



曾文溪感潮河段 水資源利用 結合 自然解方 與 水岸環境營造 初步規劃

黃郁芳／AECOM 艾奕康工程顧問股份有限公司 主辦工程師

黃俊維*／AECOM 艾奕康工程顧問股份有限公司 高級計畫經理

李祈宏／AECOM 艾奕康工程顧問股份有限公司 技術總監

陳汶圓／經濟部水利署水利規劃分署 助理研究員

趙永楠／經濟部水利署水利規劃分署 科長

陳聖文／經濟部水利署水利規劃分署 科長

葛武松／經濟部水利署水利規劃分署 主任工程司

近年來科技產業積極在臺灣投資布局，並因應政府「大南方新矽谷推動方案」串聯南部半導體 S 廊帶，相關產業用水需求快速成長，且受氣候變遷及極端氣候影響導致降雨時空分布日趨不均，豐枯水期差異加劇，南部地區水資源調度面臨嚴峻挑戰。為建構完善且穩定供水網絡，短期除積極強化節約用水、加速降低漏水率、強化跨區調度措施及提升備援能力外，積極開發多元水資源因應係為我國當前重要的水資源開發策略。

經調查分析綜合評估後，曾文溪感潮河段（又稱半鹹水）具開發潛能^[1]，因此，本計畫以曾文溪感潮河段為對象，探討半鹹水資源開發結合水岸環境營造之可行性。研究結果顯示，曾文溪感潮河段水源穩定充足，水質導電度（EC）及總溶解固體（TDS）較海水低，鄰近用水端可減省輸水管線距離及成本等優勢，整體產水成本可低於海淡水，若取水規模小於 2 CMS（立方公尺／秒）可減輕抽取水源之環境衝擊範圍與程度，進而精簡行政程序。

本計畫初步規劃產水規模為每日 6 萬立方公尺，結合近自然槽池、人工濕地、生物濾床及自然為本解決方案（Nature-based Solutions, NbS），透過原水調勻、生態棲地復育及濕地淨化功能，改善原水水質穩定性並降低淡化系統運轉風險，以確保取水水源具備水資源開發所需之質與量。淡化處理流程採多階段前處理程序、二級逆滲透（two pass BWRO）、除硼及除尿素程序，以符合高科技產業用水需求。本規劃成果可提供作為未來臺灣感潮河段水資源利用及流域永續治理之重要參考。

關鍵詞：曾文溪、感潮河段、半鹹水（Brackish Water）、水資源利用、人工濕地、逆滲透（RO）、自然解方（NbS）、ESG、淨零碳排

計畫背景

近年高科技產業積極投資帶動用水需求快速成長，加上極端氣候導致枯旱事件頻率增加，使南部地

區對穩定供水之需求日益迫切。另一方面，受全球氣候變遷影響，既有水庫及河川水源面臨供水穩定度之嚴峻挑戰，使南部地區供水韌性備受考驗。為因應未來供水需求，經濟部水利署近年積極推動再生水、海淡水、半鹹水（Brackish Water）及伏流水等多元水源開

* 通訊作者，rivera.huang@aecom.com

發策略。其中，曾文溪感潮河段因位處臺南科學園區鄰近區域，且具備水源穩定、水質導電度（EC）及總溶解固體（TDS）低於海水及輸水距離較短等優勢，111年完成曾文溪感潮河段新興水源可行性規劃，評估自河口至鐵路橋約 33 公里感潮河段具半鹹水利用潛力，其範圍如圖 1 所示，已被列為具開發潛力之重要新興水源^[2]。111 至 113 年模廠試驗結果顯示，感潮河段原水受潮汐及河川流量變化影響，總溶解固體、濁度、藻類及有機物濃度變化幅度較大^[3,4]，如何降低原水水質波動、減輕前處理系統負荷及控制淡化系統操作風險，成為推動半鹹水利用的重要課題。因此，本計畫規劃過程針對曾文溪感潮河段進行水質調查及水質特性分析，以掌握其水質之週期性變化，並透過近自然槽池等設施規劃，輔以人工濕地營造等友善環境措施，初步調勻水質及降低污染負荷，提升原水穩定性，藉由整合水資源利用、水岸環境營造及生態棲地復育，型塑曾文溪感潮河段水資源永續利用發展的水環境願景。

水文與水質特性

曾文溪感潮河段水體系由上游河川淡水與海水混合形成，屬典型半鹹水環境，其水質導電度及總溶解固體受河川流量、季節降雨及潮汐漲退等因素交互影響，呈現明顯之時空分布特性，水量則受河川逕流及海水上溯調節，水源穩定豐沛。空間分布方面，依據

近 10 年環境部水質監測資料（如表 1 及圖 2）顯示，感潮河段下游國姓橋、西港大橋至河口受海水入侵影響較明顯，導電度中位數約 39,100 ~ 50,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，隨距離出海口愈近而越高，水質接近海水；上游麻善大橋至鐵路橋河段則受河川淡水主導，水體多屬中度半鹹水以下，導電度中位數約 707 ~ 7,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，且隨距離出海口愈遠而逐漸降低。時間分布方面，豐水期（6 ~ 10 月）因河川流量增加，感潮河段水源受上游淡水稀釋作用顯著，導電度較低且受潮汐影響相對較小；枯水期（11 月至翌年 5 月）河川流量減少，海水入侵程度提高，感潮河段水源導電度明顯高於豐水期，且每日潮汐漲退變化呈現滿潮高、乾潮低之週期性變化趨勢。以麻善大橋為例，乾、滿潮導電度變化幅度約 4,670 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，懸浮固體（SS）則受颱風及豪雨事件影響，豐水期濃度通常高於枯水期，如圖 3 和圖 4 所示^[5]。綜合評估，曾文溪感潮河段以麻善大橋上游至鐵路橋河段兼具穩定水量與較適宜水質條件，為最具半鹹水資源利用之優選區位，惟原水中藻類、硼及尿素偶有偏高情形，如未來供水對象以高科技產業為主，則應規劃相應之水質處理單元，以符合產業用水需求。

技術挑戰

曾文溪感潮河段半鹹水資源開發雖具供水力，惟主要仍面臨原水水質變異、處理系統穩定性及環境影響管



圖 1 曾文溪感潮河段範圍

表 1 曾文溪感潮段水質中位數資料表

項目	曾文溪河口		國姓橋		西港大橋		麻善大橋	
	豐水期	枯水期	豐水期	枯水期	豐水期	枯水期	豐水期	枯水期
河川污染程度	未（稍）受污染		未（稍）受污染		未（稍）受污染		輕度污染	
水體分類	丙		丙		丙		丙	
水溫 (°C)	30.7	23.3	30.6	24	30.4	24	30.4	24.2
導電度 (μS/cm)	39,100	50,100	26,550	39,650	5,910	29,700	707	7,500
溶氧 (mg/L)	6.50	6.90	5.40	7.00	5.80	6.90	6.50	7.40
懸浮固體 (mg/L)	30.65	27.90	33.25	27.05	40.30	23.90	60.90	37.60
氯鹽 (mg/L)	13,900	18,800	9,185	14,300	3,180	10,400	38.7	2,690
總磷 (mg/L)	—	—	0.0950	0.0910	0.1330	0.1290	0.1490	0.2355
生化需氧量 (mg/L)	1.10	0.00	1.20	1.10	1.20	1.30	1.40	2.50
化學需氧量 (mg/L)	9.45	7.40	10.65	8.65	12.60	9.75	13.80	14.20
大腸桿菌群密度 (MPN/100ml)	100	20	510	80	3,100	320	4,500	390
氨氮 (mg/L)	0.15	0.18	0.18	0.22	0.32	0.37	0.22	0.41
總有機碳 (mg/L)	—	1.06	—	1.36	—	1.98	—	2.00
砷 (mg/L)	0.003	0.002	0.003	0.002	0.004	0.003	0.005	0.005
鉛 (mg/L)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.004	< 0.001
鎘 (mg/L)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
鉻 (mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—
汞 (mg/L)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
硒 (mg/L)	—	< 0.001	—	< 0.001	—	< 0.001	—	< 0.001

備註：表格中「—」代表該項目無有效數據，資料來源：行政院環境部水質監測資料，105~114 年

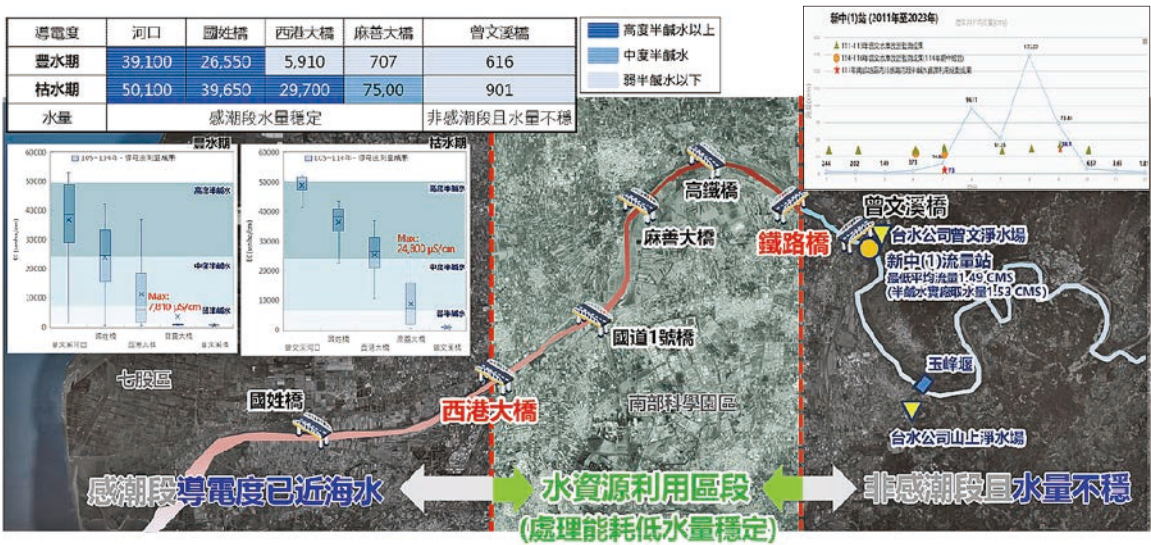


圖 2 曾文溪感潮河段水質（導電度）空間分布特性

控等多項技術挑戰。首先，感潮河段原水水質受豐枯水期流量變化、潮汐漲退及颱風暴雨影響，導致總溶解固體與導電度具有明顯變化，如圖 5，枯水期海水入侵增加，可能增加前處理設施與淡化系統操作負荷及逆滲透薄膜污堵風險。其次，原水中藻類、細菌及有機物等微細污染物，粒徑可能小於 1 μm，易造成前處理及逆滲透薄膜污堵及通量衰減，增加維護需求。此外，硼及尿素等特殊水質項目可能超出高科技產業用水要求，需增

設除硼樹脂、高級氧化等處理程序。颱風期間或水庫放淤作業可能造成懸浮固體及濁度升高，影響取水設施運轉。另外，提升高灘地設施洪水韌性，以確保系統長期穩定運作。在環境面向，濃排水之排放方式及受納水體承受能力亦為規劃重點，規劃設計階段，濃排水需進行擴散模擬與生態影響評估，未來須透過水理及水質模擬分析，建立完善監測與管理機制，以降低對感潮河段生態系統之潛在影響。

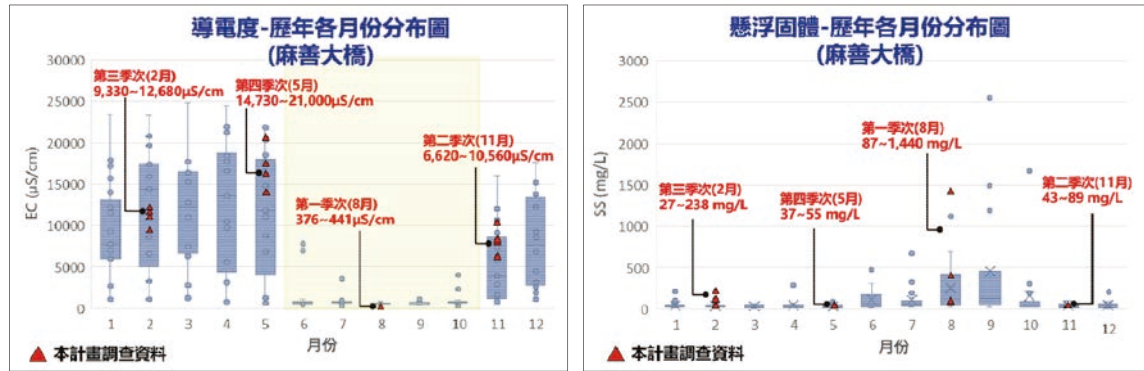


圖3 曾文溪感潮河段麻善大橋導電度 (EC) 及懸浮固體 (SS) 歷年月份分布

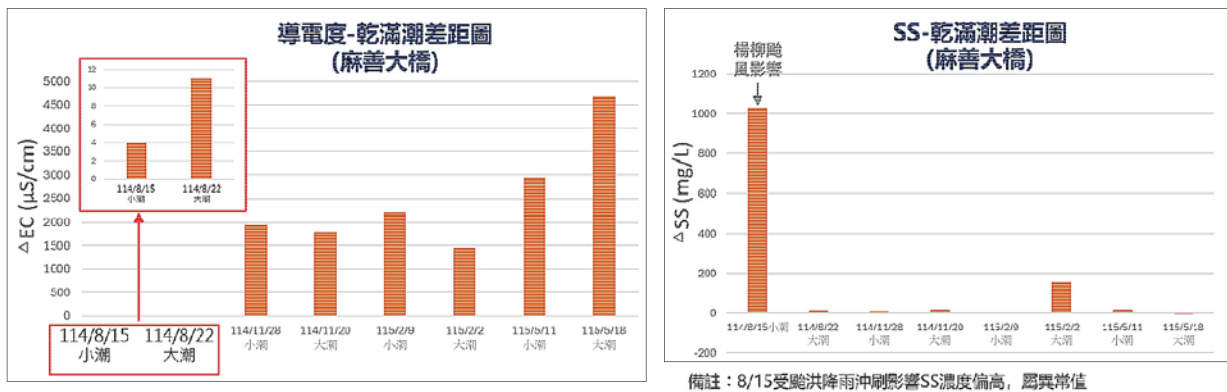


圖4 曾文溪感潮河段麻善大橋導電度 (EC) 及懸浮固體 (SS) 乾滿潮變化

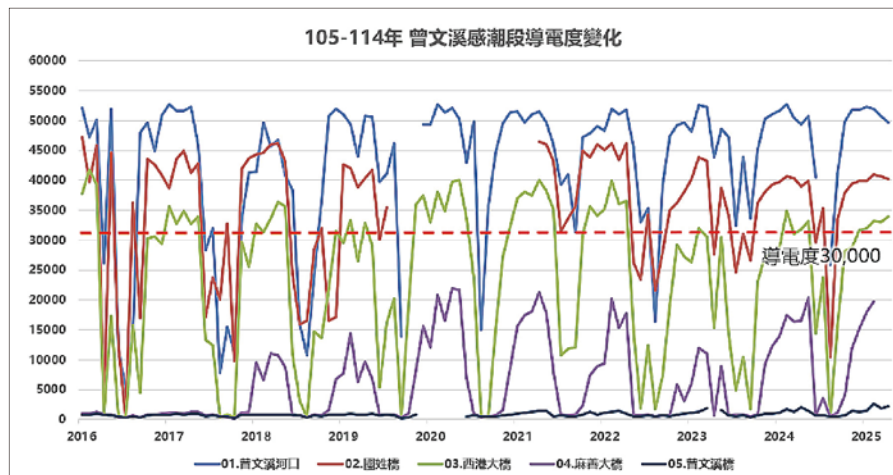


圖5 近10年曾文溪感潮段水質測站導電度各月份變化趨勢

案例借鏡

目前國內外半鹹水資源利用案例多以鹽化湖庫水及地下水為主要原水，感潮河段半鹹水淡化案例則以美國 Antioch 及英國 Beckton 較具代表性。美國 Antioch 為淨水場擴建之半鹹水淡化廠，原水取自聖華金河及水務公司 (CCWD) 購買，受氣候變遷及海平面上升影響，聖華金河鹽度逐漸升高，增加外購原水依賴與供水成本，因此增設 RO 設備處理河川半鹹水，產水

量約 2.27 萬 CMD，並以河水氯離子濃度 $> 75 \text{ mg/L}$ 為淡化設施啟動機制，透過將河水與 CCWD 原水混合及 RO 處理維持供水穩定 [6]；英國 Beckton 淡化廠則為因應乾旱及人口成長需求，取用泰晤士河的半鹹水進行淡化處理，產水量約 15 萬 CMD，設定進水 TDS 上限 $11,000 \text{ mg/L}$ ，於退潮末期取水，並利用容量 17.5 萬 m^3 原水緩衝池蓄存混合，以降低鹽度及懸浮固體波動，另依 TDS 變化調整 4stage RO 操作模式，兼顧產水穩

定與節能，濃排水則與既有污水處理廠放流水混合排放，利用稀釋降低鹽度衝擊^[7]。綜整案例顯示，感潮河段半鹹水利用可透過選擇適當取水時段、原水緩衝調勻、RO 系統彈性操作及濃排水混合稀釋等措施，降低水質變動與環境衝擊，對曾文溪半鹹水資源開發利用具有重要的參考與借鏡價值。

水資源利用初步規劃

水資源利用區位及優先推動廠址

本計畫設施廠址運用層級分析法（AHP），從工程、自然、社會及經濟四大面向進行遴選，建議優先以麻善大橋下游左岸堤內用地作為半鹹水淡化廠推動廠址，如圖 6 所示，其具防洪安全佳、地質條件穩定、公有土地可無償撥用、原水水質總溶解固體濃度較低及鄰近南科用水端等優勢，惟該廠址受生態敏感性之自然面向影響，且部分土地尚待編定。未來開發應落實生態調查、採用低干擾工法施工及補償措施，並結合環境教育型濕地營造，提升社會接受度與生態效益。

廠址配置及供水初步規劃

考量曾文溪河道變遷（沖刷、淤積及流心偏移）可能對淡化設施造成損壞或阻塞等影響，因此，取水設施建議設置於曾文溪鐵路橋下游約 900 公尺（約斷面

72）處，且為確保能取得充足水源及較佳原水水質，規劃設計以平均潮位 EL. + 0.271 m 進行取水，取水口則設置於距河床 0.6 倍取水深度以上，以防止河川表層漂浮物以及底層的泥砂進入取水設施。近自然槽池調勻設施則規劃設置於高灘地，水力停留時間採 12 小時設計，以涵蓋曾文溪半日潮週期，透過水體混合、沉降及自然淨化作用，初步達到調勻原水水質波動之目的後，再導入堤內半鹹水淡化處理設施產製淡化水供應用水端，如圖 7 所示，同時結合自然解方理念，利用濕地生態功能，營造低灘恢復自然演替濱水生態多樣性棲地環境，以達成水資源運用、濕地環境營造、生態棲地復育等多元目標。

曾文溪半鹹水廠規劃產水規模為每日 6 萬立方公尺，淡化水透過設置輸水專管方式，供應南科臺南園區。供水水質標準則參考南科臺南園區再生水使用經驗，規劃符合 21 項工業再生水標準，其中導電度控制 $< 250 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、總溶解固體物（TDS） $< 150 \text{ mg}/\text{L}$ 、硼 $< 0.1 \text{ mg}/\text{L}$ 及尿素 $< 0.005 \text{ mg}/\text{L}$ 。淡化處理流程採多階段程序，包括混凝沉澱 / 浮除及超濾（UF）前處理，以降低濁度及藻類負荷；後續採二級逆滲透半鹹水薄膜系統（two-pass BWRO）進行脫鹽淡化處理，並設置除硼樹脂及高階氧化程序去除硼與尿素等特定物質，如圖 8，以符合高科技產業用水需求，確保半鹹水淡化系統長期穩定操作。

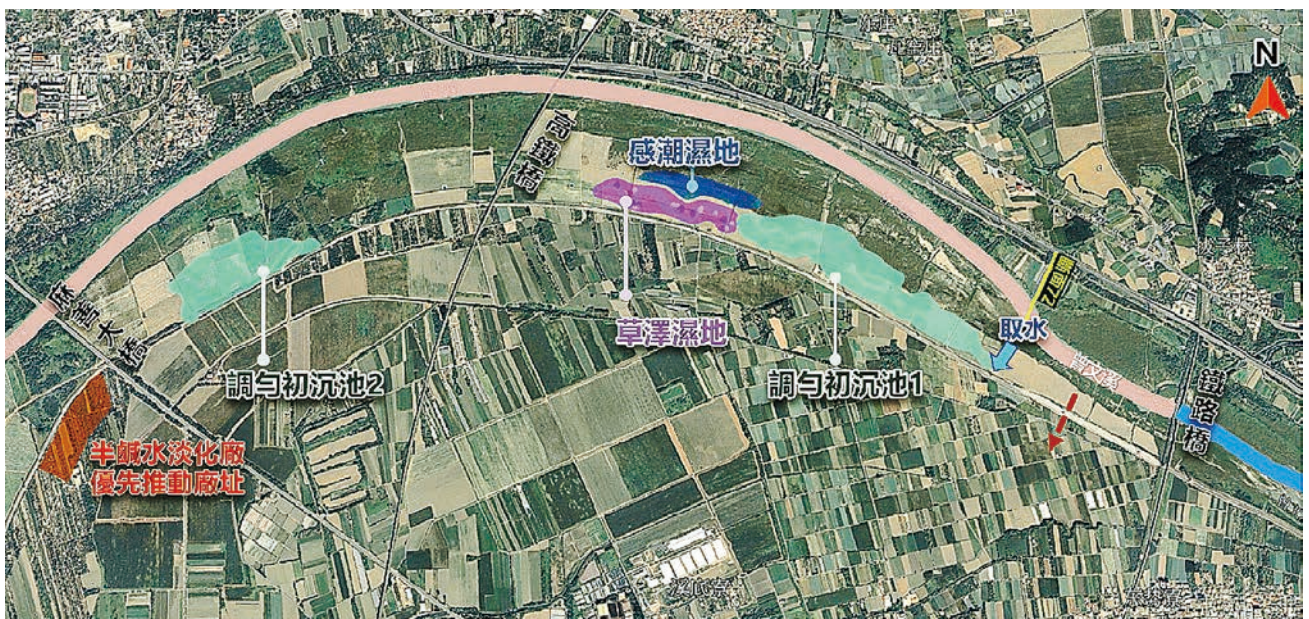


圖 6 感潮河段水資源利用區位及優先推動廠址

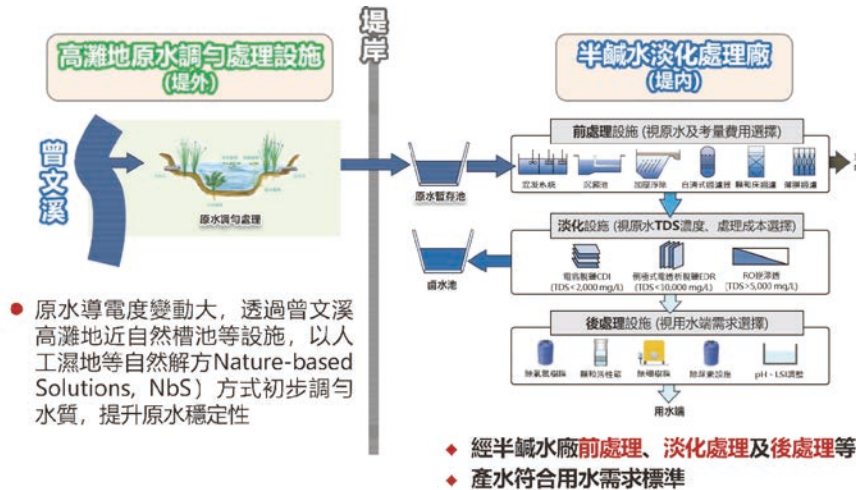


圖 7 感潮河段水資源利用原水調勻及淡化處理程序

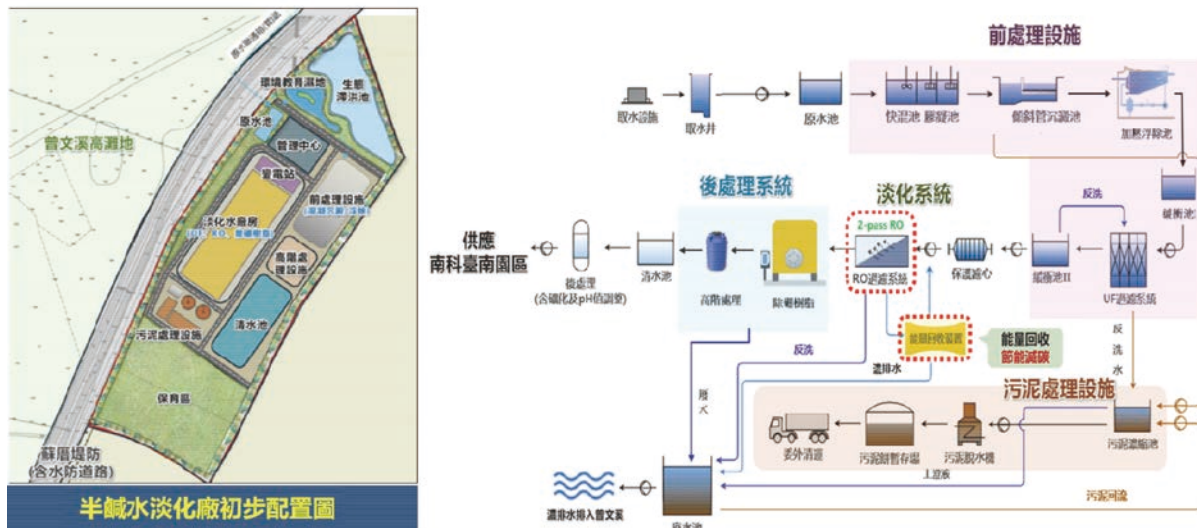


圖 8 曾文溪半鹹水淡化廠處理流程及廠區配置示意圖（初步配置僅供參考）

淡化濃排水位置規劃於曾文溪西港大橋（約斷面 41）附近河段，該河段較為平直且穩定，以多點加壓向上射流方式排放，並採連續 24 小時排放，藉由感潮河段水體稀釋、潮汐混合及自然擴散作用，使排放區域鹽度逐步回復至河川背景濃度。透過建立水質監測、預警與管制機制，於鹽度接近管制值時調整排放量或暫停排放，控制鹽度低於 35 psu，以降低對廣鹽性及狹鹽性水生生物之生態影響。未來並結合提濃減量及資源化技術，逐步降低濃排水量與環境負荷。

生態復育及環境營造

本計畫於推動曾文溪感潮河段半鹹水水資源開發利用同時，亦將河川環境改善及生態棲地復育納入整體規

劃架構，期能藉由結合河灘地、堤防內外及周邊環境營造與濕地功能復育等構想，同時考量河道地形、水質變化與生態系狀態，導入近自然槽池、人工濕地等自然為本解決方案（Nature-based Solutions, NbS），改善水環境基礎條件，初步調勻感潮段原水水質，恢復自然演替之濱水帶，確保生物環境連續性及水質具備後續水資源開發所需之可行性與穩定性，期能達到水資源與環境共榮發展理念。規劃將採自然為本解決方案（NbS）理念，依河灘地洪水漫淹頻率，以防洪安全、生態優先及低干擾、低維護管理為原則，建置約 40 公頃兼具水質改善及生態復育功能之多功能人工濕地，如圖 9。其中，淨化型濕地透過高灘地設置近自然槽池等設施，初步調勻穩定感潮段原水水質，將濕地劃分為進水緩衝的沉砂槽

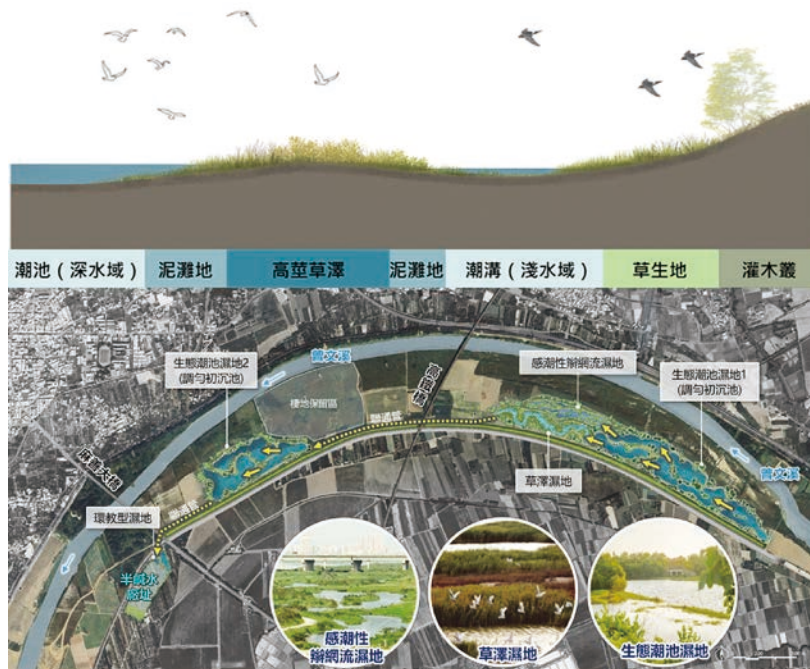


圖 9 感潮河段水資源利用生態復育及環境營造規劃構想

池、植生處理的草澤濕地區與出水穩定生態調勻池；復育型濕地透過營造濱水帶、砂洲、草澤、潮溝、泥灘地及耐鹽原生植群等多樣微棲地，恢復自然演替與河岸生態連續性，以維持生物多樣性與保護生物棲地；環境教育型濕地則提供濕地保育、環教解說功能，強化社會參與及地方認同感。

淨零碳排效益初評

因應全球氣候變遷趨勢及國際淨零排放政策目標，低碳造水已成為水資源永續發展的重要課題。本計畫以曾文溪感潮河段半鹹水淡化系統為對象，藉由減排 (Carbon Mitigation) 及碳移除 (Carbon Removal) 兩大面向評估淨零效益。參考多項生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 研究結果顯示，半鹹水淡化廠之碳排放主要集中於營運階段之能源消耗，約占整體碳排放量之 80% 至 95%，因此優先採用依原水豐枯水期水質中總溶解固體變化，調整逆滲透 RO 薄膜操作模式 (以 one-pass 或 two-pass 操作)、導入能量回收裝置 (ERD) 及建置 10% 綠能設施 (約 930 kW) 等節能措施，預估每年可分別減碳約 1.4 萬、0.75 萬及 533 公噸二氧化碳當量 (CO₂e)，整體年減碳量約 2.2 萬公噸二氧化碳當量 (CO₂e)，列如圖 10。另將 40 公頃調勻初沉池規劃成為人工濕地作為自然碳匯，每年可增加約

277 公噸二氧化碳當量 (CO₂e) 碳吸存量。

推動營運及發展願景

為提升計畫推動效率及永續營運效益，以提高公共服務水準、加速社會經濟發展，爰建議採促參 2.0 架構辦理，利用促參法第 9-1 條「政府有償取得公共服務」機制，結合 BOT 或有償 BTO 模式，引進民間資金、專業技術及營運管理能力，降低政府投資風險並提升公共服務品質。依財政部促參司 115 年 04 月 29 日公告之「促進民間參與公共建設法之重大公共建設範圍」，本計畫開發規模符合重大公共建設範疇。整體推動期程涵蓋可行性評估、先期計畫、招商甄審、設計及施工營運等階段。水資源利用結合水域環境發展願景，如圖 11，利用「科技造水」結合自然為本解決方案 (NbS) 理念，納入產業 ESG 推動架構及公私協力機制，並結合「水資源正效益」(Water Positive) 理念，藉由公私協力整合雙方資源與技術，例如由企業端以 ESG 資金支持高灘地調勻初沉設施 (友善環境設施) 之興建與後續 10 ~ 20 年的維運成本，換取該設施產出之「水資源正效益」配額，而政府則協助設施用地取得及水資源調度供應，合作推動水資源環境永續發展，達到提升區域水資源永續性與產業用水韌性，以彰顯整體政策與社會價值。

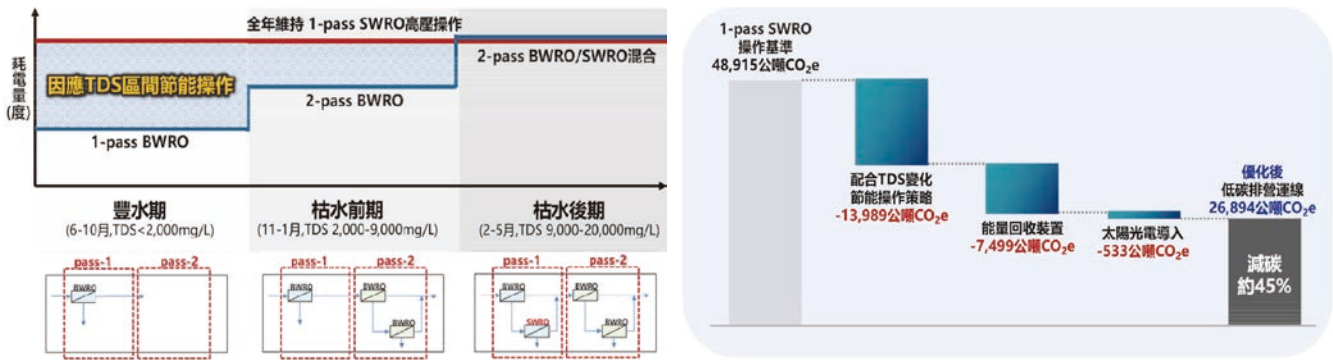


圖 10 半鹹水淡化廠節能操作策略及碳排放減量效益分析圖



圖 11 半鹹水淡化水資源利用結合水域環境發展願景效果圖

關鍵課題

本計畫屬曾文溪感潮河段半鹹水資源利用之初步規劃，後續實質開發仍須從技術、經濟、人文、土地、環境及營運等面向深化評估。淡化處理技術方面，考量感潮水質之變化特性，初步規劃之水質處理流程建議後續建立長期、連續性水質監測資料，掌握原水導電度（EC）、總溶解固體（TDS）、懸浮固體物（SS）、鹽度及濁度之時變特性與極端值，並透過 Pilot Test 驗證混凝沉澱、浮除、UF 及 RO 等處理程序，作為前處理效能、膜材選型、操作壓力、系統操作模式及節能效益之設計依據。工程與場址方面，人工溼地主要功能為調勻水質，其效益、耐洪韌性及長期維護需求亦應重視，而取水位置仍應考量潮汐水位及河川沖淤變化，評估適宜之取水方式與供水穩定性，後續建議優先選擇洪水風險較低之高灘地，採低干擾及易維護設計，保留滯洪緩衝空間，避免過多機械設備

及景觀設施，並應進一步分析改善效益、洪水漫淹頻率、河川沖淤及生態敏感性等條件，以提升耐洪韌性及災後快速復原能力。土地方面，因部分用地涉及國有地承租農作，土地取得涉及租約終止、補償回饋及地方溝通等議題，需建立適當之溝通與協調機制，以降低社會衝突對計畫期程之影響。環境方面，RO 濃排水之排放方式與位置對水域生態影響亦為重要課題，建議就規劃之排放位置、時段及擴散設施等條件，透過數值模式評估鹽度稀釋與擴散範圍，並配合生態調查及長期監測，以確認對周遭環境之影響。營運面考量國內感潮河段半鹹水淡化實廠操作經驗有限，建議依水資源供需、產業發展及實際用水需求，滾動檢討供水策略與開發規模，採分期、分階段推動，以降低初期投資及營運風險，避免設備長期閒置，提升整體設備利用率及產水效益，確保供水穩定性。

結論

本計畫針對曾文溪感潮河段半鹹水資源利用與水岸環境營造進行初步規劃，初步規劃成果顯示麻善大橋至鐵路橋河段具備水量穩定、鹽度適中及鄰近用水需求區等優勢，適合作為未來半鹹水開發利用之優先區位。規劃採每日6萬立方公尺產水規模之半鹹水淡化系統，透過近自然槽池、人工濕地及二級逆滲透薄膜（two-pass BWRO）淡化處理程序，結合除礫及高級氧化程序後，降低原水水質波動及提升系統運轉穩定性，產水滿足高科技產業用水需求。同時藉由自然為本解決方案措施導入，建置約40公頃人工濕地，除可兼顧水質改善、復育生態棲地外，並融合環境教育等多重效益。此外，透過節能操作策略、綠能設施導入及人工濕地碳匯功能（每年約增加277公噸二氧化碳當量之碳匯效益），降低系統生命週期碳排放量。惟後續推動仍應持續就淡化技術、工程耐洪、土地取得、

環境影響及營運策略等面向深化評估，並透過監測驗證及分期推動方式降低開發與營運風險。整體而言，本計畫不僅提供南部地區穩定新興水源之可行方案，更展現水資源開發、生態保育、產業永續及淨零排放共存之整合價值，可供作未來臺灣感潮河段半鹹水利用與流域治理推動之參考案例。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「台灣感潮河段設置半鹹水淡化廠利用研究」，民國94年12月。
2. 經濟部水利署南區水資源局，「南部地區河川感潮河段半鹹水資源利用規劃」，民國111年03月。
3. 經濟部水利署南水分署，「曾文溪感潮河段水資源利用模廠建置計畫」，民國113年03月。
4. 經濟部水利署南水分署，「曾文溪感潮河段水資源利用模組廠規劃及試驗評估」，民國113年03月。
5. 經濟部水利署水利規劃分署，「感潮河段水資源利用結合水岸環境營造初步規劃（第四次期中報告）」，民國115年07月。
6. Brackish Water Desalination Facility Draft EIR, 2018.
7. An Overview of the 150,000 m³/day Beckton Desalination Plant in London, 2009.

