砂濾* | 441,200 | 3.8(2.7~5.5) | 611.94 |
| 新北市 | 八里 | 曝氣沉砂+初沉池+過濾* | 1,191,177 | 5(估計濃度) | 2,173.90 |
| 新北市 | 林口 | 三段式 AO+砂濾* | 29,267 | 3.4(2.0~5.7) | 36.32 |
| 新北市 | 淡水 | 標準活性污泥法+砂濾 | 49,560 | 9.1(7.2~11.1) | 164.61 |
| 桃園市 | 龜山 | 氧化渠 | 27,415 | 1.9(1.1~2.6) | 19.01 |
| 桃園市 | 桃園北區 | $A_2O$+薄膜生物反應器及 TNCU | 67,319 | 3.7(2.4~5.0) | 90.91 |
| 新竹市 | 客雅 | 標準活性污泥法+砂濾 | 23,492 | 3.4(2.8~4.1) | 29.15 |
| 新竹縣 | 竹北 | 標準活性污泥法+砂濾* | 22,435 | 4.3(2.7~5.6) | 35.21 |
| 臺中市 | 福田 | 標準活性污泥法 | 120,206 | 2.3(1.8~2.8) | 100.91 |
| 臺南市 | 安平 | 標準活性污泥法 | 142,362 | 2.3(1.1~3.1) | 119.51 |
| 高雄市 | 中區 | 曝氣沉砂+初沉池+快濾* | 620,373 | 5(估計濃度) | 1,132.18 |
| 高雄市 | 楠梓 | 標準活性污泥法+過濾* | 29,649 | 5(估計濃度) | 54.11 |
| 高雄市 | 鳳山 | MLE | 86,255 | 3.2(2.0~4.0) | 100.75 |
| 高雄市 | 臨海 | MLE+薄膜生物反應器 | 52,618 | 1.9(1.3~2.3) | 36.49 |
| 屏東縣 | 六塊厝 | $A_2O$ | 53,045 | 3.0(2.2~3.9) | 58.08 |
| 宜蘭縣 | 宜蘭 | 標準活性污泥法+砂濾* | 28,031 | 2.3(1.3~4.6) | 23.53 |
| 宜蘭縣 | 羅東 | 標準活性污泥法+快濾 | 25,400 | 3.5(2.4~6.9) | 32.45 |
| 花蓮縣 | 花蓮 | 標準活性污泥法 | 45,406 | 1.7(1.4~2.2) | 28.17 |
| 總計 | | | 3,255,052 | | 5,132 |

1.本表水質水量資料呈現 111 年 1-4 月每日水質水量平均值級最大、最小值。
2.[*]者為具過濾系統，但設計上過濾並非放流水必經處理程序之一；[-]者為未提供數據

且依據大於 20,000 CMD 污水廠進流水估算，總計處理水量為 3,255,052 CMD，其中八里、中區及楠梓因未提供進流水總磷濃度，以 5 mg/L 估算，每年平均值約有 5,132 噸的磷會被處理，大於 20,000 CMD 污水廠之處理磷量會比預期更高，因此代表著污水是具有磷回收之潛力 。

## 參、磷資源回收技術

在現今污水處理技術上，主要仍是以加藥/混凝/沉澱的傳統處理方式進行，然而傳統技術是以成核反應為主導，將產生數量龐大的細小懸浮物，經固液分離後生成的脫水污泥含水率仍高達 60 %～ 80 %，有價物質含量低於 30 %，利用價值低，通常後續以掩埋方式作處理，因此發展了多種磷回收之技術，來解決大量磷資源被掩埋浪費之問題，本節將以沉澱技術以及結晶技術作分類，介紹各種已經於實廠使用的磷回收技術 ：

### 一、PRISA 技術

PRISA 技術為德國所開發的磷回收技術，此技術以進行多次實驗室規模以及中型規模的技術，PRISA 技術流程如圖 4，PRISA 技術第一步驟是酸化生物除磷的過剩污泥，能在厭氧消化槽之前，將過剩污泥中的磷酸鹽在預濃縮槽中溶解，可透過延長水力停留時間以及攪拌過剩污泥來減少額外的有機無機酸添加，能直接進行酸化溶解步驟，因此有大量的磷酸鹽存在於

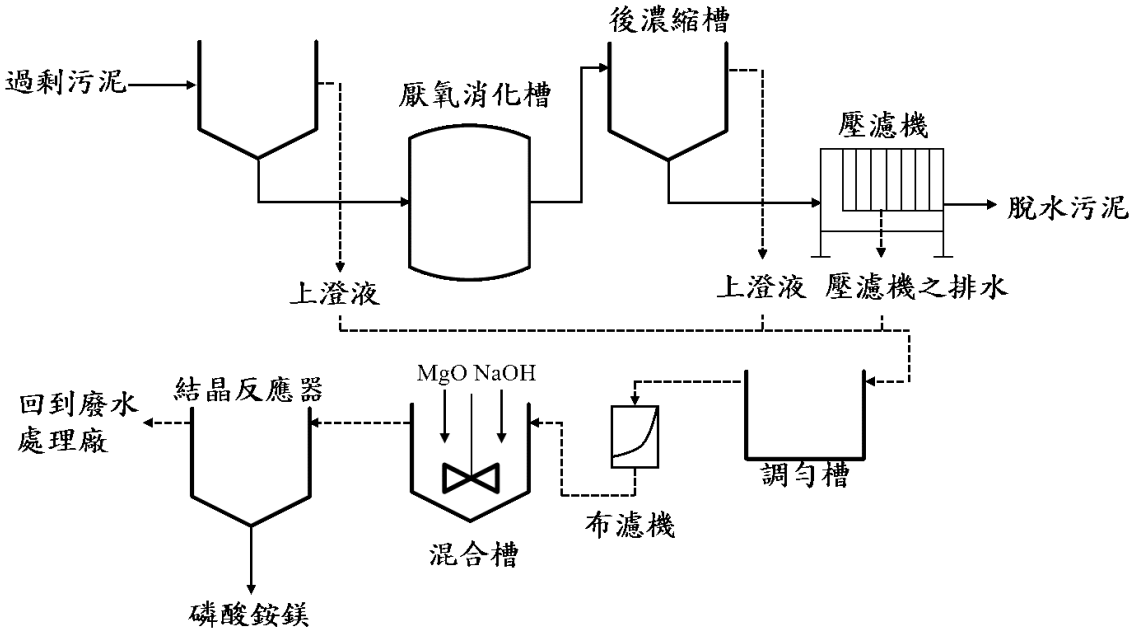



圖 4　PRISA 製成流程圖(Montag D. 2004)

預濃縮槽的上澄液當中 。

此一溶解步驟極為重要，可使進入厭氧消化槽之污泥降低自發性的磷酸銨鎂產生，導致管線結垢堵塞情形減少，剩餘污泥進入後濃縮槽脫水，此上澄液與壓濾機之排水富含大量銨離子與少量磷酸鹽，最後，在調勻槽中混和所有溶液，通過濾帶機將固體物去除，使富含銨離子及磷酸根離子之溶液進入到混合槽，並添加氧化鎂作為鎂源，以及利用氫氧化鈉調節 pH，在結晶反應器中得到最終產物磷酸銨鎂 (Montag et al., 2007) 。

## 二、Phospaq™技術

Phospaq™技術為荷蘭 PAQUES 公司所研發，此技術主要目的為磷回收及控制所需磷酸銨鎂尺寸的商業方法，並於 2006 年已有全尺寸的實驗，Phospaq™ 技術流程如圖 5，此技術是將富含磷的消化上澄液、離心液和濾液進入到 Phospaq™反應器當中，透過曝氣來達到連續且完全混和，此曝氣不但能使反應器中溶液充分混和，還能將廢水當中的 COD 變成二氧化碳，這些氣提出的二氧化碳也助於反應器 pH 值提高，而不需要過度添加額外的鹼劑，添加氧化鎂當作鎂源，於 Phospaq™分離出處理後乾淨的水，形成的磷酸銨鎂排出獲得，此技術磷去除率 70 ~ 95 % (Paques B.V.,2021) 。

荷蘭的 Aviko 使用 Phospaq™ 技術用於處理馬鈴薯製程所產生的廢水，處理水量為每天 80,000 立方公尺，進流水正磷酸鹽-磷為每天 200 公斤的磷，出流水可減少 80%的磷，磷酸銨鎂產量為每年

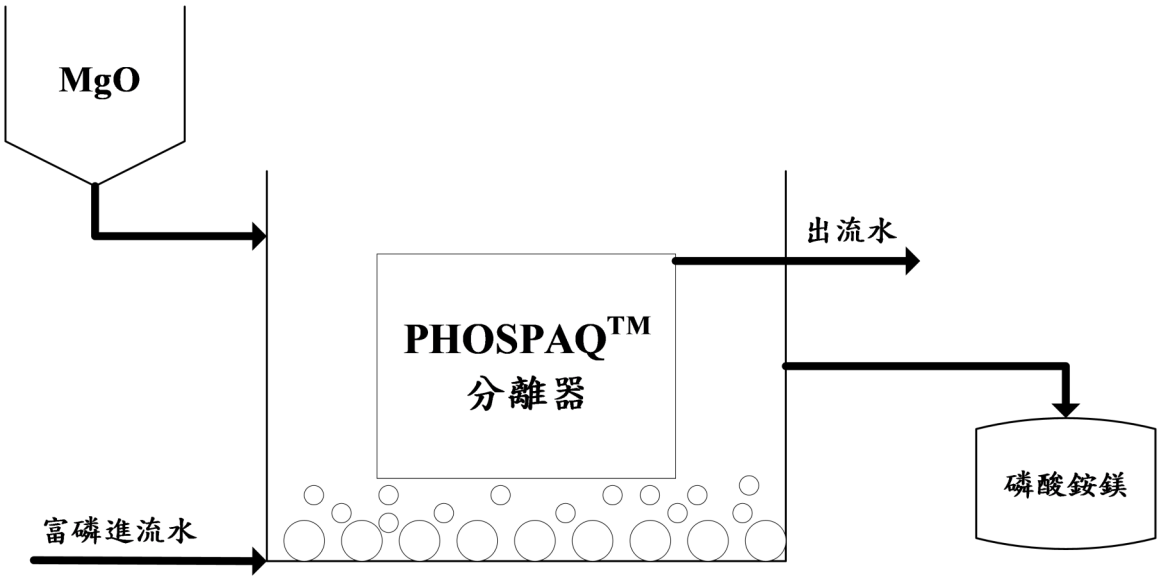



圖 5　Phospaq™技術流程(Paques B.V.,2021)

400 噸，並可直接當作肥料使用 。

## 三、NuReSys©技術

NuReSys©技術為比利時公司所研發，此技術主要目的為提供可控制的磷酸銨鎂，可以應用在污水處理廠消化污泥以及污泥脫水濾液，NuReSys©技術流程如圖 6，流程除了添加氯化鎂當作鎂源，將脫水濾液濃縮消化後，進行第一階段磷酸銨鎂沉澱，將脫水濾液鹵水和第一階段產物脫水進行第二階段磷酸銨鎂沉澱，此技術可減少磷回流的負荷量(NuReSys, 2021)。

比利時的 Aquafin 於工廠測試 NuReSys© 技術，設計水量為每小時 8 立方公尺，進流水正磷酸鹽-磷為 100 mg-P/L，出流水達正磷酸鹽-磷為 15 mg-P/L，磷酸銨鎂產量為每天 55 公斤；荷蘭有兩個市鎮使用 NuReSys© 技術處理廢水，第一個為用於 Land Van Cuijck 的市政廢水，設計水量為每小時 5 立方公尺，進流水正磷酸鹽-磷為 650 mg-P/L，出流水達正磷酸鹽-磷為 88 mg-P/L，磷酸銨鎂產量為每天 400 公斤，第一個為用於 Land Van Cuijck 的市政廢水，設計水量為每小時 140 立方公尺，進流水正磷酸鹽-磷為 450 mg-P/L，出流水達正磷酸鹽-磷為 40 mg-P/L，磷酸銨鎂產量為每天 1,500 公斤(NuReSys, 2021)。

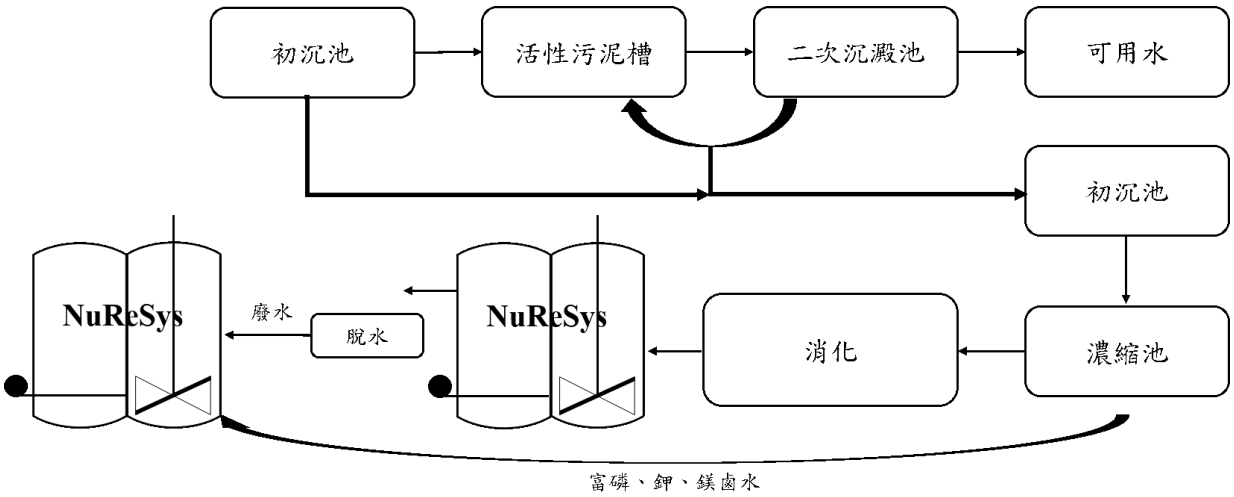



圖 6 NuReSys©技術流程(NuReSys,2021)

## 四、Unitika PHOSNIX®技術

PHOSNIX®技術由日本公司 Unitika 所研發，PHOSNIX®技術流程如圖 7，此技術能處理 100CMD 到 500CMD 的廢水量，以氫氧化鎂當作鎂源，在結晶床中隨著控制 pH 值及各離子濃度來持續結晶成長，每日可產生 100 到 500 公斤的磷酸銨鎂顆粒，磷回收率達 84 至 92%。

此技術應用於日本的 Unitika（上野和藤井），其鎂磷莫耳比為 1，固體停留時間為 10 天，進流水磷濃度約為 100 - 110mg/L，磷的回收率可達約 90%左右，晶體產物大小約為 0.5-1mm，每日可產出 500 公斤的磷酸銨鎂；於西部污水廠有 6 組磷酸銨鎂反應設備，每組設備可處理水量為每日 122 立方公尺，於 2011 年之磷酸銨鎂結晶產量約為每年 64 噸。

## 五、Ostara PEARL™ 技術

PEARL ™ 技術是由加拿大的 Ostara 為回收技術公司所研發，PEARL ™ 技術流程如圖 8，此技術為從污水當中回收氮和磷，透過流體化床結晶，產出稱為晶綠 (Crystal Green®)磷酸銨鎂產品，可達到大於 50%的磷回收率，且降低了 10 至 20%的生物固體產生，技術增加脫水率進而使固體物增加 4%，整體體積降低 20%，其磷酸銨鎂產物擁有高純度，高達 99.6% (Ostara, 2021)。

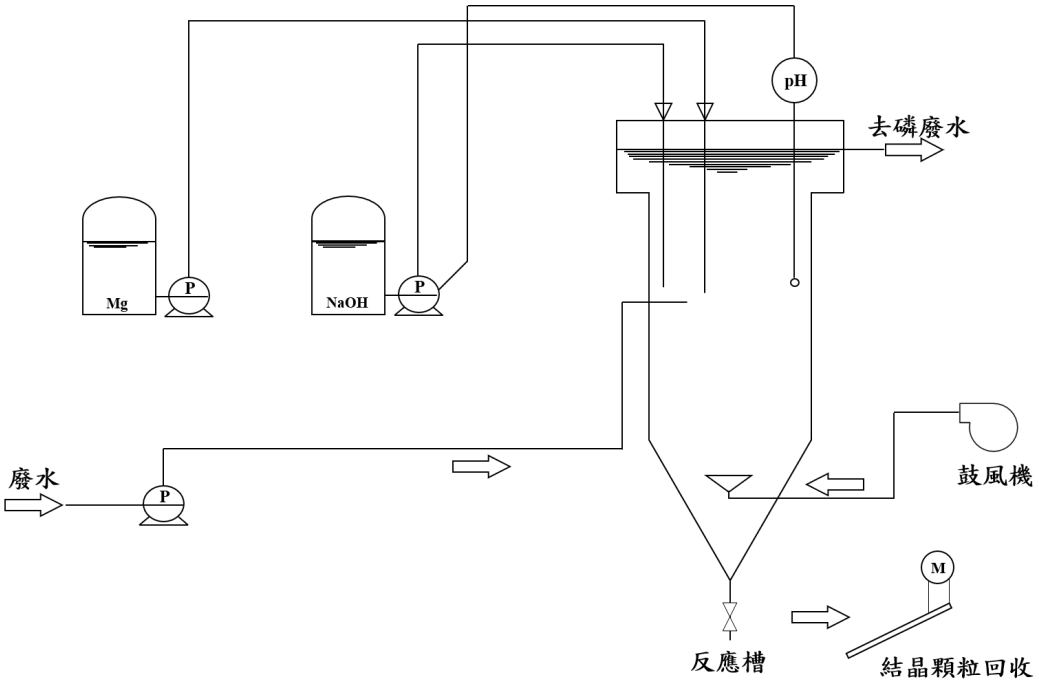



圖 7　PHOSNIX 技術設備之流程

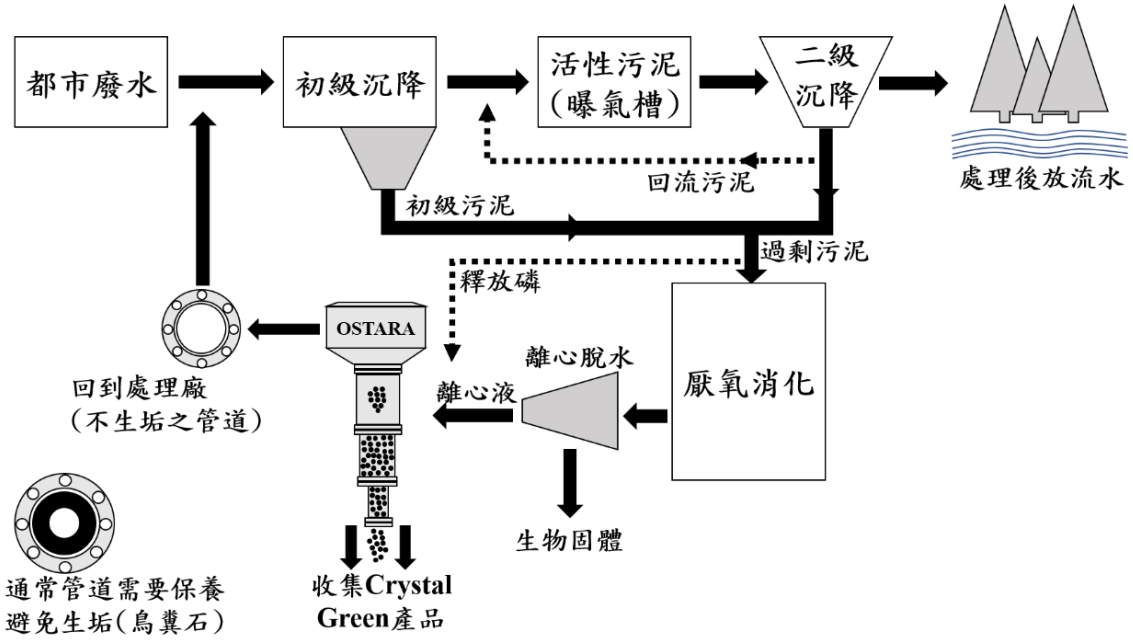



圖 8　Ostara 設備與污水廠結合之流程 (Ostara, 2021)

在賓夕法尼亞州的約克廢水處理廠建設 Ostara PEARL TM 技術的營養物質回收設施，此廢水處理廠每日處理水量大於 2,600 萬加侖，藉由此技術可回收 80 %的磷和 20 %的氮，以及在維吉尼亞州的 Hampton Roads Sanitation District (HRSD)，位於 HRSD 中的 Nansemond 處理廠使用 Ostara PEARL TM 技術的營養物質回收設施，此處理廠每天處理廢水水量為 3,000 萬加侖，藉由減少處理廠的營養成分回流來提升產率，預期磷去除率為 85 %以上(Ostara, 2021) 。

## 六、DHV-Crystalactor®技術

Crystalactor®技術是由荷蘭的 Royal HaskoningDHV 公司所研發，此結晶床為流體化床結晶器，具有空間小，產物含水率低的優點，除此之外，原先傳統技術的混凝、膠凝、分離及脫水，此結晶床可以將四個程序合而為一，有著高達每小時 40 至 120 公尺的表面負荷量，並且無

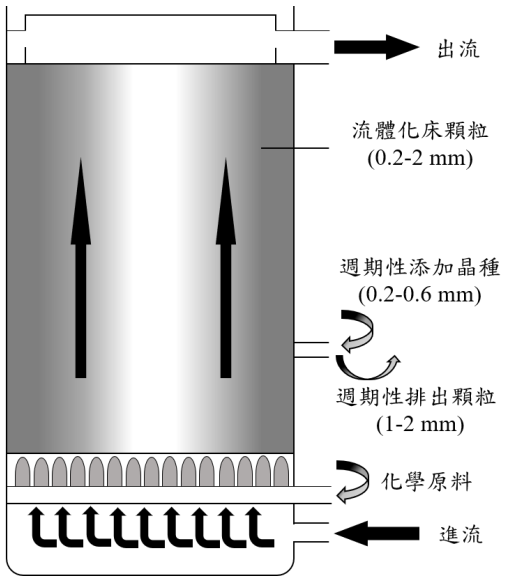



圖 9　DHV Crystalactor 技術反應槽示意圖

剩餘廢棄物的產生(RoyalHaskon-ingDHV,2021)。

## 肆、MAP 技術特性

MAP 結晶技術受各參數影響其磷去除率及結晶率，營建署所委託執行之下水道污泥含磷調查及最佳磷回收量之研究計畫，曾針對 pH 及鎂磷莫耳比等參數進行流體化床結晶試驗，固定進水磷濃度為 50mg/L 之脫水濾液及水力停留時間為 6.7 分鐘，找出最佳之磷回收參數：

### 一、不同 pH 值之影響

根據文獻選擇 pH 值控制約在 9 和 9.5 進行試驗，從圖 10 可得知 pH 值控制約在 9 時結晶率和去除率約為 70%和 83%，控制約在 9.5 時結晶率和去除率約為 50%和 75%，因此結晶率最佳 pH 值為 9.0，且提高 pH 值至 9.5 並無提高效率。

### 二、不同鎂磷莫耳比之影響

控制最佳 pH 值為 9，進行鎂磷莫耳比 1.2、1.4 及 1.6 試驗，找尋之最佳鎂磷莫耳比，隨著莫耳比增加，易達過飽和現象而產生膠羽，鎂磷莫耳比 1.2 結晶率與去除率為 70%及 75%，當鎂磷莫耳比為 1.4 與 1.6 試驗，產生膠羽較明顯，結晶

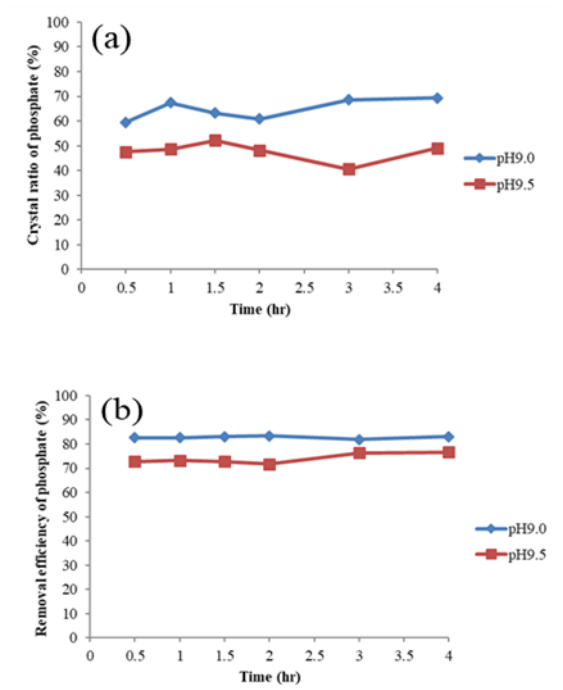



圖 10　MAP 脫水濾液試驗(a)結晶率和(b)去除率變化

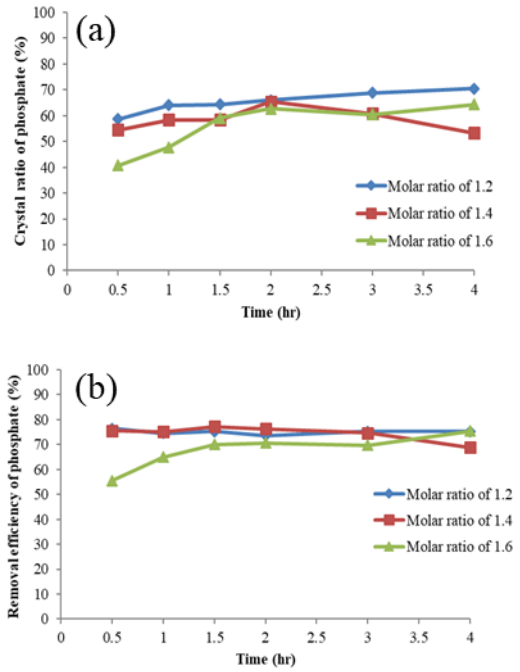



圖 11　MAP 不同鎂磷莫耳比試驗(a)結晶率及(b)去除率變化

率為 65%與 64%，因飽和度增加導致結晶效果變差。

### 三、長期試驗

控制於最佳之 pH 值 9 與鎂磷莫耳比為 1.2 進行 15 天之長期試驗，由圖 12 可知，第一天之結晶率可達 66%，但第二至八天顯現結晶不穩定現象，結晶率浮動較大，為 55%至 80%，第九天開始結晶趨於穩定狀態，最高之結晶率可達 85%，去除率與結晶率有高度相關。

在長期流體化床操作下，晶體經由碰撞及摩擦，使晶體慢慢成長，晶體粒徑大小可達 0.5mm 以上，在第三天及第六天晶體還未有特定晶型化合物出現，而趨於穩定後，於第十天結晶物表面結晶型態較為明顯，如圖 13 ；也將結晶成品進行 ICP 重金屬分析，測出鋅濃度約為 15-30 mg/Kg，低於管制規定 250mg/Kg，鉻及銅濃度也皆符合肥料法規標準值，其餘重金屬低於偵測極限值，顯示結晶物未含有害成份物質，有利後續做為肥料或製造業之再利用潛勢。

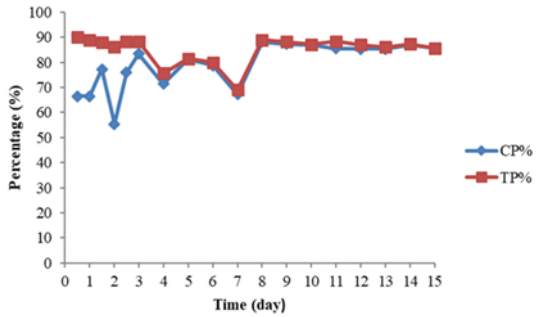



圖 12　MAP 長期試驗結晶率與去除率變化

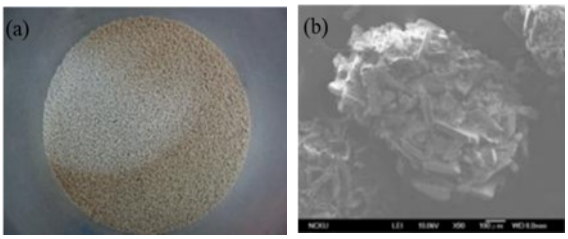



圖 13　(a)MAP 之結晶物(b)第 10 天表面結晶 SEM 圖

## 伍、國內推動磷資源回收之展望

若要將磷資源回收再利用，除技術發展完善外，必須搭配相關法規之配合，方能落實。茲將目前我國關於磷資源再利用之相關規定簡述如下。

行政院環境保護署於 103 年度依廢棄物清理法第二條第四項規定公告公共下水道污水處理廠為廢棄物清理法指定之事業，並於 104 年 7 月 1 日施行。自此，污水處理廠乃成為廢棄物清理法管理之事業對象。而依據廢棄物清理法第三十九條（事業廢棄物之再利用），事業廢棄物之再利用，應依中央目的事業主管機關規定辦理。再利用之事業廢棄物種類、數量、許可、許可期限、廢止、紀錄、申報及其他應遵行事項之管理辦法，由中央目的事業主管機關會商中央主管機關、再利用用途目的事業主管機關定之 。

內政部為公共下水道污水處理廠之中央目的事業主管機關，乃制訂公共下水道

污水處理廠事業廢棄物再利用管理辦法（中華民國 105 年 2 月 26 日），管理相關再利用事項。管理辦法指出，基於解決廢棄物問題及資源有效利用之立場，內政部針對污水處理廠主要之事業廢棄物下水污泥，積極推動其材料化、燃料化與肥料化三方向資源再利用。考量下水污泥再利用實績、用途及產品市場去化均未明朗，事業及再利用機構之事業廢棄物再利用許可應經內政部許可，始得進行再利用。目前事業廢棄物經本辦法許可之再利用用途行為包括做為原料（如紅磚原料）、材料（如輕質骨材、陶粒）、燃料（合成氣、碳化物及燃料錠）及肥料等 。

依據規定導向，目前將下水污泥再利用做為原料、材料及燃料等，國內已逐漸形成市場而漸入軌道。而對於下水污泥再利用為肥料，其管理方式與再利用規格尚處於與中央主管機關、再利用用途目的事業主管會商階段。相對行政院農委會農業事業廢棄物再利用管理辦法，已訂定農業廢棄物再利用之規範，如禽畜糞、農業污泥、菇類培植廢棄包、羽毛、畜禽屠宰下腳料、死廢畜禽、果菜殘渣等並落實執行。顯見，有機廢棄物再利用於農業上為合理之走向，建構我國下水污泥再利用做為肥料使用之系統，為一可行方向但仍有待努力 。

公共污水處理廠回收磷資源乃於處理廠中將高濃度的含磷液體，進一步再製反應成磷酸銨鎂晶體，其純度與緩釋特性使其適用於做為農地及園藝肥料，為極佳之再利用管道，透過良好之管理制度，應為我國可推廣之方向 。

## 陸、結論

臺灣並無自產磷礦，因此需產生磷資源來降低進口之依賴性，污水當中富含比天然水體更多的磷，根據估算每年會有 6,422 噸的磷直接排入承受水體，且依據大於 20,000 CMD 污水廠進流水估算，每年約有 5,132 噸的磷會進入公共污水處理廠，代表著污水是具有磷回收之潛力，而現今國外已有許多技術已開發成熟並運作於實廠，國內已有實驗室及模型廠使用實際污水進行流體化床異相及均相結晶的技術開發，並有良好之研究成果。期許在更完善的法規訂定之下，能建構完善之磷資源循環體系。

## 參考資料

1. 莊順興、黃耀輝、張維欽，下水道污泥含磷調查及最佳磷回收量之研究（先期報告），內政部營建署，第 14-74 頁，(2012)

2. 莊順興、黃耀輝、張維欽，下水道污泥含磷調查及最佳磷回收量之研究，內政部營建署，第 26-31 頁，(2012)

3. 洪俊生，考察日本污水處理廠除磷之技術 及磷資源回收之應用，內政部營建署，第 1-5 頁，(2012)

4. 110-111 年度全國公共污水處理廠營運評鑑及碳排放調查計畫，內政部營建署(期中報告書)，第 13-18 頁，(2022)

5. Montag, D., Gethke, K., & Pinnekamp, J. A feasible approach of integrating phosphate recovery as struvite at waste watertreatment plants. Proceedings of the IWA Specialist Conference: Moncton, New Brunswick, Canada, June, (2007).

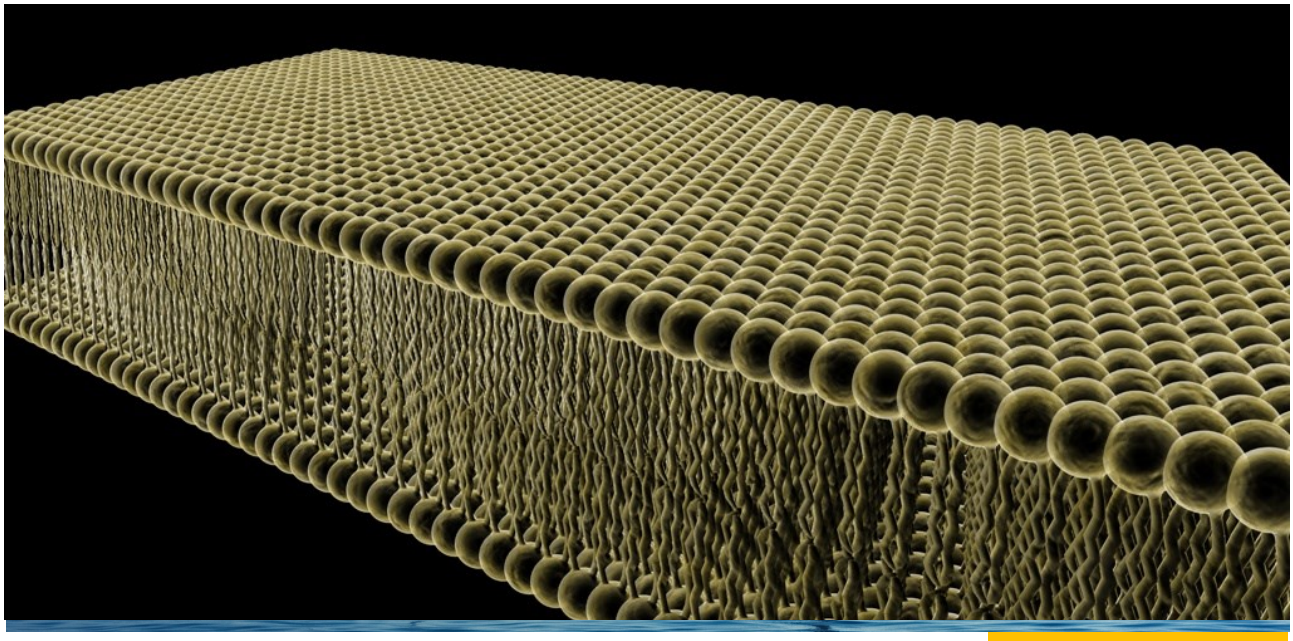
6. Paques B.V., en.paques.nl (2021)

7. NuReSys,nuresys-p.be,(2021)

8. Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc., ostara.com ,(2021)

9. Royal HaskoningDHV, gloal. royalhaskoningdhv.com,(2021)

10. Montag, D., “Recovery of Phosphates in Municipal Waste Water Treatment Plants.” , Institute of Environmental Engineering, RWTH Aachen Univ. Germany (2004).



# 薄膜蒸餾技術與其應用

莊清榮[1]


## 摘要

生活與工業廢水之再生處理常以薄膜過濾技術為主，其中如要產製高純度再生水則需涵蓋逆滲透程序，但此程序需較高級之前處理，且高水回收率時需提供較大操作壓力。而薄膜蒸餾是一種熱驅動程序，可結合低階熱源如太陽能及工廠廢熱等以產製高純度水，同時兼具水與能源的回收。本文針對薄膜蒸餾技術的分類、工程應用的優勢及應用現況等先進行說明，然後以國內石化廠之溫廢水薄膜蒸餾之模廠為案例，評估產水成本，於溫度 70℃管式模組之產水成本估算為 NT$29.3/噸, 而平板模組有較高通量於 60℃產水成本評估即降至 NT$ 20.29/噸。因其產水水質優於逆滲透，當場域之廢熱可充分提供薄膜蒸餾操作之熱源時，該技術具產業應用之潛力 。


1.中原大學化學工程學系 / 教授

由於氣候變遷與工業用水需求增加，導致臺灣常面臨缺水問題，近年來發展海淡或以生活及工業廢水產製再生水等皆是重要課題。而無論海淡或廢污水回收再生，薄膜過濾分離皆是重要操作單元，目前常藉由薄膜微過濾(MF)或超過濾(UF)進行前處理，再串聯逆滲透(RO)產製純水，然這些以壓力為驅動力之薄膜過濾單元，其操作成本有很高的比例來自電能的需求，另一方面針對含高鹽濃度之工業廢液，除了易造成薄膜結/積垢外，高操作壓力需求、低水回收率與後續高倍濃縮液處理等，皆會提高逆滲透程序的產水成本，且大規模逆滲透之濃排液不當排放也易造成環境之衝擊。基於永續發展的觀點，在水資源開發的過程中應由節能及資源回收著手，最終朝零排放的理想目標，而薄膜技術於這些應用上皆扮演重要角色。

對部分產業而言，若能於利用其廢餘熱產製再生水並於場域內循環使用，建立水及能源同時回收的環保永續發展模式，將可達節能產水及減少廢水排放量，另一方面，將產業廢水（液）或 RO 濃縮液中之有價物質進一步做資源化的回收，可達廢水處理與資源回收整合之效，所以如何降低產水能耗及進行資源回收是未來推動再生水或海淡產業之重要考量要素。

近年來，隨著薄膜製備與工程應用技術的日益發展，結合了薄膜法和蒸餾法兩者優點之薄膜蒸餾(Membrane distillation, MD)，逐漸受到重視。薄膜蒸餾是一種熱驅動程序，可結合工廠廢餘熱或太陽能等低階熱源，且可處理之進料濃度範圍廣、產製高純度再生水與由 RO 滷水中再次提取純水等優點，除可減少廢液體積，如進一步結合結晶程序如蒸發操作或薄膜結晶(MCr)，可朝所謂”零液體排放(ZLD)”目標 。

## 壹、 薄膜蒸餾技術

薄膜蒸餾其原理概念如圖 1 所示，利用多微孔疏水性薄膜將兩側不同溫度的流體區隔，膜兩側之溫度差會誘發蒸氣壓

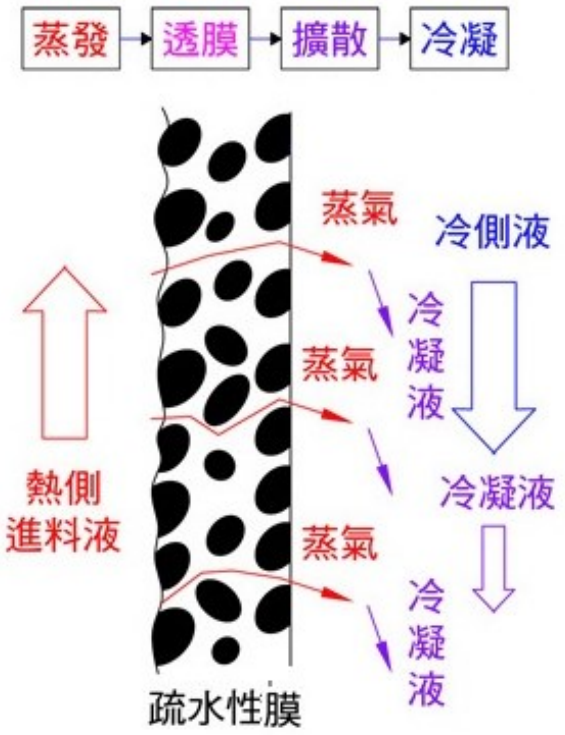



圖 1 薄膜蒸餾示意圖

差，致使蒸氣分子透過膜孔擴散至滲透端，再藉由冷流體或其它冷凝裝置冷卻並加以收集。一般而言，薄膜蒸餾之進料加熱至 50℃以上，使兩側溫差超過 15℃，即能產生足夠的蒸汽壓差，使蒸氣透過膜之通量達到工程應用上的要求。此操作近乎可完全截留進料中之膠體、離子和其它非揮發性物質等，且可以處理極高濃度的廢液。影響薄膜蒸餾的效能有諸多因素，包括薄膜特性、膜組構造及進料流體特性等 。

依照滲透端冷凝方式的不同，薄膜蒸餾常區分為四種操作：

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

進料溶液與冷凝液體分別在薄膜兩側與膜材直接接觸，兩股液體以同向或逆向方式流動，如圖 2(a)所示，蒸氣分子透過薄膜後直接在冷液體中冷凝。此模組構造簡單且容易操作，通量較高，然而也有較高之膜熱傳導損失的缺點，故熱效率較低。

(b).氣隔式薄膜蒸餾(air-gap membrane distillation, AGMD)

此程序中，薄膜另一側並非直接接觸冷卻液體，而是置有一冷凝熱交換界面，如圖 2(b)所示，蒸氣分子透過膜孔至另一側時，須再經過一段空氣間隙的擴散，最後接觸到冷凝板而被冷凝收集。因氣隔室內流體之熱對流係數低，可以降低薄膜熱傳導的熱損失，但氣隔室間隙常遠大於膜厚，以致蒸氣分子擴散傳送路徑大幅增加，因而明顯提高質傳阻力，造成其通量低於直接接觸式之操作。因蒸氣分子為直接冷凝收集，不會與冷卻液混合，獲得產物之純度較易控制，因此適用的範圍較廣。

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

此程序中滲透端流體一般使用空氣或惰性氣體，如圖 2(c)所示，蒸氣分子透過薄膜後直接被流動的氣體帶至系統外部冷凝收集。此程序與上述之 AGMD 一樣有氣體層的屏障，但氣體為流動狀態，因此會有較高的質傳係數，通量可高於 AGMD。但須設置外部冷卻系統，若欲進行熱回收則較困難 。

(d).真空式薄膜蒸餾(vacuum membrane distillation, VMD)

此程序與 SGMD 類似，不同處在於滲透端是藉由真空幫浦抽真空，如圖 2(d)所示，可提高膜兩側之蒸氣壓差及降低蒸氣分子於薄膜孔中的質傳阻力，有較高的通量，曾被用於氨氮脫除濃縮產製氨水或醇類移除等 。

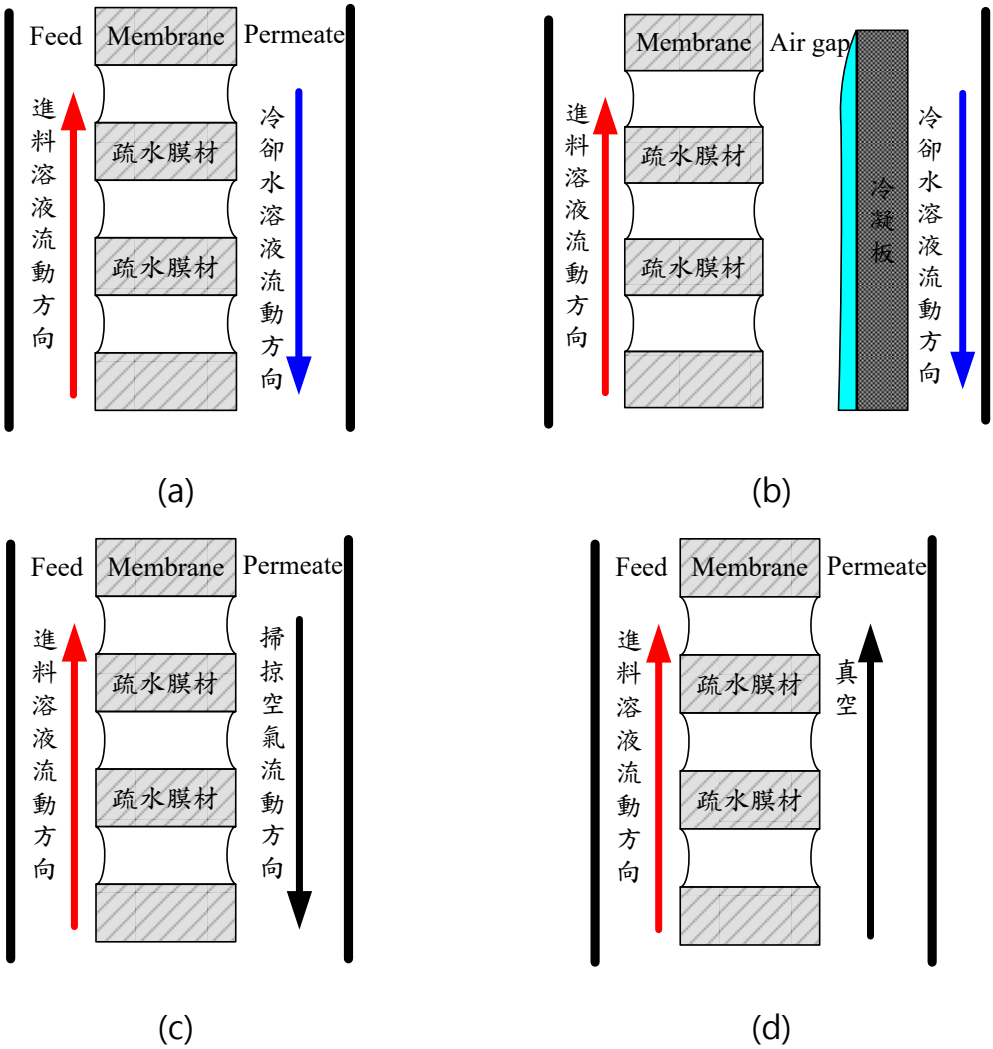



圖 2 薄膜蒸餾操作分類(a: DCMD, b:AGMD, c:SGMD, d:VMD)

## 貳、薄膜蒸餾的優勢

薄膜蒸餾通量受進料濃度影響較小，對非揮發性溶質具有幾乎 100%的阻擋率，且可利用太陽能、地熱或工業廢熱等低階熱源加熱進料的優點，早期薄膜蒸餾之研究大都集中於脫鹽淡化，近年在工業廢水的再生、海淡、生活廢水處理、食品工業及氨氮廢水處理與濃縮廢液等方面的應用研究探討相當廣泛。基於薄膜蒸餾幾乎可百分百去除離子之特性，近來也有將薄膜蒸餾用於水中砷、硼、鈾及氟等去除之研究，其移除率達 99.8% 以上。其主要優點分述如下 ：

一、低溫操作

在傳統的蒸餾操作，需加熱至液體的沸點，而薄膜蒸餾其薄膜兩端具有適度的

溫度差即可操作，可處理工業所排放具有溫度之廢水，如石化、鋼鐵及電廠等，也可以利用工業界所排放出的廢熱或太陽熱能等作為輔助熱源，使進料達到可操作溫度。有效的利用低階熱源為薄膜蒸餾的優勢之一，有諸多研究報告指出，若有充分的廢熱做為進料的熱源，以薄膜蒸餾進行海淡的產水成本約為逆滲透之 60~70%。

二、低壓操作及高水回收率

現廣為應用之逆滲透需提供高壓力以抗衡滲透壓現廣為應用之逆滲透需提供高壓力以抗衡滲透壓，隨著進料的逐步濃縮，所需的壓力亦隨之提高，例如於海淡應用上常操作大於 50 大氣壓，考慮到 RO 模組可承受的壓力與能耗，其可處理的溶液濃度及水回收率會有所限制，而薄膜蒸餾質傳驅動力為蒸氣壓差，受進料濃度影響較低，故在低壓下即可進行操作。

三、可產製高品質的純水

逆滲透對於二價離子（如 $Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$等）具有甚佳的去除效果，然而對於 $Na^{+}$和 $Cl^{-}$等一價離子常僅約 90%的去除率。而薄膜蒸餾理論上對於膠體、離子和不具揮發性物質是可以具有百分百的阻擋效果。 薄膜蒸餾與 RO 之優缺點比較如表 1 所示：

表 1　薄膜蒸餾與逆滲透相較之優劣勢

| 技術 | 分離驅動力 | 技術特色 | 產水水質 | 水回收率 | 備註 |
|---|---|---|---|---|---|
| RO | 壓力差, DP | 膜材及程序皆已成熟之技術 | 無法完全阻擋一價離子及砷(As)和硼(B)等 | 50 ~ 80% | 1.如進料為製程廢液，溫度高於 50 ℃，RO 模組一般無法承受<br>2.需較複雜之前處理<br>3.不適於濃廢液處理 |
| MD | 溫度差, DT | 發展中之技術,可利用太陽熱能或工廠廢熱等 | 對非揮發性物質近乎完全阻擋 | 80%以上 | 1.不適於含 VOCs 之進料處理<br>2.於充分廢熱條件下，單位產水成本約為 RO 的 2/3<br>3.於零液體排放有應用潛力 |

## 參、薄膜蒸餾之應用現況

一、水處理

目前薄膜蒸餾技術商業化相關資訊，以 Memsys 產品及德國 Fraunhofer 太陽能系統研究院(ISE)之設備較具體。Memsys 模組設計為平板多段 VMD 方式，針對各段蒸發潛熱能回收以加熱次段之液體，Memsys 發展之 MD 技術目前於中國已有許多實廠用於濃排液或特殊化學廢液之濃縮處理。德國 Fraunhofer 太陽能系統研究院(ISE)則開發螺捲式之 AGMD 模組，並結合太陽能為輔助熱源，已於德國及西班牙等建造多套日產水 1~2 噸之 MD 裝置。另外，韓國積極研發 MD 技術實場應用，成立 GMVP 計畫以推動具發展潛力之薄膜技術，串聯結合 RO, MD 及壓力延遲滲透(PRO)及後段有價物質如鋰的提濃等，建立完整之海淡與資源及能源回收的整合程序（圖 3）[Driloi 等 2016]。在此整合系統中，RO 的鹵水被送入 MD 程序進一步濃縮後，再送入 PRO 程序中做為提取液(DS)，而以廢汙水處理場之放流水做為進料液。但其 PRO 產生之水利壓力非用於發電，而係提供海淡系統進料增壓，預期可降低海淡整體能源需求之 20~25 %。

近年來，以薄膜蒸餾處理氨氮廢水亦漸被重視，其優勢在於低能耗與氨氮可回收再利用。部分半導體製程中會排放含有高濃度的氨氮廢水，傅等【2016】之報告中指出，採用薄膜蒸餾系統將半

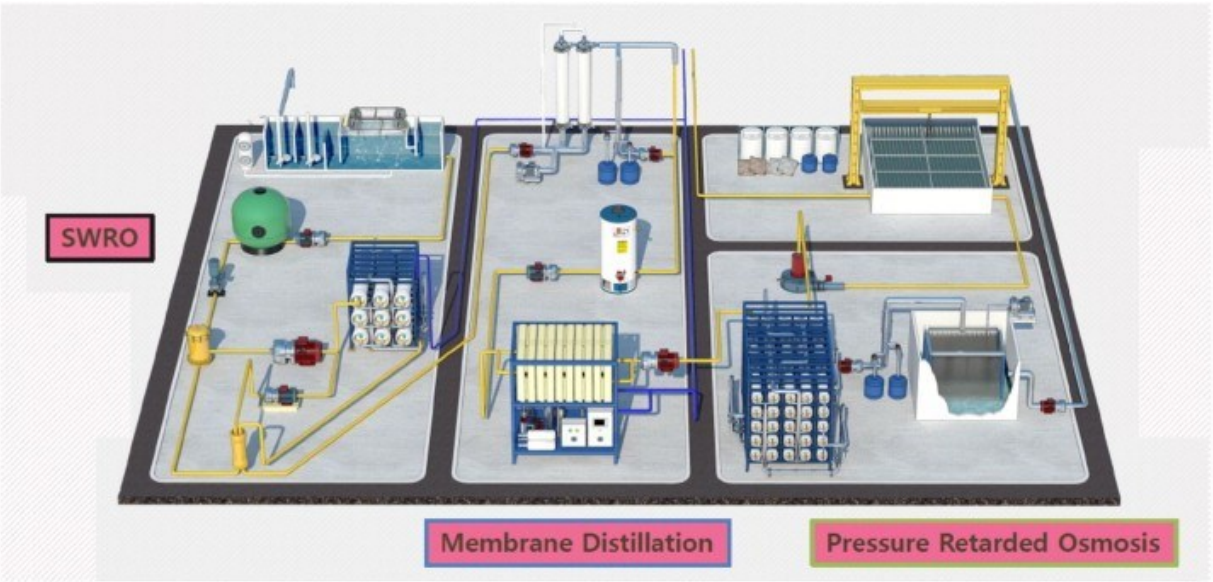



圖 3　G-MVP 計畫 RO+MD+PRO 系統示意圖[Driloi 等, 2016]

導體廠區之氨氮廢水結合場內製程之廢硫酸轉換為硫酸銨之液態廢液，並作為工業級硫酸銨回收再利用，台積電也與國內業者共同開發將此高濃度硫酸銨液，進一步產製濃度高於 20 %之氨水以供工業界使用。

二、零液體排放之應用

液體近零排放牽涉到濃排廢液之再濃縮、結晶，並將剩餘的液體回收再循環及固體資源化或廢棄物處理等，圖 4 列出 RO、滷水濃縮器（蒸發操作）及結晶罐等適用鹽濃度範圍及其能耗，雖這幾種再濃縮之技術（ED ：電透析，FO ：正向滲透，MVC ：機械蒸氣再壓縮，MD ：薄膜蒸餾等）可用於處理 RO 濃縮液體，但為了達成近零液體排放，數種或多種的處理技術組合排列常是必要的，例如膜處理技術通常需要對 RO 濃縮液進行中間處理以降低結垢離子的濃度。熱處理技術與膜技術相結合有望達成近零廢液排放，選擇膜處理的主要判斷因子是 RO 濃縮液中的總溶解固體(TDS)含量，例如在總溶解固體高>40,000mg/L 中，需要大於 31bar 的施加壓力才能克服原始滲透壓，因此，對於具有高 TDS 含量的 RO 濃縮液（例

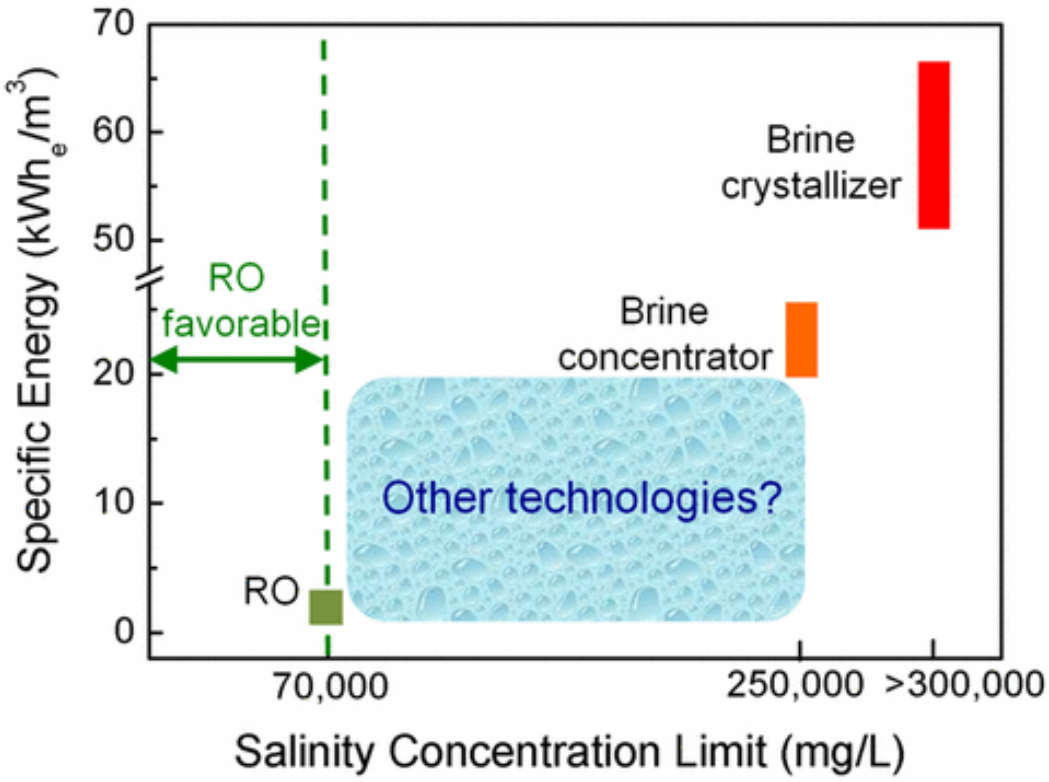



圖 4　濃排液濃縮操作之方法、能耗與其鹽濃度限制[Tong and Elimelech, 2016]

如海淡滷水），利用薄膜處理(FO, MD)將可進一步減少濃縮液體積。對於近零排放，針對末段單元目前常考慮以結晶來回收鹽類，薄膜蒸餾(MD)結合結晶有望處理濃縮液的問題[ Lu 等, 2019; Anshul 等,2022 ]，如圖 5 所示，也是近年常被提及的處理流程。

三、國內薄膜蒸餾模廠案例

由於薄膜蒸餾程序涉及相變化，熱能需求大，若以電能加熱進料，其產水成本將甚高於傳統 RO 程序。薄膜蒸餾可利用產業廢餘熱作為熱源，一般而言，石化廠、鋼廠、電廠或染整廠等大廠會有較大量溫廢水或廢熱量，基於廢熱再利用及產製水在廠內循環再利用的設計構思，經濟部水利署曾補助 [ 水及能資源全回收低排碳薄膜系統 ] 計畫、於高雄林園某石化廠進行 1 CMD 產水試驗模廠（圖 6），該廠排放之廢水溫度約 55~62 ℃，雖濁度甚低，但含有甚微量金屬離子及高分子聚合物，因而無法直接再利用，於國內相關石化業也有類似之製程廢水，且該廢水排放量皆甚大，這些石化業者多年來曾嘗試如超過濾、奈米過濾及逆滲透等欲進行該廢水回收，但皆沒有達有效之分離效能，據悉這些藉壓力推送之薄膜過濾程序易導

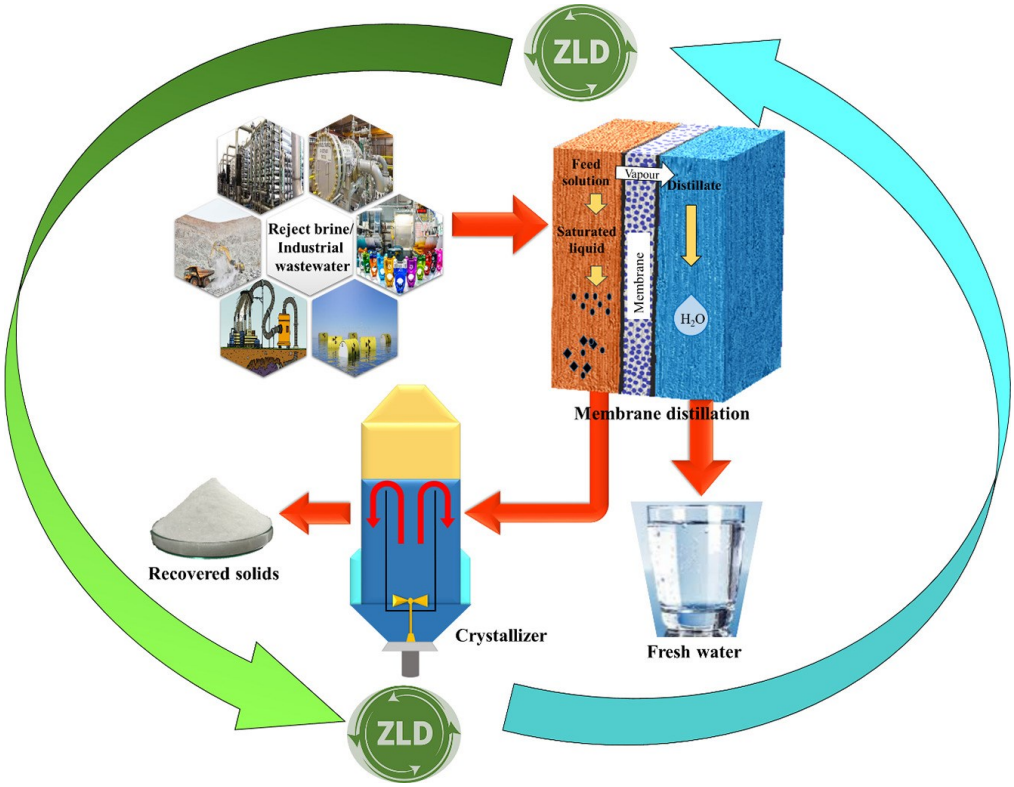



圖 5　水處理零液體排放之流程(含 MD)示意圖[Anshul 等,2022]

致該高分子聚合物附著於膜面並堵塞膜孔，因而大幅降低過濾速率。

薄膜蒸餾模廠試驗結果，顯示該股廢水中易堵塞濾膜之高分子聚合物並未對此模組造成效能衰退的影響，其水質檢測的數據也顯示甚優於 RO 產水。特須注意的結果是通量深受模組內膜管填充密度的影響，對所採用之 6 吋模管，提高填充密度時，通量由 5.3 降至 3.8 LMH。

目前該石化廠廢水進入薄膜蒸餾模組之溫度 55~60℃，若進出模組溫度降為 20℃，則熱液體每流經模組一次其顯熱變化約僅能提供 3 %進料液體蒸發並傳送透過薄膜，然實際上該股溫廢水於排放前之製程中的溫度高於 70℃，當產業有 70~80°C 之廢水，則每次流經模組可約有 6% 的蒸發量。若藉由該石化廠內廢熱回收之程序整合，未來進入 MD 模組之溫廢水應有可能達 70℃。若將進料溫度提高至 70℃時、兩不同填充密度模組試驗通量分別為為 5.3 及 7.2LMH。至於產水水質部分，高溫度較大通量下，其產水水質仍維持離子與有機物之近乎完全被阻擋。

分析薄膜蒸餾之產水成本與和其他技術之競爭性對其未來工程應用甚為重要。在工業程序中，成本評估包含資本成本 (Capital cost) 與操作維護成本 (Operation and maintenance cost)兩部分，其中前者包括與項目實施相關的所有支出如設備成本、設備建造、土地等，而操作維護成本則包含人力成本、維護成本及膜更換成本等。以石化廠每日可產水 200 噸為基準（所需的熱能除原溫廢水本身熱能外尚需有其他廢餘熱補充），先計算出所需膜面積，然後參考 Khayet & Matsuura 【2011】, Sirkar 等【2009】及 Noor 等【2020】對 MD 成本估算報

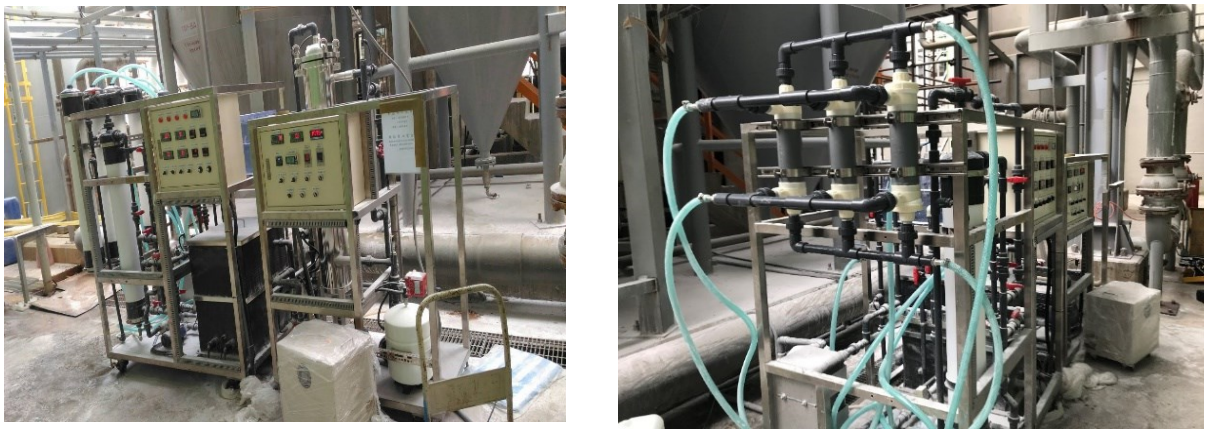


圖 6 MD 模場系統設備照片

告之參數基準，表 2 為石化廠溫廢水以管式及平板式模組進行成本估算所得的產水成本，於進料溫度 70℃ 管式模組之通量 5LMH 條件之產水成本估算為 NT$29.3/噸, 而平板模組有較高通量於 60℃通量即達 11LMH，成本評估降至 NT$20.29/噸。這產水成本評估約在 NT$20~29/噸，因其水質優於 RO 且可抑制該廢水中微量高分子易造成膜孔堵塞等問題，當場域之廢熱可回收並足夠提供 MD 操作之熱源時，MD 產水成本之評估結果顯示其具產業應用之潛力。

## 肆、結論

依據薄膜蒸餾所具備之優點,其有應用潛力之對象可歸納如下:

1. 處理高氨氮及多環芳烴有機廢水
2. 處理高鹽濃排廢水
3. 零液體排放(ZLD)薄膜整合程序

表 2　依據石化廠 MD 模廠試驗評估產水成本

| 項目 | $MD_a$ | $MD_b$ | $MD_c$ | $MD_d$ |
|---|---|---|---|---|
| 通量(LMH) | 3.8 | 4.5 | 5.0 | 11 |
| 產水量(CMD) | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 薄膜面積($m^2$) | 2193 | 1852 | 1667 | 757.6 |
| 系統設備(NT$) | 6,578,947 | 5,555,556 | 5,000,000 | 3,030,303 |
| 資本成本(NT$) | 9.398,496 | 7,936,508 | 7,142,857 | 4,329,004 |
| 年化資本成本(NT$/年) | 1,101,790 | 930,401 | 837,361 | 507,491 |
| 電能成本(NT$/年) | 281,050 | 281,050 | 281,050 | 281,050 |
| 薄膜更換(NT$)<br>(每年更換 20 % ) | 657,895 | 555,556 | 500,000 | 303,030 |
| 操作成本(NT$) | 1,564,908 | 1,394,343 | 1,301,750 | 973,467 |
| 年產水成本(NT$) | 2,666,698 | 2,324,73 | 2,139,111 | 1,480,959 |
| 產水成本(NT$/$m^3$) | 36.53 | 31.8 | 29.3 | 20.29 |

*:a,b,c 管式模組，d 平板模組

4. 有大量餘熱、低階熱源可利用的系統進行水回收

5. 對材質要求特殊的濃縮系統，如廢酸、廢鹼的濃縮

然薄膜蒸餾技術目前仍無法如 RO 為業界所廣為認知與應用，其原因除能耗考量外，膜材需求及模組設計也異於傳統膜過濾分離，如何有效藉由熱回收之程序整合以降低能耗及模組放大之設計等，皆是未來工程應用待解決的問題。

## 參考文獻


1. Anshul,Y., Labhasetwar Pawan K., Shahi Vinod K (2022).Membrane distillation crystallization technology for zero liquid discharge and resource recovery: Opportunities, challenges and futuristic perspectives, Science of The Total Environment, 806, Part 2, P 150692-150692

2. Drioli, E., C.A.Quist-Jensen, A. Ali, S. Mondal, F. Macedonio (2016). Integrated membrane systems for minerals recovery from the sea, Plenary lecture, WFC12 , Taipei

3. Khayet M. and Matsuura T. (2011).Membrane distillation principles and applications, Chap 15 Economics, energy analysis and costs evaluation in MD. Membrane Distillation 2011, Pages 429-452.

4. Lu, K.J., Cheng, Z. L., Chang, J., Lui, L., and Chuang, T.S. (2019). Design of zero liquid discharge desalination (ZLDD) systems consisting of freeze desalination, membrane distillation, and crystallization powered by green energies, Desalination, 458, 66-75

5. Noor, I., Coenen, J., Martin, A. & Dahl, O.(2020). Performance assessment of chemical mechanical planarization wastewater treatment in nano-electronics industries using membrane distillation. Separation and Purification Technology, 235, 116201.

6. Sirkar K.K. and Song L.(2009) .Pilot-scale studies for direct contact membrane distillation-based desalination process, Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No.134

7. Tong, T., and Elimelech, M. (2016),

The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: Drivers, Technologies, and Future directions, Environ. Sci. & Technol, 50, 6846–6855

8. 傅正貴、李玫、許哲彰、王俊元 (2016) "創新氨氮廢水資源化"2016 科學工業園區廠務技術研討會

# 水回收處理與能資源利用

施武陽[1]、陳孟儒[2]


## 摘要

水資源與能源是社會永續發展的關鍵要素，除持續開發新興水源外，也應檢討水資源開發與水處理降低能源消耗之可能性，導入在地綠能或廢熱之應用，更有效率地整合管理運用水資源與能源，因此，建議逆滲透產水應導入智慧化環境監測(SCADA)與模擬分析技術，進一步建立膜壽命參數估測以利於回饋高耗能操作壓力計算，藉以降低逆滲透水處理之單位能耗，未來結合電能管理概念導入綠能開發節能晶片整合 RO 模組量產將有助於開拓水資源藍海市場 。



1.國立中興大學生物產業機電工程學系 / 教授

2.國立中興大學生物產業機電工程學系 / 研究生

## 壹、背景

水資源已是二十一世紀人類所面臨最重要的課題之一，水資源對於民生需求、企業營運及國家發展有重大之關聯性，氣候變遷造成極端降雨與乾旱，全球氣候的溫室效應更加劇了水資源缺乏的危機，為因應氣候變遷，歐洲首先提出「歐洲綠色政綱」，要在 2050 年達成碳中和，時至今日已有 120 個國家提出相關減碳目標與進程。我國亦於 2020 年 2 月 14 日核定國家環境保護計畫，回應聯合國「Agenda 2030」永續發展議程，並提出近、中、長程執行策略與目標，針對氣候變遷因應等議題，提出我國 2030 年之願景，並進一步落實 2050 年達到碳中和之國際趨勢 。

## 貳、臺灣現況分析與面臨挑戰

臺灣位於亞熱帶季風區，受惠於梅雨與颱風 5 到 10 月為豐水期，11 月至隔年 4 月為枯水期，由於地形、風向的關係，臺灣地區降雨的機率有所不同，能否在豐水期內儲存足夠的水量是至關重要的，但隨著氣候變遷，臺灣年平均降雨量呈現緩步減少趨勢，但區域性極端降雨機率卻大增，這對於水資源的保存利用來說非常不利，近年政府亦積極推動再生水產業以及大型海淡廠之規劃，然而無論是再生水或是海淡廠之運作，除了產水成本高之外也需大量的能源供應，且操作成本有很高的比例來自電能的需求，故節電管理措施、導入綠電或是採用低耗能設備為推動水相關產業不可或缺之重要技術。其中結合再生能源以降低再生水之能耗，不僅可以有效利用水資源，還可減少環境衝擊，達到永續發展之目標。因應社會發展水的使用需求逐年的增加，在臺灣現地生產能源有限情形下，在綠能開發尚未完善之前，有效運用管理能資源為首要之務。

本篇文章針對水資源與能源整合降低能耗技術研究現況進行說明，以逆滲透 RO 水處理技術為主軸展開海淡水、污水與再生水處理導入再生能源之運用說明，佐以污水處理分析實例探討能源基線建立、遠端監測與電能管理整合的可行性，最後報告未來水資源與能資源整合技術方向，以利未來有效利用再生能源、降低新興水源能耗、促進國家穩定安全供水之目標 。

## 參、水資源與能源整合開發之研究現況

除了傳統水資源之外，新興水資源來自海水淡化與再生水等，水處理技術主要是逆滲透(RO)，國際上 RO 海水淡化廠於 2020 年快速成長數量佔比達八成以上，其次是使用熱技術之多級閃蒸(MSF)與多效蒸餾(MED)，以及少數電透析

(ED)。而 RO 海水淡化回收率以 42%、處理後水質 TDS 為 500mg/L 之實廠耗電量平均約 3-6kWh/$m^3$，整體海水淡化之能耗與成本現況整理如表 1。以下說明案例將以 RO 技術為主軸做闡述 。

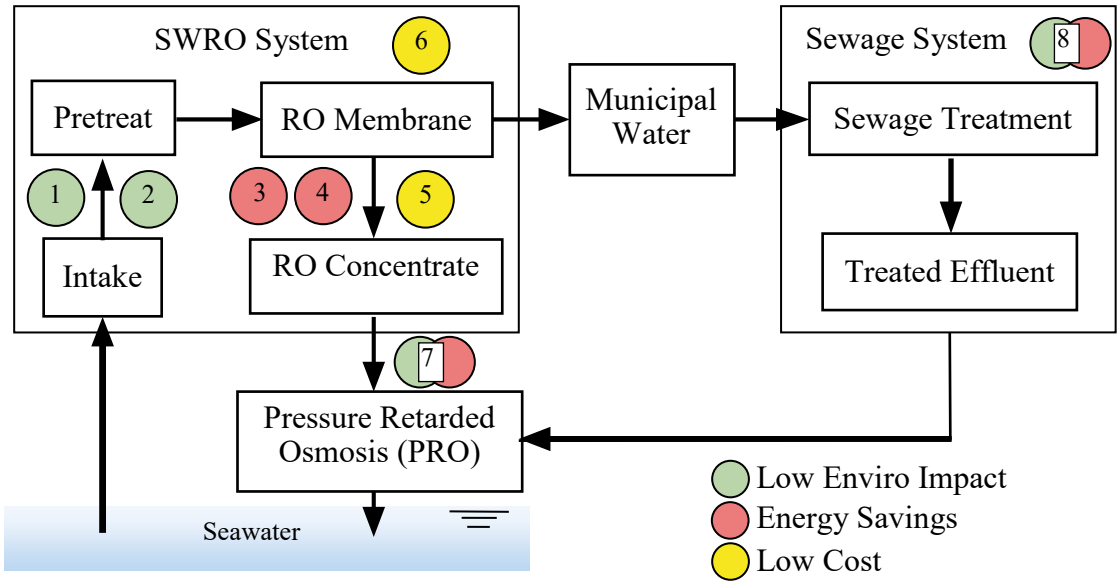
表 1、海水淡化技術現狀

| 產水技術 | 平均產水量 (CMD) | 進水 | 回收率 (%) | 產水 TDS (mg/L) | 能耗 電能 (kWh/$m^3$) | 能耗 熱能 (kJ/kg) | 產水成本 (美元/$m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MED | 0.6-30 | SW | 0.25 | 10 | 1.5-2.5 | 230-390 | 0.52-1.5 |
| TVC | 10-35 | SW | 0.25 | 10 | 1.5-2.5 | 145-390 | 0.87-0.95 |
| MSF | 50-70 | SW | 0.22 | 10 | 4-6 | 190-390 | 0.56-1.75 |
| MVC | 0.1-3 | SW | | 10 | 6-12 | 無 | 2.0-2.6 |
| SWRO | 1-320 | SW | 0.42 | 400-500 | 3-6 | 無 | 0.45-1.72 |
| BWRO | 超過 98 | BW | 0.65 | 200-500 | 1.5-2.5 | 無 | 0.26-1.33 |
| ED | 超過 145 | BW | 0.9 | 150-500 | 2.64-5.5 | 無 | 0.6-1.05 |

(TVC 為熱蒸氣壓縮； MVC 為機械式蒸氣壓縮)註： SW:海水； BW:淡海水[1]

## 肆、Mega-ton Water System 開發計畫

Mega-ton Water System 日本國家型開發計畫下鎖定開發六大核心技術，包含低壓高透 RO 膜與低壓多段 RO 系統、高壓能源回收(ERD)系統、濃度差發電(RO+PRO)系統等，日本 NEDO 於 2020 年發表可節能 30%、日產百萬立方公尺的海水淡化設備，並已完成在北九州市與南非德班市等地實證試驗，整合海水淡化與再生水的混合式系統。HITACHI 公司在該計畫中開發節能系統整合，使用 Toray 低壓高透型膜降低 RO 膜耗能 20%，加上利用海淡水濃度差透過壓力延遲膜(PRO)產生壓差(13.3W/$m^2$)推動渦輪機產電回收電能 10%。以德班市當地中部污水廠為例再生水產水量 6,250CMD，海淡水部分則是通過超濾膜(UF)進行前處理，處理後鹵水與再生水混合以稀釋海水，降低環境影響。後續市場鎖定自來水（多段 MF, UF）、海水淡化（MF, UF+多段 RO）以及生物廢水(MF, UF+RO)與工業廢水(MBR+RO)的混合型態整合運用。




1-Intake technology
2-chemical-free pretreatment
3-Low-pressure membrane
4-High-efficiency energy recovery
5-Low-cost, corrosion resistant piping
6-Intelligent SWRO plant systems
7-PRO membrane systems
8-Innovative wastewater treatment

*Mega-ton Water System Themes and Water Cycles*

圖 1　日本 Mega-ton 國家型計畫六大技術[2]

## 伍、導入再生能源於離峰產水

J. S. Kim et al. (2016)透過離峰電力加上再生能源電力生產飲用水，評估上層之需水量即時調度回饋管理產電量之可行性，並以電池等儲能元件輔助以彌補再生能源的間歇性，當混合儲能（產水＋電池）排除電池的話，將導致營運和維護成本大幅增加，並縮短產水系統壽命，導因控制閥、泵和 RO 膜會快速直接響應劇烈變化的再生能源電力而耗損。實際模擬導入再生能源產水的狀況如圖 2 是儲能電池對電力均化的貢獻，圖 3 說明在再生能源間歇供電下，膜的過濾流量與控制閥壓力與產水品質等關係，與固定操作壓相比控制壓力變動劇烈對膜的壽命影響相當明顯。

## 陸、再生能源直接提供產水用電

由於再生能源的間歇性和波動性，與 RO 設備的直接耦合需要變速調控壓力，以匹配負載與可用功率進行相應之壓力與流量控制產水。本例透過建置實驗室等級 RO 產水設施以直接評估利用再生能源並提供 AI 所需的參數以訓練壓力操作達到優化的要求，如圖 4 是以風能為例之配置。啟動風速 6m/s 時風能分布函數是 0.367、產電 6kW，如圖 5 風速 6m/s 以下或超過 10m/s 無法產水。控制系統實施的類神經網路模型生成操作進料流量和壓力設定點，同時確保滲透回收率，防止異常導致膜系統超出操作極限而需要對控制器參數進行最佳調整，如圖 6 所示 。

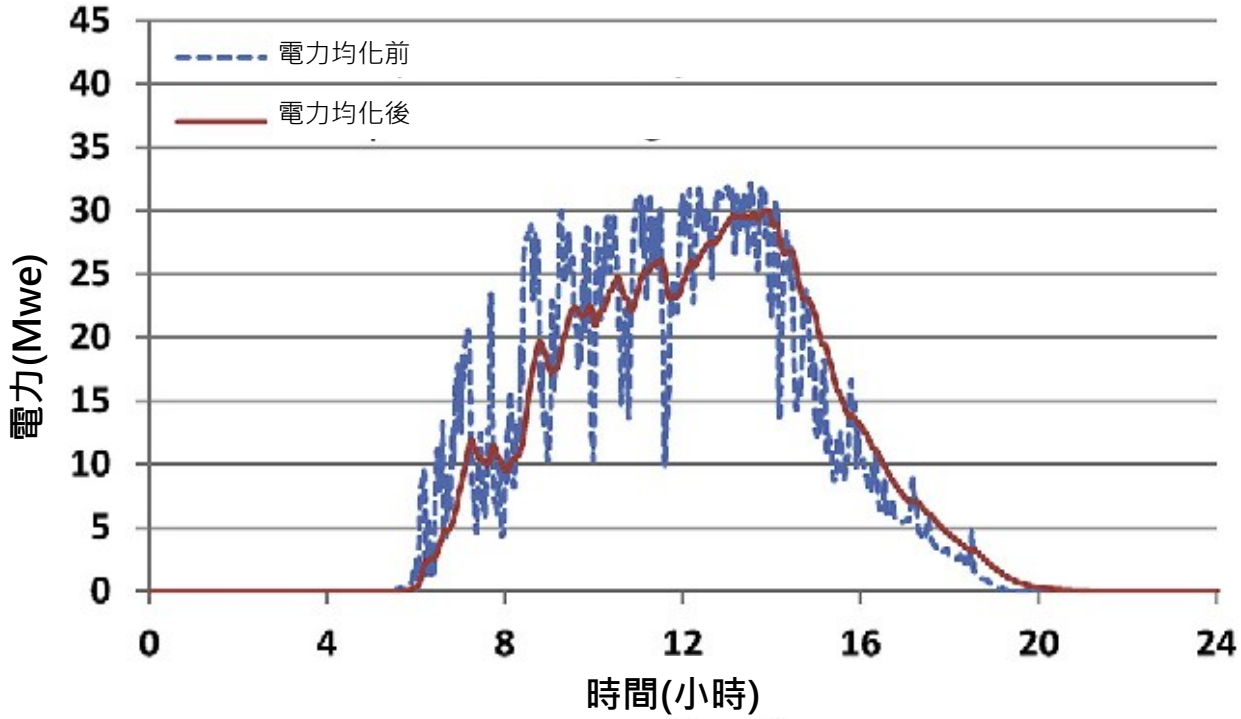



圖 2　儲能系統 ESE 對電力均化的貢獻[3]

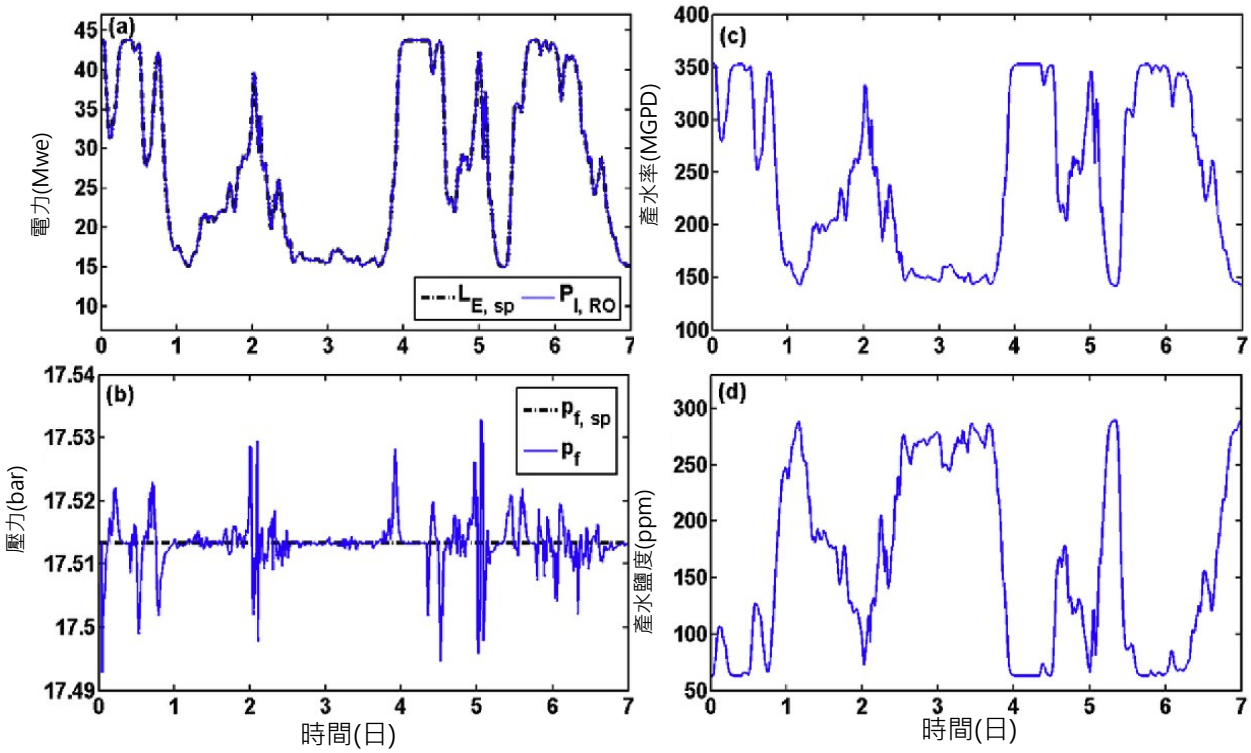



圖 3　再生能源膜過濾流量、控制閥壓力與產水品質[3]

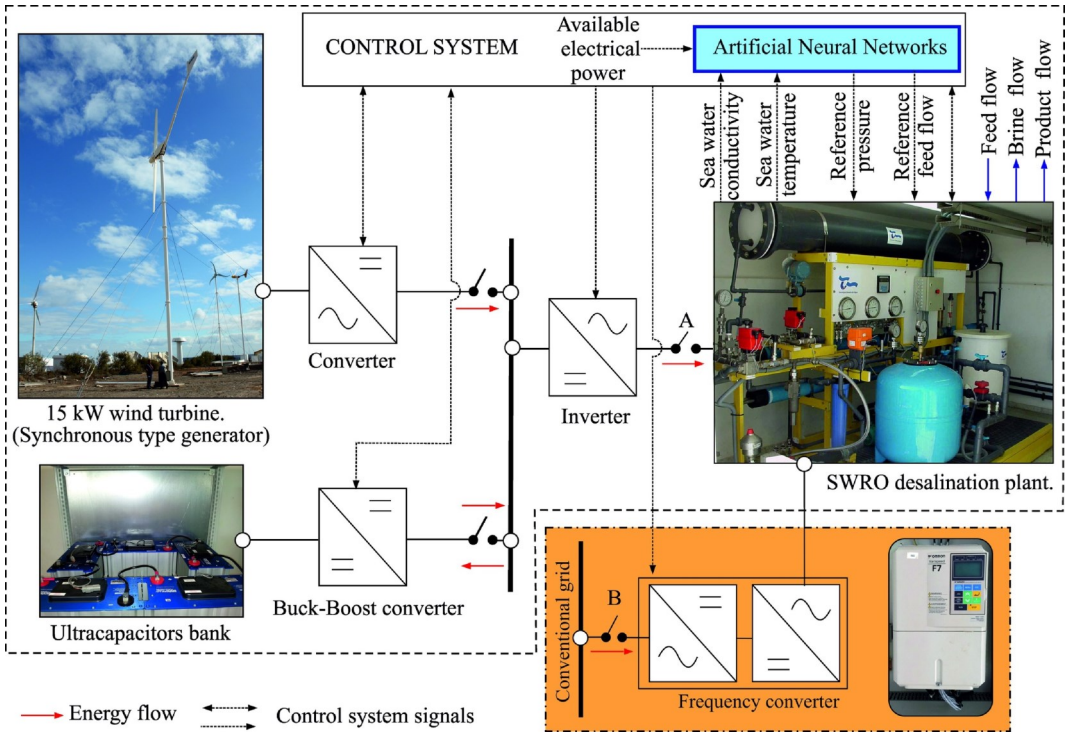



圖 4　控制系統中應用類神經網路模型架構圖[4]

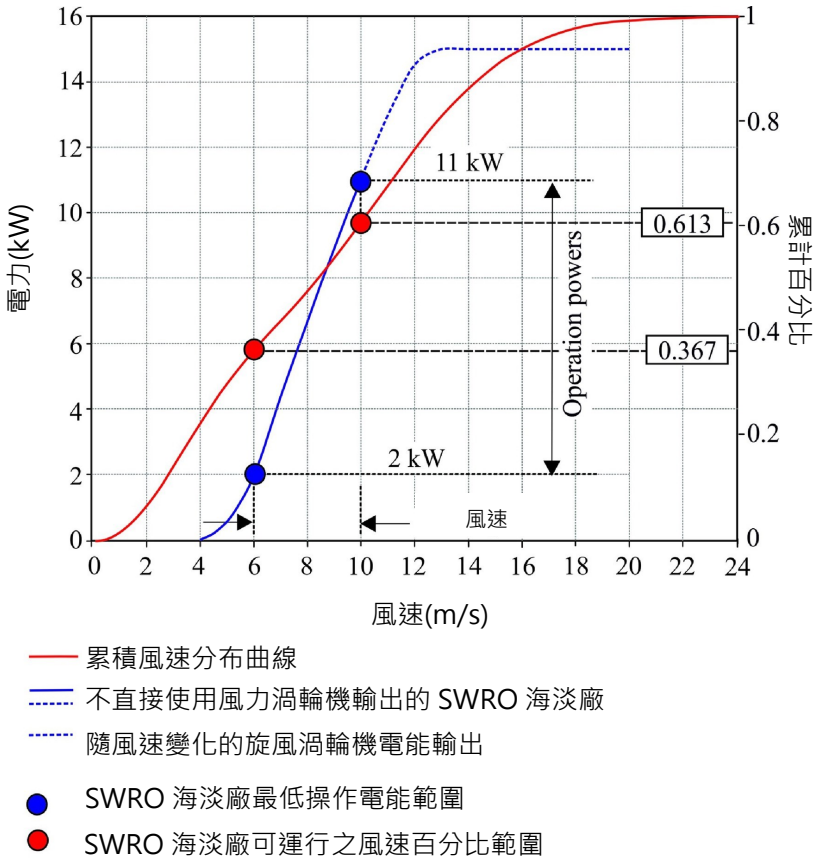



圖 5　不同風速之最大功率與海淡廠之操作極限[4]

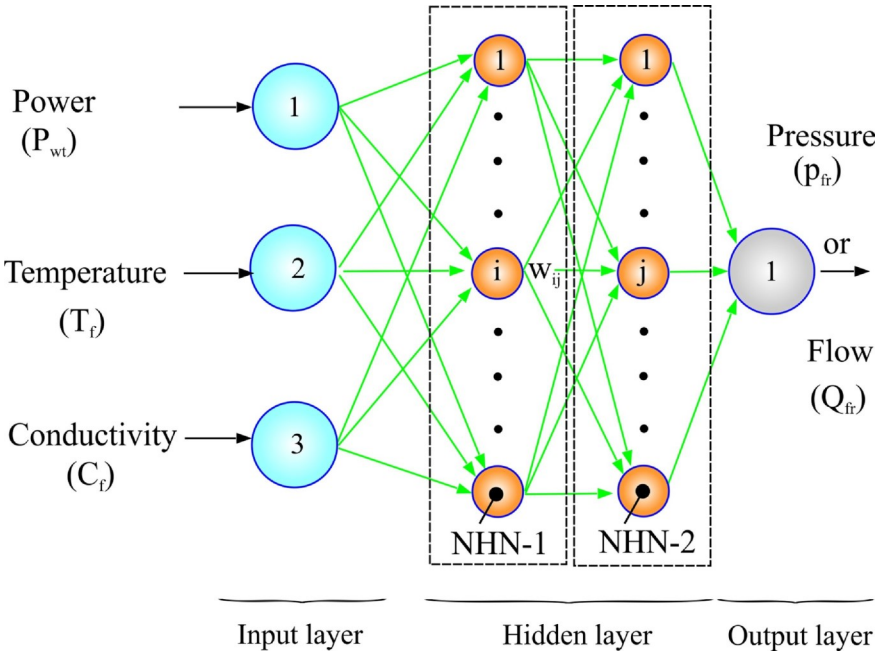



圖 6　類神經網路模型之輸入資料與輸出資料[4]

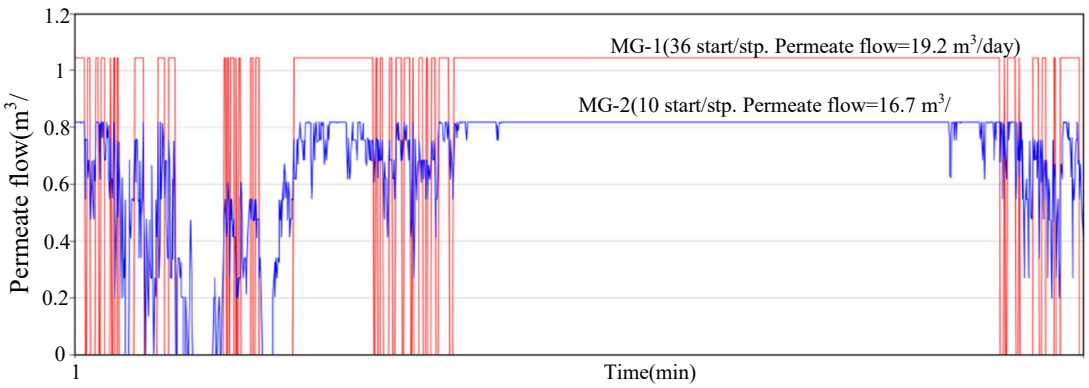
另一例是應用機器學習訓練風能直接利用產水壓力操作優化的案例分析，平均風速 8.5m/s 的風能在不同時間點風速的分布差異大，而圖 7 為定壓力(MG-1)控制與變壓力控制(MG-2)的產水量($m^3$/h)，從結果來看機器學習變壓力控制比起恆定壓力與流量管理，海淡廠運轉頻率高、產水品質高 1.08 倍、薄膜壽命長 1.2 倍。

## 柒、水處理技術節能評估拔粹

RO 技術目前已發展成熟並廣泛的水處理應用，除了再生水產製外，在海水淡化之 RO 相關技術更為成熟。以應用能源回收裝置(ERD)為例，為了克服海水逆滲透過程中海水進料的高滲透壓，需要非常高逆向的操作壓力，而 ERD 為通過導引鹽水流之高壓能量到進料流來回收能量，可分為離心式和等壓式，可有效降低能耗至少 70%。與逆滲透相比，海水淡化熱技術需要更高的能源需求和維護成本，因此只有特定地區或目的之應用，此外，不同海水淡化技術的混合搭配使用亦可大幅度降低能耗。而污水回收再生技術方面，鎖定在去氮過濾，以膜生物反應器(MBR)和傳統活性污泥(CAS)技術較為廣泛使用，但為降低潛在的微生物風險，通常將次級廢水通過砂濾、紫外線、游離輻射，或是通過化學處理進行高級處理。減少膜結垢的技術以及膜反洗的頻率是 MBR 節能的重點；但對於 CAS 而言，曝氣量的設定與排程是節能操作的重點。

## 捌、污水處理整合能源或資源回收再利用

按日本福岡市政府 2016 年之統計，日本全國污水處理廠所產污泥之沼氣提煉氫氣，可供 186 萬輛氫能車行駛，除此之外，日本全國每年使用 70 億度電處理 146 億立方公尺的污水，其中水處理技術本身使用電量最高達 47%，所排溫室效




註： MG-1:定壓力、MG-2:變壓力控制

(資料來源： Cabrera P et al., 2018)

圖 7　定壓力控制與變壓力控制下產水量變化

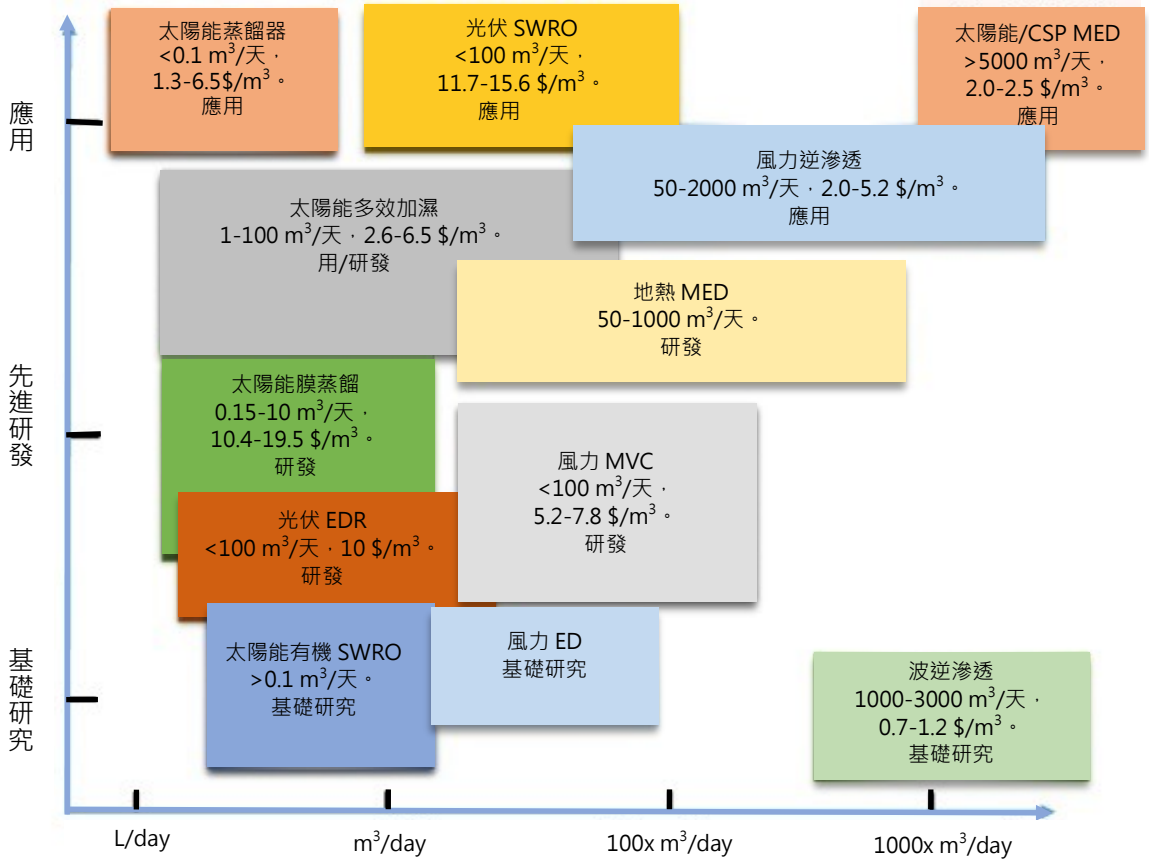
應氣體自 1990 年至 2013 年持續增加了 40%，其中曝氣處理程序所占比例最大約 6 成，其次為未利用污泥燃燒約占 2 成。但污泥經脫水處理後能夠經由燃燒爐、碳化爐與堆肥化設施產生建設原材料、碳化燃料或是堆肥，未來收集處理周邊地區廚餘與生質廢料，所產生之污泥轉化為含磷肥料或是製成固形燃料(RDF)可供發電廠使用，綜言之，污水下水道的能資源整合可以分為再生水、熱能、污泥與沼氣，目前，以日本污水所產污泥為例僅利用了 25%，整體磷肥開發的話可降低 10%海外進口量。在節能方面，霞浦水循環中心與 HITACHI 合作導入 ICT 技術監測污水氨氮濃度以回饋控制生物反應槽所需的風量，有效降低 27%能耗；小山川循環中心採用 Metawater®高效固液分離技術代替沉澱池作為前處理設備，並以生物反應槽中的兩點 DO 控制技術作為節能的循環通道，估計用電量減少 40%，興建成本降低 20% 。

## 玖、水處理技術與再生能源整合開發

水處理與能源是密不可分的，如上一個章節所說明，污水處理的程序具有豐富再生能源產出的潛力，以污泥為例所伴隨沼氣的開發利用直接對於廠內能源回收有助益，而再生能源的利用也不應侷限在廠內，如上文所提到澳洲伯斯海水淡化廠所使用風能綠電就來自於鄰近地區的大型風力發電陣列，此外，太陽能也是選項之一，但缺點是安裝面積的要求，如運作小型 RO 海淡廠（1CMD，單位能耗約 8 kWh/$m^3$），就需要約 26.5-28 平方公尺的面積，圖 8 說明各種再生能源在海淡的應用，除太陽能風能之外，地熱也有實績。臺灣在地未開發綠能豐富加上廢熱與在地廢棄生質材料等，在水處理設備建置之初應加以整合應用，加速淨零碳排進程的推動。為克服風能太陽能等間歇性問題，成本低廉的蓄電池或是回收電池仍是最優先選項，國際上也有將蓄水池(reservoir)列入評估選項來穩定供水 。

## 拾、RO 污水處理技術模擬分析實例

相較於海淡，污水處理實際上與生活及工業生產關係密切，地區發電廠每日消費大量電力進行污水除氮過濾。而除氮技術可再細分為物理化學法和生物法兩種。物理化學法分別為氣提法、離子交換、RO 逆滲透、折點加氯法等；生物法分為傳統活性污泥法(CAS)和厭氧氨氧化法(Anammox)兩種。針對污水廠整廠節能減碳是刻不容緩的。首先有賴於自動化數據收集監測系統(SCADA)的追蹤，透過結合遠端終端控制系統(RTU)、可程式化邏輯控制器(PLC)、通訊網路和人機介面的數據收集和監控系統實現即時管理與控制，如圖 9 ，進一步可透過即時數據導入數值建模，建立節能策略並評估節能效




資料來源： M.W. Shahzad et. Al, 2017

圖 8　再生能源動力海水淡化技術的現狀

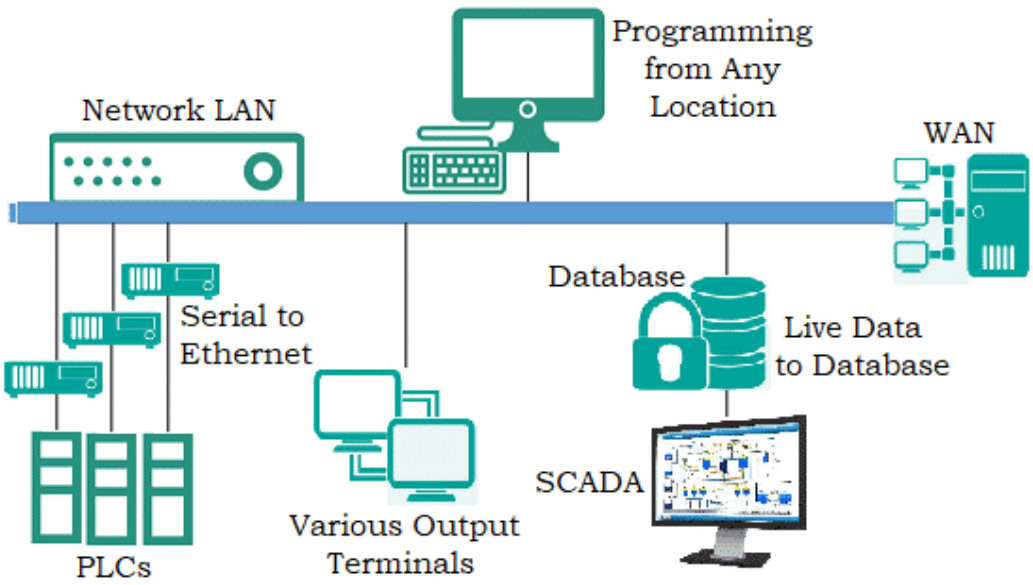



圖 9　數據收集與監視控制系統(SCADA)系統概念圖[8]

益。以下針對臺灣三個不同規模與場域的污水處理節能策略進行比較探討。誠如所知，技術上污水廠的耗能受許多因素影響，如廠的規模、選用的處理程序類型、進流水水量和水質、各單元的操作條件和其穩定性與自動控制系統的操作策略等相關，常見的二級處理程序多為使用活性污泥法，然而曝氣過程可能佔污水廠整體電力消耗的 50%-90%，如能精確掌握控制曝氣量則節能事半功倍 。

**實廠分析_A 廠**

位於航空城之 A 廠水資中心所採用的節能策略為在廠區內裝設 SCADA 動態能耗與水質監測儀器，透過生化模擬數值模式 GPS-X 評估鼓風機馬達動態所需風量與耗能回饋控制需求，如圖 10，關鍵即時參數為入口溶氧量(DO)與出口之氨氮濃度。A 廠數值模型動態模擬驗證項目分別為 BOD、TP、TKN 和 COD 四項。圖 11 為模擬能耗和實際能耗比較，經優化風量可節省電能約達 20%(較前一年值)[6] 。

**實廠分析_B 廠**

位於臺北已營運多年之 B 廠節能策略為通過 DO 開/關控制、DO_PI 控制和多重氨氮回饋+PI 控制來探討減少二級處理的曝氣量，以 DO 開/關控制器為例，當 DO 達到設定下限(set point 1)時，增加氣流到上限(set point 2)，來保持溶氧濃度； DO 馬達 PI 控制器是通過控制曝氣速度 PID 值來準確控制溶氧 DO，以此例最佳曝氣量為 240,000m$^3$/d，比例增益為 10000，積分時間為 0.001 天。圖 12

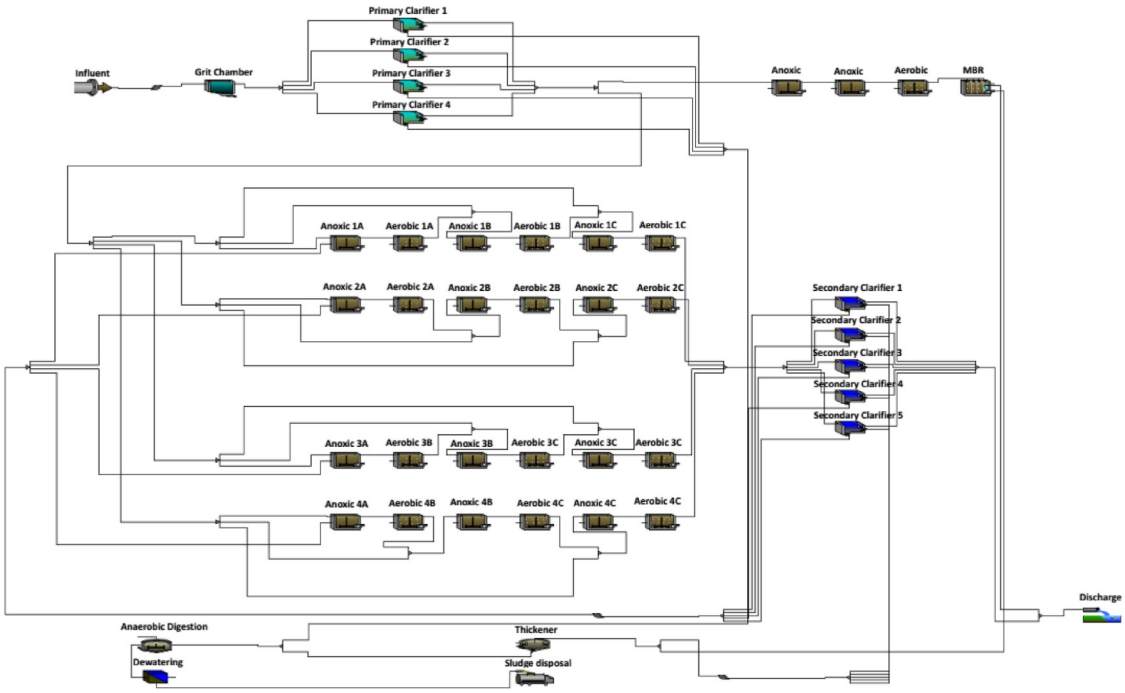



圖 10　A 廠 GPS-X 數值模型[6]

中結果為溶氧濃度接近 DO 設定值，對出流的氨氮濃度有一定影響，表明 PI 控制器為反應槽提供合適的曝氣速度。圖 12 右為應用多重氨氮控制器後的氨氮濃度的變化，多重氨氮回饋+PI 控制器由氨氮回饋開關控制器加 DO_PI 控制器組成，將氨氮穩定控制在 0.5-3mg N/L、DO 控制在 0.5-2mg$O_2$/L，有效降低氨氮濃度和能耗[7]。

**實廠分析_C 廠**

位於臺北科學園區之中小規模 C 廠的節能策略為按照不同時段的水質狀況調整曝氣量，以達節能之目的並降低操作複雜度。C 廠將每日等分為 6 個時段，每個時段 4 小時，圖 13 為 C 廠 1 天 GPS-X 模擬與實際之總累積能耗，其中 C 廠每日進流量為 124,503CMD，每日總能耗為 24,900kWh，換算平均能耗 0.2kWh/

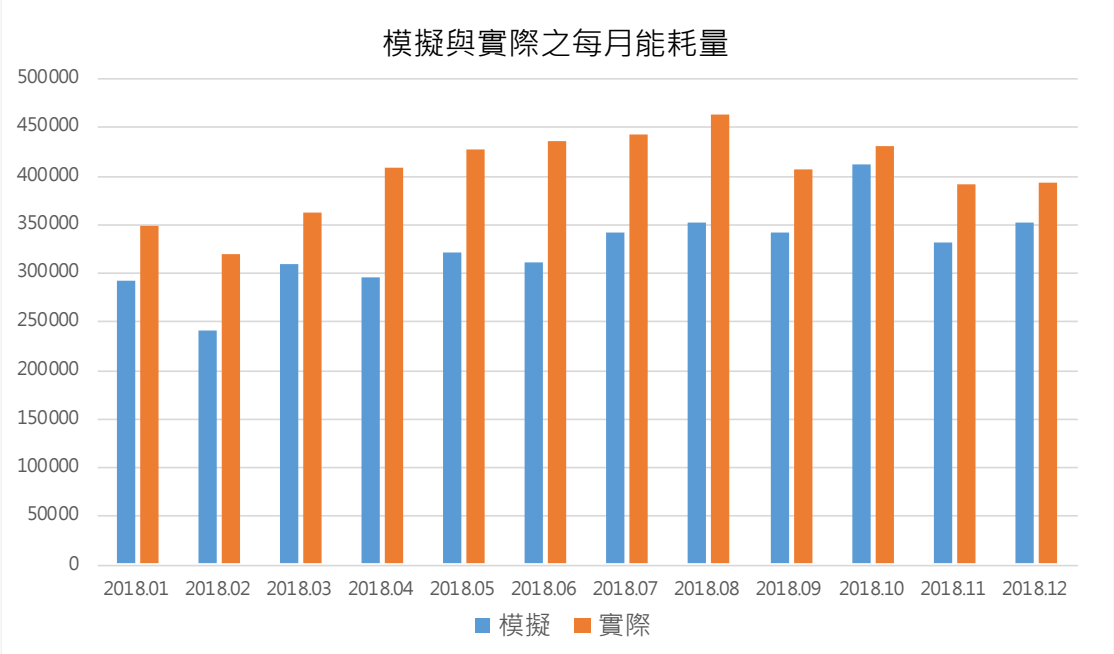



圖 11　模擬與實際之每月能耗比較[6]

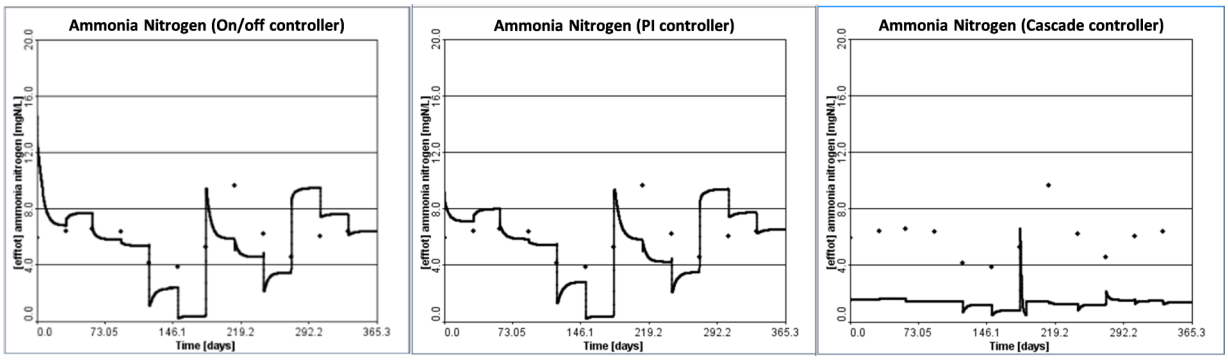



圖 12　B 廠應用混合式氨氮回饋控制器後的氨氮濃度[7]

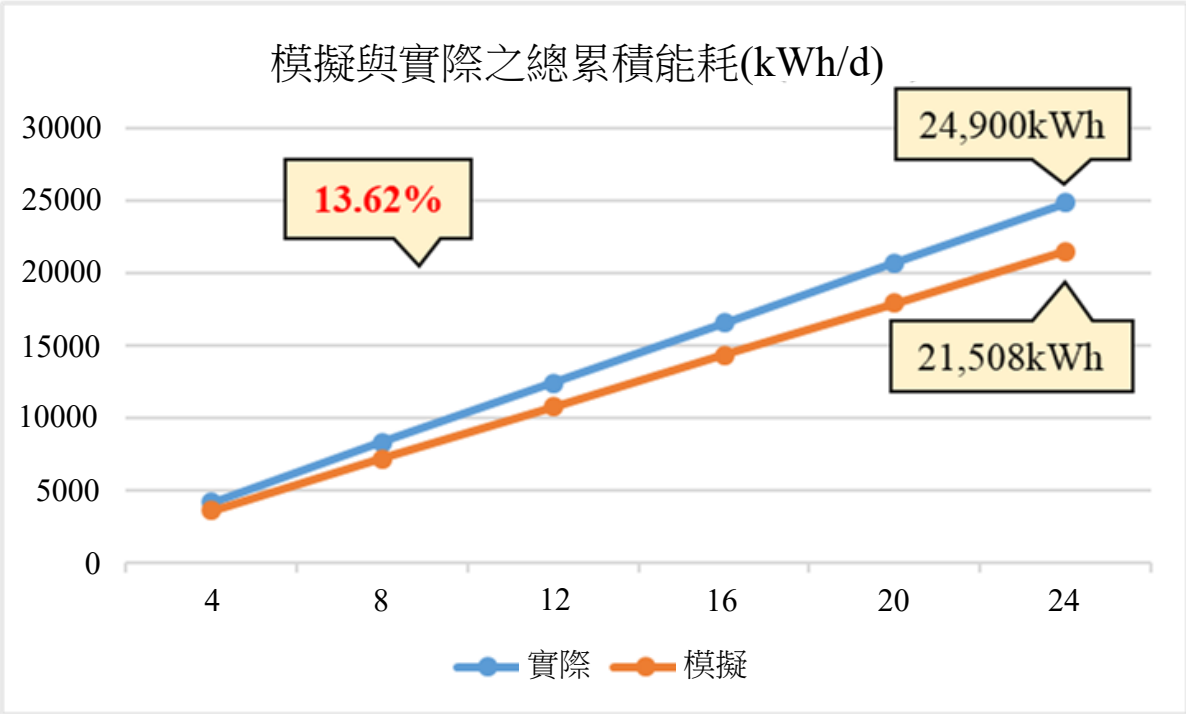



圖 13　C 廠穩態模擬與實際之總累積能耗[8]

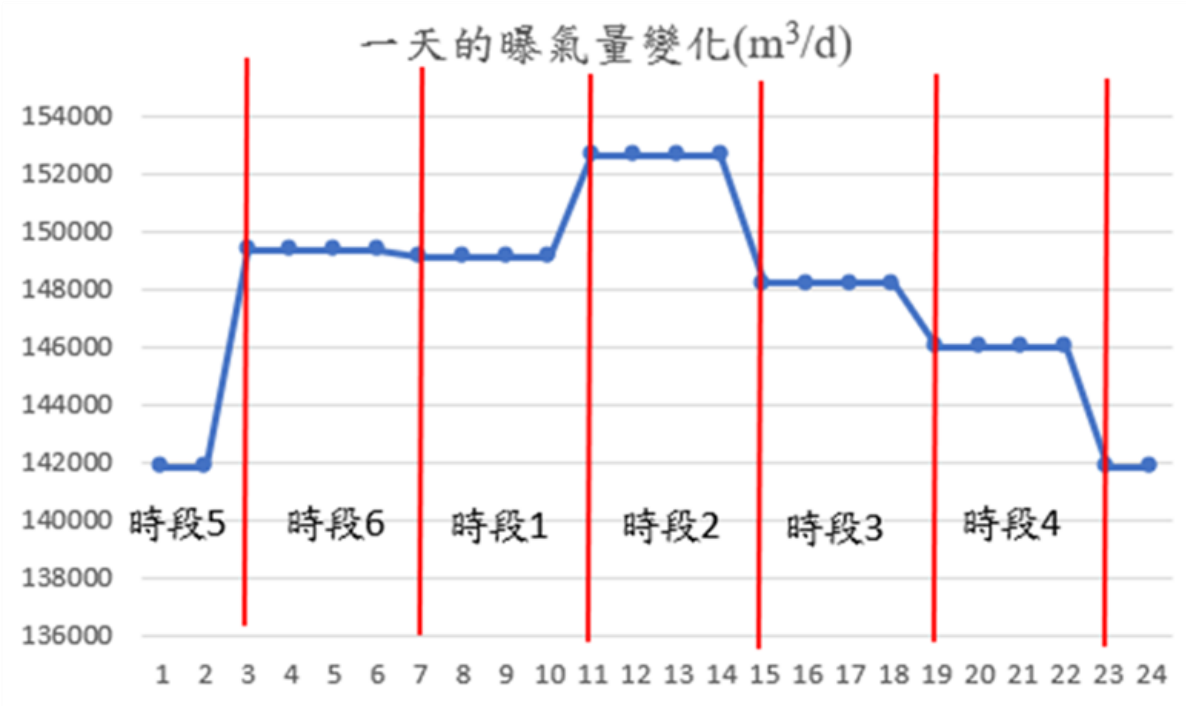



圖 14　一天的曝氣量變化[8]

$m^3$，而模擬各時段曝氣量如圖 14 所示，預估能耗分別為 3,280kWh、3,652 kWh、3,508 kWh、3,744kWh、3,700 kWh 和 3,624 kWh，分段總能耗為 21,508kWh，預估降低能耗約為 13.62%。如此按照不同時段的進水水質進行曝氣量的調整，達成電能優化減少電力消耗。

## 拾壹、水資源與能源整合發展建議

本篇文章聚焦於新興水資源海淡水、污水再生方面之逆滲透技術整合能源回收開發相關議題的探討，最關鍵的技術就是 RO 逆滲透膜本身，以及搭配 RO 膜的前處理 UF 膜等開發應用，除了維持高透性、抗污之外，低成本長壽命節能也是受到注目之處，在主流市場外類似薄膜蒸餾(MD)膜可直接利用低溫廢熱回收處理工業廢水的技術也具有利基市場。但無論海淡水處理、污水除氮或是再生水處理，膜的角色類似於電動車的電池膜，需要搭配周邊動力系統與整車控制系統才能發揮最大效能與維持電池長壽命。因此，為有效進行水處理節能管理歸納以「動態數據收集監測」、「數值模擬優化操作」、「智慧化節能對策導入」三個重點，以再生水產業為例，應用情境與架構如圖 15 所示。在數值模擬優化操作項目中，包含整廠與膜過濾單元模擬計算兩個部分，在上文關於整廠能耗計算上選用國際水協會(IWA)所開發之 GPS-X 軟體進行模擬，以 ASM 模式為基礎所開發的 GPS-X 可以

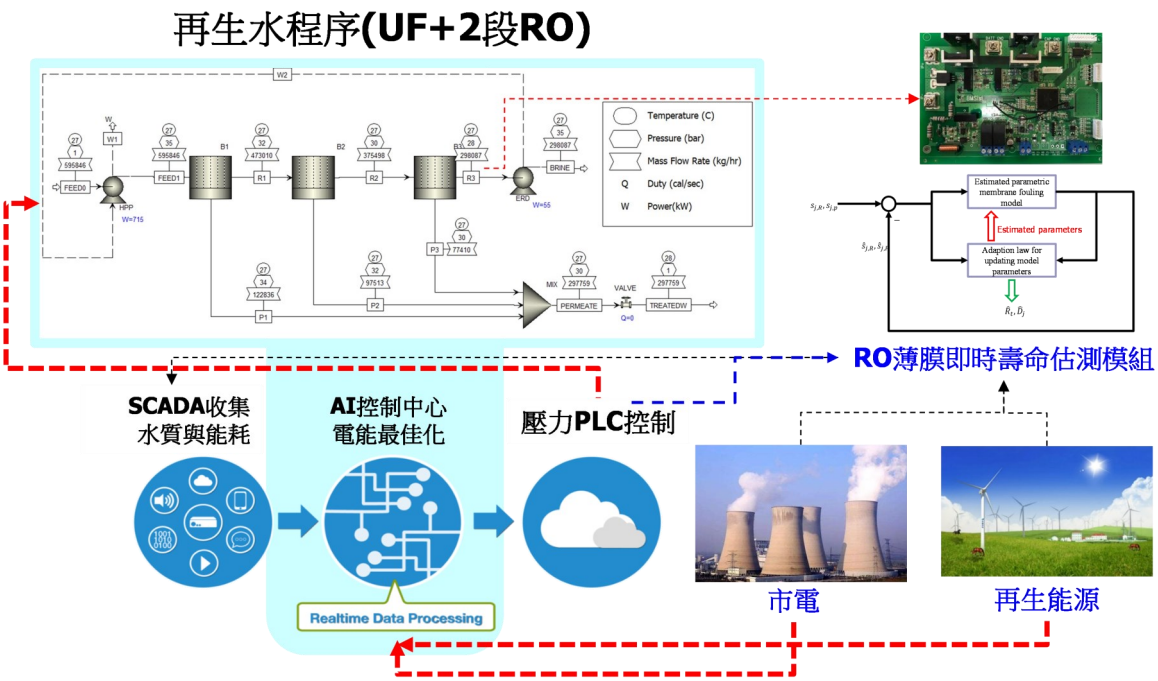



圖 15　附薄膜即時壽命估測之電能管理模組應用架構

對各種水處理流程進行模擬計算，此穩態能耗參考值可與 SCADA 之數值進行比對，建立能耗基準值，另一方面，RO 逆滲透系統的主要能耗來源是高壓泵，因此合適高壓泵壓力估測是節能重點，應建立以控制方程式為基礎之優化模型掌握特定產水量下之最低能耗值。而國際上也有相當多的研究是透過 AI 方式透過大數據收集來推定壓力泵的操作值，這部分技術也可以視為補足物理控制方程式不足之處的有效方法，但 AI 技術的缺點是需要大量而正確之資料，在水處理廠尚未穩定或是水質變動較大情況下會有明顯差異。

目前國內濾膜 90%以上為國外產品，長期操作下常因污染物堵塞而導致在相同產水量下需求操作壓力提高而增加能耗並降低使用壽命。因此，有必要開發「膜壽命參數動態估測」技術，透過預測膜通量與流阻等參數掌握阻塞狀況，搭配需求產水量下匹配操作壓力之計算、避免電能浪費，並協助排程進行膜反洗程序，以延長薄膜使用壽命，降低膜維護使用成本。團隊研發之膜壽命估測機制採用適應性控制演算法(Adaptive control algorithm)[9]來進行，具有穩定收斂快、不須大量學習資料、易於透過模擬電路轉換為晶片內嵌式估測邏輯架構之優點，可實現於通用晶片中。過去以電池電極膜為標的，透過量測動態工作電壓、電流值而估測得到壽命參數內電阻值，來管理動態充放電流下之電動車電池壽命以避免過充過放等異常操控，大幅增強電池管理系統的安全性。

過去 R.H. Peiris et al.(2013)進行超濾膜(UF)動態非線性結垢現象的模擬[13]，具體是透過拓展卡爾曼濾波器(EKF)方法來實現，EKF 方法根據通量量測值或與膜滲透物量測相關的數據進行關鍵模參數的即時適應性估測，比較不同膜污染情況下的估測結果和實驗通量數據比較，並決定膜反沖洗時程。

## 拾貳、具體兩段式 RO 計算實例

以 RO 兩段產水靜態建模如圖 16，使用具使用介面之 Aspen Plus 軟體為美國 MIT 所開發廣泛應用於化工領域之軟體，補足污水處理領域之外模擬需求。兩段式 RO 與實廠值比較結果列於表 2，可精確建立與掌握水處理之單位能耗與淡水回收狀況，具體計算模型概要與條件如要點 1 所描述。

1. **能耗基準線建立**（以某 RO 海淡產水為例:海水濃度 3.5%，處理量 14,000 CMD，ERD 回收率 90%）

2. **RO 壓力操作能耗優化模型**

UCLA 團隊發展之膜產水壓力優化模式(2013)提供要求產水量($Q_p$)下最低能耗壓力泵操作值[11,14]，根據此模型 RO 產

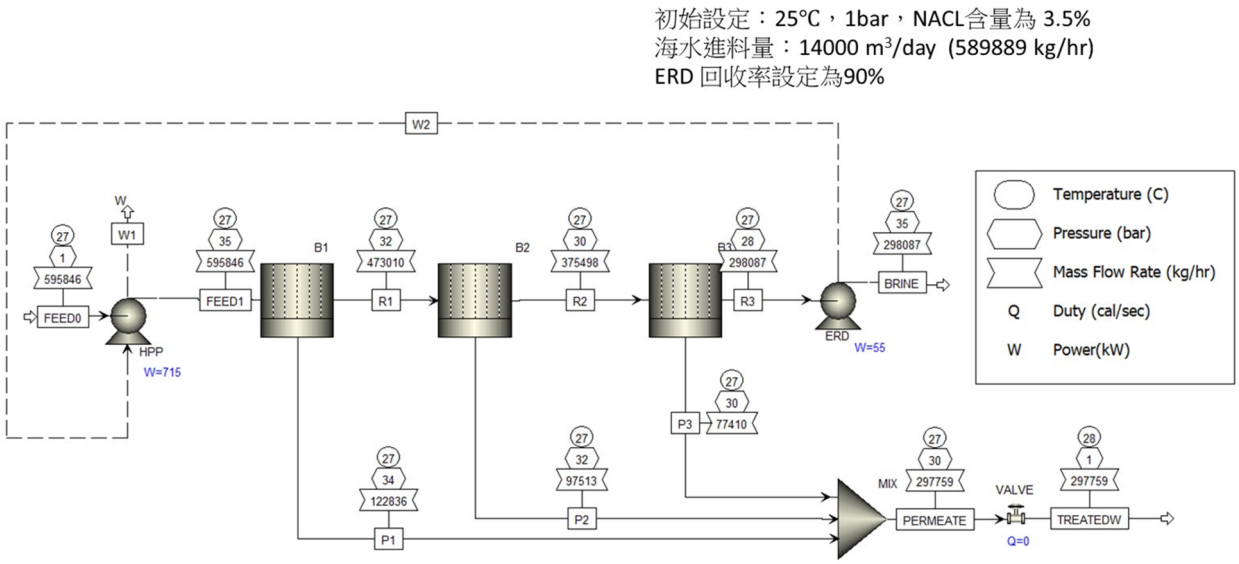



圖 16　Aspen Plus 兩段 RO 模擬[10]

表 2　兩段 RO 模擬計算結果[10]

| | **Aspen Plus 模擬** | **實場狀況** |
|---|---|---|
| 平均進料水量 | 14,300 CMD | 14,149 CMD |
| 耗能 | 770kW | 764 kW |
| 淡水產量 | 7,145 CMD<br>( 鹽濃度<0.03 % ) | 6,009 CMD |
| 鹵水(Brine) | 7,155 CMD<br>(>6.9%) | 8,139 CMD |
| 單位產水耗能 | 2.59<br>kWh/m$^3$ | 3.05<br>kWh/m$^3$ |
| 水回收率 | 49.9% | 42% |

水單位能耗(SEC)可以定義為式(1)，進一步可按壓力泵效率($\eta_1$,$\eta_2$)與水回收率(Y)歸納出能耗限制式(2)，利用航空城內某再生水模廠(<6m$^3$/h)之量測條件，不同回收率下之計算結果如圖 17 所示，其中不同顏色分布代表硬體限制、可操作區域為灰色帶，在滿足產水量（淡藍）下可得到相對應之最小能耗與水回收率等條件。隨著膜結垢老化在相同產水量下，導致滲透率下降、操作壓力與單位能耗逐步上升，如圖 18 所示，此時的膜通量相關參數透過要點 3 之動態估測演算法更新後，

$$\mathrm{SEC(2ROs)} = \frac{W_{total}}{Q_p} = \frac{\Delta P_1}{Y \cdot \eta_1} + \frac{\Delta P_2 (1 - Y_1)}{Y \cdot \eta_2} - \frac{(\Delta P_1 + \Delta P_2) \cdot (1 - Y) \cdot \eta_{ERD}}{Y} \quad (1)$$

$$\frac{min}{Y, Y_1} \mathrm{SEC}_{2stage} = \frac{\Delta P}{Y \cdot \eta_1} + \frac{\Delta P_2 \cdot (1 - Y_1)}{Y \cdot \eta_2} \quad (2)$$

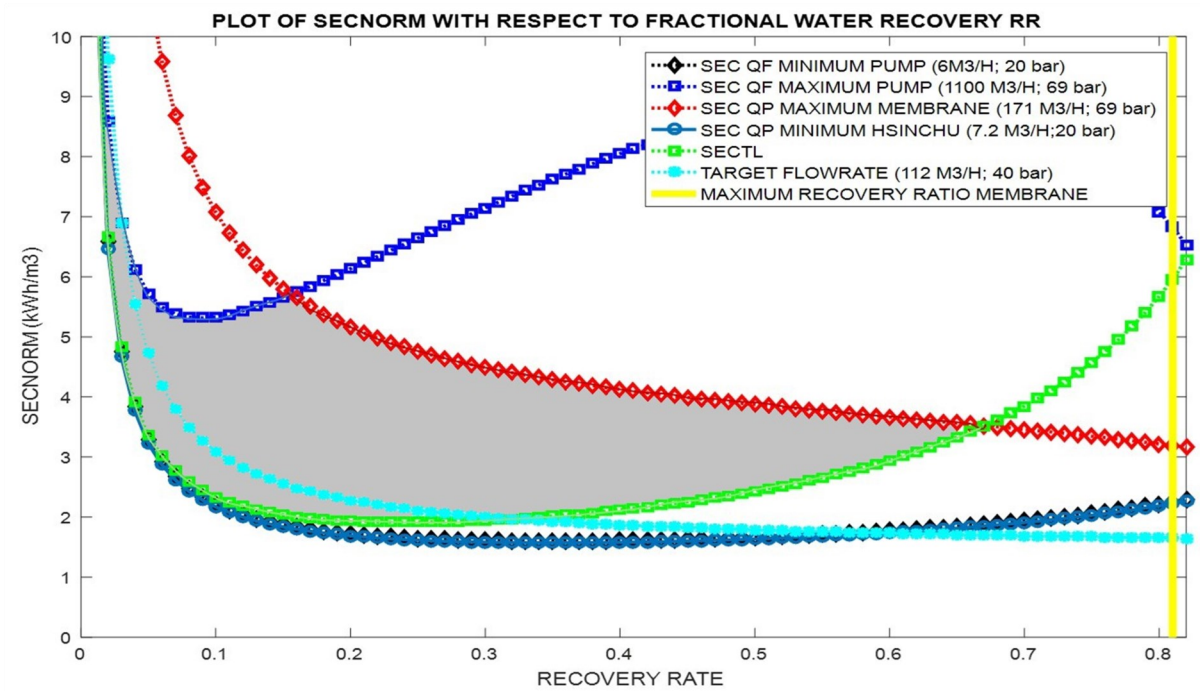



圖 17　RO 產水優化模型建議操作區域圖[12]

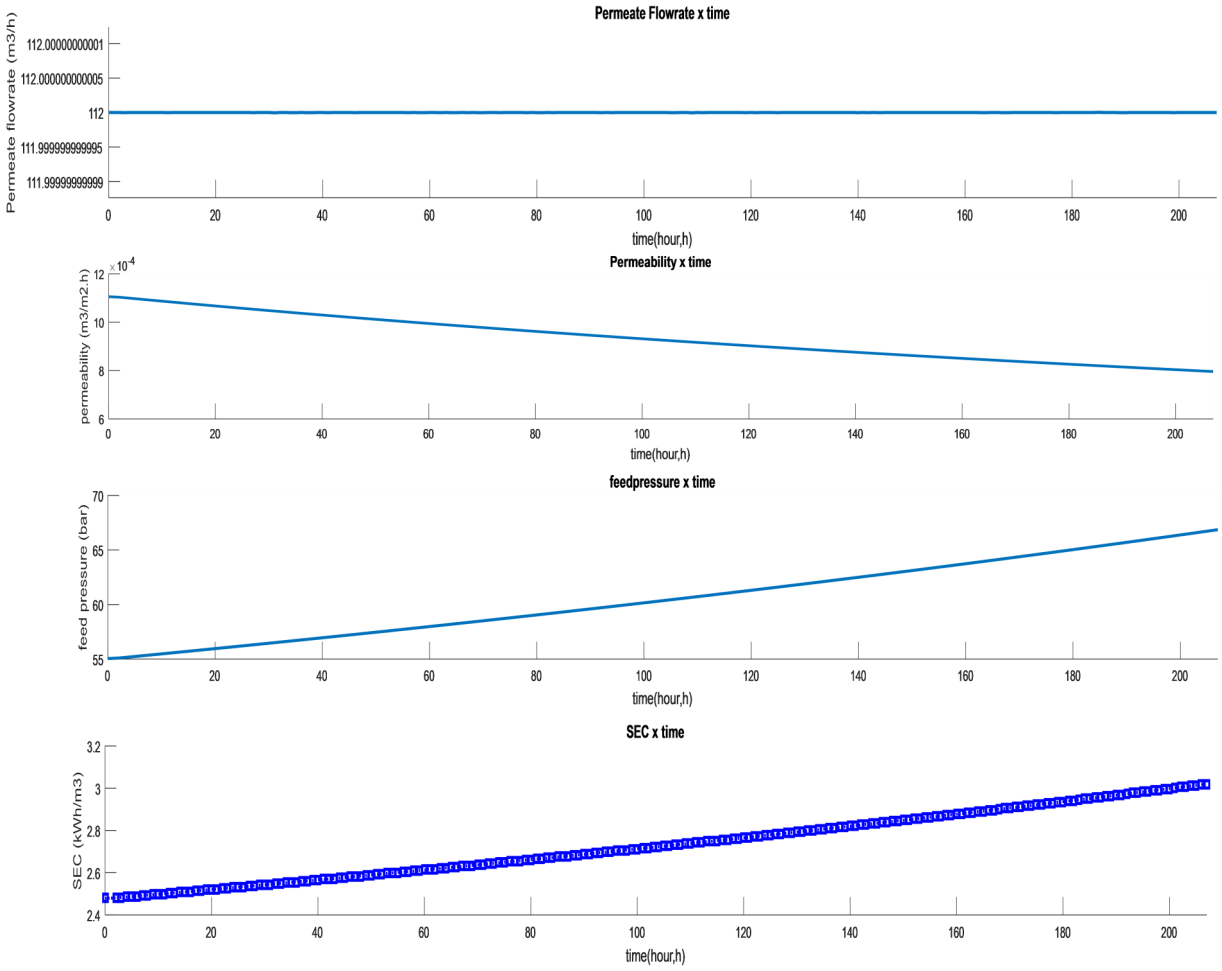



圖 18　隨著膜結垢老化在相同產水量下(a)滲透率下降(b)、操作壓力(c)與單位能耗(c)逐步上升[12]

須再次如本要點重新進行最適操作壓力疊代計算。

## 3.　動態膜壽命參數估測

膜通量相關參數受變動水質等影響需動態估測其固有物性參數值以掌握需求水量下之適切壓力操作值、達成能耗優化。(3)式定義滲透溶質 j 濃度 s、操作淨壓力 Δ p、流體總阻力 $R_t$ 式(3a)以及黏度μ、薄膜面積 A 等參數之流體控制式，經過整理可以得到結垢成因溶質 j 經膜 m 過濾之淨濃度($s_{RP}$)微分式(4)。透過 SCADA 所收集之不同操作條件下之水質 $s_{RP}$ 與 $s_R$ 後，利用適應性控制演算法同時歸納出含膜之流阻 Rt 與擴散係數 Dj 參數$\theta_{1,2}$作為循環壽命估測之標的，如式(5a)(5b)，其中，x 與 y 為監測值，$\theta_1$與$\theta_2$等參數為估測值。

$$\frac{ds_{j,M}}{dt} = A\frac{\Delta P}{\mu R_t}(S_{j,R} - S_{j,p}) \tag{3}$$

$$R_t = R_0 + \sum_{j}^{N} \beta_j s_{j,M} + \beta_{inter} s_{portein} \times s_{coll.-partic.,M} \tag{3a}$$

$$\dot{x}_j = -\theta_{1,j} x_j + \theta_{2,j} y_j \tag{4}$$

$$x_j = S_{j,RP} \tag{4a}$$

$$y_{j=}\dot{S}_{j,R} \tag{4b}$$

$$\theta_{1,j} = AD_j \tag{5a}$$

$$\theta_{2,j} = \frac{\mu R_t}{\Delta P} D_j \tag{5b}$$

以 MATLAB 所建立之離線估測流程如圖 19 所示，圖 20 分別為導入海淡廠之膜參數$\theta_1$與$\theta_2$估測結果與比較，資料數僅每日一筆導致收斂緩慢、但整體結果收斂良好與實際值吻合。

## 拾參、結語

新興水資源如海淡、污水處理回收再生水等提供重要穩定民生工業用水源並擔負節能減碳之要角，首要應針對水資源處理檢討降低能源消耗之可能性，促進水資源與在地綠能或廢熱整合開發計畫之推動，更有效率地管理及運用水資源與能源，本篇文章分享國內三個污水處理實廠節能解析的結果，從現有解析可以不難看出依據廠規模、水量與水質變動特性等能夠建議不同的曝氣控制方式，具有直接之節能效益。此外，針對逆滲透產水建議首要導入智慧化環境監測(SCADA)與分析技術建立能源基準線評估產水節能目標，並透過壓力操作能耗優化模型決定要求產水量下之最低能耗操作壓力，進一步能夠動態進行膜壽命參數估測除了有利於回饋操

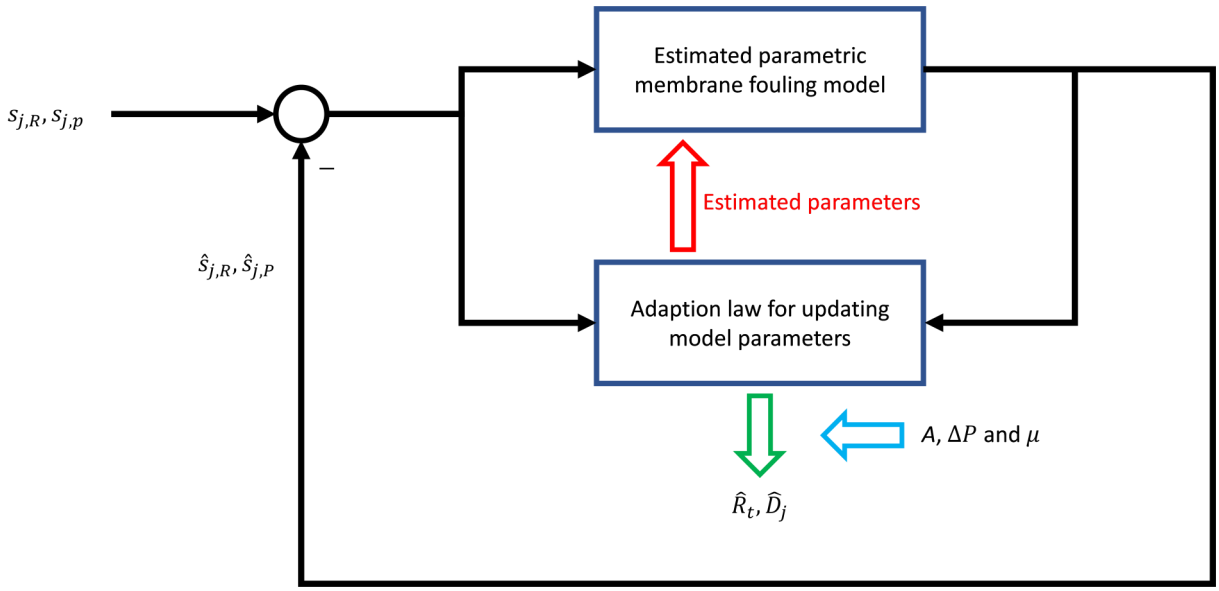



圖 19　適應性控制應用於薄膜之結垢影響下壽命估測模型線上演算法流程

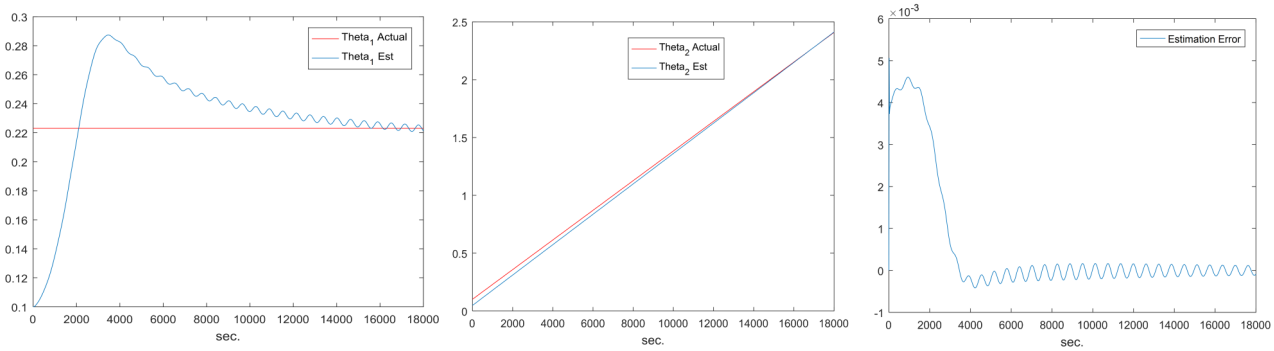



圖 20　變動水質與產水量下新竹海淡廠離線測試 RO 膜流阻與擴散係數相關參數估測模擬結果比較[12]

作壓力計算之外，也有助於評估膜反洗之時間排程，達到膜壽命延長之目的。

目前國內濾膜 90%以上為國外產品，長期操作下常因污染物堵塞而導致在相同產水量下需求操作壓力提高而增加能耗並降低使用壽命。因此，團隊應用適應性控制理論，開發「膜壽命參數動態估測」技術，透過預測膜通量與流阻等參數掌握阻塞狀況，搭配需求產水量下匹配操作壓力之計算、避免電能浪費，未來結合電能管理技術導入再生能源整合 RO 模組開發節能晶片量產將有助於開發水資源藍海市場。

以目前媒體報導之桃園北區再生水廠

為例，預計提供桃園煉油廠以及觀音亞東石化等用戶自來水等級之冷卻用再生水，並且再生水水價為 18.8-30.92 元，初步每日 4 萬噸之需求，未來全臺潛在需求達 70 萬噸（水利署再生水資訊媒合平臺資料）需求明確經濟效益龐大；而電力消費以每噸 1.2 度(kWh)概略計算，目前每日用電量將達 4.8 萬度，除電費之外，尚須負擔薄膜更換、清洗藥劑與人事成本等，因此，如何透過智慧化技術來節電與降低薄膜操作成本是刻不容緩的課題。

## 參考文獻


1. Curto, Domenico, Vincenzo Franzitta, and Andrea Guercio. "A review of the water desalination technologies." Applied Sciences 11.2 (2021): 670.

2. Kurihara, Masaru, and Hiromu Takeuchi. "SWRO-PRO system in "Mega-ton Water System" for energy reduction and low environmental impact." Water 10.1 (2018): 48.

3. Kim, Jong Suk, Jun Chen, and Humberto E. Garcia. "Modeling, control, and dynamic performance analysis of a reverse osmosis desalination plant integrated within hybrid energy systems." Energy 112 (2016): 52-66.

4. Cabrera, Pedro, et al. "Artificial neural networks applied to manage the variable operation of a simple seawater reverse osmosis plant." Desalination 416 (2017): 140-156.

5. Shahzad, Muhammad Wakil, et al. "Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability." Desalination 413 (2017): 52-64.

6. Sean, Wu-Yang, et al. "Energy consumption analysis in wastewater treatment plants using simulation and SCADA system: Case study in northern Taiwan." Journal of Cleaner Production 276 (2020): 124248.

7. Mallu, Lili Lorensia, Wu – Yang Sean, and Maria Pacheco. "Optimization of air flowrate under different control strategies focus on biological process in wastewater treatment plant." 2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE,

2021.

8. 伍志超、施武陽，“使用 CFD 方法對在純水中的厭氧氨氧化過程動力學進行中尺度建模”，中原大學環境工程所碩士論文，111 年 7 月 19 日，第 32 頁(2022)

9. 中華民國專利 I411796

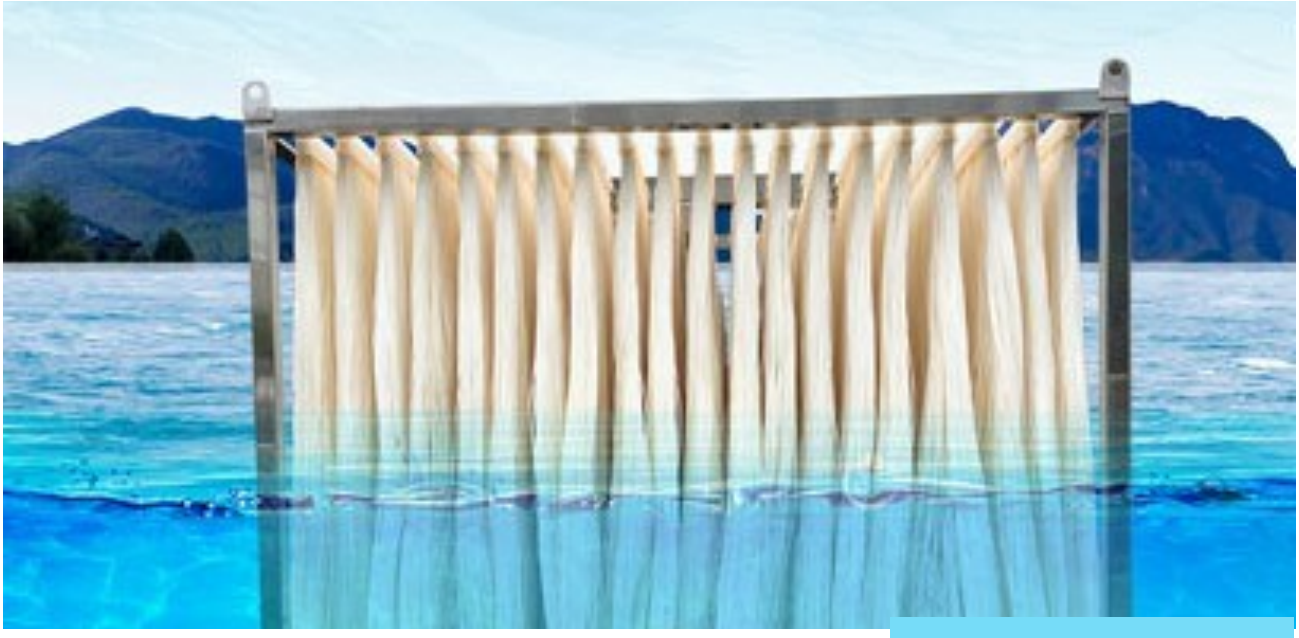
10. Isnaeni. Nurjanahe et al., Power monitoring and optimizing the distillation column design for the separation of mixtures of NMP and water using SCADA and Numerical Method, 中華民國環境工程學會 2021 廢水處理技術研討會.

11. Gao, Larry. Self-Adaptive Control of Integrated Ultrafiltration and Reverse Osmosis Desalination Systems. University of California, Los Angeles, 2017.

12. Isnaeni Nurjanah, Wu-Yang Sean, Study of Energy-saving solution and benefit by applying SCADA and numerical modeling, 中原大學環境工程研究所碩士論文, 2021.

13. Peiris, Ramila H., et al. "Fouling control and optimization of a drinking water membrane filtration process with real-time model parameter adaptation using fluorescence and permeate flux measurements." Journal of process control 23.1 (2013): 70-77.

14. Gao, Larry, et al. "Energy-optimal control of RO desalination." Industrial & Engineering Chemistry Research 53.18 (2014): 7409-7420.



# 新世代生物除氮技術-膜氧傳輸生物膜反應器

林欣潔[1]、葉庭谷[2]、鄭惠君[3]、曾淑娟[4]、侯嘉洪[5]

**摘要**

污水下水道系統與污水處理廠為解決都市污水問題之關鍵角色，而都市污水又為含氮廢水的主要來源之一。隨著工業快速發展、人類活動不斷增加，加上近年來都市污水接管率增加，污水處理廠之既有除氮程序已不足解決污水中含氮污染物不斷增加之疑慮，更難以因應日趨嚴格之放流水標準。膜氧傳輸生物膜反應器(Membrane Aerated Biofilm Reactor, MABR)作為新型生物膜載體之除氮技術，擁有低能耗、低污泥量、高氧氣傳輸效率、高有機質利用率、高操作便利性、低占地面積等優點，並可塑造最適之微環境供除氮微生物生長，具高效之除氮表現，有望成為新世代生物除氮程序之首選技術。本文將介紹膜氧傳輸生物膜反應器之原理與特點，並針對其發展趨勢與未來應用潛力進行探討 。

1.國立臺灣大學環境工程學研究所 / 博士生
2.內政部營建署下水道工程處 / 幫工程司
3.內政部營建署下水道工程處 / 課長
4.內政部營建署下水道工程處 / 處長
5.國立臺灣大學環境工程學研究所 / 教授

## 壹、前言

隨著工業快速發展、人類活動不斷增加及氣候變遷等影響，過多含氮廢水排入水體，造成環境衝擊。氮污染主要途徑包括都市污水（例如：清潔劑、食品添加劑等）、工業廢水（例如：石化、電子工業等）、農業及畜牧廢水（例如：化肥、糞尿）等，其中又以都市污水為大宗。過量含氮物質進入水體，易引起河川、湖泊、水庫之優養化，除了破壞生態外，亦可能造成飲用水的品質降低，以及空氣污染、雨水酸化、地下水污染等環境問題[1]。

為降低氮污染對環境之衝擊，行政院環保署自民國 76 年發布施行放流水標準迄今，歷經 18 次修正發布，不僅將氨氮列為重點管制項目，更逐年加嚴氨氮與總氮之排放標準。現行公共污水下水道系統放流水氨氮及總氮限值標準如表 1 所示。民國 106 年 12 月 25 日前未完成工程招標之新建污水處理廠，其氨氮限值為 10mg/L，並於 113 年加嚴為 6mg/L。而民國 106 年 12 月 25 日前完成工程招標者，其氨氮限值維持 10 mg/L，總氮限值則於 113 年由 50mg/L 加嚴至 35 mg/L [2]。

鑑此，廢水除氮技術為現今水污染控制工程領域發展的重點之一。廢水除氮技術主要可分為物化方法以及生物處理方法兩大類。物化方法主要是利用相轉換將氨氮以氣體或固體形式移除水中；而生物處理方法則是利用特定微生物對水中含氮物

表 1　公共污水下水道系統放流水氨氮及總氮限值

<table>
<tr><th colspan="3">水質項目</th><th colspan="3">限值</th></tr>
<tr><td rowspan="8">氨氮</td><td rowspan="3">排放於自來水水質水量保護區內者</td><td rowspan="2">流量大於250立方公尺/日</td><td colspan="3">10 mg/L</td></tr>
<tr><td colspan="3">6 mg/L (民國113年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td>流量250立方公尺/日以下</td><td colspan="3">10 mg/L</td></tr>
<tr><td rowspan="5">排放於自來水水質水量保護區外者</td><td rowspan="5">流量大於250立方公尺/日</td><td rowspan="3">許可核准收受處理事業廢水、截流水或水肥之設計最大量達總廢(污)水最大量百分之二十以上者</td><td rowspan="2">民國106年12月25日前完成建造、建造中或已完成工程招標者</td><td>75 mg/L<br>(民國110年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td>30 mg/L<br>(民國113年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td>民國106年12月25日前尚未完成工程招標者</td><td>20 mg/L</td></tr>
<tr><td rowspan="2">許可核准收受處理事業廢水、截流水或水肥之設計最大量未達總廢(污)水最大量百分之二十者；或未收受處理事業廢水、截流水或水肥者</td><td>民國106年12月25日前完成建造、建造中或已完成工程招標者</td><td>10 mg/L<br>(民國110年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td>民國106年12月25日前尚未完成工程招標者</td><td>10 mg/L<br>6 mg/L<br>(民國113年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">總氮</td><td rowspan="2">排放於自來水水質水量保護區內者</td><td>流量大於250立方公尺/日</td><td colspan="2" rowspan="2">中華民國九十年十一月二十三日<br>前尚未完成工程招標者</td><td>15 mg/L</td></tr>
<tr><td>流量250立方公尺/日以下</td><td>15 mg/L</td></tr>
<tr><td rowspan="3">排放於自來水水質水量保護區外者</td><td rowspan="3">流量大於250立方公尺/日</td><td rowspan="3">許可核准收受處理事業廢水、截流水或水肥之設計最大量未達總廢(污)水最大量百分之二十者；或未收受處理事業廢水截流水或水肥者</td><td rowspan="2">民國106年12月25日前完成建造、建造中或已完成工程招標者</td><td>50 mg/L<br>(民國110年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td>35 mg/L<br>(民國113年1月1日施行)</td></tr>
<tr><td>民國106年12月25日前尚未完成工程招標者</td><td>20 mg/L</td></tr>
</table>

質進行代謝達到去除之目的。由於物化方法通常有較高的能源、化學藥劑添加需求以及副產物處理等問題，因此目前仍以副作用較少、操作成本較低之生物處理方式最為污水處理廠/水資源回收中心廣泛使用。然而，隨近年來都市污水接管率增加，水中含氮污染物含量不斷上升的情況下，如何因應日趨嚴格之放流水標準為臺灣目前生物除氮技術面臨之重大挑戰。

## 貳、傳統生物除氮程序現況與困境

生物處理方法主要是利用廢水馴養特定微生物，透過菌群新陳代謝的過程將水中特定含氮污染物進行轉換。廢水中的含氮物質主要以有機氮(Organic $NH_3$)、氨氮($NH_4^+$)、亞硝酸鹽氮($NO_2^-$)及硝酸鹽氮($NO_3^-$)等型態存在，並可在不同條件下將發生轉換。考慮操作之便利性與控制門檻，現今常用之生物除氮途徑主要以硝化與脫硝作用來進行。如圖 1 氮循環圖所示，有機氮可在環境中或生物體內透過氨化作用轉化為氨氮釋放於水體，水體中之氨氮便可經硝化作用轉變為為亞硝酸鹽氮、硝酸鹽氮，再經由脫硝作用轉換成氮氣而逸散，使氮予以離開水體[3]。

硝化作用主要是由好氧自營的硝化菌進行反應，發生於充氧環境。脫硝作用則主要由兼氣性異營的脫硝菌進行反應，發生於缺氧環境，且需足夠的有機質參與反應。因此氧氣供應與污水中有機質含量為主要限制因子。

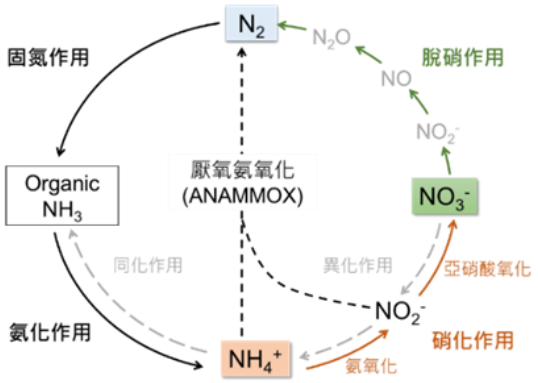



圖 1　氮循環示意圖 [3]

為達到硝化與脫硝之反應條件，目前污水處理廠最廣泛使用之方法為 MLE (Modified Ludzack-Ettinger) 程序，屬於傳統之懸浮式污泥生長系統，原理為將一好氧槽置於一缺氧槽之後，氨氮可於好氧槽可發生硝化反應形成硝化液，再將硝化液迴流至前端缺氧槽，以進流水之有機物進行脫硝反應去除硝酸鹽氮，如圖 2 所示。然而，此類傳統生物除氮系統大多存在許多缺點，包括：

1. 佔地面積大。
2. 低氧氣傳輸效率，導致曝氣量與高曝氣能耗提高。
3. 高硝化液迴流需求，導致動力能耗需求高。
4. 脫硝作用之有機質利用率低，導致無法進行低碳氮比污水除氮。

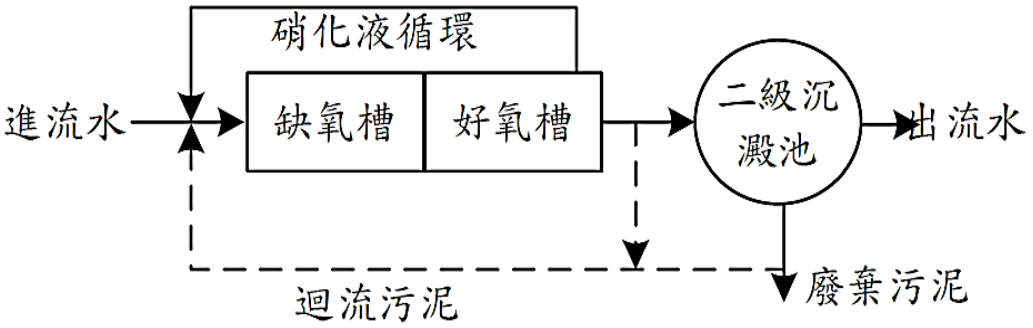



圖 2　MLE 除氮程序示意圖 [4]

5. 生物耐受性低，除氮效能易受環境變動。

6. 高污泥流失與廢棄污泥問題。

為改善上述問題，逐漸發展出貼附式生長系統，又稱生物膜法。過去常見之生物膜法例如固定生物膜活性污泥(Integrated Film Activated Sludge, IFAS)、移動床生物膜反應器 (Moving bed biofilm reactor, MBBR)等。藉由於反應槽中置入生物載體，於水體中曝氣，使載體表面形成具外層好氧、內層缺氧環境之生物膜，不僅具較高之生物耐受性，並實現了單反應槽內同步硝化、脫硝作用，大幅降低佔地面積並解決高硝化液迴流需求與污泥流失等問題。然而，傳統生物膜法卻也衍生出了生物膜表面好氧異營菌與硝化菌、脫硝菌競爭氧氣及有機質之狀況，使除氮效率受到影響 [5]；且氧氣傳輸效率低、曝氣能耗高以及脫硝作用之有機質利用率低下等問題皆並未得到緩解。因此發展具低曝氣能耗、高除氮效率的除氮技術勢在必行。

## 參、新世代生物除氮技術：膜氧傳輸生物膜反應器

膜氧傳輸生物膜反應器，簡稱為 MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor) 為一種高效且節能的生物處理單元。是由氧傳輸膜培養細胞、組織的觀念逐漸發展而來的新型載體技術，其改善了傳統生物除氮方法的種種缺點，為新世代的生物除氮技術。

MABR 之技術原理在於以透氣性中空膜作為生物載體及供氧來源，並採用一種新穎的無泡供氧方式取代傳統曝氣，使載體表面形成一特殊之異向傳輸生物膜，有利於硝化菌、脫硝菌生長，使除氮效率大幅提升。全球主要之 MABR 生產商包含 FLUENCE、Suez WTS 及 OxyMem，而市面上 MABR 的膜存在多種型式，其

中以中空纖維膜及纏繞式螺旋膜最為常見，如圖 3，而膜材又根據其孔洞大小與膜表面之親疏水特性各有不同，大致可分為微孔膜、緻密膜、複合膜等。

MABR 之無泡供氧方法是利用於擴散性透氣膜腔內通入空氣或氧氣（如圖 3），藉膜兩側之氧分壓差，使管腔內氣體可從氣相穿過纖維膜壁之孔洞向外往液相移動。在污水於膜外流動之情況下，可保持氧分壓低於泡點壓力，因此過程中將不會出現肉眼可見之氣泡，氧氣可直接向外擴散至纖維膜表面供生物膜利用。如此，微生物生長不再受污水中溶氧量限制，氧氣傳輸效率也不再受氣泡尺寸與氣泡停留的時間所限制，從而提高氧氣傳輸效率，減少無效曝氣的發生[8][9]。相比氧氣傳輸效率只有 10-20%的傳統散氣盤，MABR 之氧氣傳輸效率可高達 40~70%，使系統曝氣需求與能耗大幅降低，並解決了過去傳統曝氣池中因溶氧限制造成的硝化作用低下的問題[10][11] 。

相較於傳統生物膜法，MABR 之獨特供氧方式使透氣膜表面形成高活性之生物膜。由於污染物由外向內擴散(液相向氣項擴散)進入生物膜；氧氣則由內向外擴散（氣相向液項擴散）進入生物膜，使生物膜內之污染物與氧氣呈現異向擴散，造就了濃度梯度反向遞減的優勢，並可形成內側好氧、外側缺氧之生物膜，稱為異


圖 3　MABR 膜類型，A.中空纖維膜 [6]，B. 纏繞式螺旋膜 [7]

向傳輸生物膜，不僅保留了傳統生物膜法的優勢，更提高了除氮功能菌群的活性與除氮效率[12]。

由圖 4 可見污水中氨氮與有機質與 MABR 生物膜活性層形成之關係。生物膜內層好氧區之有機質含量低，使異營菌無法生長，因此好氧自營之硝化菌可成為優勢菌種，解決了傳統生物膜法中硝化菌與好氧異營菌之氧氣競爭問題，使 MABR 可於微量曝氣下，實現高效硝化反應，提升氨氮轉化為硝酸鹽氮之效率。隨著硝酸鹽氮逐漸向外擴散，外層缺氧區可接收來自內層的硝酸鹽氮，並可首先利用來至外部污水之有機質，有利於脫硝菌生長，並可避免傳統生物膜法中脫硝菌與好氧異營菌之有機質競爭問題，進而顯著提高脫硝作用之有機質利用率，可適應較低之碳氮比污水，使臺灣傳統除氮方法所面臨之有機質不足導致除氮能力低下的問題得到緩解，實現總氮去除效率的提升。此外，MABR 生物膜更具有高調控性，可透過氧氣供給量、污染物濃度梯度以及生物膜厚度控制等操作對生物膜中不同活性功能區的比例進行調控，保持各功能層間一定的平衡和穩定關係[13] [14]。

## 肆、膜氧傳輸生物膜反應器之優勢與應用

相較於傳統除氮程序，MABR 技術之關鍵優勢在於其高氧氣傳輸效率及具多層生物活性功能區的高活性生物膜。表 2 為 MABR 與污水廠常用之 MLE 系

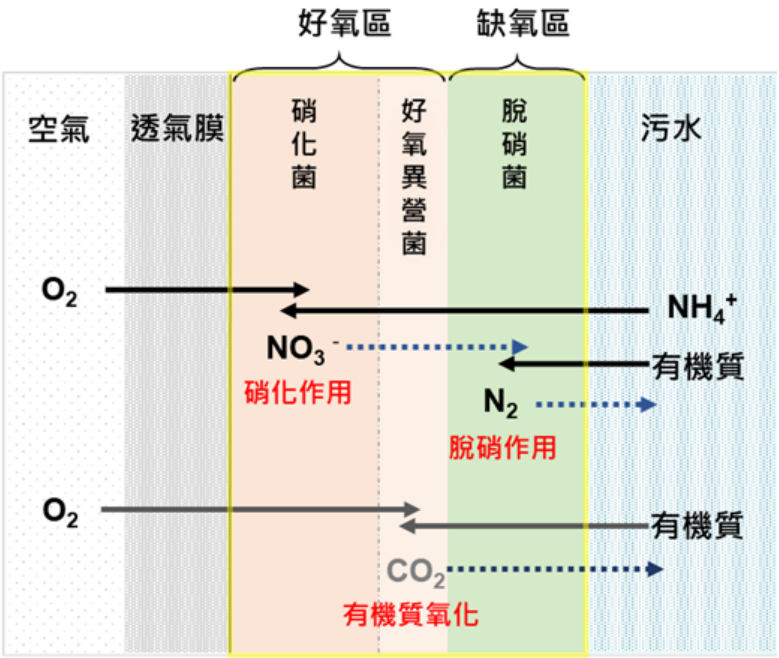



圖 4　污水中氨氮與有機質與 MABR 生物膜活性層形成之關係[3]

統、傳統生物膜法 IFAS 之比較結果，由表可知 MABR 具有較高之除氮性能與較低之動力成本，可作為傳統生物除氮程序之較佳替代方案。

近年來，世界各地積極投入 MABR 除氮系統的開發及測試，包括美國、法國、韓國、新加坡、以色列與臺灣等地區，其中又以混合式 MABR 系統具較多的實廠測試案例，如圖 5 所示。混合式 MABR 系統結合了 MABR 與傳統 MLE 程序之概念，透過缺氧槽改造為 MABR，即為將 MABR 模組置於其中，使懸浮性與貼覆性之微生物共存，可降低或免除硝化液迴流之需求，達到除氮性能提升之效果，並且可依據投入之 MABR 膜面積調整缺氧槽與好氧槽體積比例。在相同水質與水力負荷下，當缺氧槽投入的 MABR 膜面積越多時，因為此時好氧槽之氨氮負荷降低，因此可設計將後端好氧槽之體積縮減，如圖 6 所示。

MABR 除了從既有除氮程序上進行優化，也可透過改建，為既有非除氮程序之曝氣池創造除氮功能。臺灣許多公共污水處理廠因建廠初期並未考量氨氮或總氮去除之議題，導致其現行二級生物處理程序仍只有單一曝氣池之活性污泥法，如圖 7A 所示。此類型污水廠為增加除氮功能，則須另外擴增缺氧槽以

表 2　MABR 與污水廠常用之 MLE 系統、傳統生物膜法 IFAS 進行比較

| 除氮程序 | MLE | IFAS | MABR |
|---|---|---|---|
| 供氧方式 | 氣泡曝氣 | 氣泡曝氣 | 無泡供氧 |
| 微生物生長系統 | 懸附式生長 | 貼附式生長 | 貼附式生長 |
| 生物載體添加 | 無 | 是 | 是 |
| 生物膜種類 | 無 | 同向傳輸 | 異向傳輸 |
| 實現單槽同步硝化脫硝 | 否 | 是 | 是 |
| 反應槽占地面積 | 大 | 縮減 | 縮減 |
| 硝化液迴流需求 | 大 | 低或無 | 低或無 |
| 廢棄汙泥量 | 大 | 減量 | 減量 |
| 生物質停留時間 | 短 | 延長 | 延長 |
| 生物耐受性 | 低 | 提升 | 提升 |
| 氧氣傳輸效率 | 低 | 低 | 提升 |
| 曝氣需求與能耗 | 高 | 高 | 降低 |
| 脫硝作用之有機質利用率 | 低 | 低 | 高 |
| 硝化、脫硝菌之活性 | 受限 | 受限 | 提升 |
| 菌群競爭狀況 | 適中 | 嚴重 | 幾乎可避免 |
| 整體除氮性能 | 低 | 中 | 高 |
| 系統運行之動力成本 | 高 | 中 | 低 |
| 生物載體成本 | 無 | 低 | 高 |

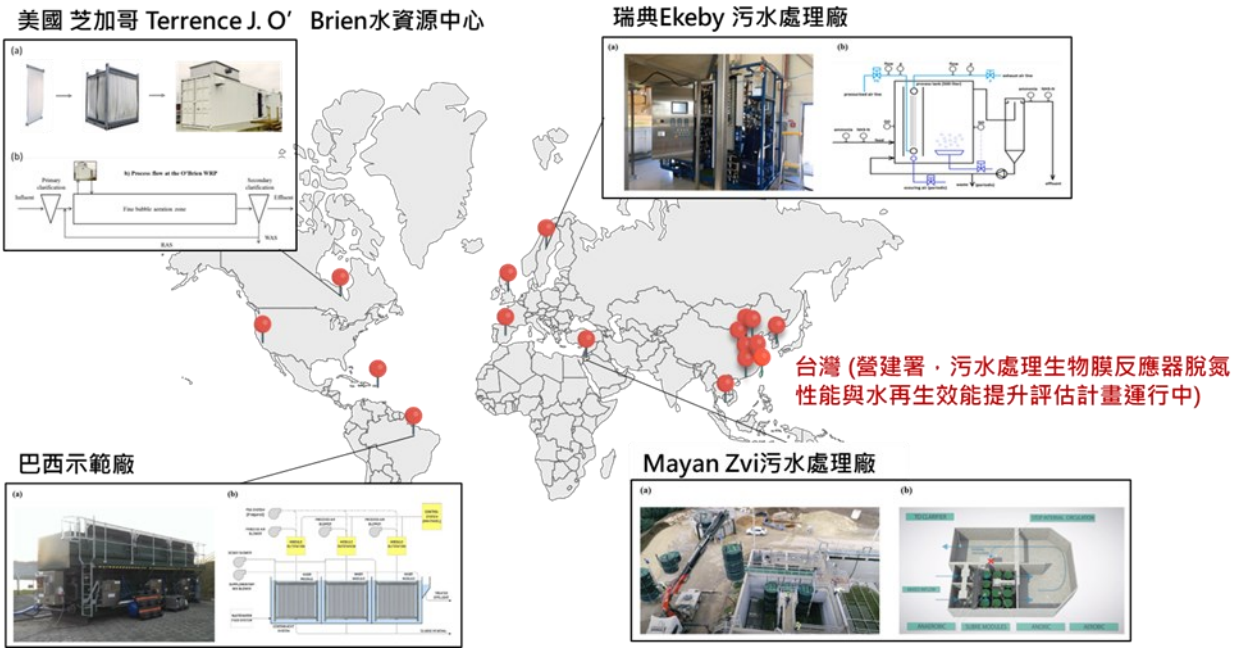



圖 5　世界各地之 MABR 實廠與模廠驗證案例[3] [11] [15][16]

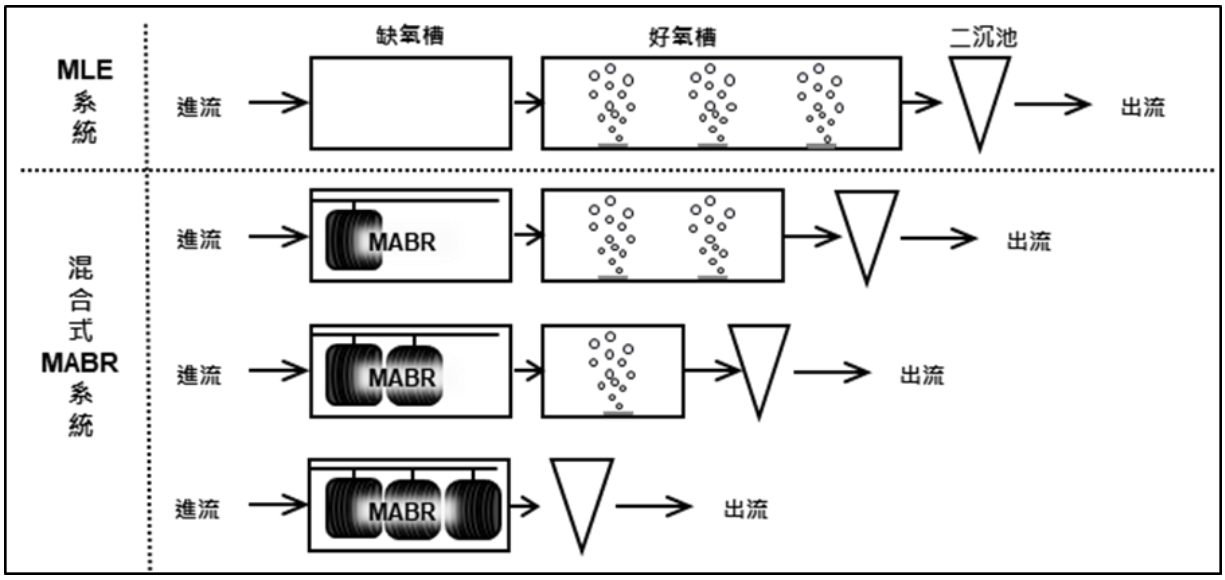



圖 6　MLE 系統與混合式 MABR 系統示意圖，以及 MABR 膜面積與缺氧、好氧槽體比例關係示意圖

供脫硝菌生長，如圖 7B 所示，然而多數廠卻面臨已無擴建空間之困境。因此，在不降低原本硝化效能之前提下，如何於既有的池槽中增加額外的脫硝作用為突破之關鍵。透過混合式 MABR 系統，首先將該曝氧池前端區域曝氣關閉形成缺氧區，加入 MABR 膜組取代該區域原先之硝化反應，並同時創造脫硝反應之環境，達到於有限空間增加總氮去除的目標，如圖 7C 所示。MABR 技術的運用突破了傳統生物處理法受限於空間的問題，提升臺灣公共污水處理廠既有生物程序除氮性能。

## 伍、膜氧傳輸生物膜反應器之中式規模測試

為加速 MABR 技術於臺灣污水處理領域之應用，建立臺灣本地之 MABR 系統操作參數為首要任務。國立臺灣大學水科技與低碳創新研發中心於民國 110 年執行營建署所委辦之「污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫」，主要研究混合式 MABR 對傳統除氮程序之優化效能，研擬解決臺灣污水廠傳統除氮程序曝氣能耗過高， 以及進流水碳氮比不足導致除氮效能無法提升的困

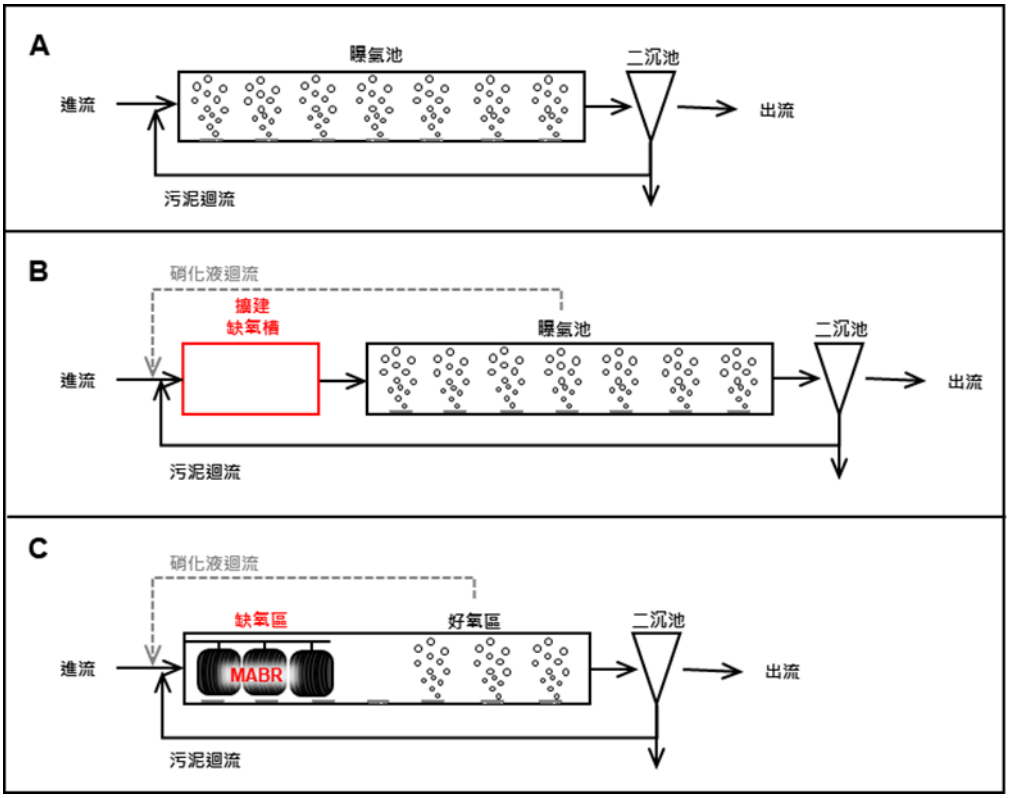



圖 7　A. 單一曝氣池之活性污泥法，B 既有曝氣池前方擴增缺氧槽以供除氮使用，C. 既有曝氣池前端改造為缺氧區並投入 MABR 模組以建立混合式 MABR 系統

境[3]。並於民國 111 年建置了臺灣首座之中式規模 MABR 系統，現於高雄岡山橋頭污水廠進行測試。

依據模廠前行試驗結果顯示低水力停留時間操作條件下，混合式 MABR 系統可保持良好的總氮去除效果。並且在低碳氮比進流水(BOD/TN=1.5)條件下，混合式 MABR 系統之污水中有機質利用於反硝化的比例約為傳統 MLE 系統的三倍，除氮效能顯著提升。現行於高雄岡山橋頭污水廠之模廠試驗，為模擬污水廠既有 MLE 程序之缺氧槽改造為 MABR 單元之狀況，使用中空纖維膜之 MABR 模組進行測試。系統基本設計流程如圖 8 所示，包含 MABR 單元（缺氧槽）、好氧槽、沉澱槽，並設有硝化液及污泥迴流管線。系統進流取至廠內初沉池溢流井，以處理水量為 5 CMD 為基礎，藉由場內進流水碳氮比偏低的特性，進行不同操作參數測試，並以系統之氨氮與總氮去除率及曝氣效率等作為效能指標，為未來實廠運用提供重要參數。

## 陸、結語

MABR 擁有低能耗、低污泥量、高氧氣傳輸效率、高有機質利用率、高操作

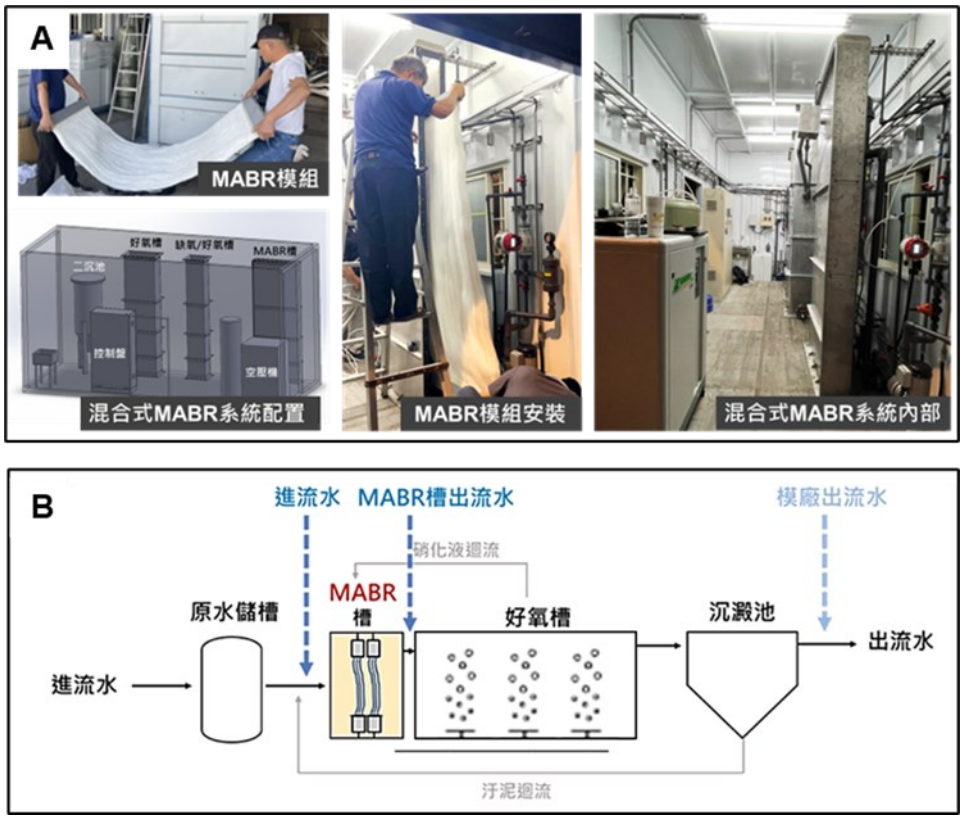



圖 8　A. MABR 模廠建置狀況，B. MABR 模廠之設計流程圖[3]

便利性、低占地面積等優點，並可塑造最適之微環境供除氮微生物生長，為高效之生物除氮技術。以現今除氮技術之發展需求，有望成為新世代生物除氮程序之首選技術，緩解臺灣污水廠傳統除氮程序運行能耗過高，以及普遍進流水碳氮比不足導致除氮效能低下的困境。並持續透過產、官、學三方合作與努力，為國內生物除氮技術發展向前邁進。

## 參考文獻


1. 蔣世安等，工業廢水除氮處理方式探討及經驗分享，中華技術專題報導，96，56-67，2012。
2. 行政院環境保護署，環署水字第。1060101625 號令修正放流水排放標準
3. 營建署，污水處理生物膜反應器脫氮性能與水再生效能提升評估計畫期初報告書，2022。
4. 內政部營建署，污水處理廠設計及解說(上)，中華民國一百零七年五月十八日
5. Shanahan, J. W., & Semmens, M. J. (2004). Multipopulation model of membrane-aerated biofilms. Environmental science & technology, 38(11), 3176 - 3183.
6. SUEZ Water Technologies & Solutions
7. Fluence Corporation
8. Brindle, K., Stephenson, T., & Semmens, M. J. (1998). Nitrification and oxygen utilisation in a membrane aeration bioreactor. Journal of Membrane Science, 144(1-2), 197 - 209.
9. Hirasa, O., Ichijo, H., & Yamauchi, A. (1991). Oxygen transfer from silicone hollow fiber membrane to water. Journal of Fermentation and Bioengineering, 71(3), 206 - 207.
10. Houweling, D., Peeters, J., Cote, P., Long, Z., & Adams, N. (2017). Proving membrane aerated biofilm reactor (MABR) performance and reliability: Results from four pilots and a full-scale plant. Proceedings of the Water Environment Federation, 2017 (16), 272 - 284.
11. Li, Q. (2018). Pilot-scale plant application of membrane aerated biofilm reactor (MABR) technology in wastewater treatment

(Master’s Thesis). School of Architecture and Built Environment, Sweden.

12. Landes, N., Rahman, A., Morse, A., & Jackson, W. A. (2021). Performance of a lab-scale membrane aerated biofilm reactor treating nitrogen dominant space-based wastewater through simultaneous nitrification-denitrification. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(1), 104644.

13. Casey, E., Glennon, B., & Hamer, G. (2000). Biofilm development in a membrane-aerated biofilm reactor: Effect of flow velocity on performance. Biotechnology and Bioengineering, 67(4), 476 - 486.

14. Essila, N. J., Semmens, M. J., & Voller, V. R. (2000). Modeling biofilms on gas-permeable supports: concentration and activity profiles. Journal of Environmental Engineering, 126(3), 250 - 257.

15. Kunetz, T. E., Oskouie, A., Poonsapaya, A., Peeters, J., Adams, N., Long, Z., & Côté, P. (2016). Innovative membrane-aerated biofilm reactor pilot test to achieve low-energy nutrient removal at the Chicago MWRD. Proceedings of the Water Environment Federation, 2016(14), 2973 - 2987.

16. Syron, E., & Heffernan, B. (2017). Oxymem, The flexiable MABR. Proceedings of the Water Environment Federation, 2017(3), 650 - 656.


# 我國公共污水處理廠污泥減量與再利用現況

郭學文[1]、李國豪[2]、蔡任斌[3]、許國恩[4]、朱敬平[5]

**摘要**

內政部為減緩逐年增長之污泥去化壓力，積極推動污泥減量及資源化再利用，累計至 110 年底我國計有 19 座污水處理廠已設置污泥乾燥設備，污泥減量效益達 25 %；下水污泥再利用積極朝燃料化、材料化及肥料化等多元資源化應用推動，目前已進行宜蘭縣及臺南市下水污泥再利用示範驗證，分別產製炭化物（作為輔助燃料使用）及輕質景觀粒料，另花蓮水資源回收中心與亞洲水泥公司合作將乾燥下水污泥作為輔助燃料生產水泥產品。藉由推動污泥減量和再利用，已大幅降低污水處理廠下水污泥去化壓力、清運與掩埋場開發之成本，並逐步建構下水污泥資源循環經濟，促動全國公共污水處理廠邁向永續發展。

1.內政部營建署下水道工程處 / 課長
2.李國豪 內政部營建署下水道工程處 / 幫工程司
3. 財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 助理研究員
4. 財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 組長
5.財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 / 副主任

## 壹、前言

內政部自 110 年展開「污水下水道第六期建設計畫」，預計於 115 年（計畫截止年度）全國公共污水下水道之目標累積接管戶數達 407 萬。隨各縣市污水處理廠陸續完工運轉、收受污水量逐年攀升，加上進流污水有機成分逐年升高（截至 109 年度全國公共污水處理廠污泥產率已增加至萬分之二），預期污泥產量將持續增加。下水污泥具有含水率高、異味等特性，早期多採衛生掩埋處置方式，惟公民營掩埋場逐漸飽和、新址開發不易，使污泥處置成本持續攀漲，導致下水污泥之去化壓力驟升。另行政院環境保護署已於 103 年 1 月 29 日公告「公共下水道污水處理廠」納列為事業，並自 104 年 7 月 1 日起生效，公共污水處理廠產生之下水污泥係認定為事業廢棄物，需依規定委託公、民營機構清除處理或再利用事業廢棄物。爰此，內政部營建署戮力推動污泥減量及資源化再利用計畫，期能透過設置污泥乾燥設備以及推動污泥再利用，以資源有效利用策略，解決日益嚴重之下水污泥去化問題，促動下水污泥循環經濟。

## 貳、下水污泥減量現況

內政部為推動下水污泥之減量，104 至 109 年度「污水下水道第五期建設計畫」優先針對污水及污泥量已趨穩定之污水處理廠補助設置污泥乾燥設備，以污泥含水率自 80%降至 30%為推動目標。

### 一、下水污泥乾燥系統設置狀況

截至 110 年度，五期計畫補助設置污泥乾燥設備之污水處理廠共 11 座，分別為桃園市龜山廠、新北市八里廠、新北市林口廠、臺中市福田廠、花蓮縣花蓮廠、新竹市客雅廠、屏東縣六塊厝廠、金門縣榮湖廠、雲林縣斗六廠與嘉義縣朴子市廠，以及興建中高雄市臨海廠；另有 8 座污水處理廠已自行設置乾燥設備，分別為臺北市迪化廠、宜蘭縣羅東廠、宜蘭縣宜蘭廠、 新北市淡水廠、高雄市楠梓廠、高雄市鳳山廠、苗栗縣竹南頭份廠、臺南市安平廠等。合計全國共有 19 座設有污泥乾燥設備之污水處理廠，總設計處理量達 435.1 公噸/日。各污水處理廠採用之污泥乾燥技術包含間接加熱（計 13 廠）或熱泵冷凝（除濕式）（計 6 廠）兩大類，間接加熱式之熱源來自沼氣、天然氣或燃料油等，藉由加熱金屬壁與污泥接觸使水分揮發（如圖 1 為福田廠污泥乾燥設備）；熱泵冷凝（除濕式）以電力作為乾燥能源，經由除濕機產生的乾燥空氣與污泥充分接觸，可將污泥中所含的水分趕出（如圖 2 為斗六廠污泥乾燥設備），各廠之設備型式與處理量能如表 1 所示。

### 二、乾燥下水污泥促進污泥減量效益

綜整 106 年到 110 年全國脫水污泥

圖 1　福田廠污泥乾燥設備

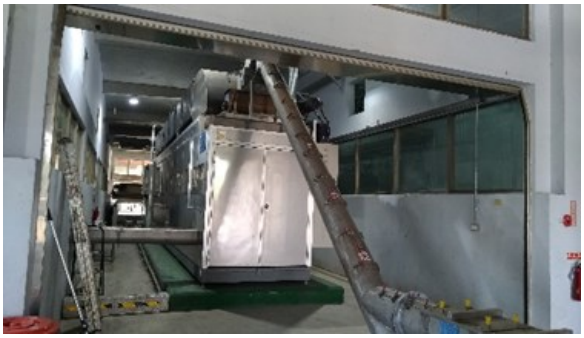


圖 2　斗六廠污泥乾燥設備

表 1　全國污水處理廠污泥乾燥設備現況

| 污水處理廠 | 設備型式 | 設計處理量(噸/日) | 現況 | 備註 |
|---|---|---|---|---|
| 桃園市龜山廠 | 間接加熱 | 24 | 已完成 | 五期補助[註 1] |
| 新北市八里廠 | 間接加熱 | 30 *2 座 | 驗收中 | 五期補助[註 1] |
| 新北市林口廠 | 熱泵冷凝（除濕式） | 12.5 *2 座 | 驗收中 | 五期補助[註 1] |
| 臺中市福田廠 | 間接加熱 | 15 *2 座 | 已完成 | 五期補助[註 1] |
| 花蓮縣花蓮廠 | 熱泵冷凝（除濕式） | 4 | 已完成 | 五期補助[註 1] |
| 新竹市客雅廠 | 熱泵冷凝（除濕式） | 12 | 試運轉 | 五期補助[註 1] |
| 屏東縣六塊厝廠 | 間接加熱 | 5 *2 座 | 已完成 | 五期補助[註 1] |
| 金門縣榮湖廠 | 間接加熱 | 7.5 | 試運轉 | 五期補助[註 1] |
| 雲林縣斗六廠 | 熱泵冷凝（除濕式） | 2 | 試運轉 | 五期補助[註 1] |
| 嘉義縣朴子廠 | 熱泵冷凝（除濕式） | 3 | 已完成 | 五期補助[註 1] |
| 臺北市迪化廠 | 間接加熱 | 70 *2 座 | 已完成 | 臺北市自設 |
| 宜蘭縣羅東廠 | 間接加熱 | 10 | 已完成 | BOT 廠設置 |
| 宜蘭縣宜蘭廠 | 間接加熱 | 10 | 已完成 | 再利用示範廠設備 |
| 新北市淡水廠 | 間接加熱 | 9 | 已完成 | BOT 廠設置 |
| 高雄市楠梓廠 | 間接加熱 | 7 | 已完成 | BOT 廠設置 |
| 高雄市鳳山廠 | 間接加熱 | 21.6 | 已完成 | BTO 廠設置 |
| 苗栗縣竹南頭份廠 | 間接加熱 | 10 | 已完成 | BOT 廠設置 |
| 臺南市安平廠 | 熱泵冷凝（除濕式） | 10 | 已完成 | 前瞻補助 |
| 高雄市臨海廠 | 間接加熱 | 40 | 建設中 | 五期補助[註 1] |

註 1：污水下水道第五期建設計畫

產量與減量效果如圖 3，若未設置污泥乾燥設備，106 年和 110 年脫水污泥產量分別達 152 和 250 噸/日（以乾燥污泥反推脫水污泥含水率 80%之產量），隨著污泥乾燥設備之投入運轉，污泥減量比例由 106 年之 15%攀升至 110 年之 25%，後續乾燥設備規模較大之八里廠完工試運轉後，污泥減量比例可望提升至 32 %，預估污泥減量達 79.3 公噸/日。

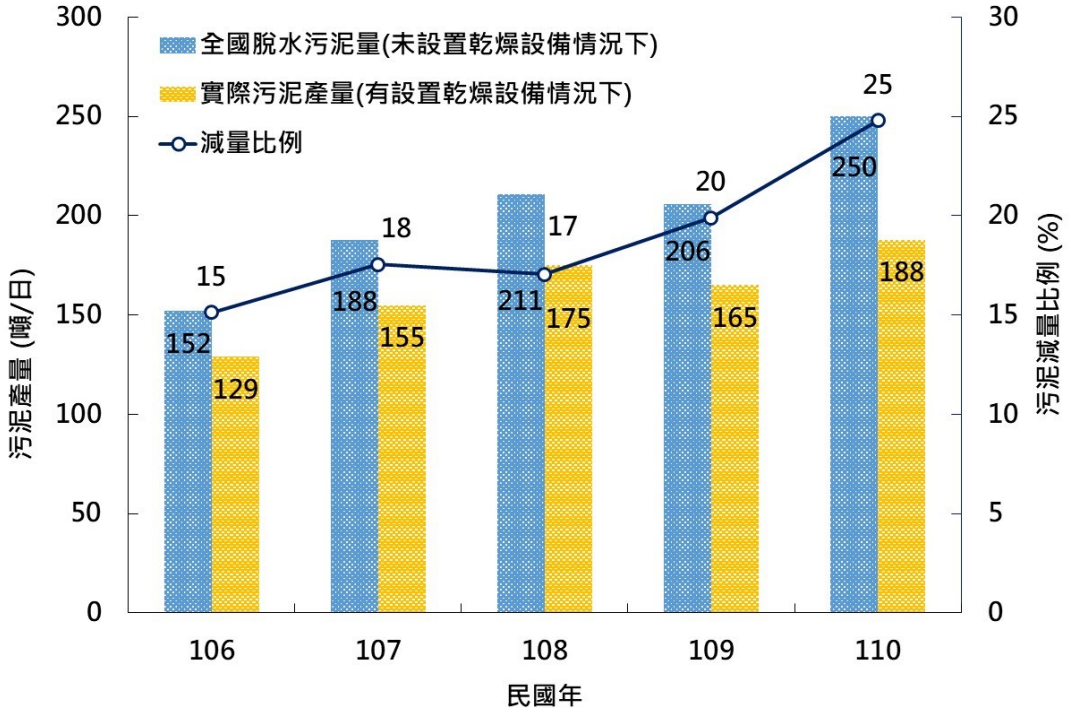



圖 3　下水污泥產量及減量效果情形

## 參、下水污泥再利用現況

考量下水污泥富含有機物，屬具再生價值資源，除優先落實下水污泥減量外，內政部營建署為促動污泥資源再利用，辦理「下水污泥處理再利用第一期計畫」，優先調查下水污泥產量穩定之污水處理廠資源化特性，並於北區宜蘭縣及南區臺南市執行下水污泥再利用示範驗證，另媒合花蓮水資源回收中心與亞洲水泥公司合作推動下水污泥作為水泥窯之輔助燃料。

### 一、下水污泥資源化特性調查

公共污水處理廠進流水因收受截流水、事業廢水及水肥等因素，致使各污水處理廠之污泥特性具差異性。而下水污泥之成分組成係為再利用用途之關鍵因素，宜按下水污泥成分組成規劃再利用用途，若污泥熱值高，宜循「燃料化」之再利用

途徑；若污泥灰分比例較高，宜循「材料化」途徑；若污泥重金屬比例可符合農委會之肥料相關標準，可循「肥料化」途徑。歸納 24 座公共污水處理廠下水污泥特性檢測結果，分別針對燃料化、材料化和肥料化等再利用途徑之關鍵指標進行說明：

1. 下水污泥燃料化特性

下水污泥燃料化用途包含製成固體再生燃料（Solid recovered fuel, SRF）、炭化物、裂解燃油、氣化（合成氣），以及生物發酵產製酒精等，其重要特性項目包含熱值、可燃分和灰分比例及灼燒減量等。可燃分係指固體燃料扣除水分及灰分之成分，可細分為揮發性物質及固定碳，兩者皆為燃料熱值的來源；灰分為不可燃之固體物質，可藉其比例估算出燃料化再利用後之排灰量；灼燒減量一般係作為焚化爐床燃燒效率判斷以及燃料化處理後可能引起有機污染程度指標。

燃料化產品品質可由灰分含量推估，灰分比例低，則可燃分比例與熱值較高，產品品質相對較理想；若灰分比例偏高，易造成污泥燃燒後黏結於鍋爐耐火材料內壁或傳熱管管壁，造成燃燒不完全、傳熱效果降低與氣體流道狹隘等問題。

24 座公共污水處理廠下水污泥燃料化特性分析結果如表 2 所示，下水污泥之灰分含量（乾基）介於 14.1 %~70.6 %、灼燒減量（乾基）介於 29.0 %~85.6 %，乾基發熱量為 1,250~4,880 kcal/kg，高於一般廢棄物焚化時最低熱值（約 800kcal/kg），但相較於煤炭（6,200kcal/kg）、燃料煤（6,400kcal/kg）或木炭/焦炭（7,000kcal/kg）之發熱量，下水污泥熱值仍屬不足，其燃料化應用宜以輔助燃料為主。

表 2　下水污泥燃料化特性分析結果

| 檢驗項目 | 灰分 | 可燃分 | 灼燒減量 | 乾基發熱量 |
|---|---|---|---|---|
| | % （乾基） | | | kcal/kg |
| 數據範圍 | 14.1~70.6 | 29.4~85.9 | 29.0~85.6 | 1,250~4,880 |
| 平均值 | 41.2 ± 13.1 | 58.8 ± 13.1 | 57.3 ± 13.2 | 3,212.4 ± 802.8 |

2. 下水污泥材料化特性

下水污泥材料化用途包含製成水泥、紅磚、陶粒、輕質粒料、控制性低強度回填材料(CLSM)原料等。一般而言，下水污泥之材料化係運用其燃燒後剩餘之灰份，故其品質指標參考 CNS 3036 之飛灰化學成分標準，其重要特性項目包含氧化矽、三氧化二鋁、氧化鐵含量等。24 座公共污水處理廠下水污泥材料化特性分析結果如表 3 所示，下水污泥所含氧化矽(砂石主要成分)範圍為 5.60% ~43.00%、三氧化二鋁範圍為 1.16% ~6.62%，而氧化鐵之含量範圍則為 1.00% ~10.50%。三項目平均值之為 25.46%，遠低於 CNS3036 最低規範。

3. 下水污泥肥料化特性

下水污泥肥料化應用之可行性與污泥所含營養成分和重金屬含量有關，依據農委會「肥料品目及規格」法規規範，針對(十一)雜項堆肥(品目編號 5-11)者，利用或添加事業廢棄物為原料者，應依循「肥料登記證申請及核發辦法」中第五條第四項規定，事業廢棄物所含重金屬砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛及鋅之全量檢驗值不得超過申請登記肥料品目規定之限值。24 座公共污水處理廠下水污泥肥料化特性分析結果如表 4 和表 5 所示，部分污水處理廠銅、汞、鎳、鋅等重金屬含量有高於前述雜項堆肥重金屬全量限值。另外，下水污泥有機質、氮、磷酐及氧化鉀等主成分比例大致可符合一般堆肥的標準限值，然而鑑於部分重金屬高於前述雜項堆肥限值，建議下水污泥肥料化之應用宜優先朝行道樹與觀賞作物等「非食用」之土壤改良劑為主。

表 3 下水污泥材料化特性分析結果

| 檢驗項目 | 氧化矽 | 三氧化二鋁 | 氧化鐵 |
|---|---|---|---|
| | %, 乾基 | | |
| 結果範圍 | 5.60~43.00 | 1.16~6.62 | 1.04~10.50 |
| 平均值 | 19.26±9.00 | 2.85±1.02 | 3.35±1.66 |
| 規範限值 | 最小值 50（C 類，褐煤/次煙煤）；<br>最小值 70（F 類，無煙煤/煙煤） | | |
| 註：規範限值 CNS 3036 對飛灰化學成分標準 | | | |

表 4　下水污泥肥料化特性分析結果

| 檢驗項目 | 調查結果 | 平均值 | 雜項堆肥規範限值 |
|---|---|---|---|
| | mg/kg（乾基） | | |
| 砷 | 0.27~32.4 | 9.62±7.43 | 25.0 |
| 鎘 | 0.84~6.0 | 2.63±1.09 | 2.0 |
| 鉻 | 30.9~863 | 145.7±160.8 | 150 |
| 銅 | 116~2,680 | 393.5±392.8 | 100 |
| 汞 | 0.77~17.2 | 5.6±3.28 | 1.0 |
| 鎳 | 23.2~516 | 109.2±122.2 | 25.0 |
| 鉛 | 14.8~108 | 48.8±17.7 | 150 |
| 鋅 | 451~2,550 | 1,328±529 | 500 |

表 5 下水污泥肥料化特性分析結果

| 檢驗項目 | pH | 有機質 | 氮 | 磷酐 | 氧化鉀 |
|---|---|---|---|---|---|
| | - | %, 乾基 | | | |
| 結果範圍 | 6.01~8.60 | 15.10~83.00 | 0.66~11.00 | 0.02~3.30 | 0.06~0.89 |
| 平均值 | 7.34±0.63 | 53.63±15.42 | 3.63±15.42 | 0.61±1.00 | 0.44±0.21 |
| 法規限值 | >5.0 | >50.0 | >0.6 | >0.3 | >0.3 |
| | <9.0 | | <5.0 | <6.0 | <4.0 |

二、宜蘭縣推動下水污泥燃料化實例

宜蘭縣依據技術、經濟（操作成本、經濟效益等）、環境及法規等四項要素遴選炭化技術進行宜蘭下水污泥之再利用，鄰近日韓等國家考量炭化物環境品質較佳（無臭味），產品質輕，且應用較多元，運送方便等特性，已持續推動下水污泥炭化再利用，考量國內尚無下水污泥碳化實績，宜蘭縣優先辦理下水污泥碳化之再利用試驗計畫，其再利用試驗計畫成果業經內政部核定，炭化設備和產品照片如圖 4 與圖 5。下水污泥炭化再利用示範廠設置於宜蘭地區水資源回收中心，每日設計處理量為 10 噸，目前刻正與炭化物銷售對象洽談合作，將於近期提送再利用許可申請。

1.　下水污泥特性

宜蘭縣運轉中都市污水處理廠共有


圖 4　宜蘭廠下水污泥再利用設備-炭化爐

圖 5　宜蘭廠下水污泥再利用產品

2 座，分別為宜蘭廠與羅東廠，設計平均日污水量分別為 30,000 CMD（兩期）和 45,000 CMD（三期），110 年實際日污水量為 27,385CMD 和 22,695 CMD，分別產出 222.1 噸的脫水污泥及 44.7 噸的乾燥污泥。2 座污水處理廠未乾燥之下水污泥含水率介於 75.0~81.9%，其灰分和可燃分比例分別介於 38.2~52.0%（乾基）和 48.0~61.8%（乾基）；下水污泥元素組成以碳為主，比例介於 21.6~31.1%（乾基），熱值約為 2,520~4,880 kcal/kg；下水污泥鎘、鉻、銅、鉛、鎳、鋅、砷和汞等八項重金屬含量檢測結果，以鋅濃度最高，介於 705~981mg/kg，其次為銅，濃度介於 156~270mg/kg。

2.　再利用技術

污泥炭化係於 500℃左右且低氧環境下使碳以外之有機成分分解，從而產生可燃性之乾餾氣體，而水分與有機物氣體揮發則使污泥產生小孔，最終形成富含固定碳之炭化物。宜蘭縣下水污泥採用日本巴工業株式會社之污泥炭化設備，宜蘭水資源回收中心之脫水污泥進入乾燥爐後，其含水率降至 20~30%；乾燥污泥再接續進入外熱式多段炭化加熱爐，污泥於 450~650℃之低氧環境受熱分解，因污泥炭化處理後含水率接近 0%，為避免炭化物自燃，噴淋自來水，控制炭化物產品含水率低於 10%，以作為輔助衍生燃料。

3．　再利用產品特性

宜蘭炭化廠再利用試驗期間 2 次（不同運轉時段、相同生產條件）炭化物產品檢測結果如表 6 至表 9 所示。炭化物元素分析以碳占最大比例，如表 6 所

示，一般以 O/C 值作為燃料熱釋放率之指標，其值越低，表示具有較佳之熱釋放率，宜蘭廠炭化物產品之碳含量約氧的兩倍，O/C 值為 0.6 和 0.53，具一定之熱釋放率。炭化物熱值（到達基）為 4,666 和 3,615kcal/kg（如表 7 所示），介於火力發電常用的褐煤(2,780~3,892kcal/kg)與亞煙煤(4,800~5,700kcal/kg)熱值範圍；另炭化物灰分比例高於臺灣電力公司主要煤炭燃料產生之灰分比例(2~16%)，可能會降低燃燒效率，並產生粒狀空氣污染物，建議可與一般煤炭經適當比例混燒，以達到資源循環利用及空污排放之要求。炭化物灰熔點介於臺灣電力公司主要煤炭燃料灰熔點範圍(1,150~1,500 ℃)（如表 8 所示），一般而言灰熔點會受到灰分成分影響，其中三氧化二鋁、二氧化矽含量高，灰熔點越高。

SRF 檢項分析方面，如表 9 所示，經濟特徵的淨熱值（兩次結果皆為 3,344kcal/kg）表現優於「固體再生燃料製造技術指引與品質規範」附表之品質標準(2,392kcal/kg)，可提供更高的熱值輔助燃燒；技術特徵的氯含量遠低於品質標準 3 %；環境特徵上，鉛、鎘含量皆符合

表 6　炭化物產品元素分析

| 檢測項目 | C | H | O | N | S | Cl |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 炭化物 1 | 36.1 | 4.8 | 21.7 | 5.4 | 1 | 0.13 |
| 炭化物 2 | 32.7 | 4 | 17.3 | 4.8 | 0.8 | 0.12 |
| 單位 | % | % | % | % | % | % |

表 7　炭化物產品近似分析

| 檢測項目 | 炭化物 1 | 炭化物 2 | 單位 |
|---|---|---|---|
| 總熱值（到達基） | 4,666 | 3,615 | kcal/kg |
| 總水分 | 3.16 | 3.88 | wt% |
| 內含水分 | 3 | 3.05 | wt% |
| 灰分（乾基） | 31.59 | 42.71 | wt% |
| 揮發分（乾基） | 58.56 | 45.16 | wt% |
| 固定碳（乾基） | 9.86 | 12.13 | wt% |

表 8 炭化物產品灰分分析

| 檢測項目 | 炭化物 1 | 炭化物 2 | 單位 |
|---|---|---|---|
| 灰融點-初變形溫度 | 1,219 | 1,313 | ℃ |
| 灰融點-軟化溫度 | 1,259 | 1,356 | ℃ |
| 灰融點-半球化溫度 | 1,358 | 1,447 | ℃ |
| 灰融點-熔流溫度 | 1,418 | 1,475 | ℃ |
| 氧化鈉 | 1.15 | 1.15 | wt% |
| 氧化鉀 | 2.06 | 2.1 | wt% |
| 氧化鎂 | 2.61 | 2.33 | wt% |
| 四氧化三錳 | 0.07 | 0.067 | wt% |
| 三氧化二鋁 | 13.38 | 13.96 | wt% |
| 二氧化矽 | 55.36 | 57.52 | wt% |
| 三氧化二鐵 | 7.22 | 7.12 | wt% |
| 氧化鈣 | 5.89 | 5.3 | wt% |

表 9 炭化物 SRF 檢項分析

| 檢測項目 | 炭化物 1 | 炭化物 2 | 單位 | 檢測方法 | 備註 |
|---|---|---|---|---|---|
| 水分 | 5.65 | 6.72 | % | BS EN ISO 15414-3 | 內含水分 ($M_{ad}$) |
| 灰分 | 29.90 | 32.17 | % | BS EN ISO 15403 | 乾基 |
| 熱值 (NCV) | 3,344 | 3,344 | kcal/kg | BS EN ISO 15400 | |
| 氯 | 0.10 | 0.11 | % | BS EN ISO 15408 | 乾基 |
| 鉛 | 64.36 | 64.07 | mg/kg | BS EN ISO 15411 | 乾基 |
| 鎘 | 1.42 | 1.57 | mg/kg | BS EN ISO 15411 | 乾基 |

品質標準。

三、臺南市推動下水污泥材料化實例

臺南市依據工程技術、經濟面和環境及介面特色等綜合評析，遴選乾燥及燒結造粒作為下水污泥示範驗證廠材料化技術。臺南仁德再利用示範驗證廠以迪化廠於 102 年至 103 年進行之有機污泥燒結輕質粒料再利用計畫為實績證明，免辦理試驗計畫，其再利用許可申請業已核定，臺南仁德廠再利用申請量為每月 300 噸，採連續操作，換算每日處理量能約為 12 噸，本廠已於民國 111 年 1 月工程完工，並自 4 月開始試運轉，設備和再利用產品照片如圖 6 與圖 7 。

圖 6　仁德廠下水污泥再利用設備-旋轉窯

圖 7　仁德廠下水污泥再利用產品

1.　下水污泥特性

臺南市轄下運轉中公共污水處理廠計有安平、虎尾寮、柳營、官田、仁德及安南等 6 座，設計平均日污水量分別為 160,000、12,000、6,000、2,500、15,500 及 13,500 CMD，110 年實際平均日處理水量為 137,875、3,329、3,728、1252、4,982 及 8,313 CMD，109 年度月平均脫水污泥產生量分別為 391.86 噸、2.85 噸、14.43 噸、0.89 噸、1.83 噸及 67.97 噸。以安平廠之污泥產生量最高，其污泥灰分和可燃分比例分別介於 30.0%~69.9%（乾基）和 30.1%~70.0%（乾基）；元素組成以碳為主，比例介於 15.2%~31.5%（乾基），熱值約為 1,250~3,450 kcal/kg。

2.　再利用技術

由於下水污泥之化學組成與陶瓷材料相似，國內外研究係藉由燒結技術將下水污泥轉化為輕質粒料，並應用於營建工程或景觀等用途。燒結技術係將粉末狀原料成形或造粒後，以略低於物質熔點之溫度（須達物質熔點一半以上），令其原子產生移動而形成鍵結，由於原子之移動、重新鍵結，物質內部結構將重新排列組合，使趨向高密度、高強度且緻密之型態，提升物質強度表現，而燒結過程產生之氣體滯含於熔融玻璃相內，冷卻後即形成充滿孔隙且外殼堅硬之輕質粒料。

本示範驗證廠位於仁德水資源回收中心，主要收受處理對象以安平廠產生之乾燥污泥為主，含水率需低於 40%允收標準。收受乾燥污泥後，先將乾燥污泥與黏土以 1 ： 2 之比例混合，並初步造粒成型，之後再經燒結設備產製堅硬輕質粒料（景觀用途）。

3.　再利用產品特性

仁德廠景觀粒料產品之乾鬆單位重須高於 880kg/m$^3$、吸水率高於 15%及外筒壓強度需高於 30kgf/cm。此外，考量景觀粒料用途可能接觸環境，為避免有害物質如重金屬、氯離子等溶出而危害環境，針對可能之環境風險，訂有事業廢棄物毒性溶出程序、重金屬含量、灼燒減量、可溶性氯離子及再生粒料環境用途溶出試驗等品質檢測項目，並規範其用途為景觀工程用粒料，不可用於食用作物之土壤，其檢測方法及頻率如表 10 所示。

四、花蓮縣推動下水污泥作為產製卜特蘭水泥輔助燃料實例

國內污水處理廠下水污泥乾基發熱量介於 1,250~4,880kcal/kg（相當於生煤發熱量 1/2 左右），具有作為水泥窯輔助燃料之再利用可行性，取代部分煤炭，且日本下水污泥約有 29%係作為水泥再利用用途。爰此，亞洲水泥花蓮製造廠（以下簡稱亞泥公司）與花蓮縣花蓮水資源回收中心共同提出將花蓮廠乾燥後下水污泥作為水泥輔助燃料之再利用許可申請，因 109 年花蓮縣公共污水下水道接管率為 35%，亞泥公司考量隨接管率提

表 10　景觀粒料產品品質檢測項目

| 產品名稱 | 產品用途 | 檢測項目 | 檢測方法 | 檢測頻率 |
|---|---|---|---|---|
| 景觀粒料 | 景觀工程用粒料（僅用於非食用作物土壤） | TCLP | NIEA R20 1.15C | 1 次/半年 |
| | | 重金屬含量 | NIEA S321.65E | |
| | | 灼燒減量 | NIEA R216.02C | |
| | | 可溶性氯離子 | NIEA W405.51C | |
| | | 再生粒料環境用途溶出程序 | NIEA R222.10C | |

升，未來污泥量將持續增加，因此以 200 噸/月為再利用許可申請量。再利用許可已於民國 109 年 12 月經內政部核定，已於 111 年 8 月 開始進行下水污泥再利用。

1. 下水污泥特性

花蓮縣僅 1 座運轉中都市污水處理廠花蓮地區水資源回收中心，設計平均日污水量 50,000CMD，實際日污水量為 41,303CMD。110 年度月平均乾燥污泥產量 28.47 噸，花蓮廠污泥灰分比例約為 29.4%（乾基）、揮發分比例為 58.21%（乾基）、固定碳為 6.88%（乾基），熱值為 3,798kcal/kg（乾基）。

2. 再利用技術

下水污泥於水泥產業之再利用模式有材料化與燃料化兩種，前者係以污泥灰分取代部分天然水泥砂石或水泥等原料；後者則利用下水污泥所含熱質，作為輔助燃料添加於水泥製程中熟料燒成階段之預熱機，藉以取代部分煤炭用料，而燃燒後剩餘之灰分則可以與生料同鍛燒為水泥熟料。

下水污泥作為輔助燃料之再利用流程，如圖 8 所示，係於預熱機上升風道

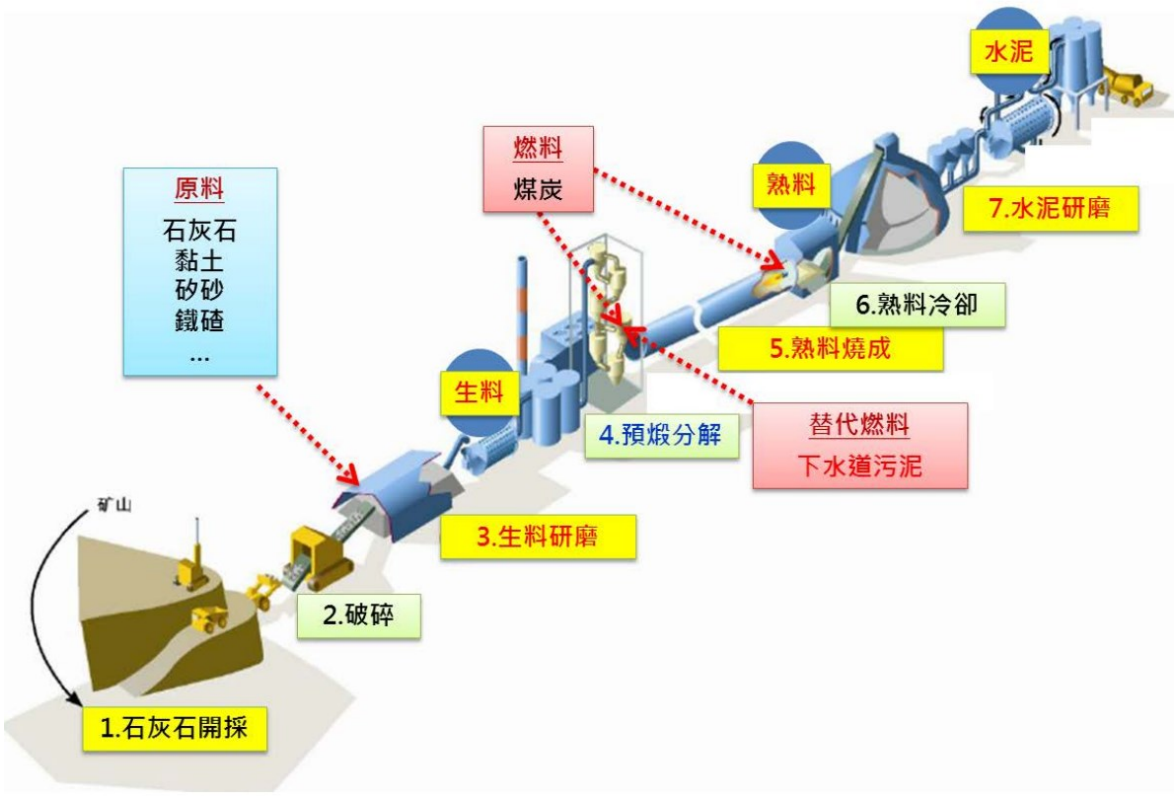



圖 8 下水污泥投入水泥製造流程位置

口投入下水污泥於旋窯系統，如圖 9 所示，有機污泥進入系統後隨即因風道內 850±100℃高溫環境充分燃燒並提供系統熱值，燃燒後剩餘之灰分隨原料流進入旋窯內與生料（石灰石、矽鋁質原料、鐵砂）鍛燒成熟料。過程中由於溫度遠高於戴奧辛生成溫度，可有效分解戴奧辛等有害物質。亞泥公司針對作為輔助燃料之有機污泥訂有允收標準，包含含水率≤40%（避免滲液）、熱值 ≥2,500kcal/kg（需具有燃料特性）、氯離子含量≤0.1%（避免過量影響製程、品質）。

圖 9　亞洲水泥花蓮廠預熱機/旋窯系統

3、再利用產品特性

亞泥公司產製之產品為卜特蘭水泥，其產品規格依循 CNS 61 R2001 第 1 型水泥之規定，主要用於營建用途，相關品質規範依據 CNS1078 進行檢測，其品質檢測項目如表 11 所示。

五、推動/規劃中之下水污泥再利用

鑒於各公共污水處理廠污泥特性差異及地區發展，下水污泥資源化再利用應因地制宜，目前離島地區之金門縣和澎湖縣刻正規劃推動下水污泥作為土壤改良劑，用於公部門行道樹或景觀植物培育與栽種，除可節省污泥運送回本島的處理費用外，亦可落實污泥資源化再利用與處理在地化的目標。

六、污泥乾燥減量與再利用之效益

1. 污泥乾燥減少委外清運和掩埋場開發成本

下水污泥經減量與再利用後，可減少下水污泥委外清運成本，若每噸污泥成本以新臺幣 9,000 元估計，110 年每日污泥乾燥減量計 62 公噸，估計每年減少的委外清運成本約新臺幣 2.04 億元。另若每噸下水污泥減少的掩埋場開發成本以新臺幣 1,200 元計，下水污泥經乾燥減量後，每年減少的掩埋場開發成本約新臺幣 0.27 億元。

2. 通過下水污泥再利用削減碳排放量

內政部推動下水污泥再利用示範驗證，宜蘭縣宜蘭廠採用碳化技術產製炭化物之輔助燃料，臺南市仁德廠採用燒結技術產製輕質粒料廠，研究顯示下水污泥經

表 11　亞泥公司水泥產品品質檢測項目

| 產品名稱 | 產品規格 | 產品用途 | 檢測項目 |
|---|---|---|---|
| 卜特蘭水泥 | CNS 61 R2001 第 I 型水泥 | 營建工程 | 比表面積 |
| | | | 游離石灰 |
| | | | 燒失量 |
| | | | 三氧化硫 |
| | | | 化學分析 |
| | | | 抗壓強度 |
| | | | 正常稠度 |
| | | | 凝結時間 |
| | | | 假凝結 |
| | | | #325 篩餘 |
| | | | 熱壓膨脹 |
| | | | 墁料空氣含量 |
| | | | 不溶殘渣 |
| | | | 水泥中石灰石含量 |

碳化和燒結技術再利用後，相較於傳統之衛生掩埋，每噸下水污泥碳排放量分別可削減 265 及 597 公斤之 $CO_2$ 當量，進一步依據宜蘭廠與臺南廠再利用許可之處理量能（均為 10 噸/日），合計每日可削減之碳排放量達 8.62 噸，相當於每年 8 座大安森林公園之吸碳效果（大安森林公園每年 $CO_2$ 吸收量為 389 噸）。

## 肆、結論與建議

內政部藉由污泥乾燥設備之建設與下水污泥再利用之推動，已有效減少公共污水處理廠下水污泥去化之壓力、降低清運成本。此外，藉由下水污泥多元化再利用途徑之建構，除可促動國內資源再生循環產業之發展，亦可通過建立之循環經濟體系接軌「聯合國永續發展目標(SDGs)」之第 12 項目標「促進綠色經濟、確保永續消費及生產模式」。

此外為提升推動下水污泥減量欲再利用之效益，考量各污水處理廠規模、下水污泥成分性質，以及所在區位發展差異，各縣市可依據地區污泥特性及鄰近產業需求，推動多元化下水污泥再利用，另可思

考多處污水處理廠共同與再利用機構提出再利用許可申請，透過具規模化處理量能，以標準化程序和均勻進料，提升生產量能與產品品質穩定性，進而提高銷售對象接受度與廠商投資意願，以開拓多元再利用之市場，提升業者對於資源再生產品之接受程度。而隨著污泥再利用產品之持續推廣，未來可修正「公共下水道污水處理廠事業廢棄物再利用管理辦法」，將技術已成熟，且市場應用無虞之再利用產品用途予以公告再利用，並進一步結合資源化綠色產品認證，納入企業永續責任，提升企業採購之利基，以建構下水污泥資源化之永續發展經濟模式。

## 參考文獻


1. Ing-Jia Chiou. et al. , “Lightweight aggregate made from sewage slud ge and incinerated ash” , Waste Management, Vol. 21, pp. 1453-1461. ,2006

2. Mun. K.J. , “Development and tests of lightweight aggregate using se wage sludge for nonstructural concrete” , Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 1583-1588. , 2007

3. 內政部營建署，全國都市污水處理廠污泥等廢棄物處置方式評估及工程規劃，2010。

4. 內政部營建署，下水污泥處理減量及再利用審查管理計畫委託專業服務案，2019 年。

5. 內政部營建署，下水污泥處理減量及再利用審查管理計畫（第 3 年度）委託專業服務案，2020 年。

6. 花蓮縣政府，內政部公共下水道污水處理廠事業廢棄物（有機性污泥）個案再利用許可申請書（定稿版），2020。

7. 宜蘭縣政府，「下水污泥處理碳化示範驗證廠統包工程」成果報告書，2021。

8. 臺南市水利局，仁德水資源回收中心事業廢棄物再利用許可申請書 （修正三版），2022。

# 臺北市污水下水道建設運營經驗分享與展望

程培嘉[1]、馬啟隆[2]、李光軒[3]、林佳雯[4]

**摘要**

臺北市用戶接管普及率已達 81.01 %為全國之冠，污水下水道業務主軸已逐漸從新建轉型為營管維護為主。在營運維護面向，率先將迪化、內湖 2 座污水處理廠採用成效式契約，以「購買服務」取代傳統「購買勞務」的方式，並納入獎勵機制及採用 ROT 精神，以提升污水處理效能；另外就污水管渠清疏結合商家水質稽查管制，導入精實管理手法、制訂最適執行流程，創造用戶與政府雙贏契機。在用戶接管成長已接近最終階段，面對各項困難，研擬推動策略，擬定 2030 年污水完全自主處理、2032 年用戶接管普及率達 90%之願景目標、並計畫性推動廠站設備更新、功能提升，與污水管渠檢視延壽工作，冀望臺北市污水下水道建設永續茁壯。

1.臺北市政府工務局衛工處 / 處長
2.臺北市政工務局衛工處 / 副處長
3.臺北市政工務局衛工處 / 副總工程司
4.臺北市政府工務局衛工處 / 正工程司

## 壹、前言

人群在生活與經濟活動時，必然會產生含有污染物的污廢水，如未經妥當處理即排入河川湖泊等水體，勢必造成嚴重水污染問題，為改善河川水質與居家環境衛生，污水下水道成為現代都市不可或缺之基礎建設。污水下水道埋設於大街小巷為密閉式管渠，將家庭污水及事業廢水收集後，經污水處理廠淨化再排入河川、海洋等承受水體。臺北市自 1969 年推動大臺北地區污水下水道建設，為國內污水下水道建設之肇始，迄今已歷時 50 餘載；特就臺北市建設成果與運營之相關經驗撰文分享，俾供各界瞭解或執行之參酌。

## 貳、臺北市污水下水道系統建設概況

一、公共污水下水道服務區與後續服務區

臺北市行政區域面積廣達 27,180 公頃，規劃為公共污水下水道系統服務區面積約 12,998 公頃，然而都市計畫區內尚有半數以上區域屬都市計畫之保護區、農業區及行水區等非發展區，範圍遼闊且人口稀疏約 14,182 公頃，經扣除河川行水區約 1,794 公頃，屬公共污水下水道較難到達地區，因此將其劃定為公共污水下水道系統後續服務區約 12,388 公頃。

臺北市全市均為都市計畫區，

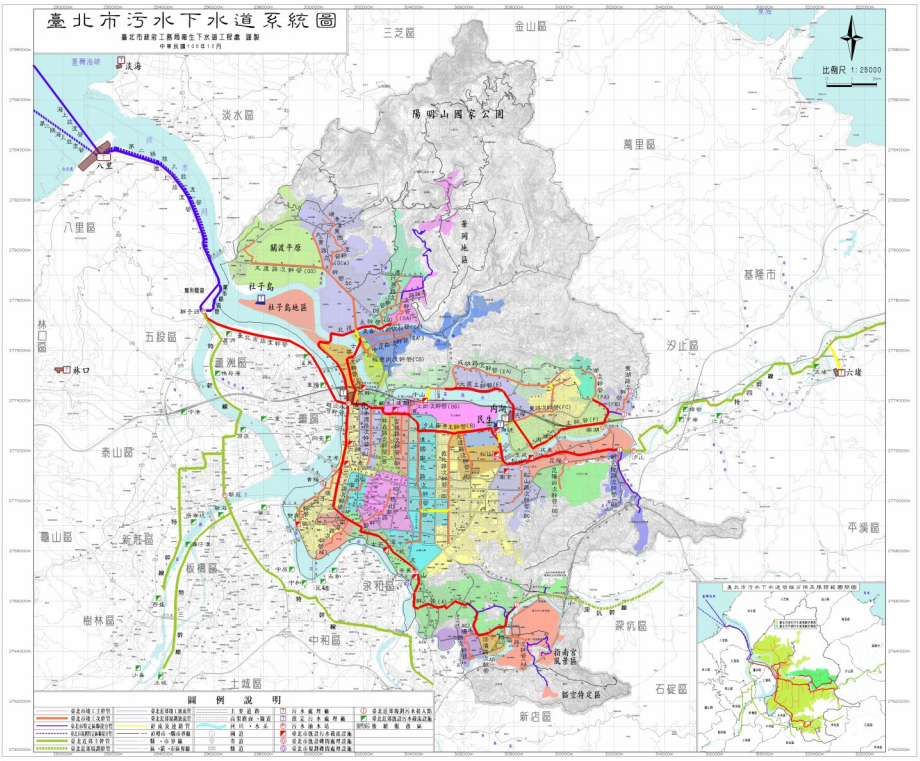



圖 1　臺北市污水下水道系統圖

經考量技術、經濟、用地、營管及效益等，後續服務區之污水處理對策，建議優先評估將周邊區域，藉由管網延伸納入目前服務區污水下水道系統為先，包括華岡、貓空、指南宮及部分周邊區域等；其次為設置獨立式建築物污水處理設施，若設施及管線用地取得無問題，可個案將評估採用聚落式小型污水收集處理系統。

二、管網工程建設

臺北市污水下道管網建設逾 50 年，截至 2022 年 7 月底，已完成規劃並佈設管徑 1,200-3,600 公釐之主幹管計 6 條（總長度為 49,528.7 公尺），已完成規劃並佈設管徑 700-1,200 公釐之次幹管計 28 條（總長度為 76,898.4 公尺）；分管網規劃長度為 905,000 公尺，已完成 833,189 公尺。

三、用戶接管普及率

用戶接管普及率，有公共污水下水道普及與門牌戶數接管普及率 2 種，茲說明如下：

(一)公共污水下水道普及率（營建署公告）：係採臺北市轄區內完成門牌接管戶數*戶量/全市總人口數而得（依內政部戶政司 2022 年 7 月底統計準得之），截至 2022 年 7 月底止累計完成門牌戶數為 913,035 戶，公共污水下水道普及率 87.5 %。其中戶量等於總人口數/戶籍戶數。

(二)門牌戶數接管普及率（臺北市公告）：採臺北市轄區內累計完成門牌戶數/門牌總戶數（依臺北市政府民政局 2022 年 7 月底統計全市門牌數為基準得之），截至 2022 年 7 月底止累計完成門牌戶數為 913,035 戶，門牌戶數接管普及率 81.01 %。

四、污水處理廠

目前臺北市營運中之污水處理廠有迪化及內湖等 2 處污水處理廠，均採二級生物處理，其中迪化污水處理廠放流至淡水河，內湖污水處理廠放流至基隆河。

(一)迪化污水處理廠

採用全面加蓋式半地下化理念設計，處理方式採用深槽階段曝氣二級生物處理流程，設有三級處理水回收再利用設備。在廠房上部 4.6 公頃面積規劃為回饋公園（全廠 7.8 公頃）。迪化廠設置 2 臺污泥乾燥設備，以間接乾燥方式將污泥餅平均含水率由 80 %大幅降低至 30 %以下，全廠目前採委託操作維護及營運管理。

以 2022 年上半年平均日處理量為 420,053 噸，放流水質 BOD 為 12.02

表 1　臺北市污水下水道用戶接管普及率

| | 累計污水處理總戶數 | | | | 臺北市轄區內門牌總戶數 | 門牌戶數接管普及率(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 公共污水下水道門牌用戶接管戶數 | 建築物自設專用污水下水道設置戶數 | 建築物自設污水處理設施設置戶數 | 合計 | | |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | 【註一】(5) | (6) =(1)/(5)*100 |
| 總計 | 913,035 | 3,473 | 9,488 | 925,996 | 1,127,067 | 81.01 |
| 松山區 | 74,794 | 502 | 358 | 75,654 | 85,075 | 87.92 |
| 信義區 | 79,487 | 271 | 363 | 80,121 | 93,120 | 85.36 |
| 大安區 | 108,119 | 133 | 308 | 108,560 | 127,993 | 84.47 |
| 中山區 | 117,573 | 28 | 826 | 118,427 | 136,345 | 86.23 |
| 中正區 | 56,136 | 153 | 431 | 56,720 | 72678 | 77.24 |
| 大同區 | 45,433 | 0 | 519 | 45,952 | 59,413 | 76.47 |
| 萬華區 | 66,561 | 257 | 507 | 67,325 | 84,726 | 78.56 |
| 文山區 | 85,274 | 247 | 934 | 86,455 | 101,740 | 83.82 |
| 南港區 | 39,486 | 1 | 334 | 39,821 | 48,094 | 82.10 |
| 內湖區 | 94,702 | 597 | 1,617 | 96,916 | 116,226 | 81.48 |
| 士林區 | 82,467 | 340 | 1,323 | 84,130 | 107,654 | 76.60 |
| 北投區 | 63,003 | 944 | 1,968 | 65,915 | 94,003 | 67.02 |

統計截止日： 111 年 7 月 31 日

111 年 8 月 3 日編製

註一：臺北市轄區內現門牌總戶數 1,127,067 戶，係依據本府民政局 111 年 7 月底統計全市門牌樹為基準得之。(門牌戶數資料來源：本府民政局)

註二：統計項目定義：

(一)公共污水下水道：供公共使用之污水下水道。

(二)建築物自設專用污水下水道：供特定地區或場所使用而設置且尚未納入公共污水下水道之污水下水道。

(三)建築物自設污水處理設施：公共污水下水道還尚未到達地區，建築物依建築技術規則規定設置處理側廁所排水、生活雜排水之設施。

(四)門牌戶數接管普及率：累計公共污水下水道門牌用戶接管戶數占臺北市轄區內門牌總戶數之比率。

mg/L、SS 為 10.33mg/L、$NH_3$-N 為 5.07mg/L，均優於國家放流水標準及環評承諾水質，處理水放流至淡水河。

(二)內湖污水處理廠

採用全面加蓋式半地下化理念設計，處理方式採階梯式 VIP 法二級生物處理流程，設有三級處理水回收再利用設備。在廠房上部 3.8 公頃面積規劃為回饋公園（全廠 7.46 公頃）。設置有管徑 2,000 公釐之越基隆河連絡管銜接汐止南港主幹管，發揮內湖污水處理廠及迪化污水處理廠具有雙向紓流功能，並於越基隆河連絡管中再設置直徑 200 公釐之污泥輸送管，藉以將內湖廠產生之污泥採重力方式經既有之污水下水道送至迪化污水處理廠集中處理，節約污泥處理成本。

以 2022 年上半年平均日處理量為 199,700 噸，放流水質 BOD 為 3.35 mg/L、SS 為 11.13mg/L、$NH_3$-N 為 1.46mg/L，均優於國家放流水標準，且在 $NH_3$-N 的處理發揮極佳效能，處理水則放流至基隆河。

## 參、精實專案-污水管渠堵塞熱區改善精進之推動經驗分享

臺北市用戶接管普及率高，每日約產生有 92 噸的污水（含截流），家家戶戶透過龐大的污水下水道管網輸送至污水處理廠處理，污水輸送過程若不暢通，則猶如人體靜脈血管栓塞，造成血流緩慢、血管壁損傷，進而損及身體系統運作，對照污水下水道若發生堵塞時，將導致路面人孔冒污水，或用戶端廁所與廚房排水堵塞，將直接影響居家環境衛生。

臺北市為減少管線堵塞及降低清管維護成本，特別就污水管渠的堵塞原因進行比率分析後發現「毛髮堵塞佔 4%」、「混凝土流入管渠佔 2%」、「異物（石塊、瀝青）堵塞佔 2%」、「樹根竄根佔 2%」、「雜物（塑膠袋、布類等）堵塞佔 10%」，餘 80% 的堵塞原因，均為超量「油脂」排入污水下水道形成油垢(塊)所致；同時統計 2017 至 2019 年民眾通報屬公共污水管堵塞，清疏件數分別為：2017 年 2,416 件、2018 年 2,970 件、2019 年 3,318 件，其中屬油脂堵塞者 2017 年 2,311 件、2018 年 2,831 件、2019 年 3,212 件，呈現逐年增加之勢。

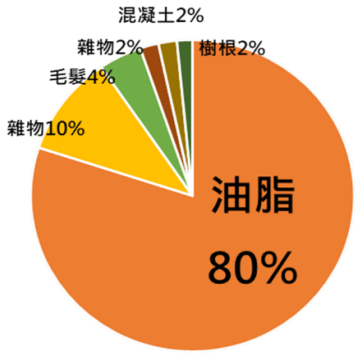



圖 2　污水下水道堵塞原因

依上述分析統計數據得知，污水下水道陳情堵塞案件有逐年攀升之趨勢，相對造成清疏費用及行政作業增加，為減少民怨及浪費，建構預防勝於治療的理念與作為，衛工處針對問題於 2020 年組立「精實專案」，探究其原因與解決方案。

首先運用「柏拉圖八二法則」分析污水下水道堵塞原因，並求得重點原因及同時能獲得最大效益者著手--油脂堵塞，以「SIPOC」模型檢討作業流程，修訂污水下水道清疏流程，並增訂宣導裁罰流程，最終以推動「預防性清疏管渠」搭配「商家稽查，源頭管理」以及跨局處

「聯合稽查作業」等創新業務整合模式，從源頭解決污水下水道堵塞問題，以降低堵塞次數，提升用戶之滿意度，俾符合精實管理「減少浪費」及「創造客戶的價值」等 2 大核心價值，提供市民更優質生活品質！

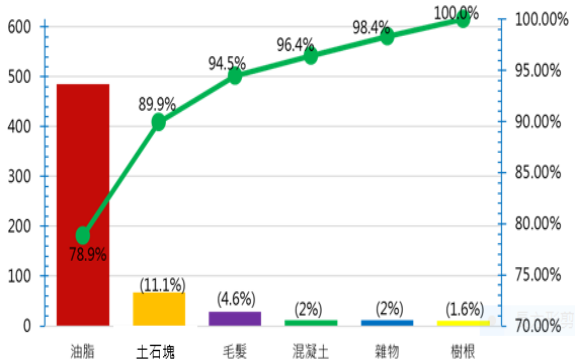



圖 3　柏拉圖八二法則分析

最後就預防性清疏管渠、源頭管理商家稽查、業務流程檢討與整合及成果之執行分別說明如下：

(一)預防性清疏管渠

在未執行精實專案前的管渠清疏業務本為被動性執行，於接收民眾通報堵塞後才會派員至現場疏通管渠，然清疏人員至現場時，因已發生管渠堵塞情事，民眾生活亦已遭受不便，且若堵塞地點屬經常性通報或重複堵塞地點，則易被誤解為管渠清疏不力。

為積極面對解決窘境，該業務改採主動性出擊，首先調閱歷年管渠堵塞資料，將一年內曾重複發生 3 次以上堵塞地點定義為「堵塞熱區」，優先派員現場開啟人孔檢視，如發現人孔有油垢堆積，直接辦理預防性清疏，清理人孔及管線油垢，體現預防勝於治療的執行精神。有別於既有清疏流程，係發現人孔完全堵塞才辦理清疏作業。

預防性清疏辦理完成後，開始執行為期 180 天的「人孔治療療程」，首先於堵塞熱區人孔蓋噴漆「B（Blockage 的縮寫）」註記，目的使現場清疏人員易於確認堵塞人孔所在位置，接續以每 60 日為周期辦理 1 次人孔開蓋複查作業，並以累積複查 3 次為原則。如複查 180 日期間均未再接獲通報發生堵塞情形，則恢復 1 年 1 次的檢視頻率；如複查 180

日內仍出現堵塞狀況，會進一步檢討是否污水管渠因施工或沉陷等因素，造成坡度不良或變形等狀況所致，經確認會進一步研擬管線更新可行性，以工程手段來解決重複堵塞問題。


圖 4　人孔蓋噴漆「B」記號

(二)執行商家稽查，源頭管理

研擬價值流程圖以整合預防性清疏管渠及水質稽查等 2 項業務模式，使業務執行效果加乘最大化。堵塞熱區經預防性清疏後，立即調查堵塞熱區周邊餐飲名單，找出油脂排放的源頭，造冊列管為油脂超量排放的可疑商家，接續辦理商家宣導及水質稽查作業。

辦理商家水質稽查作業前，將先對商家辦理宣導作業，積極向商家溝通污水油脂排放標準、油脂截留的正確清潔方式及改善餐盤洗滌習慣等。並於宣導後 1 個月起辦理水質稽查作業，如水質稽查結果不合格則開立限期改善單，並於 2 個月後不定期辦理複檢作業。如仍不合格則開立 1 萬元以上 10 萬元以下裁處書，得連

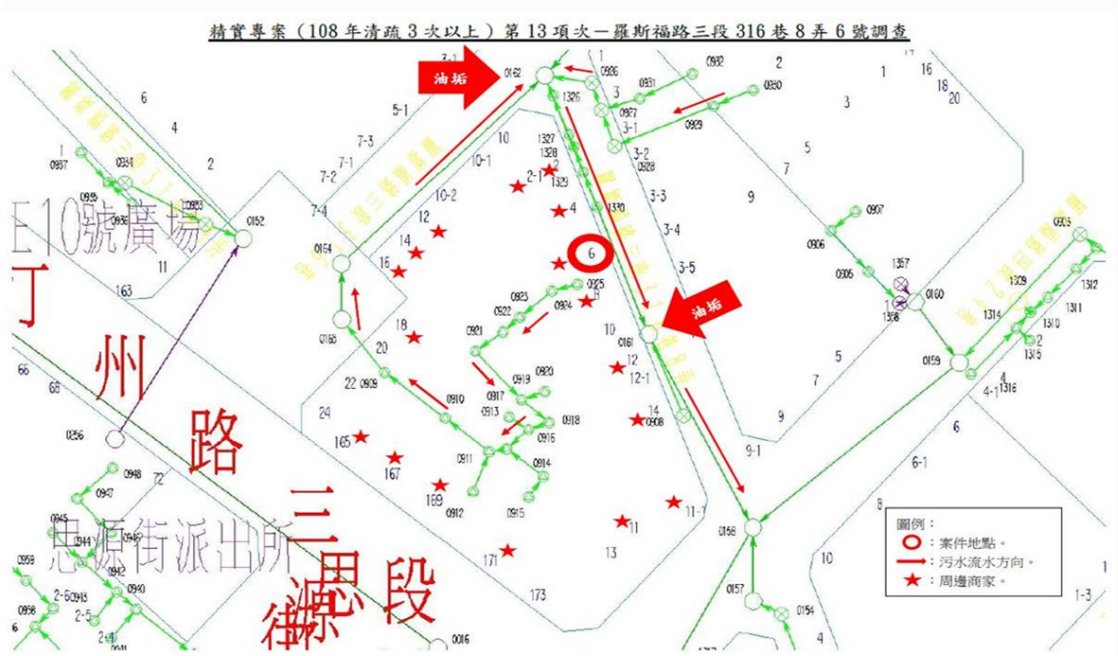



圖 5　堵塞熱區周邊商家標記管制

續處罰直至複檢合格為止，設法遏止餐飲業超標油脂排放之行為。另針對屢次水質稽查不合格用戶，亦將對該用戶辦理 1 對 1 專案輔導作業，現場與用戶深入訪談油脂截留器清潔習慣，並針對不合格項目辦理觀念輔導，建立商家正確使用污水下水道的概念。

臺北市針對污水下水道接管用戶訂有納管水質標準，用戶污水須依水質標準排放，如經水質稽查不合格可處以 1 萬元以上 10 萬元以下罰 鍰。目前水質稽查對象，除精實管理管制商家外，尚針對用水量大戶或排放水質特殊事業用戶 ( 如：飯店、市場、修車廠、加油站、焚化廠等 ) 辦理每年例行性稽查作業。

(三)業務流程檢討與整合

經過「SIPOC」模型檢討工作流程後，發現原有的管渠清疏維護業務與商家宣導稽查業務，因未整合執行，以致事倍功半效果不彰。故經檢討改善後將預防性管渠清疏作業與後端商家宣導及稽查作業，串聯成系統性之業務流程。為有效管理堵塞熱區、清疏狀況、商家名單、宣導及稽查成果等資料，納入資訊專業技術協助，開發視覺化專案管理系統及小 e 化系統，以其管理系統輔助，可有效降低人力成本及節省繁複管控流程，待處理案件、處理結果以及民眾滿意度等資料均能一目瞭然。

對於水質稽查多次不合格、屢勸仍未裝設油脂截留器或重複堵塞熱區用戶，則結合臺北市各局處管轄責任，採取「聯合稽查」，有效嚇阻民眾勿排放超量油脂。


圖 6　視覺化專案管理系統

以臺北商業大學附近商圈等嚴重堵塞熱區為例，迄今共計辦理 6 場次聯合稽查作業。其中衛工處負責辦理油脂截留器裝設宣導、水質採樣稽查，確保排放水質符合納管標準；衛生局檢查用戶油脂截留器是否有良好維護及清潔，並宣導業者定期清洗以維持正常功能；環保局稽查用戶有無污水或油脂廚餘排入水溝造成環境污染，並勸導業者改善；經過跨局處合作，周邊商家均已依規定裝設油脂截留器，且排放水質複檢後均符合本市之納管標準。

(四)執行成果

本精實管理自 2020 年 5 月開始執行，截至 2022 年 6 月底，本市共計 243 處列為堵塞熱區，共計有 588 家受列商家。

1. 堵塞熱區計有 243 處，預防性清疏成果已有 165 處經過 180 天的「人孔治療療程」已再無發生堵塞、47 處尚於 180 天內管制目前尚無堵塞情形，故合計未發生再堵塞比率達 87 %，31 處仍有發生重複堵塞，本處將探討是否污水管線因施工或沉陷等因素造成坡度不良或管線變形等狀況所致，並同步對周邊商家辦理跨局處聯合稽查。

2. 受列商家 588 家，經宣導及稽查後，油脂截留器裝設率已達 81 %，水質稽查合格率達 65 %，後續對未裝設油脂截留器之商家及水質不合格用戶，持續辦理宣導作業與稽查採樣；若再經勸導多次仍未裝設油脂截留器者，則由本府建管處依建築技術規則相關規範給予行政指導，對於水質稽查不合格商家已開立限期改善單 122 家次，裁處書 30 家次。

## 肆、願景目標

臺北市的污水下水道建設在用戶接管普及率超過八成之後，已逐漸從新建轉型為營管維護為主，在接管率有限的成長空間下仍不斷突破推動，並以污水下水道永續經營之理念，擬訂以下願景目標。

一、2032 年用戶接管普及率達 90 %

臺北市污水下水道建設歷經 50 年的推動歷程，目前約有 20 萬戶尚未完成接管，而其未接管原因主要大致可歸類為施工障礙、缺乏施作空間、施工安全疑慮及用戶不配合接管等 4 大類；為能突破現行艱難，臺北市擬定有「用戶接管 10 年接管計畫」，並採取 5 大執行策略，以每年 1 萬戶為成長目標，於公共污水下水道服務區內優先以「接管率偏低之里」、「環保局列管抽肥大戶」、「市區溪流水質嚴重污染區域」、「自費申街與住戶陳情」等對象推動用戶接管；另於後續服務區內則持續檢討延伸可服務之周界，並推動聚落式污水處理設施及指定專用下水道之設置。

所謂 5 大執行策略包含有(一)首創污水下水道工程採「成效式統包契約」模式辦理，由統包廠商運用專業引導設計減少界面，強化施工可行性，提升用戶接管；(二)同時強化市府機關間跨域合作，對防火間隔或法定空地有增建物影響接管者，配合建管查報，確保污水管渠埋設空間，且完成後一併施作後巷美化，優化鄰里空間；(三)提升市民接管意願，檢討補助、補償法規，擴大補助對象及鬆綁補助要件，並提高補助金額；(四)滾動式檢討接管申辦流程，以達簡政便民為目標；(五)最後若遇拒不配合且影響他人接管者，將依法要求限期改善或裁罰。

臺北市已改變過往之招標策略，期待突破過去無法接管的困境；於用戶提供維護空間所需，衛工處與建管處協助合作，並於 2021 年達 100 %用戶自行配合拆除之成效；同時已修訂法規施行提高廢除化糞池/設置污水坑補助、使用建築物室內空間設置污水管渠補償金額，並擴大補助對象；另於自費申接用戶，除現階段可採行「市民服務大平臺」網路申辦外，後續將就其審查流程與文件再行檢討簡化，希望能更為簡政便民。在上開多重引導政策下，若用戶仍拒絕配合用戶接管者，再依下水道相關法規進行裁罰。

二、新建水資中心，2030 年污水自主處理

臺北市除營運中之迪化及內湖污水處理廠；目前尚新建民生水資源再生中心、及規劃新建濱江水資源再生中心、社子島水資源再生中心等，以 2030 年達臺北市污水自主處理為目標 。

表 2　臺北市污水處理廠處理量統計表

| 項目別 / 廠（中心） | 處理狀況 | |
|---|---|---|
| | 處理等級 | 設計處理量 $M^3/d$ |
| 迪化污水處理廠 | 二級 | 500,000（營運中） |
| 內湖污水處理廠 | 二級 | 240,000（營運中） |
| 民生水資源再生中心 | 三級 | 40,000（新建中） |
| 濱江水資源再生中心 | 三級 | 160,000（規劃中） |
| 社子島水資源再生中心 | 三級 | 350,000（規劃中） |
| 污水處理量 | 合計 | 975,000 |

(一)迪化、內湖污水處理廠提升三級處理

為提高污水處理廠代操作廠商之服務品質，目前於迪化及內湖廠代操作以成效式契約約定執行，並參採 ROT-RENEW 精神由代操廠商執行設備更新工程設計與施工，透過 ROT-RENEW 執行，可望於 2023 年底迪化廠完成部分升級增產再生水量、2027 年底內湖廠全面升級。

(二)民生水資源再生中心暨環境教育館新建工程

位於臺北市民生污水處理廠舊址用地，用地面積為約 0.85 公頃，計畫採 MLE+MBR 進行三級污水處理，並新建下水道環境教育館，及佈設周邊回收水管線系統與 3 座智慧取水站，以建構結合上水、中水及下水之水資源循環教育園區。本水資中心目前新建中，預計 2025 年正式營運。

圖 7　民生水資源再生中心鳥瞰模擬圖

(三)濱江水資源再生中心

計畫廠址位於本市中山區大佳里濱江街，用地面積為 5.05 公頃，目前已進行規劃，未來採三級處理，地下化設計，因位處松山機場旁，上部區域將結合在地環境打造為飛機觀景公園，提供民眾休憩空間，本水資中心預計 2023 年開始新建，2029 年正式營運。

(四)社子島水資源再生中心：將配合社子島開發計畫新建，預計 2024 年推動環評作業。

三、計畫性辦理廠站設備更新

臺北市污水下水道建設起步較早且系統龐大，廠站的部分設施已屆生命週期，機電設備發生妥善率逐年下降、節能效率不足等情境。然而延壽與更新工作實非一蹴可及，臺北市首先由代操作廠商進行主要設備健全度評估，並由專案管理廠商進行確認；除可靠度及健全度良好之設備，應持續進行相關維護及檢測作業，以達延壽之目標外，對健全度不佳之設備排定優先順序辦理更新工程，為減少施工介面及設備選用疑義，並提升更新效能，採分期編列更新預算，再將更新工程併入代操作契約執行，並採後擴方式延長代操作廠商履約期間最長可達 12 年，增加廠商選用優良設備意願，提升精進其處理效能。

臺北市污水下水道系統龐大，所需耗費的資源及衍生需投入有形無形的資源也相對增加，於設備更新，將導入自動化結合 e 化管理，增加效率，穩定系統，達預

警、減少人為疏失及減少能源、藥品和材料消耗。

四、管渠檢視延壽

臺北市污水下水道管網佈設起自民國 1972 年，截至 2021 年底全市污水下水道已建設完成之管渠長度總計有 272 萬 3,073 公尺，其中管齡最大已有 47 年之久；為確保道路安全、維持系統運輸及延長污水管渠使用壽命，臺北市自 2019 年起即開始試辦第 1 期主、次幹管檢視及修繕延壽，以管齡、損壞率為考量，擇取士林主幹管，吉林路、建國南北路次幹管辦理，計完成 8,205 公尺檢視，並針對滲漏損壞處進行立即性修繕；續於 2020 年再度針對分支管網展開檢視及修繕延壽試辦工作，截至 2021 年 12 月已完成檢視 8 萬 2,475 公尺，修繕 5,653 公尺。

依內政部營建署「公共污水下水道管渠維護管理要點」主、次幹管應每 20 年定期檢視一次，分支管應每 10 年定期檢視一次；臺北市已擬定主、次幹管、分管之首輪檢視計畫，採分期分年辦理，主、次幹管部份預計 2030 年可完成，分管部分則預計 2031 年完成；道路上的支管考量風險性低，將優先以管齡超過 10 年的支管為對象辦理。後續將再檢討提高檢視頻率之可行性，導入風險評估，及早發現及時治療之理念，達延長管線壽命之效益，更希望透過妥適的修繕將管線壽命延長至 75 年。

過去污水管修繕方式以傳統明挖為主，惟此類施工方式除需要開挖、回填外，更會因施工期間過長，導致諸多不便及增加危險性；因此，臺北市引進多項免開挖工法，在局部性範圍整建，係以膠膜內襯(貼片點補)及不銹鋼內襯工法較常應用；在區段整建方面以反轉內襯工法(CIPP)及旋轉內襯工法(SPR)較常應用。

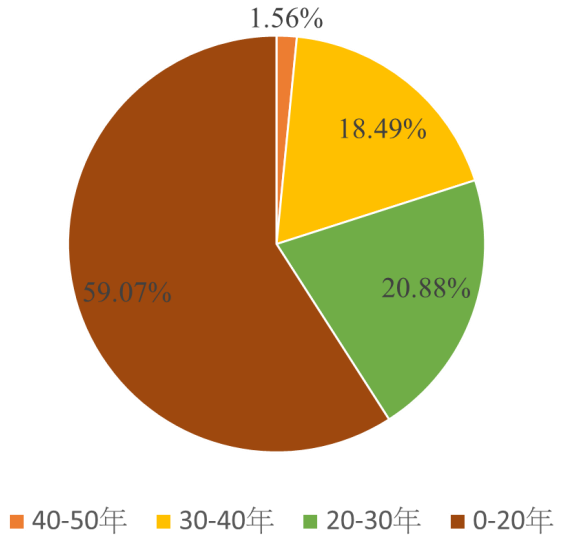



圖 8　污水下水道管齡分布圖

五、精進管理與 E 化

(一)建置防災應變系統

臺北市污水下水道系統除包含污水處理廠、污水抽水站、揚水站、污水管渠等主要設施外，尚有截流站、礫間處理等輔助設施，為能因應氣候變遷之劇烈天氣之情境，臺北市以結合主要設施與輔助設施，建置系統性之防災應變系統，於主次幹管安裝固定水位計、各廠站設施之閘門則安裝水位計與遠端啟閉裝置、各抽水機

組起抽遙控裝置等，再結合雨量觀測站、河川水位站組成物聯網系統，提供資訊數據自動傳送，提供管理建議。

同時為降低雨污混流對系統造成的衝擊，目前已採用 60 個移動式水位計監測分支管網，透過物聯網的數據收集分析找尋系統內水量異常點，進而改善雨污水混接情形；另為維持道路行的安全，逐年編列預算汰換舊行之人孔框蓋為耐揚壓框蓋，以避免框蓋拱起損壞路面或噴飛之情形。

(二)節能減碳

為達 2050 年淨零排放，降低污水下水道系統能耗，未來將著重於大型設備性能優化，如 30hp 以上抽水機、曝氣鼓風機、厭氧消化槽，降低其用電量與提升沼氣再生能源，並透過碳足跡盤查進行追蹤管制。除優化硬體設施外，同時也希望透過精進操作達到節能的效果。

(三)推廣再生水

臺北市近年用水因未有缺水問題，故於再生水之推廣一直是很大挑戰。臺北市政府決定採由公而私模式，由公部門帶頭做起，透過路程成本分析擬定短期(2022)執行計畫，納入臺北市政府所屬工程契約範本增訂「公共工程工地清洗、施工車輛清洗用水要求使用」，於內湖廠半徑 4 公里、迪化廠半徑 4.7 公里內，維護公園、綠地之澆灌、工地用水要求使用再生水；另計畫配合民生水資中心之新建，於其附近佈設 3 處智慧取水點，屆時市政用水替代率可望由現行的 4%提升至 29%。

(四)精實管理

臺北市於 2020 年推行污水管渠堵塞熱區改善精進專案，其成果已驗證可降低重複堵塞率達 87.2 %，績效卓著且獲得臺北市政府精進專案競賽 1 名之殊榮；透過該案例更可確認許多的公務流程與業務合作的檢討與精進，確實可對政府與民眾帶來雙贏效益，未來將持續檢討各業務精進需求並加入小 e 化，以最經濟模式達到有效管理之目標。

# 高雄打造 4 座再生水廠，穩定產業成長需求

蔡長展[1]


## 摘要

隨著全球氣候變遷加劇，旱澇越趨頻繁，傳統水源供應穩定性受到極大挑戰，高雄市積極配合中央水再生利用水源政策，在內政部營建署指導及支持下，推動再生水計畫以滿足產業用水增長需求。自民國 107 年 8 月鳳山再生水廠正式營運供水，迄今已再完成鳳山再生水廠二期及臨海再生水廠初期建置，總計每日產水 7.8 萬噸再生水供應臨海工業區廠商使用。另配合行政院「大南方、大發展─南臺灣發展計畫」，高雄市推動高科技 S 廊道於北高雄形成產業聚落，民國 110 年起超前佈署，積極著手推展橋頭及楠梓再生水計畫，預計民國 115 年於橋頭再生水廠每日產製 3 萬噸再生水，民國 117 年楠梓再生水廠將每日產製 7 萬噸再生水，供應楠梓產業園區與楠梓科技產業園區，未來高雄預計每日再生水供應產業使用將可達 21 萬噸再生水，提供穩定水源吸引廠商投資進駐，創造在地就業機會及地方經濟發展。

高雄市除領先全國，積極推動再生水廠建置計畫，將污水廠搭配再生水廠升級為「水資源中心」，亦思考再生水廠未來智能營管之精進作為，包含污水水源質與量的穩定供給、工程施工品質營管執行及供水調度彈性規劃等，以確保再生水廠能正常營運，穩定供水，遂將過往自規劃、設計、施工及營運等階段的推動經驗於文中與讀者分享，供全國各機關推動再生水計畫之借鏡及參考。


1.高雄市政府水利局 / 局長

## 壹、投資高雄 - 產業需水增長

依據經濟部民國 110 年 8 月「臺灣各區水資源經理基本計畫（核定本）」，高雄地區民國 108 年生活用水每日 93.83 萬噸，預估民國 125 年生活用水下修為每日 88.05 萬噸，雖然生活用水量下修，惟工業用水則呈現快速成長趨勢，由民國 108 年之 56.53 萬噸增至民國 125 年預估之 82.05 萬噸，因此，公共用水由民國 108 年 150.36 萬噸成長至民國 125 年 170.10 萬噸，用水需求詳表 1 所列。

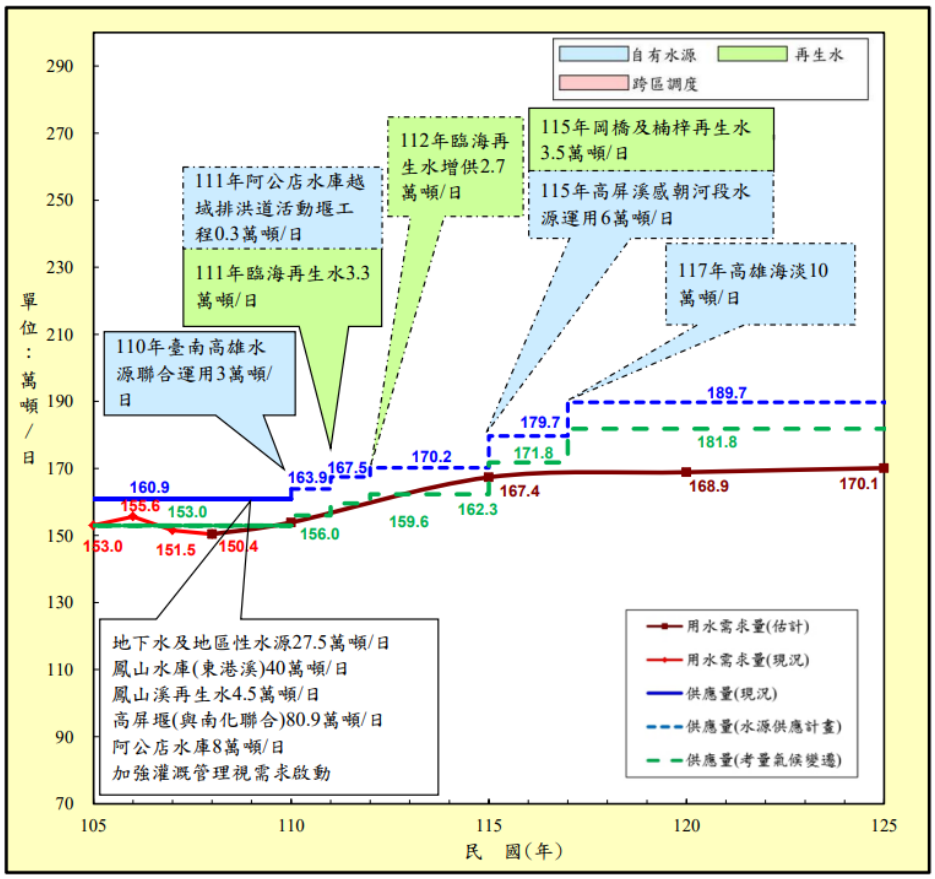
參考高雄地區給水供需圖（如圖 1），現況水源供應量每日為 160.9 萬立方公尺，無法滿足民國 125 年每日 170.1 萬立方公尺用水需求量，除持續積極進行相關水源開發策略外，近程採開發再生水以因應工業用水成長需求。由前述水源供應計畫可得知多元水資源開發儼然成為高雄市水資源供應策略積極推動的一環。

近期產業積極投資高雄，數個產業園區都在規劃中或將陸續開發，以致工業用水需求呈現突增式成長，如高雄煉油廠轉型後之楠梓產業園區（用水需求每日 11.8 萬噸）、橋頭科學園區（每日 4 萬噸）及楠梓科技產業第三園區（每日約 2 萬噸），其他還包括楠梓科技產業第一園區因擴廠增加用水量約每日 2 萬噸，新材料循環產業園區未來開發後每日約 2.2 萬噸之用水需求，合計高雄地區未來用水需求每日約 188.1 萬噸（如表 2），滿足產業用水需求是高雄市政府首要工作。

民國 110 年臺灣面臨 56 年來最嚴峻乾旱，全臺各地水情拉響警報，而高雄亦面臨嚴峻挑戰，因此在乾旱時期積極尋找水源解方，包含伏流水開發、緊急抗旱地

表 1 高雄用水需求推估情形

| 目標年 / 用水標 | 總需水量 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 108 年 | 115 年 | 120 年 | 125 年 |
| 生活用水(萬噸/日) | 93.83 | 90.02 | 88.62 | 88.05 |
| 工業用水(萬噸/日) | 56.53 | 77.38 | 80.28 | 82.05 |
| 合計 | 150.36 | 167.40 | 168.90 | 170.10 |




資料來源：臺灣各區水資源經理基本計畫（核定本），經濟部，110 年 8 月

圖 1　高雄地區給水供需圖

表 2　高雄地區產業園區新增用水需求

| 需求量 | | | 水量(CMD) | 備註 |
|---|---|---|---|---|
| 水資源經理基本計畫預估需求量 | | | 1,701,000 | 125 年 |
| 重大產業投資 | 楠梓科技產業 第一園區 | | 20,000 | 擴廠增加用水量 |
| | 新材料循環產業園區 | | 22,225 | 新創園區稱佳用水需求 |
| | 半導體先進製程 | 楠梓科技產業 園區 | 118,000 | |
| | | 楠梓科技產業 第三園區 | 20,000 | |
| 需求量小計 | | | 1,811,225 | |

下水井開鑿及再生水計畫加速推動等，預計至民國 117 年高雄地區每日備用水源將可再新增 44 萬噸（如圖 2），解決產業用水增長需求，亦可於乾旱時為產業提供穩定水源，增加城市對旱季供水韌性。

## 貳、超前佈署 - 4 座再生水廠

一、推動緣由

面對氣候變遷之衝擊，為有效紓緩水資源開發壓力，並確保民生用水權益與穩定產業發展，高雄市政府積極盤點轄內大用水量的工業區，其中高雄臨海工業區為綜合性工業區，廠商家數達 493 家，其中不乏高耗水產業，如基本金屬業、化材業、石油業...等，以中鋼為例，年耗水量約 3 千萬噸，相當於 1.2 萬座奧運標準泳池容量，一旦遭逢停限水將造成產業莫大損失，為穩定產業 / 民生需求，考量臨海工業區鄰近高雄臨海、鳳山等污水區，污水水源充足，同時具備大量潛在客戶，推動再生水事業儼然成形。

爰上，行政院於民國 102 年核定「公共污水處理廠放流水回收再利用示範推動方案」，高雄市積極配合中央再生水資源政策，促使鳳山溪污水廠放流水回收再利用成為全國第一座再生水示範廠，並於民國 105 年 8 月 22 日與民間機構藍鯨水科技股份有限公司完成簽約。

二、客製化的再生水廠

(一)全國首座鳳山再生水廠

「鳳山水資源中心」座落在高雄市鳳山區鳳山溪河畔，佔地面積約 10 公頃（如圖 3），民國 107 年完成第一期每日 2.5 萬噸再生水供應臨海工業區內之中鋼及中鋼鋁業等廠商製程使用，民國 108 年擴建至每日 4.5 萬噸再生水，有效


圖 2　高雄地區水源新增示意圖

圖 3　鳳山水資源中心空拍圖

增加水資源利用效率及降低缺水風險，提高整體供水可靠度。本廠各階段執行摘要如下：

1.　用水廠商媒合

本計畫簽約時，國內放流水回收再利用尚在起步階段，故成為國內首例以公共污水廠放流水回收再利用示範計畫，再生水資源發展條例亦屬起步階段，各項主、客觀條件均未成熟，加上臺灣自來水水價過低，媒合有意願使用再生水之用水人著實費了番心力，經過中央協助幾次的用水人媒合會議，並輔以向潛在用水人說明氣候變遷傳統水源供應不穩、可降低廠內再純化成本及再生水示範計畫其建設費均由政府負擔等誘因，最終中鋼及中鋼鋁業公司展現企業社會責任，並跳脫傳統用水成本思維以產業保命用水之觀點考量，而配合使用再生水，讓計畫得以順利推行。

2、處理程序研擬

再生水計畫推動採「以需訂供」原則，故規劃設計階段，不論再生水供水量及供水水質都以符合用水人需求為主，因本計畫用水人表達用水標的為冷卻用水，其再生水廠處理程序為將污水廠放流水經快濾池過濾後，再經過 UF 薄膜及 RO 逆滲透膜處理程序，其處理流程如圖 4 所示。

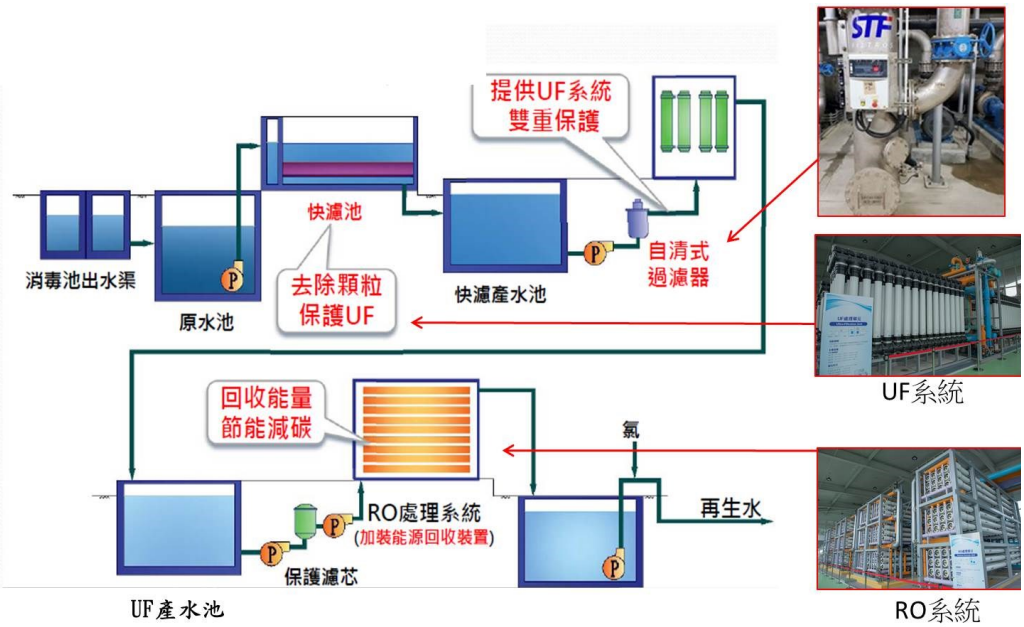



圖 4　鳳山水資源中心再生水廠處理流程

3、專管輸送規劃

臨海工業區與鳳山溪污水廠直線距離僅約 4.2 公里，本計畫於規劃之初即蒐集各管線單位提供的各路段既有管線圖資並辦理路線現勘，經過水利署、工業局、營建署及相關管線單位多次研商後，終於擇定輸水管線路徑，如圖 5 所示。輸水管線附掛水管橋過鳳山溪後，沿保生路佈設管線並右轉至鳳頂路，再沿鳳頂路佈管至中安路，之後經高鳳路、營口路及博學路至工業區分界點再接入臨海工業區用水人配水池。

(二)全國首座污水處理廠及再生水廠同時興建之臨海水資源中心

臨海水資源中心座落於臨海工業區聯合污水廠旁，佔地面積 6.32 公頃。鑑於以往再生水廠都是因產業有用水需求而增設於既有污水廠，其處理工法及空間配置都受到限制，也無法有效且完整的規劃，增加建設及營運成本，故臨海再生水廠有別於過往，採全面向思考規劃，以產製再生水為最終目的，成為全臺首座再生水廠與污水廠同時興建的再生水計畫（如圖 6），本計畫最終污水處理規模達每日

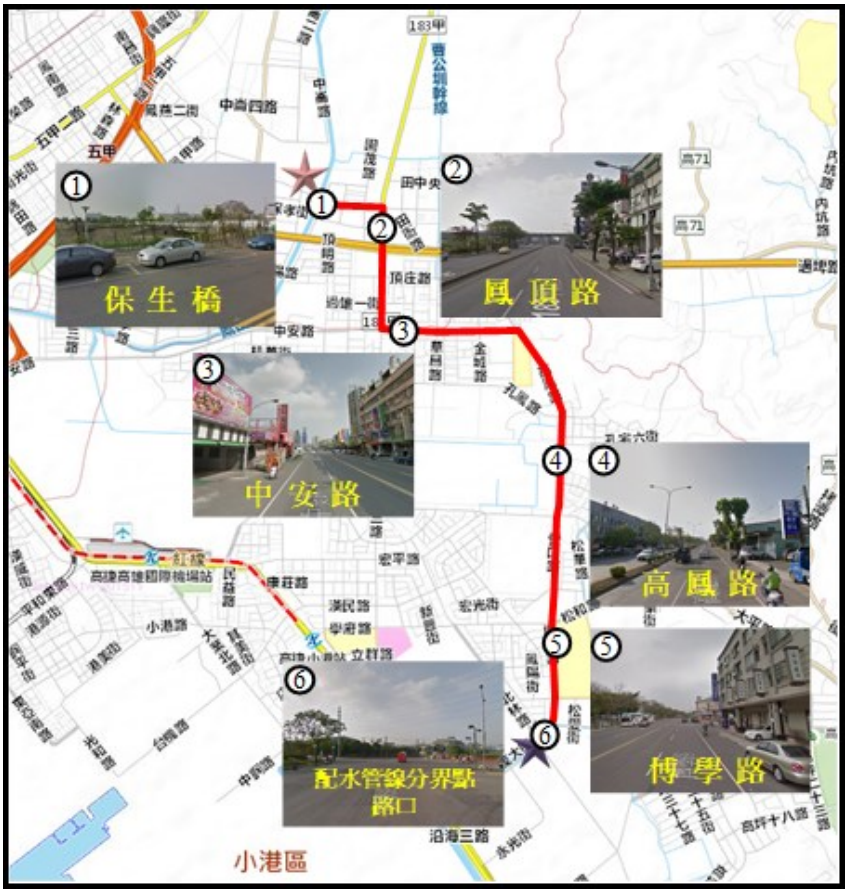



圖 5　鳳山水資源中心再生水輸水管線路徑圖

10 萬噸、再生水產量達每日 6 萬噸。與國內相似處理規模之污水廠比較，本計畫廠址土地面積相對較小，因此在處理設施之選擇上，優先選用占用體積小、處理效能高、節能之設備，處理流程較傳統方式處理量能可提升約 43%。

圖 6　臨海水資源中心空拍圖

1、滿足質量需求配置

本廠再生水就近供應臨海工業區使用，有鳳山水資源中心的媒合經驗，本廠用水需求調查及媒合作業則顯得順利，區內用水需求量由原規劃每日 1 萬噸增加至初期每日 3.3 萬噸，用水戶分別為中油、中石化、李長榮化學、李長榮科技及中鋼等（如圖 7）。考量再生水水質需求、廠址用地大小及操作便利性等因素，故臨海水資源中心處理程序採 AO-MBR 搭配逆滲透 RO 薄膜（如圖 8），以產製滿足用水人需求之再生水。

2、跨區取水補足水源

本廠因臨海集污區初期用戶接管率低，污水量無法滿足產製再生水需求，因此採跨區取高雄集污區每日 5.5 萬噸之民生污水，由高雄集污區凱旋主幹管截流，沿著瑞吉街、中山路與翠亨南路至 EC01 人孔併入臨海集污區污水下水道系統，再匯集至臨海水資源中心，途中穿越輕軌、前鎮河與捷運等設施，跨區取水管線長度


| 用水廠商 | 用水量(CMD) |
|---|---|
| 中鋼 | 20,000 |
| 中油大林廠 | 10,000 |
| 李長榮科技 | 800 |
| 李長榮化工 | 1,200 |
| 中石化 | 1,000 |
| 合計 | 33,000 |

圖 7　臨海水資源中心供水量及位置點


| | |
|---|---|
| 1 | 管理中心 |
| 2 | 污水高級測試中心 |
| 3 | 進流抽水站及前處理房 |
| 4 | 再生水機房 |
| 5 | 污泥處理機房 |
| 6 | 初沉池及生物池 |
| 7 | 放流口 |
| 8 | 地磅站 |
| 9 | 警衛室 |
| 10 | 擴建初沉池及生物池 |
| 11 | 滯洪池 |

圖 8　臨海水資源中心配置圖

總計 5,900 公尺，如圖 9 所示。

3、高難度之取水工程

跨區取水工程中，以凱旋主幹管 B23 人孔之破管工程為整個取水工程中最為關鍵且困難的部分，從設計至施工總耗時約 18 個月，為求安全謹慎，經多次會議討論、程式模擬、地面試鑽及施工設備安裝等前置準備工作，考量不影響凱旋主幹管污水系統運作，最終採滿管水下作業（如圖 10 及圖 11）進行主幹管洗孔（施工示意如圖 12），創全國首例於既有污水主幹管進行銑孔取水的工程。

為完成鑽掘作業，施工人員需於能見度極差的水中施工，因凱旋主幹管仍維持正常通水，滿管高流速污水不斷流經作業環境，其施工風險為高速水流帶動造成吸拉，且作業場所亦為局限空間，考量作業安全及兼顧工率掌握，採水面供氣潛水設備，具 CCTV、即時通話、燈光照明與潛水臍帶結合強化人員安全防護，在如此嚴峻且高危險工作環境下，每位工作人員每次工作時間僅約 2~3 小時，施工時間耗時約 50 天。

此外，取水工程途中穿越輕軌（如圖 13）、跨越前鎮河及鄰近捷運紅線，

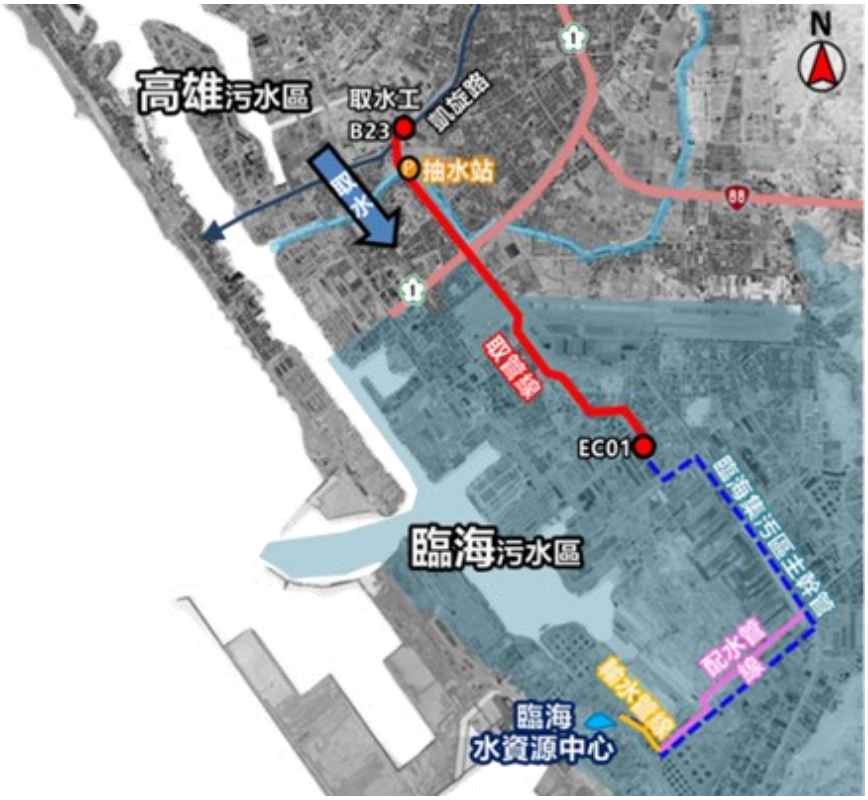



圖 9　臨海水資源中心跨區取水示意

圖 10　凱旋主幹管水下銑孔人員準備作業

圖 11　凱旋主幹管鑽掘取水水下作業

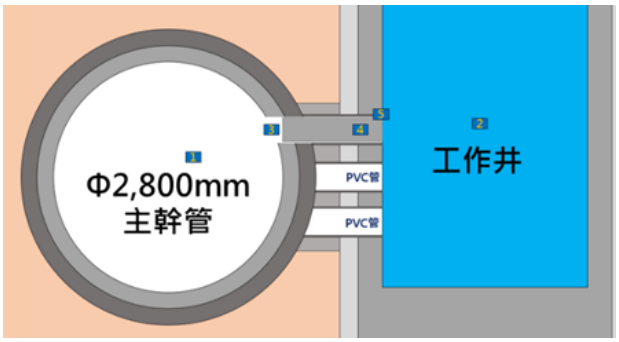



圖 12　凱旋主幹管取水設施施工示意圖

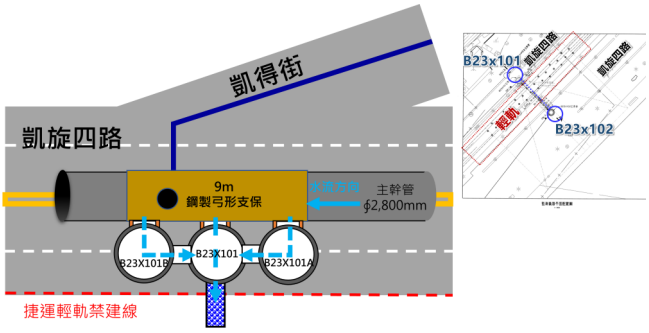



圖 13　凱旋主幹管取水穿越輕軌示意圖

施工前除依「高雄市大眾捷運系統兩側禁限建範圍」規定辦理安全影響評估外，施工期間乃依循安全評估作業施作並進行安全監測，避免因施工或營運影響大眾捷運設施。

4、輸水穿越複雜地下管線

臨海工業區內既有管線多且雜亂，錯綜複雜的地下管線中，新埋設輸水管線須有妥適之設計及施工，以避免工安事件發生，施工前於各路段先檢視既有管線分布情形並進行試挖作業，配合既有管線地下埋設之狀況採取合宜的施作工法，前期大量耗時的調查與詳盡規劃，因地制宜的施設，使得管線施工過程能順利進行並得以防止意外發生。

(三)高雄首座供應高科技園區再生水之橋頭再生水廠

本廠規劃座落於岡山橋頭污水廠北側用地，面積約 1.71 公頃（如圖 14）。配合行政院推動的「大南方、大發展─南臺灣發展計畫」，高雄市積極推動高科技 S 廊道於北高雄形成產業聚落，為符合楠梓產業園區用水需求，預計民國 115 年正式營運，日供 3.0 萬噸再生水予楠梓產業園區。


圖 14　岡橋污水廠及橋頭再生水廠範圍圖

1、量身訂做特殊處理

因用水戶為高科技產業，其用水標的為先進製程用水，水質管制標準要求高達 21 項，其中特別要求水質中之硼及尿素濃度（如圖 15），為此，處理程序規劃於廠內達到除硼目標，並於用水端園區內設置尿素高階處理設施，使再生水質符合用水人需求，再生水廠處理流程以 3 段 A/O+MBR+RO（2stage），污水廠及再生水廠配置如圖 16。


圖 15　橋頭再生水廠客製化供應再生水


圖 16　岡橋污水廠及橋頭再生水廠配置圖

2、全面污水收集補足水源

本廠以岡山橋頭污水廠放流水作為水源，然因污水廠初期因污水收集量不足，故規劃以截流晴天污水作為污水水源補注方案，將阿公店溪沿岸已設置 6 處截流站未納管之雨水箱涵透過晴天污水截流，導入既有下水道污水管網系統匯集至污水廠，補注污水廠污水量，此法除可滿足再生水廠產製水源需求，亦改善下游河川水質，減輕其涵容能力負擔，橋頭再生水廠取水方案如圖 17。

為因應產製每日 3 萬噸再生水及每日處理 5 萬噸污水量需求，遂將原訂第二至四期污水廠擴建提前至本計畫一併辦理，本計畫工程包含污水廠擴建至每日 5 萬噸處理設施、取水設施（含管線）、再生水廠與輸水管線；取水管線為 RCP


圖 17　橋頭再生水廠取水方案評估

管與 DIP 管，長度約為 2,270 公尺與繞流管 960 公尺；再生水輸水管線設置 HDPE 雙管，輸水距離約 8.7 公里，送至楠梓產業園區供應園區廠商用水。

(四)全國首座最大產水規模之楠梓再生水廠

為滿足北高雄科技產業用水需求，除推動每日供水 3 萬噸之橋頭再生水廠興建計畫外，亦規劃建置全國首座最大產水規模日產 7 萬噸之楠梓再生水廠，預計於民國 117 年正式上線營運，供水楠梓產業園區及楠梓科技產業園區，因用水人產業特性不同，故對產水水質要求亦不同，楠梓產業園區為 21 項水質管制標準，楠梓科技產業園區則比照臨海工業區供水水質以 8 項水質管制標準，因此，於規劃階段依用水人需求分別採不同處理程序進行再生水廠規劃。

楠梓再生水廠預計興建於高雄市楠梓區典寶溪南岸，即楠梓污水廠之擴建用地，用地面積約 3.5 公頃，以楠梓污水廠放流水作為水源，然因污水廠收集污水量不足以滿足產製再生水需求，另規劃其他擴增水源補注方案。再生水廠依據用水端水質需求，其處理流程規劃為快濾+UF+RO，經處理後供應用水端使用。

本工程包含取水設施（含管線）、再生水廠每日供水 7 萬噸與輸水管線，再生水輸水管線採 HDPE 專管埋設，為確保穩定供水楠梓產業園區以雙管規劃設置，輸送長度約 6,550 公尺；另供應楠梓科技產業園區之輸水管線則採單管設置，輸送長度約 5,800 公尺。預計民國 113 至 116 年辦理再生水廠、輸水管線與取水設施（含管線）興建工程，配合用水人用水期程，民國 116 年每日供水 4 萬噸，至民國 117 年全期每日供水 7 萬噸。

## 參、智能營管－監控污水與再生水

一、進流污水水質監管

民國 108 年鳳山水資源中心陸續遭遇多次下水道異常水質污染事件（如圖 18），主要以民國 108 年 7 月發生有機溶劑入流事件、108 年 12 月異常油污流

入事件、109 年 11 月有機溶劑入流事件，以及 110 年 2 月異常油污流入等事件，嚴重影響原污水廠系統處理效能，一度連續 2 年再生水供水量降至 80%（如圖 19）。由於鳳山水資源中心早期規劃並未設置相關油污污染相應偵測設備，部分專用污水下水道流經民間工廠與夜市等高污染區段時，可能無法避免不肖業者排入有機溶劑、廢油與高濃度有機物之情形。影響再生水穩定供水的主要風險為異常污染物質流入污水下水道系統而進入污水廠處理系統。

為杜絕不肖業者任意開啟污水下水道人孔偷倒廢油污，並即時掌握污水下水道水質變化狀況，以利異常水質發生時可立即因應處置，除於民國 108 年 9 月 17 日邀集召開「公共污水廠有機溶劑及廢油污染事件跨局處聯合稽查機制研商會議」，建立橫向聯繫機制，建構聯合稽查平臺，遇污水下水道有發現油污事件時，即時橫向通報環保與警政單位配合稽查。

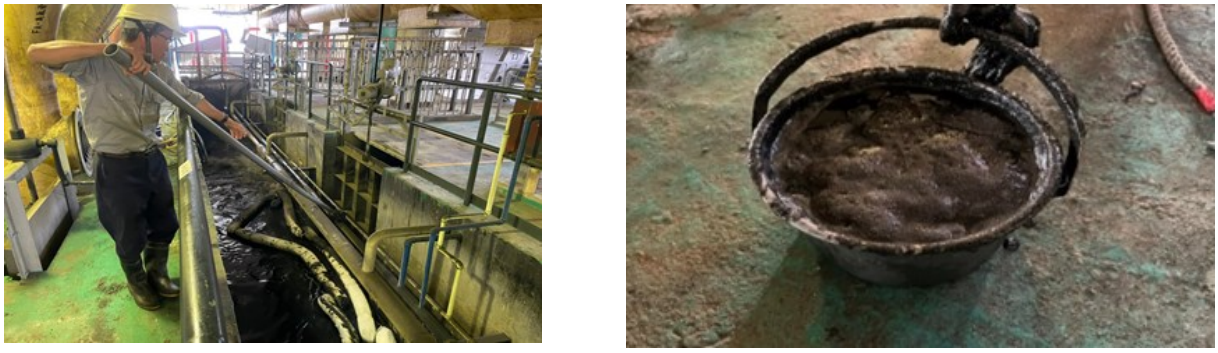


圖 18　細攔污柵共同渠道大量油污累積

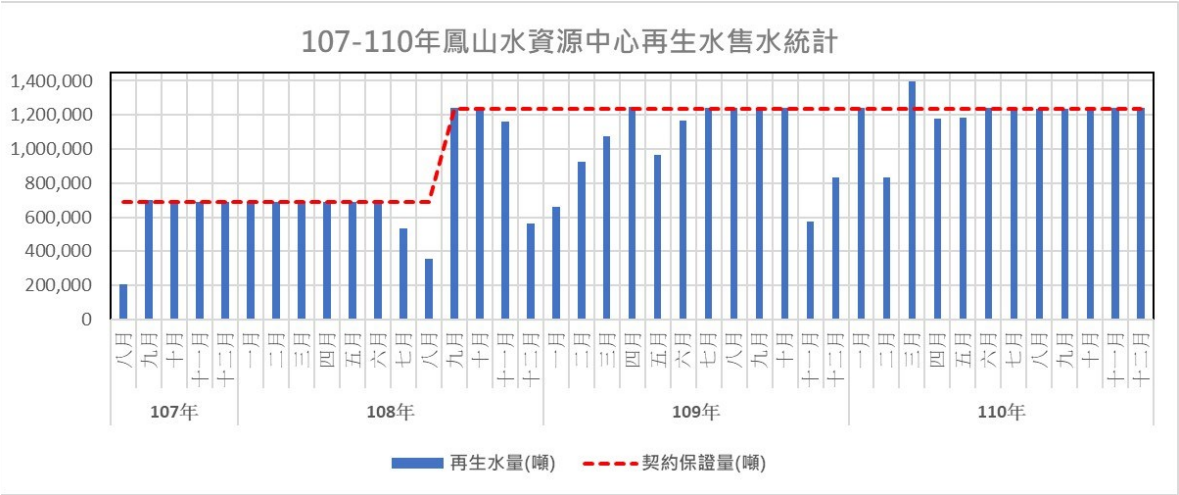



圖 19　鳳山水資源中心再生水售水量統計

民國 108 年 12 月份異常油污流入事件發生後，該橫向機制適時發揮功能，水利局就異常污染發生點位、熱區提供環保局與警察局，由環保局追查可疑不肖業者，再由檢調單位調閱重點監視系統並建立資料追蹤，在各局處充分聯繫合作下，最終將不肖業者依法究辦，民國 110 年市政府也在營建署補助下，積極完成上游污水下水道水質遠端智慧監測預警系統硬體設施建置（如圖 20 及圖 21），廠外透過人孔封堵、智慧監控、預警；廠內則透過緊急應變、彈性操作、設備優化等方式，以物聯網架構及雲端大數據 BIG DATA，透過 API 程式進行現場監測設備資料介接回傳，並開發 Web GIS 網頁，作為監測資料回傳至圖控平臺螢幕警示，並加強管線稽查巡檢，以固定巡檢人孔、查核用戶納管水質。

本監測預警系統完成後，能即時掌握污水下水道系統水質水量資訊，以及各截流設施操作狀況，即時迅速因應下水道系統各種突發污染情事之主要功能，提升異常水質事件早期預警能力及啟動相關緊急應變措施。

二、進流污水水源調控

考量臨海水資源中心營運初期時，臨海集污區用戶接管率尚低，污水量不

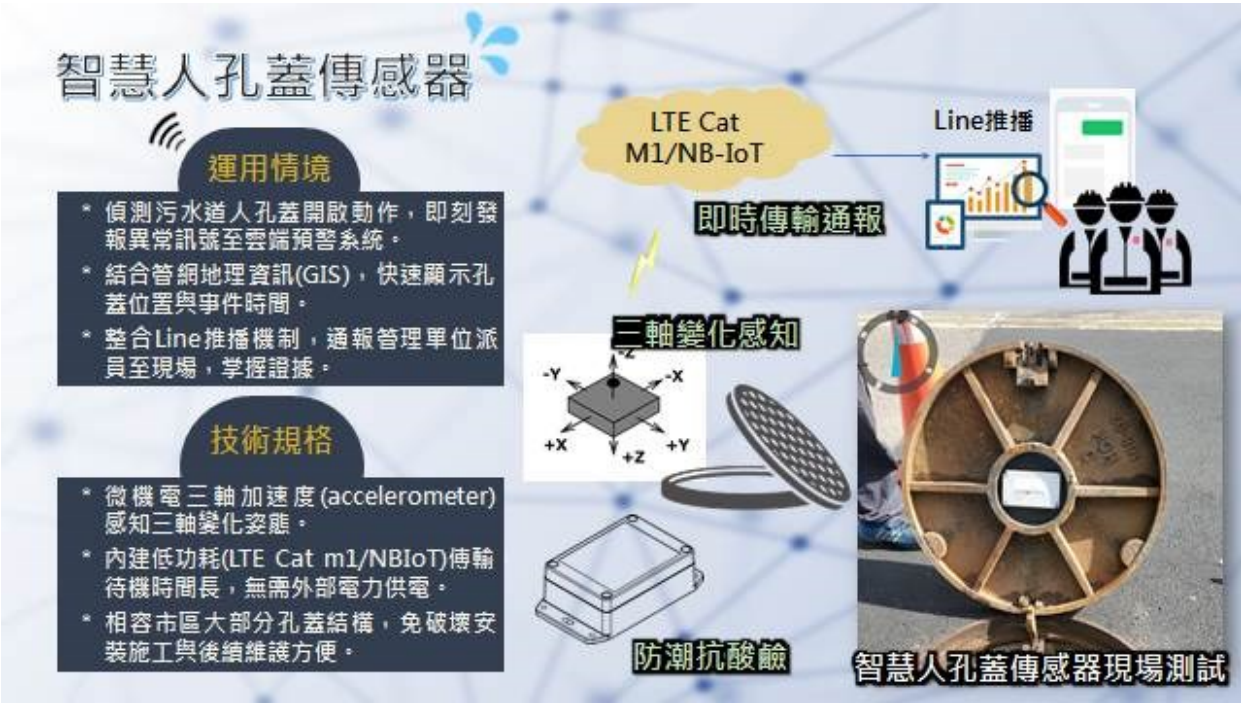



圖 20　智慧人孔蓋

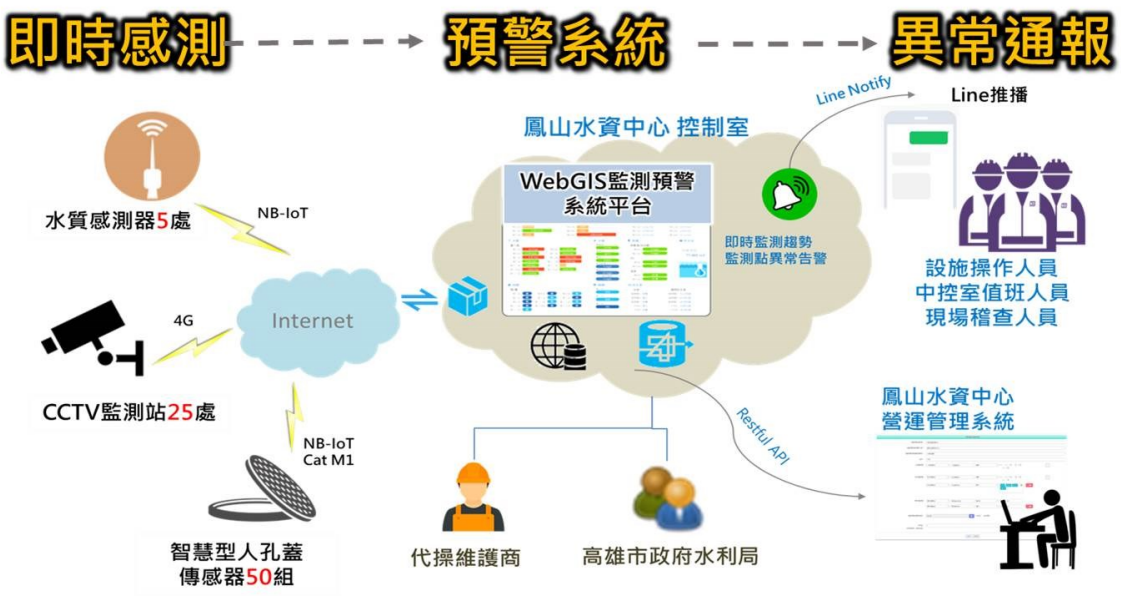



圖 21　Web GIS 監測預警系統平臺

足情形，全部污水源均由設置於 75 期重劃綠地之取水抽水站送水供應，未來若臨海集污區用戶接管率逐步提昇後，則取水抽水站與污水廠進流抽水站將依實際水量互相搭配作動，以調節臨海集污區污水量變化，為能精確穩定供應產製再生水所需污水量，除於取水抽水站及進流抽水站設置流量控制器外，未來亦規劃於臨海集污區各集污分區及截流站設置流量計（如圖 22），以確實監控污水廠進流抽水站流量，若污水需求量有不足或超過部分，則透過臨海水資源中心中控室資訊回饋（如圖 23~圖 24），再由 PLC 計算控制取水抽水站應泵送之流量。

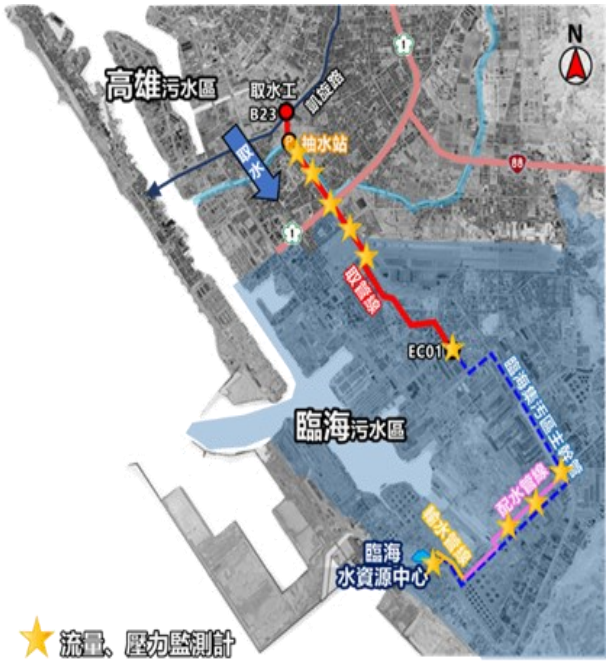



圖 22　臨海污水水源流量壓力計裝設位置

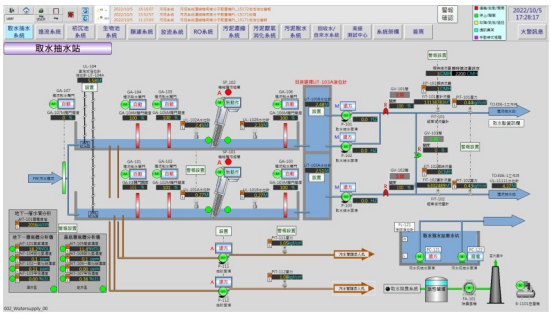



圖 23　中控室內取水抽水站監控畫面


圖 24　中控室內取水管線監控畫面

三、再生水輸送安全監控

為確保再生水供應穩定安全，於再生水輸送管線都配置有線上水質(online)監測設備及壓力監測設備，並於用水人接水點前安裝流量計，各監測點之所有監測訊號都透過數據專線傳送至水資源中心中控室（如圖 25）進行即時監控。另外，於接水點前端設置緊急關閉閥，可於現場採手動操作或遠端控制，若監控發現所輸送之再生水水質不符合需求時，則可即時操作緊急關閉閥，確保再生水供應安全。

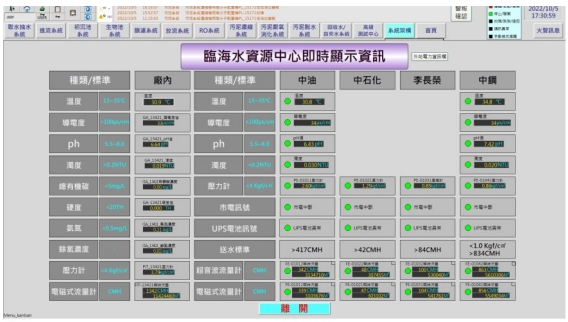



圖 25　中控室內輸水管線安全監控畫面

四、工程施作品質確保

臨海水資源中心於設計時即導入建築資訊模型(Building Information Modeling，BIM)（如圖 26），可於工程施工前預先檢核各類構件在空間中是否衝突或干涉，改善工程全週期作業流程。施工階段考量平面圖紙於現場施工常不易聚焦討論，影響工程推展，且施工督管上亦不容易覺察工程錯誤，因此本計畫履約管理顧問特別開發利用 BIM 模型成果結合擴增實境技術(Augmented Reality，AR) 進行工程進度比對、品質控管和工序規劃等工作（如圖 27），使施工團隊可透過手

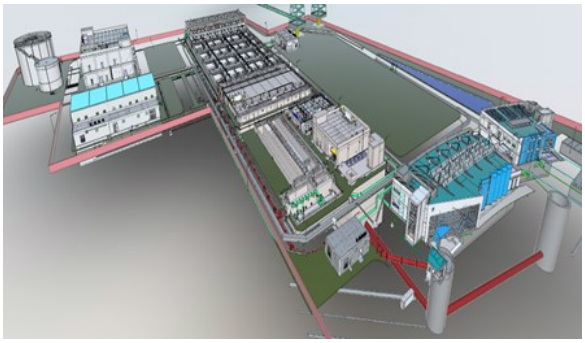


圖 26　臨海再生水廠 AR 輔助工程應用

圖 27　臨海再生水廠 AR 輔助工程應用

機或平板等行動裝置隨時隨地皆可更為便利的查看建築、結構、管線與機電設施於施工現場的確切位置、施工順序或其他模型資訊，確保現場的討論與品質查核更便利有效。此系統於 2021 年榮獲 Autodesk「BIM 數位應用創新獎」之「施工延伸應用」及「平臺開發應用」佳作，更獲得票選為「最佳人氣獎」（如圖 28）。


圖 28　榮獲 Autodesk BIM 數位應用創新獎

五、供水管網彈性調供

高雄市積極建設再生水廠，除南高雄已有鳳山、臨海兩座再生水廠營運中，北高雄亦規劃有橋頭及楠梓兩座再生水廠，目前再生水廠之輸水管線皆以專管輸送至用水人處，尚未建構再生水管網系統，若再生水廠輸水管線有受損無法正常輸送時，將導致再生水廠被迫停止供水，降低再生水廠的供水穩定性。

爰此，除推動再生水廠建設外，亦著手思考將原先所建設之再生水廠與其他系統的供水連結，使各水廠間再生水可相互支援至用水人處增加供水調度彈性，如鳳山溪與臨海再生水廠的供水對象都是臨海工業區，兩水廠供水系統連結後，即可確保產業的用水可靠度。

## 肆、永續經營 - 再生水事業

一、打造再生水事業國家隊

新興國家經濟成長，用水需求量提升，水資源有限與氣候變遷造成穩定供水需求成長，應及早佈局高成長新興市場（廢污水回收再利用、海水淡化）。高雄市政府將利用過往執行再生水計畫經驗整合國內自設計、施工、營運操作及設備材料零件等團隊廠商，透過產業聯盟結合起來(如圖 29)，提供國際級 total solu-

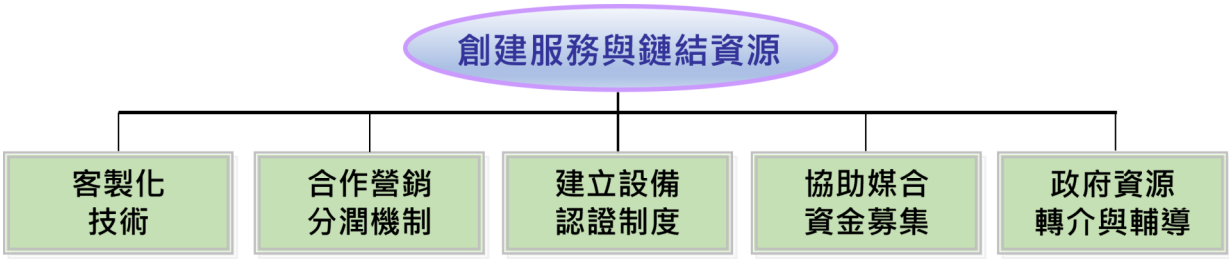



圖 29　產業聯盟整合架構

tion，配合國家新南向政策，作為再生水事業領頭羊，打造科技用水平臺，帶動國內相關產業技術輸出至東協及南亞等新興市場。

二、材料國產化

為扶植國內再生水產業，高雄市政府於臨海水資源中心規劃建置污水高級測試中心，提供國內再生水相關廠商進行再生設備測試平臺，讓臺灣再生水相關設備材料透過測試平臺認證，厚植創新服務能力，強化市場開拓力。

三、基金公司化

為建立再生水營運網絡系統穩定健全之發展，最終應朝向設置建設與營運基金，以高雄市政府為主管機關，基金得以專款專用，且資金運用靈活，預算執行較具彈性，同時獨立財務個體，便於衡量建設、營運成本與效益及釐清機關經營績效及責任，最後，更負有自籌財源責任，以利激勵創造收入，抑減支出等功能。

再生水屬永續經營事業體，政府端結合現有公共污水處理廠產製再生水，並採用受益者或使用者付費精神，可減少社會觀感不佳及抗拒等情形，具備價值創造、環境保護等效益，同時政府提供再生水材料開發利用平臺，亦讓企業展現社會責任穩步邁向永續發展願景，創造雙贏局面。

# [第 1 期]期刊勘誤公告

《下水道．水再生期刊》第 1 期出現多個錯誤，編輯部深感愧疚，在此向作者及所有讀者致歉。

第 63 頁「我國公共污水處理廠再生水之推動與展望」文中，「圖 4　臨海再生水廠及 RO 設施」，因疏忽誤植為「圖 4　臨海再生水廠及凱旋路污水幹管分水工程示意圖 」。

第 71 頁「因應氣候變遷-下水道產業因應之道」作者應為「游源順　總工程司」，編輯部因疏忽誤植為「游順源　總工程司」，在此致上萬分歉意。

# 下水道·水再生期刊稿約

**壹、誠徵稿件**

一、本期刊為內政部營建署針對下水道領域所發行之期刊，每年三、七、十一月下旬出版，誠徵稿件。

二、歡迎下水道從事人員以及設計、產銷有關下水道工程之器材業者提供相關文稿，如創見或新研究成果；國外新知或工程報導；下水道工作現場發表感想；國內有關下水道發展之研究計畫；國內、外與下水道相關之新書介紹等。

三、惠稿每篇以伍千至壹萬字為宜，特約文稿及專門論著不在此限，本期刊對於文稿之文字有刪改權，如不願刪改者，請於來稿上註明；無法出刊之稿件將儘速通知。

四、惠稿（含圖表及著作權讓渡同意書，並請提供一張圖片作為封面圖片）請用電子檔寄至 twea900606@gmail.com，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。

五、本刊原則上不刊載譯文或已發表之論文。

**貳、稿件格式**

一、版面設定：頁面紙張請以 A4 規格 21cm * 29.7cm 直式編排；本文版面規格:版面上下左右邊界各為 1.27 cm ；內文段落採單行間距，並設定左右對齊。除摘要，其餘皆以兩欄型式呈現。內文首行需位移 2 字元。

二、字型設定：字體中、英文請採微軟正黑體字型。字體大小：頁首頁尾及頁碼採 12 號字，標題採 18 號粗體字（置中）作者姓名、任職單位及職稱採 12 號字（置右），”摘要”標題採 14 號粗體字（置中），各章節標題採 14 號粗體字（置左），內文採 12 號字，圖表標題採 11 號字 。

三、文章篇幅：每篇文章以 10 頁為限（含所有內容及圖表）

四、文章架構：

- ◆ 標題：宜簡明
- ◆ 作者姓名、任職單位及職稱：請以置右方式依序條列
- ◆ 摘要（300 字為限）

◆ 本文（章節之編序以：壹、一、1、(1)、... 為原則）

◆ 參考文獻

五、圖表配置：本文中之圖表請隨文插入（與文字排列），圖表之編號一律以 1,2,...等阿拉伯數字表示，圖標題請以置中方式標註於圖下方；表標題以置中方式標註於表正上方。

六、數據規範：內文中之數字請以阿拉伯數字呈現，並採用半型，可量化數字超過 3 位數請以逗號區隔，如 1,234 ；年份請以西元紀年；文中所使用數據單位請以公制單位，如： min、℃、mg/L 等，數字及單位之間請空半形 1 格。

七、參考文獻格式

期刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月。

書籍：作者，篇名，出版，頁數，年月。

機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，編號，年月。英文之作者姓名應將姓排在名之縮寫之前。

【參考文獻 格式範例】

1.歐陽嶠暉，下水道工程學，長松出版社，增訂版，第 45-56 頁，臺北(1992)。

2.黃國文、李方中、於望聖、陳志偉、顏慧敏、施上粟、林旺德、林佳薇 (2017)，公共污水下水道維護管理訪評計畫之研訂與推動，農業工程學報， 63(2)，第 1-10 頁。

3.陳余育、劉振宇、鍾淑女、李金靖、陳怡寧、游勝傑， “臺灣地區性水資源回收中心新冠肺炎病毒檢測初探” ，中華民國環境工程學會 2021【廢水處理技術研討會】研討會，110 年 8 月 19 日，第 132 頁(2021)。

八、文章內文格式範例（請洽本期刊編輯組）

**參、本期刊內容將刊載於內政部營建署下水道資訊入口網（https://sewergis.cpami.gov.tw）歡迎各界參閱。**

# 著作權讓渡同意書

本人_____保證除本次投稿至「下水道‧水再生」期刊之文章_____，相同內容未投至國內外其他有版權之期刊或有抄襲之情事，若有涉及著作權之侵權或其他不法行為，本人願負相關之法律責任。

本人代表所有作者同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，讓渡給內政部營建署，有重新製作並將本篇文章置於所屬網站及刊物等刊載供外界查詢之權利，但需註明本文章作者。作者保留引用文章在自己著作之權利。

**此　致**

**內政部營建署**

**立 書 人 ：　　（親筆簽名）**

**通 訊 處 ：**

**身分證字號：**

**聯 話 電 話 ：**

（親簽後掃描為電子檔與文稿一併寄送至編輯組）

**中　華　民　國　　年　　月　　日**

中華民國　一百一十一年十一月出刊　　第 1 卷第 2 期

中華民國　一百一十一年七月創刊

**發　行　人**：吳欣修

**指導委員**：宋德仁、於望聖、林志峯、范世億、陳志偉、劉振宇、蔡長展、韓榮華（依姓氏筆畫順序）

**編輯委員**：王朝民、朱錫麟、阮春騰、邱敏錦、周黎明、林舜宏、侯嘉洪、洪俊雄、胡念英、康世芳、張添晉、莊順興、陳立儒、黃成龍、黃良銘、黃靖修、楊仁彰、廖宗銘、鍾志成、蘇玫心（依姓氏筆畫順序）

**總　編　輯**：曾淑娟

**副總編輯**：周世銘、鄭惠君

**執行編輯**：游勝傑

**出版單位**：內政部營建署

地址：臺北市松山區八德路 2 段 342 號

電話：(02)8771-2345

網址： https://www.cpami.gov.tw/

**執行單位**：社團法人台灣水環境再生協會

地址：臺北市松山區復興南路一段 1 號 1204 室

電話：(02)2777-2675

網址： https://www.twea.org.tw/contact.html

GPN:2011100010　ISSN:27913805