

## 國際智慧水資源管理政策與新興科技採用趨勢

薛孝亭、洪立萍

### 一、前言

由於人口成長、全球暖化及各種環境污染的影響，世界各地共同面臨日益嚴重的洪災、乾旱及水污染等威脅與挑戰。根據聯合國 2021 年世界水資源發展報告(The United Nations World Water Development Report 2021)，過去 40 年中，全球淡水使用量大幅增加(每年約以 1%的速度成長)，且估計到 2030 年時，全球水資源將面臨 40%的短缺；估計全球有 80%的工業和民生廢水未經處理即排放到環境中，對人類健康和生態系統造成不利影響；過去十年間，全球洪水和極端降雨事件增加了 50% 以上，預計氣候變遷將進一步增加洪水和乾旱的頻率和嚴重程度。

另外，2021 年聯合國發布了全球水資源壓力進展(Progress on Level of Water Stress)報告，文中表示儘管 2018 年全球水資源壓力(water stress)仍屬於無壓力狀態，但各國之水資源壓力差別相當大(主要國家水資源壓力請參閱圖 1)，並且有超過 4 成國家面臨著不同嚴重程度的水資源壓力，其中以色列、韓國、新加坡等國面臨高度水資源壓力，日本、美國等國則面臨輕度水資源壓力。提高用水效率、減少抽取的淡水量、增加可再生的水資源等，為降低水資源壓力之關鍵。

為了因應前述水資源挑戰，各國積極尋找先進且對環境友善的解決方案，並且透過新興科技，例如人工智慧、大數據等科技，發展智慧水資源管理(Smart Water Management, SWM)系統，以提高水資源的使用效率與再利用效率，減少對環境的影響，進而滿足日益增加的用水需求，並且保障人民健康與安全。本報告聚焦於美國、以色列、新加坡、韓國、日本等主要國家於智慧水資源管理之政策動態與重要成果介紹，包含數據整合平台與數位工具、數位水資源計畫以及未來

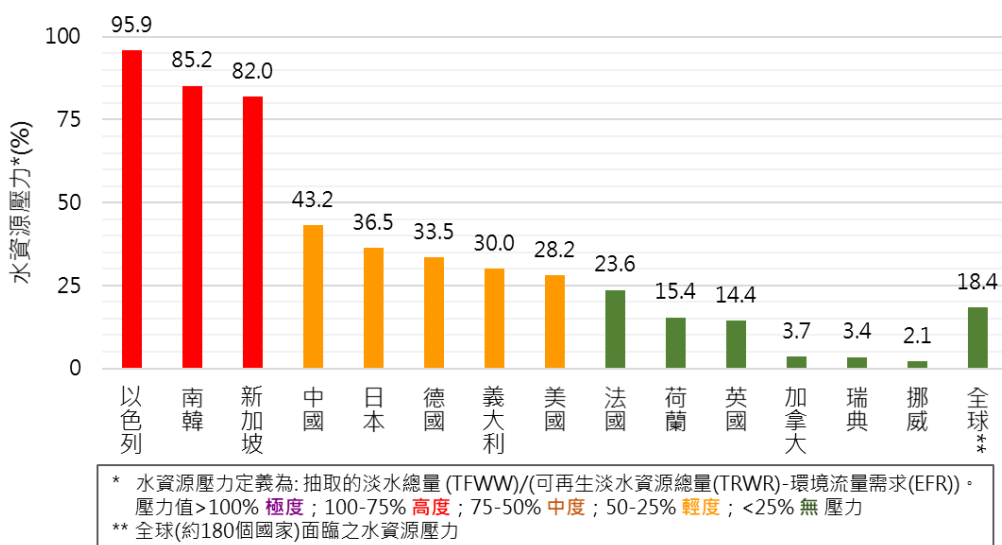


圖 1. 全球主要國家面臨之水資源壓力(2018 年)

資料來源：聯合國報告，科技發展觀測平台整理

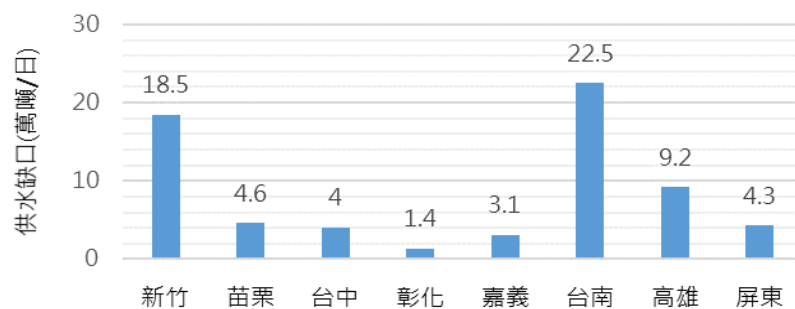
規劃等。在技術發展觀測方面，則提出智慧水資源管理之關鍵數位科技(如大數據、雲端儲存與計算、人工智慧、數位孿生)以及創新水處理科技(如奈米科技、光催化技術、微藻廢水處理、新興海水淡化技術)等技術主題之發展觀測，以描述目前全球水資源管理技術總體發展與應用概況。

## 二、臺灣水資源現況與挑戰

臺灣年雨量豐沛(平均年雨量約 2500 毫米)，但由於臺灣地狹人稠，且降雨時間與空間分布極為不均，導致每人每年可用水量僅約為世界平均值的 1/5。另外，地球升溫導致全球氣候變遷，極端氣候事件發生機率將更加頻繁。2021 年臺灣即爆發大規模乾旱缺水，導致全國各地皆實施不同程度的減壓供水等限水措施。另外，水利署研究估計，臺灣在 2036 年到 2065 年間，降雨將呈現「豐越豐、枯越枯」趨勢，豐水期(5-10 月)雨量增加 3%~9%，枯水期(11 月到隔年 4 月)減少 6%~12%，水資源管理將面臨更為嚴峻的挑戰。面對極端氣候日益頻繁以及旱澇交替的劇烈變化，嚴重影響我國民生與經濟。

臺灣的供水管線亦面臨嚴重的漏水問題。根據臺灣自來水公司之資料，101 年之漏水率約為 20%。儘管近年來台水已積極投入改善漏水率，110 年管線漏水率已降低至 14%，但破漏管線每年仍流失約 4.85 億立方公尺的自來水資源，漏水量足以提供全台超過 2 個月的生活用水，顯示漏水率仍有大幅改善之空間。

隨著臺灣都市與工業發展，預估用水需求將持續增加，尤其是科技產業。然而根據水利署 110 年臺灣各區水資源經理基本計畫估計，現有供水能力(包含民生用水與工業用水)無法因應 2036 年社會經濟發展用水的成長，且預估每日將產生約 70 萬噸的供水缺口。其中新竹縣市、台南市以及台中市等縣市，同時也是國內三大科學園區之所在地，將面臨嚴重的供水缺口。(各縣市之供水缺口請參閱圖 2)。因此，如何提高水處理效率、減少水資源浪費，以滿足未來用水需求，為須重視之議題。



**圖 2. 2036 年國內每日供水缺口估計**

資料來源：水利署，科技發展觀測平台整理

另外，水資源汙染亦是臺灣水資源面臨之重要危機。根據環保署資料顯示，2021 年臺灣有接近 45% 的重要河川為中度與重度汙染，為過去五年以來新高。另外，在全國主要的 20 座水庫中，2018 年僅有 4 座有優養化現象，然而在 2021 年卻有 8 座水庫面臨著優養化。前述數據顯示，在過去數年間，全臺灣水源的汙染隱約有更加嚴重之趨勢。水汙染不但會影響環境生態、民眾健康，自來水廠亦需要耗費更大的心力來淨化水質，並且可能縮短水處理設備之壽命、降低水處理效率。

綜上所述，氣候變遷、用水需求成長、供水管線漏水，以及水資源污染等，為目前國內面臨之主要水資源威脅。政府近年來在水資源經營方面推行了諸多措施，包括推動節水三法、進行自來水減漏、串接用水管路等措施，並且加強科技造水布局，如增設再生水及海水淡化等設備，以開源節流，提升供水韌性，並且減少水污染。以下章節將針對各國在面臨水資源挑戰時所發展之科技解決方案，如數據整合平台與數位工具，以作為我國政府在規劃水資源科技投入時的參考。

### 三、國際政策動態

各國政府與水務單位建立了不同形式的資料庫與數位工具，並且積極發展與採用人工智慧、大數據、雲端儲存與計算，以及數位孿生等新興數位科技，應用於水資源管理。以下將分別簡要介紹美國、以色列、日本、韓國、新加坡等國之重要資料庫與數位工具、重要計畫與成果，以及未來規劃等。

#### (一) 美國

美國幅員遼闊，主要水資源包括河流、溪流、湖泊、水庫、泉水和地下水等。水資源管理主要決策與管理單位包括美國國家環境保護局(EPA)、各州/地方與水資源相關部門及社區團體等單位。

##### 1. 數據整合平台與數位工具

美國環境保護署(EPA)過去建置多項數據整合平台與數位工具，包括：評估每日最大總負荷量追蹤與應用系統(ATTAINS)，以收集與管理各地提供的數據與報告，並作為未來減少水污染之決策參考；海灘污染監測系統 BEACON(Beach Advisory and Closing Online Notification)，以監測沿海與休閒水域之污染情況；CDM(Camp Dresser and McKee, 工程與建築公司)合作開發雨水管理模型(SWMM)系統，以支持地方、州和國家進行雨水管理。另外美國地質調查局(USGS)則建立了國家水文資料庫(NHD)，蒐集全美地表水的水文與地理空間數據。

## 2. 智慧水資源管理重要計畫與成果

### (1) 堪薩斯智慧下水道計畫(Smart Sewer Program)

2010 年，堪薩斯城啟動 25 年期的智慧下水道計畫(Kansas City's Overflow Control Program, OCP)，預計投入數十億美元，改善城市廢水處理，並且對下水道進行現代化和智慧化更新，包括建造新的下水道基礎設施；提升汙水處理量能；設置綠色基礎設施，以貼近自然的方式管理雨水；採用數據驅動的解決方案(如智慧流量計)和創新溢流控制技術。同時堪薩斯城與 Xylem 等廠商合作，結合既有的資產管理系統，建立智慧下水道網絡，以即時監控下水道，並可針對即將發生的重大天氣事件進行預測，以提早做準備減少溢流發生。同時，智慧下水道網絡還安裝各項監視設備，以確定下水道系統的運作狀況。

## 3. 未來規劃

### (1) 水資源數據整合

美國在水資源數據整合面臨挑戰，大量的水資源數據(如各州的水質檢測數據)，多由不同單位所蒐集、管理與維護。除了數據蒐集沒有統一標準外，資料亦分散於不同的資料庫中，且各資料庫分類、單位與結構亦互不相容。目前 EPA 正致力於制定水質監測框架(The Water Quality Framework)，以期整合現有數據與資訊系統，進而提供更完整且清晰的水質資訊。

### (2) 基礎設施現代化

美國水務基礎設施已逐漸老化，且難以因應氣候變遷、環境污染等因素所導致的水資源壓力。基礎設施現代化為政府與水務單位關注的重點。美國政府近期通過了飲用水和污水基礎設施法案(Drinking Water and Wastewater Infrastructure Act)，該法案規劃在 2021 年至 2026 年期間投入 350 億美元，全面檢修更換鉛水管、為農村與偏遠地區建設供水設施、投入先進淨水技術研究、建立水資源資訊共享系統，以及提升供水系統的災害抵禦能力等。

## (二) 韓國

韓國主要以水壩、河流和地下水為主要水資源。水資源管理主要決策與管理單位有韓國環境部(MoE)與 K-water。其中 MoE 國家水資源管理之主管機構，負責地方水廠管理、污水排放政策、跨區域供水等。K-water 則負責全國區域及地方的水資源開發與水處理系統建置，受環境部管轄。

### 1. 水資源數據整合平台與數位工具

K-water 開發之智慧水資源管理工具包含以下三類，分別為：(1)水資源管理預測/營運系統：K-water 利用其過去數十年來累積的水資源管理技術與經驗，結合了先進的 ICT 技術，開發出決策支援工具-K-water Hydro 智慧工具包(K-water Hydro Intelligent Toolkit)，包括即時水文數據採集和處理系統(RHDAPS)、降雨預報系統(PFS)、洪水分析系統(FAS)、水庫供水系統(RWSS)等工具。(2)水資源維護與安全管理：K-water 地震監測系統(KEMS)與水資源安全管理系統(WRSMS)。(3)流域/河流/水庫水質管理：以超級電腦運算為基礎的綜合水質預測系統-SURIAN(Super-computer-based River Analysis Network)。

### 2. 智慧水資源管理重要計畫與成果

#### (1) 瑞山智慧水管理

瑞山市於 2016 年引入由 K-water 管理的智慧水管理(SWM)系統以因應長期乾旱，並且減少漏水。該計畫在供水管網安裝智慧水表，並將數據與中央監控系統連接以蒐集即時的水流量、水壓等數據，有助於發現可能的漏水點。試驗結果顯示每年可減少約 19 萬立方公尺的漏水。

#### (2) 坡州智慧水城

坡州市在 2014 年實施智慧水城(SWC, Smart Water City)試驗計畫。K-water 於該計畫中建立了一個智慧水管理系統，將 ICT 技術整合至自來水供應流程，對水量與水質進行科學化管理。同時，市民可以透過水質公告或智慧手機應用程式

即時檢查使用的水質。該計畫改善了當地自來水水質，全市自來水直接飲用率亦大幅提高(1%提高到 36.3%)，自來水的滿意度也顯著提升(從 80.7%提高到 93.8%)。

### 3. 未來規劃

#### (1) 碳中和智慧水管理 (Carbon-Neutral Smart Water Management)

為了於 2050 年實現碳中和，韓國政府計劃在污水處理廠採用以人工智慧為基礎的自動化水處理系統，以減少碳排放、簡化營運成本並提高安全性。預計在未來 5 年內將全國多座淨水廠、污水道以及污水處理廠實現智慧化。

### (三) 新加坡

新加坡儘管年雨量豐沛，但人口稠密且儲水面積有限，導致淡水資源嚴重缺乏。目前主要淡水來源包括：水庫、從馬來西亞進口的水、NEWater 以及海水淡化。其中 NEWater 為新加坡研發的高純度再生水技術，主要用途為工業(如晶圓廠)與空調用水，以及間接飲用水。新加坡政府主要的水資源管理及執行單位有永續發展與環境部 (MSE)、公用事業委員會 (PUB)。PUB 為 MSE 管轄的委員會，負責新加坡水資源的處理、供給與安全等。

#### 1. 數據整合平台與數位工具

PUB 在排水系統和洪水監測、飲用水水質監測以及降雨監測等方面建立了多項數位工具與平台。在排水系統和洪水監測方面，PUB 在排水道和運河中安裝感測器，可即時監測水位，並可向民眾發送水質與山洪警報等資訊。在飲用水水質監測方面，PUB 開發了 WaterWise 智慧水網系統，可即時監測供水網的水壓、水質、pH 值、電導率及濁度。在降雨監測和預報方面，PUB 結合雨量計、閉路電視等監測系統以及人工智慧技術，開發降雨預測系統，並且與相關業者(如 Furuno)合作開發雷達系統，能結合氣象局的降雨預報資料，提供強降雨預測，以提高城市洪水管理效率。

## 2. 智慧水資源管理重要計畫與成果

### (1) 水庫水質監測

PUB 與學研單位/公司合作(如 ST Engineering、新加坡國立大學)，探索多種物聯網技術，以對水庫進行監測，例如：利用機器人天鵝監測水庫水質；部署配備遙測系統的無人機，以對水濁度和藻類濃度進分析。

### (2) 水回收廠數位孿生

PUB 與 Jacobs 集團合作，為樟宜水回收廠建立數位孿生系統，該系統可即時監測廠內的設備，並可透過機器學習不斷調整與優化設備的處理效率，以改善水質並減少能源和化學品的消耗。

## 3. 未來規劃

### (1) 智慧 PUB 路線圖 (Smart PUB Roadmap)

為了解決水資源短缺、運營成本上升等挑戰，PUB 預計將整個供水管網數位化，以實現更智慧化的水資源管理，並且提出智慧 PUB 路線圖，主要目標包括：智慧排水網：綜合性水文監測、預測性排水和洪水管理等；智慧水處理廠：利用數據優化營運和決策支持、自主營運與安全監控；智慧供水網：水質與流量監測、預防性洩漏檢測、用水需求預測與預測性負載調度；智慧下水道網：故障預測與維修安排、監控網絡和隧道結構完整性、追蹤非法排放；數位化營運：改善操作系統並實現全面性監控、利用自動化流程提高生產力、透過數位平台改善服務與共享知識。

### (2) 零碳排污水處理系統開發

PUB 不斷發展更環保的污水處理技術，並且著重於降低污泥的產生、生產更多的沼氣以及減少能源消耗等項目，如開發可以提高過濾效率的濾膜。同時，為了實現低碳/零碳排放，PUB 亦積極發展太陽能，以降低石化燃料的使用，例如 PUB 近兩年廣泛在國內的水庫上部署漂浮式太陽能發電系統。

#### (四) 以色列

以色列是地處沙漠邊緣、水資源稀缺且安全威脅不斷的小國，一直面臨淡水資源嚴重短缺的壓力，政府極重視水資源數據蒐集以及廢水回收、海水淡化等技術的發展。目前海水淡化成為以色列的主要飲用水來源，且有接近 90% 的廢水可以被回收，並做為農業灌溉使用。以色列水務方面的主管機關為水務局 (Israel Water Authority, IWA)，負責用水的規劃、分配和收費規定；Mekorot 水務公司，主要負責淡水的生產、輸送與廢水處理。

##### 1. 數據整合平台與數位工具

水務局和阿拉德集團 (Arad Group) 推出生產者網站 (Producers' Website) 以支持製造商監測其生產設備的用水量。同時，水務局也建立水質監測與調查系統，以便及早發現含水層和水井等水源的污染物，並且防止燃料等污染物污染地下水或海水侵入沿海含水層等事件發生。

另外，以色列衛生部 (Ministry of Health) 建置飲用水品質監測資料庫 - My Water。該資料庫提供了供水網各環節 (如水源、海水淡化廠、供應設備等) 之水質檢驗數據，包括化學與微生物檢驗。

##### 2. 智慧水資源管理重要計畫與成果

Mekorot 除了專注於節能的海水淡化技術發展外，亦持續投入人工智慧等數位科技，以提升其營運和管理效率。主要的創新技術或開發中的項目包括：智慧供水管理平台，能精簡營運流程、優化水資源處理效率、風險管理與決策支持等；智慧實驗室晶片 (Lab-on-a-chip)，可以安裝在水龍頭上，以監測、追蹤水質，若水質不佳將會通知使用者；病毒監測系統，可檢測廢水中的病毒含量與種類，以分析可能的傳染病流行；網路安全系統，以保護水利基礎設施免受網路攻擊。

##### 3. 未來規劃

以色列未來行動計畫重點在於解決水資源短缺和農業用水問題。儘管目前國

家供水系統能穩定供水，但水務局預估隨著人口增加以及天然水源供應減少，以色列將出現水資源短缺的問題。為了縮小未來幾十年水的供需差距，以色列預計將持續專注於節約用水，以及提高水處理、循環利用和海水淡化效率。此外，隨著可用於灌溉的淡水越來越少，將促使以色列改為耕種更適合半乾旱氣候的作物，或發展能更節省水資源的耕種技術。

## (五) 日本

日本的主要水資源為水壩、河流和湖泊等地表水，有 7 個河流系統支持超過 50% 的總人口和工業活動的用水。水資源管理由多個政府部門和機構管理與監管，如國土交通省、水務廳等單位。

### 1. 數據整合平台與數位工具

#### (1) 海洋和水質監測

環境省下屬的水、空氣和環境局(The Bureau of Water, Air, and Environment)負責監測全國 9,000 多個地區的水質資訊，且會在環境省進行整合後公布。

#### (2) 防洪與管理

國土交通省(MLIT)透過開發雨水儲存與滲透設施、河道資訊監測等，制定綜合防洪措施；透過與地方河道管理相關單位合作建立河道資訊系統。此外，該系統同時整合了氣象廳的降雨預測數據，並提供洪水預報。

#### (3) 供水設施檢查與維護

日本水務廳(JWA)主要對水壩、運河、攔沙壩等設施進行監測及水質的檢查。監測的數據可用於設施功能分析、維修規劃與風險預測等，例如告知水用戶的洪災風險或是合適的補救時機等，以提高水資源安全。

### 2. 智慧水資源管理重要計畫與成果

#### (1) 供水物聯網推廣 (Promotion of IoT Utilization in Water Supply)

厚生勞動省自 2018 年以來即積極推動供水業務中推廣物聯網利用模式

(Promotion of IoT Utilization Model in Water Supply Business) 計畫，旨在支自來水公司採用物聯網(IOT)以及虛實整合系統(Cyber-Physical System, CPS)等先進技術以提高監測及供水效率，例如利用智慧水表監測用水情況，或者分析流量計、壓力錶等數據，以及早發現漏水、優化配水和故障預測等。

### 3. 未來規劃

#### (1) 100%安裝智慧水表 (100% Installation of Smart Water Metering)

在日本水研究中心(JWRC)的幫助下，日本訂定 2025 年全面安裝智慧水表的目標，規劃透過智慧水表自動化收集用水數據，以改善用水效率與克服勞動力短缺等問題，並且幫助自來水公司降低營運成本。此外，智慧水表亦可提高居民的節約用水意識，同時還可提供監控照護等附加服務。

## 四、智慧水資源管理關鍵技術

近幾年水資源技術的發展動態包括：透過感測器與大數據分析實現即時監控、以人工智慧自動化管理水處理設備、奈米科技於水處理技術的應用創新、減少水處理的能源消耗等。本報告綜整前述技術發展動態，歸納出兩項重大技術議題，分別為關鍵數位科技(如大數據、雲端儲存與計算、人工智慧、數位孿生)，以及創新水處理科技(如奈米科技、光催化技術、微藻廢水處理、新興海水淡化技術)，以下將簡述各項技術之發展現況、應用與代表性案例。

### (一) 關鍵數位科技

改變傳統水資源管理模式之關鍵數位科技包含大數據、雲端儲存與計算、人工智慧以及數位孿生等技術，各項技術說明請參閱圖 3。下列介紹前述各項關鍵數位科技於水資源管理之主要應用與代表性案例：



圖 3. 水資源管理關鍵數位科技

資料來源：Frost & Sullivan，科技發展觀測平台整理

## 1. 數位科技主要應用說明

### (1) 大數據

水質與漏水監測、水務資產監控等為大數據之主要應用。在水質與漏水監測方面，於供水水路設置感測裝置，可蒐集大量水質與漏水相關數據，協助相關單位研判需要淨水處理或可能發生漏水的環節，進而採取應對措施，以恢復水質並確保水路供水不間斷。在水務資產監控方面，大數據分析可以蒐集相關數據並且評估水務基礎設施的健康程度，提供故障預警及其可能發生之位置資訊，以在重大損失發生前進行維護。

### (2) 雲端儲存與計算

雲端儲存與計算於水資源管理之主要應用包含：高效率水資源管理、廢水管理等。在高效率水資源管理方面，由於越來越多的水資源數據儲存在雲端中，水務當局可以輕易取得各基礎設施生成的即時數據，了解目前的供水與用水狀況。另外，由於水資源管理是高度動態的，雲端解決方案，可幫助水務當局即時因應供需變化或者突發事件。在廢水管理方面，廢水處理流程會因水質特性(如污染物數量與化學物質濃度)與水量隨著時間改變，同時系統效能亦會受到人為操作、

環境條件、微生物等因素影響。因此，以雲端為基礎的解決方案，可以即時蒐整和分析各項影響水質的參數，讓水務營運商得以更清楚地了解汙染源與廢水處理程度。

### (3) 人工智慧

供水管網智慧化管理、緊急計畫實施自動化等為人工智慧之主要應用。人工智慧驅動的解決方案能夠預測用戶的用水模式，並能自動化調配供水，或者提供營運商優化供水管網之相關建議，以滿足用戶需求。另外，人工智慧能夠從流量與用水之相關資訊中，協助水務單位分析可能漏水之區域。在緊急計畫實施自動化方面，人工智慧解決方案可以協助水務公司，在緊急情況發生時即時分析與預判風險造成的危害，並且依照事先製定的緊急計畫，自動採取應對措施，以管控損失。

### (4) 數位孿生

數位孿生於水資源管理之主要應用包含：新設備測試與設備使用評估、操作員培訓等。在設備測試與使用評估方面，構建新設施的數位孿生，可以在實際建設開始之前，於虛擬環境中進行各項測試，或者可以在不干擾建設進度的情況下，快速分析各種備選方案。同時，數位孿生能模擬與分析真實設備的老化、耐用度等，協助水務部門掌握設備之健康程度以及需要維修的零組件，並且可以測試在緊急狀況發生時的應對步驟。另外，數位孿生亦可作為人員培訓使用，訓練工作人員操作與管理設備，避免操作失誤導致設備損失以及人員受傷。

## 2. 應用數位科技於水資源管理之代表性案例

許多知名國際企業利用數位科技發展智慧水資源管理產品，例如 Yokogawa Electric、Jacobs Engineering Group、Idrica 等。前述廠商之代表性產品與近期發展動態介紹如下：

(1) 水資源人工智慧與數位孿生解決方案 (廠商：Yokogawa Electric)

Yokogawa Electric 為日本跨國電氣工程和軟體公司，在水務方面可提供水處理監控系統、輸水監測與管理系統、水質監測系統、水資源需求預測系統等。2019 年，Yokogawa Electric 與新加坡 PUB 合作，合作開發人工智慧解決方案，包括：設備早期故障檢測和診斷系統等。另外，Yokogawa Electric 亦於 2022 年 3 月與大阪自來水局合作，規劃利用人工智慧技術開發設備故障預測。

(2) 水資源雲端與智慧化解決方案 (廠商：Jacobs Engineering Group)

美國 Jacobs Engineering Group (Jacobs) 在智慧水管理領域，開發了多項創新產品，包括數位孿生解決方案 REPLICA，可模擬智慧水網中各項設備的即時動態；雲端洪水預測平台 Flood Cloud，可預測洪水的發生與範圍等。Jacobs 於 2020 年與新加坡 PUB 合作，利用 REPLICA 軟體與水回收廠的數據收集與監測系統，開發出數位孿生平台，可用於人員培訓，亦可分析營運調整時(如設備維修)對工廠整體績效的影響。

(3) 水循環管理數位轉型解決方案 (廠商：Idrica)

西班牙公司 Idrica 主要產品為水資源管理平台 GoAigua，可將水網中各項設備(如水質監測器)所產生的數據整合，並使用先進的人工智慧演算法，搭配不同的功能模組，實現營運優化、檢測漏水、應對危機等功能。Idrica 於 2021 年時與西班牙瓦倫西亞政府合作開發了全球首款 5G 智慧水錶，並且成功地即時偵測飲用水之消耗量。未來可望能透過 5G 技術連接百萬台感測器，實現更即時以及更有效率的管理。

## (二) 創新水處理科技

污水處理、海水淡化等水處理技術，能提升水資源使用與再利用效率、減少水資源浪費，以緩解水資源短缺的壓力，成為各國政府與相關業者關注的技術焦

點。以下聚焦於具潛力之創新水處理科技，並列舉數項近期之創新成果，以描繪近期整體發展概況。

### 1. 具潛力之新興水處理科技

奈米科技、光催化技術、微藻廢水處理、新興海水淡化技術等為具潛力之創新水處理科技。各項技術介紹如下：

#### (1) 奈米科技

奈米顆粒或奈米結構的大表面積與體積比例，能強化化學與生物顆粒的吸附，與傳統的水處理方法相比，基於奈米科技的水處理技術被認為是高效率且具有成本效益的新興水處理科技。奈米科技在水處理過程中的主要應用包括金屬奈米顆粒、奈米濾膜和奈米吸附劑等。其中，碳奈米管(CNTs)因具有能去除水中多種類型污染物的能力，被認為是具有發展性的奈米材料之一。舉例來說，奈米碳管的管徑尺寸(約數奈米)可限制微生物與大顆粒的污染物通過；同時，將奈米碳管進行處理後(如修飾碳管上的官能基)，可提升對有害重金屬離子的吸附能力。

#### (2) 光催化技術

許多廢水處理技術需要消耗大量能量，例如電化學、逆滲透(RO)等，並且在水處理過程中會產生難以處理的副產物，例如累積污染物的濾膜。光催化技術為利用光線(如 UV 光)刺激光催化劑分解水中的有毒物質，包括可將廢水中的有機污染物(如激素、殺蟲劑等)降解，或將無機污染物(如一氧化二氮)還原或氧化為無害物質，具有處理流程簡單、技術環保等特色，目前常見用以處理高濃度有機物或金屬污染的工業廢水。提升光催化劑的反應效率，或開發創新光催化複合材料，為該類技術發展之重心。

#### (3) 微藻廢水處理

微藻有生長快、光合作用效率高、處理污水效果好等優勢，為近期備受關注

的技術。藻類能夠利用水中的含氮與含磷的化合物進行生長，如氨氮或磷酸鹽等，因此適合應用於有機廢水處理，尤其是去除廢水中營養鹽。此外，傳統的廢水處理需透過多個步驟，分別去除含氮以及含磷的化合物，處理過程複雜且耗能。利用微藻處理廢水，可簡化水處理的步驟。另外，微藻還可以進一步回收再利用，並可衍伸出具經濟價值的副產物(如飼料添加物)，為業者帶來額外的收入。

#### (4) 新興海水淡化技術-薄膜淡化技術、以再生能源驅動淡化

海水淡化為濱海或海島地區的重要淡水與飲用水來源。高效率且低耗能的海水淡化技術為前述地區關注的發展項目。海水淡化多採用以薄膜為基礎之淡化技術，包含正滲透(FO)、逆滲透(RO)、奈米過濾(nanofiltration, NF)等方法，其中又以逆滲透(RO)為主流。目前先進的薄膜為 TFC(thin-film composite)膜，TFC 膜具有高透水率和高脫鹽率等優勢，能減少能源消耗，改善淡化效率。然而，薄膜淡化常面臨膜污染與堵塞的挑戰。因此，抗污染、提升透水率為目前研發的重心。

另外，海水淡化需要消耗大量電力，利用再生能源以減少傳統能源的使用亦為淡化技術之發展軸心。再生能源中，太陽能為最具潛力的解決方案，主要技術有 CSP(Concentrated Solar Power, CSP)和 PV(photovoltaics)。CSP 為利用太陽能產生熱將海水中的水與鹽類分離；PV 則是透過太陽能發電為 RO 幫浦提供動力。然而該類技術迄今仍存在許多障礙，例如高成本和電源不穩定等。

## 2. 創新水處理科技代表性案例

### (1) 可在短時間內快速淡化海水的奈米膜過濾技術 (廠商：Nanoseen)

Nanoseen 為成立於 2020 年的波蘭新創公司，專注於開發新型奈米材料，以解決水資源危機和塑料污染。傳統逆滲透(RO)裝置除了需要外部電源供電以外，逆滲透亦會將水中對健康有益的礦物質一併去除。Nanoseen 開發了數十種可選擇性地吸附不同種污染物和微生物的奈米膜。這些奈米膜不需要其他電源或能量，緊緊依靠重力即能在 2-5 分鐘內完成淨化處理，並且可重複使用。

(2) 適用於電力短缺地區的光催化濾水設備 (研究單位：瑞士洛桑聯邦理工學院)

2022 年瑞士洛桑聯邦理工學院(École polytechnique fédérale de Lausanne)的研究人員開發出混合二氧化鈦奈米線 (TiO<sub>2</sub>NW)和奈米碳管 (CNT)的濾紙，並研製出新型過濾器。濾紙中的二氧化鈦為光催化劑，奈米碳管成分可提升光催化反應的效率。因此，該過濾器除了能過濾水中雜質，同時可產生光催化反應殺死水中的病原體(如大腸桿菌)與分解有機汙染物(如殺蟲劑與清潔劑)。由於此新型過濾器不需使用電源，適合於電力短缺的偏遠地區與農村使用。

(3) 能與水處理廠設備整合之藻類廢水處理系統 (廠商：Gross-Wen Technologies)

Gross-Wen Technologies 開發了藻類廢水處理系統-RAB。該系統使用垂直的輸送帶，並在輸送帶表面培養藻類。輸送帶會反覆浸入水中與曝露於空氣中，能使藻類從空氣中獲得足夠的陽光與二氧化碳，並可消耗廢水中的氮和磷。該系統可適用於工廠的廢水處理，並能與水處理廠之現有系統整合，不須對整個廠內設備進行昂貴的升級，即能滿足更嚴格的汙水排放限制。

(4) 創新海水淡化濾膜 (廠商：NX Filtration)

成立於 2017 年的 NX Filtration 開發了創新的奈米纖維濾膜。該濾膜具有良好化學穩定性和耐用性，可耐受極端的 pH 值，同時濾膜特殊的多層奈米結構，可以降低阻塞率並可提高過濾的選擇性，亦可去除多種微生物與病毒。NX Filtration 的濾膜目前已被多國的海水淡化廠與廢水處理廠使用，包括阿拉伯聯合大公國、荷蘭等。

## 五、水資源技術創新與綠色經濟實現

2022 年 5 月世界經濟論壇(World Economic Forum)發布淡水的未來：沒有藍色，就沒有綠色經濟 (A Freshwater Future : Without Blue, There Is No Green Economy)報告。文中表示為了因應氣候變遷之威脅，世界各國與業者紛紛提出淨零排放(Net Zero Emissions)策略與計畫，如英國淨零策略(Net Zero Strategy)。然

而，前述策略多未把水資源視為重點關注領域，並可能會嚴重影響淨零目標之實現。全球人為溫室氣體(GHG)排放中，有高達 10%以上與水資源相關，包括：水務單位的溫室氣體排放量約占總排放的 2%，相當於航運業的排放量。另外，水資源不安全會對供應鏈造成嚴重干擾，例如，採礦業易受到缺水限制而減產，而金屬減產會影響電池的生產。供應鏈面臨風險，將可能迫使業者延緩或放棄淨零排放目標。

水資源技術對淨零碳實現至關重要。然而將水納入淨零碳戰略需要技術、專業知識、治理工具等方面的創新。以下列出兩項代表性案例，說明其如何透過合作，成功減少水資源與能源消耗：

1. 藉由公私合作發展水處理技術，降低工廠能源與水資源消耗 (廠商: Carlsberg)

2021 年，丹麥啤酒製造商 Carlsberg 建設了一家水處理廠，以處理啤酒廠產生之廢水。同時，Carlsberg 透過丹麥公私合作夥伴關係-DRIP (Danish Partnership for Resource and Water Efficient Industrial Food Production)，與技術提供商、大學以及研究機構等單位合作，實現減少水資源與能源的消耗之目標。該工廠目前每年可節省超過 5 億升的水，估計減少了約 21 萬噸的 CO<sub>2</sub> 排放。同時，透過沼氣生產和熱水循環技術，啤酒廠的能源消耗降低 10%。

2. 與地方政府合作將都市廢水再生用於天然氣抽取 (廠商: Shell)

國際石油公司殼牌(Shell)鄰近加拿大道森克里克市(Dawson Creek)的天然氣工廠，需要透過大量的水資源來抽取天然氣。然而，該地區之地表水資源有限，因此 Shell 與當地政府合作建立了道森克里克市再生水計畫(Dawson Creek Reclaimed Water Project)，將道森克里克市的都市廢水經處理後，透過管線提供給天然氣工廠使用。該計畫成功地將都市廢水再利用，使天然氣工廠不需使用珍稀的地表水資源，並且消除了運水卡車的需求，除了降低社區的噪音、灰塵以外，每年可減少 3000 噸以上的 CO<sub>2</sub> 排放量。

前述兩項創新案例顯示水資源技術具備幫助產業與社會邁向淨零碳之潛力，且藉由公私協力能降低創新壁壘。然而，這些案例主要是由數家公司與學研單位組成的小型合作夥伴。因此，為了擴大創新規模，帶動整個地區或國家的轉型，世界經濟論壇認為仍需要有更明確的機制與措施，以促進利害關係人合作，例如透過協作平台促進跨部會與跨界分享以及學習；透過貿易協定、稅收優惠、市場准入等措施吸引業者投入等。

## 六、結語

因應水資源的挑戰，主要國家積極利用數位科技，發展水資源數據整合平台、數位工具水資源科技，以強化水資源管理，提高水資源分配效率並且減少漏水；並且投入再生水及海水淡化等新興水處理科技發展，以期提高水資源的供給量，同時減少水污染。

另外，根據世界經濟論壇報告，水資源技術創新能大幅度降低碳排放與能源消耗。為了擴大創新規模，透過協作平台以及貿易協定、稅收優惠、市場准入等措施，將有助於促進利害關係人合作，大幅度降低創新壁壘，進而完善創新生態體系，加速淨零碳目標的實現。

氣候變遷導致全球旱災及水災等極端天氣事件的強度與頻率增加，臺灣因地理因素留不住降雨，更將面臨缺水危機。政府近年來水資源經營策略逐漸朝向強化管理邁進。未來若能結合國內優勢之 ICT 產業，發展先進智慧水資源管理技術以及建立創新生態系，除了能大幅改善國內水資源壓力，亦可望能將技術輸出，為全球淨零碳排之實現做出重大貢獻。

【參考文獻】

1. 水利署，臺灣各區水資源經理基本計畫，2021。
2. 台灣自來水公司，台水公司辦理降低自來水漏水率作為及執行進度，2022。  
取自：<https://www.water.gov.tw/ch/Subject/Detail/1134?nodeId=134>
3. 行政院，前瞻基礎建設計畫-水環境建設，2021。取自：  
<https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/c776edfe-61bd-4f9e-9609-f1fb13919ad7>
4. 監察院財政及經濟委員會新聞稿，監察委員賴振昌關切極端氣候下我國水資源永續利用之困境與發展問題，2021。
5. 環保署，全國環境水質監測資訊網，2022。取自：  
[https://wq.epa.gov.tw/EWQP/zh/Default.aspx#utm\\_source=Epa&utm\\_medium=EpaIframe&utm\\_campaign=EpaIframe](https://wq.epa.gov.tw/EWQP/zh/Default.aspx#utm_source=Epa&utm_medium=EpaIframe&utm_campaign=EpaIframe)
6. Frost & Sullivan, Global Trends on Smart Water Management, 2022.
7. Frost & Sullivan, Global Water and Wastewater Treatment Outlook 2022, 2022.
8. Public Utilities Board (PUB), Carbon Zero Grand Challenge, 2022.  
<https://www.pub.gov.sg/innovationchallenge/Pages/CarbonZero.aspx>
9. Public Utilities Board (PUB), Innovation in Water, Singapore, 2019.
10. UN, Progress on Level of Water Stress, 2021.
11. UN Water, The United Nations World Water Development Report 2021, 2021.
12. U.S. Environmental Protection Agency, Water Data and Tools, 2022.  
<https://www.epa.gov/waterdata>
13. World Economic Forum, A Freshwater Future : Without Blue, There Is No Green Economy, 2022.