

中鋼廢水處理及再生技術開發

Development of Wastewater Treatment and Reclamation Technologies in CSC

葉茂淞¹ ■ 鄭竹逸² ■ 陳彥旻²

M.S. Yeh, C.I. Cheng, Y.M. Chen

中鋼公司為台灣唯一一貫作業大煉鋼廠，使用大量製程冷卻水，103 年每日平均用水量約 13 萬 m³/day，同時產生約 4 萬 m³/day 工業廢水。為降低水資源耗用量，持續減少污染排放量，中鋼積極開發廢水處理及再生技術，創造廢水回收績效，以成為一流環保綠色鋼廠為目標。本研究成功開發以 MBR 處理中鋼煉焦廢水及冷軋含油廢水之高效新技術；使煉焦廢水場 S.S. 由不定期 >100 降至 <5 mg/L，COD 去除率由 88% 增加至 93%，大幅提升後續臭氧處理系統之效率，有效降低中鋼放流水 COD 排放量約 720 kg COD/day；再者，使第二冷軋廢水場出流水之 COD 由原高達 152 降低至 <80 mg/L，減少 COD 排放量約 449 kg COD/day。此外，本研究亦針對熱軋冷卻濃縮排放水及電鍍鋅線洗滌廢水，開發出以 EDR 作為核心脫鹽系統且經濟可行之再生流程技術，分別完成 (1) 再生水應用於冷卻水系統水質調控，降低鈣硬度並提高穩定性，成功解決熱軋工軋打滑問題；該濃縮排放水再生工場電導度去除率約 80%，回收率達 75%，再生水產量約 550 m³/day；及 (2) 產製再生純水供應電鍍鋅線，可節省純水生產成本，減少廢水處理費用；該洗滌廢水再生工場採用氧化混凝沉澱及纖維過濾為前處理系統，IX 為後精製系統，回收率達 70%，再生純水日產量約 538 m³、電導度 < 10 μS/cm。

關鍵詞：廢水處理、廢水再生、MBR、EDR

CSC is the largest steel making company in Taiwan which consumed 130 thousand m³ water/day and discharged 40 thousand m³ wastewater/day in 2015. CSC developed wastewater treatment and reclamation technologies to decrease water usage and pollution. This study successfully developed a high efficiency MBR technology to treat coking and cold rolling wastewater. The MBR system reduced S.S. concentration in coking wastewater from >100 mg/L to <5 mg/L, enhanced COD removal rate from 88% to 93% (reduced COD discharge of 720 kg COD/day), and stabilized the efficiency of following O₃ treatment system. The MBR system decreased COD concentration of cold rolling wastewater from 152 mg/L to <80 mg/L (reduced COD discharge of 449 kg COD/day). This study established an economical EDR desalination technology to reclaim hot rolling cooling and EGL rinse wastewater. The EDR system in hot rolling process reclaimed 550 m³/day cooling wastewater with a conductivity removal rate of 80%, and a recovery rate of 75%. Pumping the high quality reclaimed water into hot rolling cooling water system could raise stability of cooling water quality and avoid fine roller slipping. Applied the EDR system with pre- and post-treatment units in EGL reclaimed 768 m³/day rinse wastewater and produced 538 m³/day demineralized water with conductivity of <10 μS/cm. It could reduce the cost of demineralized water produced from fresh water and wastewater treatment.

Key words: wastewater, MBR, EDR, reclaimed water

壹、前言

中鋼公司為台灣唯一一貫作業大煉鋼廠，製程需大量使用水作為冷卻、除銹、潤滑、洗塵及發電等用途。數年來中鋼製程產量雖逐漸擴充，但因勵行用水管理及回收水再利用，同時配合臨海工業區區域能源整合，使得平均每日原水使用量僅約 12.6 萬 m³ (表 1)。

表 1 中鋼歷年用水資訊

	99年	100年	101年	102年	103年
原水補充用水量 (萬噸)	5,200	5,269	4,832	4,828	4,863
製程用水回收率	97.9%	98.2%	98.3%	98.3%	98.3%
製程用水循環量 (萬噸)	237,632	280,190	278,065	275,264	273,660
單位產品用水量 (噸/噸鋼胚)	5.09	4.84	4.96	5.24	5.02

再者，中鋼積極進行水污染防治工作，除持續強化設備運轉管理，提升各類用排水水質外，亦設置處理總容量達 7.96 萬 m³/day 的廢水處理設施，更加強雨水排放口之監控管理，針對原料區逕流廢水設置 4 萬 m³/day 的處理場。中鋼 103 年全年放流水排放量為 1,397 萬 m³，較 102 年 1,495 萬 m³ 減少 98 萬 m³，且其化學需氧量 (Chemical oxygen demand, COD) 濃度為 45.9 mg/L，懸浮固體 (Suspended solid, S.S.) 濃度為 5.5 mg/L，遠優於放流水標準。

此外，中鋼涓滴計較，努力節水，實績上設立產水量 8,000 m³/h 之原水軟化系統，降低原水硬度，提升冷卻水濃縮倍水，達到減少補水量之目的。廣設廠房屋頂雨水收集回收設施，103 年雨水回收量達到 33.8 萬 m³，有效利用不穩定之雨水資源。另，設置工業廢水純化場，以超過濾 (Ultra filtration, UF)- 逆滲透 (Reverse osmosis, RO)- 離子交換樹脂 (Ion exchange resin, IX) 程序回收中鋼放流水，產製 13,500 m³/日除礦水，且回收 4,800~6,800 m³/day 之 RO 濃排水進行高爐水淬，作為次級用水。

為進一步提升中鋼公司廢水處理與回收再利用之積效，本研究發展薄膜生物反應器 (Membrane bioreactor, MBR) 技術與倒極式電透析 (Electrodialysis reversal, EDR) 技術，分別應用於中鋼煉焦廢水及冷軋含油廢水處理，與熱軋冷卻濃縮排放水及電鍍鋅線洗滌廢水再生，效益顯著。

貳、中鋼水系統及應用技術介紹

2.1 中鋼水系統簡介

中鋼公司目前水源僅來自鳳山水庫供應之工業用水。原水進入蓄水池後先經原水處理系統沉澱、軟化，再分別供應給純水系統用於發電及製程、洗塵水系統、直接冷卻水系統、間接冷卻水系統及民生用水系統，並分別產生冷軋廢水、洗塵廢水、冷卻濃縮排放廢水、衛生與煉焦廢水。而中鋼為妥善處理前述各類廢水，以符合環保法規並善盡企業社會責任，設置有冷軋廢水處理系統、工業廢水處理系統及生化廢水處理系統，確保放流水 100% 達標，甚至優於排放

標準（圖 1）。本研究之目的即為提升冷軋及生化二廢水處理系統之效率，並回收處理製程洗滌與冷卻用水再利用，其中主要應用之二關鍵技術：MBR 與 EDR 法處理廢水及再利用，分別簡介如下。

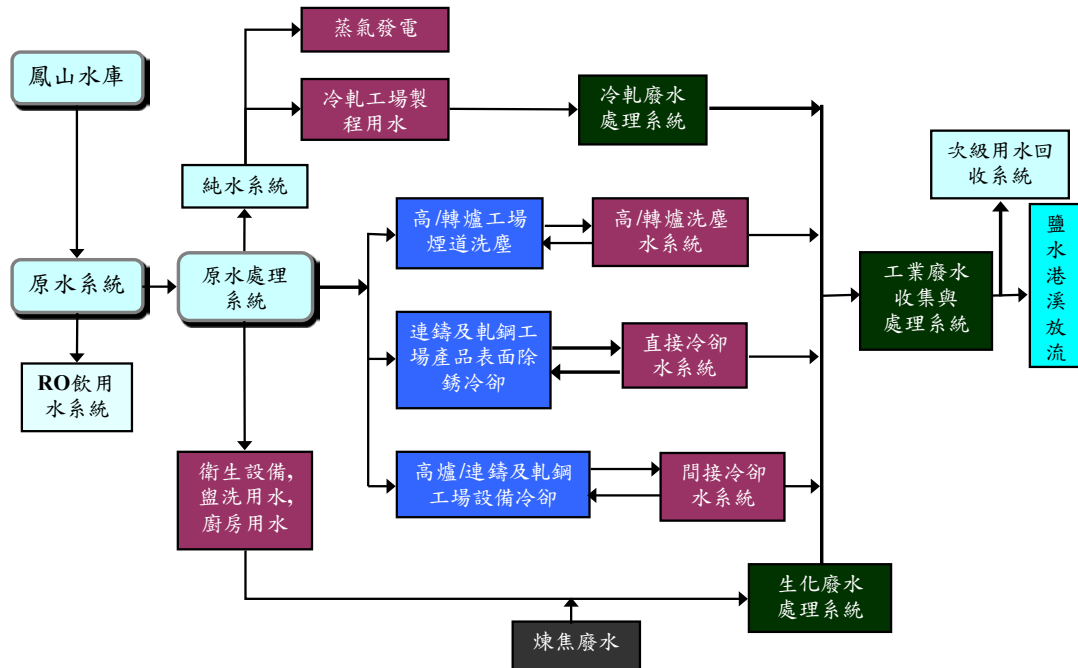


圖 1 中鋼水處理系統

2.2 薄膜生物反應器 (Membrane bioreactor, MBR) 技術

所謂 MBR 技術，即是將生物處理程序（例如活性污泥系統）與薄膜分離程序結合在單一反應槽體內之技術（圖 2）。目前 MBR 技術採用之薄膜以超過濾 (Ultrafiltration, UF) 膜及微過濾 (Microfiltration, MF) 膜為主。MBR 技術近十幾年在國內外快速發展，已從實驗室研究規模發展至實廠應用⁽¹⁻⁶⁾。

MBR 主要降解有機污染者是生物反應系統之微生物，而薄膜分離程序是利用薄膜孔洞之過濾機制將生物反應槽中懸浮固體物（包含微生物）與水溶液進行分離。該二種處理程序結合，一方面可增濃微生物反應槽內微生物量，增加生物反應系統處理效率，同時以薄膜之微孔隙過濾，固液分離後水質之懸浮固體物可達回收再利用之標準⁽⁷⁻⁹⁾。其進行固相與液相分離時所利用到的驅動力 (Driving force) 為壓力差，操作時此壓力差通常由抽水幫浦提供，並以透膜壓力 (Transmembrane pressure, TMP) 表示。當系統驅動力增大時，相對薄膜的通量 (Flux) 也會變大，同時也會增加薄膜表面積垢的速度⁽¹⁰⁻¹¹⁾。

本研究經實驗室、模場 (Pilot plant) 研究、評選後，採用美國 GE 之 MBR 系統應用於處理煉焦廢水，與國產康那香 MBR 系統應用於冷軋含油廢水處理。

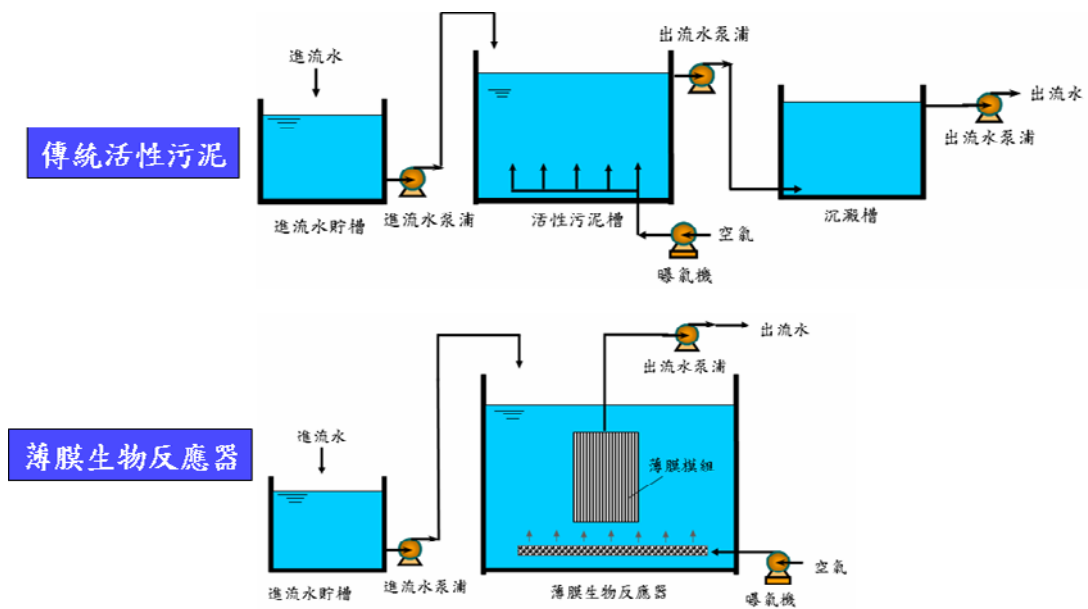


圖 2 MBR 與傳統處理程序比較

2.3 倒極式電透析 (Electrodialysis reversal, EDR) 技術

電透析 (Electrodialysis, ED) 處理技術是利用陽離子只能穿透陽離子交換膜，而陰離子只能穿透陰離子交換膜的特性，在外加直流電場的作用下，水中的陰離子移向陽極、陽離子移向陰極（反離子遷移），最後得到淡水及濃水，達到淡化除鹽的目的（圖 3）⁽¹²⁻¹⁷⁾。EDR 則是將電透析處理技術作進一步修正，定時進行電透析直流電正負極及內部導流的切換，能自動清洗離子交換膜表面上的結垢，可增加電透析系統的操作穩定性及壽命。

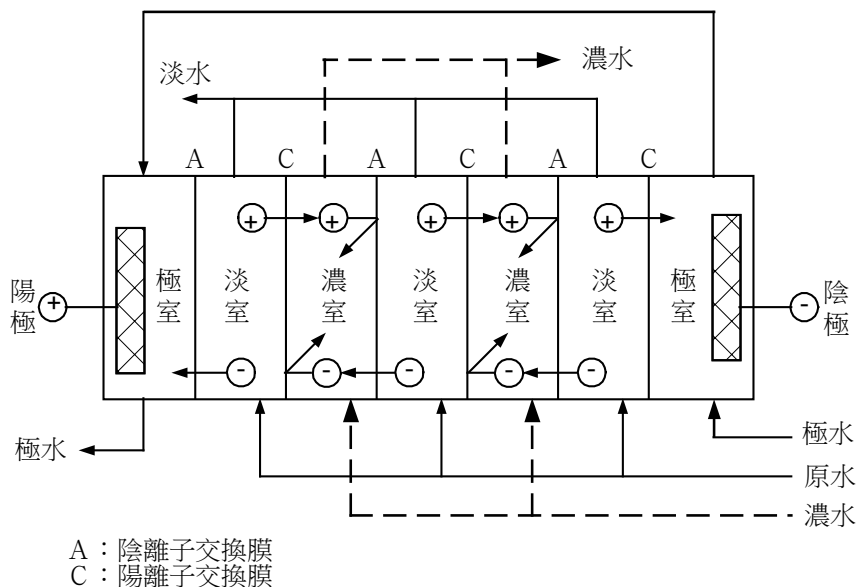


圖 3 電透析設備脫鹽的示意圖

由於 EDR 藉由每隔一定時間將兩端電極極性互換，且淡水及濃水之控制閥亦隨之切換，如此反覆操作，能自動清洗離子交換膜表面上的結垢，增加電透析系統的操作穩定性及壽命之外，ED 膜更較 RO 膜具備較好的物理性及抗化性（包括耐 SiO_2 ），對於雜質、膠質及細菌的容忍度亦較高。

本研究與工研院材化所及國內水工社公司合作開發 EDR 水回收再生技術，應用於中鋼熱軋製程冷卻濃縮排放水及電鍍鋅產線洗滌廢水之回收處理再利用。

參、結果與討論

3.1 MBR 於中鋼生化廢水處理場之研究與應用

中鋼生化廢水（衛生與煉焦廢水混合後稱之）仰賴活性污泥系統去除 $>85\%$ 之 COD，因此，廢水生物處理系統之穩定性非常重要，原處理流程如圖 4 所示。由於產線不斷擴充，生化廢水水量與 COD 均超過活性污泥系統原設計值，影響生物處理系統之穩定性，不定期使得處理後二級出流水之 COD、S.S. 遽增，造成活性污泥流失及降低後續臭氧處理效率之異常。因此，為增加廢水生物處理系統之預度，並降低二級出流水 S.S. 濃度，提升後續臭氧系統之處理效率，本研究建立 MBR 處理生化廢水之技術。

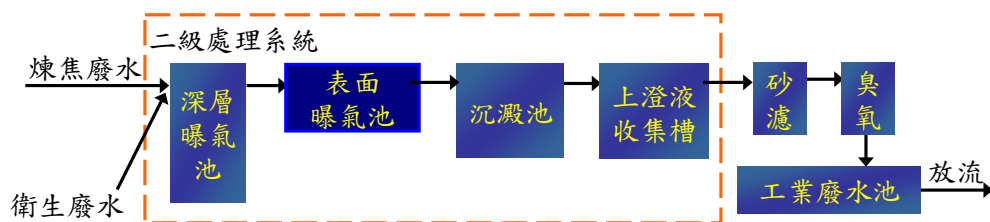


圖 4 中鋼生化廢水場原處理流程

本研究以模場研究篩選國內外五種商業化之 MBR 模組，其中有三廠家之 MBR 模組成功通過測試，產水水質及薄膜抗垢效率符合要求。研究獲得處理生化廢水之最適操作參數為：Flux 控制於 $12.5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ 時，膜壓上升緩慢，適合長期操作；原生物處理系統之活性污泥濃度 (Mixed liquor suspended solids, MLSS) 可由 $3,000 \sim 5,000 \text{ mg/L}$ ，提高至 $8,000 \sim 12,000 \text{ mg/L}$ ；水力停留時間 (Hydraulic retention time, HRT) 可由 $24 \sim 30 \text{ h}$ 縮短至 16 h 。中鋼選定實績較多之美國 GE 商業化 MBR 系統建造亞洲第一個以 MBR 技術處理煉焦廢水之實場，實場改造如圖 5，將 MBR 薄膜置於原活性污泥池中，取代原沉澱池之固液分離功能，處理水量達 $7,200 \text{ m}^3/\text{day}$ 。

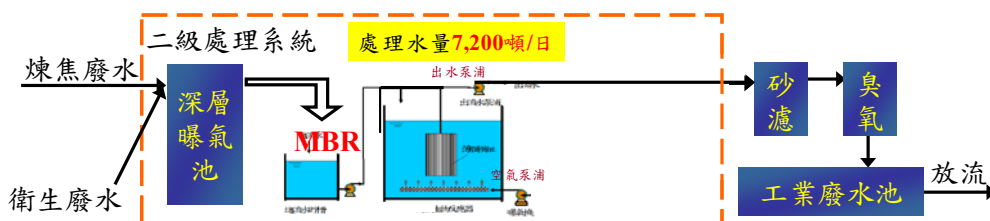


圖 5 增設 MBR 系統後之中鋼生化廢水處理流程

實場運轉成效顯示（表 2），MBR 生物系統除可承受突增之高通量負荷外，(1) 對二級出流水水質改善成效顯著，S.S. 由不定期 >100 mg/L 降至 <5 mg/L、COD 下降 10~20%；(2) 大幅提升後續臭氧高級處理系統之處理效率；(3) 使生化廢水處理場整體 COD 去除率由 88% 增加至 93%，相當成功。

表 2 中鋼生化廢水場增設 MBR 處理系統前後之水質 COD 比較

	二級出流水COD(mg/L)		臭氧處理後出水COD(mg/L)	
	MBR建立前	MBR建立後	MBR建立前	MBR建立後
平均值	277	219	268	168
標準差	59	36	82	37

3.2 MBR 於中鋼冷軋廢水處理場之研究與應用

冷軋廢水中含乳化液、脫脂劑、潤滑油、界面活性劑、硫化物、S.S. 以及酸、鹼等有機或無機的污染物，由於成分複雜，傳統多以物化方法處理，即加藥、破乳、混凝、沈澱或浮選、過濾、強氧化等程序，但處理後出水難達標排放，且存在二次污染等問題，難以符合環保標準。中鋼第二冷軋廢水場原處理流程如圖 6 所示，分別接收酸洗廢水、含油廢水及鹼洗廢水，進行物化處理；其中含油廢水及鹼洗廢水之 COD 貢獻度約佔冷軋廢水之 80%，二者 COD 貢獻度主要來自軋延液之界面活性劑及溶解性油脂。因此，本研究之主要處理對象鎖定為混合含油廢水及鹼洗廢水之冷軋含油廢水。

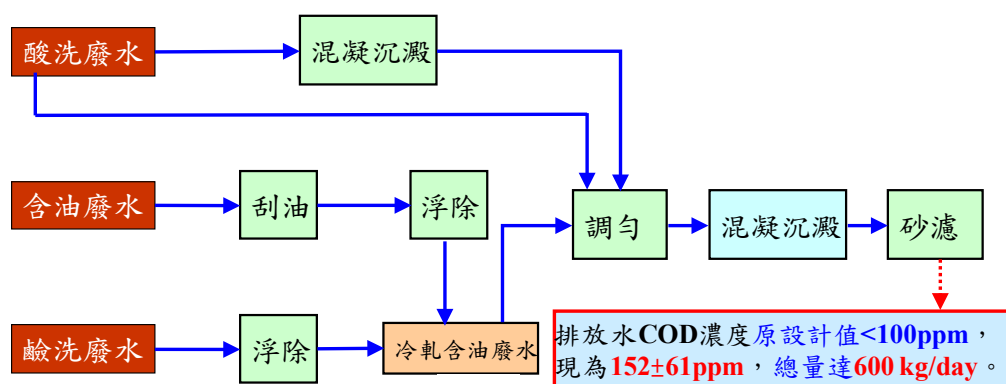


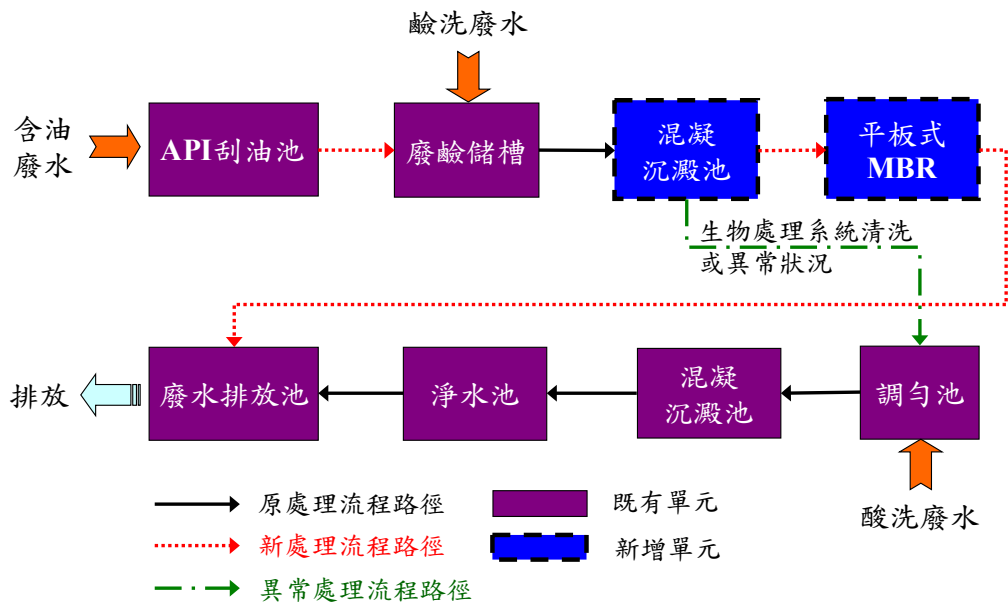
圖 6 中鋼第二冷軋廢水場原物化處理流程

本研究先於實驗室研究國內外三種不同型式之 MBR 模組，結果顯示國內康潔公司之 MBR 系統較適合處理該冷軋含油廢水。因此，建置操作體積為 1.63m³ 之 MBR 模場，內置 3 片長 × 寬為 100cm × 50cm 之平板膜（總表面積為 13 m²），研究測試其 MBR 模組效能。研究獲得處理冷軋含油廢水之最適操作參數：Flux 為 0.30 m³/m² · d，MBR 反應槽之 MLSS 為 9,000~10,000

mg/L，HRT 為 10 h，反洗頻率 1 次/day、藥洗週期 ≥ 6 個月。

確認技術可行後，中鋼以國內康潔商業化 MBR 系統建造處理能力達 1,800 m³/day 之實場，原物化處理流程改造如圖 7，即含油廢水先經油水分離單元處理後，與鹼洗廢水混合調勻成冷軋含油廢水，再進入以原浮除單元改造之混凝斜板沉澱單元處理，最後進入 MBR 進行微生物降解有機物與薄膜固液分離，MBR 出流水與處理過後之酸洗廢水匯流達標後，排入中鋼工業廢水處理場。

實場運轉成效顯示，在冷軋含油廢水 COD 及 SS 分別為 1,590 \pm 725 及 211 \pm 92 mg/L 之條件下，經新設 MBR 系統處理後，分別下降至 56 \pm 11 及 3 \pm 2 mg/L，且油脂亦低為 3 \pm 1 mg/L，符合 COD<80 mg/L、S.S.<5 mg/L、油脂 <8 mg/L 之水質處理研究目標，同時遠優於環保法規要求，改善效果顯著。



3.3 EDR 於中鋼熱軋直接冷卻排放水之研究與應用

如圖 8 所示，中鋼熱軋製程功能為在高溫狀態下將扁鋼胚軋延成熟軋鋼捲，其中精軋與粗軋程序使用直接冷卻水控制溫度，直接冷卻水完成熱交換後回到冷卻水塔進行降溫後循環利用，然因蒸發、噴濺作用，當冷卻水逐漸濃縮至一定倍率後，必須適當排放並補充新水，控制適當水質，以確保冷卻水系統不發生結垢、腐蝕問題，製程能穩定運轉，且不會影響產品品質。本研究即針對該須排放之濃縮冷卻水，研發適當之 EDR 回收處理流程，以再生該濃縮冷卻水，達到水資源於製程中循環再利用之永續目標。

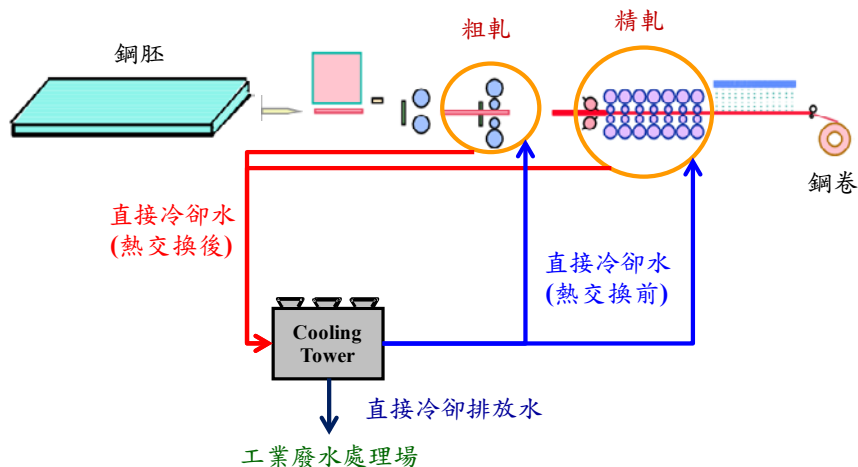


圖 8 中鋼熱軋製程與直接冷卻水系統

本研究先以實驗室 EDR 小型測試機組及模場設備，完成濃縮冷卻水之最適操作參數與工程設計參數建立，再於現場設立具備 EDR 核心技術之濃縮冷卻水再生實場。為因應現場有限之空間，1,200 對膜片分為 4 大模組，每個模組有 300 片膜對，採兩極兩段式設計，兩座串連為一組，再兩組並連為整個系統（圖 9）。採用 2 級 2 段並聯兩組可以確保機台維修時仍能保有 50% 的產水量，級間的膜對數較少，膜間的夾緊效果較佳，但其缺點為 (1) 電級板使用量較多，成本較高，(2) 配電配管及控制較為複雜。

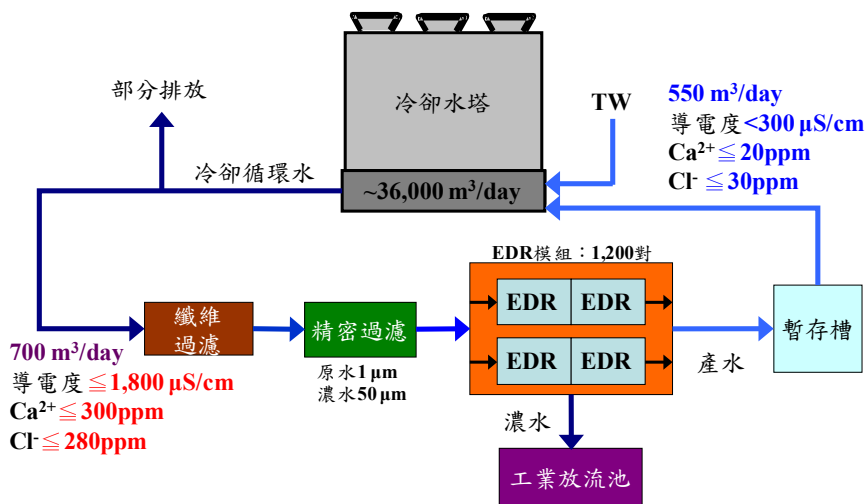


圖 9 增設 EDR 再生系統後之中鋼熱軋直接冷卻水處理流程

該實場設計產能 550 m³/day，濃縮冷卻水回收率 $\geq 75\%$ ，脫鹽率 $\geq 80\%$ 。功能測試期間之濃縮冷卻水導電度在 $1,350 \pm 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，以 130V 之脫鹽電壓之操作條件下，再生水水質 pH 5.0~7.0、導電度 $\leq 300 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\text{Ca}^{2+} \leq 20\text{ppm}$ 、 $\text{Cl}^- \leq 30 \text{ppm}$ ； $\text{SO}_4^{2-} \leq 120 \text{ppm}$ ，符合規範。連

續運轉期間濃縮冷卻水導電度變化度大為 1,000~1,900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，經研究測試找尋不同導電度產生極限電流之過電壓範圍，建立本回收再生系統最適脫鹽條件，即導電度 1,600~2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、1,200~1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 及 <1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之最適操作電壓，分別為 150V， $130 \pm 10\text{V}$ 及 105V。

本 EDR 回收濃縮冷卻水再生實場之實際應用效果：由於再生水成本（約 13~15 元/ m^3 ）低於工業用水水價，可節省補水水費及廢水處理費，減少枯水期補水/排水量 439 m^3/day ，豐水期減少補水/排水量 239 m^3/day ，減少補水及減廢效益高達 660 萬元/年；再者，因再生水之 Ca^{2+} 及 Cl^- 濃度較工業用水低，具有穩定直接冷卻水水質之功效，使直接冷卻水質 Ca 硬度之變異度從 $\pm 22 \text{ ppm}$ 穩定至 $\pm 11 \text{ ppm}$ ， Cl^- 則從 $\pm 24 \text{ ppm}$ 穩定至 $\pm 15 \text{ ppm}$ ，更進一步完全克服精軋工輥因水質不佳之打滑問題，使打滑次數從 53 次/年減少為 0 次/年。

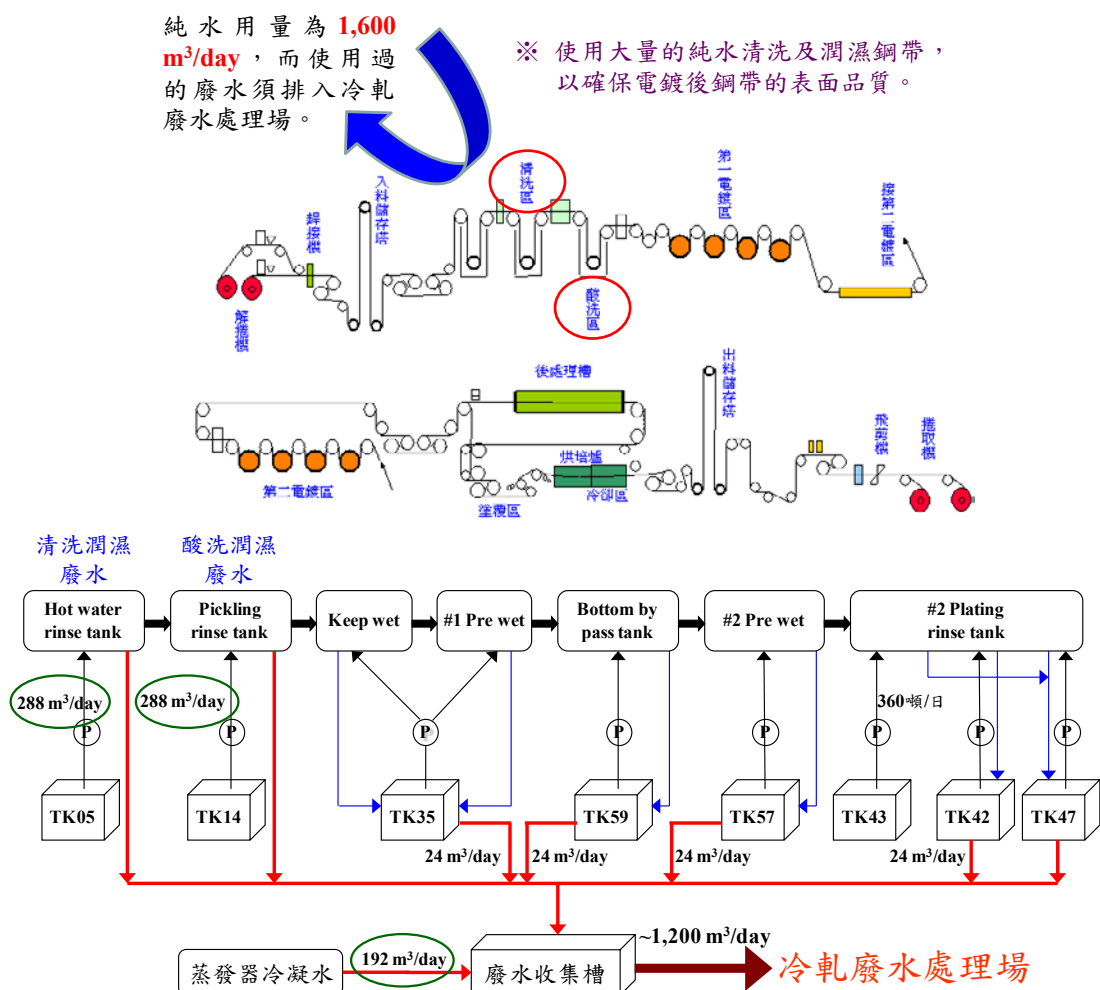


圖 10 中鋼電氣鍍鋅線製程用水示意

3.4 EDR 於中鋼電氣鍍鋅線洗滌廢水之研究與應用

中鋼軋鋼三廠電氣鍍鋅線 (Electrolytic Galvanizing Line, EGL) 的製程中須使用大量的純水清

洗及潤濕鋼帶，以確保電鍍後鋼帶的表面品質。EGL 滿載的純水用量為 1,600 m³/day (圖 10)，居軋鋼三廠之首位，每日用水成本即超過 10 萬元；而使用過的廢水須排入冷軋廢水處理場，每日廢水處理成本約 13 萬元。為降低 EGL 生產成本，及配合中鋼之節水策略，使水資源的運用與效益達到最大化，如何在製程中篩選適合回收的廢水源，並建立回收處理再利用技術，實刻不容緩。

考量水質及水量因素，經研究調查選取 EGL 之清洗潤濕廢水、酸洗潤濕廢水及蒸發器冷凝水，作為廢水回收處理為純水再利用之對象，合稱洗滌廢水。本研究陸續完成 EGL 洗滌廢水回收處理為純水之流程技術開發與可行性評估，確認氧化混凝沉澱/纖維過濾/倒極式電透析 EDR/IX 之處理流程經濟可行，並以模場研究基本操作參數及全處理流程之工程設計規劃後，於現場設立處理量 768 m³/day、回收率達 70% 之高效率 EGL 洗滌廢水再生實場，產製純淨合格之純水回到製程再利用。

如圖 11 所示，本 EGL 洗滌廢水再生實場採用 EDR 作為核心脫鹽系統，EDR 之脫鹽率達 85% 以上。再者，為避免 EDR 使用之陽離子交換膜被洗滌廢水中之 Fe²⁺ 毒化，而無法以鹽酸再生，利用氧化混凝沉澱及纖維過濾前處理系統，將總鐵(T-Fe)從 40~70 mg/l 處理至 <0.1 mg/l；最後，EDR 系統產製之淡水再經由 IX 系統精製，使再生水達導電度 < 10 μS/cm 之 EGL 使用純水等級。

本研究結果不但節省純水生產成本，減少廢水處理費用，更創造廢水回收績效，年效益達 1,160 萬元，除持續提升中鋼節水效益，更落實環保節能政策。

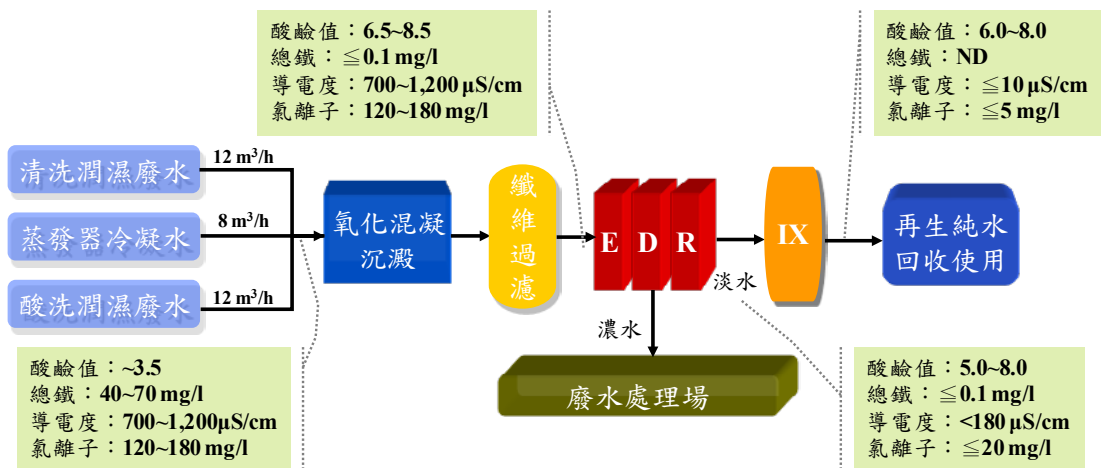


圖 11 中鋼 EGL 洗滌廢水再生流程

肆、結 論

1. 4.1 中鋼生化廢水處理場與第二冷軋廢水處理場，經研究分別由傳統活性污泥處理及物化處理系統，成功改造成 MBR 處理系統，提升整體處理效率，克服老場空間不足之問題。新增二 MBR 系統共降低中鋼放流水污染物排放量 1,170 Kg-COD/day。粗估可增加約 11,000 m³/

day 之工業廢水回收空間，改善效果顯著。

4.2 經完整研究開發，中鋼設立熱軋直接冷卻排放水回收系統，將冷卻濃縮排放水處理至優於工業用水水質，降低補水/排水量，穩定水質，效益約 666 萬元/年。再者，增設 EGL 洗滌廢水回收處理系統，將洗滌廢水處理至純水等級，節省純水使用成本，減少廢水處理費用，效益約 1,163 萬元/年。二廢水再生系統共可創造約 30 萬 m³/年之再生水績效，可提供業界處理回收製程及冷卻廢水之參考。

伍、誌 謝

感謝工研院材化所、康潔公司、美商 GE 公司、水工社公司、中宇公司與中鋼公司共同合作研究開發，使本研究得以順利進行，實場充分落實應用，特此致上感謝之意。

陸、參考文獻

- (1) Y. Shimizu, Y. I. Okuno, K. Uryu, S. Ohtsubo, and A. Watanabe, "Filtration Characteristics of Hollow Fiber Microfiltration Membranes Used in Membrane Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment", Wat. Res., 30 (10), 2385, 1996.
- (2) M. Cheryan, "Ultrafiltration and Microfiltration Handbook", Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA, USA, 1998.
- (3) N. Cicek, J. P. Franco, M. T. Suidan, and V. Urbain, "Using a membrane bioreactor to reclaim wastewater", J. Am. Water works Assoc., 90, 105-113, 1998.
- (4) S. Adham, P. Gagliardo, L. Boulos, J. Oppenheimer, E.-J. Whitman, and R. Trussell, "Overview of the Membrane Bioreactor Process for Wastewater Treatment and Water Repurification", from "Membrane Technologies for Industrial and Municipal Wastewater Treatment and Reuse", Water Environment Federation, 371, 2000.
- (5) T. Stephenson, S. Judd, B. Jefferson, and K. Brindle, "Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment", IWA Publishing, London, 2000.
- (6) Simon Judd and Claire Judd, The "MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment", Elsevier Ltd., 1st edition, 2006.
- (7) E. H. Bouhabila, R. Ben Aim, and H. Buisson, "Microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling (application to wastewater treatment)", Desalination, 118, 315-322, 1998.
- (8) W. Sholz, "Treatment of oil contaminated wastewater in a membrane bioreactor", Water Research, 34: 14, 3621-3629, 2000.
- (9) W.K. Chang, A.Y.J. Hu, R.Y. Horng and W.Y. Tzou, "Membrane bioreactor with nonwoven fabrics as solid-liquid separation media for wastewater treatment", Desalination 202, 122-128, 2007.
- (10) E. H. Bouhabila, R. Ben Aim, and H. Buisson, "Fouling characterisation in membrane bioreactors", Sep. Purif. Tech., 22-23, 123-132, 2001.
- (11) T. H. Bae and T. M. Tak, "Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membrane during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor", J. Membrane Sci., 264, 151-160, 2005.
- (12) Nevill J.B., Christopher P.J. and Mark D.N., "Electrochemical ion exchange", J. Chem. Tech. Biotechnol., Vol.50, pp.469-481, 1991.
- (13) Zhou C.D., Taylor E.J., Stortz E.C. and Sun J.J., "In-process recycling of plating wastewater with a novel ELECTROCHANGE recovery system", 18th AESF/EPA Pollution prevention control conference, pp.245-256, 1997.
- (14) an der Hoek J.P., Rijnbende D.O., Lokin C.J.A., Bonne P.A.C., Loonen M.T., Hofman J.A.M.H., "Electrodialysis as an alternative for reverse osmosis in an integrated membrane system", Desalination, Vol.117, pp.159-172, 1998.
- (15) Renz R.P., Fritchley T. R., Sun J.J., Taylor E.J. and Zhou C.D., "In-process recycling of plating rinse water for PWB operations using an electrochange recovery system", 19th AESF/EPA Pollution prevention control conference., 147-156, 1998.
- (16) Zhou C.D. et al., "Method of removing metal salts from solution by electrolysis an electrode closely associated with an ion exchange resin", US patent 5804057, Faraday Technology, Inc., Ohio, 1998.
- (17) Richard W. Baker, "Membrane Technology and Applications," McGraww-Hill, 2000. *