

水處理科技的 現在與未來

張敏超、洪仁陽、梁德明、李宗銘

極端氣候變遷使得水資源供需失衡，如何善用科技解決水資源匱乏問題，已成為 21 世紀最重要的議題之一。

自古以來，人類的生存與「水」關係密切。在人體內進行的生化反應中，水是主要介質，水也是新陳代謝反應的參與者，因此可以說有水才有生命。地球上大部分面積都被海水覆蓋，大自然界有水的循環系統：海水蒸發到大氣中冷卻為雲及雨，雨水降到地面供人類及萬物使用，人類社會生活、工業或農業使用後的水經處理後又回到河川或海洋。

近年來，溫室氣體所造成的極端氣候，使得水循環系統遽變，頻頻出現極端的水災和旱災（水太多 / 水太少），水資源供需嚴重失衡。以台灣為例，近年來，強降雨發生次數增加，颱風豪雨後自來水原水濁度飆升，屢傳停水。人口大幅增加，也使得全世界水資源的分配變得越來越重要。

天主教教宗方濟各於 2017 年 2 月 24 日出席聖座科學院以水資源與人權為主題的研討會，呼籲眾人立即採取具體行動保護水資源。聯合國糧食與農業組織也指出：日常飲水、工業發展及農業使用都需要的淡水資源，未來將面臨嚴重不足。因此，如何善用科技解決水資源匱乏問題，已成為 21 世紀最重要的議題之一。



近年來，溫室氣體所造成的極端氣候，使得水循環系統遽變，頻頻出現極端的水災和旱災，水資源供需嚴重失衡。（圖片來源：種子發）

近年來，溫室氣體所造成的極端氣候，使得水循環系統遽變，頻頻出現極端的水災和旱災，水資源供需嚴重失衡。

未來排放水成為重要的水資源之一時，
就要建立藉由科技讓「一滴水至少使用兩次」的水再生利用觀念。

科技方式解決水資源匱乏

有鑑於此，世界各國目前紛紛投入資源於水科技的研發，例如以色列發展先進的海水淡化技術，建立高再用率的污水循環系統供農業灌溉等使用。新加坡也積極開發各種新水源，包括海水淡化及新生水利用等，新生水技術是把生活污水經過過濾雜質、逆滲透、紫外線消毒三層處理後產生的淨化水。

台灣年平均用水量是 210 億噸，但只有 181.2 億噸供水量，加上降雨季節集中在 5～10 月的豐水期，其餘月分多是枯水期，因此需有相關水科技來調適枯水期的水資源需求。水利署規劃未來水資源對策，強調多元化水資源開發，海水淡化及水回收再利用是重要項目。然而，現今海水淡化技術造水成本偏高，仍無法做為解決民生用水資源問題的方案。在水循環的過程中，會有一般家庭所產生的生活污水或事業體排放的廢水，這些不乾淨的水通常需要處理達到一定的放流水水質後才能回歸大自然。

未來排放水成為重要的水資源之一時，就要建立藉由科技讓「一滴水至少使用兩次」的水再生利用觀念。「水再生利用」是把工業廢水、生活污水、雨水貯留利用、農業灌溉回歸水、海水利用等的水再利用。2015 年底立法院通過「再生水資源發展條例」，代表台灣往水回收再利用發展的方向已經非常明確。值得注意的是，2017 年聯合國「世界水資源日」（每年 3 月 22 日）的主題是「廢水」，強調廢水回收再利用，認為是因應氣候變遷下缺水危機的有效手段。

水處理技術內涵的演進

以上所談的水科技，嚴格來說，應該是水處理技術。水處理技術可分為飲用水處理及非飲用水處理，自來水處理就屬於飲用水處理，不是本文所談的重點，其他的都屬於非飲用水處理，範圍相當廣。非飲用水處理的科技包括民生污水和工業廢水的處理技術，以及水再生利用技術。

以往廢、污水處理技術大都只考量水中污染物的去除，注重處理後放流水水質，以能達到環保署規定的放流水標準為主要訴求。這些處理技術注重有效處理程序的建立，相關設備與材料的有效利用，通常由環工教授或專家及相關業界主導，僅有少部分化學與化工相關科系教授和專家參與。

未來，當水回收再利用及工業廢水中有用物質回收循環受重視時，依傳統方法處理後的可排放水仍需去除或回收殘留的微量有機物及無機物，這時廢水處理場將蛻變成水與物質回收循環的廠區。這就牽涉到更多分子層次的化學與化工技術，需針對不同的水質應用及物質回收要求，使用不同的水處理材料與設備的水回收再利用技術，這些不僅是環工也是化學與化工的範疇，是一種需要高度整合的跨領域技術。

全方位的水處理技術團隊

工研院水處理技術的研究與開發，主要由材化所水科技組主導。三十多年來，歷經客觀環境的變化與需求，發展出各種不同型式的水處理技術，是國際上廢水處理



技術發展歷程的縮影。因此，從水科技組的水處理技術研發過程，可進一步了解水處理技術發展的現況與未來趨勢。

水科技組在水處理相關技術與應用發展，著重於最複雜的工業廢水處理，從早期輔導傳統產業進行工業廢水處理，到現在協助高科技產業廠內廢水處理及節水規劃。因應客觀形勢的變化與未來需要，也積極建立水回收再利用及資源回收技術。多年來，藉由科專計畫以及與國內外廠商的合作，在水處理技術與材料的創新研發上不斷突破，已建立具備國際競爭力的水處理核心技術與專利布局。

由於研發人員擁有完整水處理模組與系統的設計能力，以及多年的水處理經驗，因此建立了不少領先全球且已商業化的廢水處理與水回收技術，在國內外已有超過 100 個以上的成功實廠案例，產業範圍涵蓋電子業、面板業、石化業、化工業、食品業、紡織業、鋼鐵業等。以面板大廠友達公司為例，於 2010 年開始與工研院合作開發製程用水全回收技術，2015 年 9 月其龍潭廠達到廢水零排放的水準。

水科技組也移轉多項水處理與回收技術至國內相關水處理公司，例如技轉薄膜蒸餾技術及倒極式電透析技術等。國內一家不織布濾材大廠也曾透過科專計畫業界合作方式，與水科技組合作開發不織布膜分離技術。

另外，水科技組也在海外市場積極推廣廢水處理技術，包括新加坡、馬來西亞、越南、中國等，服務內容包括技術研發、實驗室級或實廠級模組測試、技術評估、系統設計、試車、人員操作與教育訓練等全方位專業服務。

創新水處理技術

工業廢水處理技術包括生物處理及物化處理。這些年來，工研院研發出不少已實廠化的創新技術，如厭氧性生物處理的「上流式厭氣汙泥床」技術、厭氣流體化床生物處理技術、結合薄膜分離與生物反應兩項技術的膜分離生物反應器技術，以及多孔性生物擔體技術。物化處理技術則有可處理含氟、砷等無機廢水的「流體化床結晶廢水處理技術」，應用於廢水回收再利用的「倒極式電透析脫鹽技術」等。以下介紹這幾項重要的創新廢水處理技術。

上流式厭氣汙泥床技術及厭氣流體化床生物處理技術 廢、汙水處理的技術方向，如果考慮能源、資源回收、環境友善，厭氧生物處理技術絕對是首選。工研院早期開發的上流式厭氣汙泥床技術，包括進流水分配、汙泥床、汙泥毯、氣固液分離等創新裝置。

這項技術是在厭氧條件下，微生物把有機物降解代謝成甲烷與二氧化碳，再由三相分離器分別導引排出槽外，微生物則流入沉澱區並回到反應槽中。它的優點是低初設成本及低操作成本，且甲烷可回收成能源。目前這項技術已經廣泛應用於食品、石化、化工、造紙、發酵、塑膠、光電等工業領域，國內有多家公司的廢水處理都已採用，國外則在馬來西亞、越南等國家有多個食品產業與釀酒產業採用。

另一項創新技術是厭氣流體化床生物處理技術。它是在反應槽內填充細小擔體，以提供廣大表面積讓厭氣微生物附著，並利用快速水流使其流體化的一種有機廢水處理技術。這項技術特別適用於低濃度且含有生物抑制性成分的廢水，處理槽呈瘦高形狀以節



近年來國際間興建汙水處理廠，注重廢水能回收再利用。（圖片來源：種子發）

省用地。國內外不少化工廠難處理的廢水都採用這個技術。

膜分離生物反應器技術 這些年來國際上快速發展的膜分離生物反應器技術，是結合濾膜分離與生物處理兩項技術的新穎廢水處理技術，它的最大優點是占地面積減小、高效率固液分離、水質穩定、提高水回收再利用的可行性。2000年起，水科技組與國內一家公司合作，以建立國際競爭力的水處理公司為目標，透過科專計畫業界合作方式開發不織布濾膜的技術，成功地建立全球第一個以不織布濾膜為主的水處理技術，並獲得國內外專利。

以纖維過濾機制的非織布濾膜取代以微孔篩濾，是非織布膜分離技術革命性的

改變。2006年，水科技組於國際上著名的水處理期刊《Desalination》上發表全球第一篇不織布濾膜技術的學術論文。發展至今，已進行到第四代模組的開發，於食品業、化工業及電子業建立了不少實廠業績。

例如：在工業界中，玻璃纖維廠 1,000 CMD（每日處理量 / 噸）、中鋼 1,800 CMD，都已順利運作多年。生活汙水處理實績有台中某社區 2,000 CMD 的生活汙水處理。國內公共工程實績包括石門水庫、苗栗客家園區，以及台中后里馬場的汙水處理。這家公司於 2015 年「第 12 屆世界過濾會議暨展覽」，展出新世代的薄膜過濾模組及廢水處理槽實體模型，引起廣泛注意，被認為是國際競爭力十足的先進過濾模組。

水科技組也協助公司發展不織布生物擔體技術，它是利用不織布的纖維以及多孔的特性，當作微生物居住的生物擔體，具有生物分解及物理過濾雙重功能。這技術已應用於國內北部某都市生活汙水處理廠，處理規模是 100 噸 / 日，經過 1 年半的運轉，成功驗證水回收再利用的可行性。

這家公司的不織布膜離技術從無到有，從科專計畫實驗室研究到實廠應用，經歷了 15 年，是工研院執行科專計畫與產業界充分合作的成功例子。

多孔性生物擔體水與廢水處理技術

水科技組所開發以「多孔性生物擔體」為核心的創新廢水生物處理系統，採用開放性多孔性擔體為反應槽介質，能提供廣大表面積供微生物附著、增殖，而累積大量及特定族群的生物膜微生物，適合處理低負荷、高流量的操作，以及難分解有機物質的去除。如用於地下水整治，可去除水中的有機物、氨氮或硝酸氮等。這項技術不僅可做為工廠既有生物處理系統的前處理，以及應用於廢水回收再利用的前處理，也可用以處理遭受汙染的自來水原水。

自來水公司曾與工研院合作，採用多孔性生物擔體處理技術進行自來水原水前處理，馴養硝化菌、異營菌等的優勢菌種，去除氨氮及有機物質，且不需加藥，榮獲經濟部公共工程優質獎。

流體化床結晶廢水處理技術 流體化床結晶廢水處理技術主要是在結晶槽中利用 0.2 ~ 0.5 mm 矽砂擔體做為結晶核種，添加適當藥劑調整在進流水中的過飽和度，使欲處理的無機離子於矽砂擔體表面形成穩態結晶體。當晶體粒徑達 1 ~ 2 mm 後，可排出槽外回收再利用，達到廢棄物減量的目的。以半導體含氟廢水為例，使用這項技術結晶後的產物如氟化鈣，也可回收

再利用。目前國內已經有二十幾個案例。

水科技組於 2014 年以這項技術與全球最大的水處理公司荷蘭 DHV 競標新加坡美光廠一案時，贏得標單，其後與興建新加坡美光廠的廢水處理工程公司合作，成為新加坡美光廠廢水處理技術顧問。

倒極式電透析脫鹽再生技術 電透析處理技術是利用不同特性的薄膜對水中的離子做分離選擇，水中離子的移動則是靠正負直流電作為吸引的驅動力。倒極式電透析是進一步修正電透析處理技術，利用直流電正負極和內部導流的切換來延長薄膜使用壽命。

工研院創新研發出的電透析脫鹽專利技術，具有高脫鹽率與回收率、倒極式電透析膜壽命長、不易結垢、容易清洗等特性，因此適合應用在工業廢水脫鹽與水回收領域。例如：中鋼公司就使用工研院倒極式電透析技術進行原水脫鹽處理、工業廢水回收等。倒極式電透析也可應用於地下水脫鹽、河川水脫鹽、冷卻循環水脫鹽、RO 濃縮水脫鹽、製程廢水脫鹽等。

前瞻水處理技術與材料研發

除了處理程序建立外，針對水回收再利用，水科技組進行了兩種低耗能新穎水脫鹽技術：電容去離子脫鹽技術和正滲透技術，以及相關材料的研發。電容去離子技術是一種新穎的電化學處理程序，以碳材為電極材料，利用電吸附原理移除水中的帶電荷汙染物質或離子。它的特點是可於低壓（0.2 ~ 0.3 MPa）與低電壓（0.8 ~ 1.2 V）環境下操作。目前，水科技組已完成模組的實驗室驗證，正朝向模組系統開發階段發展。

「正滲透技術」的基本原理是由高濃度的提取液，藉由半透膜，水由低滲透壓液區流向高滲透壓液區，再從提取液進行

從永續經營的角度來看，
工業廢水處理要考慮水可回收再利用及有用物質的回收和循環利用。

水分離。這項技術可分為薄膜、提取液與系統整合 3 大部分，水科技組正積極分頭進行中。

過去數年間，水科技組也開發出使用離子液體 / 微波加熱溶膠－凝膠法的創新技術：第一階段是現生 (in-situ) 合成及固定 TiO_2 奈米粒子於高分子基材上，以及第二段現生固定 TiO_2 奈米粒於活性碳上。這兩項技術的創新處是在於 TiO_2 奈米粒子的合成、結晶化、均勻分散與固定，可於常壓下 90 分鐘內完成，優於需於高溫高壓且反應時間超過 24 小時的水熱法。這兩項技術都獲得本國及美國專利，並發表 5 篇以上的學術期刊論文，可分別應用於光觸媒高級氧化處理技術及製備電容脫鹽技術的電極材料。

從永續經營的角度來看，工業廢水處理要考慮水可回收再利用及有用物質的回收和循環利用。水科技組正結合材化所所內不同性質的研究部門，積極研發與國際同步的水處理及水回收再利用的新技術和

新材料。水回收再利用根據不同的目的，需要不同的處理程序單元。水科技組也協助國內廠商針對所要處理的水質與水量，以及最終所需的水質，從水回收的觀點，重新評估改善既有的工廠廢水處理單元或整合所需的處理單元，建立有用、有效率的最適處理系統。

未來當水處理相關科技受政府當局重視時，工研院材料與化工研究所水科技組有能力配合政府政策，結合院內外的相關水處理技術資源與專家學者一起努力，除了能大幅且有效改善國內水資源供給問題外，有朝一日也能使水處理技術變成國家重要的技術輸出項目。

張敏超、洪仁陽、梁德明
工研院材料與化工研究所水科技研究組

李宗銘
工研院材料與化工研究所

