

環境管理規劃類

產業新興水資源循環技術之碳排放量分析

李宜亭*、徐秀鳳**、林子皓**、許自強***、林庭瑋****、
駱尚廉*****

摘 要

本研究蒐整國內 7 項新興水資源循環技術於實廠應用的案例，包括生物網膜 (BioNET)、薄膜生物反應器 (MBR)+RO、倒極式電透析 (EDR)、薄膜蒸餾 (MD)+硫酸洗滌、離子交換樹脂 (IER)、管式金屬電解回收以及薄膜電容去離子 (MCDI) 等技術，並擬定碳排放量分析方法，依據技術的能資源消耗、節水量、產品資源化量等因子計算各項技術之總碳排放量以及處理每噸水之碳排放量。

由碳排放量分析資料顯示，部分技術如 EDR、MD+硫酸洗滌、IER 以及 MCDI 等，相較於傳統處理技術具有良好的減碳效益。其中 MD+硫酸洗滌技術因其系統操作碳排放量皆低於水回收與資源化產品回收再利用之合計減碳量，應可認定為廣義之負碳技術。這些技術不僅能有效去除廢水中污染物，還能實現廢水回收再利用以及污染物資源化，值得產業參考應用與投入研發資源，以促進產業朝低碳轉型邁進。

【關鍵字】新興水資源循環技術、碳排放量、低碳轉型

* 國立臺灣大學環境工程研究所
** 財團法人環境與發展基金會
*** 定禰環保顧問股份有限公司
**** 經濟部產業發展署永續發展組
***** 國立臺灣大學環境工程研究所

博士生
研究員
工程師
科長
名譽教授

一、前言

我國廢污水處理及回收在政府以及產業界攜手努力下，工業用水回收率已從 91 年 46.0% 提升至 112 年的 73.9%。隨著工業發展及新興污染物種類與特性越趨複雜，如表面處理業廢水中含有重金屬離子物質，化學製品製造業、電子零組件製造業廢水含難分解有機物質或揮發性有機物質，傳統活性污泥法或化學混凝沉澱法等廢水處理技術已無法有效去除這些新興污染物質，也使得後續水資源回收再利用程序受到限制。為提升水資源循環利用效能，產業界分流收集不同性質廢水後，再依污染物濃度及特性選擇合適之處理系統將廢污水中的污染物降解或分離後，再將潔淨的水回收再利用。為達到我國淨零科技方案 - 資源循環再利用之目標，選擇兼具廢水處理、回收及資源化的低碳技術已成為現階段產業水回收技術之主流趨勢。

為此，各國紛紛投入研究與發展新興水資源循環技術，以提升水資源的可持續利用性及減少對環境的衝擊。本研究係蒐整國內產業界目前所採用之新興水循環技術的資料，依據各項技術的能資源耗用量計算其碳排放量，並與傳統處理技術進行比較，以評析環境友善且碳排放量較低的技術，提供產業參考應用，期能促進產業朝低碳轉型邁進。

二、新興水資源循環技術與應用案例

本研究蒐集 7 項產業近年發展及應用之新興水資源循環技術資訊，包括生物網膜 (BioNET)、薄膜生物反應器 (Membrane bioreactor, MBR) + 逆滲透 (Reverse osmosis water, RO)、倒極式電透析 (Electro dialysis reversal, EDR)、薄膜蒸餾 (Membrane distillation, MD) + 硫酸洗滌、離子交換樹脂 (Ion exchange Resin, IER)、管式金屬電解回收及薄膜電容去離子 (Membrane capacitive deionization, MCDI) 等。表 1 彙整各技術之應用產業、處理標的污染物以及可資源化產品等。其中離子交換樹脂、管式金屬電解回收、流體化床結晶等 3 項技術兼具廢水處理、回收及資源化多重效益。

各項新興水資源循環技術之技術原理以及實廠應用案例，摘要說明如下：

表 1 新興水資源循環技術之應用產業、標的污染物以及可資源化產品

項次	技術名稱	主要應用產業	標的污染物	資源化產品
1	BioNET	<ul style="list-style-type: none"> 食品與飼品製造業 紡織業 化學材料與肥料製造業 電子零組件製造業 廢污水 / 自來水處理 	有機物、氨氮、硝酸鹽氮	-
2	MBR+RO	<ul style="list-style-type: none"> 金屬製品製造業 電子零組件製造業 化學材料與肥料製造業 廢污水處理業 	有機物、SS、鹽類	-
3	EDR	<ul style="list-style-type: none"> 金屬製品製造業 電子零組件製造業 化學材料與肥料製造業 廢污水處理業 	鹽類、溶解性帶電離子	-
4	MD+ 硫酸洗滌	<ul style="list-style-type: none"> 金屬製品製造業 電子零組件製造業 化學材料與肥料製造業 	氨氮	硫酸銨
5	IER	<ul style="list-style-type: none"> 電子零組件製造業 化學材料與肥料製造業 	四甲基氫氧化銨 (TMAH)	四甲基氫氧化銨 (TMAH)
6	管式金屬電解回收系統	<ul style="list-style-type: none"> 金屬製品製造業 電子零組件製造業 	銅、鈷	銅棒、鈷棒
7	MCDI	<ul style="list-style-type: none"> 金屬製品製造業 電子零組件製造業 化學材料與肥料製造業 	金屬離子、氨氮、硝酸鹽氮	-

資料來源：經濟部產業發展署 (2024)

(一) 生物網膜 (BioNET) 技術

生物網膜 (BioNET) 技術是以「多孔性生物擔體」為核心之新型生物處理技術，採用可壓縮多孔性擔體作為生物處理反應槽的生長介質，其比表面積相較於傳統生物處理技術使用之擔體高約 1.3~2 倍，具有大量孔洞結構、形狀特殊等特性，可以提高懸浮固體物攔截之機會。多孔性生物擔體會隨水流狀況於槽體內循環流動，可降低堵塞及磨損情況的發生，相較於傳統活性污泥法具有較低水力停留時間，並縮小槽體體

積。處理水質條件 COD 約 50~500 mg/L，預估可節省 50% 以上之操作費。該技術常應用在處理含有機物、氨氮及硝酸鹽氮之廢水處理程序，常見的應用產業如食品製造業、紡織業、化工業、半導體業、污水處理廠等。透過生物分解作用，去除廢水中之有機污染物質，並產生低濃度之出流水，依出流水水質及規劃利用單元水質需求，再經多層過濾、快濾、超濾或其他技術處理後可回收廠內使用。

國內大型應用案例包括石化廠放流水回收再利用以及自來水進水廠淨水工程等（如表 2 所示），說明如下：

表 2 BioNET 技術之實廠應用案例

項目		某石化廠放流水回收再利用 *	某自來水進水廠淨水工程 **
處理流程		BioNET+UF+EDR	BioNET+ 沉澱 + 快濾
處理水量 (CMD)		1,600	300,000
標的污染物		有機物、氨氮	有機物、氨氮
BioNET 之操作條件及處理效能	HRT	1 hr	>10 min
	COD 體積負荷率 (Kg COD/m ³ ·d)	-	0.3~1.0
	COD 去除率 (%)	15~20	37~41
	TOC 去除率 (%)	5~15	5~38
	氨氮去除率 (%)	>95	>95
產水用途		冷卻水塔補水	自來水

資料來源：* 黃聖智等 (2020)；** 王雅湘 (2017)

(二) 薄膜生物反應器 (MBR) + 逆滲透 (RO) 技術

薄膜生物反應器 (MBR) 是結合薄膜分離和生物處理的廢水處理技術，且已經廣泛被應用。其技術原理是透過活性污泥槽將廢水中的有機物降解為穩定的無機物質，再以超濾膜 (UF) 的薄膜分離系統，利用薄膜兩側的壓力差，驅使廢水中的懸浮固體、微生物以及其他大分子物質從水體中分離，得到乾淨的出流水。

此項技術利用薄膜分離取代傳統活性污泥處理程序的二級沉澱池及三級處理的功能，目前市場雖以沉浸式中空纖維絲膜組為主流，參與市場的主要公司包括 Veolia、Xylem、SUEZ、KUBOTA、Evoqua Water Technologies LLC、Mitsubishi Chemical、TORAY 等大廠。據統計全球超過 1,000 座以上污水處理廠使用沉浸式平板模組，顯示中空纖維膜組與平板模組各有其優缺點及適用水質特性，與傳統活性污泥法比較，主要具有占地小、污泥產量低及產水品質佳等優勢。

國內外亦已廣泛應用 MBR+RO 系統進行水資源回收利用，包括新加坡的新生水廠 (NewWater)、美國的再生水廠等；國內包括桃園北區水資中心、台塑、中鋼等企業均已使用相關技術進行廢水再生回收。國內某電子零組件製造廠之製程廢水因含有界面活性劑、有機物等高 TOC 成分，導致傳統的廢水生物處理技術無法有效處理。因此該廠透過無氧 / 好氧的生物處理系統，搭配 MBR 系統有效去除廢水中的有機物與懸浮固體，並且透過 RO 系統將 MBR 系統之出流水進一步過濾處理，處理水量約 6,000 CMD，處理 TOC 濃度 600 mg/L，處理後產生高水質標準再生水，全數回用至純水系統回製程使用。

表 3 MBR+RO 技術之實廠應用案例

項目		某電子零組件製造 A 廠 廢水回收再利用	某電子零組件製造 B 廠 廢水回收再利用
處理流程		MBR+RO+ACF	MBR+RO
處理水量 (CMD)		6,000	450
標的污染物		有機物、SS	有機物、SS
MBR 單元操作條件及效能	HRT	3~16 hr	10.5 hr
	MLSS (mg/L)	3,000~6,000	8,400
	F/M	0.02~0.2	0.13
	TOC 去除率 (%)	>90	>90
產水用途		冷卻水塔補水	製程用水

資料來源：經濟部產業發展署 (2024)

(三) 倒極式電透析 (EDR) 技術

電透析 (Electro dialysis, ED) 是採用陰、陽離子交換膜多層交替，透過外加直流電場，使水中離子的受庫倫力影響而被牽引至離子交換樹脂表面並被置換，以達到脫鹽之效果。倒極式電透析 (EDR) 則是以電透析技術作為基礎，透過週期性的正負極翻轉，藉此清洗離子交換膜表面上的結垢，以增加電透析系統的操作穩定性及壽命。在實務上 EDR 系統以多層陰、陽離子交換膜交替排列於兩電極之間，以形成許多獨立槽室。在系統運轉過程中離子會因為庫倫力的驅動而穿過離子交換膜往相反電荷之電極移動，進而產生低濃度出流水及濃縮廢液。低濃度出流水之導電度較低，水質條件優良，可直接供應給次級工業用水使用，或是增設 RO 系統進一步過濾水體中的雜質，即可回收供應製程單元做使用。

EDR 技術常應用於鹹水淡化及河水、地下水處理及工業用水的再生上。該技術優勢在於 ED 膜相較於 RO 膜有更好的物理性及抗化性 (包括耐 SiO_2)，且 EDR 更對雜質、膠質及細菌的容忍度較 RO 高，並且還可透過自動反轉電極來達到薄膜除垢清潔之功效，藉此增加系統的操作穩定性及壽命。該技術常見的實廠應用包含 ROR 廢水脫鹽、地下水脫鹽、廢水脫鹽 / 回收、冷卻水塔排放水回收以及自來水處理等。

國內某樹脂及塑膠製造廠採用 EDR 技術作為工業水再生系統之核心處理單元 (如圖 1 所示)。該系統包含沉浸式薄膜過濾、EDR、RO 3 種處理單元。當廢水進入再生系統後會藉由浸式薄膜過濾初步去除水體中之懸浮固體與微生物，再進入 EDR 系統後，水體中的離子會被吸附到濃縮槽中，產生低濃度出流水與濃縮廢水，最後出流水再經由 RO 再次過濾產生再生水可供系統重複使用。根據統計，該系統自 2021 年啟用，每天約可產生 3,000 噸之再生水供廠區使用 (工業技術研究院創新水科技研發服務網)。



圖 1 某樹脂及塑膠製造廠之 EDR 系統 (工業技術研究院創新水科技研發服務網)

(四) 薄膜蒸餾 (MD)+ 硫酸洗滌

薄膜蒸餾 (MD)+ 硫酸洗滌技術係透過 MD 系統將氨氮與水體分離，再利用硫酸將氨氮吸收成硫酸銨，以去水廢水中之氨氮。處理流程是先於氨氮廢水中加入鹼液 (如： NaOH) 提高氨氮廢水之 pH 值 (10.5 以上)，將廢水中的離子態氨氮 (NH_4^+) 被轉換成分子態氨氮 (NH_3)，再導入 MD 系統中，透過疏水性多孔薄膜將分子態 NH_3 與液體分離，以產生低濃度之出流水與 NH_3 濃縮液。 NH_3 濃縮液導入吸收塔中，再利用硫酸作為吸收液將氨氮轉化成硫酸銨。這些硫酸銨再經過純化後可作為資源化產品使用。

該技術適用於中低濃度之氨氮 (500~5,000 mg/L) 廢水處理，如半導體廠及化工廠都常使用該技術進行氨氮廢水的處理。其優點在於系統建置所需空間較小、操作及維護容易、去除效率高且穩定 (平均可達 95% 以上)，且副產物硫酸銨可作為資源化產品再次販售。缺點是 MD 建置成本較高且容易堵塞，故需額外建設過濾系統去除進流水中之雜質。

國內某半導體廠採用 MD+ 硫酸洗滌技術處理製程產生之氨氮廢水。該系統之處理水量約為 500 CMD，氨氮濃度為 2,000 mg/L，氨氮廢水在進入系統前會先經由活性碳塔及砂濾塔進行過濾，再進入 pH 調整池中將 pH 提升至 11.8，使廢水中產生分子態之 NH_3 ，經過過濾後，廢水會再被導入 MD+ 硫酸洗滌系統，藉由 MD 將 NH_3 與水體分離，再於吸收塔內透過硫酸將 NH_3 吸附並產生硫酸銨。硫酸銨會在吸收塔中循環使用，而經 MD 處理後產生的出流水水質良好，可回收至次級工業用水單元使用（莊永豐，2023）。

（五）離子交換樹脂（IER）技術

離子交換樹脂（IER）是由高分子聚合物製成的網狀結構材料，其表面帶有可交換之官能基團，可吸附並置換水體中的帶電離子，藉此達到離子去除的效果。根據官能基團種類不同，IER 可分為陽離子和陰離子 IER。陽離子 IER 帶有負電荷基團（如磺酸基 $-\text{SO}_3^-$ ），常用於去除廢水中的金屬離子（如鈣離子 Ca^{2+} 和鎂離子 Mg^{2+} ）；陰離子 IER 則帶有正電荷基團（如季胺基 $-\text{NR}_4^+$ ），則用於處理廢水中的陰離子及無機鹽類（如氯離子 Cl^- 和硫酸根離子 SO_4^{2-} ）。不同材質的 IER 會有不同的離子選擇性，因此在實廠應用中會將多種 IER 管柱串聯模組化，以將離子去除效率最大化。當 IER 吸附達到飽和後，可使用強酸或強鹼進行反沖洗來恢復 IER 之吸附能力。常見的反沖洗液如 HCl 、 H_2SO_4 、 NaOH 、 NaCl 等。

該技術常應用在各行業別廢水之脫鹽作業、重金屬去除、硬水軟化（2B3T）等處理程序上，處理水質 TDS（總溶解固體）不宜超過 500 mg/L（需頻繁再生），通常會於前端設置過濾設備（如：活性碳塔、砂濾塔）以去除水中懸浮固體，並且可於後段設置 RO 系統降低排水之導電度，以利進行回收使用。

國內某半導體廠使用 IER 系統處理 TMAH 廢水（如圖 2 所示），處理程序中產生的出流水會收集至回收系統供其他用水單元使用。四甲基氯化銨（TMAC）經委外處理後可作為資源化產品，而反沖洗產生的 TMAH 廢水會給供應商進行處理及純化，最後回用於製程中（許哲彰等，2019）。

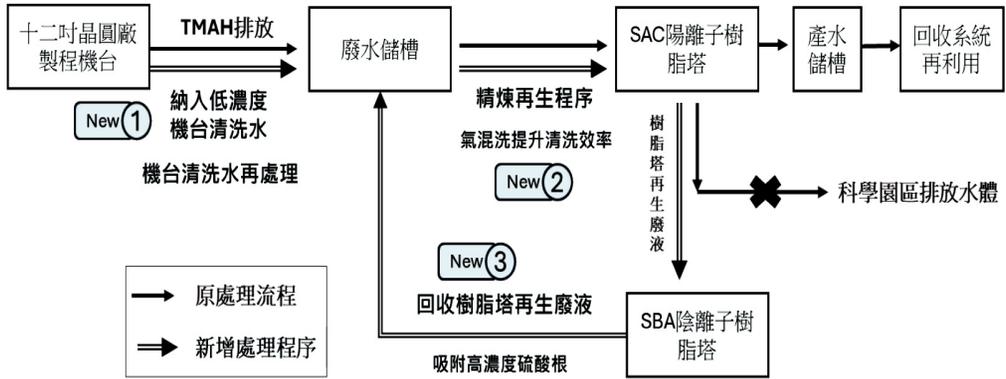


圖 2 某半導體廠以 IER 技術回收 TMAH 之流程圖

(六) 管式金屬電解回收技術

管式金屬電解技術係串聯多個密封式管狀電解筒作為電解槽，進行含重金屬廢水之處理。在電解筒中以 2 個同心管所組成，內心管作為陽極，外心管為陰極，而兩管中間之夾層則為流道。透過於電極上外加電場，將廢水中的金屬離子吸附到電極表面上並發生氧化還原反應。此時陰極吸附的金屬離子會發生還原反應並被固定於電極表面上，以達到離子去除的效果。而處理後之出流水可根據水質情況委外清運，或是回用至其他用水單元使用。在系統運作過程中，被固定於陰極表面的金屬會持續累積形成管狀結構，當系統離子吸附達到飽和後，可將金屬管材取出，在經過純化後可產生高純度（97% 以上）之金屬，可作為資源化產品進行販售。

該技術常應用在電鍍、蝕刻製程的廢水處理，如於電子零組件製造業、印刷電路板業、光電面板業、半導體製造業等產業常將此技術應用於含銅、鈷、鎳廢水之處理及回收。相比於傳統之平板電解槽，管狀電解槽建置所需之空間相對較小，且管狀結構有著更好的流動性，廢水可以極高且固定之流速於電解槽內循環流動，藉此提升系統之質傳效率。同時高流速動亦可達到攪拌之功效，可使廢水中的離子濃度分布更均勻，形成的銅管均勻度也會更高。處理廢水之金屬離子（如銅離子）濃度可達 10,000

mg/L 以上，且在處理過程中會產生高純度之金屬管，可作為資源化產品販售，因此國內現在已有多間廠商將其應用於實廠中。

國內某半導體廠使用管式金屬電解回收技術處理硫酸銅廢液（如圖 3 所示）。該廠每年約會產生 1,680 公噸的硫酸銅廢液，過往都是委外進行處理，每年花費金額高達 1,600 萬元。而在 2022 年啟用管式電解還原系統後，每處理 150 噸之硫酸銅廢液約可產生 4 噸的純銅。經估算後每年淨利可達 1,300 萬元，且處理後低濃度之廢水還會導入離子交換樹脂塔，處理後回收供次級工業用水使用（聯電公司，2023）。

另一家半導體廠與設備商合作建置 Recocell 電解回收系統，處理並回收電鍍廢水中的銅離子與鈷離子，將原先需委外處理廢硫酸銅液轉製為再生銅管（如圖 4 所示）。該系統自 2017 年啟用，該年度已將 1,942 公噸廢硫酸銅轉製為 42 公噸再生銅管，其中 6.7 公噸的再生銅管已轉製成電子級陽極銅。該公司將持續於各廠建置 Recocell 電解回收系統，預估每年約可回收 1.6 萬噸的含銅廢液，並產生 170 噸的再生銅管（紀碧芳等，2018）。



圖 3 某半導體廠之管式電解還原系統



圖 4 某半導體廠之 Recocell 電解回收系統

(七) 薄膜電容去離子 (MCDI) 技術

薄膜電容去離子 (MCDI) 技術係藉由在奈米孔洞碳材電極之間施加低電壓的方式，利用電吸附的原理將帶電的離子儲存於奈米孔洞的電雙層結構中，以達到高效的水質淨化與離子回收目的（如圖 5 所示）。透過移除外部電壓或反向充電的方式進行脫附再生處理，不需要加入酸鹼進行再生而具有高度環境友善性，不造成二次污染。

該技術針對低濃度（如導電度低於 $3,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 或 TDS 低於 $1,500 \text{mg}/\text{L}$ ）之電鍍水或目標水體，其低能耗之優勢將更顯著，如生活用水、工業或農業再生水脫鹽，去除污染物有重金屬如銅、鈷、鉻、硼以及砷等，以及銨離子、硝酸鹽等，不適用於含有氧化性物質（如雙氧水）之廢水。

國內某半導體廠以 MCDI 系統做為洗滌塔出流水的處理設備（如圖 6 所示）。該廠原以導電度控制洗滌塔之補水程序，設定導電度大於 $1,300 \mu\text{S}/\text{cm}$ 時進行補水，直至導電度降至 $1,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。然而在補水稀釋過程中會有大量水體會經由溢流管排放至廢水處理系統，導致水資源的浪費。因此該廠於洗滌塔出水口裝設 MCDI 系統，透過多孔電極之充放電程序，吸附廢水中的 Cl^- 離子，以降低出流水之導電度，並且回收至洗滌塔重複使用（李孟珊等，2020）。

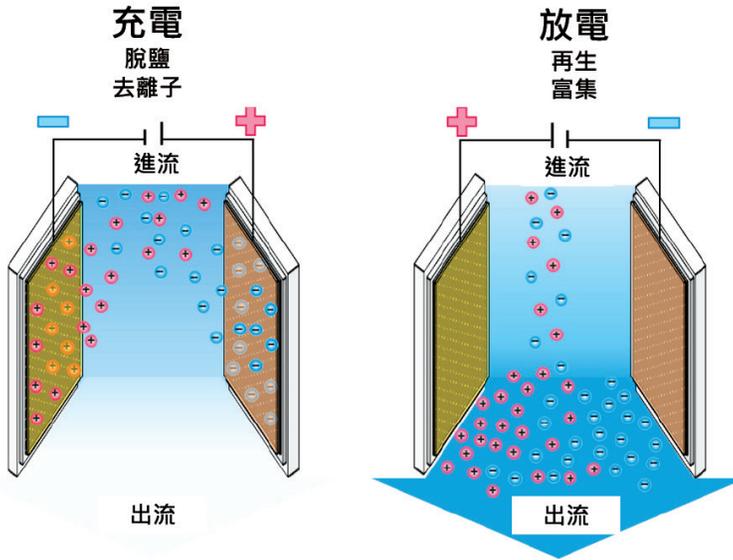


圖 5 MCDI 技術示意圖



圖 6 某半導體廠之 MCDI 系統

三、新興水資源循環技術之減碳效益分析

為評估新興水資源循環技術之減碳效益，本研究蒐整前述 7 項技術於國內產業界實際應用情形，依據各項技術的能資源耗用量（包括用電量及用藥量等）、節水量、產品資源化量等計算技術碳排放量，並與傳統處理技術進行比較，據以評析環境友善且碳排放量較低的技術，提供產業參考應用。以下分別針對碳排放量計算方法、各技術於實廠應用之能源消耗及碳排放量、技術減碳效益等進行說明。

(一) 技術碳排放量計算方法

在計算碳排放量上，分為能資源耗用量以及回收量 2 個部分。能資源耗用量主要是蒐集該處理技術（系統）於實廠應用之用電量與用藥量，並參考台電公司及環境部公布之電力及化學品碳排係數，計算處理技術（系統）之「技術碳排放量」；考量某些技術除了水資源回收外，亦有資源化產品之產出，僅計算產品之能資源消耗將無法體現該技術之經濟價值。故將各技術之回收水量與資源化產品之產量納入減碳量之計算。透過台水公司公佈之每度自來水 CO₂ 排放當量及化學品碳足跡排放係數，計算處理技術（系統）之「技術減碳量」。最後將案例的技術碳排放量與技術減碳量相減，即得到「技術總碳排放量」（如圖 7 所示），若該數值為負數，代表該項技術應屬「負碳技術」，計算公式如圖 8 所示。



圖 7 技術碳排放量計算方法

技術碳排放量	技術減碳量
Eq1. 用電碳排放量 = 用電量 × 電力碳排放係數 $= \frac{\text{用電度數}}{\text{day}} \times \frac{0.494 \text{ kg CO}_2\text{e}}{\text{度}}$	Eq4. 節水減碳量 = 回收水量 × 每度水CO ₂ 排放當量 $= \frac{\text{回收水量 } m^3}{\text{day}} \times \frac{0.156 \text{ kg CO}_2/\text{ton}}{\text{度}}$
Eq2. 用藥碳排放量 = 加藥量 × 化學品碳足跡排放係數 $= \frac{\text{kg 化學品}}{\text{day}} \times \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg 化學品}}$	Eq5. 產品資源化減碳量 = 資源化產品產量 × 化學品碳足跡排放係數 $= \frac{\text{資源化產品產量 kg}}{\text{day}} \times \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg 化學品}}$
Eq3. 技術碳排放量 = 用電碳排放量 + 加藥碳排放量	Eq6. 技術減碳量 = 節水減碳量 + 產品資源化減碳量
技術總碳排放量	
Eq7. 技術總碳排放量 = 技術碳排放量 - 技術減碳量 Eq8. 處理每噸水之碳排放量 = 技術總碳排放量 / 系統處理水量 $= \frac{\text{kg CO}_2}{\text{day}} / \frac{\text{用水量 } m^3}{\text{day}}$	

圖 8 技術碳排放量計算公式

(二) 技術於實廠應用之能源消耗及碳排放量

茲將 7 項水資源循環技術於實廠應用之碳排放量計算結果分述如下：

1. BioNET 技術

某半導體廠以 BioNET 技術處理製程廢水中的氨氮及有機物，平均處理水量為 32,000 CMD，平均用電量為 3,278 度/day，處理過程中會使用 45% NaOH（碳足跡排放係數為 0.675 kg CO₂/kg）調控 pH 值，平均使用量為 58,900 kg/day，計算後得出該系統之用電碳排放量為 1,619 kg CO₂/day，用藥碳排放量為 39,758 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 41,377 kg CO₂/day。該系統處理後產生之出流水可全數回收，忽略去除之氨氮及 COD 質量不計，回收水量約為 32,000 CMD。以自來水碳排當量 CO₂（0.156 kg CO₂/m³）計算，節水減碳量為 4,992 kg CO₂/day。該技術無資源化產品之產出，因此該系統之技術總碳排放量為 36,385 kg CO₂/day，計算處理每噸水之碳排放量為 1.14 kg CO₂/m³。

2. MBR+RO 技術

本研究蒐整 3 個 MBR+RO 技術實廠應用案例，包括 1 家液晶面板廠、1 家半導體廠以及 1 家電子零組件製造廠，分述如下：

(1) 某液晶面板廠

某液晶面板廠以 MBR+RO 系統處理廢水中 TOC、SS、鹽類等物質，廢水經處理後回收作為製程用水使用。該案例平均處理水量為 17,500 CMD，平均用電量約 40,000 度/day，用電碳排放量為 19,760 kg CO₂/day；處理過程中需添加 45 % NaOH，平均加藥量為 2,000 kg/day，用藥碳排放量為 1,350 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 21,110 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 14,000 CMD，計算節水減碳量約為 2,184 kg CO₂/day，系統無資源化產品之產出，故技術減碳量即為 2,184 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 18,926 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 1.08 kg CO₂/m³。

(2) 某半導體廠

某半導體廠以 MBR+RO 系統處理廢水中 TOC、SS、鹽類等物質，廢水經處理後回收供次級工業用水使用。該案例平均處理水量為 1,400 CMD，平均用電量為 6,500 度/day，用電碳排放量為 3,211 kg CO₂/day；處理過程無添加藥劑，故技術碳排放量為 3,211 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 1,000 CMD，水回收率約 70 %，計算節水減碳量約為 156 kg CO₂/day，並且系統無資源化產品之產出，故技術減碳量即為 156 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 3,055 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 2.18 kg CO₂/m³。

(3) 某電子零組件製造廠

某電子零組件製造廠亦採用 MBR+RO 系統進行廢水處理及回收單元，經處理後之水質達到製程使用之標準。平均處理水量為 647 CMD，平均用電量為 2,281 度/day。系統運作過程會於 MBR 槽中加入尿素 (CH₄N₂O) 及 85% H₃PO₄ 等營養鹽以維持微生物活性，尿素平均使用量為 17.6 kg/day (碳足跡排放係數為 1.65 kg CO₂/kg)，磷酸平均使用量為 1.9 kg/day (碳足跡排放係數為 4.65 kgCO₂/kg)。計算該系統之用電碳排放量為 1,127 kg CO₂/day，用藥碳排放量為 38 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 1,165 kg CO₂/day。平均回收水量為 451 CMD，節水減碳量為 70 kg CO₂/

day，無資源化產品，故技術減碳量為 70 kg CO₂/day，計算該系統的技術總碳排放量為 1,094 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 1.69 kg CO₂/m³。

綜合以上 3 個廠碳排放量數據顯示，當處理水量介於 647~1,400 CMD 時，平均碳排放量為 1.94 kg CO₂/m³；而當處理水量較大時，碳排放量可下降至 1.08 kg CO₂/m³。

3. EDR 技術

南部某樹脂及塑膠製造廠以沉浸式薄膜過濾、EDR、RO 3 種處理單元將廠區內排放廢水進行再生處理。該案例平均處理水量為 5,625 CMD，其中 EDR 平均用電量約 1,020 度/day，用電碳排放量為 504 kg CO₂/day；處理過程中需添加 32% HCl，平均加藥量為 3 kg/day，用藥碳排放量為 2 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 506 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 3,000 CMD，計算節水減碳量約為 468 kg CO₂/day，系統無資源化產品之產出，故技術減碳量即為 468 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 38 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 0.01 kg CO₂/m³。

4. MD+ 硫酸洗滌技術

本研究蒐整 2 個半導體廠之 MD+ 硫酸洗滌技術實廠應用案例，分述如下：

(1) 某半導體 A 廠

某半導體廠亦以 MD+ 硫酸洗滌系統處理製程產生之氨氮廢水。該案例平均處理水量為 1,000 CMD，平均用電量約 3,970 度/day，用電碳排放量為 1,961 kg CO₂/day；處理過程中需添加 45% NaOH 以及 60% H₂SO₄，平均加藥量分別約為 8,000 kg/day 以及 1,167 kg/day，用藥碳排放量合計為 5,737 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 7,698 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 1,000 CMD，計算節水減碳量約為 156 kg CO₂/day，並可產出約 6,200 kg/day 的硫酸銨產品（碳足跡排放係數為 1.68 kg CO₂/kg），產品資源化減碳量為 10,414 kg CO₂/day，故技術減碳量即為 10,570 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 -2,871 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 -2.87 kg CO₂/m³。

(2) 某半導體 B 廠

某半導體廠以 MD+ 硫酸洗滌系統處理製程產生之氨氮廢水。該案例平均處理水量為 480 CMD，平均用電量約 3,620 度/day，用電碳排放量為 1,788 kg CO₂/day；處理過程中需添加 45% NaOH 以及 60% H₂SO₄，平均加藥量分別約為 6,000 kg/day，以及 5,400 kg/day，用藥碳排放量合計為 5,611 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 7,399 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 480 CMD，計算節水減碳量約為 74.9 kg CO₂/day，並可產出約 5,000 kg/day 的硫酸銨產品，產品資源化減碳量為 8,400 kg CO₂/day，故技術減碳量即為 8,475 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 -1,076 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 -2.24 kg CO₂/m³。

以上 2 個實廠案例之系統操作碳排放量皆低於水回收與資源化產品回收再利用之合計減碳量，應可認定為廣義之負碳技術。

5.IER 技術

本研究蒐整 2 個 IER 技術之實廠應用案例，包括 1 家半導體廠以及 1 家液晶面板廠，分述如下：

(1) 某半導體廠處理含 TMAH 廢水

某半導體廠以 IER 系統處理含 TMAH 廢水，處理程序中產生之 TMAC 經委外處理後可作為為資源化產品。該系統之處理水量為 19,500 CMD，平均用電量為 44 度/day，用電碳排放量為 22 kg CO₂/day；處理過程中需添加 32%HCl，平均加藥量約為 6,187 kg/day，用藥碳排放量合計為 4,207 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 4,229 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 19,500 CMD，計算節水減碳量約為 3,042 kg CO₂/day，並可產出約 7,500 kg/day 的 TMAH 產品（碳足跡排放係數為 7.41 kg CO₂/kg），產品資源化減碳量為 55,575 kg CO₂/day，故技術減碳量即為 58,617 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 -54,388 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 -2.79 kg CO₂/m³。

(2) 某液晶面板廠處理含鉬廢水

某液晶面板廠以 IER 系統處理含鉬廢水，處理程序中產生之鉬酸鈣可作為為資源

化產品。該系統之處理水量為 2,000 CMD，平均用電量為 200 度/day，用電碳排放量為 99 kg CO₂/day；處理過程中需添加 32%HCl 以及 45%NaOH，平均加藥量分別約為 2,000 kg/day 以及 3,000 kg/day，用藥碳排放量合計為 3,385 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 3,484 kg CO₂/day。該系統平均回收水量約為 1,000 CMD，計算節水減碳量約為 156 kg CO₂/day，並可產出約 38 kg/day 的鉬酸鈣產品（碳足跡排放係數為 16.9 kg CO₂/kg），產品資源化減碳量為 642 kg CO₂/day，故技術減碳量即為 798 kg CO₂/day，經計算該系統之技術總碳排放量為 2,686 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 1.34 kg CO₂/m³。

分析以上 2 個實廠案例之系統操作碳排放量顯示，以 IER 技術處理不同污染物之用電量差異甚大，也直接影響總碳排放量。

6. 管式金屬電解回收技術

本研究蒐整 2 個管式金屬電解回收技術之實廠應用案例，包括 1 家半導體廠以及 1 家液晶面板廠，分述如下：

(1) 某半導體廠處理含銅及鈷廢水

某半導體廠於 2017 年於廠內建置 Recocell 電解回收系統，處理並回收製程產生之銅廢液與鈷廢液，取代過往委外處理。該系統之處理水量為 270 CMD，平均用電量為 1,500 度/day，用電碳排放量為 741 kg CO₂/day。該系統產生之出流水會全數進行回收，回收水量 270 CMD，節水減碳量為 42 kg CO₂/day。而該系統電解反應產生銅金屬管與鈷金屬管皆屬資源化產品。銅管（碳足跡排放係數為 3.87 kg CO₂/kg）的平均產量為 56 kg/day，計算減碳量為 217 kg CO₂/day；鈷管（碳足跡排放係數為 6.40 kg CO₂/kg）的產量為 2.8 kg/day，計算減碳量為 18 kg CO₂/day，合計該系統產生之資源化產品可間接產生 235 kg CO₂/day 之減碳量，合計技術減碳量為 277 kg CO₂/day。經計算系統之技術總碳排放量為 464 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 1.72 kg CO₂/m³。

(2) 某液晶面板廠處理含銅廢水

某液晶面板廠以 Recocell 電解回收系統處理並回收製程產生之銅廢液。該系統之

處理水量為 30 CMD，平均用電量為 400 度/day，用電碳排放量為 198 kg CO₂/day；處理過程中需添加 98%HCl，平均加藥量約為 285 kg/day，計算用藥碳排放量為 82 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 280 kg CO₂/day。該系統產生之出流水會全數進行回收，回收水量 30 CMD，節水減碳量為 4.7 kg CO₂/day。電解反應產生之銅金屬管平均產量為 65 kg/day，計算減碳量為 251 kg CO₂/day，合計技術減碳量約為 256 kg CO₂/day。經計算系統之技術總碳排放量為 24 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 0.79 kg CO₂/m³。

由以上 2 個實廠案例之碳排放量數據顯示，當處理水量介於 30~270 CMD 時，平均碳排放量為 1.25 kg CO₂/m³。

7.MCDI 技術

本研究蒐整 2 個 MCDI 技術之模廠應用案例，包括 1 家都市污水處理廠以及 1 家半導體廠，分述如下：

(1) 某都市污水處理廠放流水再生

某都市污水處理廠以 MCDI 應用於後段回收再生程序，將污水廠產生的低濃度放流水導入 MCDI 系統中去除水中帶電離子，以產生低導電度的再生水。其平均處理水量為 20 CMD，平均用電量為 34 度/day，用電碳排放量為 16.8 kg CO₂/day；處理過程中需添加檸檬酸，平均加藥量分別約為 1.7 kg/day，用藥碳排放量為 10.3 kg CO₂/day，故技術碳排放量為 27.1 kg CO₂/day。該廠平均回收水量為 15.4 CMD，節水減碳量約為 2.4 kg CO₂/day，無資源化產品之產出，故系統減碳量為 2.4 kg CO₂/day。計算技術總碳排放量為 24.7 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 1.23 kg CO₂/m³。

(2) 某半導體廠 ROR 廢水再生

某半導體廠以 MCDI 系統處理廠區純水系統之 ROR 濃排水，平均處理水量 5 CMD，平均用電量為 12 度/day，用電碳排放量為 5.9 kg CO₂e/day；處理過程中需添加檸檬酸（碳足跡排放係數為 5.96 kg CO₂/kg），平均加藥量分別約為 0.29 kg/day，用藥碳排放量為 1.7 kg CO₂/day，合計技術碳排放量約為 7.6 kg CO₂/day。該廠平均回收水量為 3.5 CMD，節水減碳量約為 0.55 kg CO₂/day。無資源化產品產出，故系統減

碳量即為 0.55 kg CO₂/day。經計算技術總碳排放量為 7.1 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 1.42 kg CO₂/m³。

茲將上述 7 項技術之碳排放量綜整如表 4 所示。

表 4 新興水資源循環技術之碳排放量計算結果彙整表

技術名稱	技術碳排放量 (kg CO ₂ /day)					技術減碳量 (kg CO ₂ /day)					技術總碳排放量 (kg CO ₂ /day)	
	處理水量 (CMD)	用電碳排放量	用藥碳排放量	技術碳排放量	回收水量 (CMD)	節水減碳量	產品資源化減碳量	技術減碳量	技術總減碳量	技術總碳排放量	處理每噸水之碳排放量 (kg CO ₂ /m ³)	
BioNET	32,000	1,619	39,758	41,377	32,000	4,992	-	4,992	36,385	1.14		
MBR+RO	17,500	19,760	1,350	21,110	14,000	2,184	-	2,184	18,926	1.08		
	1,400	3,211	-	3,211	1,000	156	-	156	3,055	2.18		
EDR	647	1,127	38	1,165	451	70	-	70	1,094	1.69		
	5,625	504	2	506	3,000	468	-	468	38	0.01		
MD+硫酸洗滌	1,000	1,961	5,737	7,698	1,000	156	10,414	10,570	-2,871	-2.87		
	480	1,788	5,611	7,399	480	74.9	8,400	8,475	-1,076	-2.24		
IER	19,500	22	4,207	4,229	19,500	3,042	55,575	58,617	-54,388	-2.79		
	2,000	99	3,385	3,484	1,000	156	642	798	2,686	1.34		
管式金屬電解回收系統	270	741	-	741	270	42	235	277	464	1.72		
	30	198	82	280	30	4.7	251	256	24	0.79		
MCDI	20	16.8	10.3	27.1	15.4	2.4	-	2.4	24.7	1.23		
	5	5.9	1.7	7.6	3.5	0.55	-	0.55	7.1	1.42		

(三) 新興水資源循環技術之減碳效益分析

為計算各項技術之減碳效益，本研究盤點上述 7 項技術對應之傳統技術（詳表 5 所示），並蒐整傳統技術之實廠操作數據（詳表 6 所示），同時與新興水資源循環技術進行比較與分析，以評估各技術之減碳效益。其中，BioNET 技術之標的污染物包括有機物、氨氮、硝酸鹽氮等（詳表 1 所示），本研究蒐整之實場應用案例係某半導體廠採 BioNET 技術處理製程廢水中的氨氮及有機物，爰將 BioNET 技術對應之傳統處理技術同時納入活性污泥法以及 A2O，以利比較減碳效益之差異。另 MBR 技術之標的污染物為有機物及 SS，為提升回收水之水質，本研究蒐整 3 個實廠應用案例皆以 MBR+RO 進行水回收以符合實際用水需求，惟其用電量、用藥量、回收水量等數據難以分割，爰本研究將活性污泥法列為 MBR+RO 對應之傳統技術。說明如下：

表 5 新興水資源循環技術對應之傳統處理技術

技術名稱	主要對應之傳統處理技術
BioNET	活性污泥法、A2O
MBR+RO	活性污泥法
EDR	化學混凝
MD+ 硫酸洗滌	A2O
IER	化學混凝法
管式金屬電解回收	化學混凝法
MCDI	化學混凝法

1. 活性污泥法

某中部地區產業園區污水處理廠 A 廠將廠商之原廢（污）水經由物理處理，去除廢水中可沉下或浮起之物質，再經由生物處理 - 活性污泥法，利用好氧性微生物分解水中有機物質（包括 BOD、COD 等）。生物處理後經由二沉池固液分離，上層液經由三沉池化學處理後排至快濾池過濾後放流。

該污水處理廠之處理水量為 17,000 CMD，生物處理程序之平均用電量為 10,194 度 /day，用電碳排放量為 5,036 kg CO₂/day，處理過程中無需添加藥劑，故技術碳排

152 產業新興水資源循環技術之碳排放量分析

放量為 5,036 kg CO₂/day，僅計算處理過程的能耗及用藥量之碳排放量，不包括產生的污泥處理處置的碳排放量；該處理系統無節水及產品資源化之效益，故無技術減碳量。經計算系統之技術總碳排放量為 5,036 kg CO₂/day，換算處理每噸水之碳排放量為 0.3 kg CO₂/m³。

2. 化學混凝技術

某中部地區產業園區污水處理廠 A 廠主要是處理金屬表面處理專業區內工廠所排放之氰系、鉻系及酸鹼系廢水。前處理廠所採用之處理程序氰系廢水係利用氧化反應去除廢水中氰化物，鉻系廢水係利用還原反應將廢水中六價鉻還原成三價鉻，再將鉻系及氰系與酸鹼系廢水混合後藉由 pH 調整及化學加藥及混凝沈澱後去除廢水中之重金屬物質（包括鎳、銅、鋅、鉻），處理後之廢水再排放至產業園區污水處理廠做後續生物處理。

該污水處理廠之處理水量為 7,200 CMD，化學混凝程序之用電量為 6,658 度/day，用電碳排放量為 3,289 kg CO₂/day。處理過程中需添加氫氧化鈉 (45%)、多元氯化鋁 (10%)、次氯酸鈉 (10%)、亞硫酸氫鈉 (20%)、過氧化氫 (35%)、硫酸 (50%) 等藥劑，計算用藥碳排放量為 6,872 kg CO₂/day，合計技術碳排放量為 10,161 kg CO₂/day。僅計算處理過程的能耗及用藥量之碳排放量，不包括產生的污泥處理處置的碳排放量，該處理系統無節水及產品資源化之效益，故無技術減碳量，換算處理每噸水之碳排放量為 1.41 kg CO₂/m³。

3.A2O 技術

某南部地區產業園區污水處理廠以 A2O 處理專園區內工廠所排放之廢水。處理水量為 2,950 CMD，A2O 程序之用電量為 4,037 度/day，用電碳排放量為 1,994 kg CO₂/day。處理過程中不需添加藥劑，故技術碳排放量為 1,994 kg CO₂/day。該處理系統無節水及產品資源化之效益，故無技術減碳量，換算處理每噸水之碳排放量為 0.68 kg CO₂/m³。

表 6 傳統處理技術之碳排放量計算結果彙整表

技術名稱	技術碳排放量 (kg CO ₂ /day)				技術總碳排放量 (kg CO ₂ /day)	
	處理水量 (CMD)	用電碳排放量	用藥碳排放量	技術碳排放量	技術總碳排放量	處理每噸水之碳排放量 (kg CO ₂ /m ³)
活性污泥法	17,000	5,036	-	5,046	5,046	0.30
化學混凝技術	7,200	3,289	6,872	10,161	10,161	1.41
A2O 技術	2,950	1,994	-	1,994	1,994	0.68

為計算各項新興水資源循環技術之減碳效益，爰將各項技術之碳排放量與其對應之傳統處理技術進行比較（詳表 7 所示）。另考量技術處理水量不同對碳排放量之影響，故本研究以處理每噸水之碳排放量作為比較基準。新興處理技術若有多筆實廠應用案例，則以處理水量與傳統處理技術最為接近之案例進行比較。由實廠操作數據顯示 EDR、MD+ 硫酸洗滌、IER 以及 MCDI 等 4 項技術相較於傳統處理技術具有減碳效益。其中，MD+ 硫酸洗滌技術因可產生硫酸銨產品，具有較大的產品資源化減碳量，相較於化學混凝技術之減碳效益最佳，平均處理每噸水之碳排放量可減少 3.55 kg CO₂。

表 7 新興水資源循環技術之減碳效益

技術名稱	新興技術碳排放量 (kg CO ₂ /m ³)	對應之傳統處理技術碳排放量 (kg CO ₂ /m ³)		減碳效益* (kg CO ₂ /m ³)
		活性污泥法	A2O	
BioNET	1.14	0.30	0.68	-0.84
		0.30	0.68	-0.46
MBR+RO	1.08	0.30	0.68	-0.78
EDR	0.01	1.41	0.68	1.40
MD+ 硫酸洗滌	-2.87	1.41	0.68	3.55
IER	1.34	1.41	0.68	0.07
管式金屬電解回收	1.72	1.41	0.68	-0.31
MCDI	1.23	1.41	0.68	0.18

- * 備註：1. 減碳效益 = 傳統處理技術碳排放量 - 新興技術碳排放量。負值表示不具減碳效益。
2. 傳統處理技術碳排放量僅計算處理過程的能耗及用藥量之碳排放量，不包括產生的污泥處理處置的碳排放量。

四、結語

本研究探討國內產業有關新興水資源循環技術的應用，在面對複雜污染物以及傳統處理技術的局限下，採用創新以及低碳的技術是提升廢水處理效能與工業用水回收率的關鍵。透過 7 項新興技術於實廠應用之能源消耗及碳排放量分析，以及與傳統處理技術進行比較，顯示部分技術如 EDR、MD+ 硫酸洗滌、IER 以及 MCDI 等，相較於傳統處理技術具有良好的減碳效益。不僅能有效去除廢水中污染物，還能實現廢水回收再利用以及污染物資源化，為產業低碳轉型提供了可行的方案。

隨著全球對環境保護的重視及政策支持，這些技術的發展潛力巨大，產業界應持續關注並積極投入資源研發與應用，尤以兼具廢水處理、水回收再利用以及資源化等多重效益的技術最為關鍵，以提升產業水回收效率，最終達成永續發展與淨零碳排的目標。

參考文獻

經濟部產業發展署（2024），113 年產業用水效能提升計畫。

黃聖智、廖昌郁、蔡翼澤、潘毅峰、陳慶隆、林冠佑、洪仁陽、梁德明（2020），石化業綜合放流水回收再生之場域驗證研究，工業污染防治，第 148 期，p 67-87。

王雅湘（2017），東港溪淨水處理 BioNET 立大功，工業技術與資訊月刊，p 32~35。

工業技術研究院創新水科技研發服務網，奇美實業 EDR 水資源中心介紹，<https://www.itriwater.org.tw/Technology/More?id=1289>。

莊永豐（2023），氨氮處理技術分享，新興廢水處理技術推廣暨臺印永續水環境論壇，2023 年 9 月。

許哲彰、陳澤榆、王俊元（2019），實現綠色製造，十二吋晶圓廠 TMAH 削減量達成年度目標，<https://esg.tsmc.com/ch/update/greenManufacturing/caseStudy/24/index.html>。

聯電公司 (2023)，廢水變黃金，回收硫酸銅廢液再製銅管，落實循環經濟，https://www.umc.com/zh-TW/Html/latest_newsletters/HasLeftContent/2023Q3_1。

紀碧芳、曾宏升 (2018)，台積公司領先業界首創電子級銅物料循環使用，<https://esg.tsmc.com/ch/update/greenManufacturing/caseStudy/13/index.html>。

李孟珊、許桓瑜、關蓓德、侯嘉洪 (2020)，以環境友善思維探討電容去離子技術於產業應用之優勢，工業污染防治，第 150 期，p 141~145。

