

出國報告（出國類別：考察）

前往新加坡 PUB 考察水質檢驗、生物分析、水質管理、水處理研究及相關教育訓練等之運作報告

服務機關：台灣自來水股份有限公司

姓名職稱：王傳政 總工程師

王興舜 組長

派赴國家：新加坡

出國期間：114 年 2 月 16 日至 114 年 2 月 21 日

報告日期：114 年 5 月 13 日

目錄

目錄	2
表目錄	3
圖目錄	4
壹、目的.....	7
貳、過程與內容	9
一、行程.....	9
二、過程與內容.....	10
(一)2025 年 2 月 16 日 (星期日)	10
(二)2025 年 2 月 17 日 (星期一)	11
1、Water-Exchange 交流會.....	11
2、參訪 PUB 水質實驗室.....	16
3、參訪濱海灣花園(Gardens by the Bay).....	20
(三)2025 年 2 月 18 日 (星期二)	21
1、參訪吉寶濱海東海水淡化廠 (KMEDP)	21
2、PUB 供水(管網)部門及客服中心進行技術討論會	23
(四)2025 年 2 月 19 日 (星期三)	29
1、參訪蔡厝港淨水廠 (Choa Chu Kang Waterworks, CCKWW) ...	29
2、參訪碧山-宏茂橋公園 (Bishan-Ang Mo Kio Park)	35
(五)2025 年 2 月 20 日 (星期四)	38
1、Ripple2Wave 會談 4 家新創公司技術交流會	38
2、參訪濱海堤壩 (Marina Barrage) 與永續新加坡展覽館.....	52
(六)2025 年 2 月 21 日 (星期五)	55
參、心得與建議	56
肆、參考文獻	62

表目錄

表 1.1 新加坡參訪行程表.....	9
---------------------	---

圖目錄

圖 2.1 WATER-EXCHANGE 交流會	11
圖 2.2 林文富博士簡報全面水質管理與新技術應用專題	12
圖 2.3 AQUAPRO™水質安全預警儀 圖 2.4 ALGAPRO™水生藻類智慧監測儀	12
圖 2.5 AQUAPRO™ 警報系統	13
圖 2.6 參觀實驗室內 ALGAPRO™水生藻類智慧監測儀、檢測樣品盤及顯微鏡等設備	16
圖 2.7 參訪水質實驗室致贈見面禮	17
圖 2.8 水質部水生生物實驗室概覽	17
圖 2.9 放射性監測策略流程圖	18
圖 2.10 自動取樣系統	18
圖 2.11 新加坡國家水務局(PUB)水質實驗室	19
圖 2.12 園藝花卉展示藝術	20
圖 2.13 園藝展示藝術	20
圖 2.14 濱海灣花園的超級樹(SUPERTREES)	21
圖 3.1 吉寶濱海東海水淡化廠的雨水回收管理系統簡介	21
圖 3.2 海水淡化廠地面永續發展展示館	22
圖 3.3 海淡廠雨水收集處理池 圖 3.4 海淡廠雨水收集管線及處理池	22
圖 3.5 屋頂設計綠色休閒區與公共開放空間	23
圖 3.6 新加坡國家水務局 PUB 管理樓及會場	24
圖 3.7 代表團與 PUB 供水技術部門技術交流合影留念	24
圖 3.8 一般家用水表 圖 3.9 非家用水表	26
圖 3.10 新加坡在主動漏水偵測比例	26
圖 3.11 PUB 之漏水偵測率	27
圖 3.12 代表團與 PUB 客服部門合影留念	28
圖 4.1 蔡厝港自來水廠(CCKWW)	30
圖 4.2 蔡厝港自來水廠(CCKWW)內部陶瓷膜過濾設備	30
圖 4.3 2019 年更新陶瓷膜現場 圖 4.4 2019 年更新陶瓷膜現場照片	31
圖 4.5 陶瓷膜元件規格	31
圖 4.6 2019 年升級陶瓷膜 圖 4.7 2019 年升級陶瓷膜剖面	31
圖 4.8 升級前臭氧產生器現況 圖 4.9 升級 3 個臭氧產生器後現況	32
圖 4.10 2019 年升級後之後臭氧接觸槽	32
圖 4.11 14 槽生物活性炭 BAC TANKS	33
圖 4.12 2019 年升級後淨水場的處理示意圖	33

圖 4.13 當前淨水場處理示意圖	33
圖 4.14 蔡厝港水廠工程師介紹淨水處理設備功能	34
圖 4.15 代表團與蔡厝港水廠廠長及工程師技術交流拍照留念	34
圖 4.16 蔡厝港水廠廠區設備空間規劃寬敞方便維修	35
圖 4.17 碧山-宏茂橋公園河道自然生態設計	36
圖 4.18 當地常見的新加坡野雞	36
圖 4.19 新加坡澤巨蜥	37
圖 4.20 新加坡白腹秧雞	37
圖 4.21 碧山-宏茂橋公園豎立宣導紅魚出沒警示牌	37
圖 4.22 碧山-宏茂橋公園人工湖及茂密樹林	38
圖 5.1 數碼孿生平臺的構建示意圖	40
圖 5.2 本公司代表團與睿克公司代表林博士針對數位孿生技術運用交流會	40
圖 5.3 飛灰(ASH)	41
圖 5.4 碳煙塵 (CARBON SOOT)	41
圖 5.5 五氧化二釩	42
圖 5.6 電池電極用導電碳材料	42
圖 5.7 本公司代表團與探討低碳技術之新創公司代表技術長合影留念	42
圖 5.8 3E 公司中空纖維奈米過濾膜產品(NF MEMBRANE)照片	43
圖 5.9 新創 3E 公司傅總裁分享創新的水處理過濾薄膜技術	44
圖 5.10 全球資料外洩的總平均成本	45
圖 5.11 可信執行環境 TEE 與商業應用之關係示意	46
圖 5.12 應用 INTEL SGX 技術	47
圖 5.13 本公司代表團與新創公司交流密鑰管理系統技術代表合影留念	48
圖 5.14 新創公司介紹水壓管理系統發展趨勢	48
圖 5.15 亞洲無收益水(NRW)%	49
圖 5.16 不可避免損失與潛在的可挽回損失	50
圖 5.17 柬埔寨小鎮案例	51
圖 5.18 濱海堤壩兼具水資源貯蓄、防洪、綠能及觀光功能	53
圖 5.19 濱海堤壩的貯蓄與水池操作原理	53
圖 5.20 濱海堤壩的防洪與降低水位排水操作原理	54
圖 5.21 建築物屋頂由草坪覆蓋	54
圖 5.22 本公司代表團抵達濱海堤壩的永續新加坡展覽館參觀	55
圖 5.23 本公司代表團於永續新加坡展覽館 2 樓綠地前拍照留念	55

摘要

本次公差出國考察，係由台灣自來水公司核派王總工程師傅政率領企劃處長何亮旻、營業處組長蔡文玲及供水處組長王興舜等共一行 4 人，前往新加坡考察，行程日期為 2025 年 2 月 16 日（星期日）至 2 月 21 日，共計 6 日，為因應原水豐枯期之水質變化加劇及環保法規管制日趨嚴苛，本次出國考察交流，旨在汲取新加坡從水政策到水部門的技術與創新經驗，有必要針對水處理相關研究及淨水場水處理技術提升之需求，從水質檢驗、生物分析、水質管理、水處理研究、技術及相關教育訓練等面向之運作方式，前往新加坡參訪了解公用事業局(PUB)目前水質法規、水質管理、水質監測、水處理技術及水質專業相關等運作方式及策略，並收集資料，作為淨水場管理及運作參考，將有助日後規劃方向。

台灣與新加坡在水資源管理領域的交流已行之有年，此次前往新加坡除參訪考察 PUB 水質檢驗、生物分析、水質管理、水處理研究及相關教育訓練等之運作，另期許發展台灣與新加坡水務合作，並藉由參加由新加坡國家水務局（PUB）、新加坡水協會（SWA）及睿克科技公司（ZWEEC）共同邀請之水務交流研討會，PUB 亦邀請四家新創廠商：CBE 生態解決方案公司、3E 膜科技公司、SANDHIGUNA 公司及 Veritas Water 公司與會交流分享，以全方位開拓本公司對水務產業之新視野，並尋求雙方建構未來合作模式及機會。此外更安排新加坡水務及水利工程等相關設施，俾了解新加坡在水資源技術與管理的最新進展。

本次參訪行程包括新加坡國家水務局（PUB）、吉寶濱海東海水淡化廠、蔡厝港自來水廠（CCKWW）、濱海灣花園、碧山-宏茂橋公園、Ripple2Wave、睿克科技（ZWEEC）等新創公司水務技術交流會、濱海堤壩與永續發展館等單位。透過實地參訪與交流，深入了解新加坡在水資源管理及技術應用之先進經驗，期能作為本公司未來發展之參考。參訪過程中了解新加坡在水資源多元化、水質安全管理、先進淨水處理技術與氣候變遷應對方面的成功經驗。

新加坡沒有天然湖泊，水資源嚴重匱乏，城市日常生活和工業生產用水主要靠收集存儲雨水及從鄰國進口淡水，天然水資源有限，透過水庫、人工湖收集雨水、海水淡化廠、新生水及進口水等多元水源策略，降低對單一水源的依賴性，有效確保供水穩定性。台灣水資源豐富，河川短而急，特性略有不同，在極端氣候影響下仍有旱澇不均的問題，同樣有多水源備援的需求，新加坡建立的水資源多元化策略是成功經驗，足為台灣效法，尤其是新生水廠及海水淡化廠之水處理技術發展，可作為未來提升台灣供水韌性的榜樣，降低依賴水庫及地下水，以確保水資源水質及水量能永續穩定經營。

壹、目的

台灣與新加坡在水資源管理領域的交流已有多年歷史，為因應原水豐枯期之水質變化加劇及環保法規管制日趨嚴苛，有必要針對水處理相關研究及淨水場水處理技術提升之需求研討交流。此次前往新加坡 PUB 考察水質檢驗、生物分析、水質管理、水處理研究及相關水利工程等之運作現況，旨在尋求台灣與新加坡水務合作機會及相互交流學習，並藉由參訪及研討新加坡水務相關設施，深入了解新加坡在水資源技術與管理上的最新技術及進展，學習汲取新加坡對水資源管理與供水韌性挑戰的豐富經驗，並探索雙方未來合作的潛在機會，此次參訪及交流研討的主要目的如下：

- 一、探討永續水質及水量管理的合作策略：探索確保區域水資源可持續性的共同方法。
- 二、相互分享經驗與最佳實踐：交換水資源管理與供應方面的知識，以促進雙方共同進步與提升。
- 三、研商未來合作潛在機會：透過與新加坡公用事業局（PUB）的友好交流，深化雙方在水資源管理方面的合作，進一步鞏固兩國在淨水處理及水利工程技術和管理經驗方面的互惠關係，特別是在水質管理、供水系統管理、淨水處理、水資源回收再利用、永續環境保護方面的合作，尋找技術開發方面共同解決區域挑戰的合作項目。
- 四、討論挑戰與解決方案：就氣候變遷、水安全與 AI 導入進行交流，找出實用及可迅速調適未來的解決方案。
- 五、瞭解新加坡水管理框架：通過參觀新加坡公用事業局（PUB）的先進水質實驗室、新生水水廠、海水淡化廠、濱海堤壩（Marina Barrage）、永續新加坡展覽館等，獲取第一手的水資源綜合管理成功經驗。

本次計畫前往新加坡就數位水務轉型服務、氣候適應和水資源抵禦能力、安全水流程管理、漏水防治科技與相關策略及創新者與合作夥伴之商業合作形式、ESG 永續實踐力等各面向加以研討，目標在汲取新加坡從水政策到水部門的技術與創新經驗，全方位開拓本公司對水務產業之新視野。

新加坡因地小人稠，沒有天然湖泊，新加坡水資源嚴重匱乏，新加坡人均水資源占有量居世界倒數第二位，城市日常生活和工業生產用水主要靠收集存儲雨水及從鄰國進口淡水，天然資源不豐，為全球極度缺水國之一，遂長年投入水流程優化及水管理策略，惟其擁有先進的思維，台灣雖水資源豐沛，但天災頻仍、旱澇不均，淨水處理狀況較新加坡複雜許多，雙方均有足堪師法之處。目的在擷取先進國家淨水處理技術及管理之實務經驗，作為本公司爾後水質監測、檢測及管理技術、水處理技術，及相關水利工程規劃提升之參考。

本次參訪及交流由新加坡國家水務局(PUB)高級顧問廖國榮先生促成，希望與台灣自來水公司就水管理議題進行各面向之多元交流，並經由睿克科技公司(ZWEEC)及新加坡水協會(SWA)致文邀請。本次計畫前往新加坡，針對以下五大面向進行研討：

- (一)數位水務轉型服務：透過與新加坡國家水務局(PUB)供水管網部門及客戶服務中心，分享導入 AI 數位服務經驗，找出可供參考的數位化服務發展模式。
- (二)氣候適應和水資源抵禦能力：就水安全與氣候變遷，尋求實用及可迅速調適未來挑戰的解決方案。
- (三)安全水流程管理：透過參觀新加坡國家水務局(PUB)的水廠、海水淡化廠、濱海堤壩(Marina Barrage)，瞭解新加坡安全水管理與供應方面的進步。
- (四)創新者與合作夥伴之商業合作形式：尋找在技術開發方面共同解決區域挑戰的合作項目與機會。
- (五)ESG 永續實踐力：探索永續水管理的合作策略，確保區域水資源可持續性的共同方法。

總之本次本代表團參訪及交流目標在汲取新加坡從水政策到水部門的技術與創新經驗，全方位開拓本公司對水務產業之新視野，並建構日後合作之方式，期能達到共榮雙贏的目標。

貳、過程與內容

一、行程

本次公差出國考察，係由台灣自來水公司核派王總工程師傳政率領企劃處處長何亮旻、營業處組長蔡文玲及供水處組長王興舜等一行 4 人，前往新加坡考察，行程日期為 2025 年 2 月 16 日（星期日）至 2 月 21 日，共計 6 日，2 月 16 日(星期日)啟程前往新加坡、2 月 17 日（星期一）拜訪新加坡國家水務局（PUB）與 ZWEEC 公司探討生物網路水質研究及參訪 PUB WaterHub、2 月 18 日（星期二）與 PUB 工業與技術合作部及公共部門會議交流、2 月 19 日（星期三）參訪蔡厝港自來水廠及碧山-宏茂橋公園、2 月 20 日（星期四）與 Ripple2Wave（會談 4 家新創公司）的會議、新加坡永續館、濱海堤壩等行程、2 月 21 日（星期五）賦歸返抵台灣。

表 1.1 新加坡參訪行程表		
日期	上午	下午
2025 年 2 月 16 日 (星期日)	TPE14:10 新加坡航空 SQ 877 Taipei Taoyuan International Airport	SIN 18:55 PM Singapore Changi 機場 19:50 抵 達旅館 check in
2025 年 2 月 17 日 (星期一)	拜訪新加坡國家水務局 (PUB) 與 ZWEEC 公司探討生 物網路水質研究 1、Water-Exchange 交流會 2、參訪 PUB 水質實驗室 3、參訪水資源循環利用示範 區-濱海灣花園	參訪 PUB WaterHub
2025 年 2 月 18 日 (星期二)	與 PUB 工業與技術合作部及 公共兩部門進行會議交流 1、參訪吉寶濱海東海水淡化 廠 (KMEDP) 2、PUB 進行技術討論會	參訪吉寶濱海東海水 淡化廠
2025 年 2 月 19 日	1、參訪蔡厝港自來水廠	參訪碧山-宏茂橋公園

(星期三)	(CCKWW)及技術討論會 2、參訪新加坡 ABC 水計畫之一碧山-宏茂橋公園	的加冷河
2025 年 2 月 20 日 (星期四)	1、與 Ripple2Wave 新創公司(會談 4 家新創公司) 技術交流會 2、參訪永續新加坡展覽館與濱海堤壩	永續新加坡展覽館、濱海堤壩
2025 年 2 月 21 日 (星期五)	SIN 11:40 新加坡航空 SQ 878 Singapore 新加坡 Changi 樟宜機場	台北 下午 04:20 抵達 臺北(桃園國際機場)

二、過程與內容

本次公差出國考察新加坡共計 6 日，行程涵蓋各項重要水資源管理單位及設施，包含政府機構、技術交流討論會議，並參訪海水淡化廠、水利工程及水處理工程等設施，目的藉由交流以深入了解新加坡的水資源政策面及水務相關部門的技術與創新經驗，如水資源管理、技術創新、數位水務轉型、氣候適應、水安全流程管理、商業合作模式及 ESG 永續實踐力等管理經驗及技術，以作為本公司未來發展方向與合作參酌。

本團一行四人 2 月 16 日(星期日)啟程前往新加坡。2 月 17 日(星期一)拜訪新加坡國家水務局(PUB)與 ZWEEC 公司 Water-Exchange 交流會，探討生物網路水質研究及參訪 PUB WaterHub、其次參訪 PUB 水質實驗室，下午則持續參訪水資源循環利用示範區-濱海灣花園等。2 月 18 日(星期二)參訪吉寶濱海東海水淡化廠(KMEDP)，隨即與 PUB 工業與技術合作部及公共部門、吉寶濱海東海水淡化廠廠長、技術人員等進行技術討論會交流。2 月 19 日(星期三)參訪蔡厝港自來水廠(CCKWW)及進行技術討論會，隨後參訪新加坡 ABC 水計畫之一碧山-宏茂橋公園及繞道至宏茂橋公園公園內的加冷河岸。2 月 20 日(星期四)與 Ripple2Wave(會談 4 家新創公司)的交流會議，隨即轉往新加坡濱海堤壩與永續新加坡展覽館等行程。

(一)2025 年 2 月 16 日(星期日)

自桃園機場啟程搭乘新加坡航空 SQ 877 至新加坡 Changi 機場。

Taipei 時間 14:10 自桃園機場(Taoyuan International Airport)啟程
搭乘新加坡航空 SQ 877 出發前往新加坡，抵達至新加坡 Changi 機場時間：
18:55（新加坡當地時間）

(二)2025 年 2 月 17 日（星期一）

拜訪新加坡國家水務局（PUB）與 ZWEEC 公司探討生物網路水質研究：

1、Water-Exchange 交流會。2、參訪 PUB 水質實驗室。3、參訪水資源
循環利用示範區-濱海灣花園行程。

1、Water-Exchange 交流會

2025 年 2 月 17 日上午 9 時 30 分，本公司代表團從新加坡阿馬拉飯店出發前往本次主要會談之新加坡公用事業局（Public Utility Board, PUB）2 樓會議室，參加由新加坡國家水務局（PUB）與睿克科技公司（ZWEEC）共同舉辦的 Water-Exchange 交流會（如圖 2.1），會議目的是加強雙方在水資源永續發展方面的技術交流，會中介紹新加坡在水資源所面臨水量、水質等之挑戰與永續發展策略。由於天然水資源缺乏，故水資源早期大多仰賴由馬來西亞進口，為了提供國家足夠的水資源，及降低對單一水源的依賴度，PUB 公用事業局積極開發多樣化的水源，以提升水資源的安全，確保供水的穩定及水資源的永續發展。



圖 2.1 Water-Exchange 交流會

由 ZWEEC 公司(A*STAR,新加坡科技研究局衍生新創公司)之高級顧問林博士接待及主辦，其為公用事業局前水質副署長退休後服務於 ZWEEC 公司擔

任高級顧問一職，具豐富水務經驗及知識。隨後，由 ZWEEC 公司進行會議業務簡報，是一家總部位於新加坡的領先技術公司，專注於構建創新和水安全的技術解決方案。其於會中談到解決方案係採用集成和數據驅動的方法，利用先進的分析、人工智慧和預測建模來推動一物聯網解決方案，從而進行早期之干預機會，取得解決先機，防患於未然。

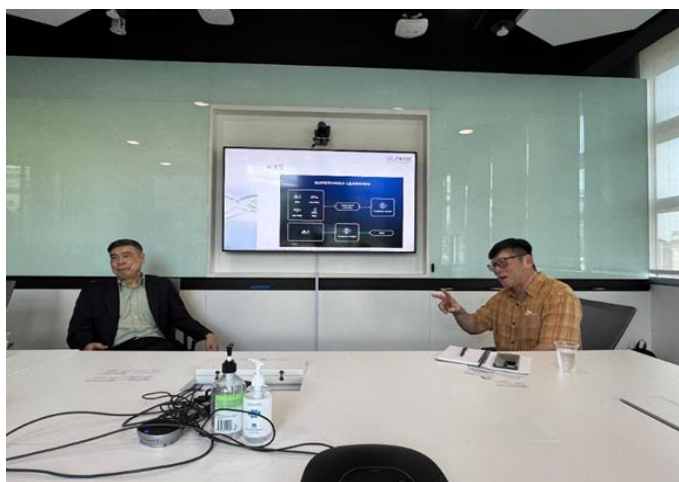


圖 2.2 林文富博士簡報全面水質管理與新技術應用專題

林博士述及 ZWEEC 公司屢獲殊榮的水務技術解決方案係以本地實踐實施和安全的雲端技術解決方案，受到來自新加坡、澳大利亞、中國、美國和中東的水務行業領導者的信賴，當天會議簡報介紹該公司針對未來的水之清潔、安全、可永續的研發產品及技術，利用 AI 旗艦技術解決方案之研發產品例如 Aquapro™(以智慧生物之偵測分析技術-AI 魚類行為監測系統儀如圖 2.3)、Algapro™(以 AI 對浮游植物識別及計數影像辨識技術-AI 浮游生物(藻類)辨識監測系統儀如圖 2.4)等技術及其承攬協助新加坡公用事業局 (PUB) 的模式。

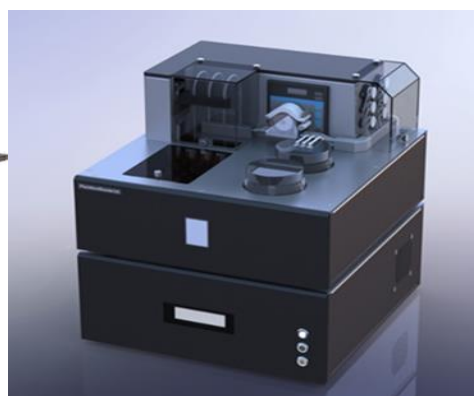


圖 2.3 Aquapro™水質安全預警儀 圖 2.4 Algapro™水生態藻類智慧監測儀

(1) Aquapro™ 智慧生物監測分析技術-AI 魚類行為監測系統儀

ZWEEC 公司主要業務項目為承攬協助 PUB 於各原水抽水站、淨水場、配水池、配水管線建置全新加坡約 70 多處養魚箱協助監控原水或清水質。藉偵測魚類行為異常以檢測水中污染物情形，當偵測到魚的行為和水質異常時，Aquapro™警報系統(如圖 2.5)會自動發出警報，異常嚴重性共分為 3 種顏色警示，分別為褐色、黃色、紅色警示通知機關。這項技術已廣泛應用於新加坡水庫、取水口各原水抽水站、淨水場、配水池配水管線的水。

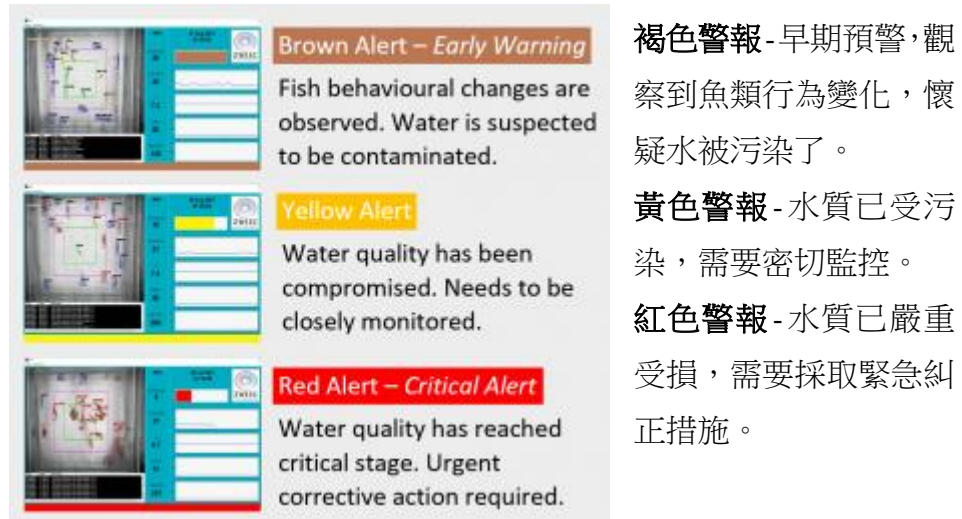


圖 2.5 Aquapro™ 警報系統

常規定期指標檢測項目分述例如檢測 pH 值、濁度、溶解氧等常規指標，藉以評估水質基本狀況。而化學污染物分析項目例如分析重金屬、農藥、有機污染物等化學物質，確保飲用水安全。此外生物指標監測項目例如監測細菌、病毒、藻類等生物指標，需儘早發現預防生物污染引發的健康問題。

水質管理面臨的挑戰和未來經濟發展及城市化趨勢增加了水污染的頻率，而化學品種類繁多、日益嚴格的標準與法規和持續保證水質安全，需要面對新興污染物的發現，因此全面水質管理其實包含精準設計的水質監測和監控，可獲致下列結論：

- A. 水污染事件隨時隨地都可能發生。
- B. 無論污染事件時間的長短，它都會對人們的心理意識和社會經濟造成重大的影響。
- C. 每個污染事件都會減低公眾對水質安全的信心。
- D. 全面的水質管理可以對當前的，醞釀中的，和新興的水質問題提供預警，讓有關管理單位有足夠的時間，儘快的採取更正和補救的措施，來確保

供水安全。

在全程的供水環節中，從水源頭到用戶水龍頭，應用多級屏障、危害分析及關鍵控制點預防管理體系（HACCP），來全面的實行水安全計劃。水污染事件隨時隨地都可能發生，傳統的終點採樣檢驗往往是“太少或太遲”，無法提供足夠的時間來啟動相關的應對措施來避免災害。常規參數的檢驗無法全面性的反映水質安全。水安全計劃能夠彌補以上的不足。水質監測策略臚列如下：

- A. 在線監測蓄水池、原水，淨水場各單元程序、清水池的進出口，主幹管的策略部位水質（包括 pH 酸鹼度、電導率、餘氯、總有機碳、濁度、氨氮、藍綠藻等項目）。
- B. 日常監測主要微生物指標，整體代表性的物化參數（包括 pH 酸鹼度、電導率、濁度、鹼度、餘氯等項目）。
- C. 週、月、年度檢測生物化學參數、殺蟲劑、新興污染物。
- D. 在線生物監測：使用魚類來監測水中毒性。
- E. 輸水管網日常的在線和採樣監測。

水處理過程的智慧監測與控制人工智慧在水質監測中的應用，從水源頭到水龍頭之原水水質與水處理過程的數位孿生人工智慧在水質監測領域具有廣闊的應用前景。通過智慧監測、優化控制和數位孿生技術，AI 能夠顯著提升水質管理的效率和水準，保障公眾的飲水安全，實現可永續發展。水質安全預警儀能夠快速檢測重金屬、殺蟲劑、除草劑及有毒有機物等大部分有毒有害物質。在儀器操作上簡單易學，運行成本低、全程不需要加入化學物質，屬綠色環保儀器。而其應用場合包括有(A)河流水庫、(B)取水評估、(C)化學分析、(D)水道分析與評估、(E)水廠取水口、(F)排水系統、(G)飲用水監測、(H)毒物學評估、(I)教學與科研等九項不同場合。

總之利用 AI 可實現精準監測(更精準的水質監測與預警)、智慧優化(通過 AI 演算法優化水處理過程，降低成本)、數位孿生(構建數位孿生系統，實現水質管理的智慧化)、水質科學研究、水質安全生物毒性綜合預警。

Aquapro™ 水質安全預警儀是一款高靈敏度的多功能在線水質毒性檢測

設備，係以我們熟知的魚類(新加坡通常使用虎斑魚)作為生物感測器，利用顯微拍攝技術、圖像識別跟蹤技術、自動化控制技術及計算機軟體技術實時監測水質對生物活動的影響，通過分析魚類的運動學行為變化情況確定水質綜合毒性大小。

ZWEEC 公司自行研發有關 Algapro™ 是一種基於人工智慧的自動浮游植物識別和計數技術，徹底改變了傳統的浮游植物監測方法，並集成了深度學習和最先進的演算法，可自動檢測不同的浮游植物。憑藉定期監測浮游植物，可以診斷原水或清水水質，因此水生生態系統的健康情況非常重要，並可以及時防止有害藻華（HAB）發生，為每個人提供安全的用水。

迄今為止，Algapro™ 系統已廣為運用部署在新加坡和中國的自來水公司，藉 AI 系統儀錶板視圖識別，以即時分析、計算浮游植物的數量，ZWEEC 專有的浮游植物監測檢測技術可實現大規模和高頻率的浮游植物監測，打破專業人力資源不足的限制，將保護水資源的專家從勞動密集型的人工顯微鏡檢查中釋放出來，確實保護水資源免受藻類污染，並就雙方多年來的交流合作進行回顧與暢談展望。

緊接著由林文富博士簡報「全面水質管理與新技術應用專題」(如圖 2-2)，內容研討有關水資源可持續性，主要包括水量和水質兩個方面水質管理面臨的挑戰和未來展望。水量之挑戰與基礎設施建設息息相關，而水質挑戰之複雜性，主因水污染問題漸趨複雜化所致，須憑藉先進儀器的檢測、監控及監測水污染，方能夠即時分析原水水質數據，迅速探測正在發生的水污染事件。

(2)Algapro™ AI 浮游生物辨識監測系統-AI 浮游生物(藻類)辨識監測系統儀

浮遊藻類是水生生態系統中主要初級生產者，特點為種類多、數量大、繁殖快，其數量及分佈對生態系統功能有決定性影響，對水體中的藻類進行識別計數，於水生生態監測範疇可謂執牛耳之地位。水生生態藻類智慧監測系統儀，參觀實驗室內水生生態藻類智慧監測系統儀內裝(如圖 2.6)，檢測樣品盤及顯微鏡等設備內含 15 組樣品自動批量檢測，約 4 小時可完成檢測，獲得精確到屬種的藻密度分佈數據，具備原始樣品直接檢測能力，並節省前處理步驟和時間。此外該設備中包括多微流道顯微觀測卡匣、自動掃描高倍顯微圖像，閉環運動控制、600 萬像素高感光

靈敏度相機，融合深度神經網路技術與專家知識的全新演算法，能即時智慧識別，識別速度達 50FPS，其識別可信度全面超越所有市面現有產品，集成化的控制系統與樣品載入模組、樣品搖晃功能，防止樣品凝固和沉積、自動清洗管道和觀測卡匣、統計輸出與數據存儲等功能。自主智慧財產權，專利保護，業內首創，以深度神經網路技術為基礎的全自動藻類識別系統，其無人值守快速全自動批量檢測浮游藻樣品、目前為國際領先技術之一。

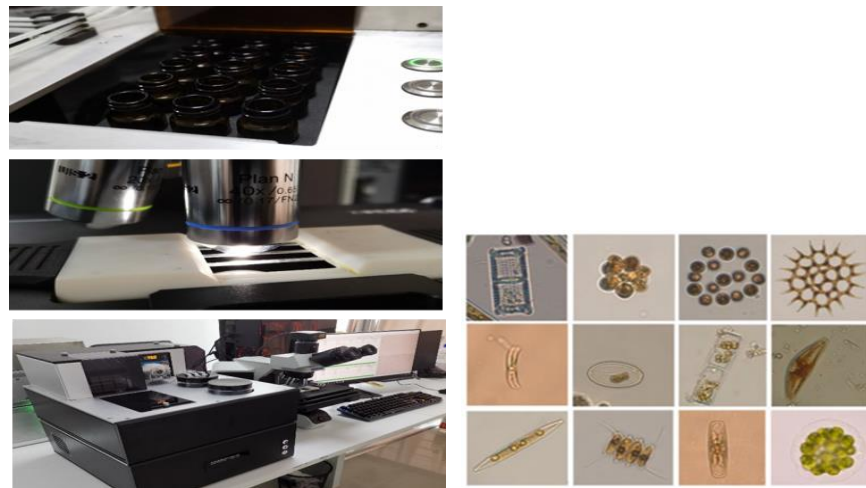


圖 2.6 參觀實驗室內 Algapro™水生態藻類智慧監測儀、檢測樣品盤及顯微鏡等設備

新加坡的水源主要來自水庫、海水淡化、新生水及由馬來西亞進口水，為因應氣候變遷及社會經濟發展與進步帶來的各項挑戰，PUB 透過長期規劃、不斷創新以及對新技術的投資等策略來滿足國家的供水需求。在供水管理策略：(1)興建水庫儲存雨季的過剩水量，提供旱季穩定的供水。(2)增建淨水廠及利用廢水再生與海水淡化技術，增加水資源供給。(3)埋設管材品質較佳的輸(送)水管線，減少輸(送)水過程中的流失，提高供水效率。在水質管理策略：建立完善的水安全計畫，並應用水質監測及人工智能技術，例如：數位孿生技術模擬水處理流程，結合 AI 監測數據分析，提高水質監測的即時性與精確度，確保從原水、淨水場處理及供水管網等供應端到用戶端的水質安全。

2、參訪 PUB 水質實驗室

本公司代表團進行 Water-Exchange 交流會後，隨即前往參訪 PUB 的水質實驗室，包括：水生生物實驗室、無機化學與放射性物質實驗

室、細菌與寄生蟲實驗室、有機化學實驗室…等，了解新加坡在水質監測技術的發展。



圖 2.7 參訪水質實驗室致贈見面禮

(1)觀摩水生生物實驗室概覽：水生生物實驗室對水樣進行生物分析，包括：測試葉綠素-a、藻類毒素的濃度等實驗項目，利用顯微鏡觀察與鑑定水中的藻類與微型動物的形態特徵，探索新加坡的浮游生物多樣性，主要有三大方向說明如下：

- A.水庫中的淡水浮游植物(藍綠藻、綠藻等)：(A)水庫樣本會被保存以維持細胞結構完整性。(B)借助顯微鏡，能夠研究水庫中多樣的淡水浮游植物群落。
- B.海洋中的海洋浮游植物(矽藻、甲藻等)：(A)除了水庫，周邊的海域也擁有多種海洋浮游植物。(B)若有潛在有害或造成困擾的藻類，能透過顯微鏡辨認。
- C.不咬人的搖蚊（非叮咬型搖蚊）：收集並計數不同生命階段的搖蚊，以密切監控水庫中搖蚊爆發的情況。



圖 2.8 水質部水生生物實驗室概覽

(2)觀摩無機化學與放射性物質實驗室：首先映入眼簾的是一張放射性監測策略（Radioactivity Monitoring Strategy）流程圖如圖 2.9 所示，主

要有二大方向說明如下：

- A. 進行總 α 與總 β 活性檢測：(EPH 規範：總 α 活性 ≤ 0.5 Bq/L、總 β 活性 ≤ 1.0 Bq/L)，如經檢測氡 ≤ 100 Bq/L 或總 α 劑量 ≤ 0.1 mSv 或總 β 劑量（扣除 K-40 活性後） > 1.0 Bq/L，則水質適合，無需進一步行動。
- B. 持續進行檢視放射性核種的潛在來源，測定個別放射性核種的活性，並與指導值比較。若劑量 > 0.1 mSv 則在合理情況下，考慮並採取補救措施以降低劑量。

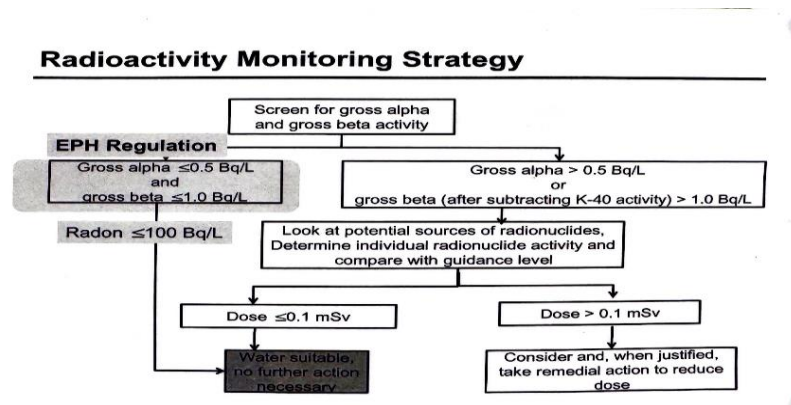


圖 2.9 放射性監測策略流程圖

除了上述兩部門外，各部門實驗室內部均設有多項先進設備，包括自動取樣系統(如圖 2.10)、即時生物監測儀及高精度光譜分析儀等各式精密儀器，這些技術設備可用於檢測各類水污染物，如重金屬、農藥殘留及微生物污染檢測分析。



圖 2.10 自動取樣系統

緊接著PUB成員也一一帶領觀摩了AI 水質分析系統實驗室的實際運作，

系統透過大數據與機器學習技術，以預測監測水質持續變化趨勢，進一步即時優化新加坡的水處理決策。而 PUB 水質部門的員工在導覽時，曾提到 PUB 在提升水質檢測及監測方面投入很多經費，部分是領先各國環保法規尚未規範之未來污染物，先行研究分析處理技術，以防範於未然，以先行投注技術研發心血，因人力逐漸精簡之趨勢，為解決工作量增大問題，更藉著導入 AI 技術及設備，不僅提高水質檢(監)測的速度與精準度，同時大大節省人力，整層水質實驗室的機器設備比人多數十倍，足可為台灣各界借鏡參考學習。

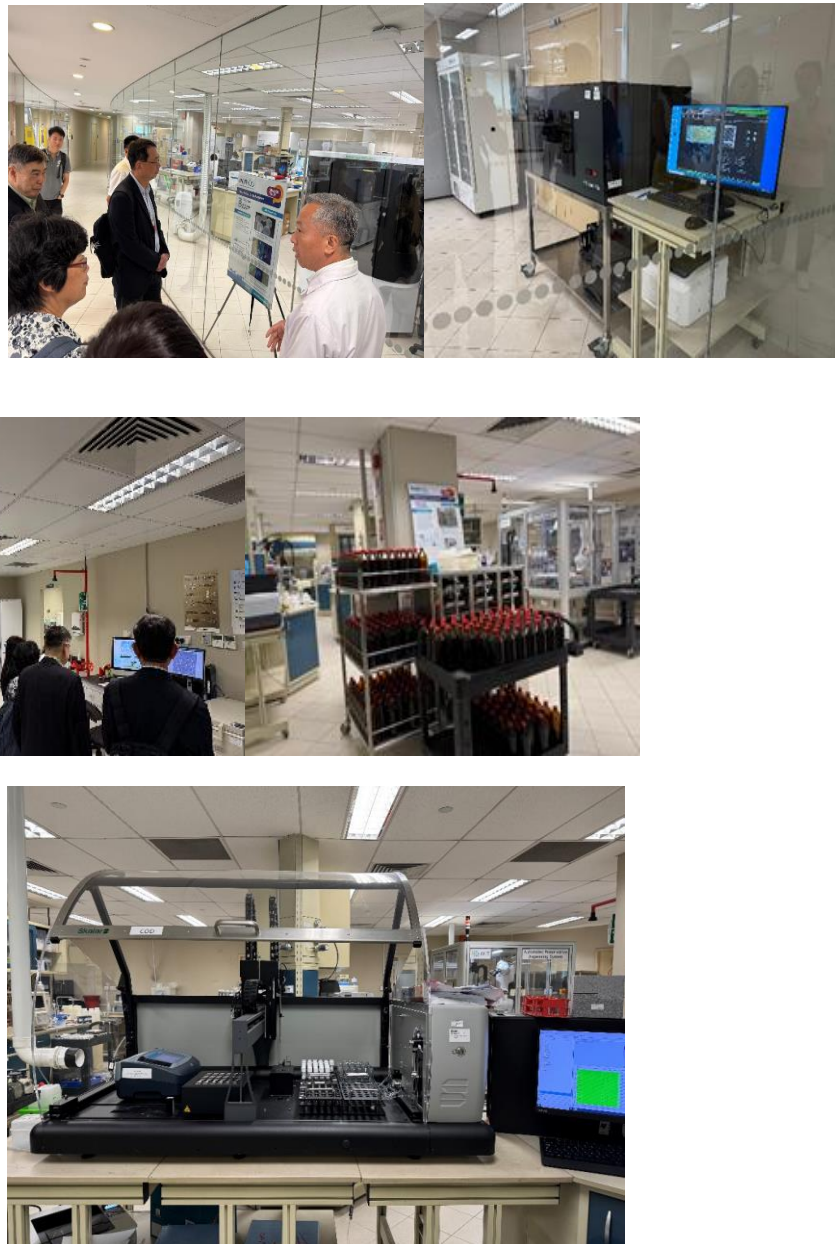


圖 2.11 新加坡國家水務局(PUB)水質實驗室

3、參訪濱海灣花園(Gardens by the Bay)

本代表團參觀新加坡公用事業局水質實驗室之後，午後至鄰近的新加坡著名的濱海灣花園(Gardens by the Bay)隨意走走逛逛，深入了解當地的高空花園，該園區不僅是觀光勝地，亦是城市水資源管理的重要示範點，不僅帶來觀光財，更可振興國內園藝花卉展示藝術經濟(如圖 2.12、圖 2.13)。據觀察花園內設有雨水回收系統，能夠收集與過濾雨水後，再利用於園區澆灌與景觀水體補充，此為節約水資源之典範。



圖 2.12 園藝花卉展示藝術



圖 2.13 園藝展示藝術

新加坡寸土寸金，故花園特色亦採充分利用空間模式思考，又為克服雨季帶來不便，特意創造溫室花園模式，亦屬一大觀光創意，為新加坡帶來不少旅遊商機及豐厚稅捐收入，足為台灣局部用地狹隘之城市之師法對象。此外，園區內的超級樹(Supertrees) (如圖 2.14)具備美觀之外，亦有儲存雨水及太陽能發電功能，這些措施展現了新加坡在水資源循環利用與永續城市發展上的創新思維。



圖 2.14 濱海灣花園的超級樹(Supertrees)

(三)2025 年 2 月 18 日 (星期二)

與 PUB 工業與技術合作部及公共兩部門進行會議交流 1、參訪吉寶濱海東海水淡化廠 (KMEDP)。2、PUB 進行技術討論會。

1、參訪吉寶濱海東海水淡化廠 (KMEDP)

2025 年 2 月 18 日上午，本公司代表團前往吉寶濱海東海水淡化廠 (Keppel Marina East Desalination Plant, KMEDP) 進行參訪。吉寶濱海東海水淡化廠 (KMEDP) 是新加坡第四座海水淡化廠，吉寶濱海東海水淡化廠的雨水回收管理系統簡介 (如圖 3.1)，KMEDP 是新加坡第一個大型雙模式 (Dual-Mode) 海水淡化廠 (如圖 2.16、圖 2.17)，可根據潮濕或乾燥的天氣條件，靈活處理處理濱海灣蓄水池的淡水或淡化海水，以確保新加坡的供水穩定，運用先進的水處理技術，包括超濾 (UF)+逆滲透 (RO) 雙層過濾、紫外線消毒、數位孿生技術等，優化水資源利用並降低能源消耗。



圖 3.1 吉寶濱海東海水淡化廠的雨水回收管理系統簡介

KMEDP 專案採用設計、建造、擁有和營運模式，日生產淡飲用水 3,000 萬加侖。吉寶基礎設施部門與公用事業局簽署了一份為期 25 年的供水協議，負責設計、建造、擁有和營運 KMEDP，並向公用事業局供應新鮮飲用水。簡報已介紹 KMEDP 如何透過智慧水管理系統提升運營效率，並強調其地下化設計，使地面可作為綠地公園，與城市景觀融合，地面層為海水淡化廠地面永續發展展示館(如圖 2.16)，海水淡化廠地面雨水收集處理池(如圖 2.17、圖 2.18)。

殊為可惜的是，當日地下層的水處理廠因故未能開放參觀，無法實地觀摩該廠地下室的水處理流程。不過，該海淡廠將綠色基礎建設與公共空間整合，提升水處理設施的社會價值，可為台灣之借鏡，引入水資源管理系統，促進永續發展。



圖 3.2 海水淡化廠地面永續發展展示館



圖 3.3 海淡廠雨水收集處理池 圖 3.4 海淡廠雨水收集管線及處理池

此外該海水淡化廠實現了土地的多種利用，創新設計將處理設施完全設置於地下，而屋頂設計綠色休閒區與公共開放空間(如圖 2.15)融為一體，以友善地供社區休閒空間。



圖 3.5 屋頂設計綠色休閒區與公共開放空間

此外值得一提的是，深層隧道污水收集系統（DTSS）：樟宜水回收再生水廠（CWRP：Changi Water Reclamation Plant）是 DTSS 的核心之一，這是世界上最大的再生水處理設施之一，佔地 43 公頃，土地約是傳統工廠規模的三分之一，CWRP 的特點是國家級具有最先進的、緊湊和有蓋的再生水處理設施，該設施於 2008 年投入使用，日處理能力達每天 800,000 立方米的廢水（CMD）。是新加坡對其長期用水需求的回應。為因應這種超長期的用水需求，新加坡的廢水處理和處置，包括一條 48 公里長的隧道，該隧道從新加坡北部的克蘭芝延伸到東部的樟宜，像條超級高速公路用於收集、處理和處置廢水，另有一個中央再生水廠，位於東部 60 公里的樟宜，包括 60 公里的連接下水道和一個 5 公里長的深海排污口。深隧道完全依靠重力工作，因此無需泵站，從而降低了廢水溢出的風險。

另有一勝科新生水廠（The Sembcorp NEWater Plant）是新加坡最大的、全球領先的再生水廠之一，也是世界上最大的填海造水廠之一，2008 年曾由 PUB 授予獎項，在公私合營下，勝科與私人合夥企業簽訂合同，勝科與設計--建造--擁有--營運（DBOO）這個新生水工廠簽訂合同，為期 25 年，皆可為相互支援之處理水廠及設施。

2、PUB 供水(管網)部門及客服中心進行技術討論會

本公司代表團隨後即與新加坡國家水務局（PUB）專家團隊進行了技術研討（如圖 2.20 新加坡國家水務局 PUB 管理樓及會場），會中本代表團率隊長官王總工程師先說明了此次交流的目的，主要是近年來台灣受極端氣候變遷之影響，地震、颱風、乾旱、水災等天災頻傳，致水資源供

應的不穩定性相對提高許多，並以 2024 年 4 月 3 日台灣發生的 0403 花蓮地震為例，說明因 0403 地震及餘震不斷造成土石鬆動，加上強降雨導致上游集水區崩塌，而致區域土石流，進而造成原水濁度急遽上升，一時間無法正常供水。突發性停水事件加劇用戶的焦慮與不滿，致客服中心進線量瞬間激增。

此番特地前來與 PUB 專家學者就數位水務轉型服務面向、供水(管網)技術部門及客服中心請益有關如何強化處理突發性的原水濁度升高、管線受損搶修、供水不穩定及客服應變運作等問題的處理效能及經驗，藉以學習提升本公司在水務管理的應變能力。新加坡國家水務局（PUB）專家團隊代表亦在技術研討會中，詳細介紹新加坡供水管網、配水損失管理及客戶服務中心實際運作模式(圖 2.21 代表團與 PUB 供水技術部門技術交流合影留念)。



圖 3.6 新加坡國家水務局 PUB 管理樓及會場



圖 3.7 代表團與 PUB 供水技術部門技術交流合影留念

(1)供水管網與配水損失(DL)管理

為確保水資源供應的穩定性、新加坡的水源朝向多樣化發展，及相互支援系統，以提升穩定性，因此水源主要來自水庫、海水淡化、新生水(NEWater)及進口水(Johor Water)等管道。目前全國擁有 5 座海水淡化廠、6 座本地淨水場及 1 座在馬來西亞柔佛淨水場。供水系統採用環狀主幹管系統(Ring Main System)，提供備援的供水路線，以確保突發事件或部分管線破漏維修狀況，也能即時透過備援路線維持正常供水，並提升供水系統的彈性與應變能力。

新加坡 PUB 的供水管網總長度約 6,000 公里，相當於本公司一個管理處之管線長度，平均管線年齡為 28 年，耐用年限 70 年。漏水維修頻率約每 100 公里管線上平均約 4.5 個漏水點。透過完善的輸配水管網(Distribution Network)將水資源穩定地供應至一般家庭、商業及工業用戶。目前用戶數約 170 萬戶，主要管理策略是透過 A.精準計量、B.主動漏水檢測、C.管網汰換與 D.維修及立法與施工監管等多管齊下的策略，使配水損失(DL: Distribution Loss Management)率從 2018 年 8.3%到 2024 年時，降至 7.2% (減少 1.1%)。

A.精確計量 (Accurate Metering):

一般家用水表(如圖 3.8)之直徑 15 毫米，須符合 ISO4064/1，新水表精度為 $\pm 2\%$ 、在役水表精度為 $\pm 3\%$ ；非家用水表(如圖 3.9)之直徑 15 至 300 毫米，屬單式或複合式水表，複合式水表能夠準確捕捉高流量和低流量，新水表精度為 $\pm 2\%$ 、在役水表精度為 $\pm 3\%$ 。

(A)定期校對與汰換逾齡水表(小表 15 年、大表 10 年)，減少計費誤差，PUB 計量管理總共約：171 萬個客戶帳戶，國內和非國內共 174 萬個水表。

(B)推動智慧水表(SWM)，提高用水數據精度，2021-2024 年完成 30 萬只智慧水表安裝，2024-2039 年由 SPS 負責營運與維護，推動對象包括一般家庭、商業與工業用戶，用戶免付費。自動記錄用水數據，每日傳送 4 次，每 6 小時回傳一次，減少人工抄表，即時提供用戶用水數據，提早發現用水量異常(突增)及調整用水習慣(節水)。



圖 3.8 一般家用水表



圖 3.9 非家用水表

B. 主動漏水偵測：應用智慧化漏水偵測技術

新加坡在主動漏水偵測方面，應用智慧化漏水偵測技術者：臨時性設置偵測點約占 31%、永久性設置偵測點約占 3%；傳統方法偵測者：主動調查偵測點約占 16%、同仁回饋告知偵測點約占 50%(如圖 3.10)。

(A)移動與固定式噪音記錄器：透過聲音技術檢測管道內的異常聲波，精準定位潛在漏水點。

(B)固定式感測器：在輸水管網關鍵區域安裝長期監測設備，即時偵測水壓與流量異常。目前佈設現場感測器數量約 1,500 個；監測輸水管網總長度約 700 公里。

(C)智慧球檢測技術：使用內部流體探測設備，深入管線內部，透過高精度聲音感測，檢測微小漏水點。

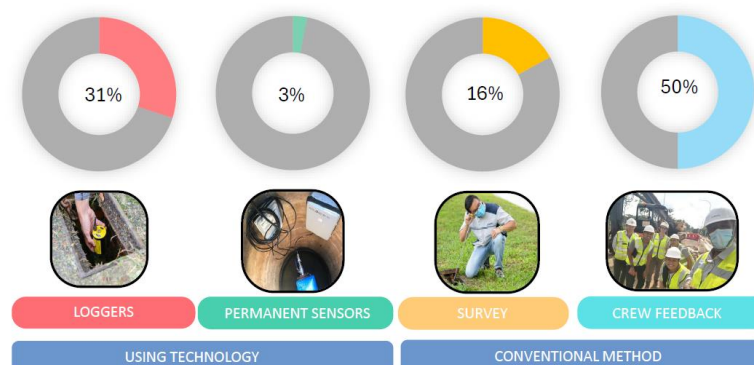


圖 3.10 新加坡在主動漏水偵測比例

(D)運用 GIS 數據整合與 AI 預測分析：透過地理資訊系統 (GIS) 標示高風險管線區域，並應用 AI 預測與歷史數據分析，以預測可能發生漏水的

區域(PUB 之漏水偵測率如圖 3.11)，提升維修效率。PUB 之漏水偵測率自 2018 年之 14%至 2024 年之 40%，節省水量亦自 2018 年之 1MGD 提升至 2024 年之 1.8MGD，足見其應用智慧化漏水偵測技術等策略之成果斐然。

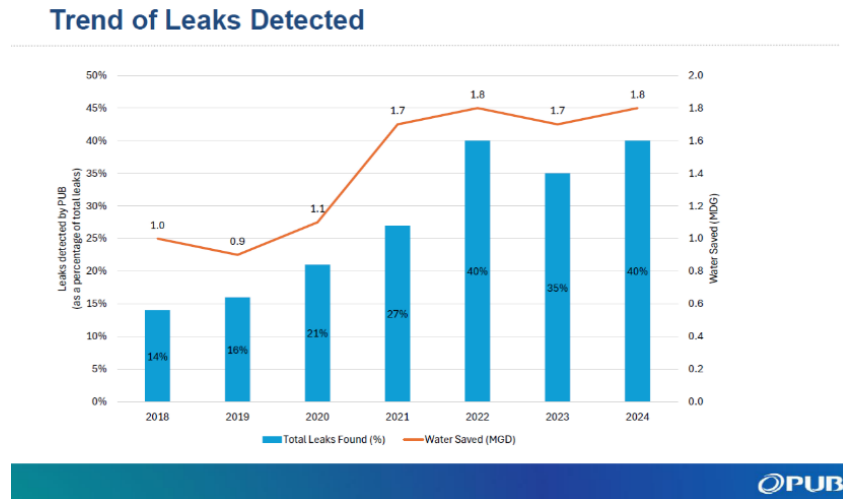


圖 3.11 PUB 之漏水偵測率

C. 管網汰換與維修：

- (A) 良好的管網規劃管線汰換計畫 (Pipeline Renewal Strategy)、設計與施工：確保管徑、閥門位置與備援管線等設計合理，便於供水調度與維修，提高供水穩定性。
- (B) 更新及使用較好的管材 (如聚氨酯塗層球墨鑄鐵 PU-Coating DI 或鋼管 ST Pipe) 與防腐技術，延長管線使用年限。
- (C) 嚴格監督與施工品質管控：確保管線鋪設符合標準，提升整體耐用性
- (D) 預測性維護 (Predictive-Based)：透過數據分析與管線狀況評估決定汰換計畫。
- (E) 基本維修 (Corrective-Based)：當管線出現 2 次或以上漏水，即主動汰換。

D. 立法與施工監管 (Legislation & Compliance)

- (A) 自來水管線基礎設施保護法規：所有在水管周圍的工程須經過 PUB 核准，確保施工不影響供水安全。
- (B) 施工現場監控與巡檢：應用監視攝影機監控輸水幹管工地或 GPS 追蹤高風險施工機具。

(C)施工符合 PUB 規定檢查 (Compliance Verification)：標記與劃定水管與水閥位置，避免誤挖，以及建立地理圍欄與 GPS 監控機具移動，確保施工安全。

PUB 透過多樣化的水源供應、精準計量、智慧水網、管線汰換及立法等管理策略，確保供水系統的穩定性與持續性，目前配水損失率 7.2%，顯示於智慧供水管網管理與主動漏水偵測的成效，值得為本公司師法，並應引以為迎頭趕上之目標。

(2) PUBOne 客服中心運作

PUBOne 是新加坡國家水務局 (PUB) 於 2002 年成立之 24 小時客戶服務中心，專責處理新加坡民眾有關供水、污水處理、排水系統等問題的查詢、報修與回饋，編制共設置 16 人(白天班 14 人、晚班 2 人)分成 3 班 24 小時輪流值機，平均每月進線量約 4,800 通，民眾反映的問題以水壓低無水及水質等問題較多。其中水壓低無水問題，以臨時破管搶修因素居多，甚少因局部管線搶修或計劃性工程施工造成大停水，導致用戶大量集中進線客戶服務中心。

本公司代表團於技術交流過程中，已更進一步了解新加坡 PUBOne 客戶服務中心的運作模式與技術應用，主要是 PUB 的供水系統擁有完善的備援供水管線，供水穩定性高，PUBOne 辦公室緊鄰供水操作及管網維修中心，若客戶服務中心值機員無法於線上立即解決的問題或發生用戶突量集中進線需要協助，供水操作及管網維修中心會立即支援接聽電話或協助派工處理，不僅提升 PUB 水務管理的應變效率，也強化了民眾對於政府水資源管理的信賴 (圖 3.12 代表團與 PUB 客服部門合影留念)。



圖 3.12 代表團與 PUB 客服部門合影留念

(四)2025 年 2 月 19 日 (星期三)

參訪蔡厝港自來水廠 (CCKWW)及技術討論會 2、參訪新加坡 ABC 水計畫之一碧山-宏茂橋公園。

1、參訪蔡厝港淨水廠 (Choa Chu Kang Waterworks, CCKWW)

本公司代表團上午行程安排參訪蔡厝港淨水廠 (CCKWW) (如圖 4.1 蔡厝港自來水廠)，是新加坡最先進的水處理設施之一，負責供應西部地區的大部分飲用水。該廠最初於 1976 年啟用，並於 1981 年進行第二期擴建，過去幾十年間歷經數次升級改造，2008 年採用聚合物膜技術為第一階段升級，已於後續升級中停用，2019 年改用陶瓷膜過濾技術為第二階段升級，2024 年已全面更新，並規劃於 2027 年改造為全自動化智慧水廠，主要為確保其能夠應對新加坡日益增長的用水需求與水質挑戰。

蔡厝港自來水廠 (CCKWW) 是新加坡第二大自來水廠，處理能力為每天 8000 萬加侖 (364MLD)。該工廠建於 1975 年，經過多輪升級改造，以加強處理工藝。最近一次完成的升級是在 2019 年，增加了陶瓷膜過濾、臭氧消毒和生物活性炭 (BAC) 過濾。陶瓷膜處理設施的容量為 40MGD (或 182MLD)，是世界上最大的陶瓷膜處理設備 (圖 4.2 蔡厝港自來水廠 (CCKWW) 內部陶瓷膜過濾設備)，使用預臭氧化的給水，有助於減少膜表面的污垢，並允許更高的膜通量和回收率。臭氧和 BAC 過濾去除處理過的水中有機碳，使其具有生物穩定性。當這些先進的工藝結合在一起時，有助於使工廠為氣候變化預期帶來的更具挑戰性的原水品質做好準備。

該工廠將於 2026 年完工，並改造成最先進的水處理設施，配備最新的水處理技術和智慧功能，以加強其運營、維護、安全和安保。該工廠將採用新的水處理技術和設備進行升級，例如高速澄清器、先進的膜過濾系統和高度自動化的化學製備/加藥系統，以取代 1981 年之前建造的現有設備和建築物。早期升級的陶瓷膜和臭氧生物活性炭過濾系統不會受到改造的影響。



圖 4.1 蔡厝港自來水廠 (CCKWW)



圖 4.2 蔡厝港自來水廠 (CCKWW) 內部陶瓷膜過濾設備

目前，蔡厝港淨水廠的核心技術包括如下：

(1) 陶瓷膜過濾技術 (Ceramic Membrane Filtration)

蔡厝港自來水廠原先所採用的過濾技術也是較傳統的砂濾技術，該廠於 2019 年進行升級，將原有的砂濾技術翻新一半，改為世界領先的陶瓷膜過濾系統，目前新設安裝 12 組 C90 陶瓷膜模組，每組包含 90 支陶瓷膜，2019 年更新陶瓷膜現場(如圖 4.3、圖 4.4)，設計通量：360l/mh - 反沖洗頻率：約 180 分鐘，臭氧前殘餘物：0.5 - 1.2mg/L，平均回收率 > 99%，每日可處理 40MGD(約 182MLD)的水量，陶瓷膜元件規格(如圖 4.5)，2019 年升級陶瓷膜(如圖 4.6)、2019 年升級陶瓷膜剖面(如圖 4.7)，目前本廠是全球最大的陶瓷膜水處理廠之一，另一半則仍使用數年前翻新後採用的聚合物薄膜過濾技術。



圖 4.3 2019 年更新陶瓷膜現場 圖 4.4 2019 年更新陶瓷膜現場照片

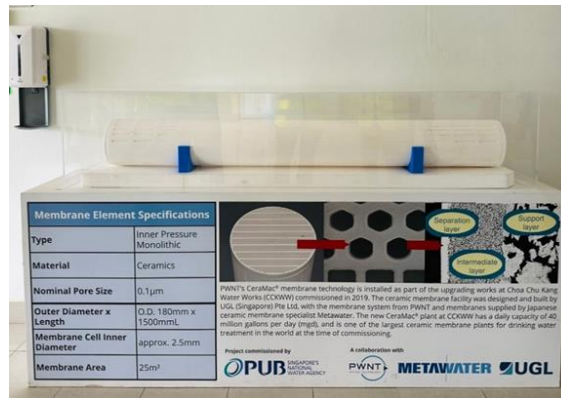


圖 4.5 陶瓷膜元件規格

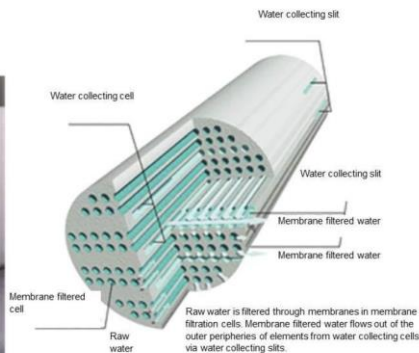


圖 4.6 2019 年升級陶瓷膜

圖 4.7 2019 年升級陶瓷膜剖面

(2) 臭氧氧化處理 (Ozonation)

自來水中藻類代謝物為重要水質議題，其中 2-Methylisoborneol (2-MIB) 及 trans-1,10-dimethyl-trans-9-decalol (Geosmin) 為常見水中臭味的化學物質，在低濃度即可聞到味道，實際上對自來水之適飲性有不小影響。因此良好之分析方法及了解原水系統，提升對 2-MIB 及 Geosmin 的控制即是提升對水中臭味物質之控制。

新加坡地理位置處馬來西亞下游，水資源管理的一大挑戰即是天然有機物污染（如 MIB 與 Geosmin），這些物質會影響水的味道。2019 年升級後的 CCKWW 導入高效臭氧氧化技術，已大幅提高去除效果，並減少對傳統氯消毒的依賴。臭氧產生器數量原設置為 12 組，升級前臭氧產生器(如圖 4.8)，升級後改為 3 個臭氧產生器後現況(如圖 4.9)，後臭氧接觸槽是高級淨水處理場一個非常重要的關鍵，臭氧是目前高科技及高效能用於水處理作用上的氣體，主要針對：氧化剩餘的致癌物質及去除可能殘留的殺蟲劑等，對人體有害污染物質之去除而設計，新加坡也在 2019 年升級後之後臭氧接觸槽示意圖（Post Ozone Contact Tank)(如圖 4.10)。



圖 4.8 升級前臭氧產生器現況 圖 4.9 升級 3 個臭氧產生器後現況

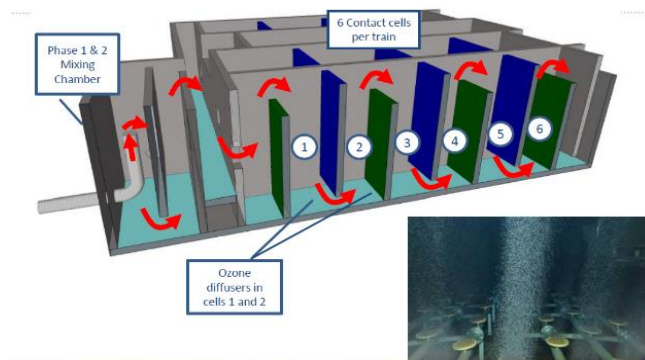


圖 4.10 2019 年升級後之後臭氧接觸槽

(3)生物活性碳（BAC）處理

CCKWW 廠內增加設置 14 座 BAC 濾池，生物活性炭 Biological Activated Carbon tanks (BAC) (如圖 4.11)，主要能有效吸附水中殘留的有機污染物而設計，進一步提升水質穩定性，以確保符合新加坡嚴格的飲用水標準。自處理過的水中接續去除有機物共設置有 14 個 BAC 槽，EBCT：13-20 分鐘，反沖洗頻率：1 次/54 小時。

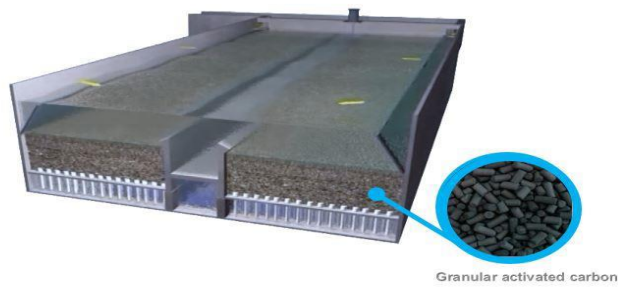


圖 4.11 14 槽生物活性炭 BAC tanks

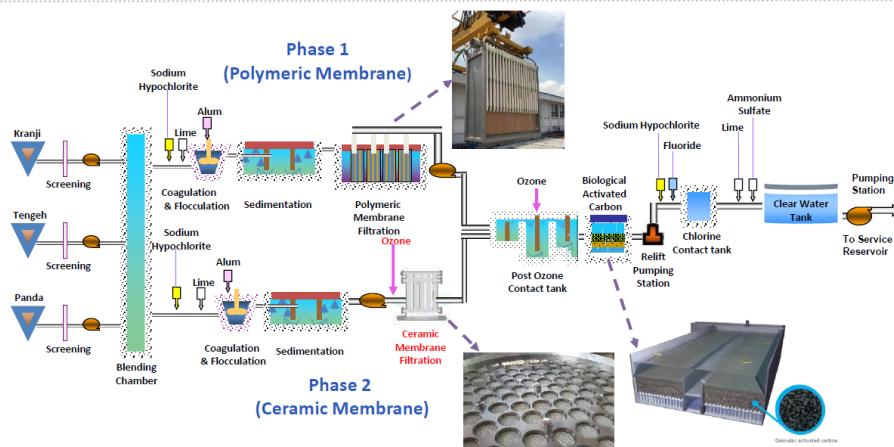


圖 4.12 2019 年升級後淨水場的處理示意圖

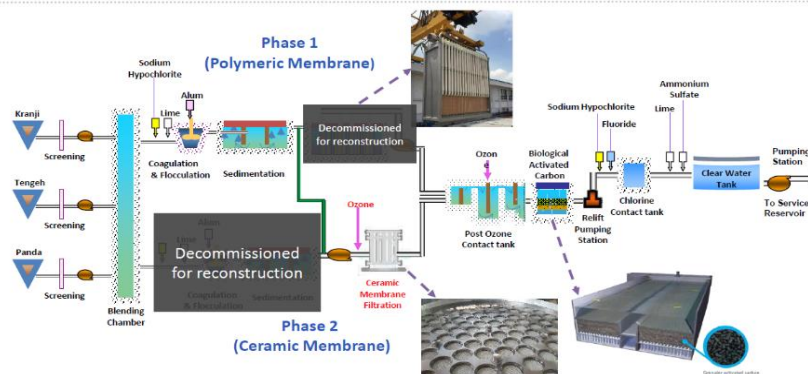


圖 4.13 當前淨水場處理示意圖

2027 年計畫將重建一座智能淨水場(Smart Plant)，一個完全集成和自動化的淨水場，導入新的水處理技術和設備，例如：高速澄清器、先進的膜過濾系統、高度自動化的化學製備及加藥等。新智能淨水場將保留 2019 年升級後的工藝，如陶瓷膜、臭氧和 BAC 等核心單元。

2月19日上午實地參訪 CCKWW 廠過程中，蔡厝港水廠工程師介紹淨水處理設備功能及淨水技術的實際運作(如圖 4.14)，了解到陶瓷膜過濾系統的優勢在於耐用性高，一般使用年限約為 20 年，視水質狀況至少有 15 年，過濾精度高，孔徑僅 0.1 微米，對病原體及懸浮物去除率約為 99.9% 以上，且相比傳統砂濾技術(每小時清洗一次)，陶瓷膜每 3 小時清洗一次能夠降低耗能，對於節能與永續水資源管理極具優勢。



圖 4.14 蔡厝港水廠工程師介紹淨水處理設備功能

本公司代表團於簡報交流會議後，與蔡厝港水廠廠長及工程師技術交流拍照留念(圖 4.15)，隨即被引導前往廠區參觀，過程中與技術人員討論淨水處理過程的監測與控制策略等，發現蔡厝港水廠廠區設備空間規劃寬敞，多數淨水設備設於地下室，管線設置於地面層，且均有預留維修空間，極方便檢視破漏處或機具進入進行維修(如圖 4.16)。



圖 4.15 代表團與蔡厝港水廠廠長及工程師技術交流拍照留念



圖 4.16 蔡厝港水廠廠區設備空間規劃寬敞方便維修

2、參訪碧山-宏茂橋公園 (Bishan-Ang Mo Kio Park)

2月19日下午，本公司代表團參訪碧山-宏茂橋公園(Bishan-Ang Mo Kio Park)，該公園為新加坡 ABC 水計劃 (Active, Beautiful, Clean Waters Programme) 的旗艦項目之一，可以透過(1)河道自然生態設計、(2)土壤生物工程增加公園的生物多樣性、(3)河道根據洪泛平原概念設計、(4)利用河道進行灌溉、人工湖及水資源回收與再利用。四個主要面向分別闡述如下：

(1)河道自然生態設計

河道自然生態設計(圖 4.17)，將城市水資源管理與休閒空間相結合。碧山宏茂橋公園(Bishan Ang Mo Kio Park)的加冷河(Kallang River)之河段是新加坡“ABC 水計劃”的旗艦項目，一項讓人們更加了解沃特斯計劃的戰略舉措；該計劃規劃設計，旨在拉近人們與水的距離，讓民眾更接近水資源，讓他們更好地欣賞並更加珍惜這一珍貴的自然資源。

該項目將原有的混凝土水道改造成一條 3 公里長的自然化河流，使用各種植物和不同的河床材料進行河岸生態工程建設。這條自然化河流的設計基於洪水平原概念，晴天時，在乾燥的天氣裡，水流將被限制集中於河流中間部分的狹窄河道內，下雨時河水上漲，公園用地成為洩洪通道。下雨時，在河中央河水水位會上升，河流旁的公園用地也會上升，河流旁的公園用地會兼作輸送通道，將水流輸送到下游。自 2012 年開放以來，該河段以其平緩的河岸和供公眾接近水源的設計，如踏石，成為新加坡人喜愛的“藍綠”地標。



圖 4.17 碧山-宏茂橋公園河道自然生態設計

(2) 土壤生物工程增加公園的生物多樣性

碧山-宏茂橋公園公園內的加冷河專案是 PUB 和 NParks 的聯合合作，旨在將一條混凝土運河變成一條風景如畫、充滿生機的河流，在 ABC 水域計劃下，引入了植物、岩石等天然材料和土木工程技術的組合，以軟化水道的邊緣，使其具有自然的外觀並防止水土流失，被稱為土壤生物工程，這是新加坡首次探索此類技術。在安裝前，大約有 10 種不同類型的生物工程技術進行了 11 個月的測試。隨著河流歸化，該地區吸引了許多野生動物，如普通藍尾豆娘、普通猩紅蜻蜓、常見的當地新加坡野雞(如圖 4.18)、新加坡澤巨蜥(如圖 4.19)、新加坡白腹秧雞(如圖 4.20) 等生物，現在經常出現在河岸上，足見公園的生物多樣性。



圖 4.18 當地常見的新加坡野雞



圖 4.19 新加坡澤巨蜥



圖 4.20 新加坡白腹秧雞

人行道路旁更發現有豎立宣導魟魚出現告示牌(如圖 4.21)，足見連鮮見之魟魚也出現過，更增添公園的生物多樣性，目前已記載 50 多種魚類、100 多種鳥類，成為都市中重要的生態棲地。這樣的水利設計不僅提升了防洪能力，也為市民提供了休憩與生態環境教育的空間。



圖 4.21 碧山-宏茂橋公園豎立宣導魟魚出沒警示牌

(3)河道根據洪泛平原概念設計

河道本身是根據洪泛平原概念設計的，一種自然化兼具滯洪池之設計，並能與城市中的排水網路相連。公園內部設有雨水收集系統，透過植被過濾與生態池沉澱，回收的水可用於園區灌溉與人工湖補水，展現了水循環利用的永續發展理念。在乾燥的天氣，水流僅限於河中央的一條狹窄的溪流。在暴風雨發生時，相鄰的公園區域將兼作輸送通道，逐漸將雨水輸送

到下游。原本位於該區域的排水渠道是典型的混凝土箱涵，僅具有導水功能，無法發揮生態效益，PUB 在 2011 年將其改造為自然化河道，並設計多個滯洪池，在暴雨期間能夠儲存 40%以上的洪水量，減少市區淹水風險。

(4)利用河道進行灌溉、人工湖及水資源回收與再利用

公園內部設有雨水收集系統，可透過多樣性之自然植被過濾，與生態池沉澱淨化，回收的水可用於園區灌溉與人工湖補水(如圖 4.22)，利用河川湖庫之自淨作用，展現了水循環利用的永續發展理念。



圖 4.22 碧山-宏茂橋公園人工湖及茂密樹林

(五)2025 年 2 月 20 日（星期四）

新創技術交流會及參訪 1、與 Ripple2Wave 新創公司（會談 4 家新創公司）技術交流會 2、參訪永續新加坡展覽館與濱海堤壩。

1、Ripple2Wave 會談 4 家新創公司技術交流會

2025 年 2 月 20 日上午，本公司代表團在 PUB 會議室，除了與 PUB 員工代表會談以外，另與睿克科技公司代表會談數位孿生(Digital Twin) 技術之應用，及 4 家新加坡的新創公司代表，就氣候變遷對水資源管理的影響、AI 及大數據在水務管理中的應用、非傳統水資源開發（如海水淡化、回收水）、智慧管網建置等重要議題，探討如何透過創新技術提升水資源管理效率，確保供水安全，並促進亞洲區域內水管理產業的技術交流與國際合作。

Ripple2Wave 是一家總部位於新加坡的孵化器，是由 Serve

Global Markets 資助的，由少數當地投資者於 2019 年創立，專注於建立新興的水技術之本地投資者，且為專注於培養新興的水技術領導者，以服務全球市場。Ripple2Wave 由新加坡企業發展局資助並得到 PUB 的支援，創造了一個獨特的新加坡企業生態，為新興水技術初創公司創造了一個獨特的生態系統。

(1)數位孿生(Digital Twin) 技術之應用：飲用水處理優化方案

本次新加坡方面出席交流代表為 Mong Hoo Lin 博士，目前擔任睿克科技公司高級顧問，會中簡報針對新加坡在原水水質方面議題，說明原水水質監測的重要性。因原水水質是飲用水處理的基礎，透過對水源地水質的全面監測，可以瞭解污染物種類和濃度，為後續處理程序單元及工法提供依據，監測指標主要為 pH 值、濁度、溶解氧、有機物含量等，監測方法有在線感測器、實驗室分析、遙感等技術。總之原水監測及工法運用，概分為幾項要點闡述如下：

A.關鍵處理程序單元的水質控制：

對混凝、絮凝、過濾、消毒等關鍵環節進行水質控制，保障處理效果，防止污染物超標，例如，根據原水水質調整混凝劑投加量，過濾進一步去除顆粒物，消毒、殺滅病原微生物。

B.飲用水水質保障和餘氯控制：

為確保最終符合國家飲用水水質標準，可以透過在線監測和智慧調控，實現餘氯的精確控制工法：(A)水質標準（需符合國家飲用水標準）、(B)餘氯控制（須保障監測消毒效果，避免異味）、(C)在線監測（須實時監控水質參數）。

C.數碼孿生平臺的構建與應用：

構建數碼孿生平臺，即是藉整合水質數據、設備數據及程序操作參數，以實現水處理過程的虛擬模擬和優化，參見圖 5.1 數碼孿生平臺的構建示意圖。再透過數據分析，預測水質變化趨勢，並提前預警風險。包括四要項：A 數據採集、B 模型構建、C 優化控制、D 模擬分析。



圖 5.1 數碼孿生平臺的構建示意圖

總之，數碼孿生技術為飲用水處理帶來新的機遇，透過即時監測、數據分析和智慧控制，可顯著提高水處理效率和水質保障水準，未來，數碼孿生將在水資源管理中發揮更重要作用如提高水質、優化效率、保障安全，為因應此潮流趨勢，本公司須效法新加坡在這方面著力，並加速迎頭趕上。



圖 5.2 本公司代表團與睿克公司代表林博士針對數位孿生技術運用交流會

(2)工業碳廢棄物碳煙塵 CBE Eco-Solutions 回收技術與應用：

在會議中與新創廠商 CBE Eco-Solutions Pte. Ltd.公司代表會談，Babu Cadium Mohan 是該公司技術長(CTO)，在交流過程中，我們特

別關注低碳技術的發展趨勢。飛灰(ASH) (如圖 5.3)及碳煙塵 (Carbon Soot) (如圖 5.4)均是碳污染物之一環，特別值得一提的是碳煙塵，是全球第二大人為導致的全球變暖的因素，主要來自煤、木材、生物燃料和化石燃料的不完全燃燒或氣化，據統計每日新加坡產生約 200 噸碳煙塵，在地狹人稠的新加坡不算少。



圖 5.3 飛灰(ASH)

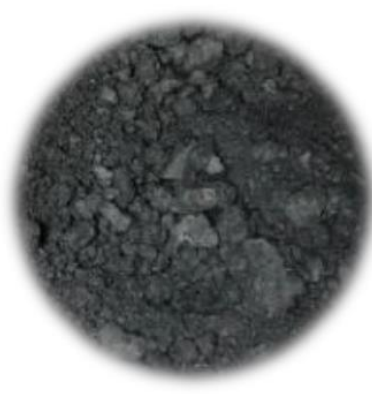


圖 5.4 碳煙塵 (Carbon Soot)

(A)當前處理方法-傳統處理

傳統處理方法有焚燒與填埋兩種方式，焚燒屬高成本，排放溫室氣體，將加重全球變暖；而灰燼填埋則對環境具有毒性影響。以上為企業需支付之基本入門檻費，將增加生產成本。

(B)CBE 碳煙塵回收技術與應用

CBE 碳煙塵回收技術為全球首創碳煙塵回收技術，CBE 透過專利技術將工業碳廢棄物碳煙塵(包括即燃煤電廠、鋼鐵與石化業等排放的碳煙塵)，透過專利技術自碳煙塵中萃取高純度碳黑與五氧化二釩

(Vanadium Pentoxide)(如圖 5.5)，予以轉化為高價值產品，例如：電池電極使用之導電碳材料 (圖 5.6 電池電極用導電碳材料

(Conductive carbon material for battery electrode)、橡膠增強劑、釩氧化物(釩流電池核心材料)、合金鋼添加劑等能源存儲材料予以再利用，更能同時達到減少碳排放與環境污染。專利技術與核心能力有重金屬分離 (使用綠色可生物降解劑)、碳顆粒表面改性 (提高孔隙率)、高純度釩氧化物合成 (>99.9% 純度)、重金屬廢水處理等方式，可謂垃圾變黃金，化腐朽為神奇。



圖 5.5 五氧化二釩



圖 5.6 電池電極用導電碳材料

(C)市場前景與商業模式說明如下：

以目前市場規模，全球可回收碳煙塵市場約 510 萬噸/年，新加坡現有氣化廠擴建，產量已增至約 200 噸/日左右，據了解全球近 5 年至少新增 3 座氣化廠，釩氧化物市場之增長潛力，年均增長率約 16.6%，市場價值達 87 億美元，而先進碳材料市場之增長潛力，年均增長率 6.8%，市場價值達 19 億美元。商業模式可分為三種型態說明如下：a. 產品銷售（下游市場）、b. 廢棄物處理費用（上游企業支付）、c. 碳信用交易（減排獲利）。財務規劃約略說明如下：新加坡回收碳煙塵數量，第一階段商業工廠（50 噸/日）：資本支出 2,000 萬新幣，內部投資回報率（IRR）超過 30%。第二階段擴展至 200 噸/日：預計 2026-2027 年完成，簡報交流會談後，本公司代表團與探討低碳技術之新創公司代表技術長合影留念如(圖 5.7)。

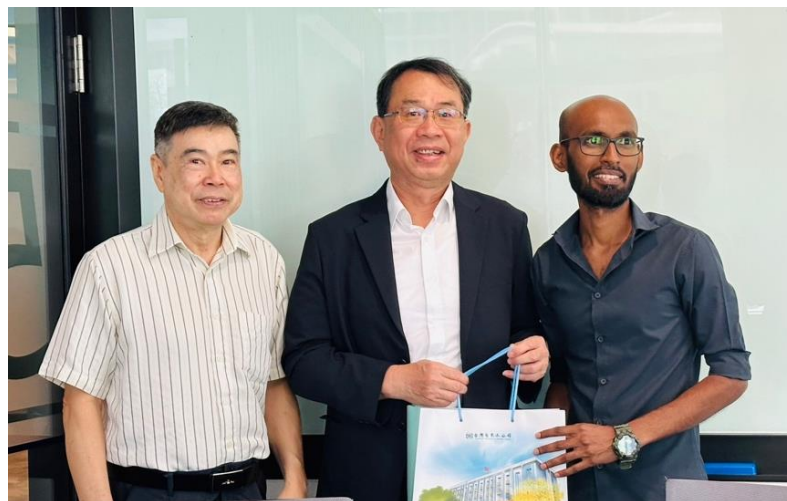


圖 5.7 本公司代表團與探討低碳技術之新創公司代表技術長合影留念

(3)抗氧化中空纖維奈米過濾膜 Anti-oxidation Hollow Fiber

Nanofiltration Membrane (Nanofiltration，簡稱 NF) 技術與應用：

本次出席的 3E Memtech Pte Ltd 公司是一家專注於奈米過濾膜 (NF) 技術的企業，3E 交流代表為傅鋒江總裁 (CEO)，主要闡述該公司致力於提供可靠且節能的過濾產品，目標是透過奈米過濾膜 (NF) 技術創新和高品質發展，並期望拓展全球市場並建立戰略夥伴關係，成為全球創新過濾解決方案的領導者。



圖 5.8 3E 公司中空纖維奈米過濾膜產品(NF Membrane)照片

會談交流中說明有關 3E 公司 NF 膜產品的五大優勢說明，例如：A. 全分子量範圍分離－可適用於多種物質分離應用。B. 耐氧化性－能夠承受高達 2000ppm 的次氯酸鈉。C. 耐溶劑性能－適用於多種溶劑環境。D. 高耐溫性－可在 80°C 環境下運行。E. 抗污染性－提高使用壽命並降低維護需求。與螺旋捲繞 NF 膜產品相比，3E 公司之 HF-NF 膜具有更高的抗污染能力、耐氧化性、更廣的適用範圍，並且在物料分離與水處理應用方面表現更為出色。其具有抗氧化、耐高溫 (80°C)、耐溶劑與抗污染特性，可廣泛應用於污水回收、飲用水淨化、材料分離與海水淡化等面向。相較於傳統螺旋捲繞濾膜(NF 膜)，更能降低能耗、減少濾膜污染與提高水回收率。

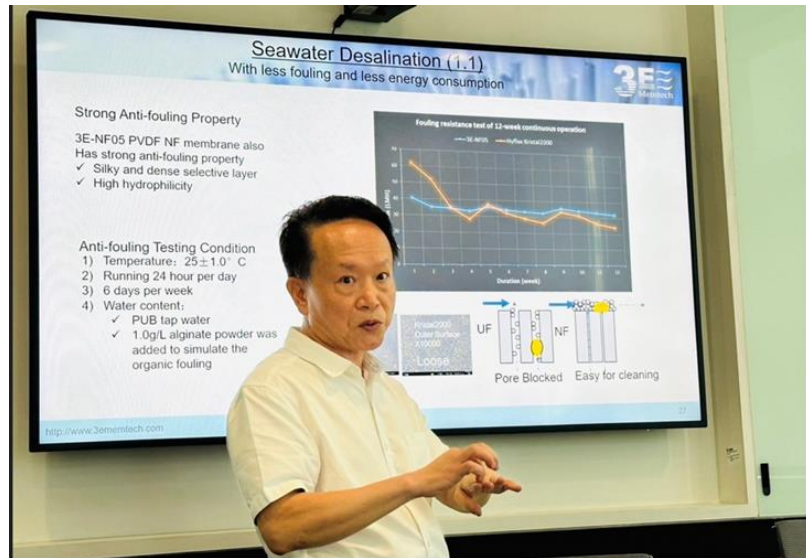


圖 5.9 新創 3E 公司傳總裁分享創新的水處理過濾薄膜技術

3E 公司之 NF 膜的潛在應用，可應用於材料分離，例如植物提取（如中草藥、飲料純化、聚合物製造等）、化妝品與生物燃料的純化及醫學診斷與營養物質分離等方面。用於水處理方面，例如飲用水淨化、廢水回收與零排放（ZLD）、苦鹹水處理與海水淡化預處理及農業灌溉與地下水修復等面向。此外可應用於冷卻塔與工業水循環，例如降低化學藥劑使用、減少補充水需求、減少污水排放等。3E NF 膜的試點與實際應用測試案例說明如下：

- (A) 洗衣廢水回收—使用 3E-NF60 膜，處理能力達 100 m³/天，運行壓力 2.5 bar，鹽截留率約 60%。
- (B) 海水魚場廢水回收—使用 3E-NF20 過濾系統能去除 COD 和重金屬，而保留 NaCl。
- (C) 海水淡化與鹽資源回收—降低淡化成本及高回收率特性，可減少高濃度鹵水排放，降低對海洋環境的影響。

未來發展 3E 公司仍將繼續專注於 NF 膜技術創新，擴展全球市場，並提供高效能的水處理與材料分離解決方案，有機會也許可推廣在本公司高級處理場測試及運用於產水製程。

(4) 密鑰管理系統（SG-KMS）技術：

有關密鑰管理系統（SG-KMS）技術主題部分，本次出席交流新創公司代表為 AYU ARIESTYA 總經理，PT. SANDHIGUNA WIDYA PROTEKSI 公司（以下簡稱 SANDHIGUNA 公司）所在地是位於印尼，談論到在印尼的數據保護與合規性要求，依據《個人數據保護法》（UU PDP No. 27 Tahun

2022) 規定個人數據必須受到適當保護，以防止未經授權的存取、處理和洩露。相關法規條款有第 36 條：數據控制者必須保護個人數據的機密性、第 38 條：數據控制者需確保個人數據免受未經授權的處理及第 46 條：未能保護個人數據可能導致刑事責任，包括數據洩露、未經授權的存取、數據丟失或更改等臚列供參。

會中 SANDHIGUNA 公司代表講述有關數據加密可分為保護靜態數據 (At Rest)、傳輸中的數據 (In Transit) 及使用中的數據 (In Use) 等數據加密重要性，主要目的係為防止未經授權的存取與濫用、確保符合數據保護法律(印尼 UU PDP 法案規定)、提升企業信譽、降低數據洩露的法律風險等，全球資料外洩的總平均成本(如圖 5.10)，自 2018 年至 2024 年有逐漸攀升之趨勢。

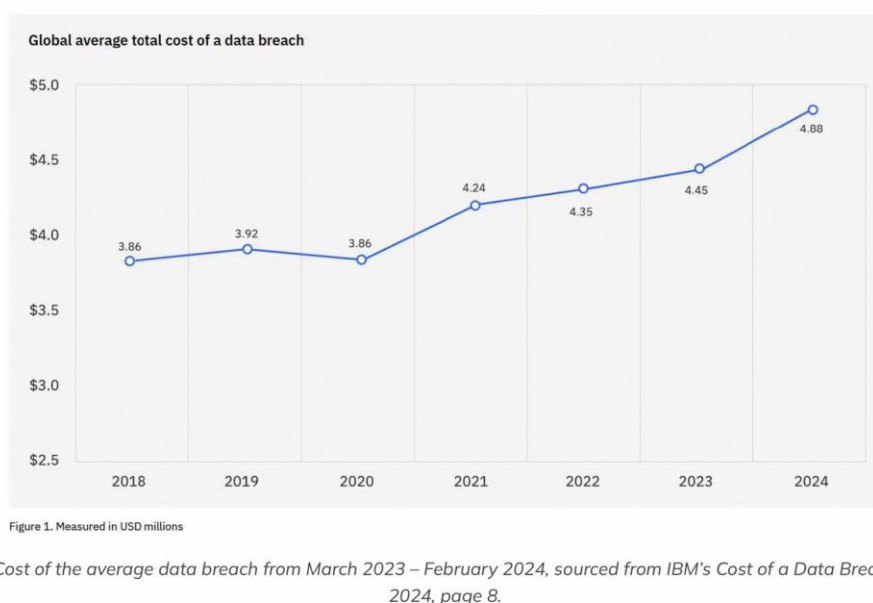


圖 5.10 全球資料外洩的總平均成本

A. 介紹 SG-KMS 與架構

SG-KMS (Sandhiguna Key Management System) 是一種加密和金鑰管理的軟體與可信執行環境 (TEE) 為基礎的硬體(如圖 5.11 可信執行環境 TEE)作為其信任之根本。其管理加密對象，例如金鑰和證書，並執行安全、高效能的加密操作，支援分散式與集中式密鑰管理。SG-KMS 由三個邏輯上分離的組件構建，即 LCEV、CCEV 和審計日誌伺服器，它們分別提供加密服務、金鑰管理服務和稽核日誌服務。

B. SG-KMS 的主要組件

- (A) LCEV (本地加密引擎與密鑰保管庫)：執行高效能的加密運算，透過標準 API (如 RestAPI) 提供加密服務。
- (B) CCEV (中央加密引擎與密鑰保管庫)：負責密鑰的生成、分發、存儲與輪換，使用安全的密鑰交換協議與 LCEV 互動。
- (C) 審計日誌伺服器 (Audit Log Server)：記錄所有加密與密鑰管理操作，透過防篡改機制確保數據完整性。

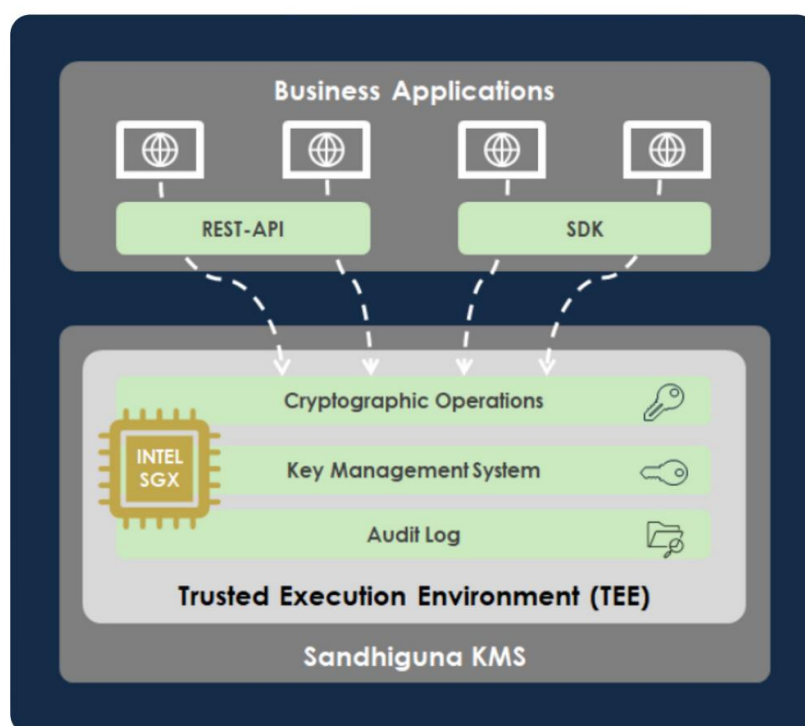


圖 5.11 可信執行環境 TEE 與商業應用之關係示意

SG-KMS 採用密鑰共享技術 (Secret Sharing) 和智能卡備份，確保密鑰的安全恢復與可用性，且 SG-KMS 是以 TEE 技術為基礎硬體，可在商用伺服器上運行，無需昂貴的專用硬體，亦可降低總體擁有成本 (TCO)。

C. SG-KMS 的技術與優勢

為了確保數據安全性，SG-KMS 使用 Intel SGX 技術，在受信任的執行環境 (TEE) 內執行加密與密鑰管理，確保數據在靜態、傳輸和使用過程中的安全性。應用 Intel SGX 技術(如圖 5.12)包括：

- (A)安全內存區 (Secure Enclave)：確保敏感數據在執行時的安全。
- (B)遠端驗證 (Remote Attestation)：證明執行環境的可信度。
- (C)機密計算 (Confidential Computing)：允許數據在受保護環境中處理。
- (D)內存加密 (Memory Encryption)：確保數據存儲與處理的安全性。



圖 5.12 應用 Intel SGX 技術

D. 密鑰管理最佳實踐

- (A)使用最新與安全的加密演算法。
- (B)定期安全審計，檢測並修正漏洞。
- (C)限制密鑰存取權限，確保只有授權人員能夠存取。
- (D)符合行業標準與法規。

SG-KMS 的優勢包括低總擁有成本 (TCO) 相較於硬體安全模組 (HSM)，TEE 技術可降低成本、高可用性架構、標準化 API 與 SDK 等優勢，以利於企業整合與應用開發。此外去中心化加密伺服器可以提高加密運算效能與安全性，SG-KMS 並支持本地加密伺服器 (LCEV) 與中央密鑰管理 (CCEV) 的分散式架構，以提高安全性與效能，會後本公司代表團與新創公司交流密鑰管理系統 (SG-KMS) 技術代表合影留念(如圖 5.13)。



圖 5.13 本公司代表團與新創公司交流密鑰管理系統技術代表合影留念

(5)AI 智能水管理系統技術：

本次出席的新創 Veritas Water 公司，主要闡述該公司致力於提供可信度高之 AI 應用技術，透過智慧水務(IoT 監測平台、AI 漏水檢測技術及 GIS 數據整合)的視覺化管理及數位孿生技術(模擬水處理與管網運行狀況，預測供水風險，產生最佳化資源配置)，提供決策參考，以提高水資源利用率，降低 NRW，新創公司介紹水壓管理系統發展趨勢(如圖 5.14)。



圖 5.14 新創公司介紹水壓管理系統發展趨勢

A. 透過壓力管理減少無收益水(NRW)

VW 於會中指出全球 NRW 的容量估計為每天 3.46 億立方公尺或每年 1,260 億立方公尺。在亞洲，據估計每年因無收益水(NRW) 造成的損失高達 140 億美元，亞洲各國的無收益水百分比之差異供參)如圖 5.15)。

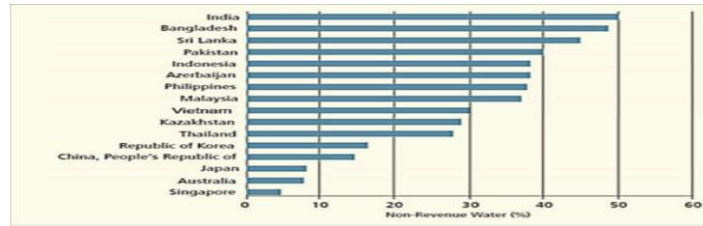


圖 5.15 亞洲無收益水(NRW)%

B. 實施成本高、投資報酬率(ROI)不確定

- (A)技術效率低—現有網路缺乏支援複雜、高階管理解決方案的技術能力，需要昂貴的升級。
- (B)獨特的網路—各分銷網路都是獨特的，因此在沒有大量投資的情況下很難客製化和整合缺乏互通性的 NRW 技術。
- (C)數據管理問題—目前的 NRW 管理系統非常複雜，需要在特定條件下提供準確且全面的數據，這在不斷變化的網路中可能具有挑戰性。
- (D)SENSEIH 是一個操作框架，可以在其中優化網路：a.省錢：投資複雜系統成本的一小部分，可以在儲存時實施的智慧建置。b.賺錢：NRW 節省、改進的壓力設定意味著消費者將使用更多、節省更多，投資者也能賺更多。c.行善 Do Good：提高水資源供應量，減少社區用水壓力，並提高永續性。

C. 運作方式

- (A)分析管網：就像健康檢查一樣，SENSEIH 會調查管線網路，以確定最佳位置的正確感測器，以提供可以自信地採取行動的見解。
- (B)回顧和預測：根據收集到的見解，SENSEIH 透過簡單易懂的報告推薦最佳泵設置，這些報告可以自動化，以獲得更輕鬆的體驗。
- (C)監控和學習：SENSEIH 監控管線網路並不斷從收集的數據中學習，以構建基於事件的場景，從而隨著時間的推移進一步減少 NRW，它學得越多，使用者賺的就越多！

D. AI 驅動的感測器部署工作流程

- (A)AI 驅動的感測器部署工作流程之各步驟說明如下：第 1 步：數據收集和預處理，即收集網路和歷史數據，然後清理和規範數據集。第 2 步：基於 AI 人工智慧的優化，即訓練 ML 模型以進行洩漏和欺詐檢測，並使

用遺傳演算法和 GNNs 優化佈局。第 3 步：感測器部署和校準，即在高衝擊區域安裝感測器，並使用水力模型驗證位置。第 4 步：即時 AI 控制，即 AI 驅動的異常檢測和強化學習優化壓力調整。

(B)獨特的特點說明如下：a.互操作系統：SENSEIH 系統可與最流行品牌的感測器、雲、泵、啟動器等配合使用。使用者可以目前擁有的設備使用所選擇的品牌而不影響性能。b.易於使用的預設：c.易於使用的保存模式/舒適度：適度調整。d.平衡：中間立場。e.最大化的節約裝置 (Max Saver)：在較長時間視窗內進行調整。

(C)壓力管理：a.比例壓力管理。b.基於時間的壓力管理。c.恆壓系統 (Ebara, 格蘭富 (Grundfos))。d.操作員手動調整 (以人力為基礎分析)

(D)主動漏水控制超音波流量測量和管理：a.超音波洩漏檢測儀。b.主動減壓閥 (PRV)、c. AVK 閥門。

(E)管道和資產管理：a.更換老化管道。b.更換更有效率的泵。c.更換 VSD 等電力驅動裝置 (丹佛斯/施耐德)。d.安裝自動恆壓控制泵浦系統 (格蘭富)。e.主動洩漏監測系統 (FIDO、Wi-Plat、智慧球 SMART Ball)，不可避免損失與潛在的可挽回損失 (如圖 5.16)

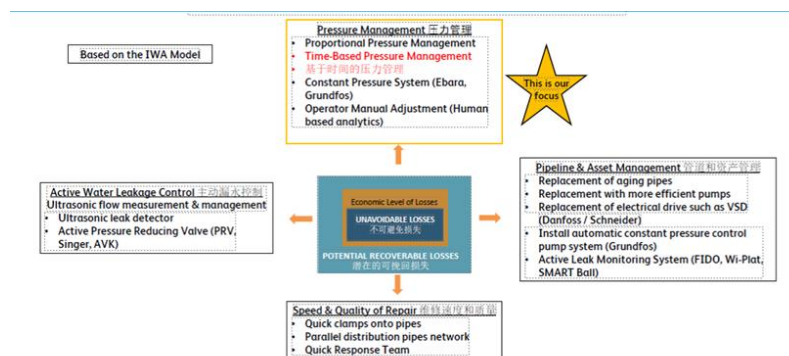


圖 5.16 不可避免損失與潛在的可挽回損失

E. 參考案例分享

一個柬埔寨小鎮 (Cambodia Town)，看到 NRW 收益在幾個月，而不是幾年內，減少年用水量為 135 萬立方米 (3,700CMD)，管網管線長度約 160 公里 (實際更高)，人口約 20,000 人，供水系統壓力約 2.54 bar，無收益水為 26%，漏水率估計為 15%，生產水成本 0.5 美元/3 米，能源價格低於 0.2 美元/千瓦時，固定速度泵，控制功能開啟 / 關閉，2x2 個泵系統，4 條單一

管線連接到主要管線，預期整體泵效率 52%，管網壓力從 0.5 到 3.5bar，取決於距離和海拔，管網混合各種管線材料(圖 5.17)。



圖 5.17 柬埔寨小鎮案例

總而言之：可有效減少 NRW 並增加收入。

本公司代表團與上述這些新創公司代表交流，藉以了解區域內水管理產業的合作機會，特別是在(A)數位孿生(Digital Twin) AI 應用技術之應用、(B)工業碳廢棄物碳煙塵 CBE Eco-Solutions 回收技術、(C)抗氧化中空纖維奈米過濾膜 Anti-oxidation Hollow Fiber Nanofiltration Membrane (NF) 技術與應用、飲用水處理優化方案、(D)密鑰管理系統 (SG-KMS) 技術、(E)AI 智能水管理系統技術等領域，探索未來雙方在 ESG 永續水管理範疇上，可能的技術合作與共同研發的機會。

2、參訪濱海堤壩（Marina Barrage）與永續新加坡展覽館

會後下午，本公司代表團前往濱海堤壩（Marina Barrage）及永續新加坡展覽館參訪，濱海堤壩(如圖 5.18)建於濱海水道的河口，創造了新加坡的第 15 座水庫，也是市中心的首個水庫。濱海流域覆蓋 10,000 公頃，是島上最大、城市化程度最高的集水區。該水庫與另外兩座水庫結合，使新加坡的集水區從占國土面積的 50%提升至三分之二。

濱海堤壩帶來三項主要效益：提供水源供應、防洪功能以及成為休閒場所。此外，參觀者可了解其如何幫助應對極端天氣事件，減少洪水的影響和可能性。這座堤壩是新加坡水資源管理的重要基礎設施之一，也是因應氣候變遷與水資源短缺，為增加多元水源而建設的關鍵防洪及水源貯蓄系統。濱海堤壩係於 2008 年即完工啟用，此前是淡水及海水混和區域，自堤壩啟用後，變為一個淡水湖泊，其核心功能分述如下：

- (1)水資源貯蓄功能：濱海堤壩的建立使濱海灣由原本淡水及海水混和區域，自堤壩啟用後，逐漸被河川及與水稀釋，變成多了一個淡水湖泊，新加坡自此增加了第 15 座水庫，不僅能夠收集雨水回收利用，還能提供 10% 的新加坡民生用水，提高水資源備援能力。
- (2)都市與生態綠能景觀的結合：濱海堤壩不僅是一座水源備援水利工程，場址設有太陽能發電設施，增加綠能及富含教育意義，另有永續新加坡展覽館展示各項綠能及環保建設相關說明。
- (3)防洪調節功能：該堤壩設計能夠調控濱海灣的水位高低，具與水調蓄及防洪功能，亦可防止因強降雨或潮汐變化造成都市的淹水問題。
- (4)具開放式觀光及休憩功能：該堤壩設計自然非動力式涼風迴旋導流造型，使堤壩具寓教於樂功能，成為開放式的觀光及休憩空間，可謂一舉數得之設計。



圖 5.18 濱海堤壩兼具水資源貯蓄、防洪、綠能及觀光功能

永續新加坡展覽館位於濱海堤壩內，三層高的訪客中心介紹新加坡水資源及環境永續的發展，館內有靜態展示及互動式數位模擬，三樓設有一個電動模型，可開動模型介紹整個濱海堤壩的貯蓄與水池操作原理(如圖 5.19)，濱海堤壩的防洪與降低水位排水操作原理(如圖 5.20)，建築物屋頂由草坪覆蓋(如圖 5.21)，除可降低室內溫度更可供遊客野餐、活動，另設置 405 片太陽能板，發電量足供室內照明及所需電力的一半。



圖 5.19 濱海堤壩的貯蓄與水池操作原理



圖 5.20 濱海堤壩的防洪與降低水位排水操作原理



圖 5.21 建築物屋頂由草坪覆蓋

自新加坡宣布獨立以來，永續發展一直是新加坡發展的核心標的，本公司代表團抵達濱海堤壩的永續新加坡展覽館展覽館參觀(如圖 5.22)，發現展覽館內有專業義工導覽，專人操作及解說濱海堤壩影音模型，以利民眾學習多功能堤壩，除展示新加坡最重視的水資源管理外，亦涵蓋許多不同環境議題，例如新加坡面對極端氣候變遷的策略、改善能源的對策、廢棄物再生，以實現零浪費新加坡願景，另有推動新生水技術，確保新加坡能在降雨不足時，維持穩定供水。另一方面發展綠能水管理，在污水處理過程中回收能源，提高整體水管理系統的永續性。迎面解決各項環境挑戰的努力，旨在確保公眾能夠永續享受乾淨和綠色

的生活環境，這次參訪讓我們深刻理解濱海堤壩如何兼具水資源管理、防洪、可再生能源利用與都市發展功能，這種多功能整合發展模式值得台灣在未來水務管理規劃中參考學習應用，本公司代表團於永續新加坡展覽館 2 樓綠地前拍照留念(如圖 5.23)。



圖 5.22 本公司代表團抵達濱海堤壩的永續新加坡展覽館參觀



圖 5.23 本公司代表團於永續新加坡展覽館 2 樓綠地前拍照留念

(六)2025 年 2 月 21 日（星期五）

回程返抵台灣，新加坡(Singapore)時間 11:40 自樟宜(Changi)機場啟程。
搭乘新加坡航空 SQ 878 下午 04:20 抵達臺北(桃園國際機場)。

參、心得與建議

一、加強雙方在水資源永續發展方面的技術交流，積極參考新加坡公用事業局積極開發多元化的水源，以增加開發相互備援的水資源

本次參加由新加坡公用事業局（PUB）與睿克科技公司（ZWEEC）共同舉辦的 Water-Exchange 交流會，加強雙方在水資源永續發展的技術交流，由於新加坡位於下游區段天然水資源缺乏，故水資源早期大多仰賴由馬來西亞進口，為了提供國家足夠的水資源，及降低對單一水源的依賴度，新加坡將水資源提升至國家最高層級及最重要事務經營，PUB 則更積極開發多元化的水源，以利相互備援，提升水資源的安全性，確保供水的穩定及永續發展，未來可積極參考引進新加坡的成功經驗，如濱海堤壩（Marina Barrage）即為新增水資源之實際成功案例，縮短智慧水安全管理發展的時程。

二、推動智慧水安全管理，引進 Auqapro™—AI 智慧生物偵測分析技術

PUB 於交流會中介紹新加坡在水資源所面臨水量及水質等之挑戰，借助 ZWEEC 公司屢獲殊榮的水務技術解決方案，係以本地實踐實施及安全的雲端技術解決方案，針對未來的水質之清潔、安全、可永續的研發產品及技術，例如利用 AI 技術方案之研發產品 Auqapro™以智慧生物之偵測分析分技術-AI 魚類行為監測系統儀即是成功的案例之一，ZWEEC 公司承攬協助 PUB 於各原水抽水站、淨水場、配水池、配水管線建置全新加坡約 70 多處養魚箱，協助監控原水或清水水質，藉偵測魚類(虎斑魚)行為異常樣態，以檢測水中污染物情形，當偵測到魚的行為和水質異常時，Auqapro™警報系統會自動發出警報，異常嚴重性分為褐色、黃色、紅色 3 種顏色警示通知機關。這項技術已廣泛應用於新加坡水庫、取水口各原水抽水站、淨水場、配水池配水管線的水，大幅提升民眾用水之安全性及穩定性，值得本公司效法，建議可引進類此產品技術以提升本公司各用戶之用水安全性及穩定性。

三、推動智慧水安全管理，引進 Algapro™—AI 浮游生物辨識監測技術

PUB 於交流會中介紹新加坡在水資源所面臨水質之挑戰，借助 ZWEEC 公司先進的水務技術解決方案，其中提及 Algapro™—AI 浮游生物辨識監測系統，係以 AI 對浮游植物識別及計數影像辨識技術，浮游

藻類是水生態系統中主要初級生產者，特點為種類多、數量大、繁殖快，其數量及分佈對生態系統功能有決定性影響，針對水體中的藻類進行識別計數，新加坡於水生態監測範疇可謂執牛耳之地位，其水生態藻類智慧監測系統儀，亦相當成熟，經參觀實驗室內水生態藻類智慧監測系統儀內裝、檢測樣品盤及顯微鏡等設備，內含 15 組樣品自動批量檢測，約 4 小時可完成檢測，如此迅速地獲得精確到屬種的藻密度分佈數據，並具備原始樣品直接檢測能力，相當節省前處理步驟及時間。此外該設備包括多微流道顯微觀測卡匣、自動掃描高倍顯微圖像、600 萬像素高感光靈敏度相機等器材，融合深度神經網路技術與專家知識全新演算法，能即時智慧識別，識別速度達 50FPS，其識別可信度更超越所有市面現有產品。自主智慧財產權，專利保護，亦為業內首創，以深度神經網路技術為基礎的全自動藻類識別系統，其無人值守快速全自動批量檢測浮游藻樣品，目前亦為國際領先技術之一。

四、參訪 PUB 的水質實驗室管理，導入 AI 技術及設備，提高水質檢(監)測的速度、精準度及以科技解決人力不足方法

本公司代表團於進行 Water-Exchange 交流會後，隨即參訪 PUB 的水質實驗室，依各不同類項目分設實驗室，包括水生生物實驗室、無機化學與放射性物質實驗室、細菌與寄生蟲實驗室、有機化學實驗室…等，了解新加坡在水質實驗及監測技術的發展進程，實遠超過台灣的規模。緊接著 PUB 代表成員逐一帶領觀摩了 AI 水質分析系統實驗室的實際運作，透過大數據與機器學習技術，以預測及監測水質持續變化趨勢，進一步即時優化新加坡的水處理決策。而據 PUB 水質部門的員工曾提到 PUB 在提升水質檢測及監測方面投入很多經費，部分是研發領先各國環保法規尚未規範之未來污染物檢測，已先行投注心血研發分析處理技術，以防範於未然，此外因人力逐漸精簡之趨勢，為解決工作量增大問題，更藉著導入 AI 技術及設備，提高水質檢(監)測的速度與精準度，同時大大節省人力，整樓層水質實驗室的機器設備比人多數十倍，足可為台灣各界參考學習對象。

五、參訪濱海灣花園(Gardens by the Bay)，高空花園具備美觀之外，亦有儲存雨水及太陽能發電功能，展現新加坡在水資源循環利用與永續城市發展上的創新思維。

本代表團參觀新加坡著名的濱海灣花園，並藉機深入了解當地的高空花園，該園區不僅是觀光勝地，亦是城市水資源管理的重要示範點，不僅帶來觀光財，更可振興國內園藝花卉展示藝術經濟。據觀察花園內設有雨水回收系統，能夠收集與過濾雨水後，再利用於園區澆灌與景觀水體補充，此為節約水資源之典範。新加坡寸土寸金，故花園特色亦採充分運用空間模式思考，又為克服雨季帶來不便，特意創造溫室花園模式，亦屬一大觀光創意，為新加坡帶來不少旅遊商機及豐厚稅捐收入，足為台灣用地狹隘城市之師法對象。此外，園區內的超級樹(Supertrees)除具備美觀之外，亦有儲存雨水及太陽能發電功能，這些設計理念及措施展現了新加坡在水資源循環利用與永續城市發展上的創新思維，足可為台灣之效法對象。

六、參訪吉寶濱海東海水淡化廠(KMEDP)發展水資源多樣化策略，確保供水穩定

吉寶濱海東海水淡化廠是新加坡第四座海水淡化廠，該廠納入雨水回收管理系統設計，是新加坡第一個大型雙模式(Dual-Mode)海水淡化廠，可根據潮濕或乾燥的天氣條件，靈活處理處理濱海灣蓄水池的淡水或淡化海水，以增加水源確保新加坡的供水穩定，運用先進的水處理技術，包括超濾(UF)及逆滲透(RO)雙層過濾、紫外線消毒、數位孿生等技術，優化水資源利用，並降低能源消耗。KMEDP專案採用設計、建造、擁有和營運模式，日生產淡飲用水3,000萬加侖。吉寶基礎設施部門與公用事業局簽署為期25年的供水協議，負責設計、建造、擁有和營運KMEDP，並向公用事業局供應新鮮飲用水。其透過智慧水管理系統提升運營效率，並強調其地下化設計，使地面可作為綠地公園，與城市景觀融合，地面層為海水淡化廠地面永續發展展示館，該海淡廠將綠色基礎建設與公共空間整合，提升水處理設施的社會價值，引入水資源管理系統，促進永續發展，台灣目前尚無類此設計海淡廠，足可為台灣之效法對象。

七、參訪蔡厝港自來水廠（CCKWW）強化水處理技術，發展水資源多元化策略，確保供水穩定

新加坡第二大自來水廠蔡厝港自來水廠（CCKWW），處理能力為每天 8000 萬加侖（364MLD），廠建於 1975 年，最近一次完成的升級是在 2019 年，增加了陶瓷膜過濾、臭氧消毒和生物活性炭(BAC)過濾等先進高級處理程序，目前是世界上最大的陶瓷膜處理設備，使用預臭氧氧化的給水，有助於減少膜表面的污垢，並允許更高的膜通量和回收率，利於降低維護費及處理水量穩定。尤其是臭氧和 BAC 過濾去除處理過的水中有機碳，使其具有生物穩定性，提升淨水處理之品質。憑藉先進的處理程序結合，有助於使該廠易於適應氣候變化帶來的更具挑戰性的原水。2024 年已全面更新，並規劃於 2027 年改造為全自動化智慧水廠，主要為確保其能夠應對新加坡日益增長的用水需求與水質挑戰，為加強其運營、維護、安全和安全保證，該廠將採用新的水處理技術和設備進行升級，例如高速澄清器、先進的膜過濾系統和高度自動化的化學製備/加藥系統，以取代 1981 年以前建造的現有設備和建築物，已達全自動化智慧水廠目標，此種計劃目標及執行力，足為我輩師法。

八、參訪碧山-宏茂橋公園(Bishan-Ang Mo Kio Park)水利工程多功能設計策略，融合自然生態、滯洪池、雨水回收、排水相連設計等充分展現水循環永續發展理念

碧山-宏茂橋公園(Bishan-Ang Mo Kio Park)為新加坡 ABC 水計劃（Active, Beautiful, Clean Waters Program）的旗艦項目之一，將原有的混凝土水道改造成一條 3 公里長的自然化河流，發展水利工程設施多功能設計策略，如河道自然生態設計、土壤生物工程增加公園的生物多樣性、河道根據洪泛平原概念設計、利用河道雨水收集系統，進行灌溉、人工湖及水資源回收再利用等四個主要功能設計，在乾燥的天氣裡，水流將被限制集中於河流中間部分的狹窄河道內，下雨時河水上漲，公園用地成為洩洪通道，並能與城市中的排水網路相連，公園內部設有雨水收集系統，可透過多樣性之自然植被過濾，與生態池沉澱淨化，回收的水可用於園區灌溉與人工湖補水，利用河川湖庫之自淨作用，展現水循環利用的永續發展理念，堪為台灣師法。

九、引進 AI 數位孿生 (Digital Twin) 技術監測分析應用，推動智慧水安全管理

本次在會議中與新創廠商睿克公司在交流過程中，深刻體會到新加坡在 AI 數位孿生技術監測分析技術應用在智慧水安全管理方面的實際投入經費及為解決人力短缺問題，研發 AI 技術應用十分努力。藉著導入數位孿生技術模擬水處理流程，並結合應用 AI 進行監測及數據分析等策略，提高水質監測之即時性與精確度，不僅確保水資源自供應端到用戶端的全流程水質安全，亦能藉監測即時回饋資料提供有效解決方案，及提高處理水質污染事件的效率。本公司目前使用中的水質預警系統(ADTS)及持續推動中的水安全計畫，未來可積極參考新加坡的技術發展進程，或與國際水管理技術公司合作，引進新加坡的成功經驗，建立更完善的水安全計畫。

十、發展工業碳廢棄物碳煙塵(CBE) 回收處理技術，確保供水穩定

在會議中與新創廠商 CBE 公司在交流過程中，本代表團特別關注低碳技術的發展趨勢，特別值得一提的是碳煙塵 (Carbon Soot) 回收技術與應用，碳煙塵是全球第二大人為導致的全球變暖的因素，主要來自煤、木材、生物燃料和化石燃料的不完全燃燒或氣化，據統計每日新加坡產生約 200 噸碳煙塵，在地狹人稠的新加坡不算少，CBE 公司新創技術為全球首創碳煙塵回收技術，透過專利技術自工業碳廢棄物碳煙塵中萃取高純度碳黑與五氧化二釩(Vanadium Pentoxide)，轉化為高價值產品，如電池電極使用之導電碳材料、釩氧化物(釩流電池核心材料)、合金鋼添加劑等能源儲存材料予以再利用，更能同時達到減少碳排放與環境污染，可謂垃圾變黃金，是一項化腐朽為神奇之寶貴技術，非常值得學習，有機會可引進或合作多角化經營。

十一、參訪濱海堤壩與永續新加坡展覽館發展多元水資源策略，強化水源備援、防洪功能，場址設有太陽能發電設施，永續綠能技術，確保供水穩定

本公司代表團參訪濱海堤壩 (Marina Barrage) 及永續新加坡展覽館，濱海堤壩建於濱海水道的河口，創造了新加坡的第 15 座水庫，也是市中心首個水庫，濱海流域覆蓋 10,000 公頃，該水庫與另外兩座

水庫結合，使新加坡的集水區從占國土面積的 50%提升至三分之二。濱海堤壩帶來三項主要效益：提供水源備源供應、調控濱海灣的水位高低之防洪功能及觀光休閒場所。堤壩是水資源管理的重要基礎設施之一，也是因應氣候變遷與水資源短缺之水源貯蓄系統，及為增加多元水源而建設的關鍵防洪設施。濱海堤壩係於 2008 年級完工啟用，自淡水及海水混和區域，變為一個淡水湖泊，不僅能夠收集雨水回收受利用，還能提供 10%的新加坡民生用水，提高水資源備援能力，此外都市與生態綠能景觀的結合，及增加綠能設施極富教育意義。另有永續新加坡展覽館展示各項綠能及環保資源回收建設相關說明，展覽館設計自然非動力式涼風迴旋導流造型，使堤壩及展覽館具寓教於樂之教育功能，成為開放式的觀光及休憩空間，可謂一舉數得之設計，非常值得台灣學習效法。

十二、引進先進水處理技術，發展水資源多元化策略，確保高品質水質及水量永續穩定

新加坡沒有天然湖泊，新加坡水資源嚴重匱乏，新加坡人均水資源占有量居世界倒數第二位，城市日常生活和工業生產用水主要靠收集存儲雨水及從鄰國進口淡水，天然水資源有限，透過水庫、人工湖收集雨水、海水淡化廠、新生水及進口水等多元水源策略，降低對單一水源的依賴性，有效確保供水穩定性。台灣水資源豐富，河川短而急，特性略有不同，在極端氣候影響下仍有旱澇不均的問題，同樣有多水源備援的需求，新加坡建立的水資源多元化策略是成功經驗，足為台灣效法，尤其是新生水廠及海水淡化廠之水處理技術發展，可作為未來提升台灣供水韌性的榜樣，降低依賴水庫及地下水，以確保水資源水質及水量能永續穩定經營。

肆、參考文獻

1. 經濟部水利署全球資訊網。
2. 新加坡國家水務局 PUB 網站及會議資料。
3. 新加坡濱海灣花園、碧山-宏茂橋公園、濱海堤壩與永續新加坡展覽館等單位網站。
4. 吉寶濱海東海水淡化廠（KMEDP）簡介。
5. 蔡厝港淨水廠會議資料。
6. Ripple2Wave 四家新創公司會議資料。
7. 睿克新創公司會議資料。