109年度大用水戶輔導節水
總管理團隊計畫

產業先進
節水技術與案例

主辦單位：經濟部水利署

執行單位：財團法人環境與發展基金會

協辦單位：國立交通大學
環興科技股份有限公司
財團法人台灣產業服務基金會

經濟部水利署

財團法人環境與發展基金會

目錄
Catalog

壹．薄膜電容去離子技術 1

一．技術原理與優勢 1

二．應用案例 2

(一).國外應用案例 2

(二).國內應用案例 3

三．參考資料 4

貳．薄膜生物反應器技術 5

一．技術原理與特點 5

二．國外應用案例說明 8

(一).新加坡裕廊島 (Jurong) 石化工業區污水廠案例 8

(二).阿拉伯聯合大公國沙迦 (Harjah) 某工廠廢水回收案例 9

三．參考資料 10

參．冷卻水塔節水技術 11

一．冷卻水塔蒸發水回收系統 11

(一).技術原理與特點 11

(二).國外應用案例說明 12

二．陶瓷球處理裝置 13

(一).技術原理與特點 13

(二).國外應用案例說明 14

三．參考資料 15

壹．薄膜電容去離子技術

薄膜電容去離子技術 (Membrane Capacitive Deionization, MCDI) 因預處理需求低、設備維護簡單、能耗低、水回收率高等技術優勢，近年來已受到各界矚目，並與逆滲透 (Reverse osmosis, RO) 及電透析 (Electrodialysis, ED) 技術形成較强的競爭關係。

以能耗量為例，有別於傳統的 RO 及 ED 高耗能的薄膜脫鹽技術， MCDI 能耗約在 0.1~0.6 kWh/m^3 之間，水回收率可達 85 % 以上 (傳統 RO 能耗 1.5~2.0 kWh/m^3，水回收率為 50~75 %)。

也因為其技術優勢，MCDI 近年來已廣泛應用於純水製造、硬水軟化、海水淡化、重金屬去除、地下水處理、鍋爐用水處理、放流水再淨化、特殊廢水目標物選擇性去除等，成為新一代水處理及水回收技術 1,2。以下將針對此創新脫鹽技術之技術原理、優勢及應用案例等進行說明。

一． 技術原理與優勢

MCDI 之週期由電吸附和電級再生兩個步驟組成，其原理是利用具有電容性的電極，將之放置在水中，在低電壓下產生正極和負極，當原水通過電雙層時，通過施加在流體上的靜電場，水中的陽離子會被靜電力吸引到負極，相對的水中陰離子就會被吸引到正極，並被吸附在電極表面形成的電雙層中，使溶液中的離子濃度大大降低，從而達到去除離子的目的。而使用過的電極可以利用斷路 (或倒極)，使原本吸附在電極上面的離子脫附而再生產生濃鹽水，如此電吸附 / 脫附交替的操作，就可以達到脫鹽之目的，其作用原理如圖 1。

由活性碳材料製備的電極不僅導電性能良好，而且具有很大的比表面積以及較好的化學和電化學穩定性，因此該技術可以達到 95% 以上的水回收率和低於 1 μS/cm 的高純水製備要求 3,4。MCDI 之技術優勢與 RO 比較如表 1 所示。

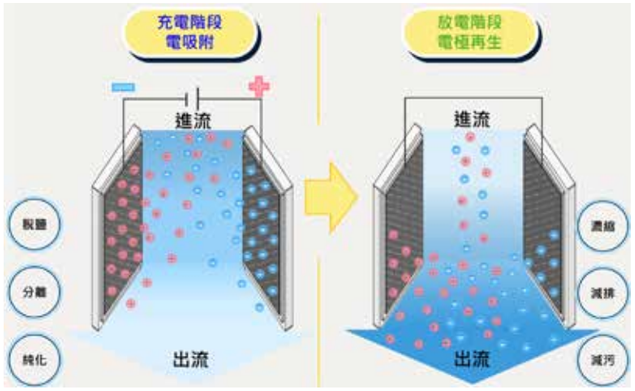


圖 1 薄膜電容去離子作用原理示意圖

表 1 MCDI 技術優勢與 RO 比較表 [3,4]

對比項目	RO	CDI	
設備持久性	約 2-3 年需更換濾心	電吸附核心元件可穩定操作長達 10 年	技術優勢： 1. 水回收率≧ 95%，脫鹽率≧ 95%。 2. 電極再生和清洗效率高。 3. 系統控制靈活。 4. 出水水質可依需求調節。 5. 無高壓操作環境。 6. 可去除某種特定的離子。 7. 核心電極元件壽命 10 年。 8. 對於入水的預處理需求低。
操作靈活性	脫鹽率高，但不可調	脫鹽率可根據要求在 0-95% 區間內調節	
前處理需求	需阻垢劑、還原劑等	可忽略	
能耗	1-2 kwh/m^3	0.1-0.6 kwh/m^3	
水回收率	50-75%	80-95%	
積垢導致通量衰減	7-15%/ 年	可忽略	

二． 應用案例

(一). 國外應用案例

以加拿大為例，採用 MCDI 進行市政地下水淨化與回收再利用，每天處理規模達 100 m^3，處理後地下水中硝酸根離子低於 5 mg/L，去除率 86-98%，水回收率 >90%，而其耗電量僅 0.33-0.37 kWh/m^3。另中東國家也有採用 CDI 進行鍋爐水淨化與製備之案例。該案例為設置一處理規模為 100 m^3/ 天之 CDI 設備，將入水導電度由 230-700 μS/cm 降至出水導電度 4.5-12 μS/cm，去除率 98%，水回收率可達 90% 以上。相關案例應用說明如表 2。

表 2 國外 MCDI 應用案例

加拿大市政地下水淨化與回收再利用 [3] 案例一

規模：100 m^3/ 天
設備：36 處理單元集裝箱式
處理效果：處理後硝酸根離子低於 5 mg/L，去除率 86-98%，水回收率 >90%
耗電量：0.33-0.37 kWh/m^3

污水廠放流水回收再利用 [4] 案例二

規模：100 m^3/ 天
設備：36 處理單元集裝箱式
處理效果：入水導電度 230-700 μS/cm，出水導電度 4.5-12 μS/cm，平均去除率 98%，水回收率 90%

(二). 國內應用案例

國內普泉科技公司已成功開發出每日產水量 10 m^3 與 100 m^3 之 MCDI 設備，並應用於包括清洗廢水回收、污水廠放流水回收再利用以及洗滌塔排水回收再利用控制等相關案例（詳表 3 所示）。

表 3 國內 MCDI 應用案例

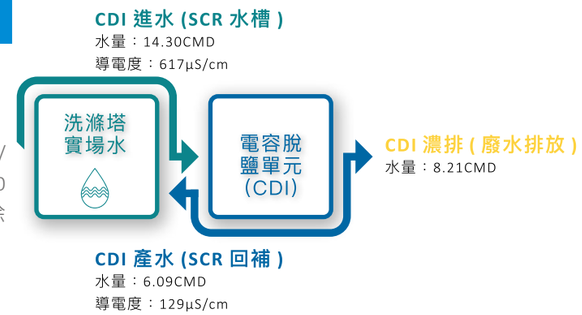
清洗廢水回收 [4] 案例一

規模：5~20 m^3/ 天
處理效果：入水導電度約 600 μS/cm，出水導電度 100 μS/cm 以下

污水廠放流水回收再利用 [4] 案例二

規模：5~20 m^3/ 天
處理效果：入水導電度約 4,000 μS/cm，出水導電度 750 μS/cm 以下，平均去除率 80% 以上

洗滌塔排水回收再利用 [4] 案例三



規模：5~20 m^3/ 天
處理效果：入水導電度約 620 μS/cm，出水導電度約 130 μS/cm 以下，平均去除率 80% 以上

三． 參考資料

1. Electro-Static Deionization (ESD) for the Removal of Total Dissolved Solids(TDS) http://www.currentwatertechnologies.com/electro-static-deionization。
2. 工業技術研究院創新水科技服務網，電容脫鹽技術 (CDI)- 下世代的低耗能脫鹽技術 https://www.itriwater.org.tw/technology/More?id=75。
3. 北美膜電容脫鹽水處理技術 http://cn.umoregroup.com/article1.aspx?id=2769。
4. 范振軒，CDI 技術原理，普泉科技公司，2020 年。

貳．薄膜生物反應器技術

薄膜生物反應器 (Membrane Bio-Reactors, MBR) 係結合活性污泥程序與薄膜科技，為一新興的處理技術。目前在歐美與日本等國家已廣泛運用於廢（污）水的處理及水回收應用上，國內也有許多產業以及工業區污水處理廠有採用此項技術。

MBR 由於佔地面積小、高效率以及膜成本有逐年降低之趨勢，預測未來將有更大的市場競爭力 [1,2]。如 MBR 後端再加上 RO 等高級處理程序，則可大幅提升處理水水質，供應給水質需求更高的製程用水或鍋爐用水使用。以下將針對以 MBR 之技術原理、特點及應用案例等進行說明。

一． 技術原理與特點

MBR 是在傳統活性污泥法曝氣池中加裝數組薄膜組合而成，操作時以透膜壓力為驅動力，並利用薄膜孔洞之過濾機制將生物反應槽中微生物與水進行分離。此技術藉由提高污泥濃度，以增強微生物對難降解有機物分解，經固液分離後水質佳，可達回收再利用之標準 [2]。

MBR 技術之特點包括 [1,3]：

1. 出水水質品質高，出水中無固體物質存在
2. 系統可過濾細菌，後消毒加藥劑量可降至最低
3. 污泥齡長，與其他好氧處理技術比較，污泥產生量少
4. 污泥濃度高，反應池體積可大幅縮小，佔地面積少
5. 處理系統不需沉澱單元
6. 可快速馴化出降解難生物分解之微生物，提高系統穩定性
7. 具有處理高污染濃度廢水之能力
8. 具有處理高污染濃度廢水之能力可去除細菌和病毒，有利於處理水回收再利用的水質要求。

MBR 型式可分為三種，包括固液薄膜分離生物處理槽 (Solid-Liquid Membrane Separation Bioreactor, SLMSB)、無泡曝氣生物處理槽 (Bubbleless Aeration Membrane Bioreactors, BAMB)、萃取式薄膜生物處理槽 (Extractive Membrane Bioreactor, EMB)[3]（詳圖 1 所示），其技術特點與應用情形彙整於表 1。目前主流形式為固液薄膜分離生物處理槽。

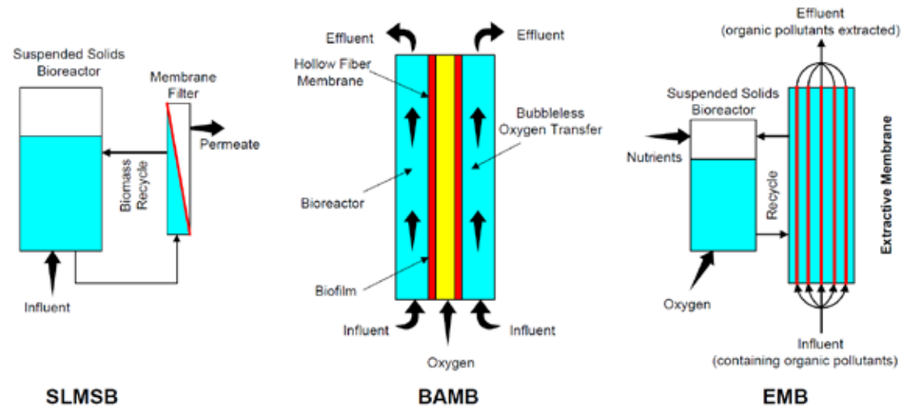


圖 1 MBR 型式 [3]

表 1 不同 MBR 型式之技術特點 [3]

MBR 型式	技術特點	可應用領域	主要應用國家
SLMSB	1. 污泥量少 2. 處理水質佳 3. COD 去除率高	1. 都市污水處理 2. 垃圾滲出水處理 3. 食品及化學工業廢水處理 4. 自來水除氮	日本、德國、法國
BAMB	1. 無泡曝氣 2. 氧傳送速率提高	1. 有機廢水處理 2. 地下水處理	英國、美國
EMB	1. 對特殊行業廢水處理相當有效 2. 氧傳送速率提高	1. 含鹽份、無機物之 有機物廢水 (如染料製造業、製藥業廢水處理 2. 含低濃度有機毒性物質廢水處理	英國

以固液薄膜分離生物處理槽而言，國內外常見之商業化與非商業化薄膜模組可分為平板式、管式、螺旋式以及中空纖維式 4 種，目前主流為中空纖維膜及平板膜。若依薄膜材質區分，有機材質包含 PVDF (聚偏二氟乙烯， polyvinylidene difluoride) 、PE(聚 乙 烯， polyethylene) 、PES (聚乙烯碸，polyethylsulfone)、PS (聚碸，polysulfone) 與 PAN (聚丙烯腈，polyacrylonitrile) 等；無機材質主要使用的是由鋁或鈦及鋯的氧化物所組成的陶瓷膜 (詳圖 2 所示)[2]。

其中陶瓷膜 MBR 具備耐高溫（80℃）、超強抗污耐污（強酸鹼）性、可採高壓噴槍強力噴洗以及使用壽命長（約 7 至 10 年）等特性，近年已逐漸被大量應用於廢水處理及回收。陶瓷平板 MBR 膜與有機膜之特性比較彙整如表 2。

圖 2 中空纖維式及平板式陶瓷膜 [4]

表 2 陶瓷平板 MBR 膜與有機膜之特性比較 [1]

備註：＋號越多，顯示功能越佳。

特性 \ MBR 模組	中空纖維膜	平板膜	
材質	PVDF	PVDF、PE	陶瓷
膜總表面積	++	+	+
耐酸鹼及耐強氧化劑	+	+	++
耐溫性	+ (50℃以上容易出現問題)	+ (50℃以上容易出現問題)	++ (可達 80℃)
除油能力	+	+	++
使用年限	3~5 年	5~7 年	10~15 年
過濾性能	++	++	++
阻塞狀況	膜管接縫及內緣位置容易阻塞及斷絲	逆洗壓力小容易阻塞	有逆洗壓力不易阻塞
回收再利用	不易回收再利用	不易回收再利用	可回收再利用

二． 國外應用案例說明

相較於 PVDF、PE 等材質之 MBR 膜，陶瓷平板 MBR 較具有操作上優勢，以下特以陶瓷平板 MBR 於國外之應用案例進行說明。

(一). 新加坡裕廊島 （Jurong）石化工業區污水廠案例 [5]

新加坡政府之公共設施委員會（Public Utilities Board，PUB）於 2012 年邀請各大廠針對裕廊島（Jurong） 石化工業區污水處理廠廢水進行陶瓷平板 MBR 模廠（Pilot）現地測試，於 2012 年 3 月至 2013 年 3 月完成 4,600CMD 之廢水處理與水回收實廠之建置 (處理及水回收流程如圖 3 所示)，並於 2014 年 3 月完成實廠試車運轉，其處理成效彙整於表 3，經處理後之回收水則供應區內廠商使用。

圖 3 新加坡裕廊島石化工業區污水廠應用陶瓷平板 MBR 之廢水處理流程 [5]

表 3 新加坡裕廊島石化工業區污水廠採陶瓷平板 MBR 之處理成效 [5]

水質項目 \ 處理成效	原水	處理後出流水
pH	6.8	7.2
COD (mg/L)	2,202	37
BOD (mg/L)	858	5
TSS (mg/L)	555	＜ 1
油脂 (mg/L)	89	＜ 0.5
總氮 (mg/L)	85	17
總磷 (mg/L)	25	14

(二). 阿拉伯聯合大公國沙迦 (Harjah) 某工廠廢水回收案例 [6]

阿拉伯聯合大公國沙迦某工廠於 2016 年 3 月啟動陶瓷平板 MBR 處理其污泥濃縮池之出流水 (處理流程詳圖 4)。該處理系統之最大處理量為 300 CMD。原廢水 COD 及 BOD 濃度高達 8,000 及 6,000 mg/L，經 MBR 過濾後之出流水再搭配逆滲透膜 (RO) 處理，使其達到回收再利用水的水質標準，大幅提高水資源再利用層次和價值。相關處理照片詳圖 5 所示。

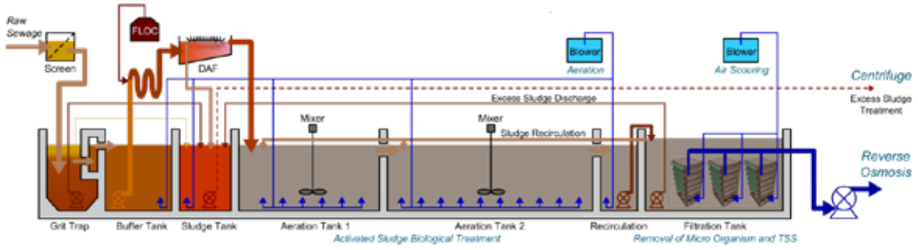


圖 4 阿拉伯聯合大公國沙迦某工廠應用陶瓷平板 MBR 之廢水處理流程 [6]

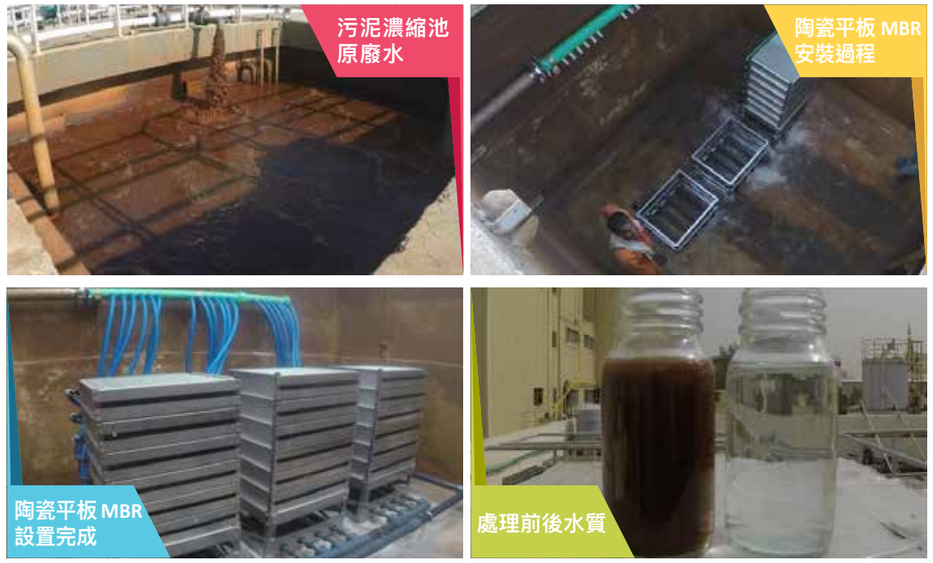


圖 5 沙迦 (Harjah) 某工廠應用陶瓷平板 MBR 之廢水回收案例照片 [6]

三． 參考資料

1. 林正祥，陶瓷平板 MBR 在大型工業廢水回收應用案例。
2. 范姜仁茂等人，薄膜生物反應器 (MBR) 於廢水處理之技術評析，工業污染防治第 109 期，第 51 卷，2009 年。
3. 張王冠，膜離生物反應器 (MBR) 技術原理及應用，水及廢水高級處理實務技術講習班 , 2005 年。
4. Innopor
   https://www.inopor.com/de/
5. 2014 Singapore International Water Week 會議資料， 2014 年。
6. Ceramic MBR using SiC membranes
   http://www.ceramic-flat-membrane.com/SiC-MBR.html。

參．冷卻水塔節水技術

冷卻用水係指生產過程中，為吸收或轉移生產設備及產品多餘熱量以維持正常溫度下工作之用水。然而，在熱交換的過程中，有 3/4 的冷卻水蒸散，導致必須補充大量的水源。

根據經濟部之調查，國內工業區用水標的之取水量以製程用水佔 50% 最高，冷卻用水佔 40% 次之 1，如何提升冷卻用水效率，以減少補水量，為節約用水之關鍵。以下將針對國外推動成效良好的冷卻水塔蒸發水回收系統以及陶瓷球處理裝置進行說明。

一． 冷卻水塔蒸發水回收系統

(一). 技術原理與特點

冷卻水塔蒸發回收系統係於冷卻水塔內設置冷凝模組 (詳圖 1 所示)，當環境空氣通過冷卻塔散熱填料區後，溫暖且飽和的空氣將進入冷凝模組“濕區”熱交換的通道，環境空氣則透過”氣窗”進入冷凝模組並穿過冷凝模組“乾區”與溫暖且飽和的空氣接觸後產生冷凝水，再滴落集水池回收。

而冷凝後的飽和濕溫空氣與從冷凝模組“乾區”側溫暖乾燥的空氣混合，以降低含水率，使排出的空氣是乾燥低飽和水氣 [2,3]。

技術特點

1. 減少冷卻水蒸發量及補水量：視外氣環境條件每年節水高達 20%以上。
2. 採用冷凝模組在塔內凝結水分，大幅降低水霧排放。
3. 保證消霧行程冷卻散熱能力 100%。

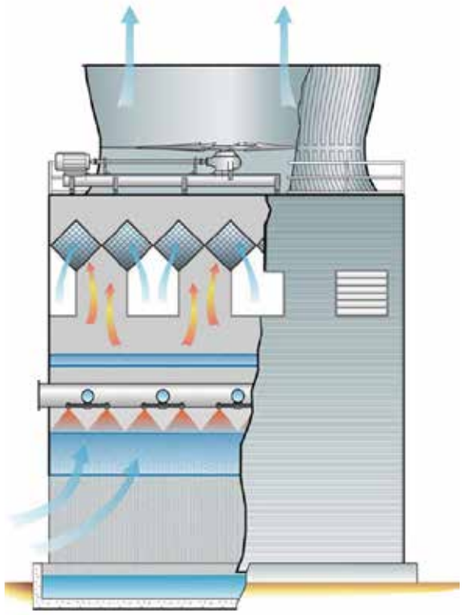


圖 1 冷卻水塔蒸發水回收系統示意圖 [2,3]

(二). 國外應用案例說明

美國芝加哥奧海爾國際機場及美國新墨西哥州火力發電廠設置冷卻水塔蒸發水回收系統後，不僅可減少 15%~20% 的蒸發水損失外，亦大幅降低水霧排放，提高周邊環境之能見度 (詳圖 2 所示)。

美國芝加哥奧海爾國際機場

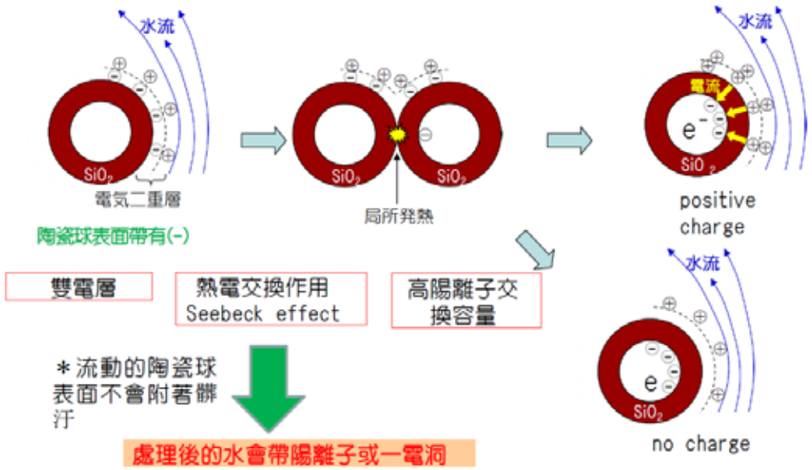
美國新墨西哥州火力發電廠

圖 2 冷卻水塔蒸發水回收系統應用案例 [2]

二． 陶瓷球處理裝置

(一). 技術原理與特點

在不銹鋼本體中裝入約 1/2 容積 3 種不同直徑的陶瓷球，冷卻水流經陶瓷球後帶陽離子，Ca^{2+}、Mg^{2+} 等二價陽離子與碳酸鹽等陰離子產生膠體化形成水垢，使得水垢沉積在水流流速低的冷卻水塔水盤中，因此水垢不會附著到管線及熱交換器的管壁上，以減緩管線的腐蝕，可大幅降低排水量來控制濃度 3，相關設備水處理原理及實體設備如圖 3 所示。



技術特點

1. 可大幅降低冷卻水塔排放水量，以減少補水量。
2. 減緩水垢生成，以降低高壓清潔及藥劑使用成本。

圖 3 陶瓷球處理裝置原理 [4]

(二). 國外應用案例說明

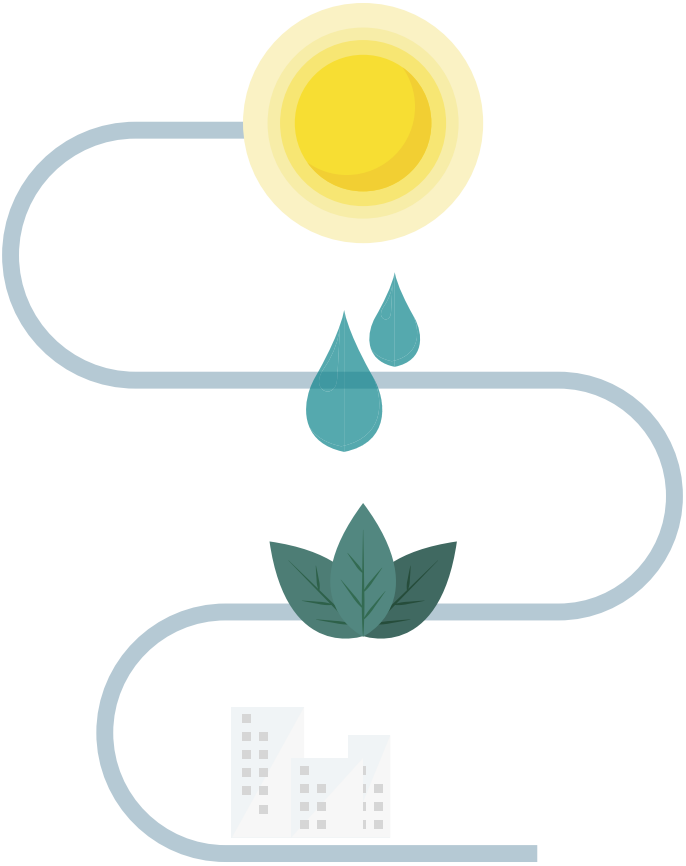
日本北九州市海底電纜製造廠與下關市大型輪胎生產工廠設置陶瓷球處理裝置後，管線、冷卻水塔百葉之水垢可剝離，且大幅降低排放水量，減少補水量 (詳圖 4 所示)。

圖 4 陶瓷球處理裝置應用案例 [4]

三． 參考資料

1. 財團法人環境與發展基金會，產業用水效能提升計畫，期末報告，2019 年。

2. 賴建宇，MARLEY CLEARSKY™ 冷卻塔提升用水效率，2017 年。

3. MARLEY CLEARSKY Cooling Tower Plume Abatement
   https://spxcooling.com/cooling-towers/marley-clearsky-plume-abatement/

4. 盛義實業有限公司，冷卻循環水處理裝置 EMIIR SRDEC-CT 提案書，2017 年。