

主編的話



● 從韌性治理到淨零轉型——重新定義下一世代水環境基礎建設

回顧過去數十年臺灣下水道建設的發展歷程，從早期著重雨污水分流處理，到近年積極推動提升水資源中心為能資源再生設施，下水道系統已逐漸成為支撐城市發展的重要公共基礎設施。然而，當我們邁入二十一世紀第三個十年之際，全球所面臨的挑戰已與過去截然不同。

極端氣候事件日益頻繁，能源價格波動加劇，水資源供應不確定性升高，淨零排放目標逐步成為各國發展共識，人工智慧與數位科技則持續改變產業運作模式。在此背景下，下水道系統所肩負的使命，也已從單純的控制與防治，逐步擴展至氣候調適、能源轉型、資源循環與永續治理等多元面向。

面對這些前所未有的挑戰，我們必須重新思考一個根本問題：未來的下水道系統，究竟應該具備什麼樣的能力，才能持續支撐城市與社會的永續發展？

本期刊「韌性」一詞近年已廣泛應用於工程、管理、經濟與公共政策領域，但對於下水道產業而言，韌性絕非單純代表結構強度或設備耐久性，而是一種涵蓋組織、工程、設施、能源及治理體系的整體能力。

一套真正具備韌性的下水道及其最終處理系統，必須能夠在暴雨、地震、停電、設備故障、能源短缺甚至組織人力流失等多重風險下，維持基本功能、快速恢復運作，並持續進化與調整。

傳統工程管理長期以來強調品質、進度與成本控制，但在極端氣候逐漸常態化的今天，工程管理已不能只追求「如期完工」，更必須思考如何降低施工風險、提升災害應變能力以及縮短復原時間。

近年來 AI、AIoT、大數據分析及智慧監控技術快速發展，讓管理逐漸由經驗導向轉向數據導向。透過即時監測、預警系統及數位決策工具，營運團隊得以在災害發生前預先掌握



主編的話



風險，並透過備援設施與標準化應變程序降低衝擊。

這樣的轉變，象徵工程產業正從「事後修復」走向「事前預防」，也代表韌性管理思維已逐步融入工程生命週期之中。

在全球淨零排放浪潮下，污水處理未來不只是環境保護設施，更將成為能源系統與資源循環系統的重要組成部分。未來的水資源回收中心，除了生產再生水之外，也可能生產綠電、生質天然氣(Bio Gas)、氫能原料、肥料產品甚至碳權價值。這些新價值的創造，將使污水下水道產業從傳統公共服務部門，逐步成為支撐綠色經濟發展的重要力量。

在《焦點觀測站》專欄中，三篇文章分別從都是能資源韌性分析、污水廠韌性設計、營運韌性，看似不同的研究主題，其實都指向同一個方向－建立一個更具韌性、更具智慧、更具永續性的下水道建設與治理體系。

面向未來，我們相信污水下水道建設的成功標準，將不再只是接管率或處理率的提升，而是整個系統是否具備面對不確定環境的調適能力；是否能夠創造更多資源循環價值；是否能夠在維護公共利益的同时，促進環境、經濟與社會三者的永續平衡。

當氣候變遷已成為全球共同課題，當淨零轉型已成為國家發展方向，當循環經濟逐漸成為產業競爭力的重要來源，污水下水道系統所承載的意義，也將遠超過傳統工程設施本身。它將是城市韌性的基石，是循環經濟的樞紐，是淨零轉型的重要夥伴，更是未來永續城市不可或缺的核心基礎建設。

期盼本期內容能夠提供產官學各界更多啟發，共同思考臺灣水環境治理的下一步，也共同為打造更具韌性、更具智慧、更具永續價值的未來城市而努力。

除了韌性設計與施工管理之外，本期亦收錄多篇聚焦於水資源循環利用、能源轉型及智慧治理之研究成果，展現當代水環境產業正由傳統污染防治逐步邁向資源循環與智慧管理的新發展方向。



主編的話



在《水再生鍊金術》專欄中，三篇文章分別從生物處理技術在高科技產業水資源管理上的實際成果，以及從生質能與微水力發電角度探討污水處理設施的能源價值。

移動床生物膜反應器(MBBR)應用於微電子製造廠污水回用及零排放案例，呈現先進生物處理技術在高科技產業水資源管理上的實際成果。隨著全球缺水風險日益增加，以及半導體、電子與新能源產業用水需求持續攀升，如何透過高效率且低能耗的生物處理系統提升廢水回收率，已成為企業永續經營的重要課題。移動床生物膜反應器(MBBR)案例不僅驗證 MBBR 技術於高回收率水處理系統之可行性，更顯示未來工業用水管理將從單純污染防治轉向水資源循環利用的新模式。

操作條件對厭氧共消化沼氣發電效能之影響研究顯示，透過不同有機基質之共消化設計，可大幅提升甲烷生成效率與能源回收效益，使污水處理設施從能源消費者逐漸轉變為能源生產者。

而公共污水處理廠發展微水力發電潛力研究，則進一步證明污水處理過程中的水力位能同樣具有再利用價值。當污泥、有機廢棄物、再生水及放流水所蘊含的資源逐步被重新認識，污水處理廠的定位也正在改變，從過去的終端處理設施，轉型為結合能源、資源與環境服務功能的循環經濟平台。

另在《智慧解碼》專欄中，厭氧活性污泥膜濾法(AnMBR)具 COD、BOD 高效去除率以及低能耗、污泥產量少、具甲烷產氣潛勢等優勢，屬於新型膜分離與能資源韌性處理技術。

臺北市府衛生下水道工程處建構整合式 GIS 視覺化決策平台之案例，則展現智慧治理已逐步成為未來水務管理的重要核心。當下水道系統規模持續擴大、設施逐漸老化及維運資訊日益龐雜時，傳統依賴紙本紀錄與人工經驗判斷的管理模式已難以滿足現代治理需求。透過 GIS 空間資訊、行動巡檢系統、雲端平台及決策分析工具的整合，不僅提升資料透明度與管理效率，更為未來數位孿生(Digital Twin)與 AI 智慧決策奠定基礎。這也意味著未來水務管



主編的話



理將由「經驗管理」邁向「數據治理」，由「被動維護」邁向「預測管理」的新階段

綜觀本期內容，從污水廠能源韌性、韌性設計，到生物處理技術所轉化之工業處理水回用、能資源韌性以及智慧水務治理，完整呈現水環境產業未來發展趨勢如下：

- ◇ 建立面對極端氣候的韌性能力
- ◇ 推動污水處理設施資源化與能源化
- ◇ 加速數位轉型與智慧管理
- ◇ 實踐淨零碳排與循環經濟目標

這些趨勢彼此並非獨立存在，而是共同構築未來智慧水資源回收中心的發展藍圖。未來的污水處理廠不僅要能處理污水，更要能生產再生水、創造綠色能源、提供環境教育價值、支援城市韌性發展，並透過智慧化系統提升治理效率與決策品質。這正是全球水環境產業邁向永續發展的重要方向，也是臺灣水務產業迎向下一個世代的重要契機。

惠民實業股份有限公司 楊仁彰總經理 敬誌



目錄



第五卷第二期
韌性提升之工程與管理技術

 焦點觀測站	提升都市能資源韌性實務分析-以日本福岡與佐賀公共污水處理廠為例	p.01 曾淑娟
	因應氣候變遷衝擊下的污水處理廠韌性設計	p.15 胡慶祥
	提升污水處理廠營運韌性之實務策略-以斗六廠及虎高廠為例	p.27 劉嘉豐
	國內公共污水處理廠發展微水力發電之潛力-以中區污水處理廠為例	p.39 蔡易勳
 水再生煉金術	應用移動床生物膜反應器(MBBR)提升微電子製造廠用水韌性之污水回用與零排放案例探討-以印度清奈工業園區為例	p.53 李 寧
	操作條件對厭氧共消化沼氣發電效能之影響-文獻整合與龜山水資源回收中心案例驗證	p.67 蕭振宗
	應用厭氧活性污泥膜濾法處理低濃度污水以提升都市能源供應韌性	p.81 陳福幸緣
 智慧解碼	建構整合式 GIS 視覺化決策平台以提升污水下水道治理效能	p.97 黃 群



目錄



第五卷第二期
韌性提升之工程與管理技術



下水道相關活動列車

p.115



提升都市能資源韌性實務分析－ 以日本福岡與佐賀公共污水處理廠為例



摘要

本 研究以日本福岡市與佐賀市為案例，分析下水污泥能資源化之實務模式，作為我國污泥管理與淨零轉型之參考。整理日本在生質能利用推進基本計畫、下水道B-DASH計畫及 2050碳中和願景下，如何由末端處理轉向污泥能源化與農業化再利用，並透過區域分工配置能源化中心與農業循環據點。福岡市於西部水處理中心導入污泥造粒乾燥燃料化技術，利用消化沼氣及餘熱生產固體燃料供水泥窯替代部分煤炭，年處理約半數下水污泥並減少超過 10,000噸二氧化碳排放；中部水處理中心則以沼氣發電與餘熱回收提高系統能源自給率，並進一步發展沼氣製氫等高值化利用。佐賀市採YM菌超高溫好氧堆肥技術將污泥全量處理，年產堆肥約1,400至1,600噸，處理成本較焚燒降低，並回收約五成的氮與八成的磷；同時結合再生水農業灌溉及季節性調控出水營養鹽支援有明海海苔養殖，形成農業導向的在地循環模式。綜合分析顯示，依區域產業結構選擇差異化資源化路徑、導入公私協力與長期去化機制，以及以示範場域累積技術與成本資料，為推動下水污泥能資源化及循環經濟之關鍵方向。



關鍵字：

-  下水污泥能資源化
-  沼氣能源利用
-  好氧堆肥
-  氮磷回收
-  循環經濟



作者



曾淑娟¹，內政部國土管理署下水道建設組 / 組長



鄭惠君²，內政部國土管理署下水道建設組 / 科長



馬緻宇³，名古屋大學 / 特任助理教授



羅聖翔⁴，內政部國土管理署下水道建設組 / 幫工程司



吳柏璋⁵，國立臺灣大學環境工程學研究所 / 博士後研究員

Abstract

This study examines sewage sludge resource recovery practices in Fukuoka and Saga cities, Japan, as references for sludge management and net-zero transition in Taiwan. Drawing on Japan's Basic Plan for Promoting Biomass Utilization, the B-DASH Project, and the 2050 carbon neutrality vision, it traces Japan's policy shift from end-of-pipe disposal toward energy recovery and agricultural reuse through regionally coordinated facilities. In Fukuoka city, the Western Water Treatment Center produces solid fuel via sludge pelletizing and thermal drying, utilizing digestion biogas and waste heat to partially substitute coal in cement kilns, processing roughly half of the city's municipal sludge and reducing CO₂ emissions by over 10,000 tonnes annually. The Central Water Treatment Center focuses on biogas power generation and waste heat recovery to improve energy self-sufficiency, with further development toward biogas-to-hydrogen conversion. In Saga city, YM bacterial ultra-high-temperature aerobic composting processes the city's entire sludge output, yielding 1,400 – 1,600 tonnes of compost per year at lower cost than incineration, while recovering approximately 50% of nitrogen and 80% of phosphorus. The city also manages seasonal effluent nutrient levels to support nori aquaculture in the Ariake Sea, forming an agriculture-oriented local circular model. These cases highlight three key directions for advancing sludge resource recovery: tailoring pathways to regional industrial characteristics, establishing public-private partnerships with long-term offtake arrangements, and leveraging pilot sites to build technical and cost evidence.



Keywords:

-  Sewage sludge resource recovery
-  Biogas energy utilization
-  Aerobic composting
-  Nutrient recovery
-  Circular economy

壹、前言

近年來，永續發展與循環經濟理念日益受到重視，傳統被視為廢棄物的下水污泥也開始被重新定位為可再利用的資源。相較於以往將大量污泥掩埋或焚化處置，現今各國積極嘗試將污泥轉化為燃料與肥料等有價產品，以減輕廢棄物處置壓力，並回收其中所含的能源與養分，促進資源循環利用與環境永續。日本近年來亦推動多元的污泥資源化實務措施，其中福岡市與佐賀市更成為典型案例：福岡市將污泥中產生的沼氣用於能源供應，而佐賀市則運用乾燥污泥製成有機肥料，成功將污水處理與農業生產相結合。這些實踐不僅展現了污泥資源化在實際操作中的可行性，也突顯出由廢棄物邁向資源化所產生的社會、環境與經濟效益。本文即以日本福岡與佐賀之燃料與肥料產出為例，從實務操作角度分析下水污泥資源化的現況與成效，說明此類永續資源管理策略在實務層面的重要性。

貳、污泥再利用策略：福岡能源化與佐賀農業化

一、污泥資源化目標與日本碳中和戰略

過去被視為環境負擔的下水污泥，在日本碳中和政策推動下逐漸被重新定位為具資源化潛力的生物質來源。自2016年修訂《生質能利用推進基本計畫》以來，日

本政府將下水污泥列為生質能源的重要組成，並設定至2025年前達成85%資源化利用的政策目標。此政策反映政府對污泥中豐富有機物（約占總量八成）的重視，藉由開發其生質能潛力，期望降低廢棄物處理負荷並促進能源轉型（農林水產省，2016）。2020年，日本政府進一步提出2050年碳中和願景，明確要求推動能源結構轉型、提升再生能源比重並強化廢棄物減碳功能。污泥若能轉化為沼氣、生質燃料與熱源，將有助於降低化石能源依賴並支撐低碳社會的發展（国土交通省国土技術政策総合研究所，2022）。為支援地方實踐轉型，国土交通省自2011年推動「下水道革新技術實證專案」（B-DASH計畫）（圖1），累計逾半數示範項目與污泥能源回收相關，涵蓋沼氣發電、乾燥製肥及磷回收等多元技術（溝上，2020）。在法規面向，2015年修訂《下水道法》增列資源利用義務，為地方推動再利用提供法律依據。中央政府亦透過「社會資本整備總合交付金」等制度，補助地方建設創能與資源化設施，並推動各地編製「下水道能源利用推進計畫」，以提升系統整體效率與能源自給率（国土交通省水管理・国土保全局下水道部，2015）。整體而言，日本污泥管理正由末端處理邁向資源循環轉型，逐步形塑支撐2050碳中和目標的關鍵基盤。

創新污水處理技術示範專案(B-DASH專案)清單

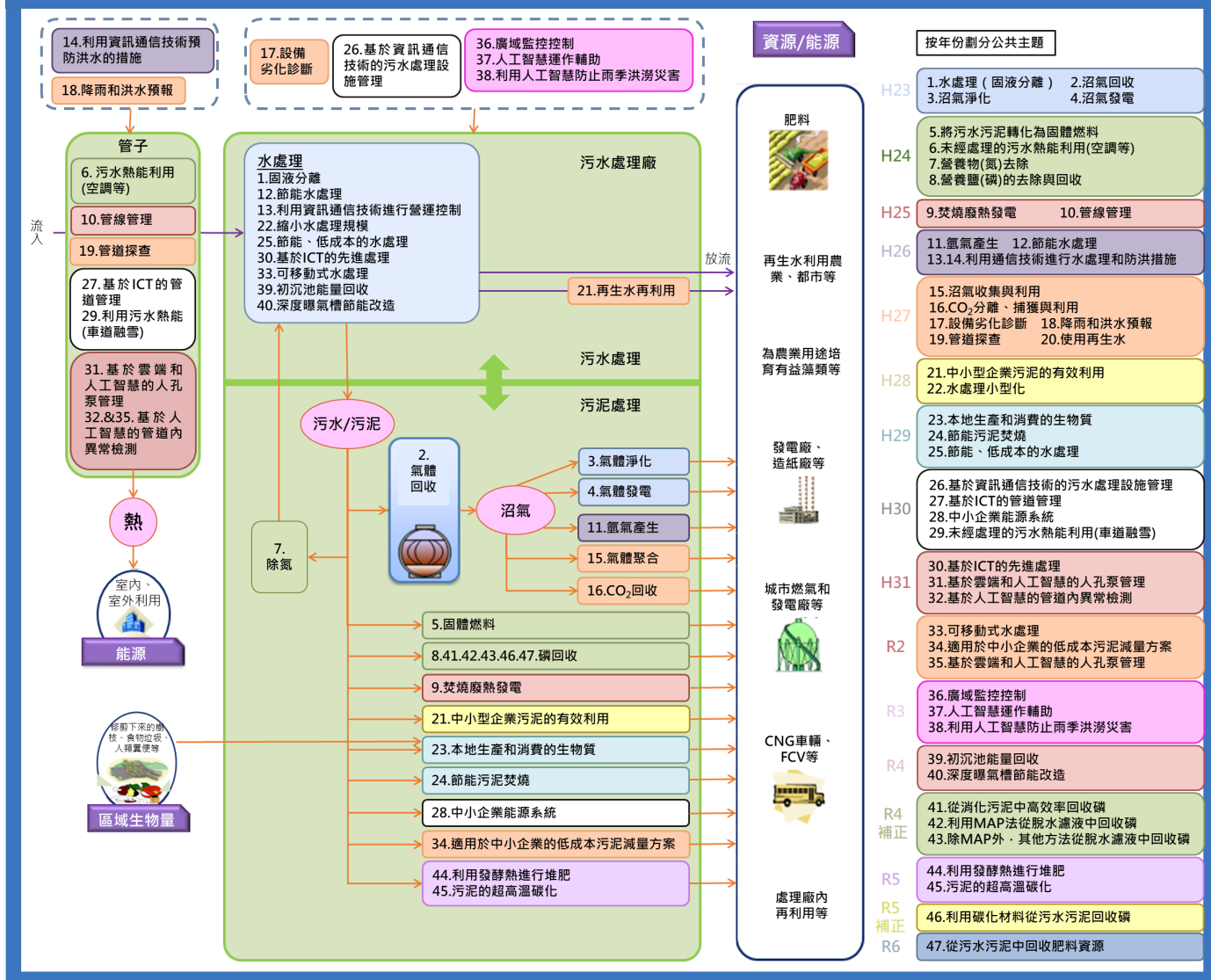


圖1 日本國土交通省 B-DASH 計畫：下水道創新技術實證專案路徑

二、污泥處理設施之功能定位與區域分工

在上述國家願景引導下，日本地方政府開始針對污泥處理設施進行功能定位與區域分工，以發揮規模經濟並契合在地條件(圖2)。傳統上各市町村多採獨立處理模式，如今則逐漸形成跨域合作的治理架

構：部分地區設置能源化中心，專責污泥燃料與能源轉化；另一些地區則聚焦於農業再利用與堆肥化應用。此分工模式展現地方政府在多層級治理下的角色轉變，透過資源整合與制度協作，提升污泥管理之經濟性與永續性。



為進一步探討其制度與技術運作機制，本文選取福岡市與佐賀市作為對比案例，分別代表都市型能源化樞紐與農業型循環再利用兩種策略實踐。前者聚焦於污泥造粒與乾燥燃料化以取代燃煤，後者則以高溫好氧發酵與放流水再利用為核心，形成在地化資源循環模式。這兩個案例將於後續章節詳細分析其技術內涵、治理結構與減碳成效，以揭示地方層級推動污泥資源化的多元途徑。

（一）福岡：能源化樞紐與固體燃料製造

隨著碳減排壓力上升與污泥處理費用高漲，傳統高耗能處理模式逐漸失去經濟可行性。日本每年下水道維護管理費用約1.2兆日圓（折合新台幣約2,400億元；日圓換算新台幣之匯率皆以0.2計算），其中污泥處理費用占其約5%，同時煤炭進口依存度高達九成以上。此背景促使日本政府重新評估污泥的能源潛力。福岡市順應國家生質能政策導向，特別是在國土交通省於2014年制定污泥燃料JIS標準後，開始將污泥定位為替代燃煤的能源資源。

2021年，福岡建置大型污泥固形燃料化設施，將脫水污泥乾燥造粒，供水泥窯等產業作為燃煤替代燃料使用，並回收燃燒灰渣作為土壤改良材或建材原料。此閉環利用模式達成污泥100%再資源化，並每年減少約11,000噸二氧化碳排放，展現出能源化與減碳的雙重效益。除固體燃料外，福岡亦整合污泥厭氧消化系統，回收

沼氣以供廠內發電與乾燥能源之用，並進一步推動沼氣提氫技術，建置下水道氫能站以支持燃料電池車運行。該示範系統在地方政府、產業與學術機構的協力下運作，成為日本下水污泥能源化的代表性實例。

在治理模式上，福岡採用設計-建造-運營(DBO)公私協作架構，由民間業者統包管理污泥能源化設施，以確保營運效率與產物去化的穩定性。此制度設計不僅降低了地方財政負擔，也形塑了技術創新與政策誘因相互支撐的治理機制。整體而言，福岡的經驗凸顯地方政府在國家碳中和戰略下如何以制度創新整合能源轉型與資源循環，形成都市型污泥能源化樞紐的發展典範。

（二）佐賀：農業堆肥化與在地資源循環

佐賀市以農漁業為主要產業結構，因而選擇以在地循環為核心的污泥再利用策略。地方政府意識到污泥及其他有機廢棄物的潛在再生價值，於2009年設置日處理30噸的污泥堆肥化設施（亦採DBO模式並獲中央補助），以取代傳統外運處置方式。該設施每年可產出約1,600噸堆肥，產品由當地約3,000名農民購買使用，形成穩定的在地循環體系。技術核心為與民間企業合作，應用專利微生物「YM菌」進行超高溫好氧發酵，使堆肥溫度可維持攝氏90度以上而無需外加乾燥劑，顯著提升分解效率並減少臭味與衛生風險。最終產品具

高營養與低氣味特性，逐步獲得農戶接受。

為促進堆肥產品市場化，市政府建立跨部門協作與農民團體溝通機制，透過試用示範與價格補助方式，擴大肥料使用規模。此治理模式展現地方政府在推動循環經濟中的協調與社會整合能力。此外，佐賀將放流水再利用納入整體循環體系，利用再生水灌溉農田，並於冬季將含氮出流水排入有明海以支援海苔養殖，形成陸海間的養分循環鏈。在中央補助與政策引導下，佐賀於2014年被認定為「生物質產業都市」，成為污泥農業再利用的示範案例。其經驗顯示，當地化技術創新結合跨部門治理結構，可有效降低碳排放與處理成本，並創造地方產業與就業效益。佐賀的發展路徑反映出地方政府在碳中和與循環經濟轉型中，如何以農業需求為核心建立多層次的生物質利用體系。

參、福岡案例：污泥能源化與新能源利用

一、污泥造粒乾燥技術

福岡市在西部水處理中心引進「污泥造粒乾燥」技術（圖3），以實現污泥的資源能源化利用。此技術將污泥脫水後進行造粒，再透過熱風乾燥生成穩定的污泥固體燃料。造粒階段中，會以少量乾燥污泥顆粒（約1毫米直徑）為核心，不斷覆蓋新鮮脫水污泥，使其累積增大成直徑約5毫米的

粒狀物。接著在乾燥階段，造粒後的污泥顆粒被送入旋轉乾燥桶，利用約攝氏400度的高溫熱風吹拂，使顆粒迅速乾燥並大幅降低含水率；經乾燥後污泥含水率可降至10%以下，粒徑穩定在1-5毫米的球形範圍。乾燥過程配有振動篩分裝置將顆粒按大小分類，不達規格的小顆粒返回前端重新造粒，如此循環確保最終產品符合尺寸要求。乾燥後的污泥顆粒經收集冷卻，即成為具燃料價值的產品，最後裝料外運供下游使用（福岡市道路下水道局，2024）。

福岡的污泥乾燥系統充分利用污水處理過程產生的餘熱與沼氣作為能源。一方面，乾燥所需熱源主要來自於消化槽產生的下水沼氣燃燒，輔以少量液化石油氣以穩定供熱。這使得乾燥過程本身幾乎完全依賴再生能源，降低對化石燃料的需求。同時，乾燥設施運行中所產生的廢熱則透過冷凝器以溫水形式回收，導引至厭氧消化槽加熱系統再利用，替代原有蒸汽鍋爐熱源。透過上述熱能整合措施，該系統在處理污泥的同時可改善能源自給效果，整體能源利用更趨高效。除此之外，設備本身採用簡化流程設計，組成緊湊且維護方便，顯示出良好的操作經濟性。污泥造粒乾燥技術的核心成果是在不顯著損耗污泥原有熱值的前提下，將之轉化為高熱值的固體燃料，可直接替代部分煤炭使用。據現場資料顯示，所得乾燥污泥顆粒高位發熱量約為15.03 MJ/kg（濕基），約相當



於一般煤炭的六成熱值。這種固體燃料具備良好的粒體強度與可操作性：粒徑均勻且含水率低，粉塵生成量少，不易碎裂便於儲運及氣動輸送。福岡市將該燃料供給水泥製造等產業，用作水泥窯爐燃燒的替代燃煤。此舉不僅確保了污泥的長期出路，還能部分替代傳統化石燃料。福岡市每年約有一半的下水污泥（處理量約100噸/日，即年處理約33,000噸）經此技術轉製為固形燃料，並簽訂20年特許經營合約保障其最終去化管道。按官方估算，以污泥固體燃料替代煤炭燃燒，每年可減少超過10,000噸的二氧化碳排放。由此可見，污泥造粒乾燥技術在資源化污泥的同時實現了顯著的減碳效益，符合碳中和與循環經濟策略目標。

二、沼氣利用策略

福岡市的污水廠積極推動將厭氧消化產生的沼氣升級轉化為多元能源產品（圖4），以提高能源自給率並減少溫室氣體排放。這些沼氣經充分淨化後，可用於發電、供熱，甚至製備氫氣等創新用途，為廢棄物處理提供了再生能源的新價值。

沼氣發電利用方面，在污水處理領域，福岡市率先將下水污泥產生的沼氣用於發電。位於市中心的中部水處理中心安裝了總容量約2 MW的燃氣內燃機發電機組，由民間業者投資建置並透過再生能源固定電價收購制度(Feed-in Tariff, FIT)運營。所發電力全數向電力供給業者出售，

不僅提供穩定的綠色電力，還為污水廠帶來長期經濟收益（FIT合約可保障購電長達20年）。在規模較小的廠站，則建有約200 kW的沼氣發電機組，以滿足廠區內部用電需求，提高設施的能源自給程度。據統計，透過導入高效率鼓風曝氣等節能技術以及沼氣發電等創能措施，福岡市全市污水處理系統總體能源消耗降低了約7%，而自產再生能源供給相當於整體用能需求的約11%。這些措施有力推進了污水部門邁向碳中和的進程。

在沼氣餘熱回收方面，福岡市充分利用沼氣燃燒所產生的熱能進行熱電聯產，並將其應用於污泥消化過程的加熱需求。過去，消化槽的加熱主要依賴傳統的燃油鍋爐，但現在已改由沼氣發電設備的廢熱及污泥乾燥系統產生的熱能來供給。具體而言，沼氣經燃氣內燃機發電時產生的高溫廢氣，透過熱交換器回收可用熱，直接用於維持消化槽的操作溫度，從而取代了原先的鍋爐燃料需求。這種熱回收策略不僅提高了能源使用效率，還進一步減少了外部能源（如燃油或市政電力）的依賴和運行成本。此外，由於沼氣的主要成分為甲烷，其燃燒產生的二氧化碳屬生質循環的一環，相較直接排放甲烷（全球暖化潛勢約為二氧化碳的28倍）而言，用於發電供熱可有效降低溫室效應。因此，將沼氣與餘熱最大限度轉化為電力和熱能的策略，對於減輕外部化石燃料依賴與降低整體溫室氣體排放具正面效益。



以水蒸氣重組反應轉化為氫氣與二氧化碳，後者再經吸附回收以降低排放。該系統每日處理約2,400 Nm³沼氣，可生產3,300 Nm³高純度氫氣（純度可達99.999%），足以供應約60輛燃料電池汽車使用（福岡市道路下水道局，2023）。

整體而言，透過發電、供熱與製氫的整合利用，福岡市已有效活化約九成下水沼氣資源，為城市污水系統的碳中和與永續轉型提供了示範性模式。

肆、佐賀案例：在地循環與農業資源化

一、污泥堆肥化技術

佐賀市自 2009 年起導入 YM 菌超高溫好氧堆肥技術，將下水污泥全量資源化處理。在攝氏 90 度以上的好氧條件下連

續發酵 45 至 50 天，即可將有機污泥穩定轉化為腐熟堆肥。系統以含水率約 80% 的脫水污泥為原料，日處理量約 30 噸，只需添加少量 YM 菌並配合強制曝氣，即可維持高溫發酵，無須額外投加稻殼等調質材料或外部熱源，並同時達成病原體去除與臭氣抑制（圖 5）。

堆肥化設施佔地約 3,880 平方公尺，年產堆肥約 1,400–1,600 噸。成品為含水率降低的粉狀有機肥，總氮與磷含量分別約 2.9 與 4.9%。依《肥料品質確保法》檢驗結果，其鎘濃度約 1.5 mg/kg，遠低於



圖 5 日本佐賀市下水污泥堆肥化流程圖

5 mg/kg 的標準上限，其餘重金屬亦皆低於法規值，顯示產品符合農用安全要求。佐賀市將該產品登記為普通肥料並命名為「循環發酵肥料」，自 2011 年起以每 10 公斤約 20 日圓（折合新台幣約 4 元）價格供應本地農戶，主要用於水稻、小麥等大田作物及園藝作物基肥與追肥，並透過說明會及田間試用逐步提升農戶接受度。在處理成本方面，全量堆肥化使污泥處理單價由焚燒階段的每噸約 14,000 日圓（折合新台幣約 2,800 元）降至每噸約 9,000 日圓（折合新台幣約 1,800 元），每年可節省外運與處置費用約 4,100 萬日圓（折合新台幣約 820 萬元；本文日圓換算新台幣之匯率皆以 0.2 計算）。以運輸

與焚燒排放估算，溫室氣體排放量可較傳統焚燒情境減少約 86%，約相當於每年 500 噸二氧化碳。依現場物質平衡推估，約 50% 的進水總氮與 80% 的進水磷負荷最終封存於堆肥產品中，過去隨放流水流失的養分現改以肥料形式回補於農田，有助於實現養分循環與部分化肥替代。

二、放流水再利用

佐賀市除推動固體污泥資源化外，亦回收部分處理後出流水，供農業灌溉與沿海漁業使用，以在符合排放標準前提下，同時利用水資源與殘餘養分，提升整體資源利用效率（圖 6）。



事業廢水



廢水處理設施

農業方面應用



免費提供灌溉用水



放流水灌溉之景象



污泥肥料產品照



在地農民取用肥料之景象

海苔養殖方面應用



有明海之海苔養殖風景



海苔商品

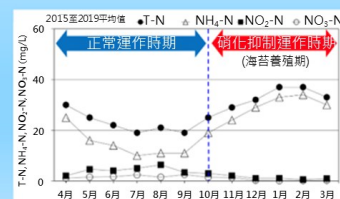


圖 6 日本佐賀市放流水循環再利用

佐賀市污水淨化中心的出水經二級處理及消毒後，部分透過分支管線輸送至廠區入口供水點，由周邊農戶自備水車取用。供水點設有水龍頭及計量設備，最大供水能力約 $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ ，可因應周邊農田的灌溉需求。再生水在農業端主要用於果菜類作物灌溉及大田作物配藥、噴灌等用途；由於水中仍含有一定濃度的氮、磷養分，可部分替代化肥並減少地下水抽取，在枯水期尤具效益。實務運轉上，再生水各項水質及病原指標均符合中水利用標準，僅經適度氯消毒後即供農使用，反映出系統設計以安全與經濟兼顧為前提。整體而言，農業再生水利用有助於緩解淡水資源壓力，並透過養分回收降低農業用肥與用水成本。

另一方面，佐賀市鄰近的有明海為日本重要海苔養殖海域，但冬季海水營養鹽濃度偏低，常導致產量與品質下降。為改善海域生產力，佐賀市自 2007 年起於海苔養殖季節調整下水道處理方式，在不違反排放標準前提下，於冬季適度降低硝化脫氮效率，使出水保留較高濃度的無機氮與磷酸鹽，作為「液態肥料」經河口輸送至灣奧海域。產學官聯合監測結果顯示，在實施硝化抑制運轉期間，養殖區海水無機氮濃度可維持在約 $0.07\text{--}0.1 \text{ mg/L}$ ，相較一般運轉時期明顯提高，且由於處理水經河口稀釋混合，未觀察到對海水鹽度造成不利影響。研究認為此措施在環境接受範圍內有效補充了養殖海域營養鹽，對海

苔增產具有實質貢獻（一般財団法人佐賀県環境科学検査協会等，2020），佐賀市下水道部門亦因此獲日本水大賞未來開拓獎等肯定。

佐賀市政府與漁業團體經由多次協商與充分的資訊揭露，化解了各界對水質安全及風險評估的疑慮，並共同建立持續性監測與溝通機制，為營養鹽管理的長期推行奠定了共識基礎。國土交通省其後將此案例彙整為營養鹽能動管理之參考模式，截至 2022 年 3 月，全國已有 47 處污水處理廠導入類似的季節性運轉策略。整體而言，佐賀市結合農業灌溉與漁業養殖兩項出水再利用措施，將原本單純排放的出流水納入在地循環系統，兼顧農業用水、肥料需求與沿海初級生產，有助於實現城市與農漁村間的資源循環與環境負荷降低。

伍、結語

支援國家淨零轉型與循環經濟政策目標綜整日本九州福岡市與佐賀市之實務經驗，顯示下水污泥資源化並無單一標準範式，其成功關鍵在於確立符合「區域特性」與「產業需求」的差異化策略。福岡市利用造粒乾燥技術生產固體燃料及氫能，體現都會區對應大規模減碳需求的能源化路徑；佐賀市則透過高溫發酵技術產製優質堆肥並結合放流水灌溉，展示農業城鎮實現地產地消的物質循環模式。此雙軌策略對我國具有具體借鑑價值。首先，

污泥治理應跳脫末端處置思維，轉向以「淨零排放」為導向的資源再生策略，將公共污水處理廠提升為兼具能源回收與資源再生功能的複合型設施。其次，制度保障至關重要，兩市皆採行DBO模式，透過長期契約要求民間機構不僅負責營運，更須確保再生產品（燃料或肥料）的最終去處與市場通路。此機制有效解決過往資源化產品缺乏穩定去化的瓶頸，確保循環鏈的完整性。綜合上述，建議我國未來規劃污泥資源化設施時，應優先盤點各區域產業結構、水文條件與農地需求，評估能源化、農業化或兩者併行之可行性，據以選擇適當的技術組合與規模配置。同時建立穩健的公私協力與績效監測機制，以可驗證的環境與經濟效益作為決策依據，逐步提升下水污泥資源化比例，支援國家淨零轉型與循環經濟政策目標。

參考文獻

1. 福岡市道路下水道局，中部水处理センター，第 4 版，第 1-6 頁，日本(2023)。
2. 福岡市道路下水道局，西部水处理センター下水污泥固形燃料化施設，日本(2024)。
3. 國土交通省國土技術政策綜合研究所，「2050 年カーボンニュートラル実現に資する技術のイメージ」，令和 3 年度下水道技術開発会議エネルギー分科会（第 3 回），日本(2022)。
4. 農林水産省，バイオマス活用推進基本計画，日本(2016)。
5. 國土交通省水管理・国土保全局下水道部《新下水道ビジョン加速戦略～実現加速へのスパイラルアップ～(令和四年度改訂版)》，國土交通省，日本(2023)。
6. 國土交通省水管理・国土保全局下水道部，下水污泥エネルギー化技術ガイドライン(改訂版)，國土交通省，日本(2015)。
7. 一般財団法人佐賀県環境科学検査協会、国立大学法人佐賀大学、佐賀市上下水道局，下水処理施設の季節別運転管理によるノリ養殖海域への効果，産学官連携共同研究報告書，日本佐賀市(2020)。
8. 內政部國土管理署，日本福岡及佐賀污水處理廠技術及淨零議題成功經驗交流，國家發展委員會，第 1-50 頁(2025)。
9. 溝上洋介，新技術の活用 下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト)による技術開発と普及促進，建設マネジメント技術，510，第 29-36 頁(2020)。

因應氣候變遷衝擊下的污水處理廠韌性設計



摘要

污

水處理廠作為都市公共衛生的核心，正面臨極端降雨、全球暖化與海平面上升等多重挑戰，系統性削弱了設施的穩定性。傳統基於歷史數據的「穩態設計」已不足以應對高度不確定的氣候風險。本文以「韌性設計」為核心，探討氣候衝擊並整合國際研究提出綜合調適策略。研究指出，氣候變遷導致處理效率下降及能耗增加，溢流事件更可能引發公衛危機。為提升系統韌性，建議依廠區條件及風險評估配置調和池作為物理緩衝，以有效削減瞬間尖峰流量並穩定效能。導入厭氧消化高精確數學模式，證實在極端情境下可透過參數優化預測並穩定系統運作。在能源韌性方面，利用高效攔截設備強化初沉污泥厭氧消化，能大幅提升甲烷產量，增強斷電風險下的能源自給能力。生命週期評估顯示，導入分散式系統搭配低能耗技術（如固定生物膜法），具備較佳的風險分散與減碳效益。針對臺灣海島型氣候特性，實務建議應朝向「集中與分散結合」的混合架構發展，推動 AI 智慧化預警管理與抗災微電網。透過硬體緩衝強化與軟體智慧監控，確保下水道系統在未來氣候壓力下持續穩定運作，達成碳中和與水資源循環目標。



關鍵字：

-  污水處理廠
-  氣候韌性
-  厭氧消化
-  溫室氣體減量
-  調適策略



作者



胡慶祥¹，惠民實業股份有限公司/協理



楊仁彰²，惠民實業股份有限公司/總經理



吳萬益³，惠民實業股份有限公司/董事長

Abstract

As core infrastructure for urban public health, sewage treatment plants face severe challenges from extreme rainfall, global warming, and sea-level rise, which systematically undermine facility stability. Traditional "steady-state" designs based on historical data are insufficient for addressing highly uncertain climate risks. Centered on "resilient design," this paper explores climate impacts and integrates international research to propose comprehensive adaptation strategies. Research indicates climate change decreases treatment efficiency, increases energy consumption, and triggers public health crises through overflow events. To enhance system resilience, comprehensively configuring equalization tanks by facility-specific conditions and risk assessments is recommended as a physical buffer to effectively reduce peak flows and stabilize performance. Applying high-precision mathematical models demonstrates that parameter optimization can predict and stabilize operations under extreme scenarios. Regarding energy resilience, utilizing high-efficiency interception equipment to enhance primary sludge anaerobic digestion substantially boosts methane production, strengthening energy self-sufficiency during power outages. Life cycle assessments show that integrating decentralized systems with low-energy technologies (such as fixed-film processes) offers superior risk dispersion and carbon reduction benefits. Considering Taiwan's island climate, practical recommendations suggest moving towards a hybrid "centralized and decentralized" architecture, while promoting AI-driven smart early warning management and disaster-resilient microgrids. By combining hardware buffers with intelligent software monitoring, sewerage systems can ensure stable operations under future climate stress, achieving carbon neutrality and water reclamation goals.



Keywords:

-  Sewage Treatment Plants
-  Climate Resilience
-  Anaerobic Digestion
-  GHG Mitigation
-  Adaptation Strategies

壹、前言

自工業革命以來，人類活動導致的溫室氣體排放已引發全球氣候系統的劇烈變遷。根據國際氣候權威機構的報告(IPCC, 2022)，極端天氣事件的頻率與強度正呈現非線性的增長。對於承擔城市公共衛生與水環境保護重任的污水處理廠(Sewage Treatment Plants, STPs)而言，這意味著其設計基準(Design Criteria)正面臨前所未有的挑戰。

傳統污水處理廠的設計多基於歷史水文氣象數據，假設進流條件(流量、濃度、溫度)在一定範圍內波動，即所謂的「穩態假設」(Stationarity)。然而，隨著氣候變遷加劇，這一假設已不再適用，「非穩態」(Non-stationarity)的氣候特徵導致許多既有設施在面對突發性暴雨、長期乾旱或異常高溫時，頻繁出現功能失效、溢流(Overflow)甚至結構損壞。Hossain (2024) 在其研究中明確指出，既有的基礎設施在應對這些新興氣候風險時顯得脆弱，亟需引入新的設計思維。

在過去的環境工程論述中，「永續性」(Sustainability)側重於資源效率與長期生存能力，而「韌性」(Resilience)則更強調系統在遭受擾動(Disturbance)後的吸收能力、恢復速度以及適應新常態的能力。根據Hossain (2024) 的定義，污水處理廠的氣候韌性是指設施在極端氣候事件

衝擊下，仍能維持核心處理功能，並在事件後迅速恢復至正常操作，同時具備隨長期氣候趨勢進行演進的能力。這意謂污水處理設計思維必須從「抵抗」(Resistance)轉向「調適與恢復」(Adaptation and Recovery)。

鑑於上述背景，本文旨在以環工專業視角，建構一套因應氣候變遷的STPs韌性設計論述。本文彙整近期多篇關鍵文獻，從衝擊量化分析、程序模擬優化、能源資源韌性及管理規劃策略等四個維度展開深入探討，旨在為我國下水道及水再生工程提供具實證基礎的調適藍圖。

貳、氣候變遷對污水處理系統之多重衝擊機制

氣候變遷對STPs的影響是多重物理、化學與生物過程的耦合結果。本章節將依據參考文獻的實證數據，剖析各氣候因子的作用機制。

一、極端降雨與水力負荷變異

極端降雨是目前文獻中討論最多的氣候衝擊因子。Ranieri et al. (2024) 針對義大利南部普利亞地區(Apulia)的研究提供了詳盡的數據支持，揭示了降雨強度與處理效能之間的關聯。

(一) 稀釋效應與生物處理效能

當大量雨水混入污水下水道系統時，

進流污水的BOD、COD及氮磷濃度會顯著降低。雖然表面上污染物負荷減少，但水力停留時間(HRT)的劇烈縮短導致微生物與基質接觸時間不足（亦即生物反應時間過短），實質上降低了污染物的去除率。Ranieri et al. (2024) 的研究數據顯示，在年降雨量較高的年份，BOD去除率呈現下降趨勢，這與活性污泥系統中污泥流失(Washout)風險增加有直接關聯。

（二）能耗與降雨強度之非線性關係

處理每立方米污水的能耗通常隨著流量增加而降低，但在極端降雨情境下，龐大的抽水需求與後續處理單元的水力衝擊，導致整體能源效率惡化。Ranieri et al. (2024) 指出，當降雨強度顯著激增時，單位能耗亦隨之飆升，處理每立方米污水的用電由0.36度增多至0.51 度。這對於追求碳中和的STPs而言，無疑是巨大的營運負擔與挑戰。

二、溫度升高對生化反應之影響

溫度是控制微生物代謝速率的關鍵參數。雖然較高的溫度通常能加速生化反應，但也伴隨著物理化學性質的改變。

（一）溶氧限制與質量傳輸

高溫會導致氧氣在水中的溶解度下降，這降低了曝氣池的氧氣傳輸效率；為了維持曝氣池中的溶氧濃度，鼓風機必須加大功率，進一步推升能耗。

（二）微生物菌群消長風險

溫度升高可能改變微生物菌群結構，導致非目標微生物的增生。例如，在高溫季節，二沉池容易發生污泥上浮或膨化(Bulking)的問題。此外，高溫環境亦有利於病原體的存活或增生，增加了後端消毒單元的負擔與成本。

三、海平面上升與海水入侵

對於坐落於沿海城市的STPs而言，海平面上升構成物理與生化雙重威脅。Hughes et al. (2021) 在紐西蘭的研究中，詳細探討了地下水水位抬升對管網的影響。海水倒灌或高鹽度地下水入滲會導致進流污水鹽度飆升，造成活性污泥微生物細胞的滲透壓休克(Osmotic Shock)，抑制微生物代謝活性，嚴重時會導致生物處理系統崩潰。同時，眾所皆知高鹽度會加速基礎設施的腐蝕。

參、程序模擬與智慧化控制：以ADM1 模式之應用為例

面對氣候變遷帶來的動態進流特徵，傳統經驗法則的操作模式已顯不足。導入高精確的數學模式進行「數位孿生」(Digital Twin)模擬，是提升韌性的關鍵技術手段。

一、模式架構與參數校正

厭氧消化模式 1 號 (Anaerobic

Digestion Model No. 1, ADM1)是國際水協會(IWA)開發的標準化結構模式。Rocha et al. (2024) 的研究展示了如何利用ADM1 結合生化甲烷產能 (Biochemical Methane Potential, BMP) 實驗，來優化污泥厭氧消化的生質能源回收。該研究使用Julia語言開發求解器，模擬了包含水解 (Hydrolysis)、酸化 (Acidogenesis)、乙酸化 (Acetogenesis) 及甲烷化 (Methanogenesis)等四個厭氧降解步驟的

複雜動力學過程。模式輸入參數包括pH、鹼度、COD等特性，並經過嚴謹的校正。

二、極端情境下之模擬驗證

Rocha et al. (2024) 的研究結果顯示，經過參數校正的ADM1模式，其模擬的累積甲烷產量曲線與實驗數據極為吻合，誤差極低，如圖1所示。

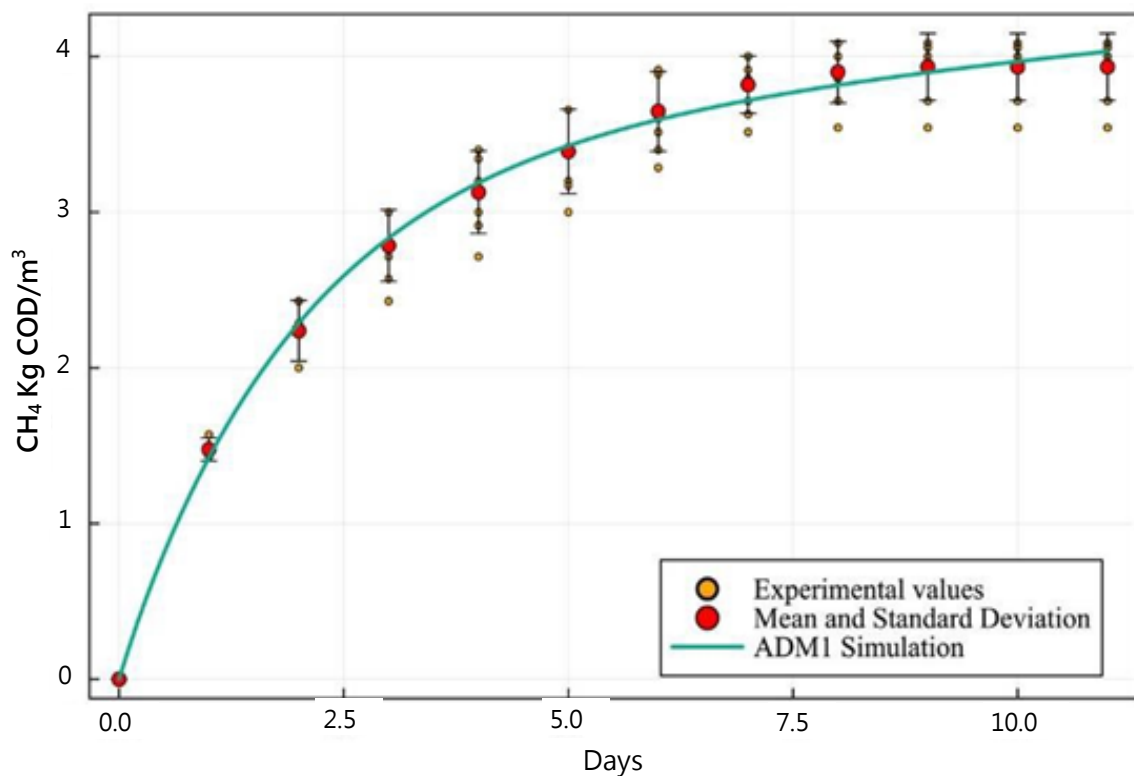


圖 1 BMP 實驗觀測與 ADM1 模式模擬之累積產甲烷曲線比對圖

在韌性設計中，此模式可用於：

(一) 極端情境預測：

模擬突發性高有機負荷對厭氧消化槽酸鹼平衡的衝擊，預警「酸敗」風險。

(二) 溫度波動模擬：

評估氣候暖化或極端寒流對甲烷產氣效率的影響，優化加熱策略。

肆、能源韌性：強化初沉污泥處理技術

能源自給是STPs韌性的重要指標。在極端氣候導致電網不穩或中斷時，具備獨立能源生產能力的廠站較能維持基本運作。Sakaveli et al. (2021) 的研究提出了一種強化初沉污泥的中溫厭氧消化策略。

一、初沉污泥之產氣潛能

傳統做法常將初沉池污泥與二沉池污泥混合後進行厭氧消化產甲烷。然而，實驗數據顯示，單獨消化初沉污泥的比甲烷產率較混合污泥高出40%，亦即初沉污泥含有較高比例易生物降解的有機物(Sakaveli et al., 2021)，這意味著在污水處理廠韌性設計上，在初沉池中設置高效攔截設備以優化傳統初沉池，甚至在特定條件下取代傳統初沉池，能獲得更高的能源回收效率。

二、強化初沉池固液分離設備之應用

除了優化後端的厭氧消化程序外，如同前述提升前端初沉池的固液分離效率亦是增強韌性的關鍵環節。透過在初沉池中設置如旋轉濾布過濾機(Rotating Cloth Media Filter, RCMF, 圖2)、旋轉帶式篩過濾機(Rotating Belt Filter, RBF)或微篩機(Microscreening)等高效攔截設備，可物理性地大幅增加初沉污泥的攔截量。這類技術路徑對於提升氣候韌性具備三大核心效益：

(一) 提升能源產出：

旋轉濾布過濾機設備能攔截更多富含有機質的初沉污泥，直接增加了後續厭氧消化單元的有機基質，進而產出更多甲烷電力，有助於實現能源自給。

(二) 減輕生物處理負荷：

透過在前端更徹底地移除懸浮固體與有機物，RCMF能大幅減輕後端生物處理程序(如活性污泥曝氣池)的有機負荷。這不僅降低了曝氣所需的龐大能耗，更為生物系統保留了應對進流變異的緩衝餘裕。

(三) 穩定系統運作：

在面對暴雨沖刷導致的高濁度進流時，強化攔截設備能發揮穩定的屏障功能，防止過量固體物質衝擊生物系統，確保出流水質穩定。

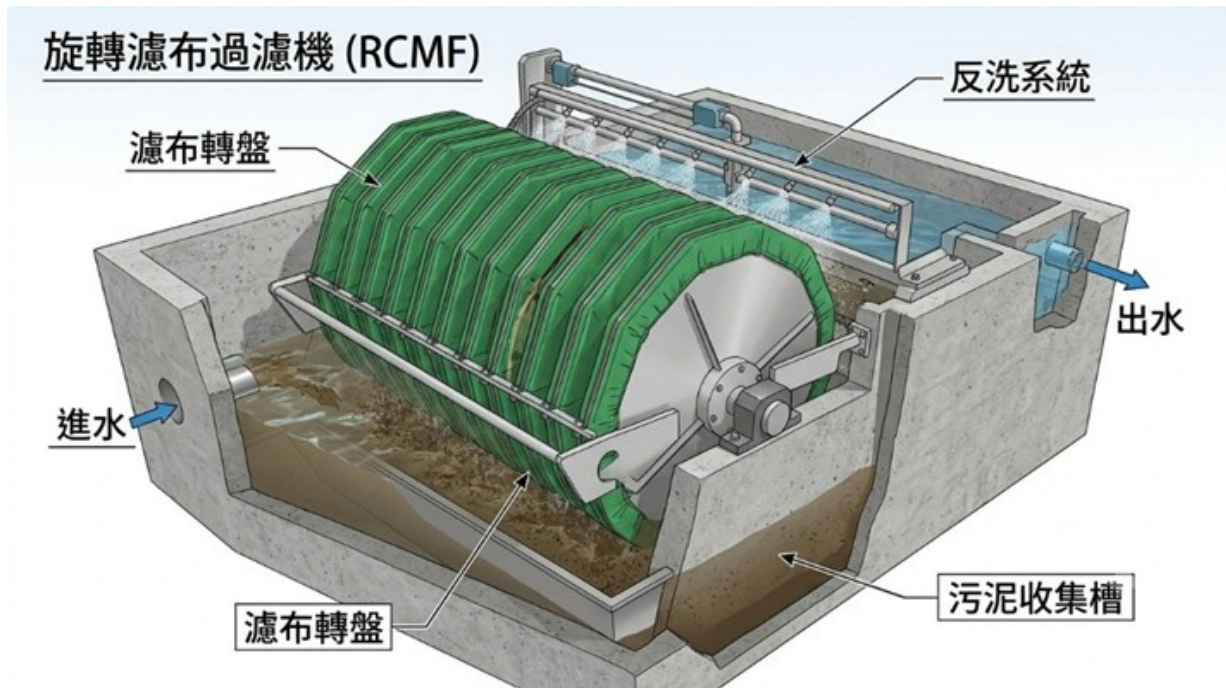


圖 2 旋轉濾布過濾機(RCMF)

伍、低碳轉型與分散式系統之生命週期評估

韌性設計不僅是適應氣候，更應包含減緩氣候變遷 (Mitigation) 的責任。Humaira與Rahmah (2024) 在印尼萬隆的研究，透過生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 方法，比較了不同污水處理模式的環境衝擊。

一、集中式與分散式系統之碳排放比較

該研究評估了多種污水處理設施，結果顯示傳統化糞池系統因甲烷逸散，其全球暖化潛勢 (Global Warming Potential, GWP) 極高。Huynh et al. (2021) 的研究則

量化了化糞池系統的溫室氣體排放，指出其甲烷與氧化亞氮的逸散係數顯著，這佐證了傳統系統在氣候友善度上的劣勢。相對地，採用好氧生物濾池 (Biofilter) 的社區型現地處理系統，其GWP僅為傳統系統的一小部分。這主要歸功於好氧程序減少了甲烷生成，且現地處理省去了長距離管網輸送的泵送能耗，適合偏遠地區或下水道建設尚未完成布建的鄉鎮。

二、韌性規劃之空間佈局

Li et al. (2023) 及Humaira與Rahmah (2024) 的研究共同指向一個趨勢：未來的韌性城市污水處理系統應是「集中與分散相結合」。分散式系統能將風險控制在局



圖3 旋轉包埋生物反應器(REBC)模廠試驗

部區域，避免單一大型設施受災導致全城癱瘓，同時達成減碳與調適的雙重目標。

三、低能耗生物處理技術之應用

在低碳轉型與韌性升級的技術選擇中，旋轉生物盤 (Rotating Biological Contactor, RBC)、旋轉包埋生物反應器 (Rotating Encapsulated Biological Contactor, REBC, 圖3)、膜氧傳輸生物膜反應器 (Membrane Aerated Biofilm Reactor, MABR)及移動床生物膜反應器 (Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR)等

各種型式的固定生物膜技術展現了獨特的優勢。相較於傳統懸浮生長的活性污泥法，這些固定生物膜的微生物不易受進流流量劇烈波動而發生污泥流失 (Washout)，特別是一些生長速率緩慢的硝化菌和甲烷生成菌。這意味著在極端降雨導致的水力過載情境下，固定生物膜系統能維持較穩定的微生物量與處理效能。此外，固定生物膜系統無需高能耗的鼓風曝氣系統，其單位處理能耗顯著降低。因此，在分散式處理系統或中小型廠站中導入固定生物膜系統技術，不僅能提升系統

應對氣候衝擊的穩定性，更能進一步降低整體碳足跡，符合氣候韌性設計的雙重目標。

陸、類型化調適策略與風險管理

Li et al. (2023) 綜整百餘篇文獻，提出了一套「類型化調適策略」(Typological Adaptation Strategy)，強調因地制宜的重要性。

一、高所得國家

如下水道普及率高的地區，重點在於解決溢流問題及老化基礎設施更新。策略包括建設滯洪池、推動綠色基礎設施以削減逕流。

二、中低所得國家

重點在於擴大公共衛生設施覆蓋率的同時，跳過高能耗模式，直接採用具備氣



資料來源：作者拍攝

圖4 臺中港特定區水資中心調和池（有效容積約 4,000 m³）

候韌性的分散式生態處理系統。

三、視條件配置調和池以緩衝水力衝擊

面對氣候變遷導致的極端降雨頻率增加，傳統僅依賴管網調蓄的設計已顯不足。建議未來所有污水處理廠，可考量幹管大小、廠區條件及風險評估設置調和池(Equalization Tank)。調和池能有效削減瞬間尖峰流量(Peak Flow)，防止生物處理單元因水力負荷過大而導致污泥流失或系統崩潰；同時能均質化進流污染物濃度，穩定後端處理效能。此緩衝機制是確保污水廠在暴雨衝擊下仍能維持穩定運作、避免溢流的關鍵物理防線。相反地，在長期乾旱或枯水期，污水濃度可能異常升高（有機負荷增加），此時，調和池的均質功能可將高濃度污水與低濃度污水混合，避免突增負荷(Shock Load)對生物處理單元（特別是活性污泥系統）產生毒害或抑制作用。

將調和池納入污水處理廠，雖然初期投資成本較高，且需額外用地，但從長期的生命週期成本(Life Cycle Costing, LCC)評估，其帶來的效益是顯著的。

綜上所述，調和池不僅是傳統的土木構造物，更可做為現代污水處理廠因應氣候變遷、實現永續營運的韌性設計要素。未來在下水道規劃與建設中，建議可考量幹管大小、廠區條件及風險評估後考量其設置必要性與最佳配置方案。

柒、結論與建議

為進一步提升本文研究之應用價值，綜合上述國際文獻探討重點，針對臺灣特殊的氣候與地理環境（如：颱風頻繁、短延時強降雨、地形狹長、能源仰賴進口），提出以下實務設計與管理建議：

一、因應短延時強降雨之防洪與調蓄設計：

臺灣極端降雨事件頻傳，建議除廠內建議依幹管大小、廠區條件及風險評估考量設置調和池之必要性以削減瞬間尖峰流量外，新建及擴建廠區應重新檢討防洪高程。針對管網系統，應結合海綿城市概念與綠色基礎設施（如滯洪池、透水鋪面）從源頭削減逕流，降低廠站的端點水力負荷。

二、結合數位孿生與AI智慧化預警管理：

善用臺灣資通訊(ICT)產業優勢，將傳統污水廠升級為智慧水資中心。建議將ADM1等高精確模式結合中央氣象署的即時降雨預報數據，建構AI動態預警系統。在颱風或暴雨來臨前，提前啟動調和池抽排騰出滯洪空間，並動態調節曝氣量，以應對非穩態的氣候特徵。

三、推動城鄉適性之分散式低碳水資源中心：

考量臺灣城鄉發展差異與地形限制，

偏鄉或非都市計畫區應跳過高能耗的長距離管網佈建。建議廣泛導入模組化、低能耗的固定生物膜技術（如REBC、MBBR）作為分散式處理核心，並結合在地用水需求，就近供應再生水，實現區域水資源循環。

四、建構抗災微電網與強化能源自主：

針對臺灣電網韌性挑戰，可透過導入旋轉濾布過濾機(RCMF)等設備攔截初沉污泥以提升沼氣產能。此外，廠區應結合太陽能、小型風機與儲能設備，建置「抗災微電網」。確保在極端天災導致外部電網中斷時，廠內核心單元仍能維持基本運作，達成能源自給。

未來的環境工程研究應進一步聚焦於「複合性災害」的情境模擬，並開發韌性新型材料，以建立真正具備韌性的污水處理基礎設施。透過系統性的韌性設計與營運管理，期能確保下水道系統在未來氣候壓力下仍能持續穩定運作，並朝向我國下水道建設推動的「碳中和」與「水資源循環再利用」目標邁進。

參考文獻

1. Hossain, K. M. I. (2024). Resilience of wastewater treatment plants to climate change: Challenges and adaptive strategies. *International Journal of Business, Social and Scientific Research*, 12(2), 41-48.
2. Hughes, J., Cowper-Heays, K., Oleson, E., Bell, R., & Stroombergen, A. (2021). Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Climate Risk Management*, 31, 100262.
3. Humaira, A. N. S., & Rahmah, U. A. (2024). Climate change impact assessment of various wastewater treatment facilities: A case study in Bandung City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1353, 012002.
4. Huynh, L. T., Harada, H., Fujii, S., Nguyen, L. P. H., Hoang, T. H. T., & Huynh, H. T. (2021). Greenhouse gas emissions from blackwater septic systems. *Environmental Science & Technology*, 55(2), 1209-1217.
5. IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
6. Li, J., Li, X., Liu, H., Gao, L., Wang, W., Wang, Z., Zhou, T., & Wang, Q. (2023). Climate change impacts on wastewater infrastructure: A systematic review and typological adaptation strategy. *Water Research*, 242, 120282.
 7. Ranieri, E., D'Onghia, G., Lopopolo, L., Gikas, P., Ranieri, F. Gika, E., Spagnolo, V., Herrera, J. A., & Ranieri, A. C. (2024). Influence of climate change on wastewater treatment plants performances and energy costs in Apulia, south Italy. *Chemosphere*, 350, 141087.
 8. Rocha, M. E., Lazarino, T. C., Oliveira, G., Teixeira, L., Marques, M., & Mangiavacchi, N. (2024). Analysis of biogas production from sewage sludge combining BMP experimental assays and the ADM1 model. *PeerJ*, DOI 10.7717/peerj.16720.
 9. Sakaveli, F., Petala, M., Tsiridis, V., & Darakas, E. (2021). Enhanced Mesophilic Anaerobic Digestion of Primary Sewage Sludge. *Water*, 13, 348.
 10. Zhang, Q., Hu, J., & Lee, D. J. (2016). Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*, 98, 108-119.

提升污水處理廠營運韌性之實務策略

-以斗六廠及虎高廠為例



摘要

面 對全球氣候變遷加劇與基礎設施逐漸老化之雙重挑戰，傳統污水處理廠以「被動處理」為導向的營運模式，已無法應對日益複雜的複合型風險。本研究旨在探討現代污水處理廠建構「營運韌性」之核心策略，推動其向「水資源回收中心」轉型。研究提出三大管理框架：（一）水資源調適：透過放流水回收再利用降低區域缺水風險；（二）能源韌性：建構整合綠能、儲能與智慧系統之微電網；（三）預測性資產管理：建立階層式監測機制，將維護由故障搶修轉向風險預防。

以雲林地區斗六水資源回收中心及虎高污水廠為實證案例。結果顯示，全面導入設備數位身分證 (QR-Code) 後，平均縮短異常反應時間達30%。在硬體優化方面，虎高廠優化鼓風機空氣管線，年節電達65.7萬度，並藉能源效率基準 (EnB) 推動離峰運轉。斗六廠則引進污泥乾燥機，並於屋頂建置總容量499.2 kWp之太陽能微電網系統。研究指出，儘管微電網受限於日照天候與廠區腹地，無法全天候獨立供應全廠耗能，但其年產約60.3萬度綠電，可穩定替代全廠近42%之日常用電，顯著降低對單一市電之依賴。透過數位管理、預防性維護與主動式能源策略之交織，能有效穩固基礎設施營運，具體實踐淨零排放與循環經濟之永續目標。



關鍵字：

-  污水處理廠營運韌性
-  水資源回收中心
-  微電網系統
-  預測性介入
-  能源效率基準 (EnB)



作者

-  劉嘉豐¹，嘉豐機械技師事務所 / 機械技師
-  詹維華²，惠民實業股份有限公司 / 事業二處協理
-  許家維³，惠民實業股份有限公司 / 事業二處副理
-  王建智⁴，惠民實業股份有限公司 / 水務部廠長
-  許宏博⁵，雲林縣政府水利處 / 處長

Abstract

Facing the dual challenges of escalating global climate change and aging infrastructure, the conventional "passive treatment" -oriented operational model of wastewater treatment plants (WWTPs) has proven increasingly inadequate in addressing the growing complexity of compounding risks. This study aims to explore the core strategies for modern WWTPs to build "operational resilience," driving their transition into Water Resource Recovery Facilities (WRRFs). The research proposes three major management frameworks: (1) Water resource adaptation: mitigating regional water scarcity risks through reclaimed water reuse; (2) Energy resilience: constructing microgrids that integrate green energy, energy storage, and smart systems; and (3) Predictive asset management: establishing tiered monitoring mechanisms to shift maintenance from reactive repair to proactive risk prevention.

The Douliu Water Resource Recovery Center and Hugao WWTP in the Yunlin region serve as empirical case studies. The results indicate that the comprehensive implementation of a digital equipment identification system (QR-Code) reduced the average abnormal response time by 30%. In terms of hardware optimization, the Hugao plant optimized its blower air pipelines, achieving annual energy savings of 657,000 kWh, and utilized the Energy Performance Baseline (EnB) to promote off-peak operations. The Douliu plant introduced a sludge dryer and installed a rooftop solar microgrid system with a total capacity of 499.2 kWp. The study highlights that although the microgrid is constrained by weather conditions and limited plant area, preventing it from independently supplying the plant's entire energy demand around the clock, it generates approximately 603,000 kWh of green energy annually. This stably replaces nearly 42% of the facility's daily electricity consumption, significantly reducing reliance on a single utility grid. Through the integration of digital management, predictive maintenance, and proactive energy strategies, infrastructure operations can be effectively secured, concretely realizing the sustainable goals of net-zero emissions and a circular economy.



Keywords:

-  Operational Resilience
-  Water Resource Recovery Facilities
-  Microgrid Integration
-  Predictive Maintenance
-  Energy Performance Baseline

壹、前言

污水處理廠作為現代城市運作的關鍵基礎設施，其營運穩定性直接關係到公共衛生、水體環境品質以及整體社會經濟的延續。過去的環境工程設計與基礎設施管理，多半著重於單一系統的處理效能；然而，隨著全球氣候變遷加劇、極端天氣事件（如強降雨與長期乾旱）常態化、基礎設施逐漸老化，傳統以「被動處理」為導向的污水廠營運模式，已無法應對日益複雜的系統性與複合型風險。

營運韌性不僅要求設施在面臨外部強烈衝擊（如極端洪災、無預警斷電、設備老化故障等）時能夠維持核心的污染防治與水資源回收功能，更強調在災後能夠以最快速度恢復正常運作，並透過系統化的學習機制不斷優化基礎設施架構與管理流程。

貳、氣候變遷衝擊與水資源調適

將處理後的放流水進一步透過適當技術淨化為「再生水」，是提升區域整體水資源調配韌性的關鍵戰略。根據內政部國土管理署2025年數據顯示，臺灣目前共有84座水資源中心投入營運，平均每日可產生約315~356萬噸的放流量。公共污水處理廠的放流水來源極為穩定，完全不受降雨豐枯與季節變化的影響。目前每日提供產業界及民眾作為次級用水的使用量約

為42.5萬噸，而其潛在的開發總量潛勢預計每日可達60.3萬噸。

將污水處理廠與高科技產業供水系統相互連結的策略，可以有三階效應：

一、降低水資源風險：

再生水作為產業的「保險用水」，降低了高耗水產業在乾旱時期因缺水而停產的鉅額經濟損失風險。

二、民生用水保障：

透過工業端使用再生水，將節省下來的自來水轉供民生使用，提供區域水源更多元的調配彈性，緩解了極端氣候下的水資源競爭。

三、財務與產業韌性：

再生水的穩定長期供水合約，為污水處理廠創造了額外的營收來源，使其有更充裕的資金投入設備升級、引進智慧化管理與循環水設施。

參、能源韌性構築與微電網系統整合

污水處理是高度耗能的產業，尤其在二級生物處理（如活性污泥法）階段，提供微生物好氧分解有機物的曝氣鼓風機耗電量，通常佔全廠總耗電量的50%至70%。此外，進水泵浦的揚水作業、污泥脫水設備的高速運轉，高度仰賴穩定且大容量的電力供應。一旦發生區域性停電，

污水處理廠若失去電力，不僅會導致未經處理的污水直接溢流，而造成嚴重的環境污染，生物處理單元中的好氧微生物群落更會因缺氧而在數小時內大量死亡；即使後續電力恢復，重新培養微生物與恢復處理效能的過程可能長達數週。

傳統的解決方案主要依賴設置大型柴油發電機作為緊急備用電源。然而，在面對氣候變遷引發的大規模複合型災害時，柴油發電機的侷限性逐漸暴露：其一，廠區內的燃料儲存量通常僅能維持數天的運轉；其二，當區域性災難（如颱風或地震）導致道路基礎設施中斷時，柴油的運補供應鏈極為脆弱；其三，柴油發電機的高碳排放特性與設備維護成本，並不符合現代污水廠追求淨零排放與永續營運的目標。

因此，導入微電網(Microgrid)系統成為現代污水處理廠構築能源韌性、突破傳統備援限制的關鍵解方。微電網透過整合分散式能源、儲能設備與智慧能源管理系統(EMS)，使廠區在面臨外部市電網路異常時，能迅速切換至「孤島模式」(Island Mode)獨立運行，確保核心污染防治功能不中斷。具體而言，污水處理廠的微電網系統建構可涵蓋以下三大構面：

一、多元創能與綠電整合：

善用廠區既有空間（如處理池上方、廠房頂部）建置太陽能光電系統；同時，

若廠區具備厭氧消化設施，應最大化污泥沼氣發電效能。透過「自發自用」的綠電產出，不僅能降低平時對市電的依賴與營運成本，更實質呼應了淨零碳排的永續政策。

二、儲能系統(Energy Storage System, ESS) 建置：

在平時營運中，利用離峰時段儲電、尖峰時段放電，以降低契約容量超載風險與電費支出。當市電無預警中斷的瞬間，儲能系統能無縫接軌提供瞬態電力，保障監控系統與關鍵機電設備（如進流馬達、基礎曝氣）不跳脫，為後續備援發電機的啟動爭取黃金緩衝時間，避免系統全面停擺。

三、智慧化能源管理系統(EMS)：

在災變等緊急狀況下，EMS能依據預設的韌性邏輯，自動卸載非關鍵設備，將有限的自產電力與儲電集中供應至維持生物處理系統存活的核心設施，最大化極端條件下的能源使用效率。

儘管微電網系統為污水處理廠構築了堅實的能源韌性，但在實務導入上仍具備若干限制。以太陽能為主的再生能源受限於天候與日照時間，無法實現全天候穩定發電；其次，污水處理廠內可供設置儲能與光電設施的腹地或廠房屋頂面積有限，直接制約了系統的建置規模；受制於上述

問題，微電網在污水處理廠的定位，應為「輔助市電、削減尖峰負載與提供災變備援」，降低市電單一依賴風險之效益。

透過微電網的建構，污水處理廠不僅能擺脫單一依賴柴油發電機的脆弱性，更能將被動的防災思維，轉化為平時節費減碳、災時穩定運作的「主動式能源管理」策略，全面提升廠區的營運韌性。

肆、資產管理、設施修復與預算最佳化

污水處理廠的營運韌性最終仍建立在實體管網與機電設備的可靠度上。然而，面對龐大且逐漸老化的基礎設施群，機構經常面臨預算拮据的困境。因此，如何在有限的財務資源下，制定科學化的設施生命週期管理與修復策略，是韌性管理的另一核心課題。為突破資源限制並實現預算最佳化，現代污水處理廠應建構一套「分級化與數據導向」的資產管理機制：

一、建置階層式狀態監測與預測性維護：

管理應從被動式的「壞了才修」轉型為動態的「預測性介入」。實務上應針對機械與電氣系統，建立嚴密的階層式保養網：

- (一) 常規保養與電氣監測：落實每月定期的「一般保養」與「預防性保養」，確保設備基礎潤滑與耗材更新。同時，針對全廠關鍵動力設

備，嚴格執行「電壓與電流之量測」。藉由比對三相電壓平衡度與實際運轉電流，可及早察覺馬達線圈絕緣劣化或負載異常等隱患，達成雙重防護。

- (二) 每季機械狀態監測：針對高負荷設備，每季定期進行轉速、震動與噪音量測。透過持續收集這些運轉特徵數據，建立設備的機械健康基線；當數據偏離正常值時，維護團隊能在設備發生災難性損壞前進行針對性檢修，大幅降低無預警停機的營運中斷風險。

二、導入專業鑑定與風險導向維護：

面對核心且昂貴的大型機電設施（如主進流泵浦、大型曝氣鼓風機等），除了廠內的巡檢與監測外，每年應定期委請專業機械技師到場進行「設備健全度評估」。透過深度的機械動力與疲勞分析，綜合評估設備的「故障機率」與「故障後果嚴重度」。將有限的維修預算與人力優先投入於高風險設施，確保關鍵系統的絕對可靠度。

伍、提升營運韌性之關鍵策略

以雲林地區斗六水資源回收中心及虎高污水廠為例，在提升營運韌性之關鍵策略，主要分為三項：分別為（一）數位化韌

性管理機制、(二)能源與節能、(三)氣候韌性與應變三個部分。

一、數位化韌性管理機制：

(一) QR-Code 資訊化巡檢：於斗六及虎高廠區全面建立設備數位身分證(QR-Code)，將巡檢路徑、即時數據與維修紀錄上傳雲端。透過行動化管理，平均縮短異常反應時間 30%。

(二) 智慧化監控中心：導入 SCADA 系統進行 24 小時遠端監控，透過大數據分析設備震動與電流變化，實現「預防性維護」。

二、能源與節能韌性：

(一) 能源績效指標 (EnPI) 建構：過去廠區的節能措施多仰賴經驗法則與單一設備的汰換，缺乏系統性的評估標準。為此，斗六廠不僅全面設置智慧電表，鎖定 20 HP 以上之大功耗動力設備以掌握全廠 85 % 之用電結構，更進一步導入「能源效率基準(Energy Performance Baseline, EnB)」與「能源績效指標 (Energy Performance Indicator, EnPI)」的科學化分析框架。透過長期盤點進流量、設備運轉時數與耗電量之間的數據關聯，廠區得以建構專屬的能耗基線模型。此一科學化診斷機制，能精準揪出不合理的隱形

能耗熱區(例如：全時段固定負載過高、離峰時段未有效降載等)，為後續推動離峰運轉調度、變頻優化與用電契約合理化，提供最堅實的決策依據。

(二) 工法節能優化：針對虎高廠鼓風機系統進行變頻改裝，並透過空氣管線連通工程，將原本需兩臺運行之 100 HP 曝氣機優化為一臺運作，每年節電達 65.7 萬度。

三、氣候韌性與應變：

針對防汛期建立「預抽、降位、備援」三級機制。結合氣象局即時氣候數據，提前將管網水位降至低位，並定期進行備援發電系統之全載模擬演練。此外，調和池或流量調節設施具有有效削減瞬間尖峰流量，緩衝處理系統衝擊之功能，亦可做為強化氣候韌性之重要選項。

陸、案例分析：雲林地區營運績效

以雲林地區之斗六水資源回收中心為實證對象，在斗六市水資源回收中心能源效率基準建構中，探討韌性管理策略之實際導入成效。經由系統化的優化，其主要績效具體展現於以下六大面向：

一、建構能源效率基準 (EnB) 與數據導向診斷：

過去污水廠的節能多仰賴經驗法則，

難以量化真實成效。為精確診斷廠區的耗能熱區並驗證節能策略，斗六廠領先導入「能源效率基準 (EnB)」進行系統性盤查。透過收集長期的營運大數據，廠區針對核心系統建立起科學化的數學模型，讓隱形的能源使用狀況具象化。

(一) 全廠能耗基準與操作盲點：透過進流量與月用電量的數據交叉分析，建立線性迴歸模型 $y=1.1517x + 107726$ (如圖 1 所示)。分析結果發現其判定係數 $R^2=0.0286$ 極低，這項科學證據打破了過去「處理水量越大、耗電越多」的傳統認知，證明全廠能耗多受限於「固定

設備耗電」與「缺乏彈性的全時段操作模式」。此一精確的數據診斷，成功促使管理端將優化重點轉向「離峰設備排程」與「曝氣精細調整」。

(二) 污泥乾燥機之效能指標：針對高耗能乾燥設備，進一步建立「蒸發水量與用電量」基準模型 $y=0.7579x + 1690.3$ (如圖 2 所示)，精確算出設備每蒸發 1 kg 水分約耗費 0.7579 kWh 電能。透過此一明確的量化基準，廠區不僅能即時監控設備的健康度，更能據此制定後續優化至 0.50-0.70 kWh/kg-H₂O 的

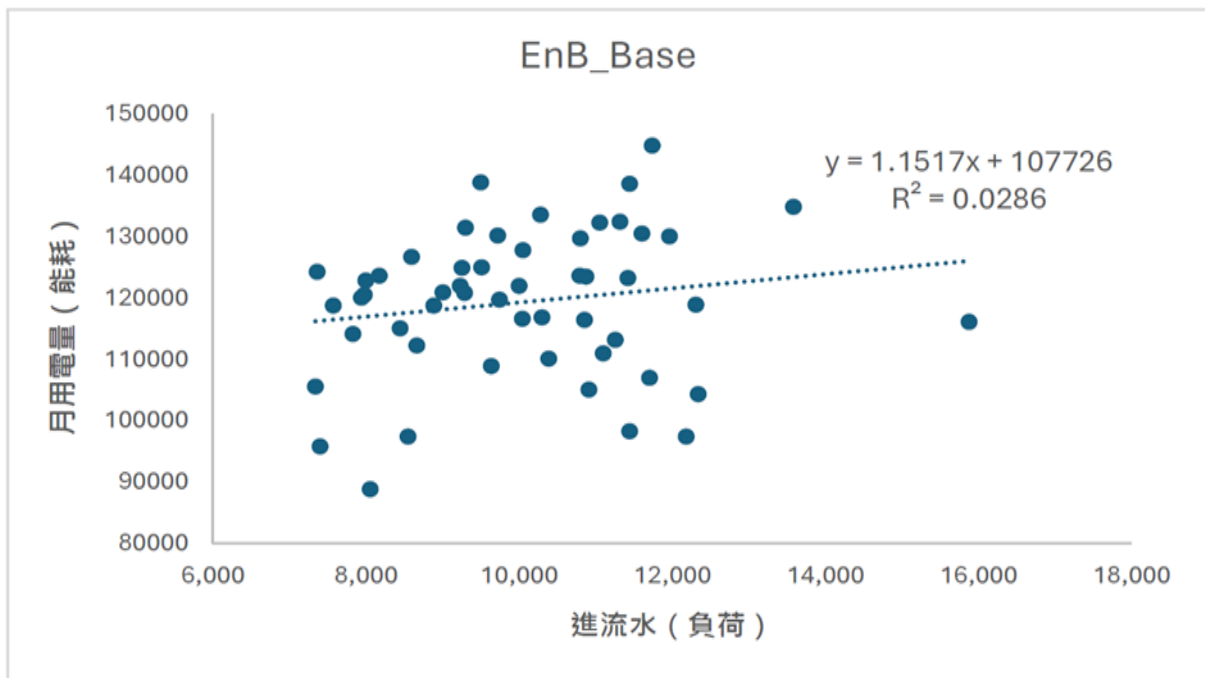


圖1 進流量與月用電量線性迴歸模型圖

深度節能目標。

二、能源韌性與硬體優化效益：

虎高廠針對大型鼓風機系統進行深度優化。除基礎的變頻改裝外，更實施了關鍵的「空氣管線連通工程」。透過管網氣動力學的重新配置與連通，成功平衡了各處理單元的供氣壓力與風量分配；打破了原設計一鼓風機僅對應單生物池的僵化配置，將原本需兩臺100 HP鼓風機同時運行之高耗能常態，成功整併縮減為單臺運作即可滿足全廠風量使用。管網優化策略，不僅降低了設備持續運轉的機械疲勞與維護頻率，更強化了廠區的財務韌性並降低營運碳排。

三、數位化資產管理與即時應變：

為確保前述「預測性維護」與現場操作之確實性，斗六及虎高廠區全面導入了設備數位身分證(QR-Code)系統。使第一線巡檢人員於現場掃描條碼後，不僅能隨時調閱該機電設施的歷史保養與維修紀錄，更整合了專屬的標準作業程序(SOP)與標準維護程序(SMP)。確保了現場人員在面臨突發設備異常或進行緊急備援切換時，能不受經驗限制，嚴格依循標準規範執行檢修步驟，大幅降低了高壓環境下的人為誤操作風險。

四、再生能源導入與綠電創能：

斗六廠積極活化廠區閒置空間，於廠

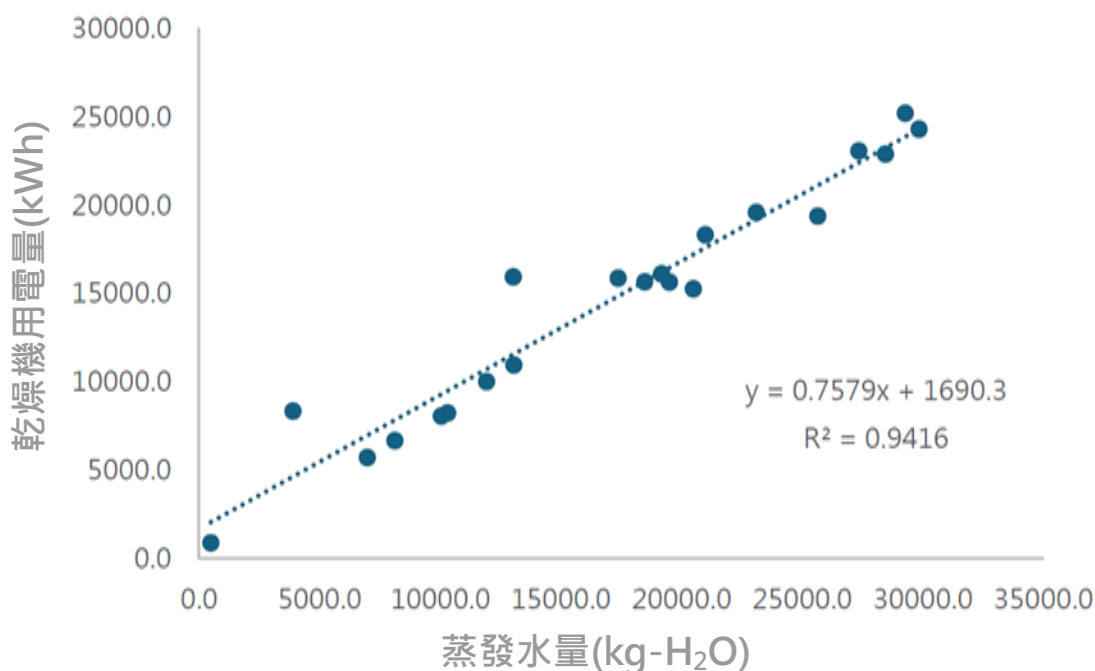


圖2 乾燥設備蒸發水量與用電量線性模型圖

房頂部增設「太陽能光電板」系統。此綠能設施的建置，使廠區從單純的「能源消耗者」轉型具備「自主創能」之能力。在實務應用上，雖受限於日照條件無法全天候發電，且廠區內可用於設置光電板的面積有限；透過太陽能自發自用，不僅有效降低平時對外部市電的依賴與整體電費支出。以斗六廠為例，目前建置之太陽能光電系統總裝置容量為499.2 kWp，年平均可產出約60.3萬度綠電。經初步估算，自產電力約可穩定替代全廠近42%的日常用電需求。

五、循環經濟與污泥減量效益：

污水處理過程無可避免將伴隨大量生物污泥產出，傳統脫水污泥含水率偏高，導致清運與後端處理成本居高不下，且頻繁的清運車輛進出亦增加碳排放隱憂。斗六廠引進並增設「污泥乾燥機」設備。透過熱能進一步降低污泥含水率，達成污泥體積與重量的顯著減量。此舉不僅大幅降低了委外清運次數，亦有效減輕了環境負荷，為廠區創造實質的經濟與環保雙重效益。

六、水資源調適與放流水多元利用效益：

呼應水資源回收中心(WRRFs)之轉型目標，斗六與虎高廠積極推動回收水之在地化與多元再利用。目前兩廠之回收水已建立常態供應機制，穩定提供雲林縣環保局作為市區洗街車及抑制揚塵之主要水

源，此舉大幅降低了市政清潔作業對傳統自來水之依賴。此外，虎高污水廠更進一步跨域整合，建置專屬輸水管線，將放流水直接引流至鄰近公園，作為生態池之常態性水源補充。這項建設不僅穩固了都市綠地與水體環境的生態基流，發揮微氣候調節功能，更成功將污水處理廠傳統的「鄰避效應」，轉化為親水、護生態的「鄰聚價值」，具體實踐了水資源循環與環境共好的韌性願景。

柒、結論

全球氣候變遷的劇烈衝擊與基礎設施日漸老化的雙重挑戰，現代污水處理廠的營運模式已無法依賴過去「被動處理」的單一思維。透過建構營運韌性的核心理論架構，並輔以雲林地區實證案例與大數據分析，深刻印證了從傳統設施邁向現代化韌性管理的必要性與具體成效。

在實體資產與能源管理方面，營運韌性的建立必須仰賴系統化的軟硬體整合。實證顯示，透過導入結合電氣與機械檢測的階層式監測機制，並輔以設備數位身分證(QR-Code)與標準作業程序之行動化，廠區成功將維護策略由故障後的被動搶修，轉型為數據導向的「預測性介入」，大幅提升了危機應變效率與資產可靠度。同時，廠區積極導入能源績效指標 (EnPI) 與能源效率基準 (EnB) 進行科學化診斷，結合管網優化、離峰排程、太陽能建置與

污泥乾燥減量，創下顯著節電績效，厚實機構能源與財務韌性。同時，微電網綠能建置（如太陽能光電）與污泥乾燥減量技術，不僅有效降低對單一市電的依賴，更創下顯著的節電與減碳績效，實質厚實了機構的能源與財務雙重韌性。以斗六廠為例，太陽能微電網年產綠電替代率近 42%，有效驗證其降低單一市電依賴之效益。

提升污水處理廠的營運韌性，其終極目標在於確保極端氣候下公共衛生與環境水體的絕對安全，並進一步創造與在地社區共好的生態價值。透過數位化管理、預防性維護、主動式能源策略的全面交織，以及放流水的多元活化利用，傳統的污水處理設施正穩健地破繭而出，邁向具備水資源調配、能源自給、循環經濟與鄰聚價值的「水資源回收中心」。這不僅為下水道基礎設施的營運立下了全新典範，更為現代城市的淨零排放、生態友善與永續發展，提供了最堅實的後盾。

參考文獻

1. Holloway, T. G., Williams, J. B., Ouelhadj, D., Yang, G., Martin, B., Wade, M. · Digital Water: Digital dynamic resilience for wastewater treatment processes: exploiting real data for long term resilience · International Water Association · 23 · 2022。
2. Gaskin, C., Stockil, K., Track, T., Horan, W., Lucht, A., Conheady, P. · Industrial Water 4.0 – A Framework for Catchment-based Digitally Integrated Industrial Water Stewardship · Environmental Protection Agency · Report No. 435 · 2023/07.
3. Pankow, N., Krause, S., Schaum, C. · Resilience Adaptation Through Risk Analysis for Wastewater Treatment Plant Operators in the Context of the European Union Resilience Directive · Water · 16(21) · 3098 · 2024/10.
4. US EPA · Power Resilience for the Water and Wastewater Sector · 2025/07 · <https://www.epa.gov/waterresilience/power-resilience-water-and-wastewater-sector>.
5. 環境部 · 國家氣候變遷調適行動計畫（112-115 年）（核定本） · 2023/09。
6. 環境部 · 水資源領域氣候變遷調適行動方案（112-115 年） · 2023/09。
7. 內政部國土管理署下水道永續營運組 · 2024/10/07。

8. 內政部國土管理署，「下水道統計年報」，2024。
9. 惠民實業，「115 年斗六水資評選簡報 (FINAL)」，2025。
10. 惠民實業，「115 年度虎高污水處理廠投標簡報 (FINAL)」，2025。
11. 國立雲林科技大學，「斗六市水資源回收中心能源效率基準建構」，2025。

國內公共污水處理廠發展微水力發電之潛力

-以中區污水處理廠為例



摘要

隨

著全球能源轉型與淨零排放政策推動，開發公共污水處理廠龐大的水力動能已成為永續發展關鍵課題。本研究以高雄「中區污水處理廠」為場域，探討如何利用其龐大且穩定的放流水資源進行微水力發電規劃。中區廠自1987年啟用至今，日平均處理水量達750,000 CMD，且民生污水進流量於枯水期間較無顯著降低影響，尚符合其設置條件。

本研究參考「水利建造物設置小水力發電規劃技術參考手冊」之規範，評估廠內各處之發電潛能，針對案廠進行計算設計流量及設計水頭後，最終選定場域內南加氯消毒池東側放流池作為開發腹地。經實測評估，該處具備約3.40公尺之可用位能差。為極大化發電效益，本計畫採用(20+30)kW之雙水輪機組配置，取代傳統單一機組設計，以彈性因應不同時段流量波動。

研究結果顯示，透過2024年3月至10月之流量數據模擬，雙水輪機組預計每小時平均發電量可達49.16kW，每日最大產電量約1,179.93 kWh，每年發電量可至389,377 kWh。本案不僅落實放流水能量回收，大幅提升廠區能源自給率，亦建立一套符合官方技術規範之污水設施微水力開發模式，為未來國內水資源回收中心建立類似系統提供重要技術指引與實務參考依據。



關鍵字：

- 微水力發電
- 污水處理廠
- 豎軸水輪機



作者

- 蔡易勳¹，高雄市政府水利局/局長
- 林昆德²，高雄市政府水利局/科長
- 彭信源³，高雄市政府水利局/股長
- 蔡青峰⁴，磐誠工程顧問股份有限公司/副理



Abstract

With the global push for energy transition and net-zero emission policies, developing the vast hydropower potential of public wastewater treatment plants has become a critical issue for sustainable development. This study focuses on the "Central District Wastewater Treatment Plant" to explore the planning of micro-hydropower generation utilizing its massive and stable effluent resources. Operating since 1987, the Central District Wastewater Treatment Plant has an average daily treatment capacity of 750,000 CMD. Furthermore, the inflow of domestic wastewater does not experience a significant decrease during dry seasons, making it well-suited for installation.

Referring to the "Technical Reference Manual for the Planning of Small Hydropower Generation in Hydraulic Structures" issued by the Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, this study evaluated the power generation potential across various locations within the plant. After calculating the design flow and design head, the effluent basin on the east side of the south chlorination contact tank was selected as the development site. Field measurements and evaluations indicate that this location possesses an available hydraulic head of approximately 3.40 meters. To maximize power generation efficiency, this project adopts a (20+30) kW dual-turbine configuration, replacing the traditional single-unit design, to flexibly accommodate flow fluctuations during different periods.

The research results, based on flow data simulations from March to October 2024, indicate that the dual-turbine system is expected to achieve an average hourly power output of 49.16 kW, a maximum daily energy production of approximately 1,179.93 kWh, and an annual energy production of up to 389,377 kWh. This project not only realizes energy recovery from effluent and significantly enhances the plant's energy self-sufficiency, but also establishes a micro-hydropower development model for wastewater facilities that complies with official technical specifications. It provides essential technical guidance and practical reference for domestic water resource recovery centers to build similar systems in the future..



Keywords:

-  Micro hydropower
-  Wastewater treatment plant
-  Vertical-axis type water turbine

壹、前言

中區污水處理廠自1987年啟用，為高雄地區規模最大之污水處理廠，透過放流水位能差轉換為電能，以提高能源回收效率並優化設施運行效益。該處放流水經過初級沉澱與消毒，相較其他單元水質較潔淨，有助於降低設備磨損並提升運行穩定性。此外，中區污水處理廠自啟用以來，放流量穩定，日均處理水量約750,000 CMD，最大可達900,000 CMD，適合作為穩定發電水源，具備開發小水力發電之優異條件。傳統污水處理屬耗能產業，若能有效利用場域內南加氯消毒池至排放口間約3.40公尺之位能差（落差），將能量回收轉換為基載電力，不僅能優化設施運行，亦符合國家減碳目標。近年《再生能源發展條例》修法鼓勵利用既有水利構造物發電，有別於一般水利設施，於污水處理廠推動微水力發電必須以「不影響原污水處理及放流流程」為首要原則，因其攸關污水處理廠營運韌性，亦為本案水理模擬與機組配置之核心依據。

觀察國外經驗，如挪威北部黑爾格蘭區Øvre Forsland小水電站，利用福斯蘭河157 m的水位高差發電，裝設兩台法蘭西斯水輪機，每年可產生30 GWh的電能，足以供應1,600 戶家庭使用；國內如后里圳低落差示範電廠等亦積極推動。惟國內外於污水處理廠設置微水力發電之成功案例較少，本計畫旨在藉由於中區污水處理廠裝

設微水力系統，透過實務數據與官方技術手冊規範，驗證污水處理廠開發微水力之高效路徑。

貳、研究方法

本計畫參考引用「經濟部水利署河川小水力發電開發參考手冊」（水利署，2023），評估案場欲計算小水力發電案場之發電潛能，先針對案場進行計算設計流量及設計水頭（有效落差），方能決定裝置容量及水輪機發電機組型式，最後計算案場水力潛能，其研究流程如圖1所示，因此本研究團隊彙整統計中區污水處理廠2024年3月至10月南加氯消毒池東側放流池操作維護紀錄「中區污水處理廠2024年年報」（高雄水利局，2024），該廠流量計為每5分鐘紀錄一筆瞬時流量，統計該池最大瞬時流量為3.85 CMS（如圖2），時間為2024年7月10日，而2024年3月至10月瞬時流量平均為1.74 CMS（如表1）。

參考「經濟部水利署河川小水力發電開發參考手冊」（水利署，2023），手冊建議以超越機率50%估計設計流量，並依案場情況考量下游保留水量。流量的超越機率係指流量於統計時間內，「被等於或超過」的時間或次數的百分比，常以歷史流量資料搭配威伯公式找出流量資料點與其發生機率間之關係，進而求得流量超越機率及所對應之流量值，一般而言，流量越大其超越機率越小，流量越小超越機率

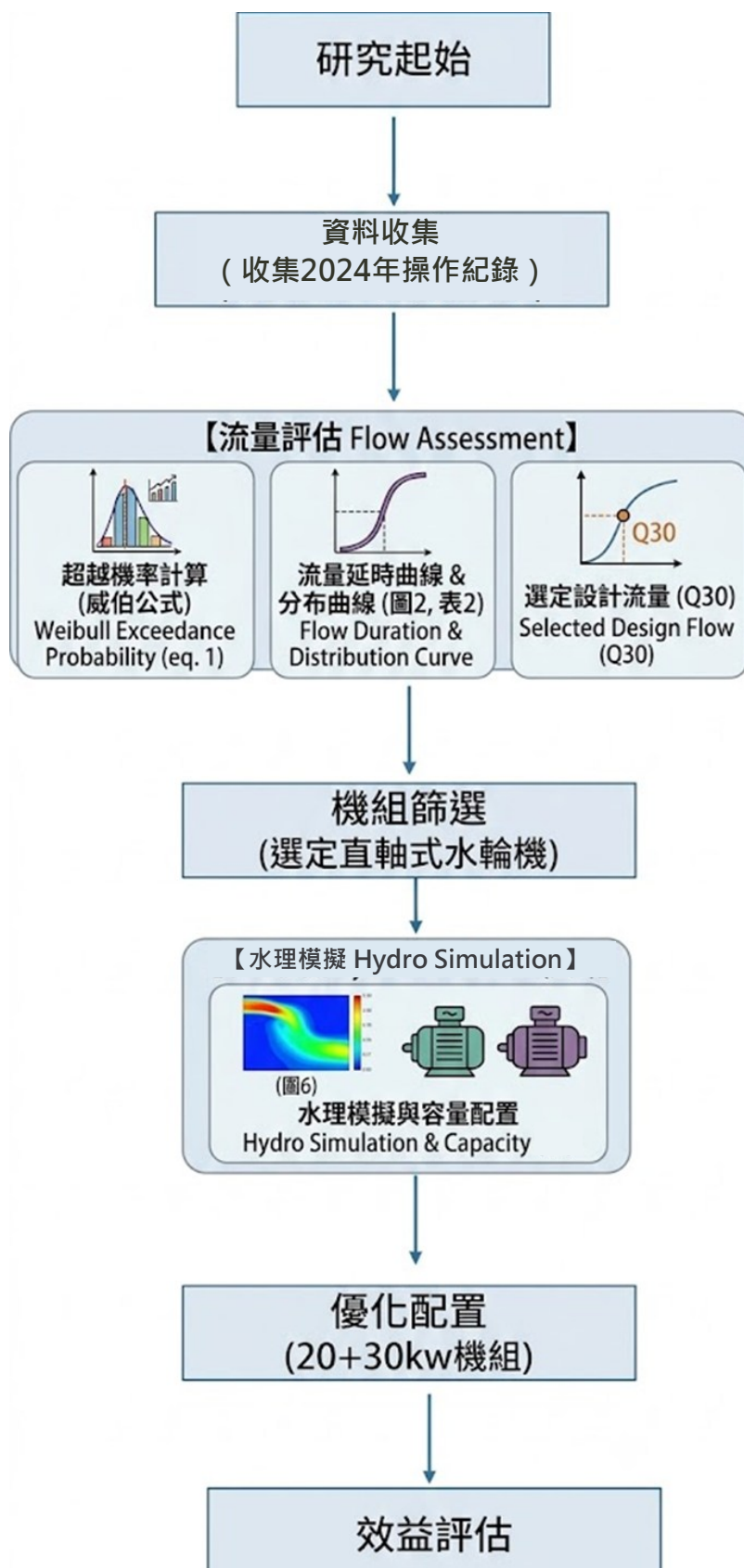


圖 1 本計畫研究方法

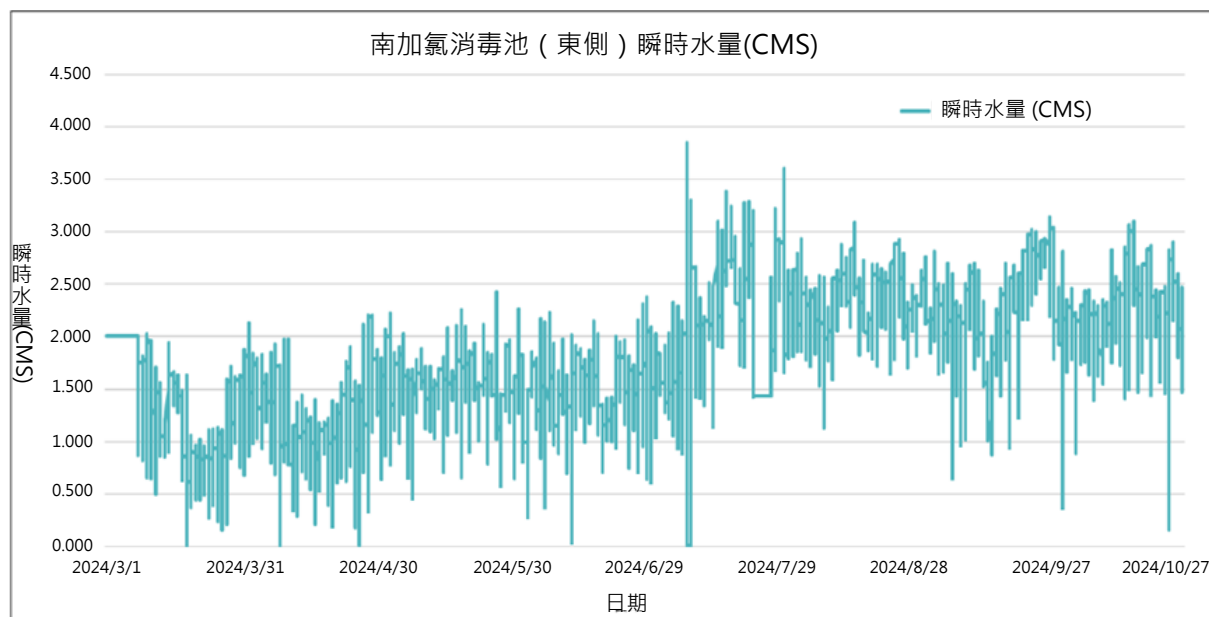


圖 2 2024 年 3-10 月份南加氯消毒池東側放流水池瞬時水量趨勢圖

表 1 中區污水處理廠南加氯消毒池放流池流量統計資料

日期	瞬時平均水量(CMS)	放流處理水量(CMD)
2024/03	1.32	3,535,488
2024/04	1.14	2,956,800
2024/05	1.50	4,012,800
2024/06	1.43	3,698,880
2024/07	1.82	4,872,192
2024/08	2.27	6,085,248
2024/09	2.23	5,774,400
2024/10	2.18	5,833,152
平均值	1.74	4,596,120

越大。計算設計流量方式如下：

1. 首先繪製流量延時曲線，先將案場推估之流量以大至小排序，以威伯公式 (Weibull) 計算各排序 m 之發生超越機率 P ， n 為流量觀測值樣本數：

$$P\% = \frac{m}{n+1} \times 100\%$$

2. 將各流量 Q_x 之發生機率 $P\%$ ，以流量為縱軸、超越機率為橫軸繪製成超越機率分布曲線，如圖 3 所示。
3. 曲線圖求出超越機率所對應之流量值 Q_x 為設計流量，並依案場情形考量下游保留水量，南加氯消毒池東側放流

池各項超越機率評估數據，詳表 2 所示。

4. 設計水頭計算需綜合考量河川斷面資料與現地調查高程數據，並扣除損失水頭以確定有效落差。蒐集高程資料時，可參考內政部數值高程模型、河川斷面數據及周邊橋墩竣工報告，必要時進行現場量測以補充缺乏數據。設計水頭為總水頭減去損失水頭，其中損失水頭包括主要損失和次要損失。主要損失多因管壁阻力而生，圓形斷面可使用達西-威士巴哈方程式計算。總水頭則是進水點與尾水點之高度差，作為設計基礎參數。在安裝軸流式微水力發電機組時有三個限制條

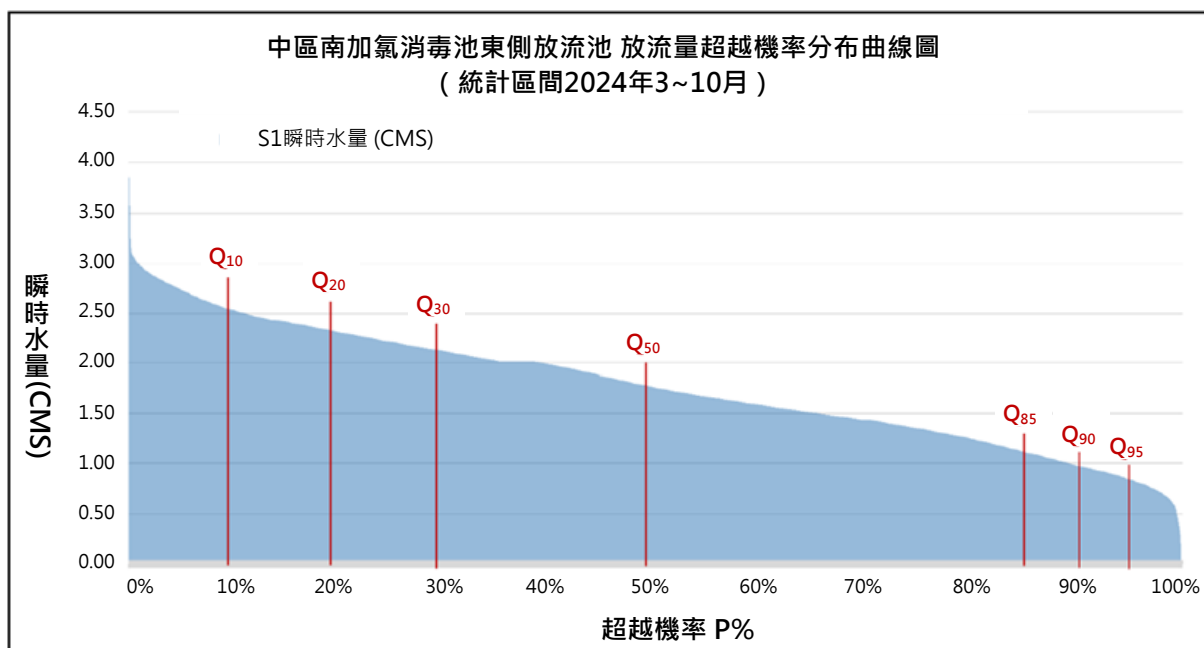


圖 3 南加氯消毒東側放流池放流量超越機率分布曲線圖

表 2 超越機率設計流量建議評估

超越機率	瞬時水量 (CMH)	瞬時水量 (CMS)	日期	時間	備註
Q ₁₀	9,105.65	2.53	2024/8/2	16:25	
Q ₂₀	8,289.63	2.30	2024/9/4	21:00	
Q ₃₀	6,322.21	2.11	2024/8/29	01:10	小水力發電採用最高
Q ₅₀	7,599.19	1.76	2024/6/15	19:15	川流式發電
Q ₈₅	4,003.45	1.11	2024/4/29	02:50	調整池式
Q ₉₀	3,521.32	0.98	2024/4/11	01:40	小水力發電採用最低
Q ₉₅	3,019.69	0.84	2024/4/24	16:25	生態基流量
平均	6,372.43	1.77	-	-	-

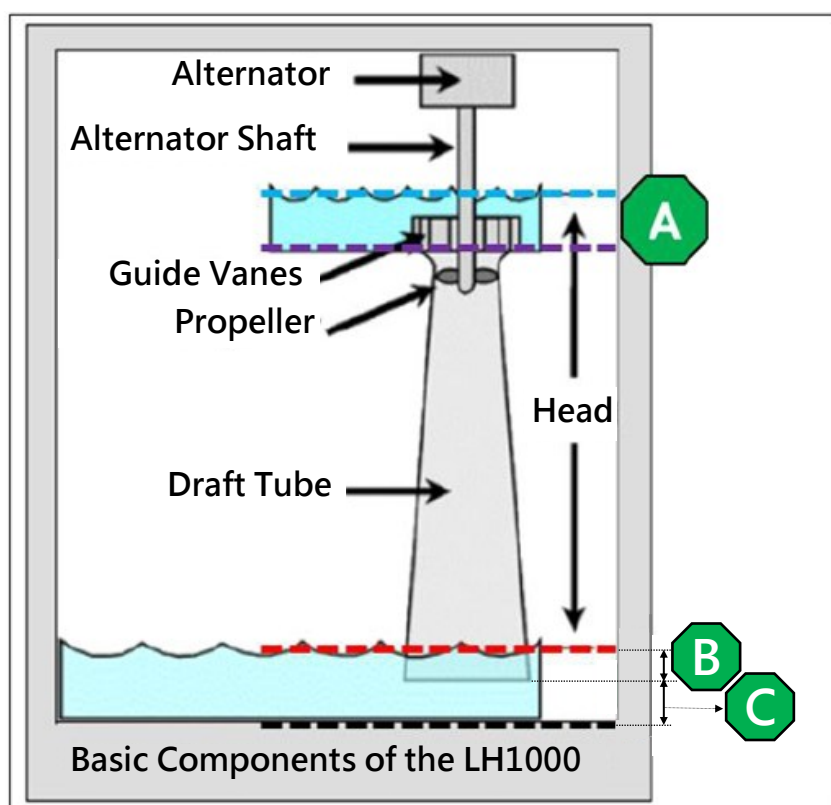


圖 4 中區南加氯消毒池東側放流池水頭限制條件

件：(A)進水口之浸沒水深 > 0.7 m、(B)放流處之浸沒水深 > 0.3 m、(C)放流口距渠底至少 0.7 m (詳圖 4)，本研究團隊針對上述資料彙整中區南加氯消毒池東側放流池有效水頭為 2.68 公尺，詳圖 5 所示。

5. 機組篩選：根據案場水頭、流量和發電量選擇合適的水輪機機型，其可將水的位能及動能轉化為機械能，並帶動發電之關鍵設備。水輪機可按水流能量轉換特徵，一般將水輪機分類為衝擊式(Impulse)及反力式(Reaction)等2大類；其中衝擊式水輪機再依據水流方向可分為水斗式、斜擊式及橫流式等3種，而反力式水輪機亦可依水流方向分為混流式、斜流式、軸流式及管

式等4種，目前也有混合水輪機可加以考量，各類水輪機對應之適用水頭範圍整理如表3所示，透過河川小水力發電推動參考手冊及推動案例(2023)，可發現現今國內營運中既有小水力電廠多採用豎軸式法蘭西式水輪機來進行發電，共計17處。國內目前有水利發電案場多位於天然河川，甚少應用於污水處理廠環境。考量污水處理廠放流水雖經處理，但相較於一般河川，仍需考量潛在微小懸浮固體或溝渠剝落生物膜等雜質之影響。豎軸型水輪機在設計上較能克服雜質卡阻與磨損問題，且便於後續人員維護與清理。基於上述雜質考量與維護便利性，經本研究團隊評估中區污水處理

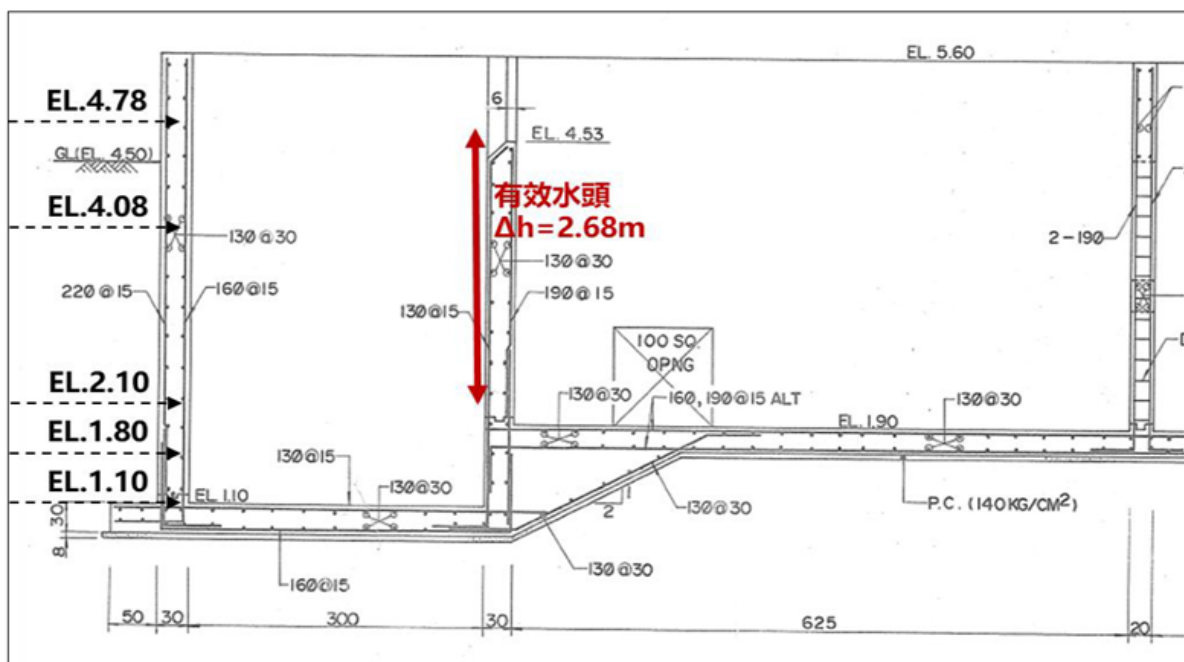


圖 5 中區南加氯消毒池東側放流池有效水頭示意圖

表 3 水輪機分類及適用水頭範圍資料

水輪機		
依據能量轉換	依據水流方向	適用水頭範圍
衝擊式 (Impulse)	水斗式(Pelton)	100~1,770
	斜擊式(Turgo)	50~400
	橫流式(Cross Flow)	10~100
反力式 (Reaction)	混流式(Francis)	10~700
	斜流式(Diagonal Flow)	4~120
	軸流式(Axial Flow)	3~80
	● 定槳式(Propeller)	
	● 轉槳式(Kaplan)	
	● 燈泡式(Bulb)	
	管式(Tubular Flow)	<20
	● 管流式(Tube)	
	● S管流式(S type)	
沉水式(Submersible Hydroturbine)		2.5~20

廠南加氯消毒池東側放流池放流處，較適用於豎軸型式水輪機組來進行發電。

參、研究成果

本研究將南加氯消毒池東側放流池現況水理進行模擬分析，紅色斜線位置為後擴再生能源項目微水力水輪機組施作範圍，詳圖 6 所示。假設放流以平均流速 $Q=1.7$ CMS 進行水理分析，當污水放流過程中堰面溢流通過平均流速約 1 m/s、平均水深 0.23 m，距離地面水位 EL 為 4.76

m，詳圖 7 所示。本計畫發電有效水深為 2.68 m，在安裝軸流式微水力發電機組時有三個限制條件：(A)進水口之浸沒水深 > 0.7 m；(B)放流處之浸沒水深 > 0.3 m；(C)放流口距渠底至少 0.7 m，為避免產生迴水影響調節池，控制條件堰頂水深為 0.23 m。

發電潛能計算包含案場之裝置容量、年總發電量、容量因數計算，若裝置容量設置太小，發電效益將過低；若裝置容量設置太大，則在流量低時將會減低發電效率，甚至無法發電，此時容量因數將過

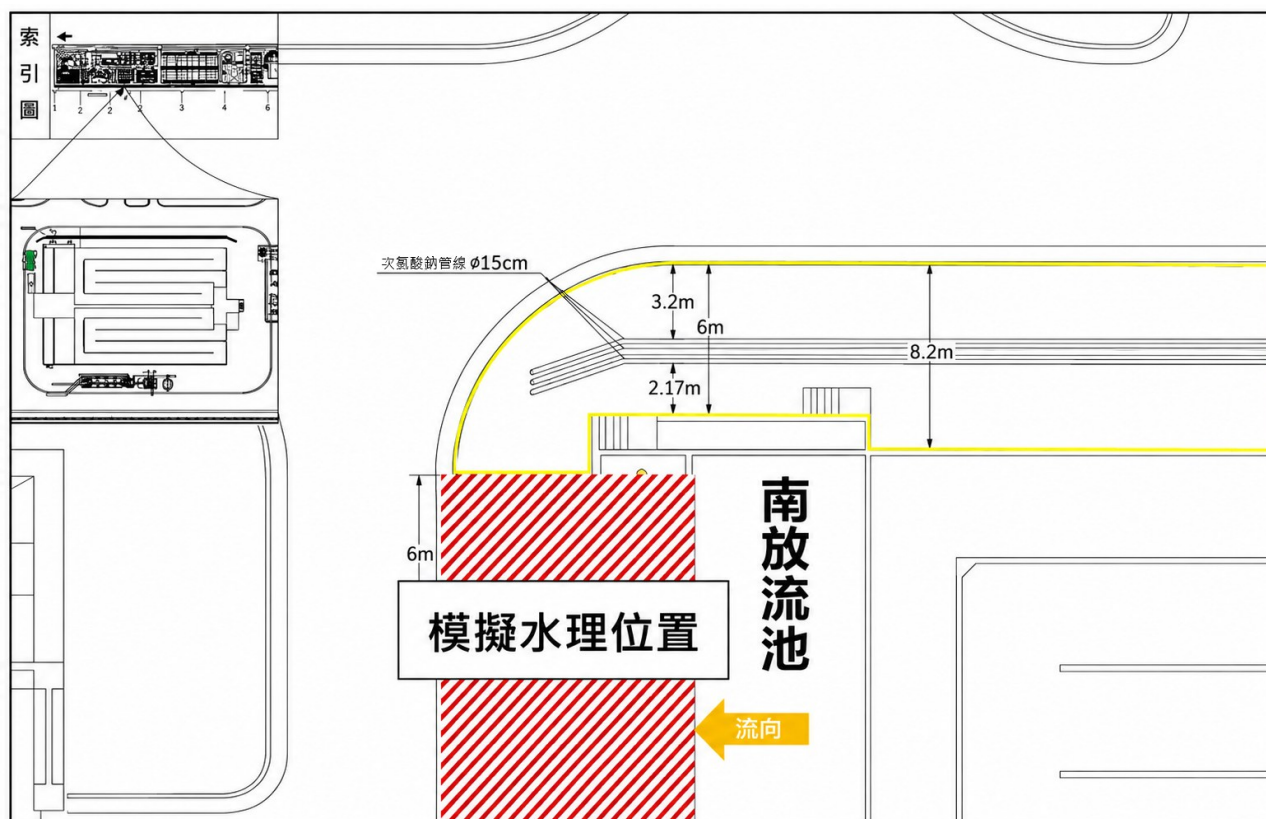


圖 6 微水力水輪機組施作範圍

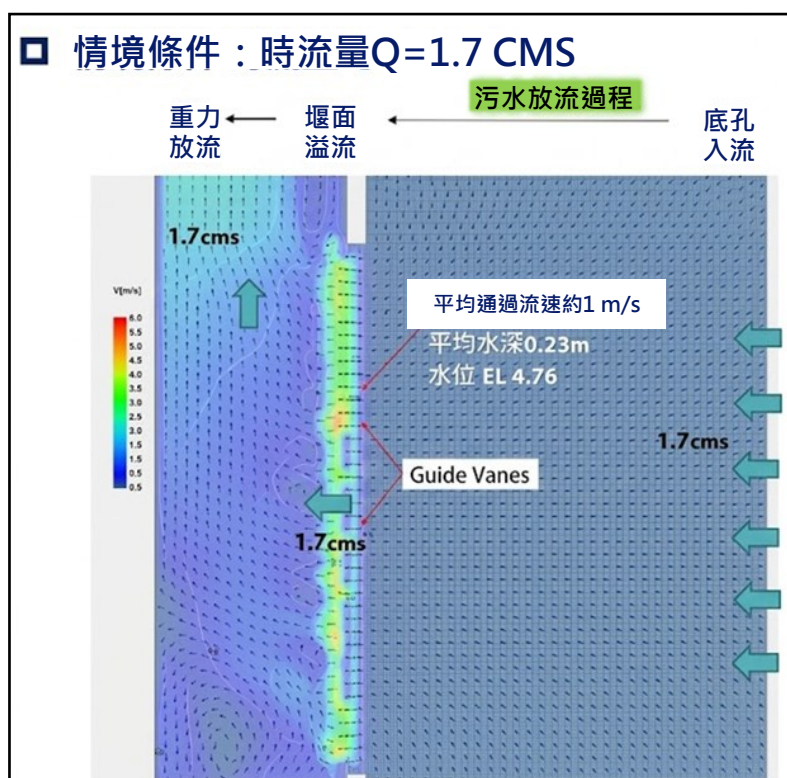


圖 7 中區南加氯消毒池東側放流池現況水理（俯視圖）

表 4 發電機及水輪機參數

型式	發電機參數/非同步發電機		
額定電壓(V)	400	頻率(Hz)	60
功率因素 $\cos \varphi$	0.8	額定轉速(rpm)	1,200
絕緣等級	B/B		
型式	水輪機參數/臥軸伸-貫流式		
額定水頭(m)	2.68	額定流量(CMS)	0.29
水輪機額定出力(kW)	50	額定效率 η (%)	85
轉輪材質	0Cr13Ni4Mo	氣蝕係數(m)	1.5

低，因此各案場可依需求評估最佳之設計流量。選取對案場最適合之開發規模。發電機跟水輪機參數表詳表 4 所示。

根據前述設計流量及設計水頭擇定水輪機機組，針對電量計算方式說明，相關計算公式如下：

1. 裝置容量(kW)：

$$P = 9.81 \times Q \times H_e \times \eta$$

其中，P 為裝置容量(kW)；9.81 為重力加速度(m/s^2)；Q 為設計流量(CMS)，建議可採超越機率 50%之流量(Q_{50})作為設計流量，另可考量生態基流量與用水標的等相關下游保留水量； H_e 為有效水頭落差(m)； η 為水輪機和發電機之合成效率，惟流量的減少亦可能造成效率降低。

2. 年總發電量(kWh)

年總發電量為一年內可以發電的電量之估計值。若實際流量大於設計流量，則使用設計流量作為流量輸入；若實際流量低於設計流量，則以實際之流量輸入。而案場若為川流式，當流量低於機組規格流量 50%時，通常無法驅動水輪機組，則視為不發電；若案場為調整池式或水庫式，則需依放流情況進行推估，年總發電量計算公式說明如下：

$$\text{年總發電量(kWh)} =$$

$$9.81 \times Q \times H_e \times \eta \times T(\text{hr}) \times \text{流量利用率}$$

(其中，T 為時間長度(hr)，並考量最低可發電流量，以及電廠型式、機組檢修等，並視情況酌予 90%~97%的流量利用

率，作為年總發電量計算。)

以河川小水力發電開發手冊之超越機率 50%作為設計流量， Q_{50} 約 1.76 CMS，本案場為污水處理廠處理放流水，相對河川流量較為穩定，為提高發電效益，建議採超越機率 30%作為設計流量， Q_{30} 約 2.11 CMS。南加氯消毒池東側放流池額定水頭為 2.68 m，若以 Q_{50} 作為設計流量，則每小時可發電量約 39.33 kW，每日最大發電量約 943.94 kWh，每年最大發電量則約為 311,502 kWh；若以 Q_{30} 作為設計流量，則每小時可發電量約 47.15 kW，每日最大發電量約 1,131.66 kWh，每年最大發電量則約為 373,448 kWh。可發電量評估詳表 5 所示。在評估可發電量後，本研究進一步探討機組容量之配置。由於中區污

水處理放流水流量穩定，為提高發電效益並考量廠區單日各時段之放流量仍會產生波動，若僅採用單一大型機組（如 50 kW），在枯水或深夜低流量時，將導致發電效率驟降甚至無法達到啟動條件而停機。因此，為兼顧發電效能與操作彈性，本案採用(20+30) kW 雙水輪機組組合。此雙機組設計可依據當下瞬時流量，靈活切換單獨運轉或併聯發電，不僅將最大化水資源利用率，更為後續結論中達到最佳發電效益奠定基礎。

肆、結論

考量中區污水處理廠處理水量穩定且放流池水位能差足夠，為提供多元化再生能源，規劃於放流渠設置 1 組(20+30 kW)

表 5 可發電量評估

超越機率	每日最大可發電量 (kW)	每年最大可發電量 (kW)	備註
Q_{10}	1,356.92	447,784	-
Q_{20}	1,233.56	407,076	-
Q_{30}	1,131.66	373,448	小水力發電採用最高
Q_{50}	943.94	311,502	川流式發電
Q_{85}	595.33	196,459	調整池式
Q_{90}	525.61	173,450	小水力發電採用最低
Q_{95}	450.52	148,671	生態基流量

水力發電機組提供本計畫產生再生能源。此搭配策略不僅能彈性應對污水處理廠時段性之流量變化，更於不影響污水處理既有流程之前提下，極大化能源回收效益之目標。兩台機組的額定水頭為 2.68 m，額定效率 $\eta(\%)$ 為 85%，流量須滿足 0.9 CMS 及 1.3 CMS，評估約可產生 49.16 kW。若每年運轉 330 日、每日有效發電 24 小時，年發電量約為 389,377 kWh。

效益評估：後續擴充工程規劃將於中區污水處理廠南加氯消毒池放流池安裝 (20+30) kW 水輪機發電機組，其中 20 kW 水輪機額定水頭為 2.68 m，額定效率為 85%，流量需滿足 0.9 CMS；30 kW 水輪機額定水頭為 2.68 m，額定效率為 85%，流量需滿足 1.3 CMS，若以電量評估 2023 年經濟部水利署河川小水力發電開發參考手冊 Q_{50} 作為設計流量，則每小時可發電量約 39.33 kW，每日最大發電量約 943.94 kWh，每年最大發電量則約為 311,502 kWh。由於中區污水處理放流水流量穩定，本計畫為提高發電效益並考量廠區單日各時段之放流量仍會產生波動，若僅採用單一大型機組，於枯水或低流量時將導致發電效率驟降甚至無法運轉。因此，為兼顧發電效能與操作彈性，本案採用(20+30) kW 水輪機組合，可依當下瞬時流量，靈活切換單獨運轉或併聯發電，預計每小時可發電量約 49.16 kW，每日最大發電量約 1,179.93 kWh，每年最大發電量則約為 389,377 kWh，惟發電量

仍受污水處理廠流量變動影響，因此後續驗收建議採區間測試方式，以確保發電效益達到預期目標。

參考文獻

1. 經濟部水利署，河川小水力發電開發參考手冊(2023)
2. 經濟部水利署，水利建造物設置小水力發電規劃技術參考手冊
3. 高雄市水利局，中區污水處理廠 2024 年年報

應用移動床生物膜反應器(MBBR)提升微電子製造廠用水韌性 之污水回用與零排放案例探討-以印度清奈工業園區為例



摘要

在 全球與臺灣各地，水資源短缺正對工業活動造成日益嚴峻的壓力。臺灣因降雨集中於梅雨與颱風季節加上地形因素，導致可儲存的水資源僅約18%。近年來，極端氣候使部分地區乾旱頻率上升。為降低風險，仰賴水資源的產業已積極導入廢污水再利用技術。隨著新一代高耗水工廠的興起，例如電動車、電池與半導體製造廠等，水再利用的重要性更勝以往。

本文將探討如何運用移動床生物膜反應器（Moving Bed Biofilm Reactor，以下簡稱 MBBR）技術，協助臺灣某科技集團於印度微電子廠廠區開發高效且具經濟效益的廢污水回用流程，實現廠區零廢水排放的目標，且同時降低營運成本與對環境的負面衝擊。

經約5個月的試運行與水質監測，在未啟動UF系統的情況下，MBBR系統的處理水質依然出色，在主要水質參數方面，皆能符合廠區需求及當地回收水標準。此結果驗證，MBBR生物處理系統在廢污水的處理上具備優異的處理效能，操作簡便、維護成本低等優勢，展現高度的實務應用潛力與業界參考價值。



關鍵字：

-  移動床生物膜反應器(MBBR)
-  廢水回用
-  零排放
-  微電子廠
-  印度



作者

-  李寧¹，艾奕康工程顧問股份有限公司/專案工程師
-  徐正雄²，艾奕康工程顧問股份有限公司/技術總監
-  洪榮聰³，鴻海科技集團/環保長
-  羅勇達⁴，鴻海科技集團/處長
-  鄧智文⁵，鴻海科技集團/工程師



Abstract

Across the globe and in Taiwan, water scarcity is placing increasing pressure on industrial operations. Although Taiwan receives relatively abundant annual rainfall, precipitation is concentrated during the plum rain and typhoon seasons. Combined with the island's steep terrain, this causes rainwater to rapidly flow into the ocean, leaving only about 18% of rainfall available for storage. In recent years, extreme climate events have further reduced the number of rainy days and increased the frequency of droughts. To mitigate these risks, water-dependent industries have actively adopted wastewater reuse technologies. With the rise of next-generation water-intensive facilities- such as electric vehicles, battery, and semiconductor manufacturing plants - the importance of water reclamation has become more critical than ever.

This article explores that Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) technology is applied to help clients develop efficient and cost-effective wastewater reuse processes, with the goal of achieving zero liquid discharge (ZLD) at industrial sites in India.

During five months of commissioning and water quality monitoring, the results indicate that even without activating the ultrafiltration (UF) system, the MBBR system consistently delivers excellent effluent quality. Key water quality parameters meet the reclaimed water standards set by client and local regulatory requirements.

These results validate the MBBR biological treatment system's outstanding performance in treating and reusing wastewater in the manufacturing facility. Its advantages, including operational simplicity and low maintenance costs, demonstrate strong practical applicability and significant reference value for the industry.



Keywords:

-  Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)
-  Wastewater Reuse
-  Zero Liquid Discharge (ZLD)
-  Microelectronics Manufacturing Facility
-  India

壹、背景介紹

臺灣某科技集團於印度清奈興建一座污水再生處理廠(STP)，用以處理及回收來自微電子廠內約 20,000名員工因工廠製程生產、宿舍以及食堂所產生的生活廢污水，每日處理量預計達3,000 CMD。由於廠區位於水資源短缺地區，且依當地法規及廠內水資源永續發展之用水需求，本廠的污水處理系統採零液體排放(Zero Liquid Discharge; ZLD)方式進行規劃處理。處理後的水將於廠區內重複使用，以達到廢污水完全回收及消除對環境影響之目標。

此專案不僅增加此廠於清奈工業區的用水韌性，減少對自來水用水的依賴，滿足廠區水資源永續發展的需求，更達成了廠區廢水淨零排放的願景及消除對水環境

的衝擊，進一步展現企業對環境保護與永續經營的承諾。

貳、設計基準

污水處理廠之設計進流量為3,000 CMD，採兩條平行的處理單元，每條處理單元水量為1,500 CMD；水質的部分依據客戶提供的條件，主要水質參數COD濃度落在400 mg/L以下、BOD濃度落在300 mg/L以下、懸浮固體(SS)的濃度落在200 mg/L以下、而氨氮的濃度則落在50 mg/L以下，其餘水質參數如表1所示。

處理後的水質，依據印度當地法規規定，不應低於2018年12月21日印度國家污水處理總局所頒佈之有關特大城市及大都會污水排放標準，以及2021年3月污水處

表 1 設計進流污水特性

參數	單位	進水濃度
水溫	°C	20 ~ 30
pH		6.5 ~ 7.5
化學需氧量 (COD _{cr})	mg/L	<400
生化需氧量 (BOD ₅)	mg/L	<300
懸浮固體 (SS)	mg/L	<200
氨氮 (NH ₃ -N)	mg/L	<50
總氮 (TN)	mg/L	<50
總磷 (TP)	mg/L	<5
動植物油 (O&G)	mg/L	<10

理廠之中水回用標準的要求。基於法規及此廠的終端用水需求（初步規劃將用於廠區澆灌、沖廁及冷卻水塔），本案的處理水質及回收水相關標準，如表2所示。

參、處理方法

本案污水處理以生物處理為主。表3比較了三種常見的生物污水處理技術：活性污泥法、膜生物反應器(MBR)與移動床生物膜反應器(MBBR)。

活性污泥法資本投資較低，但占地大、對流量負荷的衝擊性較差，且須要有經驗的操作人員進行污泥年齡等操作參數的調整；MBR出水水質優異，但投資及操作成本較高，且需定期進行膜清洗及更換，操作較複雜；而MBBR在投資資本與操作難度上相對適中，具備較高耐流量負荷衝擊性能力與良好的出水水質，不需污泥回流與膜清洗，不需定期更換曝氣氣盤，且未來擴展性高、操作容易，另因所

表 2 回收水及處理水質標準

參數	單位	特大城市 排放標準	回收水標準		本案處理 水質標準
			沖廁	灌溉	
水溫	°C	環境溫度	環境溫度	環境溫度	環境溫度
pH		5.5-9.0	6.5-8.3	6.5-8.3	6.5-8.3
化學需氧量 (COD _{cr})	mg/L	50	-*	-*	50
生化需氧量 (BOD ₅)	mg/L	10	10	10	10
懸浮固體 (SS)	mg/L	20	-*	-*	10
濁度	NTU	-*	2	2	2
氨氮 (NH ₃ -N)	mg/L	5	10	10	5
硝酸鹽氮 (NO ₃ -N)	mg/L	-*	10	10	10
總氮 (TN)	mg/L	10	10	10	10
總磷 (TP)	mg/L	1**	1	2	1
動植物油 (O&G)	mg/L	-*	10	10	10
大腸桿菌	MPN/100 mL	100	-*	-*	100
餘氯	mg/L	1	1	1	1

* 不適用; ** 用於排入池塘或湖泊的排放標準

需用地面積較小，相較於活性污泥法更適合用地受限之場址。綜合上述與考量當地缺乏具經驗的操作技術人員、場地空間有限、預期流量衝擊、有機負荷變化高、未來擴展性以及投資成本等因素，本案污水生物處理採用MBBR方法進行。

肆、MBBR介紹

MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) 為基於生物膜的污水處理技術，於生物池內填充約30-70%的塑膠填料作為微生物載體，其特點為微生物會自然地附著在專門設計的塑膠載體上，有效分解有機物，不須活性污泥回流來維持反應池的生物濃度。生物池內的懸浮固體濃度範圍為100至250 mg/L左右，相較低於傳統活性污泥法的2,500至3,500 mg/L。而MBBR處理程序可應用於包括生物缺氧、好氧等生物固定膜之有機物氧化、氨氮硝化、硝酸鹽氮脫硝等生物脫氮製程，具備操作的靈活性與適應性。

在生物載體材質方面，常見的載體材質可為聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)，因此類材質其化學穩定性高、耐久性強、微生物易附著。這些生物膜載體為微生物生長提供了大面積的受保護的且穩定的生長環境，從而促進微生物的生長及有效地降解污染物。

與活性污泥法作比較，MBBR製程主要的優勢在於：(一)所需空間小；

(二)操作簡便且無需控制污泥齡及污泥回流；(三)消除二級沉澱池中污泥膨脹的問題及其對出水水質影響的顧慮；(四)具備承較高的污水水質及水量波動的能力。相對於常見的MBR製程而言，MBBR製程在設備投資、人力維護費用及操作困難度上則友善許多，詳細比較請參考表3所示。

MBBR反應池使用生物載體的目的，在提供較高的比表面積，使得在微生物在生物載體的保護面積內形成更多的生物膜，加速生物膜的生長，同時減少生物反應器的容積及占地面積，增加了污水的處理能力及處理穩定性，如圖1呈現本案生物膜於填料中生長的過程。

因此，生物載體生物膜的可利用表面積取決於反應器容積，而基質通量則是關鍵的製程設計參數。受到廢水中基質濃度、溶解氧濃度、反應器攪拌的條件以及生物膜厚度等特性的影響。可建立適用於BOD去除、硝化及脫硝的基質通量關係，應用於MBBR製程設計中。

伍、處理流程

本案之污水處理流程如圖2所示，包括前處理、生物處理、深度處理及污泥脫水等。

前處理設施包含進水泵井、粗攔污柵、細攔污柵、調節池；污水於前處理單

表 3 不同生物處理流程之比較

項目	活性污泥法	膜生物反應 (MBR)	移動床生物膜 (MBBR)
資本投資	低	高	中等
占地面積	大	小	小
耐流量負荷衝擊	低	低	高
需曝氣鼓風機	是	是	是
需污泥回流	是	是	否
需進行膜清洗	否	是	否
前處理微篩要求	否	是	是
膜清洗藥劑需求	否	是	否
操作困難度	高	高	低
出水水質	中等	優異	良好



圖 1 本案 MBBR 生物載體與生物膜的生長情況

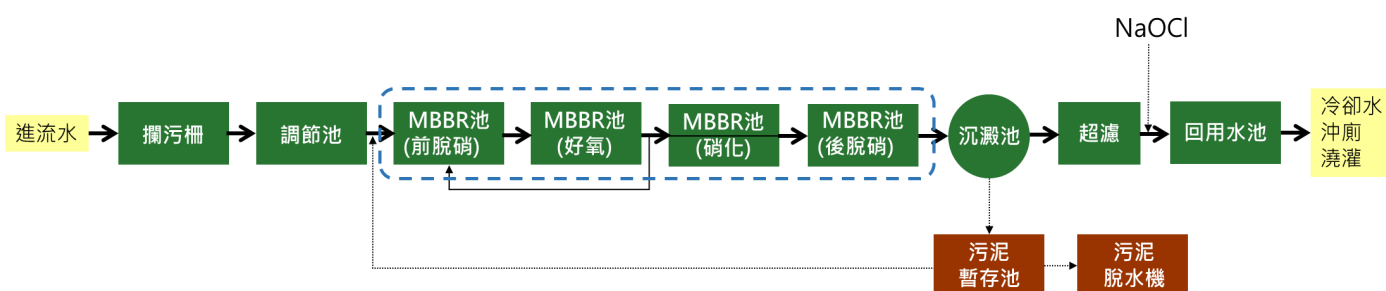


圖 2 本案污水處理流程

元移除較大的固體物雜質與油脂後，再進入調節池進行水質及水量調整。

而後透過MBBR生物處理單元（現場池槽及設備詳圖3及圖4）進一步分解水中的有機物（COD及BOD）與氨氮、硝酸鹽氮等主要污染物。在 MBBR 製程之後及二級沉澱池前，可投加金屬鹽類及高分子藥劑，以提高磷之去除效率。高負荷的

MBBR處理流程及高速率的BOD去除作業，可能會產生較分散且混濁的出流水，因此，通常亦可添加化學藥劑來改善絮凝作用以及提升出流水中懸浮固體的去除效率。

生物處理後沉澱池的出水，則進一步採深度處理，以確保達到回用水的標準。因應當地相關部門要求，本案採用超濾



圖 3 本案現場 MBBR（脫硝池）移動床生物膜反應器及攪拌設備



圖 4 本案現場 MBBR（好氧/硝化池）移動床生物膜反應器及曝氣裝置

(UF)作為深度處理單元，以有效降低水中濁度及色度，使出水水質達到各項回用水的用水標準。

陸、結果

實際進流污水水質彙整於表4所示，由表4可得知，進水流量在試運轉期間已能達到2,500 CMD的負荷。

經約5個月的運行，其處理水質，說明如下。在整廠未啟動超濾單元(UF)的情況下，其出水水質監測結果顯示如圖5所示，從圖中可清楚看出，進水井內的原污水顏色相對混濁，經過前處理、生物處理與沉澱後，其處理水在回收水池中的顏色明顯清澈，肉眼即可辨識出處理效果；而在數據量測方面，處理後的污水在主要參數方

面（如 COD、BOD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、濁度與大腸桿菌）皆已能符合回收水的用水標準，且出水水質穩定；而原預計再生水用途為澆灌、沖廁及冷卻使用，惟因實際水質優於原先預期，目前已100%作為冷卻水塔補水使用，有效達成節水與水資源永續利用之目標。

一、化學需氧量(COD)/生化需氧量 (BOD)

由圖6及圖7可觀察到於調節池中的化學需氧量(COD)濃度範圍為90至193 mg/L，而生化需氧量(BOD_5)則介於 30至114 mg/L之間。經過數周的調試後，出水的COD與BOD濃度明顯下降，且濃度變化趨於穩定，結果顯示回用水池中的COD與BOD濃度基本上分別維持在30 mg/L與4

表 4 實際進流污水水質水量

參數	單位	實際進水水質
流量	m^3/day	600 ~ 2,500
水溫	$^{\circ}\text{C}$	27 ~ 30
pH		6.8 ~ 7.9
化學需氧量 (COD_{cr})	mg/L	70 ~ 200
生化需氧量 (BOD_5)	mg/L	30 ~ 150
懸浮固體 (SS)	mg/L	40 ~ 200
氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)	mg/L	0.4 ~ 25
總氮 (TN)	mg/L	10 ~ 35
總磷 (TP)	mg/L	0.2 ~ 10
動植物油 (O&G)	mg/L	5 ~ 60

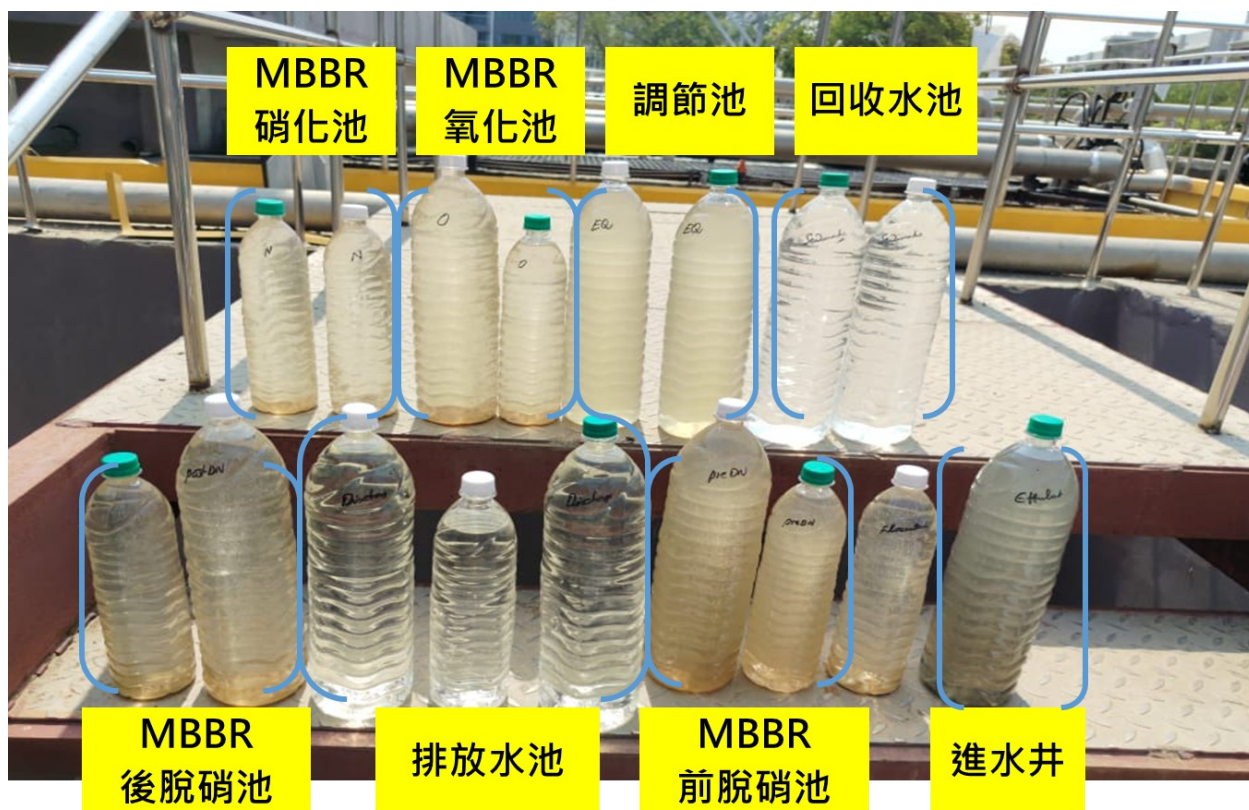


圖 5 進出水水質狀況 (未啟動 UF)

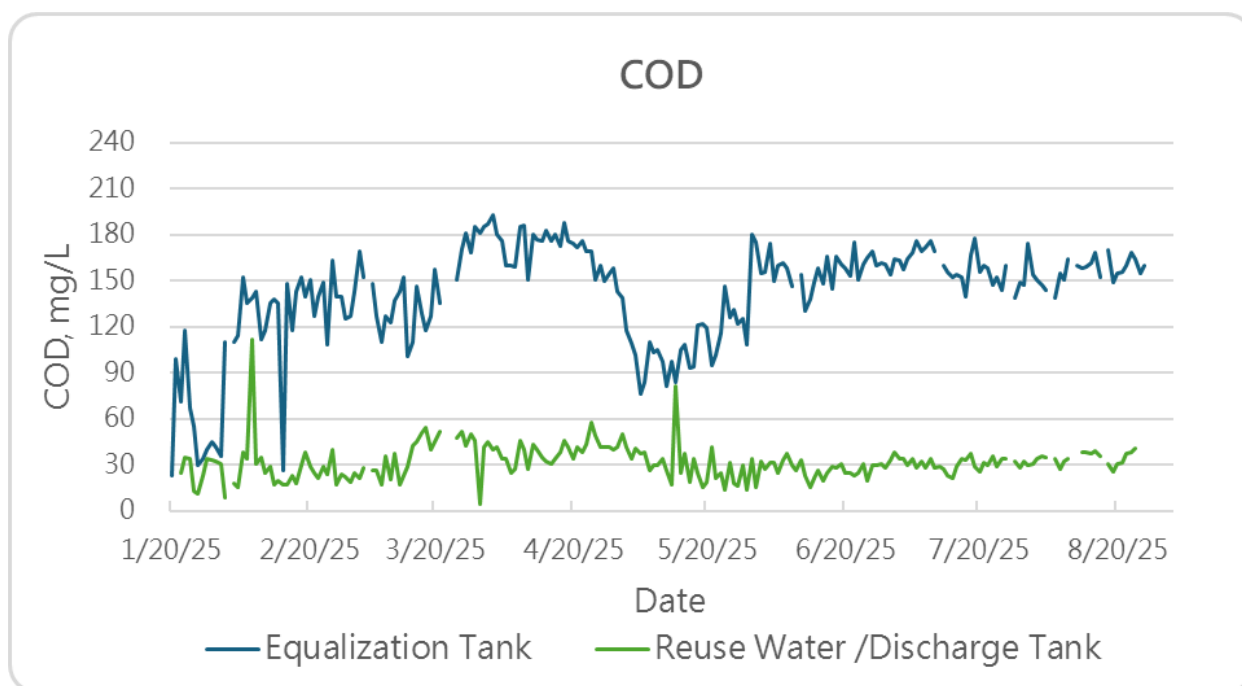


圖 6 COD 參數趨勢圖

mg/L以下。此數據呈現MBBR生物處理程序在去除COD及BOD濃度方面具備良好的成效。

二、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)

在氨氮方面（如圖8所示），調節池中的氨氮濃度範圍約為10至17.6 mg/L，經

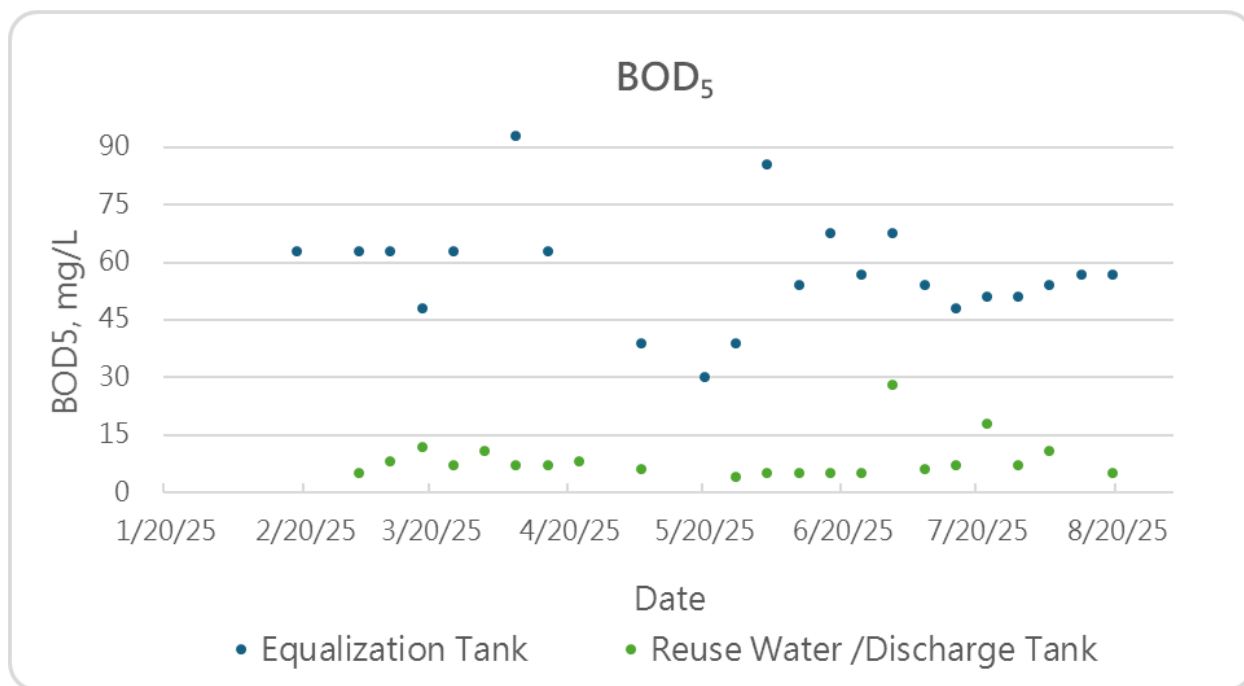


圖 7 BOD₅ 參數趨勢圖

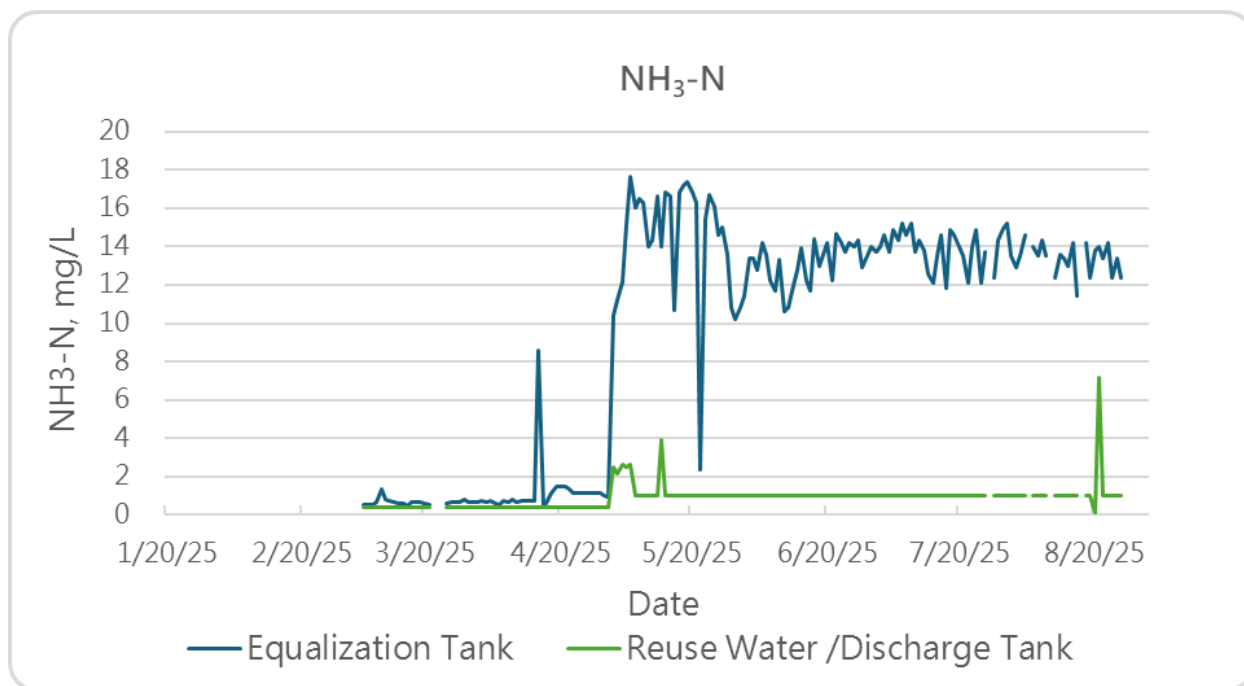


圖 8 $\text{NH}_3\text{-N}$ 參數趨勢圖

過生物處理後於終端回用水池中的氨氮濃度可穩定維持在1 mg/L以下。數據結果顯示，MBBR生物處理系統能有效去除氮氮。

三、硝酸鹽氮 (NO₃-N)/總氮(TN)

硝酸鹽氮(NO₃-N) 的去除效果受溶氧及碳源的影響較為巨大。由圖9所示，初期水中硝酸鹽氮 (NO₃-N) 平均濃度約為 13.6 mg/L，隨著脫硝池(MBBR Pre-DN Tank) 中的溶氧的調降，水中的硝酸鹽氮也逐漸下降。數據結果顯示，各池體及且於回用水池中的硝酸鹽氮濃度，可維持9 mg/L 以下，符合客戶回用水需求。

起初調節池中的總氮濃度在15至20 mg/L左右（如圖10所示），隨著硝酸鹽氮濃度的下降，最終總氮濃度可維持在10 mg/L以下，出水水質相對穩定。

四、濁度(Turbidity)

在濁度方面（如圖11所示），透過沉澱單元作用，處理後的廢水於回用水池的濁度低且穩定，基本上皆能維持在5 NTU 以下。

五、大腸桿菌(E. Coli)

考量回用水有沖廁之用途，透過於回用水池作適當的加藥，可使大腸桿菌(E. Coli)在回用水池中的濃度可達到回用水標

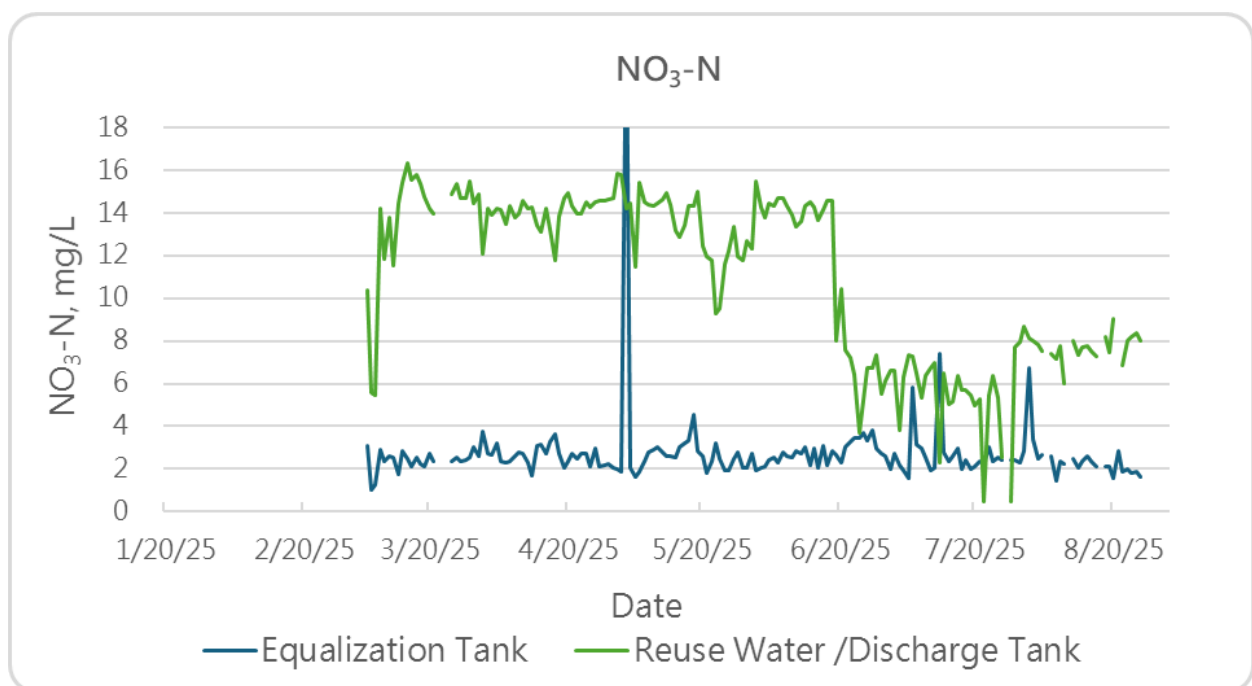


圖 9 NO₃-N 參數趨勢圖

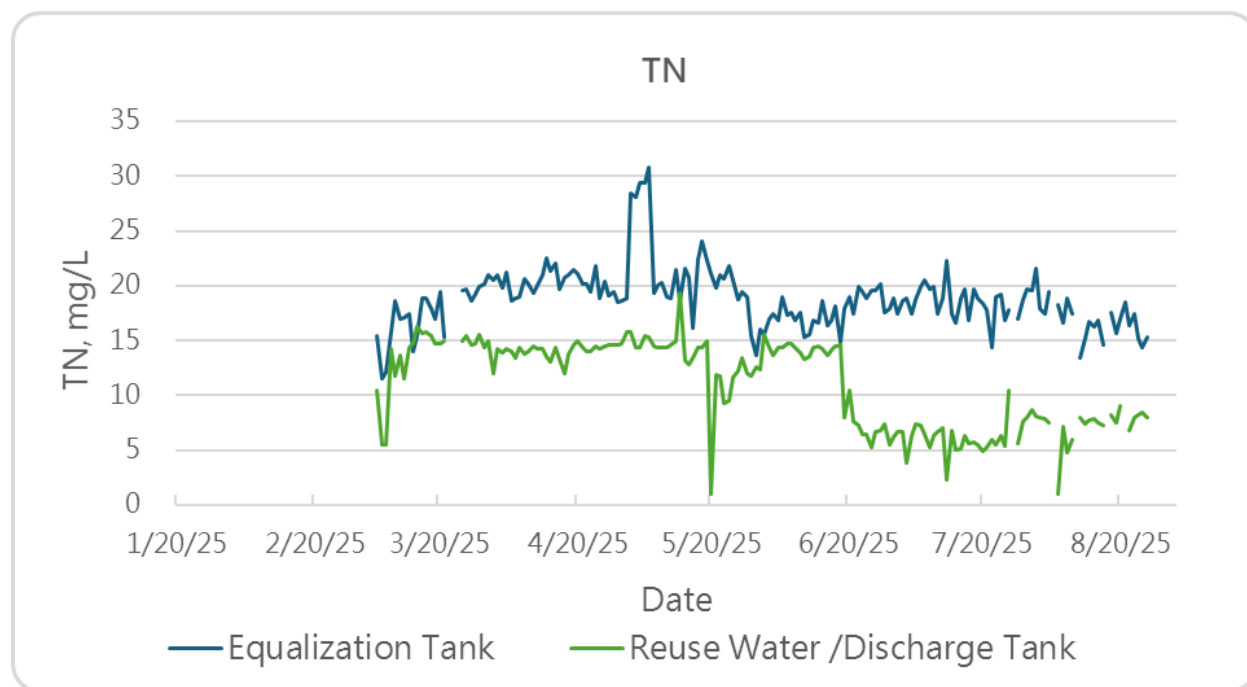


圖 10 TN 參數趨勢圖

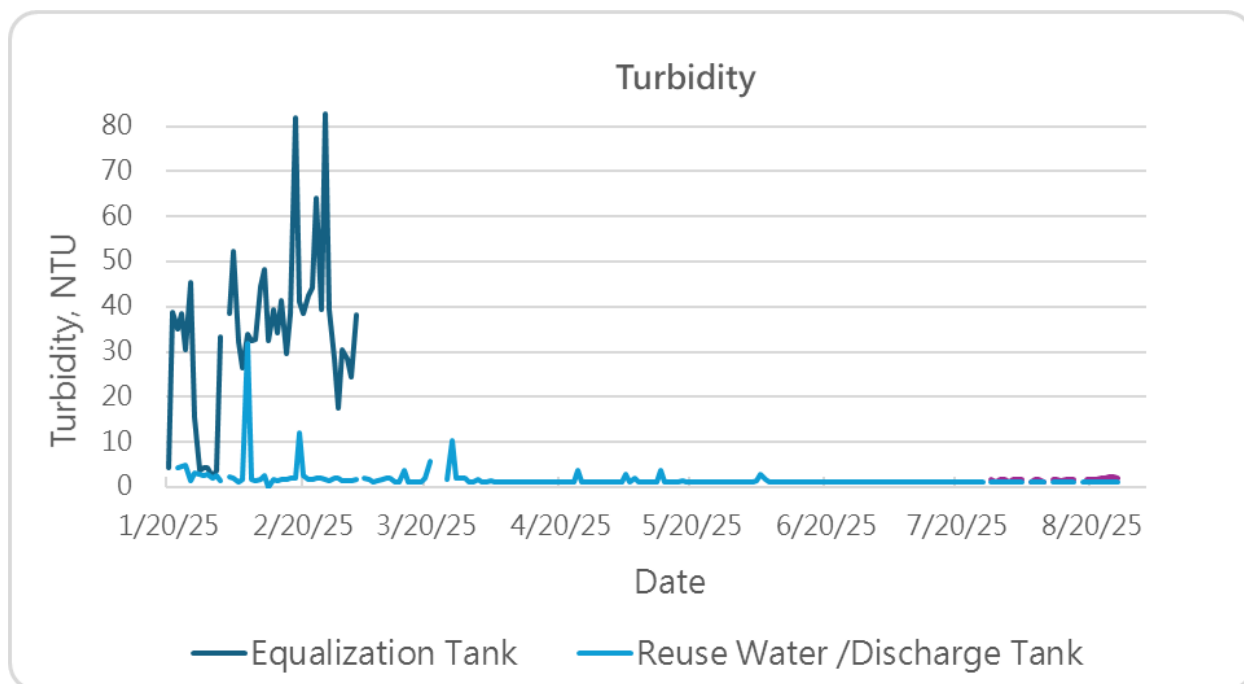


圖 11 濁度參數趨勢圖

準100 MPN以下，如圖12所示。

柒、結論

本專案採用 MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) 技術，作為實現廠區零廢水排放生物處理的製程，其建造及操作的優點及經驗歸納如下：

- 一、投資成本較低：與 MBR 工法比較，其投資成本相對較低。
- 二、系統佔地面積小：所需面積為傳統活性污泥法的 50%，符合現場有限空間的要求。
- 三、操作及維護成本較低：採用中孔曝

氣，不需定期更換曝氣盤，不需污泥回流，操作容易且維護成本較低。

- 四、具未來擴展性：增加 MBBR 生物載體的填充率，即可增加生物處理的容量及負荷，不需增設土建。

而在操作與水質監測結果顯示：

- 一、處理效率高：主要出水水質參數（如 COD、BOD、氨氮、濁度及大腸桿菌等）方面，皆能符合客戶以及當地回收水標準的要求。
- 二、具備較高耐流量負荷衝擊性能力：對進水水質及負荷變化的適應性佳，調試容易，出水穩定。

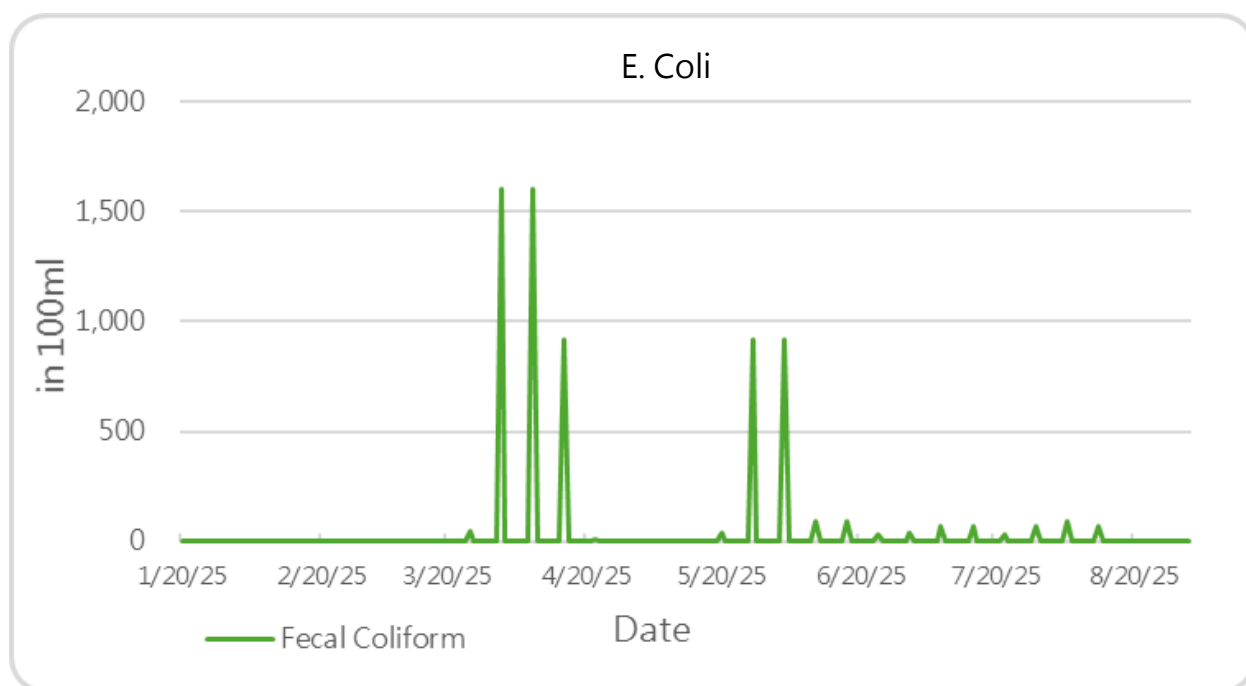


圖 12 大腸桿菌參數趨勢圖

三、在未啟動 UF 系統的情況下，MBBR 系統的處理水質依然相當出色。

此結果進一步驗證，MBBR 生物處理系統在廢污水處理應用上，具備穩定且優異的處理效能。無論在有機物去除效率或系統抗衝擊負荷能力等方面，皆展現出良好的操作表現。此外對於日後運轉及維護管理皆能有效降低成本。本成果顯示 MBBR 生物處理技術特別適用於事業廢水的生物處理，具有顯著的應用潛力，並可作為相關產業與工程設計規劃之重要參考依據。

Activated Sludge Using Media-Supported Biofilms” Page 61-64.

參考文獻

1. Metcalf & Eddy (2014), “Wastewater Engineering-Treatment and Resource Recovery” Page 1,015-1,022.
2. Hallvard Ødegaard (2006), “Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process”
3. McQuarrie, James P. & Boltz, Joshua P. (2011), “Moving Bed Biofilm Reactor Technology: Process Applications, Design, and Performance”
4. Dwight Houweling & Glen T. Daigger (2019), “Intensifying

操作條件對厭氧共消化沼氣發電效能之影響- 文獻整合與龜山水資源回收中心案例驗證



摘要

本 研究以厭氧消化(AD)與厭氧共消化(ACoD)為核心，探討不同基質組合對沼氣產率與甲烷生成效能之影響，並結合文獻整合評估其操作合理性與能源回收潛力。以民生污水及工業廢水進行單一基質AD試驗，並作為共消化比較基準。

結果顯示，AD系統可於短時間內達穩定產氣狀態，但整體甲烷產率與能源回收效益有限。相較之下，ACoD透過不同有機基質間之營養互補與緩衝效應，顯著提升產氣速率與甲烷生成能力，其能源回收效益約為單一基質AD之數十倍。

文獻對照結果顯示，本研究共消化系統之關鍵操作條件與既有研究所建議之適宜操作區間相符，證實基質混合可有效改善單一基質消化限制並提升系統穩定性。整體而言，ACoD可顯著強化甲烷生成效率與能源回收潛力，具備作為有機廢棄物資源化與再生能源應用之可行技術。



關鍵字：

-  有機廢棄物資源化
-  厭氧共消化
-  甲烷產率
-  再生能源發電
-  民生污水及工業廢水



作者



蕭振宗¹，三越暨豐川能源公司/總經理



劉振宇²，桃園市政府水務局/局長



Abstract

This study evaluates anaerobic digestion (AD) and anaerobic co-digestion (ACoD) for biogas and methane enhancement from organic waste. Municipal wastewater was used as the AD baseline.

Results show that AD achieved stable operation but limited methane yield and energy recovery. In contrast, ACoD significantly enhanced gas production and methane generation through substrate synergy, resulting in markedly higher energy recovery than AD.

Operational conditions of the ACoD system were consistent with literature-reported optimal ranges, indicating improved stability via substrate mixing. Overall, ACoD demonstrates strong potential for improving methane yield and energy recovery in organic waste valorization



Keywords:

-  Organic waste valorization
-  Anaerobic co-digestion
-  Methane yield
-  Renewable energy recovery
-  Municipal wastewater

壹、前言

隨著再生能源政策推動與循環經濟理念深化，有機廢棄物之資源化利用逐漸成為環境工程與能源管理領域的重要課題。厭氧消化技術兼具污染削減與能源回收功能，其中沼氣之生成與再利用更使其成為具發電潛力之再生能源技術。在眾多操作模式中，厭氧共消化 (anaerobic co-digestion, ACoD) 透過不同基質間之營養互補與物化特性調節，可改善單一基質可能存在之碳氮失衡、微量元素不足或緩衝能力不足等限制，進而提升系統穩定性與產氣效能，因此已廣泛應用於多元有機廢棄物處理系統。

既有研究已針對有機負荷率(OLR)、共消化比例、食微比(F/M)、pH與基質組成等關鍵操作條件進行探討，並累積大量實驗數據以評估不同操作參數對產氣效率、甲烷生成與系統穩定性之影響。儘管各研究所使用之基質種類與操作條件不盡相同，多數文獻仍可歸納出相對適宜之操作區間，作為系統設計與優化之參考。然而，現有研究多聚焦於單一參數變化或特定情境，相關結果分散，缺乏將各關鍵條件整合、比較並建立對照分析框架的系統性研究。更重要的是，過去文獻對共消化效能的評估，多著重於產氣量或有機物去除效率，較少將操作條件整合理論與沼氣發電潛力相連結，使能源回收層面的工程應用價值難以充分呈現。

基於上述背景，本研究首先系統性整合文獻中不同操作條件對ACoD成效的影響，整理各關鍵參數之建議操作區間並進行整合分析。在此基礎上，選取試驗中表現最佳之共消化操作條件作為案例，檢視其操作參數是否落於文獻整理的合理範圍，並聚焦該案例之沼氣及甲烷生成表現，進一步評估其於沼氣發電的潛在能源效益。透過文獻整合與案例驗證，本研究旨在建立操作條件與能源轉換效能之連結，提供後續實務應用與系統優化的技術依據。

貳、文獻回顧

為釐清操作條件對厭氧共消化成效之影響，本研究彙整近年相關文獻中常見之關鍵操作參數，並整理各研究所建議之適宜操作區間。既有研究多從消化效率、系統穩定性與甲烷生成量等指標評估操作條件之影響，相關成果雖累積豐富，然多分散於不同基質與實驗設計之下，仍有整合比較之必要。

在眾多操作因子中，pH為影響厭氧消化反應最直接且關鍵之環境參數，其變化將同時影響水解、產酸與產甲烷階段之微生物活性。文獻指出，水解與產酸反應較適宜於pH約6.0之環境，而產甲烷階段則以6.5–7.5為最佳操作範圍；產酸菌與產甲烷菌分別需維持pH高於5.0與6.2，以確保其酶活性與功能蛋白穩定(Leung and Wang,

2016 ; Gerardi, 2003)。因此，pH之穩定維持為確保各階段反應協調進行之基礎條件。

然而，厭氧消化過程中揮發性脂肪酸(VFA)與鹼度之動態變化，將持續影響系統酸鹼平衡。研究指出，僅控制pH數值本身並不足以反映系統穩定度，仍需配合緩衝能力指標進行判斷。例如建議將VFA/TA比值維持於0.4以下(Feng et al., 2018)，或提供約70 meq CaCO_3/L 之鹼度，以提升系統對負荷變動之耐受性(Appels et al., 2008)。顯示反應穩定性評估應兼顧即時pH與緩衝容量之整體調控。

除反應環境控制外，基質性質亦為影響消化效率之重要因素。碳源降解難易度將直接影響水解速率與後續甲烷生成潛力。高纖維素或含木質素比例較高之基質，由於其結構複雜且生物可降解性低，常使水解階段成為速率限制步驟，進而降低整體甲烷產率。文獻普遍指出，此類基質通常需透過預處理或與易降解基質進行共消化，以改善降解效率(Manyi et al., 2023)。相對而言，易降解碳源雖可迅速產生VFA，但若投料比例過高，亦可能因酸性中間產物累積而造成系統抑制，進而影響甲烷生成。例如，啤酒業廢棄物消化之甲烷產率可達462 NmL/g-VS，而乳製品業廢棄物因易降解有機物過量導致微生物抑制，其甲烷產率僅106 NmL/g-VS(Llanos et al., 2024)。相較之下，共消化

策略透過不同基質間的營養互補與碳氮比調整，通常可提升系統穩定性與甲烷產率，並避免單一基質消化中常見的降解受限問題(Poulsen & Adelard, 2016)。

在原料組成參數方面，碳氮比(C/N)為維持微生物代謝平衡之關鍵指標。文獻普遍建議C/N比控制於20–30之間，以維持碳源供應與氮素需求之適當比例(Li et al., 2011)。不同基質之適宜範圍略有差異，例如蔬果類廢棄物較適於22–25 (Bouallagui et al., 2009)，一般有機廢棄物則多落於20–35之間(Lee et al., 2009)。當C/N比過高時，氮源不足可能限制微生物生長；反之過低則易造成氨態氮累積並抑制產甲烷菌活性，顯示適當之原料比例調整對於系統穩定具有重要意義。

此外，有機負荷率(OLR)則反映反應器在單位時間內承受之有機物轉化強度。適度提高OLR有助於提升產氣潛力，惟若超過微生物代謝能力，將導致水解與產酸速率高於甲烷生成速率，進而造成VFA累積與系統失衡，進而抑制甲烷菌活性。文獻指出，不同操作溫度條件下可承受之OLR範圍有所差異：嗜溫系統較適宜的OLR約為3.0–7.3 kg-COD/m³/day，而嗜熱系統則可操作於較高範圍，約為3.0–14.4 kg-COD/m³/day (Hu et al., 2018)。另有研究指出，在以VS為基準時，嗜溫與嗜熱條件下之最佳OLR分別約為1.5與2.5 g-VS/L/day (Liu et al., 2017)，顯示操作溫度與基

質特性會共同影響OLR的負荷設定範圍。

綜合上述文獻整理，可歸納出各關鍵操作條件皆存在相對合理之控制區間，且彼此間具交互影響關係。適當之pH與緩衝能力維持反應穩定，基質結構與C/N比決定降解效率，而OLR則影響整體轉化強度與產氣潛力。後續將以實驗中表現最佳之共消化操作條件為案例，檢視其參數設定是否落於上述文獻建議範圍內，並進一步連結其甲烷生成表現與潛在能源回收效益，作為操作條件與沼氣發電效能關聯性分析之基礎。

參、材料方法

一、料源性質

本研究厭氧消化試驗所使用之接種菌，採自臺灣北部某造紙廠廢水處理系統厭氧段，為馴化後之嗜中溫活性菌種。

為評估不同基質組成對沼氣產量與發電潛力之影響，試驗以民生污水及工業廢水為主要基質，與水肥及廚餘進行共消化配置，並設置單獨民生污水及工業廢水厭氧消化試驗作為對照組，以比較共消化在能源回收效益上的改善程度。

民生污水及工業廢水來自龜山水資源回收中心所納管周邊住商、工業區，其餘共消化原料分別取自桃園地區水肥處理系統及桃園市觀音區廚餘回收系統。各原料之總成分與性質彙整如表 1 所示。

二、反應槽體

單基質消化 (anaerobic digestion, AD) 試驗與多基質共消化 (anaerobic co-digestion, ACoD) 試驗皆在相同試驗模組中進行。AD 結果用於設計 ACoD 試驗之操作條件，包括 TS %、F/M 及各基質混合比例。

表 1 基質特性

參數	單位	民生污水及 工業廢水	水肥	廚餘
pH	-	7.0-7.2	6.6	4.0
sCOD	mg/L	300-350	3,500	138,400
VFA	meq/L	5-10	4.5	210
SS	mg/L	200-300	8,200	71,500
導電度	μs/cm	500	2,400	12,000

試驗規模上限之厭氧消化反應器如圖 1 所示，為總體積 8 L、有效反應體積 6 L 的透明圓柱型壓克力反應器。反應器底部設有進料口，上端配備氣體採樣閥與液體取樣口。攪拌系統包括頂部馬達及轉子，轉葉分別位於反應器底部與中段，以確保反應時混合均勻。實績化厭氧系統則配合處理需求與有機質負荷放大槽體，反應器具備液體循環與混合機制，以維持基質與微生物之充分接觸。進流與出流分布於不同高度位置，可依操作需求調整，以確保流場穩定。氣體由上部集中收集，並於運轉期間持續監測。反應溫度則以進流水與輔助加熱設備維持於設定範圍，以確保厭氧消化效率與系統穩定性。

三、試驗方法

本研究以厭氧消化(AD)作為基準試驗，藉由控制基質與接種物比例，使反應體系達到預定之 F/M 後進行操作；並以民生污水及工業廢水之單獨消化設定為對

照，以評估基礎之沼氣產率與甲烷生成效率。於試驗級厭氧消化反應槽系統中進行操作，以模擬控制條件下之生物反應特性。試驗期間依循固定操作周期，定期監測沼氣產量、氣相甲烷比例及液相指標(sCOD、pH、VFA)，以判定反應速率及系統穩定性。

根據基準 AD 所呈現之產氣表現與基質降解特性，進一步調整共消化試驗(ACoD)之基質配置，包括混合比例、TS 濃度與 F/M 等操作參數，以評估其在不同條件下之反應協同性。參考本研究團隊先前之相關研究結果及試驗數據所建立之穩定操作範圍(Hsiao & Lu, 2026)，進行篩選與最佳化調整所得，作為後續評估之基礎設計。ACoD 亦採固定操作周期，在運行過程中持續量測氣體與液相指標，以分析混合基質對甲烷生成效率、反應穩定性與降解速率之影響，並據以判定最佳操作條件，具體研究流程圖如圖 2 所示。

四、檢測方式

1. sCOD：水樣先以 $0.45\mu\text{m}$ 濾膜過濾，濾液中 sCOD 依照 NIEA W515.55A 方法以重鉻酸鉀迴流法測定。樣品中氯離子、亞硝酸鹽氮等干擾物需先確認是否需排除。經迴流 2 h 後，使用菲羅啉指示劑以硫酸亞鐵銨滴定至當量點計算 sCOD (mg/L)。
2. pH：使用 pH 計 (Crison 20 Basic)測



圖 1 試驗級反應槽示意圖(左)、實績化厭氧系統(右)

定新鮮樣品及消化液的 pH。

- 揮發性脂肪酸(VFA)：透過高效液相色譜(HPLC, VWR Hitachi Chromaster)測定。分析採用 Biorad Aminex HPX-87H 色譜柱(300×7.8 mm)與 DAD 檢測器，0.01 N 硫酸作洗脫液，流速 0.5 mL/min。VFA 標準品如表 2 所示。

- 總固體物(TS)：樣品於 105 °C 烘乾至恆重，計算總固體含量(%)。

- 揮發固體物(VS)：將乾燥樣品於 550 °C 高溫焚燒至少 1 h，計算揮發性固體(%)。

- 懸浮固體物(SS)：以已知重量玻璃纖維濾片過濾水樣，乾燥至恆重後計算懸浮固體(mg/L)。

- 沼氣產量：使用超音波流量計(E+H9B2B50)測定反應器出口沼氣流量。

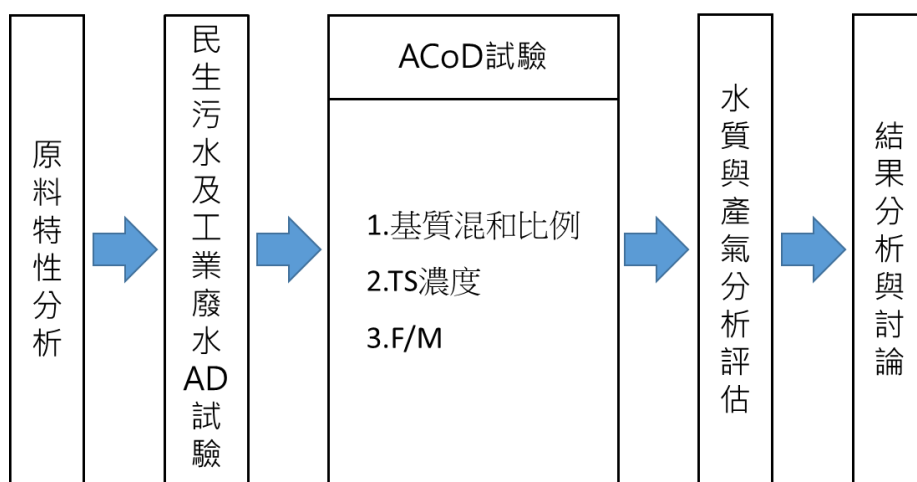


圖 2 研究流程圖

表 2 藥品資訊

藥品	英文名稱	純度
乙酸	Acetic acid	99.5 %
丙酸	Propionic acid	99.5 %
正丁酸	n-Butyric acid	99.0 %
戊酸	n-Valeric acid	99.0 %

8. 甲烷含量：分析方法參考自空氣中總碳氫化合物自動檢測方法 (NIEA A740.10C)，將樣品導入選擇性燃燒系統（觸媒轉換器）分解非甲烷總碳氫化合物，再進入火焰離子化偵測器(flame ionization detector, FID)測得沼氣中甲烷濃度，即得甲烷純度（甲烷體積/沼氣體積,%）。FID 分析所用甲烷氣體純度為 99.9 % (3N)。

肆、結果討論

一、AD 研究

單基質厭氧消化 (anaerobic digestion, AD) 以民生污水及工業廢水為基質，反應條件設定為食微比(F/M)0.28 及溫度 30 °C。試驗期間每 12 h 自出流口採樣，分析液相 sCOD、VFA、pH 變化，同時從氣相管線採集沼氣並測定甲烷純度。其液相與氣相變化趨勢如圖 3 所示。

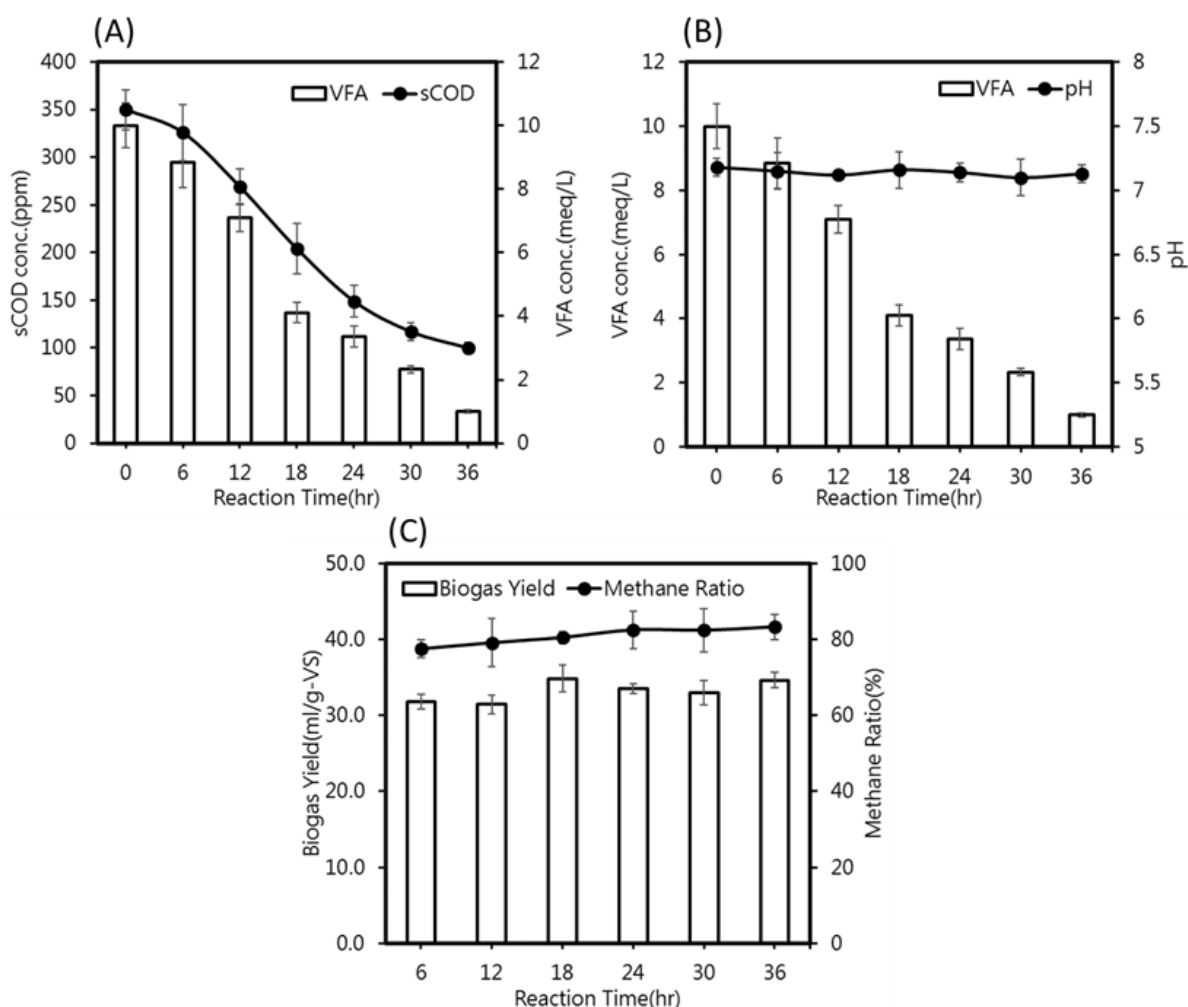


圖 3 民生污水及工業廢水厭氧消化結果圖

本研究顯示民生污水及工業廢水之厭氧消化具有快速啟動與明顯階段性特徵。反應初期(0–12 h) sCOD由約350 mg/L迅速下降，VFA同步降低，顯示基質以可溶性、易分解有機物為主，水解並非速率限制步驟。pH全程維持於7.0–7.5間，未見VFA累積或酸化抑制，顯示酸化與甲烷化反應匹配良好、系統緩衝能力穩定。

18 h時，sCOD降至204 mg/L (去除率42%)，VFA為4.1 meq/L，沼氣產率34.8 mL/g-VS，甲烷比例80.5%，已建立穩定產甲烷能力。至36 h，sCOD進一步降至100 mg/L (總去除率71%)，VFA降至1.0 meq/L；沼氣產率維持約34–35 mL/g-VS，但甲烷純度提升至83.3%，顯示後期以殘餘有機物持續轉化與氣體品質提升為主，而非產氣量增加。整體約於24–36 h即達穩定產氣狀態。

累積36 h每公升料源約產生670 mL CH₄ (約0.67 m³/噸)，折算熱能約24 MJ；以40%發電效率估算，約可產生2.7 kWh電能。整體而言，本廢水單獨厭氧消化具一定能源回收潛力，但受限於有機質濃度，產氣規模屬中等水準。

二、ACoD 研究

在完成民生污水及工業廢水 AD 分析後，本研究進一步進行厭氧共消化(anaerobic co-digestion, ACoD)試驗，以評估不同基質混合比例與操作條件對反應

速率及甲烷生成效能的影響。共消化基質依其可降解性與性狀進行配置，並搭配多組 TS %及 F/M 測試，以比較其與民生污水及工業廢水單消化在反應動力、產氣量及系統穩定性上的差異。

廚餘可提供較高濃度之有機碳源以提升厭氧消化產氣潛力，惟比例過高時可能因油脂累積而抑制甲烷生成；水肥則可補充氮、磷等營養鹽以維持微生物生長所需之營養平衡。因此，不同混合比例將影響系統穩定性及甲烷生成效能。經整合各組操作條件之水質變化、VFA 累積行為、沼氣產率及甲烷純度表現後，本研究選定一組兼具高產氣量與穩定甲烷生成效率之操作組合作為代表：民生污水及工業廢水 50%、水肥 20%與廚餘 30%，TS 15%、F/M 0.28。此組條件在消化速率、沼氣產生能力及甲烷純度表現上皆呈現最佳化趨勢，作為與 AD 結果比較之基準。各項水質參數與產氣行為之動態變化如圖 4 所示。

ACoD 系統反應初期即呈現快速的可溶性有機物分解特性。sCOD 在前 6h 內顯著下降，去除率達 48%，相當於 AD 需 36 h 才能達到的水平，顯示反應速率明顯提升。此現象可能與食品污泥及廚餘中高比例的易降解有機物 (如蛋白質與可溶性碳源) 有關，促使水解與酸化階段迅速啟動，並形成連續穩定的反應階段。36h，sCOD 去除率達 92%，遠優於 AD。

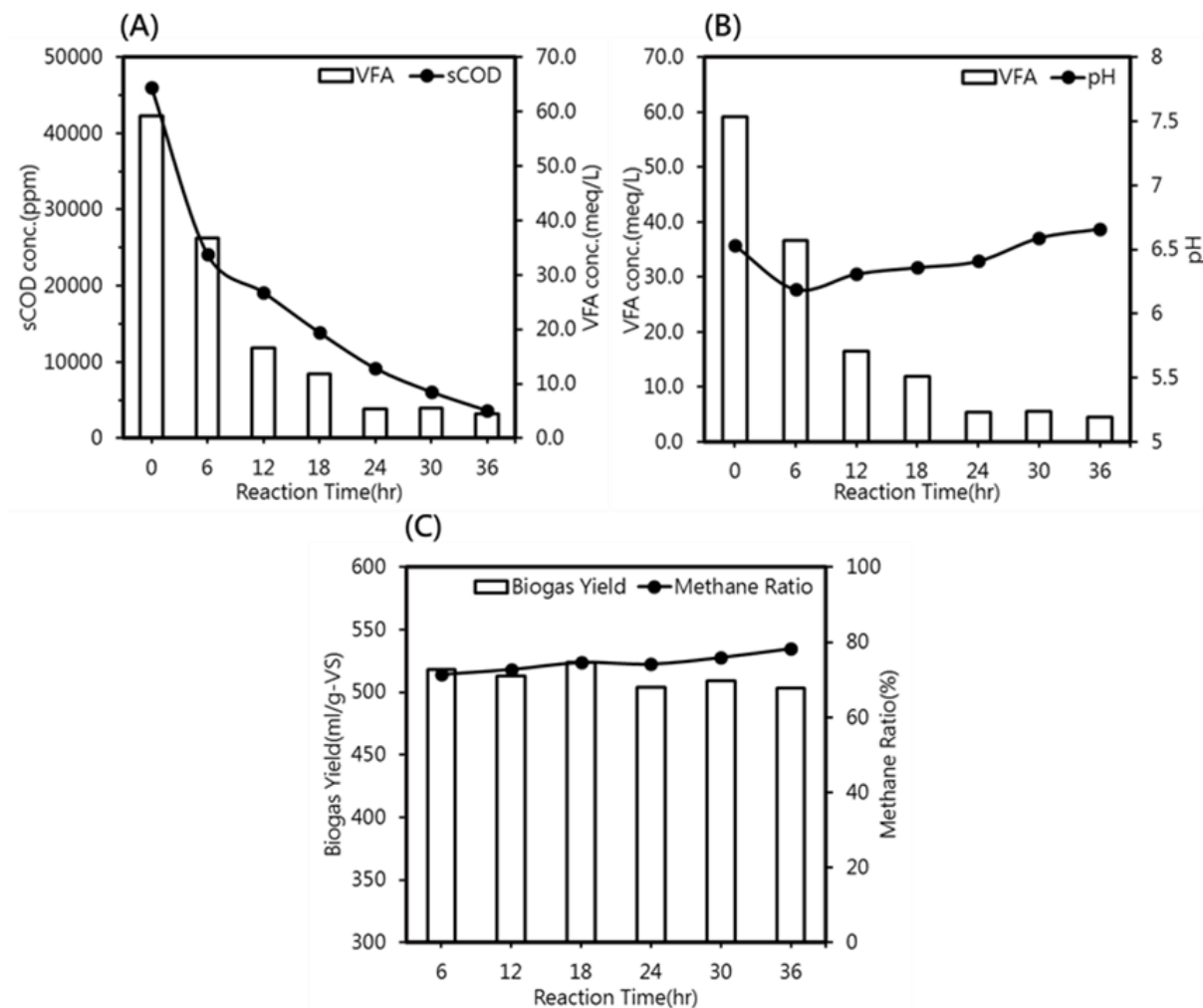


圖 4 厭氧共消化結果圖

VFA 濃度呈現「快速累積後穩定下降」趨勢。反應初期 VFA 峰值高於 AD，但隨後迅速下降，表明產甲烷菌能有效將酸化產物轉化為甲烷，防止 VFA 堆積抑制反應。24h 後，VFA 穩定控制在 10 meq/L 以下，36h 內去除率超過 90%，顯示共消化透過營養互補提升微生物代謝能力與耐酸性，維持系統穩定。

pH 變化與 VFA 動態相互呼應。反應

初期酸化造成 pH 輕微下降，但幅度小於 AD，且回升速度更快，最終維持在適合甲烷生成的中性範圍。此現象顯示 ACoD 系統可利用基質間緩衝效應抵銷酸化對 pH 的波動，避免對產甲烷菌造成抑制。

產氣表現方面，ACoD 的沼氣產率明顯高於 AD。前 6 h 即達 500 mL/g-VS 以上，峰值亦高於 AD，反映有機物轉換效率提升。由於混合基質中蛋白質與脂質分解

可能生成非甲烷氣體，甲烷純度略低於 AD，但仍維持在 70 % 以上。36 h 內，甲烷產量達 370 – 390 mL/g-VS，換算約 16,000 mL/L，推算每噸共消化料源在最佳條件下可透過沼氣發電系統產生約 64 kWh 電能，較 AD 顯著提升。

綜合而言，ACoD 可顯著提升反應速率、VFA 處理能力及甲烷產率。透過基質多樣性形成營養互補與微生物群落平衡，可有效改善基質的消化限制，促進水解、酸化與產甲烷三階段協調反應，進而增強厭氧消化在能源回收與沼氣發電應用中的潛力。

三、文獻回顧

根據文獻整理，厭氧消化效率主要受 pH 緩衝能力、基質可降解性、C/N 比及有機負荷率(OLR)等因素共同影響；而厭氧共消化(ACoD)之優勢，即在於透過不同基質間互補效應，同時調整碳源供應、微生物營養平衡與系統緩衝條件，使操作條件趨近文獻建議之適宜區間。本研究亦參照相關文獻建議之操作條件範圍，針對系統穩定性與甲烷生成表現進行比較分析，以評估共消化條件之合理性。

本研究最佳共消化組合(投入料比例：民生污水及工業廢水 50%、水肥 20%、廚餘 30%；控制參數：TS 15 %、F/M 0.28)之操作表現顯示，其 pH 維持範圍及基質性質均符合先前研究提出的有

利甲烷生成條件，顯示產氣提升為多項關鍵參數共同調節的整體效應。

相較之下，民生污水及工業廢水單獨厭氧消化因缺乏足量易降解碳源，雖具快速啟動與良好緩衝特性，但產氣速率及累積產量均受限。此結果再次驗證，共消化策略在補足基質侷限、提升反應速率與能源回收方面具有必要性。

對照文獻整理之操作條件，本研究共消化組合的產氣改善可從三個主要面向獲得支持：

- (一) 可降解碳源供應提升：基質混合顯著增加可降解有機物比例，使 VFA 生成與甲烷轉化速率接近文獻建議的最佳效能區間。此一改變直接反映於產氣速率與累積甲烷量的提升。
- (二) C/N 調控於適宜範圍：混合基質使酸化與甲烷化階段銜接更順暢，避免單一基質常見之 C/N 失衡造成的反應速率下降，符合文獻指出 ACoD 可改善微生物營養結構的機制。
- (三) 系統緩衝能力增強：ACoD 各料源涵蓋 pH 範圍較 AD 廣，混和後系統 pH 亦低於 AD，但相對的起伏波動要小於 AD，顯示其緩衝能力優於單獨消化，有效降低酸化風險，

與過往研究中「共消化有助提升反應穩定性」的結論一致。

整體而言，本研究結果證實 ACoD 的主要優勢在於提升沼氣產量與甲烷生成量。雖甲烷純度提升幅度有限，但由於甲烷總量增加，使整體能源回收明顯優於單一基質 AD。此外，本研究共消化系統之操作表現與近年相關文獻所提出之穩定操作條件趨勢一致，顯示所建立之共消化模式具有良好操作可行性與能源回收潛力。以發電估算，最佳共消化條件下每噸料源可產生約 64 kWh 電能，遠高於民生污水及工業廢水 AD 的 2.7 kWh，顯示其在能源利用與資源化應用上的實質效益。本研究結果提供共消化於後續實廠應用及沼氣能源整合之具體技術依據。

相關研究成果亦已作為龜山水資源回收中心導入厭氧消化及沼氣能源回收技術之參考。實場運轉結果顯示，系統有機物去化率可達 90%，甲烷濃度達 86.8%，每立方公尺沼氣可轉換約 3.3 度電；搭配 800 kW 沼氣發電機組，年發電量約 640 萬度，年減碳量約 3,034 t-CO₂e，進一步展現厭氧共消化技術於能源回收及減碳之應用潛力。

伍、結論

本研究透過文獻整合與試驗案例驗證，評估厭氧共消化(ACoD)操作條件對沼氣發電效能之影響，主要結論如下：

- 一、共消化提升能源回收：與民生污水及工業廢水單獨消化相比，ACoD 顯著提高沼氣與甲烷產量，每克 VS 可產生 370–390 mL 甲烷，換算每噸料源在最佳操作條件下可提供約 64 kWh 電能，明顯提升系統發電潛力。
- 二、反應穩定性改善：共消化系統利用基質營養互補與緩衝能力提升，有效控制 VFA 累積與 pH 波動，維持適合甲烷生成之中性環境，降低單一高纖維基質消化中常見的抑制與不穩定問題。
- 三、操作合理性與可預測性：試驗最佳操作組合之 pH、基質結構及反應特性均與文獻建議一致，顯示系統性能可在合理操作區間內預測與控制。
- 四、發電應用價值：甲烷產量增加直接轉換為更高發電量，證實 ACoD 可突破單一基質產氣限制，提升能源轉換效率，強化廢棄物資源化與再生能源利用價值。

綜合而言，ACoD 不僅改善反應速率與系統穩定性，更能有效增強沼氣發電效能，為有機廢棄物能源化提供可行且高效之技術策略。

參考文獻

1. Leung, Dennis & Wang, Jing. (2016). An overview on biogas generation

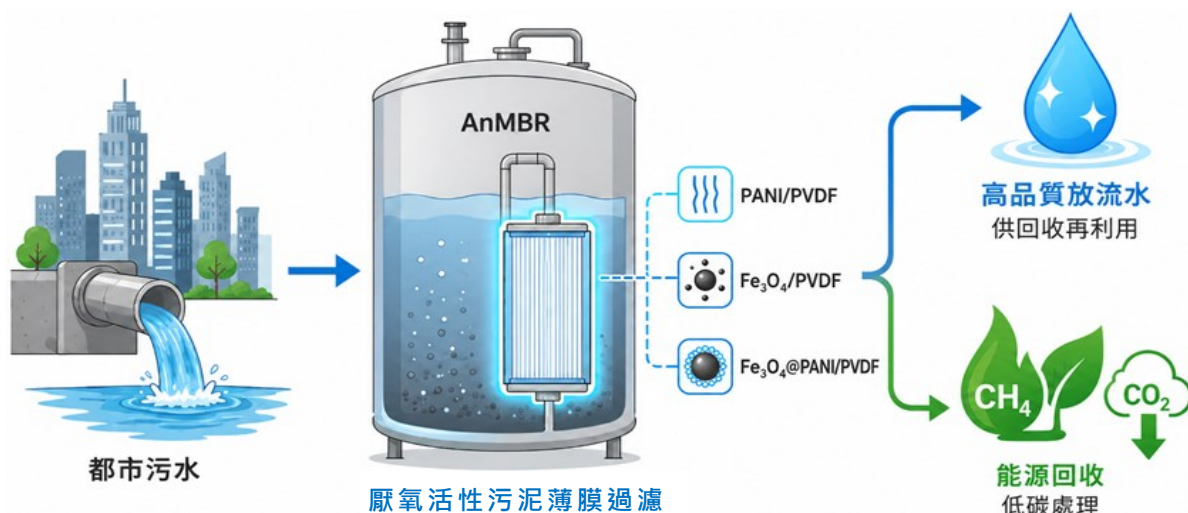
- from anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Green Energy*, 13, 119-131. 10.1080/15435075.2014.909355.
2. Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons.
 3. Feng, J., Li, Y., Zhang, E., Zhang, J., Wang, W., He, Y., Liu, G., & Chen, C. (2017). Solid-State Co-digestion of NaOH-Pretreated Corn Straw and Chicken Manure Under Mesophilic Condition. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 1027 - 1035.
 4. Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755 – 781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
 5. Manyi-Loh, C. E., & Lues, R. (2023). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Substrate characteristics (challenge) and innovation. *Fermentation*, 9(8), 755.
 6. Llanos-Lizcano, R., Senila, L., & Modoi, O. C. (2024). Evaluation of biochemical methane potential and kinetics of organic waste streams for enhanced biogas production. *Agronomy*, 14(11), 2546.
 7. Poulsen, T. G., & Adelard, L. (2016). Improving biogas quality and methane yield via co-digestion of agricultural and urban biomass wastes. *Waste Management*, 54, 118 – 125.
 8. Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821 – 826.
 9. Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of Environmental Management*, 90 (5), 1844 – 1849.
 10. Lee, D. H., Behera, S. K., Kim, J. W., & Park, H.-S. (2009). Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study. *Waste Management*,

29(2), 876 – 882.

11. Hu Y, Kobayashi T, Qi W, Oshibe H, Xu KQ. Effect of temperature and organic loading rate on siphon-driven self-agitated anaerobic digestion performance for food waste treatment. Waste Manag. 2018 Apr;74:150-157.
12. Chao Liu, Wen Wang, Naveed Anwar, Zonghu Ma, Guangqing Liu, & Ruihong Zhang. (2017). Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion of Food Waste under Mesophilic and Thermophilic Conditions. Energy & Fuels, 31, 2976 – 2984.
13. Hsiao, C.-T., & Lu, M.-C. (2026). Optimizing anaerobic co-digestion for pulp and paper sludge for enhancing methane yield and sludge reduction through substrate synergy. Process Biochemistry, 165, 32 – 49.

應用厭氧活性污泥膜濾法處理低濃度污水

以提升都市能源供應韌性



摘要

隨著淨零排放與循環經濟理念的推動，都市污水處理逐漸由傳統污染物去除導向兼具節能、減碳與資源回收的永續模式。厭氧膜生物反應器 (AnMBR) 結合厭氧生物處理與膜分離技術，具有低污泥產量、能源回收及高品質出流水等優勢。本研究以實驗室規模 AnMBR 處理模擬都市污水，並比較 PVDF、PANI/PVDF、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVDF}$ 與 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}/\text{PVDF}$ 等不同膜改質模組於系統操作中的表現。結果顯示，AnMBR 可穩定處理低濃度都市污水，COD 與 BOD 平均去除效率分別達 88% 與 94%，且各膜模組之出流水水質無顯著差異。系統甲烷含量維持於 62.4–69.1%，甲烷產率為 0.20–0.28 L CH_4 /g COD removed，顯示具能源回收潛力。膜污染分析指出，操作通量提升會加速膜阻力累積與跨膜壓差上升，其中經 PANI、 Fe_3O_4 及 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PANI}$ 改質之膜材可有效延緩跨膜壓差 (Transmembrane Pressure, TMP) 上升、降低濾餅層累積速率，並提升長期操作穩定性，顯示膜改質有助於改善膜表面抗污染能力。整體而言，AnMBR 兼具有機物去除與能源回收效益，而膜改質技術則可進一步提升膜分離性能與系統穩定性，具備都市污水低碳處理之應用潛力。未來建議採取「由小而大」策略，優先應用於偏遠山區及離島地區之小型污水處理設施，以累積實廠操作經驗並作為後續推廣基礎。



作者

- 陳福幸緣¹，中原大學環境工程學系 / 博士後研究員
王雅玢²，中原大學環境工程學系 / 教授
游勝傑³，中原大學環境工程學系 / 教授



關鍵字：

- 厭氧膜生物反應器
- 都市污水
- 膜積垢
- 甲烷回收
- 膜改質



Abstract

With increasing attention to net-zero emissions and resource recovery, municipal wastewater treatment is shifting toward sustainable and energy-efficient technologies. This study evaluated a laboratory-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater using PVDF, PANI/PVDF, Fe_3O_4 /PVDF, and Fe_3O_4 @PANI/PVDF membranes. The AnMBR achieved stable treatment performance, with average COD and BOD removal efficiencies of 88% and 94%, respectively. Methane content ranged from 62.4% to 69.1%, and methane yield was 0.20 – 0.28 L CH_4 /g COD removed, demonstrating energy recovery potential. Membrane fouling increased with operating flux, leading to higher Transmembrane Pressure (TMP) and resistance. Modified membranes effectively delayed TMP development and improved antifouling performance compared with unmodified PVDF membranes. Overall, AnMBR technology showed strong potential for low-carbon municipal wastewater treatment with simultaneous energy recovery. Future implementation is recommended through a small-to-large deployment strategy, beginning with small wastewater treatment facilities in remote mountainous or offshore island regions before wider application.



Keywords:

-  Anaerobic membrane bioreactor
-  Municipal wastewater
-  Membrane fouling
-  Methane recovery
-  Membrane modification

壹、背景介紹

都市污水處理為維持公共衛生、水環境品質及永續城市發展之重要基礎設施。隨著我國 2050 淨零排放政策推動，現代水資源回收中心已由單純污染物去除，逐步朝向產水、創能、污泥減量及降低溫室氣體排放等多重目標發展。傳統好氧活性污泥法雖具有操作成熟與處理效率穩定等優點，但仍面臨曝氣耗能高、剩餘污泥產量大及資源回收效益有限等問題，其中曝氣系統約占污水處理廠總耗能之 50 – 70%，整體能耗約為 0.25 – 0.6 kWh/m³ (Jiménez-Benítez et al., 2023)。因應節能減碳與資源循環需求，發展低能耗且具能源回收潛力之污水處理技術已成為重要課題。因此，如何將都市污水由污染物去除對象轉化為能源與資源回收來源，已成為污水處理技術的重要發展方向。

活性污泥膜濾法(MBR)結合生物處理與膜分離技術，可產出高品質放流水並維持較高污泥濃度，具有節省用地及提升處理效能之優勢。然而，MBR 需透過大量曝氣維持膜通量與控制積垢，導致能源消耗增加。相較之下，厭氧生物處理可將有機物轉換為甲烷作為能源回收，且污泥產量遠低於好氧系統，但傳統厭氧系統受限於固液分離效率，較難應用於低濃度都市污水處理。

厭氧活性污泥膜濾法(Anaerobic

Membrane Bioreactor, AnMBR)結合厭氧生物處理與膜分離技術，可同時達成有機物去除、污泥截留、能源回收及高品質出流水產出，被視為實現污水處理淨零排放的重要技術 (Tran et al., 2024)。然而，膜積垢仍為限制其長期操作之主要因素，污染物累積將造成跨膜壓差上升與操作成本增加 (Yang et al., 2024)。近年來，透過膜表面改質提升親水性、抗污染性及導電性，被認為是改善膜積垢的有效策略。因此，本研究以都市污水處理為目標，評估原始 PVDF 膜與 PANI、Fe₃O₄ 及 Fe₃O₄@PANI 改質 PVDF 膜於 AnMBR 系統中之處理效能、膜積垢控制及甲烷能源回收潛力，以作為未來技術發展之參考。

貳、研究方法

本研究建立一套實驗室規模厭氧膜生物反應器(AnMBR)系統，以模擬都市污水處理條件，評估不同膜材於長期操作下之處理效能、甲烷能源回收及膜積垢行為。反應槽有效體積為 6 L，於室溫條件下操作，接種污泥取自桃園地區污水處理廠厭氧消化槽。系統配置四組平板式膜模組，包括原始 PVDF 膜及三種改質膜：PANI/PVDF、Fe₃O₄/PVDF 及 Fe₃O₄@PANI/PVDF，總膜面積為 0.08 m²，膜孔徑為 0.45 μm。上述膜材改質條件係依據本團隊前期研究結果進行最佳化，該研究證實 PANI、Fe₃O₄ 及 Fe₃O₄@PANI 改質可有效提升 PVDF 膜之親水性、抗污染能力及

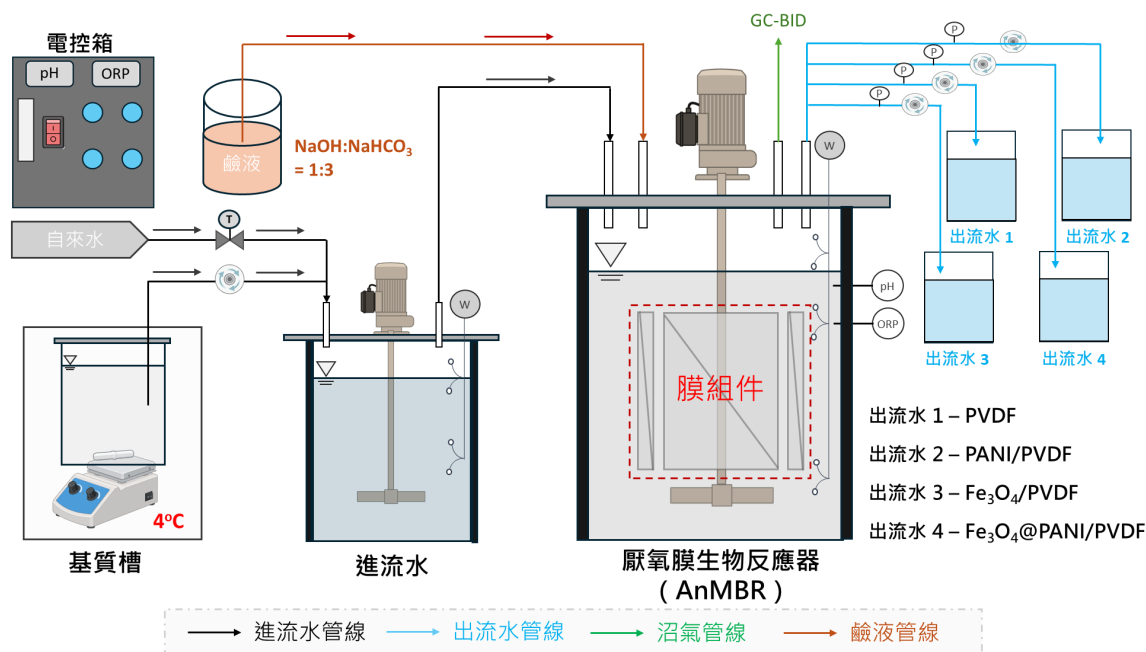


圖 1 AnMBR 系統的示意圖

長期過濾穩定性(Tran et al., 2025)。系統操作採間歇過濾模式，以 9.5 分鐘過濾及 0.5 分鐘鬆弛為一循環，操作通量依序控制於 2、4、6 及 8 LMH，以評估不同水力負荷對處理效能與膜積垢之影響。進流水為模擬都市污水，COD 維持約 300 – 400 mg/L，並以 $\text{NaHCO}_3/\text{NaOH}$ 鹼液自動控制反應槽 pH，以維持厭氧系統之緩衝能力與操作穩定性。主要系統操作參數如表 1 所示。

研究期間持續監測化學需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、pH、氧化還原電位(ORP)、鹼度、揮發性脂肪酸(VFAs)、混合液懸浮固體濃度(MLSS)、混合液揮發性懸浮固體濃度(MLVSS)、跨膜

壓差(TMP)及甲烷產量等參數，以評估系統穩定性、污染物去除效能與能源回收表現。操作期間之 pH 與 ORP 由感測器 (Sentix® XO, 德國) 每日記錄。MLSS、MLVSS 與 COD 皆依據我國 NIEA 方法進行分析(NIEA, 2010)；鹼度與揮發性脂肪酸分析則分別依據 Standard Methods 2320B 與 5560C 進行(APHA, 2005)。

當 TMP 上升至 50 kPa 時，將膜組取出進行物理清洗，以評估不同膜材之膜服務時間與清洗頻率；各操作階段結束後，再以 0.3% NaOCl 進行化學清洗及膜阻力分析，以區分膜本身阻力、濾餅層阻力及不可逆污染阻力。為進一步探討膜積垢機

表 1 系統操作參數

參數	污泥馴養	階段 I	階段 II	階段 III	階段 IV
日	0-90	91-150	151-210	211-270	271-330
通量(LMH)	2	2	4	6	8
體積 (L)	6	6	6	6	6
薄膜面積 (m ²)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
流速 (L/d)	3.6	3.6	7.3	10.9	14.6
HRT (h)	39.5	39.5	19.7	13.2	9.9
SRT (d)	30	30	30	30	30
過濾：不過濾時間	9.5 min 過濾：0.5 min 不過濾時間				

制，本研究分析污泥與出流水中之溶解性微生物產物(SMP)與胞外聚合物(EPS)含量，並區分其蛋白質(PN)與多醣(PS)組成。污泥上清液之製備係將污泥樣品以 15,000×g 離心 15 分鐘後，再以 0.45 μm 濾膜過濾。蛋白質濃度採改良 Lowry 法定量(Peterson, 1977)，多醣濃度則依酚-硫酸法測定(DuBois et al., 1956)，以評估不同操作通量下微生物代謝產物累積對膜積垢之影響。

參、研究成果分析

一、AnMBR系統的處理效率

結果顯示，系統於污泥馴養期間 pH 為 7.11 ± 0.36，進入分段通量操作後，pH 分別維持於 6.94 ± 0.18 (2 LMH)、

6.87 ± 0.09 (4 LMH)、6.87 ± 0.12 (6 LMH)與 6.88 ± 0.17 (8 LMH)，整體長期穩定於中性範圍，未出現明顯酸化現象。ORP 於各階段皆維持明顯還原環境，污泥馴養期為 -467 ± 44.1 mV，分段通量期則介於 -459 至 -470 mV。此結果顯示反應器內部可維持穩定厭氧條件，有利於產甲烷菌活性與有機物厭氧分解。

由圖 2 可知，不同膜材 AnMBR 系統對都市污水中 COD 與 BOD 皆具有穩定且良好之去除效能。在操作通量由 2 LMH 提升至 8 LMH 的條件下，整體系統仍維持良好的有機物去除表現。進流水 COD 濃度約介於 220 – 450 mg/L，經 AnMBR 處理後，平均 COD 去除效率約為 88%。另一方面，進流水 BOD 濃度約介於 160 – 380 mg/L，平均 BOD 去除效率約可達 94%。

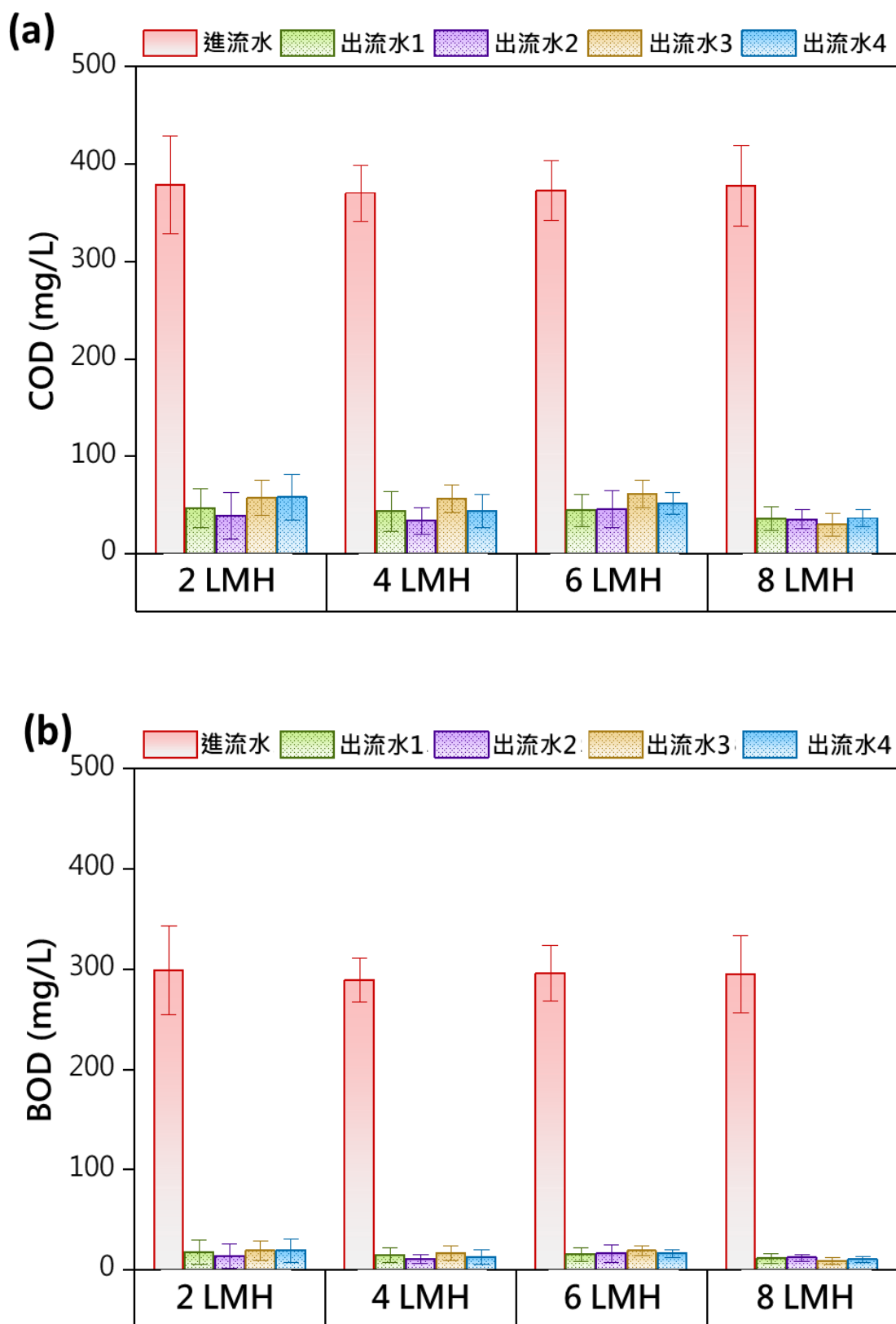


圖 2 系統之 COD 與 BOD 去除效能比較

比較不同操作通量可發現，當通量由 2 LMH 增加至 8 LMH 時，各膜組之 COD 與 BOD 去除效率僅有些微波動，並未出現明顯下降趨勢，顯示在較高過濾負荷下，AnMBR 系統仍能維持穩定之有機物去除能力。此外，各膜材組別間之出流水 COD 與 BOD 濃度差異不顯著 ($p>0.05$)，表示 PVDF、PANI / PVDF、 Fe_3O_4 / PVDF 及 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@PANI}$ / PVDF 膜皆可維持相近之有機物去除表現，且膜材改質並未對厭氧生物處理程序造成負面影響。

如圖 3 所示，在不同的操作流量下，系統的 MLSS 和 MLVSS 均保持穩定。MLSS 從約 9.0 g/L 逐漸下降至 5.8 g/L，而 MLVSS 從約 5.8 g/L 下降至 4.0 g/L。這表明，隨著操作流量的增加，反應器內的污泥濃度略有下降，但總體上仍維持了足夠的生物量。MLVSS / MLSS 比值維持在 0.77 至 0.84 之間，顯示系統中揮發性有機污泥的比例穩定，厭氧微生物的活性未受到顯著抑制。整體而言，AnMBR 系統在 2-8 LMH 的操作條件下能夠維持穩定的污泥濃度和生物活性，為有機物去除奠定

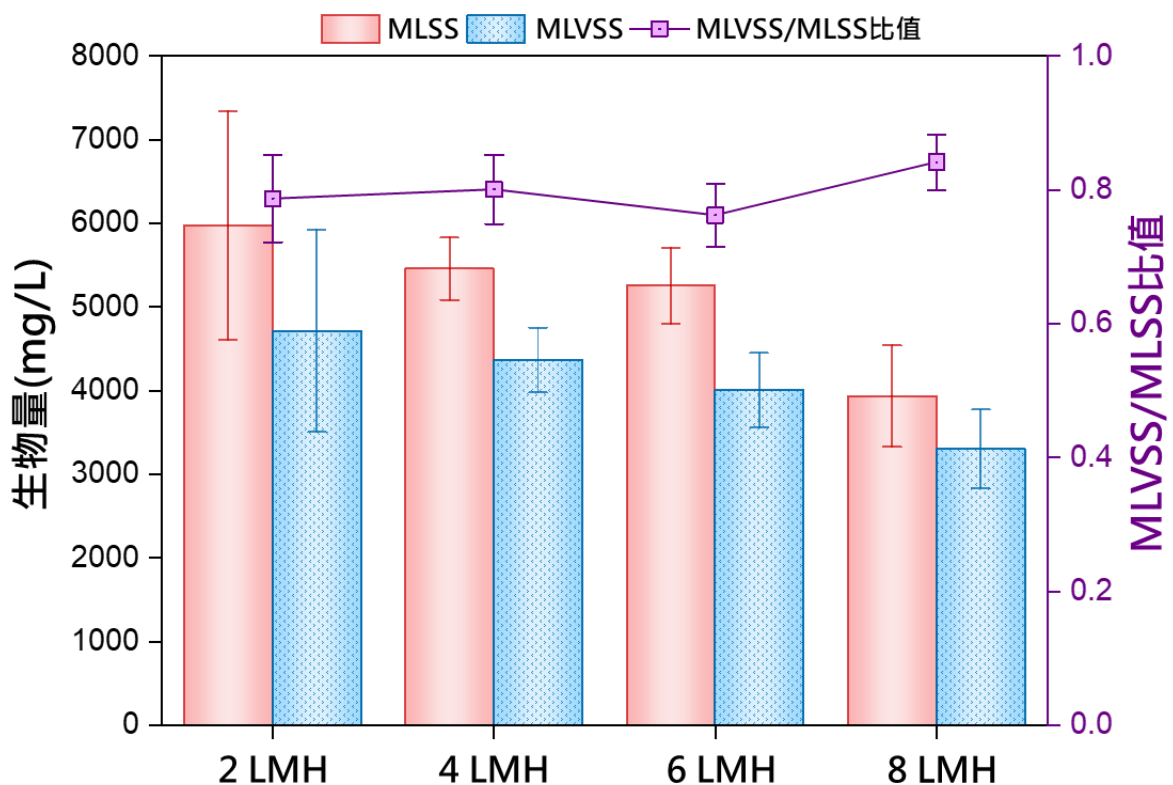


圖 3 MLSS 與 MLVSS 變化

了良好的基礎。

由圖 4 可知，系統運轉期間鹼度整體維持於穩定範圍，初期曾出現較高波動，最高約達 1,500 mg/L，推測與啟動初期鹼度補充及系統調整有關；隨操作時間增加，鹼度逐漸下降並穩定維持於約 300 – 600 mg/L。揮發性脂肪酸(VFAs)濃度則多維持於相對低值，約低於 200 mg/L，未出現長期累積現象，顯示酸生成與甲烷化反應大致維持平衡。此外，VFAs/Alkalinity 比值整體維持於較低水準，多數時間低於

0.3，顯示系統具有足夠的鹼度緩衝能力。一般而言，該比值低於 0.4 常被視為厭氧系統運轉穩定之指標 (Ünyay et al., 2022)，因此本研究反應器於操作期間並未呈現明顯酸化風險。整體而言，系統具有良好緩衝能力，且未發生明顯酸化失穩情形，有利於維持厭氧反應器之穩定運轉。

二、甲烷產生與能源回收潛力

如圖 5 所示，系統於啟動初期未偵測到甲烷產生，至第 31 天後才開始明顯產甲烷，顯示甲烷菌群需經馴化後方能建立穩

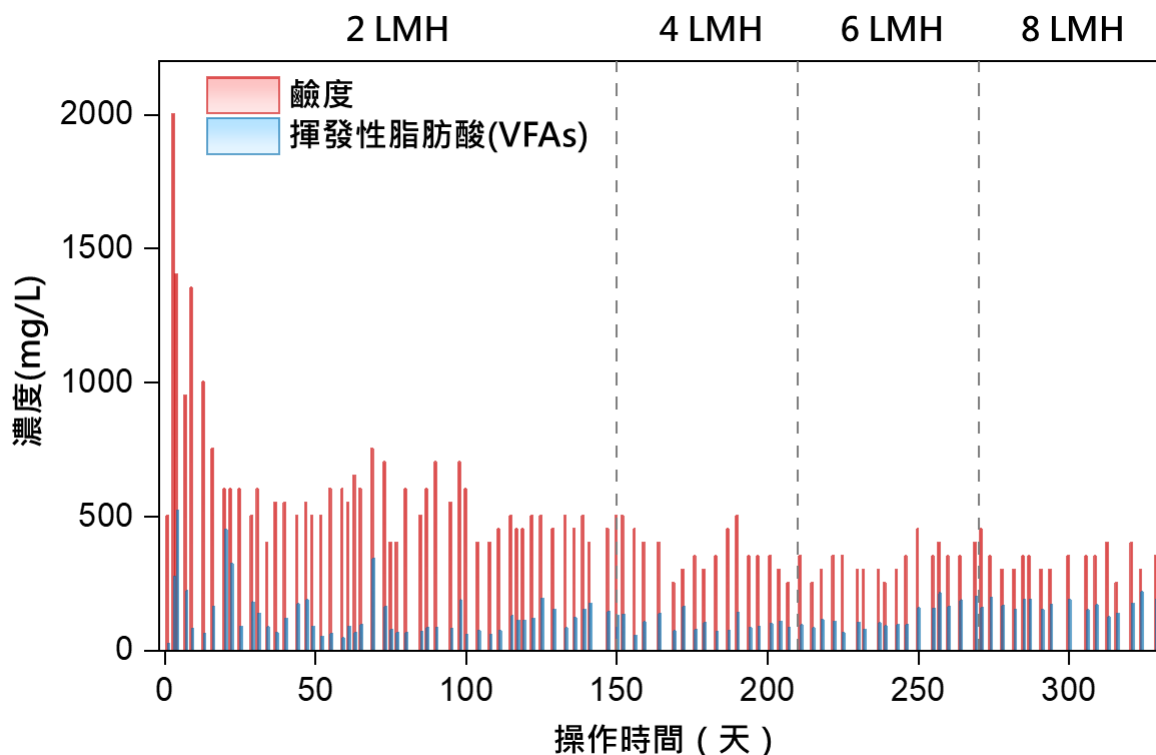


圖 4 VFAs/TA 比值

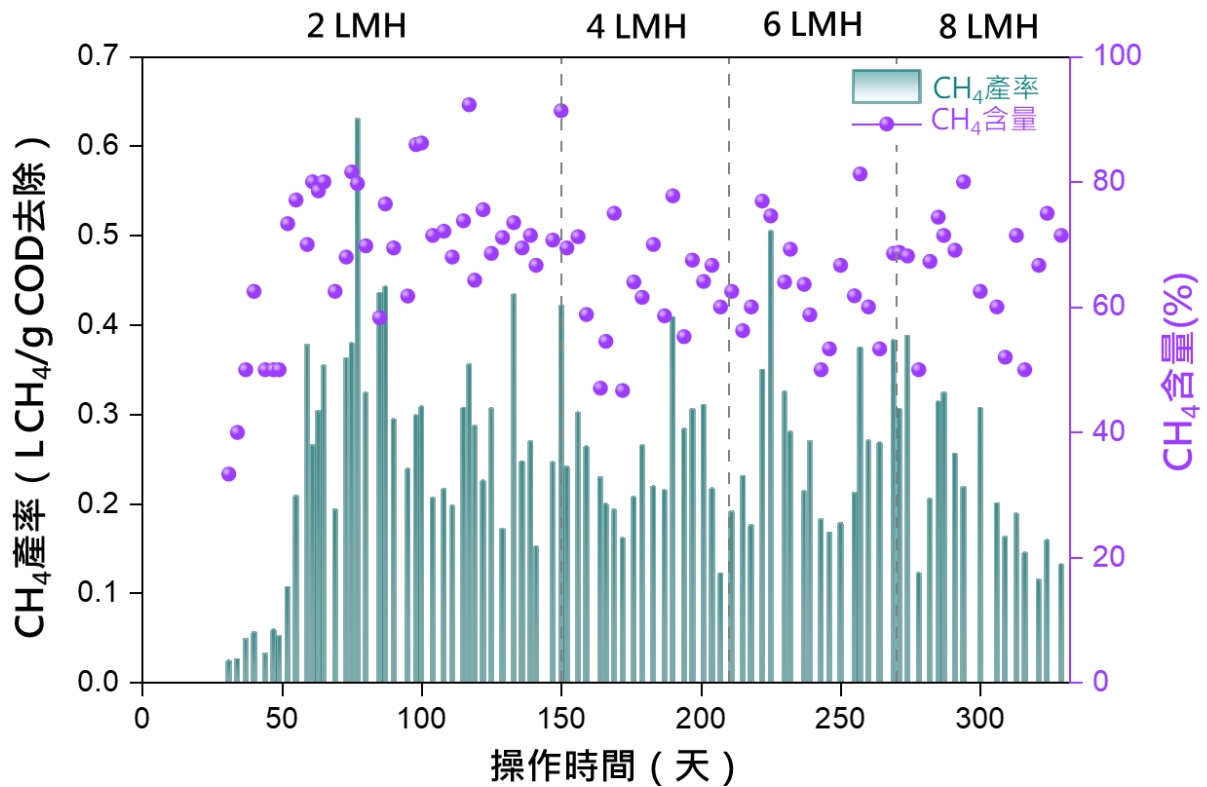


圖 5 甲烷產率與含量

定代謝活性，此現象亦與低濃度都市污水 AnMBR 研究結果一致。啟動完成後，各通量階段皆可穩定產生沼氣，2、4、6 及 8 LMH 下之甲烷含量分別為 $69.1 \pm 12.9\%$ 、 $62.4 \pm 8.28\%$ 、 $64.8 \pm 8.96\%$ 及 $66.3 \pm 9.35\%$ ，整體維持於 $62.4 - 69.1\%$ ，顯示系統具有良好的甲烷化表現。

以 COD 去除量計算之甲烷產率在 2、4、6 及 8 LMH 下分別為 0.25 ± 0.14 、 0.24 ± 0.06 、 0.28 ± 0.09 及 0.20 ± 0.07 L CH₄/g COD removed，其中 6 LMH 最

高。文獻報導都市污水 AnMBR 之甲烷產率約為 $0.13 - 0.33$ L CH₄/g COD removed (Du et al., 2022; El Kik et al., 2021; Ji et al., 2022)，本研究結果落於該範圍內，但仍低於理論甲烷產率 0.35 L CH₄/g COD removed，顯示部分有機物可能用於細胞合成、溶解性甲烷損失或其他代謝途徑。

進一步換算能源回收效益，2、4、6 及 8 LMH 下分別為 0.240 、 0.270 、 0.316 及 0.233 kWh/m³，其中 6 LMH 具有最高

能源回收表現。此數據與文獻報導之都市污水 AnMBR 能源回收範圍 $0.161 - 0.519 \text{ kWh/m}^3$ 相當，且 $4 - 6 \text{ LMH}$ 階段位於相對較高區間 (Rong et al., 2022)，顯示本系統在維持穩定出水水質的同時，具備良好的甲烷轉化與能源回收潛力。然而， 8 LMH 階段之甲烷產率與能源回收量下降，指出後續最佳化應在「提升通量」與「維持高甲烷化效率」之間取得平衡，以避免能資回收效益受到高負荷操作稀釋或抑制。

三、不同膜材對跨膜壓差與膜服務時間之影響

由圖 6 可知，四種膜材之 TMP 皆隨操作時間增加而逐漸上升，且當操作通量由 2 LMH 提升至 8 LMH 時，TMP 上升速率明顯加快，顯示較高通量會增加膜表面污染物沉積與過濾阻力。本研究以 50 kPa 作為物理清洗門檻，因此膜達到 50 kPa 所需時間可作為評估膜服務時間與抗積垢能力之重要依據。在 2 LMH 低通量操作下，各膜材之膜服務時間最長，其中原

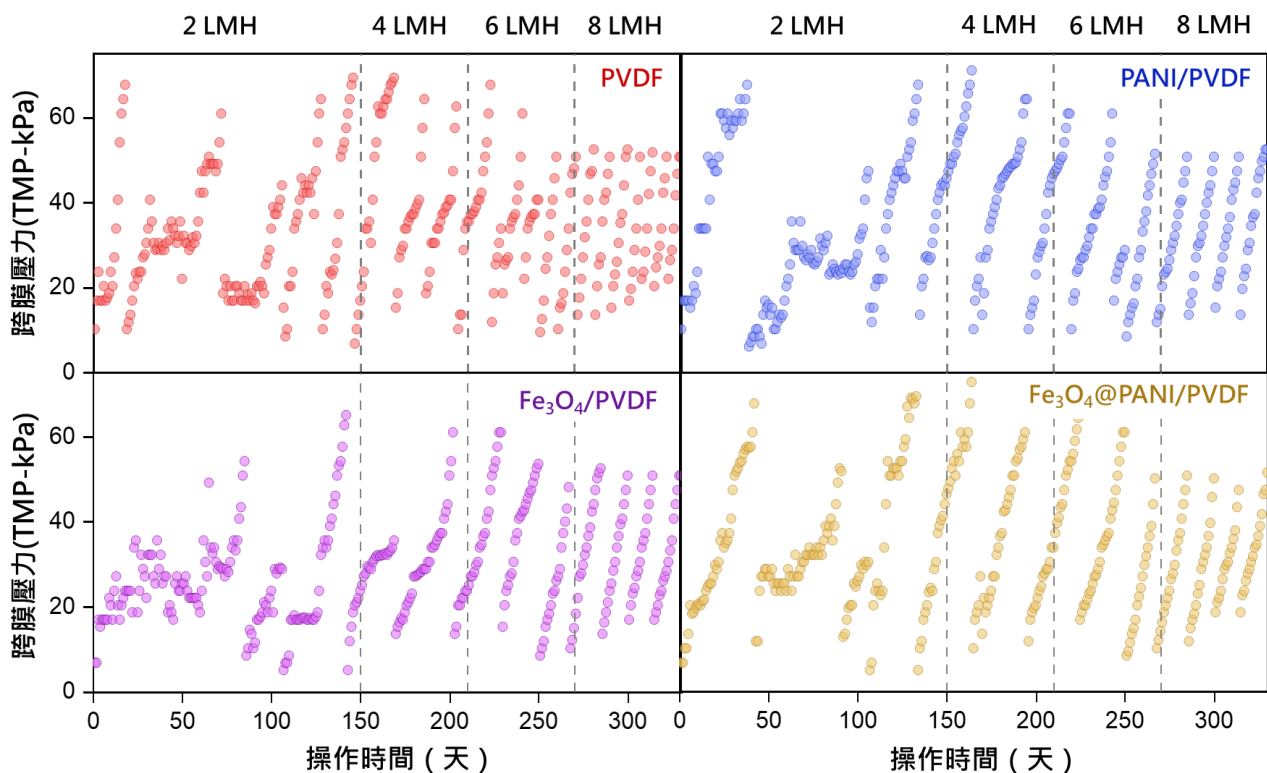


圖 6 TMP 隨時間變化分析

始 PVDF 膜約 32.5 天即需清洗，而 PANI/PVDF、 Fe_3O_4 /PVDF 與 Fe_3O_4 @PANI/PVDF 分別可延長至約 51、55 與 53 天，顯示膜表面改質可有效延緩初期膜積垢形成，並降低 TMP 上升速率。此結果可能與改質膜表面親水性提升、污染物附著減少，以及膜表面濾餅層形成速率降低有關。

隨著通量提升至 4、6 及 8 LMH，各膜材達到 50 kPa 的時間逐漸縮短，代表膜服務時間下降，清洗頻率亦隨之增加。特別是在 8 LMH 階段，TMP 上升最為快

速，顯示高通量操作會造成較大的水力剪切與過濾負荷，促進 EPS、SMP 及污泥顆粒於膜表面累積，進而加速濾餅層形成與膜孔堵塞。整體而言，原始 PVDF 膜在各通量階段皆表現出較快的 TMP 上升趨勢，需較頻繁進行清洗；相較之下， Fe_3O_4 /PVDF 與 Fe_3O_4 @PANI/PVDF 於多數操作階段具有較長膜服務時間與較低清洗頻率，顯示 Fe_3O_4 及 Fe_3O_4 @PANI 改質可改善膜表面抗污染能力。

由圖 7 可知，膜阻抗主要由濾餅層阻力(R_c)所貢獻，顯示 AnMBR 系統中膜表面

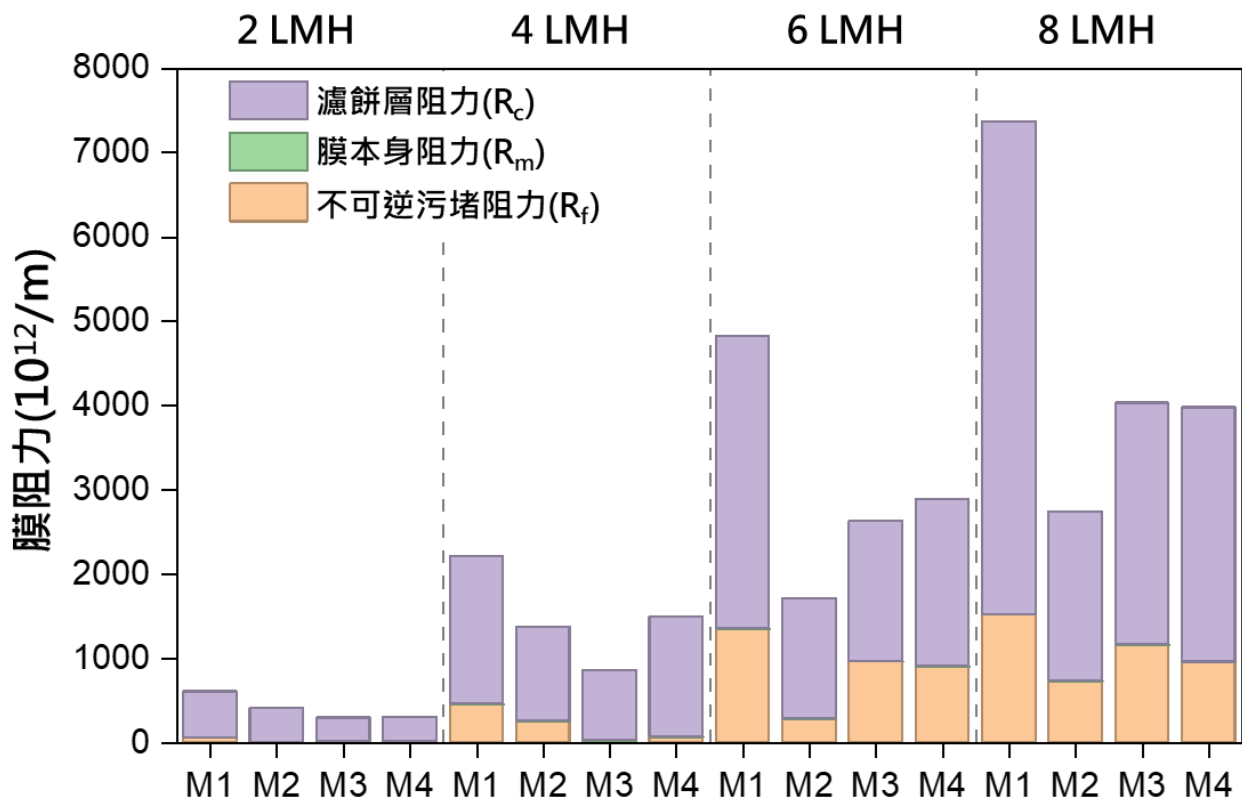


圖 7 膜阻抗分析

濾餅層累積為主要積垢來源。於 2 LMH 時，各膜組 R_c 約為 $182 - 544 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ，其中 PVDF (M1) 最高，表示低通量下仍會形成明顯濾餅層；隨通量提升至 4 LMH，部分膜組阻力增加，PVDF 之 R_f 與 R_c 分別達 462 與 $1,745 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ，顯示較高過濾負荷會促進不可逆污染與濾餅層累積。在 6 LMH 與 8 LMH 階段，阻力進一步上升，特別是 PVDF 在 8 LMH 下 R_c 高達 $5,848 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ， Fe_3O_4 (M3) 亦呈現較高 R_f ($1,159 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$)，說明高通量會明顯加速膜積垢與孔堵塞。整體而言， R_m 皆維持相對低值，表示膜本身阻力影響較小，而 R_c 與 R_f 的增加是造成總阻力上升的主要原因。

由圖 8 可知，EPS 與 SMP 中皆以蛋白質(PN)為主要組成，且整體濃度隨操作通量提升而增加。EPS 中 PN 濃度由 17.98 mg/L (2 LMH) 增加至 38.35 mg/L (8 LMH)，PS 則由 3.42 mg/L 增加至 18.39 mg/L，顯示高通量操作會促進污泥絮體與膜表面生物膜分泌更多胞外聚合物，進而提高膜積垢風險。相較之下，SMP 濃度較低，PN 由 3.51 mg/L (2 LMH) 增加至 14.73 mg/L (8 LMH)，PS 則由 1.43 mg/L 增加至 2.90 mg/L，說明溶解性微生物產物亦會在高通量下累積，但其貢獻低於 EPS。整體而言，PN 為 EPS 與 SMP 的主要成分，而 EPS 的明顯累積可能是造成 TMP 上升與膜阻力增加的重要原因。

綜合 TMP、膜阻抗及 EPS/SMP 分析結果可知，操作通量的選擇需同時考量處理水量、能源回收及膜積垢控制。由於本研究在 2–8 LMH 範圍內皆可維持穩定之 COD 與 BOD 去除效率，若以提升處理水量並提高 AnMBR 與好氧 MBR 技術競爭性為目標，操作通量仍有必要朝較高通量發展。然而，8 LMH 雖可提高產水量，但其 TMP 上升較快、膜阻抗與 EPS 累積較明顯，且甲烷產率與能源回收量下降，顯示過高通量可能增加膜清洗需求並降低能源回收效益。相較之下，6 LMH 在維持良好有機物去除效能的同時，具有最高甲烷產率($0.28 \text{ L CH}_4/\text{g COD removed}$)及最高能源回收潛力(0.316 kWh/m^3)，且膜積垢程度仍較 8 LMH 可控，因此可視為本研究中兼顧處理效率、能源回收與膜操作穩定性的較佳操作通量。未來若以實場應用為目標，建議可將 6 LMH 作為初步設計與操作基準，再依處理規模、能源回收需求及清洗成本進一步優化通量條件。然而，若應用目標僅在於滿足放流水水質標準，並藉由厭氧處理取代傳統好氧曝氣以降低能源消耗，而非追求最大化甲烷回收或最小化膜積垢，則仍可進一步評估高於 8 LMH 的操作通量（如 10 LMH 或更高）。由於本研究結果顯示在 8 LMH 下仍可維持良好的有機物去除效率，因此未來可透過更高通量條件之測試，進一步探討其在處理效能、膜污染發展及操作成本間的權衡關係，以評估其實際應用潛力。

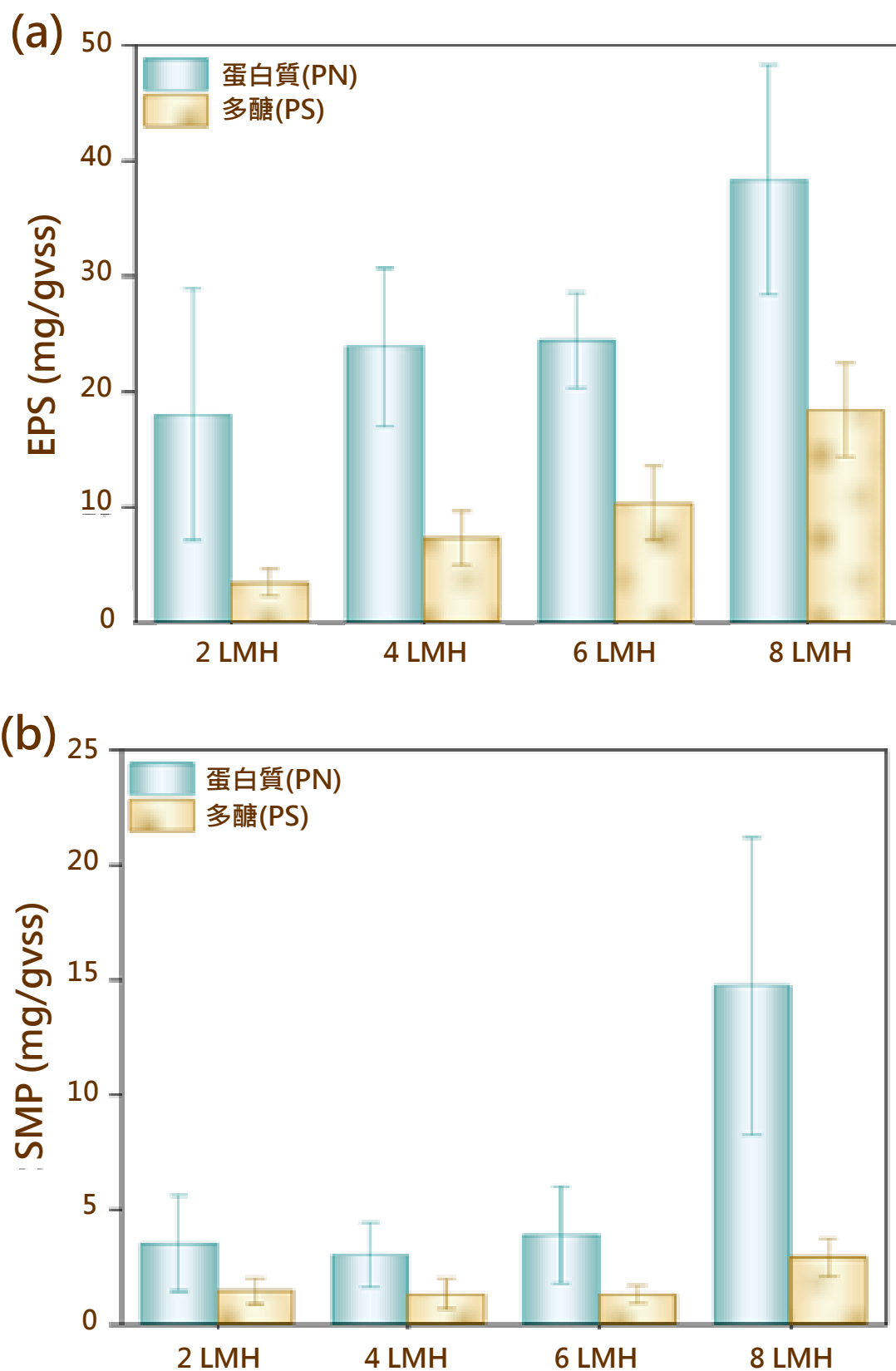


圖 8 EPS、SMP 濃度

肆、結語

本研究建立實驗室規模 AnMBR 系統，評估其應用於都市污水處理、甲烷回收及膜積垢控制之可行性。結果顯示，系統於 2–8 LMH 操作條件下可維持穩定厭氧環境，COD 與 BOD 平均去除效率分別約為 88% 與 94%，甲烷含量維持於 62.4–69.1%，甲烷產率為 0.20–0.28 L CH₄/g COD removed，顯示其具備低碳處理與能源回收潛力。膜積垢方面，TMP 隨通量提升而加速上升，膜阻抗主要由濾餅層阻力貢獻，且 EPS 中蛋白質與多醣累積為造成積垢之重要因素；相較於原始 PVDF 膜，改質膜可延緩 TMP 上升並提升膜服務時間，顯示其具有較佳抗積垢能力。整體而言，AnMBR 技術具備應用於都市污水處理之潛力，未來建議採「由小而大」策略，優先導入偏遠山區及離島小型污水處理場，如馬祖、陽明山及竹子湖等場域，作為低噪音、低碳及能源回收型污水處理技術之先導示範。

參考文獻

1. APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (21st ed.), American Public Health Association, Washington DC. USA.
2. Du, R., Hu, Y., Nitta, S., Ji, J., Li, Y.-Y., 2022. Material mass balance and elemental flow analysis in a submerged anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment towards low-carbon operation and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 852, 158586.
3. DuBois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* 28, 350–356.
4. El Kik, O., Issa, L., Katuri, K.P., Saikaly, P.E., Alameddine, I., El-Fadel, M., 2021. Coupling anaerobic fluidized membrane bioreactors with microbial electrolysis cells towards improved wastewater reuse and energy recovery. *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 105974.
5. Ji, J., Du, R., Ni, J., Chen, Y., Hu, Y., Qin, Y., Hojo, T., Li, Y.-Y., 2022. Submerged anaerobic membrane bioreactor applied for mainstream municipal wastewater treatment at a low temperature: Sludge yield, energy balance and membrane filtration behaviors. *J. Clean. Prod.* 355, 131831.

6. Jiménez-Benítez, A., Ruiz-Martínez, A., Robles, Á., Serralta, J., Ribes, J., Rogalla, F., Seco, A., Ferrer, J., 2023. A semi-industrial AnMBR plant for urban wastewater treatment at ambient temperature: Analysis of the filtration process, energy balance and quantification of GHG emissions. *J. Environ. Chem. Eng.* 11, 109454.
7. NIEA, 2010. National Environmental Research Academy: water quality detection technology and methods.
8. Peterson, G.L., 1977. A simplification of the protein assay method of Lowry et al. which is more generally applicable. *Anal. Biochem.* 83, 346 – 356.
9. Rong, C., Wang, T., Luo, Z., Hu, Y., Kong, Z., Qin, Y., Li, Y.-Y., 2022. Seasonal and annual energy efficiency of mainstream anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) in temperate climates: Assessment in onsite pilot plant and estimation in scaled-up plant. *Bioresour. Technol.* 360, 127542.
10. Tran, D.P.-H., Safiyanti, A.D., Wang, Y.-F., Tobino, T., Nakajima, F., You, S.-J., 2025. Roles of Fe₃O₄ and PANI coated membranes for fouling mitigation in membrane bioreactor: Long-term treatment performance and fouling mechanisms. *J. Memb. Sci.* 725, 124027.
11. Tran, P.-H.D., You, S.-J., Bui, X.-T., Wang, Y.-F., Ramos, A., 2024. Anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater: Progress in resource and energy recovery improvement approaches. *J. Environ. Manage.* 366, 121855.
12. Ünyay, H., Yılmaz, F., Başar, İ.A., Altınay Perendeci, N., Çoban, İ., Şahinkaya, E., 2022. Effects of organic loading rate on methane production from switchgrass in batch and semi-continuous stirred tank reactor system. *Biomass and Bioenergy* 156, 106306.
13. Yang, X., Lei, Z., Wang, L., Chen, R., 2024. A deeper investigation of membrane fouling in anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: Influencing factors and fouling layer characteristics. *J. Environ. Manage.* 371, 123223.

建構整合式 GIS 視覺化決策平台

以提升污水下水道治理效能



摘要

污 下水水道系統為現代城市不可或缺之基礎公共設施，其管理效能直接影響環境品質與公共衛生。隨著都市規模擴張與管網建設成熟，既有設施逐漸老化，巡檢、維修與建設所產生之資料量快速增加，傳統仰賴紙本紀錄與人工審查之管理模式已難以支撐即時化與精細化之治理需求。資料分散保存、查詢不易與跨單位資訊不同步等問題，已成為提升維運效率與決策品質之主要瓶頸。

為因應上述挑戰，臺北市政府工務局衛生下水道工程處（以下簡稱臺北市衛工處）推動建置「污水下水道雲端智慧管理系統」，整合地理資訊系統、行動APP、影像紀錄與統計分析模組，將巡檢、維修與建設資料集中管理並轉化為圖像化決策資訊。透過多模組決策支援機制，系統能即時呈現管網老化風險、施工進度與缺失分布情形。同時藉由行動化作業與資料標準化機制，提升資料完整性與可追溯性，強化跨單位協作與行政效率。

本研究呈現污水下水道管理由傳統工程導向模式轉向智慧治理架構之實證案例，逐步建構數位孿生基礎，提升設施管理透明度與決策科學化程度。未來透過持續優化資料品質與深化智慧分析應用，將有助於打造安全、韌性與永續並重之智慧下水道管理體系。



關鍵字：

- 污水下水道系統
- 地理資訊系統整合
- 智慧治理



作者

- 黃 群¹，臺北市政府工務局衛生下水道工程處 / 處長
- 李光軒²，臺北市政府工務局衛生下水道工程處 / 主任秘書
- 王文清³，臺北市政府工務局衛生下水道工程處 / 副總工程司
- 顧睿瑜⁴，臺北市政府工務局衛生下水道工程處 / 維護工程科科长
- 游勳喬⁵，日陞空間資訊股份有限公司 / 總經理



Abstract

The wastewater sewerage system constitutes a critical component of modern urban infrastructure, where its management performance directly impacts environmental quality and public health. With ongoing urban expansion and the maturing of sewer networks, existing facilities have gradually aged, while the volume of data generated from inspection, maintenance, and construction has increased substantially. Traditional management approaches relying on paper-based records and manual reviews are no longer capable of supporting the growing demand for real-time, precision, and data-driven governance. Fragmented data storage, limited accessibility, and a lack of inter-agency synchronization have emerged as critical bottlenecks hindering operational efficiency and decision-making quality.

To address these challenges, the Sewerage Systems Office, Public Works Department, Taipei City Government developed the “Cloud-Based Smart Sewerage Management System,” integrating Geographic Information Systems (GIS), mobile applications, and statistical analysis modules to centralize infrastructure data and transform it into visualized, actionable intelligence. Through functional modules such as the Pipeline Rehabilitation Command Center, Manhole Cover Management Dashboard, and Blockage Hotspot Analysis, the system provides real-time visualization of aging risks, construction progress, and defect distribution. Furthermore, by incorporating mobile-enabled operations and data standardization, the platform enhances data integrity, strengthens interdepartmental coordination, and improves administrative efficiency.

The implementation of this platform marks a transition from conventional engineering-based management to a smart governance framework, establishing the foundation for a digital twin of the sewerage system. By improving management transparency and advancing data-driven decision-making, the system enhances governance capacity. Continuous optimization of data quality and further integration of intelligent analytics are expected to contribute to a safe, resilient, and sustainable smart sewerage management system.



Keywords:

-  Wastewater sewerage system
-  GIS integration
-  Smart governance

壹、前言

隨著城市治理朝向智慧化與精準化發展，基礎公共設施已由單純工程建設角色，轉型為支撐都市韌性與永續發展之治理載體。污水下水道系統作為隱形卻關鍵之城市基礎設施，其維護及管理成效直接影響環境品質、公共衛生與都市防災能力。然而，在數位轉型浪潮下，傳統工程導向之管理模式，已逐漸無法滿足即時決策與整體風險控管之需求。

在此背景下，雖已有部分數位化系統導入管理流程，例如桃園市建置之次世代污水下水道統合運籌雲端平台，透過多元資訊系統整合提升維運效率（劉振宇，2023）；然而既有系統多著重於單一技術應用，缺乏整合式治理平台之系統設計思維，當設施數量與資料規模快速成長，若缺乏整合性資訊平台，管理單位將難以從龐大數據中找出有效決策依據。因此，建構一套兼具空間整合、資料標準化與視覺化決策支援能力之整合式智慧管理系統，已成為推動污水下水道治理轉型的關鍵課題。

貳、污水下水道系統新角色需求

過去污水下水道管渠及設施管理，長期仰賴紙本紀錄與人工審核作業，各項巡檢、維修及施工成果資料多以工程或勞務契約別分散保存，因此無論在查找效率、

資料整合或歷史追溯上，皆存在相當困難，更遑論提供延壽或更新決策的及時輔助。隨著污水下水道建設規模持續擴大，巡檢與維護作業日益頻繁，所累積的影像與測量資料數量迅速增加，傳統分散式管理模式已難以支撐日益龐大的數據量與精準化管理需求。

除資料整合困境外，污水下水道系統高度地下化且設施分布廣泛，管理單位若無法即時掌握設施狀況與異常分布情形，將難以及早辨識老化風險與高頻故障區域。案件通報、巡查成果、修繕履歷與建設資料若無整合機制，不僅造成跨單位資訊不同步，也影響決策效率與資源配置準確性。

因此，污水下水道系統的角色已由傳統「事後維修」模式，轉型為「主動監測、預警分析與風險管理」之智慧治理架構(Tscheikner-Gratl et al., 2019)，數位孿生與AI技術的導入更代表此一轉型之前沿發展方向(Hartmann et al., 2025)。基於上述治理挑戰，臺北市衛工處提出建構整合式空間資訊與視覺化決策支援功能之智慧管理平台。

參、雲端智慧管理系統架構與功能設計

Du et al. (2019) 指出，資料驅動架構應涵蓋資料感知、傳輸、儲存、分析應用至使用者介面等多個層次，方能支援都

市污水系統之智慧化治理目標。為使污水下水道各項業務資料能有效整合並支援智慧治理需求，本系統以GIS空間資訊為核心，整合巡檢、維修、建設、用戶接管及決策分析等業務流程，建構完整之雲端智慧管理架構。系統功能涵蓋維護工程通報與流程整合、清疏聯稽與堵塞熱區分析、行動巡查與資料即時回傳、視覺化決策支援平台、公共管線圖資管理以及用戶接管管理等六大核心模組，透過標準化資料架構串聯巡檢成果、施工履歷、管線圖資及用戶資料，形成由資料蒐集、資訊整合、風險分析至決策支援之完整管理循環。其中，維護工程通報與流程整合模組負責案件派工與修繕履歷管理；清疏聯稽與堵塞熱區分析模組協助辨識高風險堵塞區域並推動預防性管理；行動巡查系統提供現場資料蒐集與即時回傳機制；視覺化決策支援平台則整合延壽維護、框蓋管理及堵塞熱區等資訊，以圖表及空間視覺化方式支援管理決策；公共管線圖資管理模組負責維護公有管線設施之空間資料品質；用戶接管管理模組則建立完整之接管履歷與空間關聯資料。透過各模組間之資料共享與功能整合，使管理者得以於單一平台掌握設施現況、維護成果與風險分布情形，進一步提升污水下水道系統之管理效率與決策品質，如圖1所示。

為提升維護工程案件之管理效率，本系統建立完整之通報案件管理機制，透過系統串聯施工廠商、臺北市衛工處業務單

位及系統管理人員之作業流程。當民眾通報案件成立後，由施工廠商透過系統受理案件並回報施工進度，臺北市衛工處業務單位則負責案件指派、進度追蹤及工程資料管理，系統管理人員則負責系統帳號權限及資料維護作業。各階段作業成果皆即時記錄於系統平台，形成標準化之案件管理流程，有效提升案件處理效率及資料完整性，如圖2所示。

一、維護工程通報與流程整合設計

本模組構成案件流程標準化與數位化管理之基礎，整合1999市民通報、人民陳情、與維護專線等資料，透過地圖化操作介面定位故障設施，並依行政區自動分案予負責廠商。系統建置完整案件生命週期管理機制，涵蓋通報建立、現場確認、施工申報、修繕回報及施工完成等流程節點，如圖3所示。

施工廠商完成現場作業後，即時上傳施工照片、維護項目與修繕說明，形成可追溯之施工履歷資料。此一流程整合設計，有效降低人工電話確認與紙本傳遞之行政負擔，並提升案件處理透明度與進度掌握能力。

二、清疏聯稽與堵塞熱區空間分析模型

油脂堵塞為都市污水下水道系統常見之維護問題之一，主要源自餐飲業、食品加工業及住商混合區域長期排放含油廢水

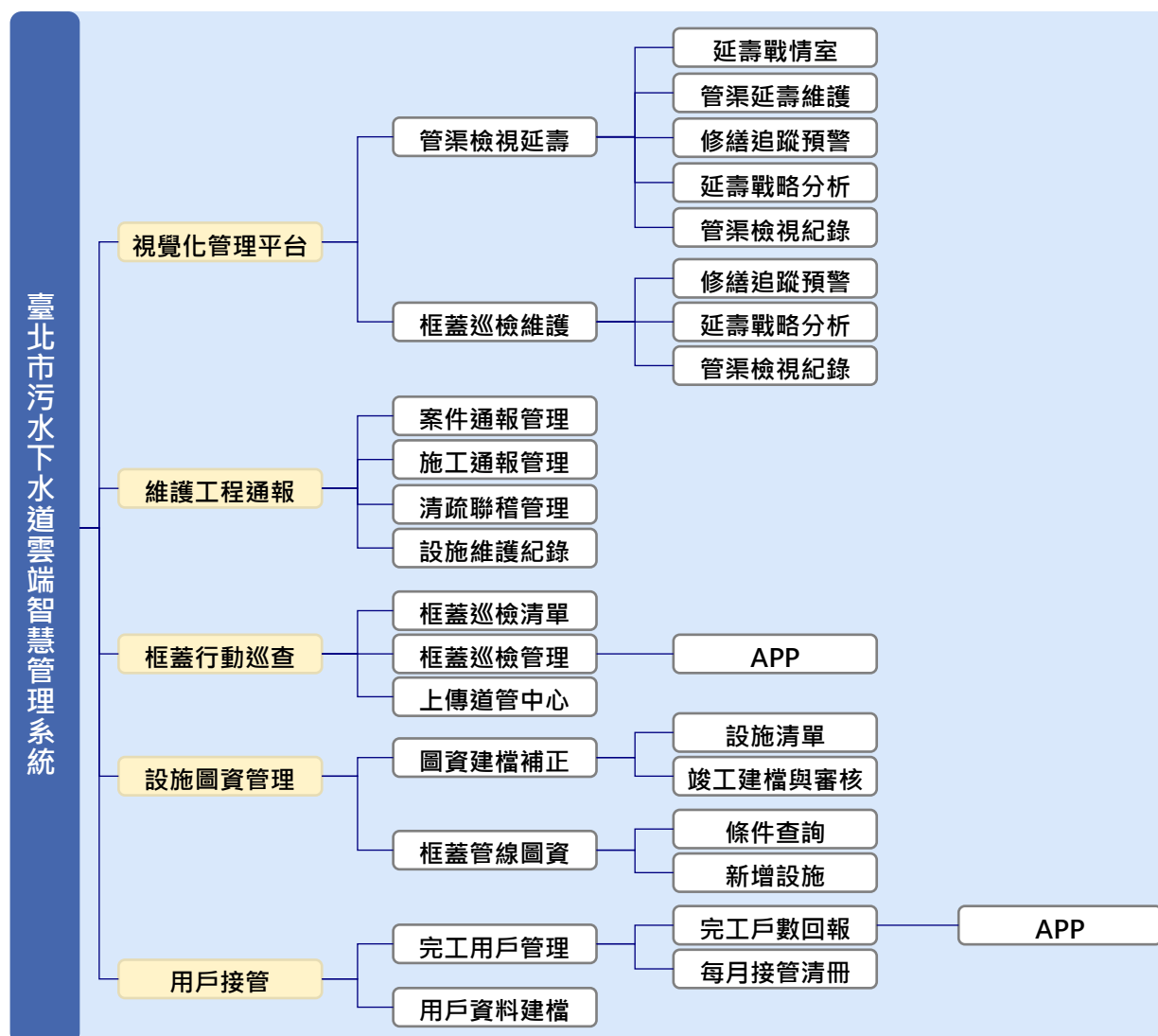


圖1 智慧管理系統架構示意圖 (自行整理繪製)



圖2 平台角色作業流程圖 (自行整理繪製)

2023年東區污水管渠設施檢視及維護預約式工程 | 60次



圖3 通報單階段與辦理情形示意圖（系統截圖）

所致。當油脂於管渠內部逐漸累積後，容易附著於管壁形成油脂結垢，不僅降低管渠輸送能力，更可能造成污水回堵、異味產生及環境衛生問題。傳統維護作業多以接獲民眾通報後再進行清疏處理，屬於被動式管理模式，雖能解決當下堵塞問題，但缺乏對重複發生區域之系統性分析與追蹤機制，導致部分區域堵塞事件反覆發生，增加維護成本與管理負擔。針對此一問題，國際研究已提出明確的改善方向：Okwori et al. (2021)證實透過空間統計方法分析堵塞高頻區域之影響因子，能有效支援預防性維護規劃；Johansen et al. (2007)則進一步指出，系統性辨識高風險區位並結合成本效益分析，可顯著提升維護資源配置之精準度，較傳統直覺式決策更具可靠性。

為提升堵塞案件之預防管理能力，本系統整合歷年堵塞通報資料、設施位置資訊及清疏履歷紀錄，建立以一年內累計2次以上油脂堵塞為條件之熱區篩選機制，並透過空間統計方法建構堵塞熱區圖層。系統可視化呈現原始通報位置、後續複查結果與列管設施分布，提升管理者對高風險

區域之辨識能力。

當系統判定成立清疏聯稽專案後，自動建立通報案件，並由施工廠商填報現場調查清冊與商家名單，再與營運管理科 MIS 水質稽查資料串聯，形成機關內跨科室聯合管理機制。此模式由被動處理轉為主動預防性管理，提升整體管網清疏策略之精準度。必要時會同北市府環保局、衛生局及建管處進行跨機關聯合稽查，不合格商家配合改善情形顯著提升。

依系統導入前後通報案件數量統計結果顯示，2024年全年度共計通報3,144件堵塞案件，導入清疏聯稽機制後，2025年全年度下降至2,023件，減少約35.7%；而2026年截至5月26日止，通報案件數僅183件，顯示預防性列管及跨科室聯合管理模式，已有效降低油脂堵塞事件發生頻率，並逐步由被動處理轉型為主動預防性維護管理，如圖4、圖5所示。

三、行動巡查系統與資料回傳機制

為解決傳統巡查作業依賴紙本紀錄與事後彙整所造成之資料延遲與錯誤風險，

本系統建置跨平台行動巡查應用程式（可支援 Android 與 iOS），作為第一線資料蒐集端點。行動巡查系統以GIS地圖為操作核心，巡查人員可於行動裝置上即時定位

設施位置，查閱既有設施資料與歷史巡檢紀錄，並直接於現場建立巡查成果。

巡查功能包含設施點選定位、缺失類型勾選、異常分級填報、照片即時拍攝上

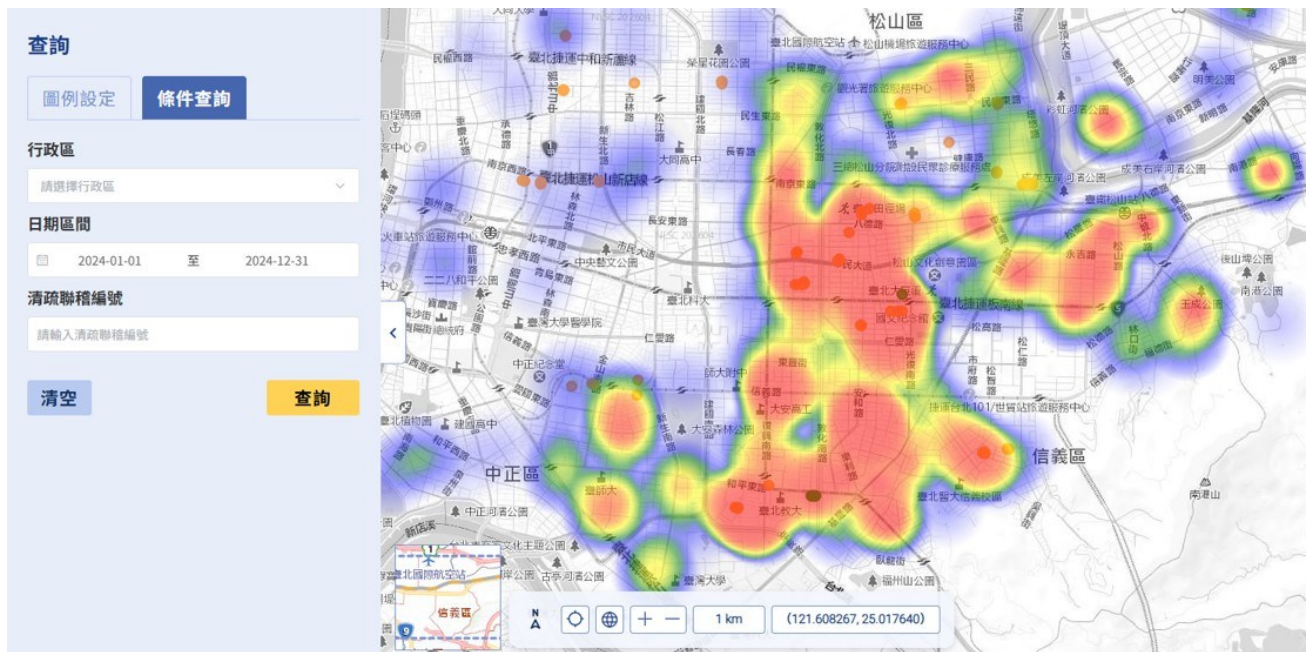


圖4 2024年臺北市堵塞熱區圖（系統截圖）

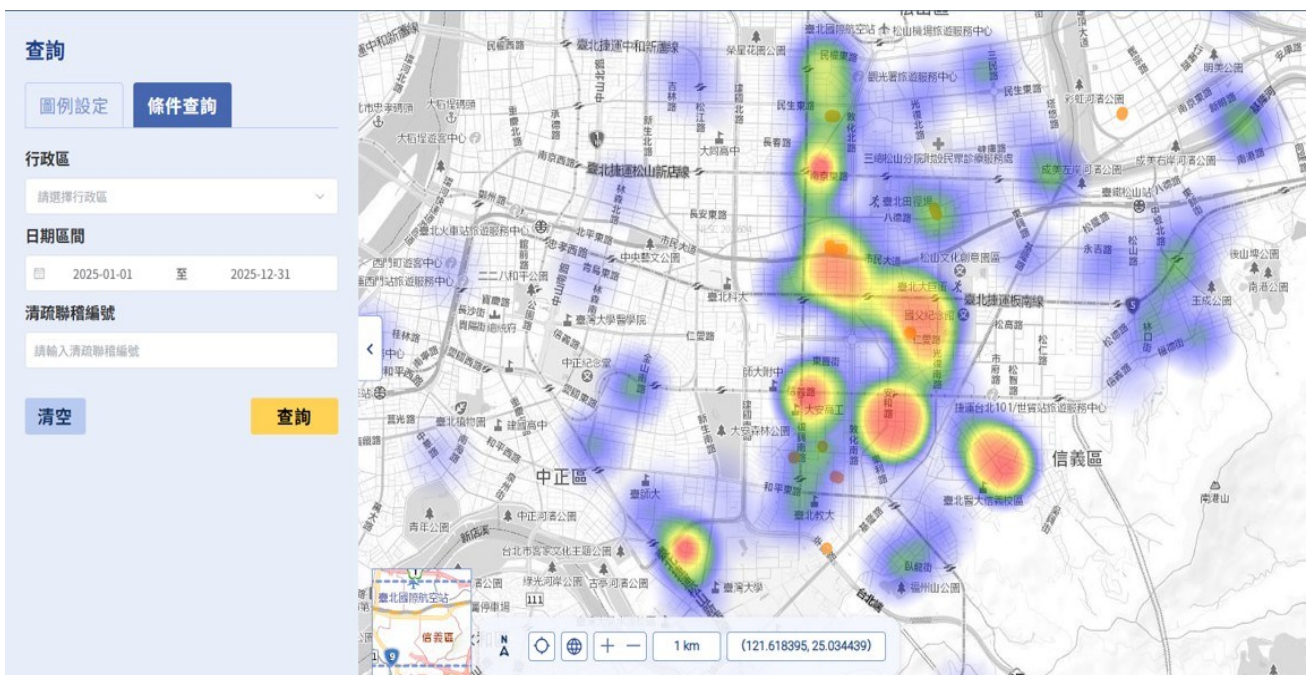


圖5 2025年臺北市堵塞熱區圖（系統截圖）

傳與補充說明輸入等項目，並透過必填欄位與格式驗證機制確保資料完整性，如圖6所示。系統內建定位驗證與時間戳記功能，將巡查時間、GPS坐標與使用者帳號同步寫入資料庫，以建立可追溯之巡查履歷。此一機制不僅強化巡查作業真實性，也避免事後補填資料所產生之落差，也達到防弊的廉政效能。

在資料回傳流程設計上，巡查完成後可一鍵同步至雲端資料庫，系統自動執行照片命名標準化與檔案分類歸檔程序，並

與對應設施編號建立關聯。巡查成果隨即更新於後端管理平台與戰情室視覺化模組，形成「現場蒐集—即時同步—即時呈現」之閉環管理流程。過往巡查成果需經紙本整理、照片彙整及人工建檔等流程，平均約需7日方能完成資料彙整與系統更新；導入行動巡查系統後，巡查資料可於當日完成同步與上線，最遲1日內即可於系統平台呈現，相較傳統人工流程，資料時效性提升約85.7%，並同步強化管理透明度與後續決策應變效率。

Figure 6 is a screenshot of the 'Manhole Inspection APP' interface, showing the '新增巡檢紀錄' (Add Inspection Record) form. The form is divided into several sections:

- Header:** '框蓋巡檢紀錄表' (Manhole Inspection Record Table).
- Form Fields:**
 - 4049-0403** (Inspection ID)
 - 巡檢類別** (Inspection Type): 外部巡檢 (External Inspection)
 - 巡檢日期** (Inspection Date): 114/03/21
 - 設施種類** (Facility Type): 人孔類別 (Manhole Type)
 - 無** (None)
 - 框蓋地址** (Manhole Address): 框蓋經緯度 (Manhole Coordinates)
 - 無** (None)
 - 巡檢人員** (Inspector): 25.0648191, 121.52630397
- 檢測項目** (Inspection Items):
 - 工程名稱*** (Project Name): 112年東區污水管渠設施檢視及維護預約... (112 East District Sewerage Facility Inspection and Maintenance Appointment...)
 - 框蓋位置*** (Manhole Location): 非道路 (Non-road)
 - 框蓋現況*** (Manhole Status):
- Inspection Details:**
 - 外觀圖樣*** (Exterior Diagram): 樹魚 (Tree Fish)
 - 框蓋型式*** (Frame Cover Type): 傳統式框蓋 (Traditional Frame Cover)
 - 框蓋表面*** (Frame Cover Surface): 無異常 (No abnormality)
 - 框蓋聲響*** (Frame Cover Sound): 無異常 (No abnormality)
 - 框座檢視*** (Frame Seat Inspection): 無異狀 (No abnormality)
 - 地面破損*** (Ground Damage): 無異狀 (No abnormality)
 - 地面不平*** (Ground Unevenness): 無異狀 (No abnormality)
- Photo Upload:**
 - 請拍攝遠照** (Please take a wide shot): Includes a photo of a street scene with a manhole cover and buttons for '刪除' (Delete) and '拍攝照片' (Take Photo).
 - 請拍攝近照** (Please take a close-up shot): Includes a photo of a manhole cover and buttons for '刪除' (Delete) and '拍攝照片' (Take Photo).
- Navigation:** Buttons for '上一步' (Previous Step), '回報' (Report), and '下一步' (Next Step).

圖6 框蓋巡檢APP—新增巡檢紀錄示意圖 (系統截圖)

此外，巡查成果可依行政區、設施類型、缺失分級或巡查期間進行篩選統計，並支援道路挖掘管理系統之Geography Markup Language (GML)資料匯出，降低重複建檔與人工轉檔負擔。整體而言，行動巡查系統不僅改善資料蒐集流程，更成為智慧治理架構中資料源頭控管與品質管理之關鍵。

四、視覺化決策支援平台設計

在資料大量累積的情境下，單純資料儲存已不足以支援管理決策，因此本系統建置多模組視覺化決策支援平台，將巡查、維修、延壽與通報資料轉化為空間化與圖表化資訊，以強化管理者對整體系統

狀態之即時掌握能力。

(一) 延壽戰情室

延壽戰情室整合用戶接管外的管渠檢視成果、建設年度與管徑類型資料，透過動態折線圖、比例分布圖與行政區統計圖呈現各年度檢視完成率與老化管線比例，如圖 7、圖 8所示。系統可依時間區間與管線屬性進行交叉篩選，並即時更新統計結果，使管理者能快速辨識高風險區域與檢視缺口。作為資源配置與年度延壽維護計畫擬定之重要依據，協助有限預算更精準投入污水下水道系統之維護管理。過往管理者於擬定延壽維護計畫時，需耗費大量時間翻閱紙本資料、比對歷年檢視紀錄及

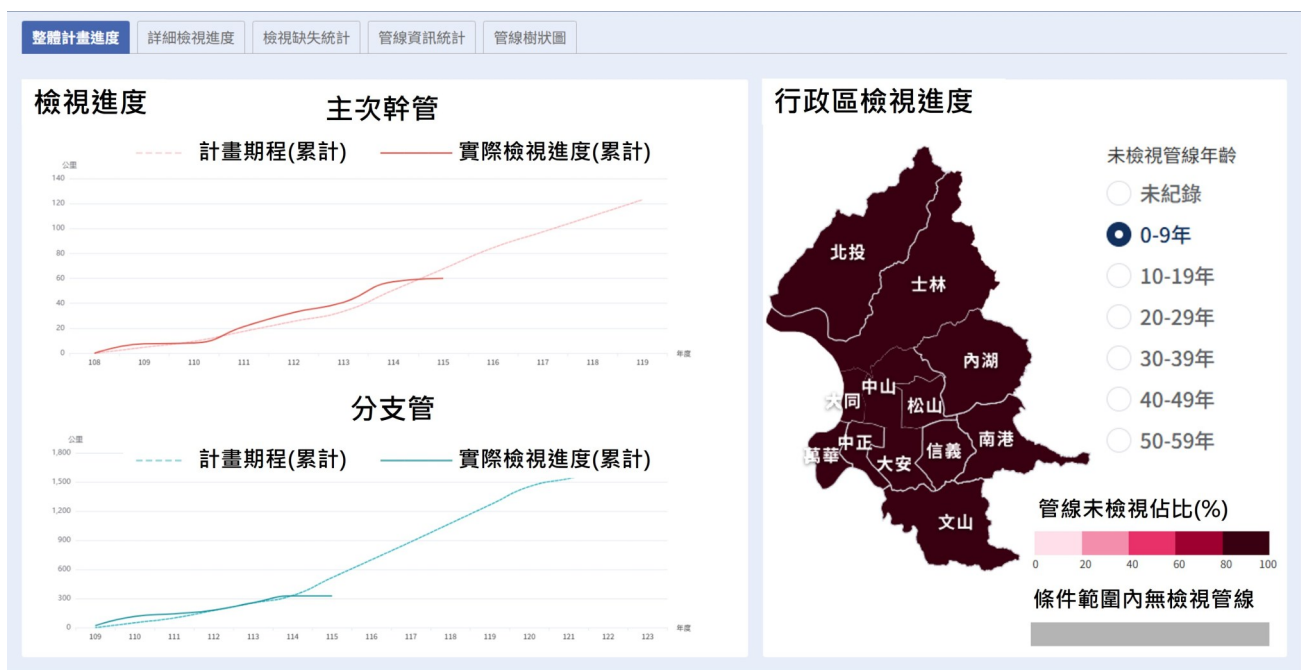


圖7 整體檢視進度示意圖（系統截圖）

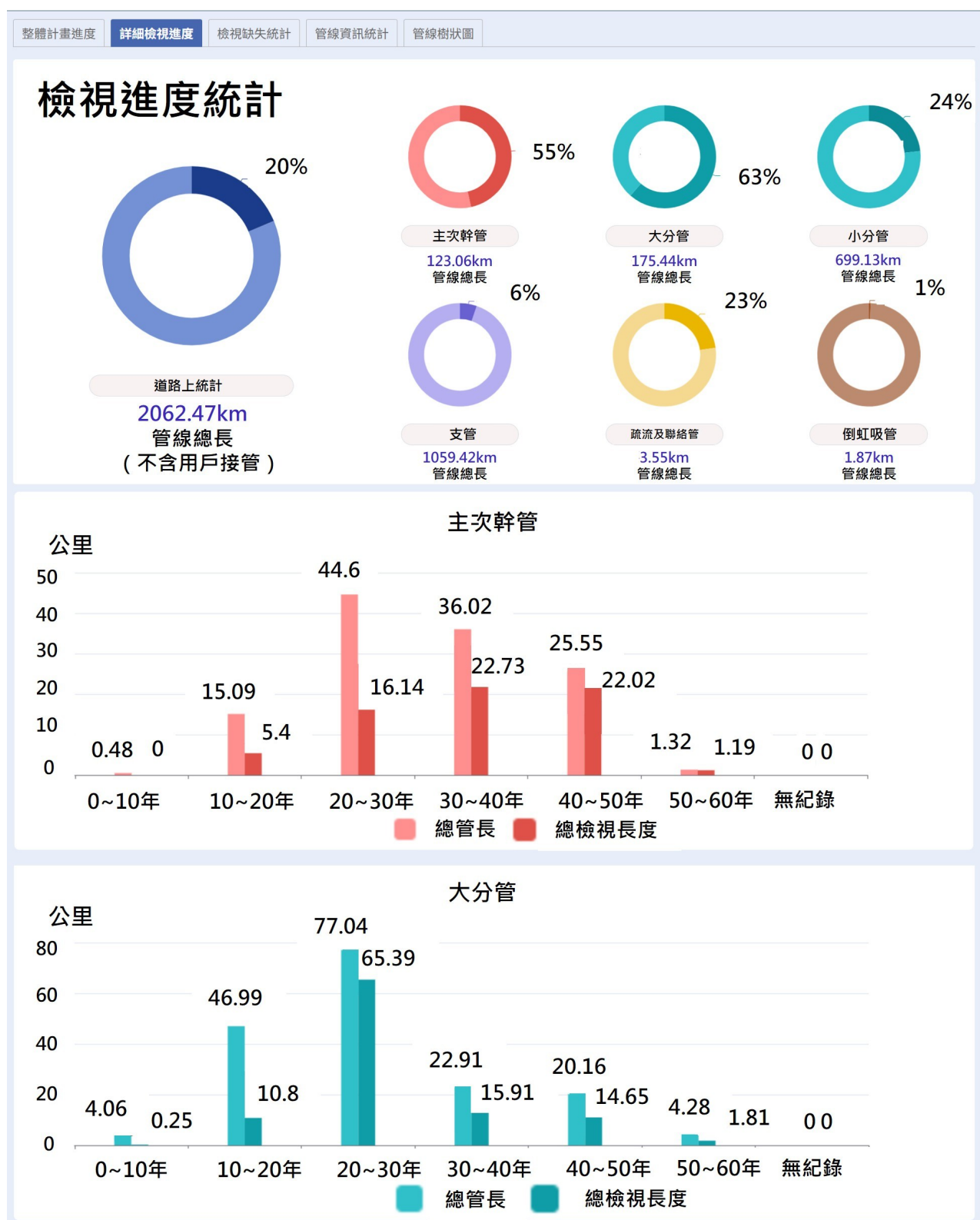


圖8 道路上詳細檢視進度示意圖 (系統截圖)

調閱光碟影片，整體資料整理與分析流程往往需時1至2週；導入延壽戰情室後，管理者僅需依需求設定篩選條件，即可快速取得對應之管線檢視成果、老化分布與統計分析結果，通常可於1日內完成延壽維護計畫之初步擬定，相較傳統人工資料調閱與整理流程，決策效率最高可提升約90%，顯著強化資料查詢效率與整體管理品質。

(二) 管渠延壽維護影像整合

在傳統延壽檢視管理模式下，各年度TV檢視成果多以紙本紀錄、光碟影像或分散檔案形式保存，不同施工廠商亦採用各自之紀錄格式與缺失分類方式，缺乏統一

資料標準與整合機制，如圖9所示。管理人員在查核時，往往需同時翻閱紙本報告、比對里程坐標並手動搜尋影片段落，不僅耗費大量時間，亦容易因資料格式差異與標示方式不同而產生誤判或遺漏。隨著檢視頻率提升與資料量快速累積，傳統分散式管理模式已難以支撐跨年度比較、缺失追蹤與延壽策略規劃等精細化治理需求。

為解決上述問題，本系統建置「管渠延壽維護影像整合」模組，以GIS圖台為核心，將管渠TV檢視影片、管線空間位置、缺失標註資訊與修繕履歷進行即時串聯，建置「跟隨式地下管線影像動態影像系統」。

建國南北路次幹管 污水管線檢視紀錄表

編號	管線編號	上游人孔	下游人孔	起點人孔	檢視日期	檢視次第	施工地點	檢視長度(m)	管徑(mm)	管材	檢視結果/未檢視原因
1	41410079	41410067		41410079	109/12/2	1	辛亥路1段及泰順街口	250.20	1650	RCP	OM-10M磚塊淤積，管段無異狀
2	41410067	41410077									
3	41410077	41410078		41410077	109/12/9	1	辛亥路1段及新生南路3段	347.00	1650	RCP	管段部分起伏變化大且有防水層剝落情形，其餘無異狀
4	41410078	42410123		41410077	109/12/9	1	辛亥路1段及新生南路3段	347.00	1650	RCP	管段部分防水層剝落，其餘無異狀
5	42410123	42410503		42410123	110/2/5	1	辛亥路2段及建國南路	336.00	1650	RCP	管段部分防水層剝落，其餘無異狀
6	42410503	42420005		42420005	109/10/16	1	建國南路2段及和平東路2段	47.00	1650	RCP	無異狀
7	42420005	42420004		42420005	109/10/16	1	建國南路2段及和平東路2段	47.00	1650	RCP	無異狀
8	42420004	42420003		42420004	109/10/19	1	建國南路2段及和平東路2段	310.20	1650	RCP	無異狀
9	42420003	42420831		42420003	109/10/16	1	建國南路2段151巷	67.10	1650	RCP	無異狀
10	42420831	42430028		42420831	109/5/13	1	建國南路2段123巷	192.75	1650	RCP	無異狀
11	42430028	42430027		42430028	109/5/13	1	建國南路2段69巷	222.50	1650	RCP	無異狀
12	42430027	42430026		42430027	109/6/8	1	建國南路2段及信義路3段	59.60	1800	RCP	破損龜裂、滲漏水
13	42430026	42430456									管段內部起伏變化大，水流湍急機具翻覆
14	42430456	42440038									管段內部起伏變化大，水流湍急水淹鏡頭
15	42440038	42440037		42440038	109/12/10	1	建國南路1段及仁愛路3段	309.50	1800	RCP	無異狀
16	42440037	42440412		42440037	109/6/11	1	建國南路1段	137.50	1800	RCP	管接頭表面防水層剝落
17	42440412	42420411		42420412	109/6/9	1	建國南路1段	59.00	1800	RCP	無異狀
18	42420411	42450117		42420411	109/6/9	1	忠孝東路3段31號	129.35	1800	RCP	破損龜裂、滲漏水；管接頭表面防水層剝落
19	42450117	42450116		42450117	109/6/10	1	建國南路1段及市民大道2段	149.15	1800	RCP	破損龜裂、滲漏水
20	42450116	42450115		42450116	109/11/16	1	建國南路1段及市民大道2段	40.00	2000	RCP	三支鋼管貫穿
21	42450115	42450114		42450115							

污水管段檢視紀錄表

工程名稱：

編號	施工地址	檢視日期	管線編號		檢視方向	檢視長度(m)	是否完成全段檢視	說明
			人孔編號(起)	人孔編號(迄)				
1	內湖區港華街63號	114/4/1	47520022	47520023	47520023 - 47520921 - 47520920	順向	11.4	是
			47520023	47520921	47520023 - 47520921 - 47520920	順向	3.8	是
			47520921	47520920	47520023 - 47520921 - 47520920	順向	10.8	是
			47520920	47520855	47520023 - 47520921 - 47520920	順向	11.8	是
			47520855	47520815		順向	8.2	是
2	信義區基隆路二段195號	114/4/2	44411502	44411503		逆向	9.8	是
3	南港區經國街58號	114/4/12	52480140	52480139		順向	35.2	是
4	大安區永康街2巷12-1號	114/4/17	41430119	41430343	41430343	逆向	9.4	是
5	內湖區大湖山莊街219巷31弄51號	114/4/18	41430343	41430344	41430344	逆向	12	是
6	大安區臥龍街195巷31-1號	114/4/18	50530113	50530038		順向	3.8	是
			44400460	44400461	44400461 - 44400462	順向	3.9	是
			44400461	44400462	44400461 - 44400462	順向	12.5	是
			44400462	44400223	44400461 - 44400462	順向	3.2	是
			40430203	40430202	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	20	是
7	大安區金山南路二段10巷	114/4/26	40430202	40430201	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	9.4	是
			40430201	40430200	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	8.4	是
			40430200	40430197	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	13.5	是
			40430196	40430265	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	7.3	是
			40430265	40430266	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	6.1	是
			40430266	40430267	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	4.2	是
			40430267	40430197	40430202 - 40430201 - 40430200	順向	5.9	是
			40430199	40430198		順向	9.8	是
			40430198	40430197	40430198	順向	10.7	是
			40430196	40430195	40430195 - 40430194	順向	7.6	是
			40430195	40430194	40430195 - 40430194	順向	14.7	是
			40430194	40430063	40430195 - 40430194	順向	4.7	是
			40430171	40430169	40430169	順向	10.2	是
			40430169	40430052	40430169	順向	10.9	是
			40430174	40430173	40430173 - 40430172	順向	8.6	是
8	大安區信義路二段72號(86巷口內)	114/4/26	40430173	40430172	40430173 - 40430172	順向	8.9	是
			40430172	40430171	40430173 - 40430172	順向	17.1	是
			40430176	40430175	40430175	順向	17.9	是
			40430175	40430171	40430175	順向	17.2	是
			40430171	40430170		順向	17.2	是

圖9 檢視紀錄未統一格式示意圖(自行整理繪製)

系統透過空間索引與統一設施編碼機制，建立影像與圖資之標準化關聯，每段檢視影片均對應其起迄坐標與里程資訊，並依統一缺失分類標準進行標記與分級。此一標準化架構，使不同年度與不同廠商所提交之檢視成果得以在同一資料結構下整合保存與比較，消弭格式差異所造成之管理斷裂問題。

在操作層面，使用者僅需於地圖上點

選任一管段或缺失圖示，播放軸即可自動跳轉至對應影片時間點，形成「空間定位—時間對應—影像呈現」之三軸整合查詢流程，如圖10所示。同時，系統支援依行政區、年度、缺失類型、缺失等級或是否已修繕等條件進行多維度篩選，並以圖層顏色區分、圖徵標示及統計圖表方式呈現檢視成果分布情形，如圖11所示。管理者可透過條件式篩選快速聚焦於特定風險類型或高老化區段，使龐大影像資料轉化



圖10 延壽檢視跟隨式影像查詢示意圖（系統截圖）



圖11 依屬性值設定分類顏色功能示意圖（系統截圖）

為具可讀性與決策意義之視覺化資訊。

此外，系統將缺失資訊疊加於檢視軌跡上，並整合缺失照片、缺失分級與修繕紀錄；若缺失已完成改善，則於圖台上同步標示修繕位置與成果照片，形成完整之「檢視—缺失—修繕—追蹤」生命週期管理鏈，如圖12、圖13所示。透過串流播放與雲端集中儲存機制，高解析檢視影片得以於瀏覽器端即時調閱，取代過往需下載或實體調閱光碟之作業模式，大幅提升跨科室協作效率與資料共享一致性。

透過影像、空間圖資與履歷資料之高度整合，本模組將原本分散且難以交互驗

證之檢視成果，轉化為可即時查詢、可追溯且具空間脈絡之決策支援工具。管理者得以在單一平台上同步掌握設施位置、缺失狀態、修繕歷程與影像證據，形成完整之設施生命週期管理視角。此種以資料整合為核心之延壽維護管理架構，不僅提升治理透明度與決策科學化程度，更為未來導入AI缺失辨識與預測維護模型奠定資料基礎(Moradi et al., 2019)。

(三) 框蓋戰情室

框蓋戰情室模組以巡檢進度監控與缺失風險管理為核心設計理念，透過多樣化統計圖表與空間視覺化呈現，使管理者得

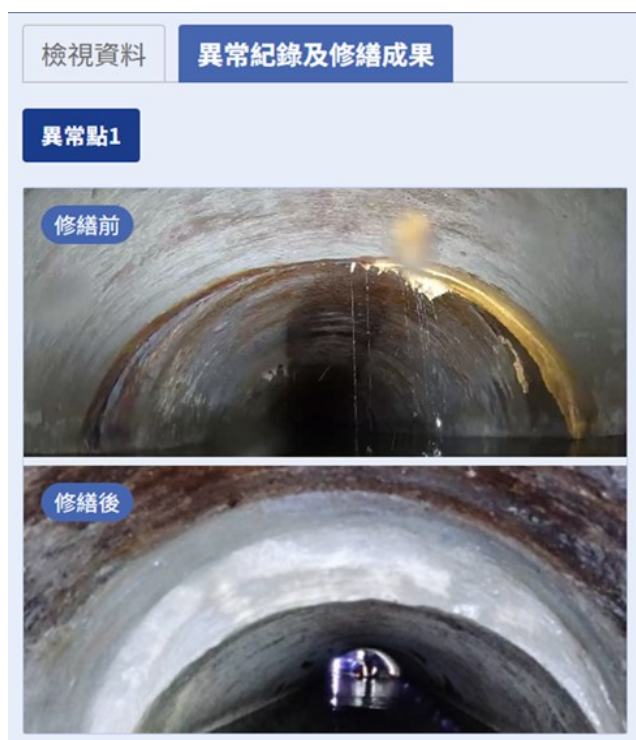


圖12 管渠修繕前後示意圖（系統截圖）

檢視異常			
異常起點(m)	50.56	異常終點(m)	0
異常方位(點)	12-3點	異常狀況說明	破損龜裂、滲漏水
異常分級	1.破損龜裂	異常程度	3：嚴重
修繕評估			
審核異常分級		審核異常程度	
修繕評估		預定修繕日期	2021-03-26
評估修繕工法		修繕評估說明	
評估監造		評估日期	
修繕成果			
修繕狀況	已修繕	修繕日期	2021-03-26
實際修繕工法		修繕說明	管線補漏修繕
修繕契約編號	S10824108018-1	修繕廠商	東鑫龍營造有限公司
修繕工程名稱	臺北市污水下水道主、次幹管渠渠延壽統包工程(第1期)		

圖13 管渠檢視異常及修繕相關資訊示意圖（系統截圖）

以即時掌握全市框蓋巡檢與修繕狀況。系統整合年度巡檢計畫、實際完成數量與缺失分類結果，並以動態長條圖、折線趨勢圖、圓餅圖及行政區比較圖等多種圖表形式呈現巡檢完成率、缺失比例與改善進度。使用者可依行政區、巡檢期間或缺失等級進行條件篩選，圖表將即時更新統計結果，協助快速辨識進度落後區域與高風險分布情形。

在缺失管理層面，系統將巡檢結果依嚴重程度進行分級，並提供「缺失框蓋清冊下載」功能，使用者可依缺失類型或等級篩選後，一鍵匯出對應設施清單與位置資訊，供施工廠商與管理單位立即安排修繕作業。此一功能使管理機制由被動統計轉為主動處置，特別針對較嚴重之框蓋異常情形，可迅速建立維修優先順序，降低設施損壞對行人與車輛安全之潛在影響。

透過圖表化進度監控與缺失下載機制之整合，框蓋戰情室不僅提供即時管理儀表板功能，更形成「巡檢—分析—優先排序—立即修繕」之風險管理流程，強化公共設施安全管理之即時性與行動能力。

(四) 堵塞熱區視覺化

透過空間熱點分析方法 (spatial hotspot analysis) 建構風險辨識模型，分析過程以一年內累計發生兩次以上油脂堵塞之通報點位為篩選條件，作為高頻事件判定基準，並結合基於高斯核函數之強度

累積方法 (Gaussian blur-based intensity accumulation) 進行空間平滑處理，呈現油脂堵塞易發生區域。管理者可依時間區間篩選熱區變化趨勢，並作為清疏聯稽專案成立與預防性清疏規劃之依據，實現由被動通報處理轉向主動風險管理之治理轉型。

(五) 延壽戰略分析

為協助管理單位落實《公共下水道管渠維護管理要點》第七條有關管渠定期檢視之規定，本系統建置「延壽戰略分析」模組，自動篩選符合年度檢視條件之管線，作為年度延壽維護計畫擬定之依據，如圖 14 所示。

系統透過GIS圖台與視覺化分析介面，將應辦理檢視之管線標示於地圖上，並提供管線類別、管線集污區、管徑及行政區等多項條件篩選功能。管理者可快速掌握各行政區應辦理檢視之管線分布情形，並依據實際維護量能與預算規模進行優先順序排序，大幅降低人工整理資料之時間成本 (Lee et al. 2021)。

過往辦理年度檢視計畫時，管理人員需調閱歷年檢視成果、管線基本資料及相關履歷資訊，逐筆比對後方能確認符合檢視條件之管線範圍，作業過程耗時且容易產生遺漏。導入延壽戰略分析模組後，系統可依維護管理要點規定自動產製應檢視管線清冊，並同步呈現其空間分布位置，

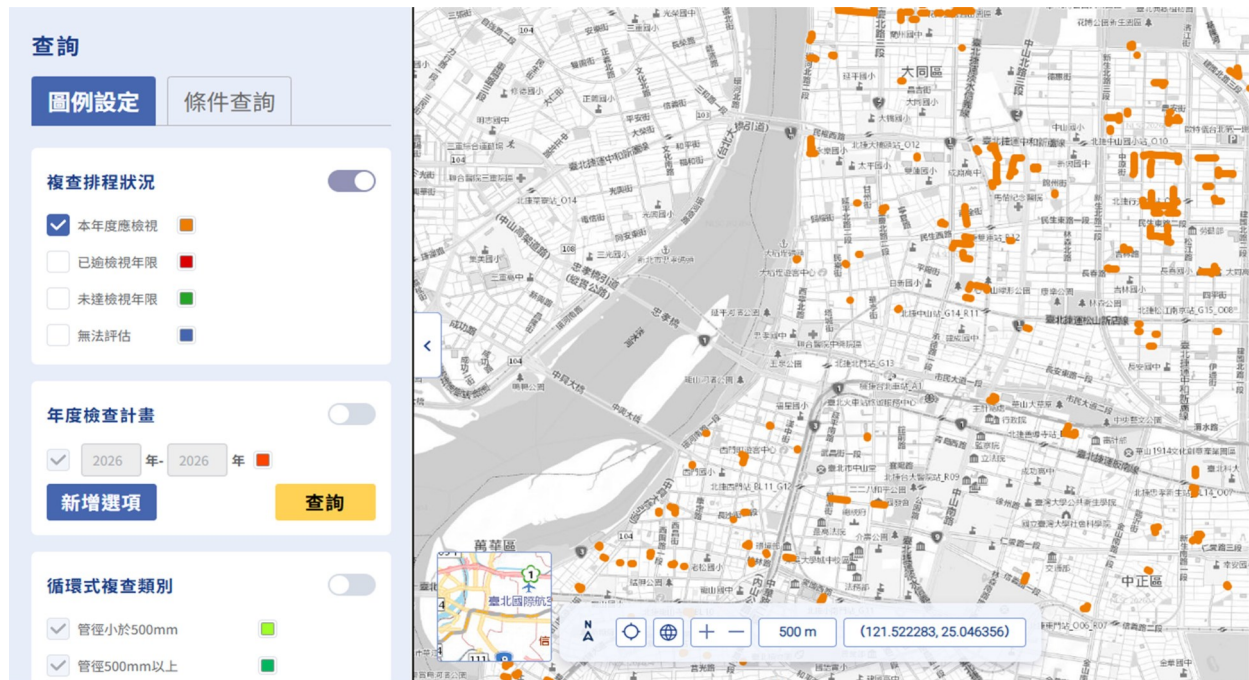


圖14 依照法規自動產出年度應檢視管線 (系統截圖)

使管理者能迅速完成年度檢視標的盤點與規劃。

例如，2025年度辦理年度延壽維護計畫時，系統依據管線建設年期及歷次檢視紀錄，自動篩選出中山區、大同區及萬華區共計約40公里符合年度檢視條件之污水管線，管理單位透過系統視覺化介面快速掌握應檢視管線位置與範圍，並於短時間內完成年度檢視計畫規劃與預算配置。近年來相關維護規劃作業均透過本功能進行輔助分析，已成為延壽維護業務之重要決策支援工具。

五、公共管線圖資管理機制

設施圖資管理模組係針對本市污水下水道公有管線設施所建置之空間資料管理

機制，涵蓋管線與框蓋設施之查詢、建置與補正作業。系統以GIS圖台為核心操作介面，提供多條件篩選查詢功能，使用者可直接於地圖上定位、編修或新增設施資料，並即時檢視其屬性內容與歷史異動紀錄，圖15所示。

在資料建置層面，圖資建檔補正功能支援符合內政部國土管理署標準格式，與道路挖掘管理中心GML規範之資料匯出，並可自動執行屬性欄位檢核與幾何拓樸驗證，確保資料品質與跨系統交換之正確性，如圖16所示。此機制有效降低人工檢核所需時間，並避免格式錯誤或拓樸異常導致退件情形。透過標準化資料結構與空間一致性檢查，公共管線圖資得以維持高品質與高可信度，形成穩定之基礎資料

框蓋編號：3946-0572 (正常)

刪除設施

最新基本資料

圖資更新歷程

資料輸入時間	工程名稱/建造號碼	承包商	操作
2023-12-30	114-115年南區分管網暨支管及用戶排水設備統包工程	啟揚環境有限公司	檢視

項次	更新時間	更新單位	更新人員	作業類別	圖資案號	操作
1	2024-12-30 17:25:29	營運管理科	承辦人	用戶申接	114000001	檢視
2	2025-01-16 09:11:35	啟揚環境有限公司	施工人員	公共管線	114000005	檢視
3	2025-01-28 11:48:03	啟揚環境有限公司	施工人員	代辦工程	114000013	檢視
4	2025-02-17 09:04:24	營運管理科	承辦人	用戶申接	114000014	檢視

圖15 檢視設施更新歷程示意圖 (系統截圖)

框蓋

管線

清單結果：共3筆

查看設施圖資

新增一筆

刪除

項次	檢核結果	框蓋編號	下游框蓋編號	框蓋中心X(E)坐標	框蓋中心Y(N)坐標	框蓋型式	是否自設	資料狀態	操作
☐ 1	通過	T11111111	T11111112	311313.741	2773871.918	圓形人孔	非自設	實測	編輯
☐ 2	不通過	T11111113	T11111114	300539.794	2776821.794	虛擬設施	自設	實測	編輯
☐ 3	通過	T11111115	T11111116	302513.052	2774680.153	圓形人孔	非自設	實測	編輯

圖16 屬性欄位檢核與幾何拓撲驗證示意圖 (系統截圖)

庫，支援後續巡檢、維修與決策分析應用。

六、用戶接管管理機制

用戶接管模組係針對自設管線與用戶端接入系統所建置之管理架構，負責用戶接管完工案件之登錄與履歷管理，並透過空間關聯機制，將用戶端接入管線與上游公共管網及最終匯流至污水處理廠之管線系統進行整合連結，使管理者得以自單一用戶端點回溯至整體污水輸送體系之完整流向與結構。

於施工階段，系統透過行動APP支援施工廠商於現地完成打卡與施工紀錄回傳，並同步蒐集施工時間、GPS定位資訊及現場照片等資料，以確保施工真實性與資訊即時性。完工後，相關資料即時回傳至後端管理平台，建立完整且可追溯之用戶接管履歷檔案。

透過標準化欄位設計與資料異動紀錄機制，用戶接管資料得以維持一致性與完整性，並支援後續查詢與歷史比對分析。此一整合機制使管理者能由個別用戶接入案件出發，掌握污水自源頭至處理端之全歷程輸送脈絡，不僅提升資料透明度與審

查效率，更強化整體污水系統之治理視野與決策基礎。

肆、結語

污水下水道系統作為現代城市不可或缺之基礎設施，其角色已由傳統工程建設逐步轉型為兼具環境保護、公共安全、韌性城市與智慧治理功能之城市核心系統。隨著都市發展成熟與管網規模日益龐大，設施老化、維護負荷增加與資料量爆炸式成長等挑戰，使既有仰賴紙本與人工管理之模式逐漸難以因應精細化與即時化之管理需求。若缺乏完整資料整合與即時掌握能力，不僅影響日常維護效率，更可能削弱決策品質與風險預防能力。

臺北市衛工處推動之污水下水道雲端智慧管理系統與視覺化管理平台，正是在此轉型需求下所建構之核心治理基礎。透過整合GIS空間資訊、行動化巡查機制、大數據統計分析與視覺化決策工具，系統成功將分散的巡檢、維修與建設資料轉化為可追溯、可分析且可預警的智慧管理架構，不僅提升資料透明度與作業效率，更強化跨單位協作與風險管控能力。

未來隨著數位技術持續進步與城市治理模式深化，污水下水道系統將不再僅是地下隱形設施，而是具備即時監測、預測分析與策略規劃能力之智慧基礎建設核心。透過持續優化資料品質、深化視覺化應用與導入智慧分析機制，臺北市將能在

既有成果基礎上，逐步建構更完善之數位孿生環境，實現安全、韌性與永續並重之智慧污水下水道管理願景。

參考文獻

1. 劉振宇 (2023)，桃園市次世代污水下水道系統統合運籌雲端平台，下水道・水再生期刊，2(3)，第103-111頁。取自<https://www.nlma.gov.tw>
2. Du, J., Kuang, B., & Yang, Y. (2019). A Data-Driven Framework for Smart Urban Domestic Wastewater: A Sustainability Perspective. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 6530626. <https://doi.org/10.1155/2019/6530626>
3. Hartmann, S., Valles, R., Schmitt, A., Al-Zuriqat, T., Dragos, K., Gölzhäuser, P., ... & Smarsly, K. (2025).
4. Digital-twin-based management of sewer systems: Research strategy for the KaSyTwin project. *Water*, 17(3), 299. <https://doi.org/10.3390/w17030299>
5. Johansen, N. B., Sørensen, S., Jakobsen, C., Adeler, O. F., & Breinholt, A. (2007, June). Risk assessment of sewer systems. In *Novatech 2007-6ème Conférence sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des*

eaux urbaines par temps de pluie/Sixth International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management. GRAIE, Lyon, France. Retrieved from <http://hal.science/hal-03234981>

9). Sewer asset management—state of the art and research needs. *Urban Water Journal*, 16(9), 662-675. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1713382>.

6. Lee, J., Park, C. Y., Baek, S., Han, S. H., & Yun, S. (2021). Risk-based prioritization of sewer pipe inspection from infrastructure asset management perspective. *Sustainability*, 13(13), 7213. <https://doi.org/10.3390/su13137213>
7. Moradi, S., Zayed, T., & Golkhoo, F. (2019). Review on computer aided sewer pipeline defect detection and condition assessment. *Infrastructures*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4010010>
8. Okwori, E., Viklander, M., & Hedström, A. (2021). Spatial heterogeneity assessment of factors affecting sewer pipe blockages and predictions. *Water Research*, 194, 116934.5. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116934>
9. Tscheikner-Gratl, F., Caradot, N., Cherqui, F., Leitão, J. P., Ahmadi, M., Langeveld, J. G., ... & Clemens, F. (201

下水道相關活動列車

從下水道出發，串聯全球水環境未來。
Connecting Water. Connecting the World.



2026年度活動

2026日本國際下水道展覽會 Sewage works exhibition



2026年8月4日-8月7日
東京國際展覽中心・東京都江東區
公益社團法人日本下水道協會

第21屆印度國際水資源科技展 GLOBAL AQUA EXPO EAW



2026年8月6日-2026年8月8日
印度新德里巴拉特曼達帕姆1號廳
Earth Water Foundation

俄羅斯國際水工程大展 EcwaTech



2026年9月8日至9月10日
俄羅斯莫斯科・Crocus Expo 2號館・7、8號展廳
ExpoVisionRus

2027年廢水處理會議及展覽 Wastewater 2027 conference & exhibition



2027年1月26日至1月27日
英國・National Conference Centre Birmingham
faversham house

2027年度活動

永續廢棄物管理與循環經濟 Sustainable Waste Management & Circular Economy



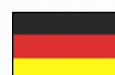
2027年7月19日-7月21日
奧地利維也納
Cognition Conferences

2027年水質協會(WQA)大會暨展覽 2027 WQA Convention & Expo



2027年4月28日-4月30日
美國亞利桑那州鳳凰城
Water Quality Association

德國國際管道和下水道技術貿易展 RO-KA-TECH 2027



2027年4月20日-4月23日
德國-卡塞爾・卡塞爾展覽中心
VDRK 德國管道和下水道技術貿易協會

2027菲律賓國際水工程展 PHILIPPINES' LEADING INTERNATIONAL WATER AND WASTEWATER EVENT



2027年3月17日-3月19日
菲律賓, 馬尼拉 SMX 會展中心
UBM Exhibitions Philippines Inc

阿姆斯特丹水處理技術展 Aquatech Amsterdam



2027年3月9日-3月12日
荷蘭阿姆斯特丹 RAI 會展中心
荷蘭阿姆斯特丹 RAI 展覽公司

國際廢水處理、水循環和水質會議 ICWTWCQ



2027年9月2日-9月3日
西班牙馬拉加
世界科學、工程與技術學院

2027歐洲膜技術大會 Euromembrane 2027



2027年9月6日-9月9日
波蘭格但斯克
symposium

法國里昂國際綠能科技與環保展 Pollutec Lyon



2027年10月12日-10月15日
法國里昂 Eurexpo Lyon 展覽中心
RX France

第十七屆亞琛水技術會議(ATW) 17Aachener Tagung Wassertechnologie



2027年10月19日-10月20日
亞琛歐洲會議中心
亞琛工業大學城市水管理研究所(ISA)
亞琛工藝工程(AVT)

下水道相關活動列車

從下水道出發，串聯全球水環境未來。
Connecting Water. Connecting the World.



2026年度活動

8月

全國治水研討會及論壇：AI 時代下都市總合治水與智水同行展望



2026 年 8 月 5 日



張榮發基金會國際會議中心



內政部國土管理署下水道分署

8月

下水道國際研討會



2026 年 8 月 18 日



張榮發基金會國際會議中心



內政部國土管理署

8月

115 年下水道技術相關手冊編修訂成果發表暨再生水發展推動交流研討會



2026 年 8 月 28 日



集思北科大會議中心感恩廳



內政部國土管理署

9月

2026 台灣設計展在桃園：一滴水的旅行



2026 年 9 月 24 日至 10 月 11 日



青埔展區、中壢展區

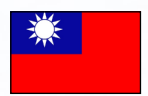


桃園市政府水務局

2027年度活動

3月

都市污水低碳及產能技術國際研討會



2027 年 3 月



集思北科大會議中心



內政部國土管理署

2月

都市污水 PFAS 流布國際研討會



2027 年 2 月



集思北科大會議中心



內政部國土管理署

12月

跟著水旅行台北
(須預約)



即日起至 2026 年 12 月止



新生建國抽水站



臺北市政府工務局水利工程處

11月

水環境工程技術研討會



2026 年 11 月 13 日



朝陽科技大學校區



朝陽科技大學
中華民國環境工程學會



下水道·水再生期刊稿約

壹、誠徵稿件

- 一、本期刊為內政部國土管理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：

◆中&英文標題：宜簡明

◆作者姓名、任職單位及職稱：請以置右方式依序條列

下水道·水再生期刊稿約

◆中文摘要 (300字為限) 及中文關鍵字 (3至5個)

◆英文摘要 (300字為限) 及英文關鍵字 (3至5個)

◆本文 (章節之編序以：壹、一、(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國土管理署資訊入口網歡迎各界參閱。



著作權授權使用同意書

(作者/機關名)

保證除本次投稿至「下水道·水再生」期刊之文章

(文章名)

，相同內容未專屬授權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。

(作者/機關名)

同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，授權

內政部國土管理署有重新編排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。

此 致

內政部國土管理署

立 書 人：

通 訊 處：

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 一百一十五年七月出刊

第5卷第2期

中華民國 一百一十一年七月創刊

發行人：蔡長展

指導委員：宋德仁、邱忠川、范世億、陳志偉、黃一平、劉振宇、蔡易勳

(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、陳立儒、張添晉、莊順興、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：葉信宏、張建偉

執行編輯：游勝傑

出版單位：內政部國土管理署

地址：臺北市松山區八德路2段342號

電話：(02)8771-2345

網址：<https://www.nlma.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

★★★本刊文章版權所有，非經同意不得轉載★★★

★本刊文章屬個人學術發表，不代表內政部國土管理署立場★