

膜離生物反應器 應用於廢水處理 之原理及實例

◎執筆 / 張王冠 · 鄧文源 · 張敏超

摘要

膜離生物反應器技術 (Membrane Bioreactors, MBR) 乃是結合薄膜分離與生物反應槽所產生之新穎處理技術，其原理主要是利用薄膜截留反應槽中之懸浮固體 (主要為微生物) 而產生出流水。MBR 與傳統活性污泥程序相比，具有出流水水質佳、佔地面積少與污泥產生量少等優點，尤其浸入式 MBR 佔地面積僅為傳統活性污泥程序之一半，產生污泥亦約為傳統活性污泥程序之一半。

目前 MBR 程序多使用微孔性 (microporous) 高分子薄膜，其製造成本較高。近年來，由於不織布 (nonwovens) 材料製造技術的進步，使其製造成本相對低廉，並已廣泛應用於水之純化及空氣之淨化等。不織布濾材應用於 MBR 技術的相關文獻並不多，已商業化之技術，只有 Kubota 公司採用不織布塗上微孔性高分子塗層，而其不織布本身僅有助濾作用。工業技術研究院環境與安生衛生技術發展中心積極研究開發應用不織布材料於 MBR 技術，目前已成功地開發出完全以不織布材料為分離膜之 MBR 技術。實驗室與實廠試驗結果證實，使用不織布為分離膜應用於 MBR 處理槽，可穩定有效處理有機廢水。

關鍵字

膜離生物反應器、不織布、廢水生物處理

前言

膜離生物反應器技術近幾年來在國外快速發展，在不到十年之間，MBR 已從實驗室研究規模發展至超過 10,000 m³/d 之實廠應用規模；而在過去 5 年內，實廠規模與家數增加特別快速，同時膜離生物反應器之應用層面與方向亦有明顯之擴展。多項原因造成膜離生物反應器技術之快速發展，其中包括：

1. 薄膜製造技術之改善，使薄膜使用壽命延長 3 至 8 年，降低更換頻率。
2. 薄膜費用大幅降低，減少固定成本與操作成本投資。
3. 膜離生物反應器技術具有解決新興產業造成污染問題之優勢。

目前膜離生物反應器技術已應用至都市污水、食品業、畜牧業、製藥業、照相業、紙漿業及船艙廢水處理等方面，隨各種薄膜材料之開發與生物反應器之設計，新的應用方向將陸續被開發，可預期未來薄膜生物技術將更廣為應用。

固液分離型膜離生物處理槽 (Solid-Liquid Membrane Separation Bioreactor, SLMSB) 為較成熟之膜離生物反應器技術，其通常利用超過濾 (Ultrafiltration, UF) 或微過濾 (Microfiltration, MF) 薄膜分離濃縮生物污泥，並得到水質良好之出流水，其示意如圖 1 所示。日前有多家國外公司已具有商業化產品，其中以加拿大之 Zenon 公司與日本之 Kubota 公司有較多實廠案例，該兩技術雖應用不同型式之模組，但皆使用微孔薄膜；工研院環安中心則開發使用較大孔隙薄膜之技術，具有操作壓力低與比通量高之優點。本文將針對固液分離型膜離生物處理技術進行更詳細之說明。

膜離生物反應技術特點

MBR 與傳統活性污泥程序相比，具有佔地面積少與污泥產生量少優點，浸入式 MBR 佔地面積僅為傳統活性污泥程序之一半，產生污泥亦約為傳統活性污

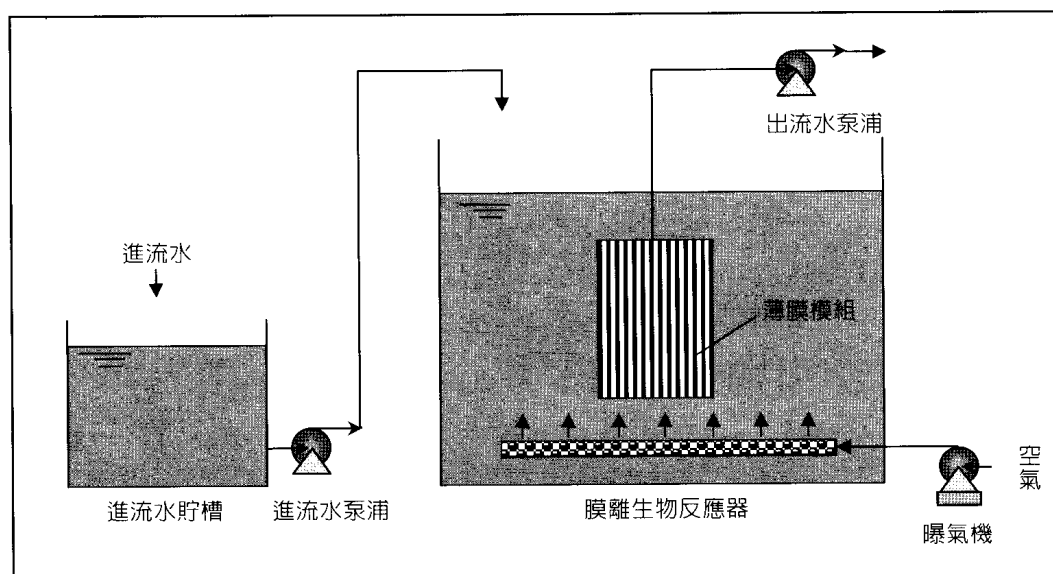


圖 1 固液分離型膜離生物處理技術

泥程序之一半，如圖2所示。MBR的技術特點非常多^[1]，與傳統處理技術比較，包括：

1. 適合中小型規模特殊污染物處理。
2. 初設成本較高，但操作成本低，以總成本而言仍較有利。
3. Biomass可完全截留，沒有傳統程序污泥分離的問題，系統操作維護容易。
4. 污泥停留時間(Sludge Retention Time, SRT)可相當長，生長速率緩慢的微生物得以滯留與增殖，有利於特殊或難分解污染物的去除。
5. 污泥濃度高，處理系統單位活性增加，進而減少處理槽體積。
6. 處理系統不需沈澱單元，可大幅節省空間。
7. 截留難分解之高分子物質，增加處理效率。
8. 可去除細菌和病毒，以達到消毒之作用。

9. 維持低F / M比，減少廢棄污泥量。
10. 處理單元緊密配置，減少臭味溢散。
11. 能量消耗低，不需外加化學藥劑。

MBR系統及傳統活性污泥之比較，反應槽中污泥濃度為兩者之間最大差異，傳統活性污泥系統中污泥濃度3,000~5,000mg/L，MBR系統中可達5,000~30,000mg/L或更高濃度，由於污泥濃度高，故HRT可以縮短至1~4小時，而節省反應槽體積。另外，在MBR系統中，SRT可以長至30天或更長，故污泥產率可以降至0.2kgSS/kgCOD，在一些情況下，污泥產率更低，而有效減少廢水處理廠污泥產量。雖然MBR擁有許多傳統活性污泥沒有之優點，但在能源消耗上較傳統活性污泥為高，通常介於0.3~2kwh/m³，故如何降低能源消耗是拓展MBR應用必須面臨的問題。另外，在MBR系統中，積垢(fouling)問題是另一個必須面對的問題，因此有效之積垢控制策略與操作，為MBR技術長期穩定操

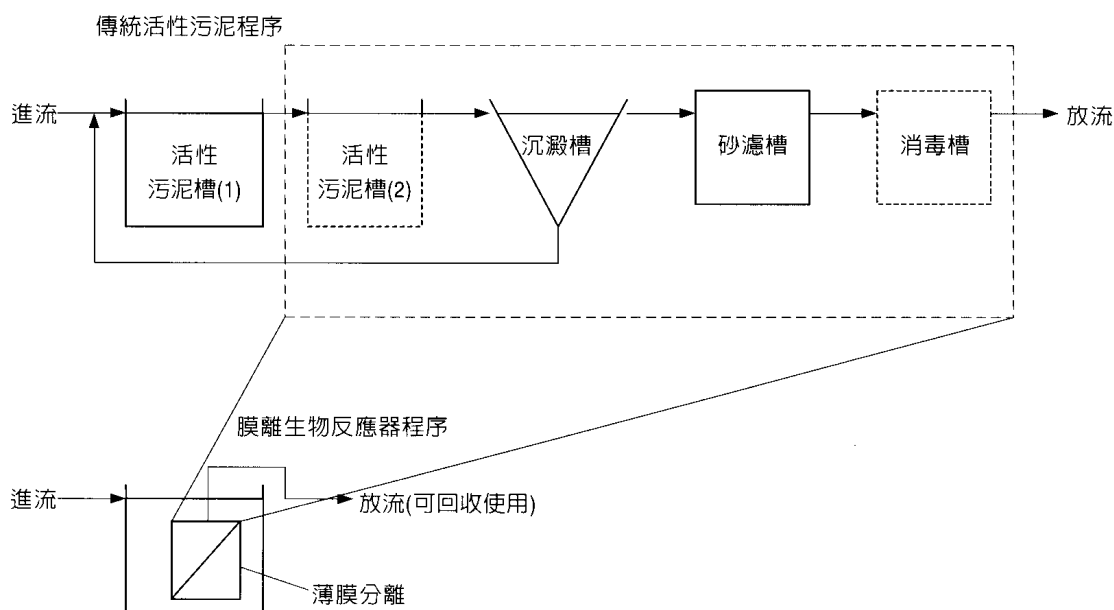


圖2 比較 MBR 與傳統活性污泥程序^[2]

作之關鍵。

薄膜型式

至目前為止，全世界至少有 500 座以上固液分離型膜離生物處理實廠運轉中，其使用薄膜材料大多為微孔性(孔徑大小 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 範圍)的高分子材料或無機陶瓷材料，如表 1 所示。其中，微多孔性高分子薄膜材料使用相轉換(phase inversion)技術，使高分子溶液塗層上溶劑揮發後而產生；微孔性薄膜也可使用中空纖維膜(hollow-fiber)。現有的固液分離型膜離生物處理技術，除了 Kubota 公司的技術外，不管是浸入式或支流式膜離生物處理技術，所用之高分子膜材都是以這兩類為主^[1]。這些材料可為醋酸纖維(cellulose acetate)、聚硫風(polysulphone)、聚醯胺(polyamide)、聚乙烯、聚丙烯等如表 2 所示。在固液分離型膜離生物處理技術中，薄膜之功用是截留微生物與

固體物，而使處理水透過薄膜輸送至薄膜另一端。

Kubota 公司膜離生物處理技術之薄膜材料，為不織物支撐物上塗上一層微孔性高分子聚合物薄層。微孔性高分子薄膜膜孔大小約在 $0.2\ \mu\text{m}\sim 0.45\ \mu\text{m}$ ，不織物支撐物有助濾作用。高分子不織物常用作過濾空氣之纖維濾材，以除去空氣中污染固體粒子。此種纖維濾材的孔隙一般可在 $1\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ ，對於小至 $0.1\ \mu\text{m}$ 之空氣微粒都能夠過濾。不織物纖維濾材具有大的纖維孔隙卻可除去微小粒子，顯然地，其過濾機制不單只是一般微孔性薄膜篩阻(sieve)分離機制而已^[3]。不織物特殊纖維排列結構，使得進入孔隙內之小粒子，也會被攔截捕捉而具高過濾效能。不織物材料之過濾機制，除了篩阻機制外，尚包括一般不織物濾材之慣性碰撞(inertial impaction)機制、截留(direct interception)機制、布朗擴散(brownian

表 1 已商業化固液分離型膜離生物處理技術所用之主要薄膜型式^[1]

公司名稱	薄膜型式
Zenon (ZeeWeed)	$0.1\ \mu\text{m}$ 中空纖維
Mitsubishi Rayon	$0.4\ \mu\text{m}$ 中空纖維(聚乙烯)
Wehrle werk Ag	管狀 UF (polysulfone)
Orelis Mutsui Chemicals	平板式(聚丙烯材料)
Kubota	於不織布塗上一層 $0.2\ \mu\text{m}\sim 0.45\ \mu\text{m}$ 厚之多孔性(孔徑大小 $0.4\ \mu\text{m}$)之高分子塗層(板框式)

表 2 案例廠水質特性

項目	pH	COD	SCOD	SS	VSS
單位	--	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
平均值	8.22	1045	1000	38	13

註：SCOD 為溶解性 COD

diffusion) 機制。其過濾分離之粒子大小範圍相當寬廣。此種不織物過濾之過濾機制可視為深床過濾分離 (deep filtration) 機制^[4]。

目前 MBR 程序多使用微孔性高分子薄膜，其製造成本較高。近年來，由於不織布材料製造技術的進步，使其製造成本相對低廉，並已廣泛應用於水之純化及空氣之淨化等。不織布濾材應用於 MBR 技術的相關文獻並不多，已商業化之技術，只有 Kubota 公司採用不織布塗上微孔性高分子塗層，而其不織布本身僅有助濾作用。工研院環安中心積極研究開發應用不織布材料於 MBR 技術，目前已成功地開發出完全以不織布材料為分離膜之 MBR 技術。

薄膜過濾原理

薄膜過濾為 MBR 技術之重點，一般而言，微過濾可分為端點過濾 (dead-end filtration) 與橫流過濾 (crossflow filtration) 兩大類 (如圖 3 所示)^[5]。

端點過濾類似傳統的濾餅式過濾，懸浮液流動方向與薄膜表面垂直，固體物被截留在薄膜表面而形成濾餅層，濾餅厚度隨懸浮液過濾量增加而增加，而滲透液流量則隨濾餅厚度增加而減少，薄膜表面濾餅必須依賴週期性反沖洗以移除。對於橫流過濾，懸浮液流動方向與薄膜表面平行，懸浮液在薄膜表面之橫流速率，產生剪力作用而不利於濾餅之形成，當濾餅之累積效應與清除效應達到平衡，濾餅厚度即固定。由於橫流過濾必須有一速率分量平行於薄膜表面，因此薄膜本身之移動或空氣氣泡擾動，均能達到類似效果。薄膜生物處理技術為避免積垢現象之產生，以產生最大滲透通量，即採用橫流過濾的方式進行固液分離。

薄膜過濾特性通常可用下式描述：

$$J = \Delta P_r / (\mu \cdot R_t)$$

$$R_t = R_m + R_c + R_f$$

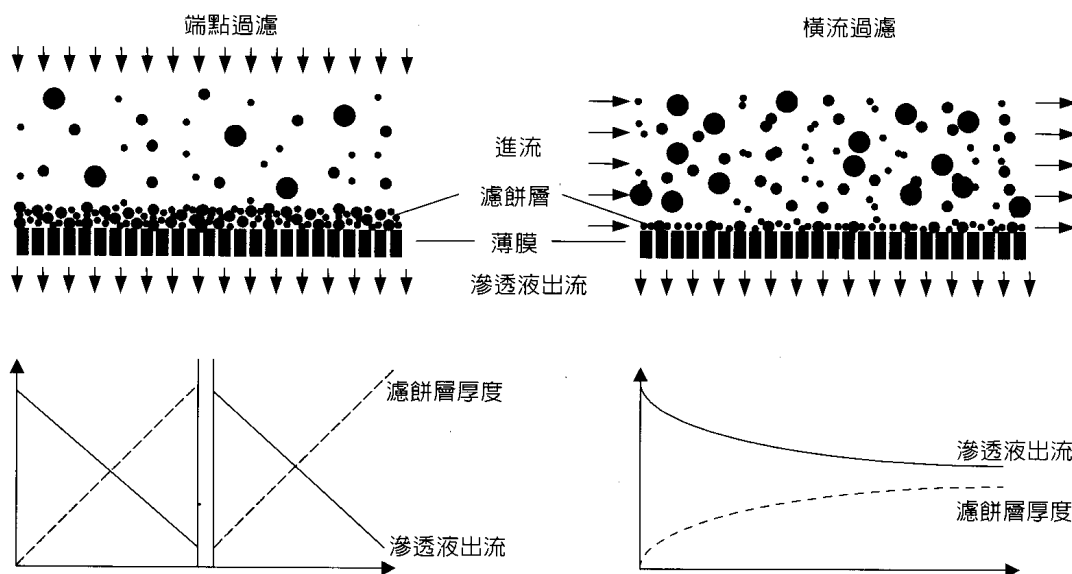


圖 3 比較端點過濾與橫流過濾之差異^[5]

其中

J ：滲透通量

ΔP_T ：透膜壓力

μ ：滲透液黏度

R_t ：總過濾阻力

R_m ：薄膜本身阻力

R_c ：薄膜表面濾餅層之濾餅阻力

R_f ：溶質吸附於薄膜孔洞與孔壁所引起之積垢阻力

由於膜離生物反應器主要使用薄膜為分離介質，並以壓力差為驅動力以進行固液分離，除採用橫流過濾的方式進行操作外，延長薄膜使用壽命及降低能量消耗，應為該程序是否經濟可行之主要因素。一般而言，減少與移除薄膜上之積垢，對上述考量均有相當助益。影響薄膜積垢速率與積垢程度之因素，可分為三大類：

1. 薄膜型式：包括製造薄膜所使用之材料、孔隙大小及分佈、模組結構與型態等。
2. 操作狀況：影響因子包括透膜壓力、薄膜表面之擾流狀況等。
3. 反應槽混合液性質：如污染物性質與濃度、污泥濃度等。

操作方式

進流水進入膜離生物反應槽後與微生物(污泥)接觸並進行分解反應，混合液在足夠壓力差驅動力下通過膜管，此過濾作用產生之滲透液即為處理水，而污泥則被完全截留在反應槽內，過量污泥定期排出以維持固定之污泥齡，而薄膜則以反沖洗或化學清洗進行定期清洗。薄膜單元可安置在生物反應槽體外，亦即污泥在生物反應槽與薄膜單元間進行循環；亦可將薄膜單元整合於反

應槽內。前者稱為支流式(side stream)或再循環式(recirculated)MBR，以正壓力梯度方式，將循環於膜管內側(外側)之混合液，由內向外(由外向內)產生滲透液(處理水)；後者則稱為浸入式(submerged)或整合式(integrated)MBR，通常由膜管內側吸取滲透液，亦即以產生負壓力方式，由外向內產生滲透液。兩種操作方式各有優缺點，通常支流式較佔空間，透膜壓力(trans-membrane pressure, TMP)較大，產生通量亦較大，但能量消耗亦較大；浸入式則相反。

應用案例

本文例舉兩個案例，予以說明不織布濾材應用於不同性質廢水處理之結果，希望提供業界參考。

(一)衛生用品製造廢水處理

1. 背景

案例廠為衛生用品製造廠商，生產過程中使用一些化學品如介面活性劑、防腐劑與香料等成分，為廢水中主要有機物之來源，其水質特性如表2中所示。廢水屬較難生物分解之廢水，由於採批次生產，廢水質與量變動大。舊有廢水處理程序僅使用化學混凝沈澱去除部分COD，出流水中COD仍高。新增之MBR處理程序設置於化學混凝沈澱之後，以進一步去除殘餘COD，使其達到排放標準。

2. 設備與方法

本案例為MBR實廠處理衛生用品製造有機廢水，圖4為流程示意，廢水從現場均勻池抽送至混凝槽處理，經過沈澱分離，上澄液進入中繼槽，再以幫浦

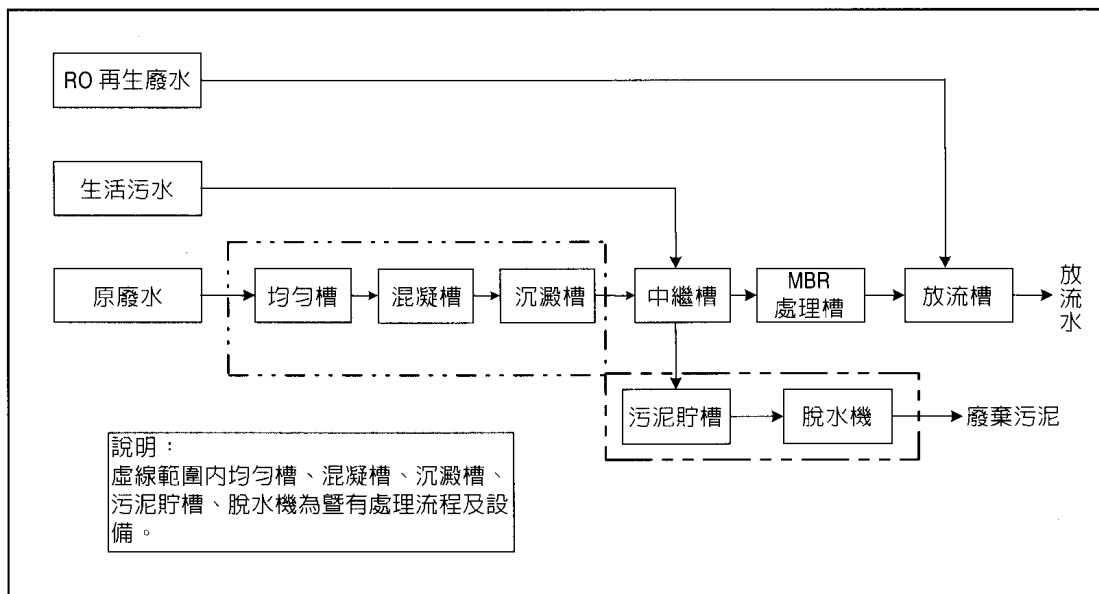


圖4 MBR 實廠流程示意圖

將廢水送入 MBR 反應槽，處理水流經薄膜以幫浦進行吸取，再將處理水送至放流水槽。反應槽有效體積為 30m^3 ，槽內採用工研院環安中心與康那香公司合作開發不織物薄膜，過濾模組的不織物膜的表面積為 150m^2 ，薄膜材質規格如表 3 中所示。膜離生物反應槽操作條件控制為：污泥初始濃度 $2,000\text{mg/L}$ as VSS、pH：6~8、溶氧(DO) 2mg/L 以上、體積負荷為 $1.0\text{ kg COD/m}^3\text{-day}$ 等。

3.結果與討論

本實廠操作已約 4 個月，出流水水質良好，尤其 SS 低於偵測值。依據處理結果，討論說明如下：

(1) COD 與 SS 濃度變化

如圖 5 中所示，進流水 COD 濃度介於 $300\sim 1,600\text{mg/L}$ 之間變化，平均濃度約為 $1,000\text{mg/L}$ ，經過 MBR 處理後，其出流水 COD 濃度介 $20\sim 80\text{mg/L}$ 之間，平均濃度 43mg/L 。從圖中 COD 濃度變化得知，雖然進流水 COD 濃度變動範圍大，

但均能達到良好的出流水質，顯見 MBR 技術對環境變異的忍受性強。其中即使進流水 SS 濃度很高，由於薄膜之過濾功能，出流水 SS 均達到低於偵測值之效果(如圖 6 所示)。由於出流水質佳，出流水具有回收再利用之潛力，在目前水源缺乏之狀況下，本技術更具有實用價值。

(2) 槽中 MLSS 變化

MBR 處理廠起動初期之 MLVSS 約為 $2,000\text{mg/L}$ 左右，開始操作兩個月後，並未進行排泥動作，污泥濃度增加至 $5,000\text{mg/L}$ 。由於在高污泥濃度下操作

表 3 薄膜模組規格

項目	規格
處理水量	30 CMD
薄膜材質	不織物薄膜
薄膜表面積	150 m^2
操作 TMP	小於 40 kPa

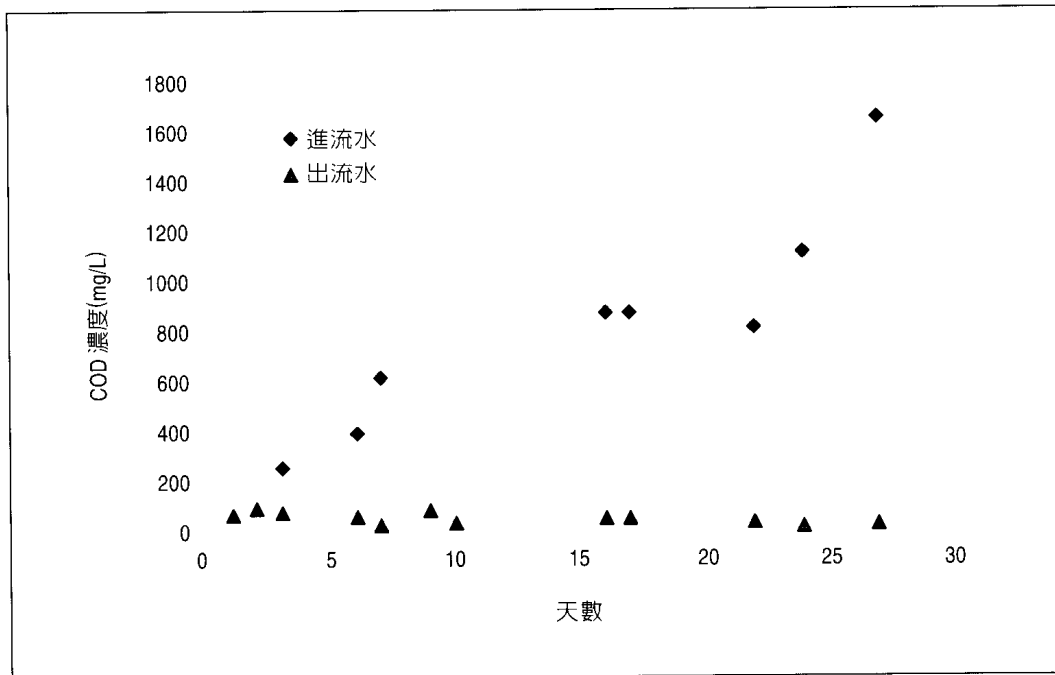


圖 5 MBR 實廠進流水及放流水 COD 濃度變化

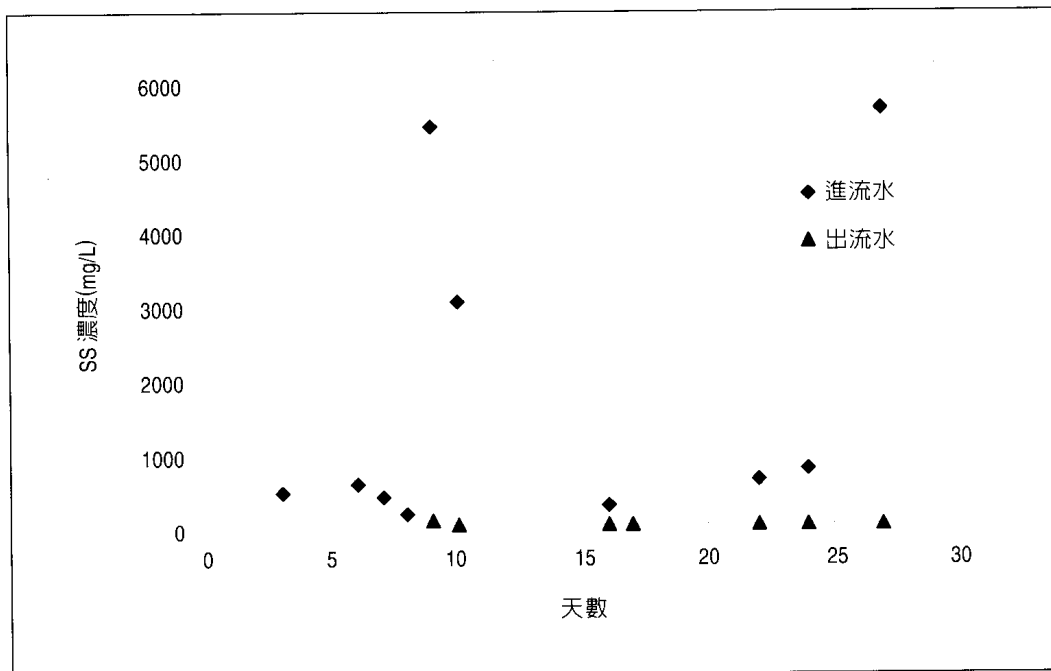


圖 6 MBR 實廠進流水及放流水 SS 濃度變化

是 MBR 特色之一，反應槽中污泥仍有增加之趨勢，提高污泥濃度除可維持高效率處理特性外，在污泥產率方面，亦較一般活性污泥系統之污泥產率低 (0.2~0.3kgSS/kgCOD)，可大幅減少廢水處理場污泥量產生。

(二)食品加工有機廢水處理

1.背景

案例廠為食品加工製造廠商，廢水處理廠老舊，使用生物固定膜技術處理，然而由於原始設計不理想，且後來廢水量增加，造成處理效果不佳，並有污泥流失情形。由於該廠並無多餘空間可使用，因此無法擴建廢水處理廠；另該廠亦不在工業區內，廢水無處可暫時排放，因此希望能在不干擾現有處理下，進行改善。其水質特性如表4 中所示。新增之 MBR 處理程序預計設置於現有生物處理槽中，將完全截流活性污泥，以提升 COD 去除效率，使其達到排放標準。

2.設備與方法

本案例為使用 MBR 模型廠處理食品加工有機廢水，從現場均勻池收集之廢水，以幫浦送入 MBR 反應槽，處理水流經薄膜以幫浦進行吸取，再將處理水送至放流水槽。反應槽有效體積為 10L，槽內採用工研院環安中心與康那香公司合作開發不織物薄膜，過濾模組的不織物膜的表面積為 0.075m²，薄膜材質規

格與表 3 相同。膜離生物反應槽操作條件控制為：污泥初始濃度 2,000 mg/L as VSS、pH：6~8、DO 2mg/L 以上、體積負荷為 1.0 kg COD/m³-day 等環境條件下，進行處理評估實驗。

3.結果與討論

本模廠操作約 1 個月，出流水水質良好，尤其 SS 低於偵測值。依據處理結果，討論說明如下：

(1)COD 與 SS 濃度變化

由圖 7COD 之變化可知，進流水原始 COD 為 372mg/L，初期因污泥未馴養，經 MBR 處理後之出流水 COD 較高，隨後污泥經逐漸馴養後，出流水 COD 則可降至 50mg/L 以下，去除率可達 86% 以上。膜管通量維持在 0.17m³/m².day 以下，對於 COD 之去除良好，連續操作 16 天，每天之出流量未有降低現象，可維持穩定通量。

(2)槽中 MLSS 變化

由圖 8 MBR 槽中 MLSS 之變化可知，因負荷不高，約在 0.42kgCOD/m³-day 以下，所以污泥 SS 值都沒有增加，SS 大都介於 1,840~2,098mg/L 之間，VSS 值介於 1,640~1,937mg/L 之間。由於在高污泥濃度下操作是 MBR 特色之一，反應槽中污泥仍有增加之趨勢，提高污泥濃度除可維持高效率處理特性外，在污泥產率方面，亦較一般活性污泥系統之污泥產率低 (0.2~0.3kgSS/kgCOD)，可大幅減少廢水處理場污泥量產生。

表 4 案例廠水質特性

項目	pH	COD	SCOD	SS	VSS	油脂
單位	--	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
平均值	7.40	372	177	70	65	15

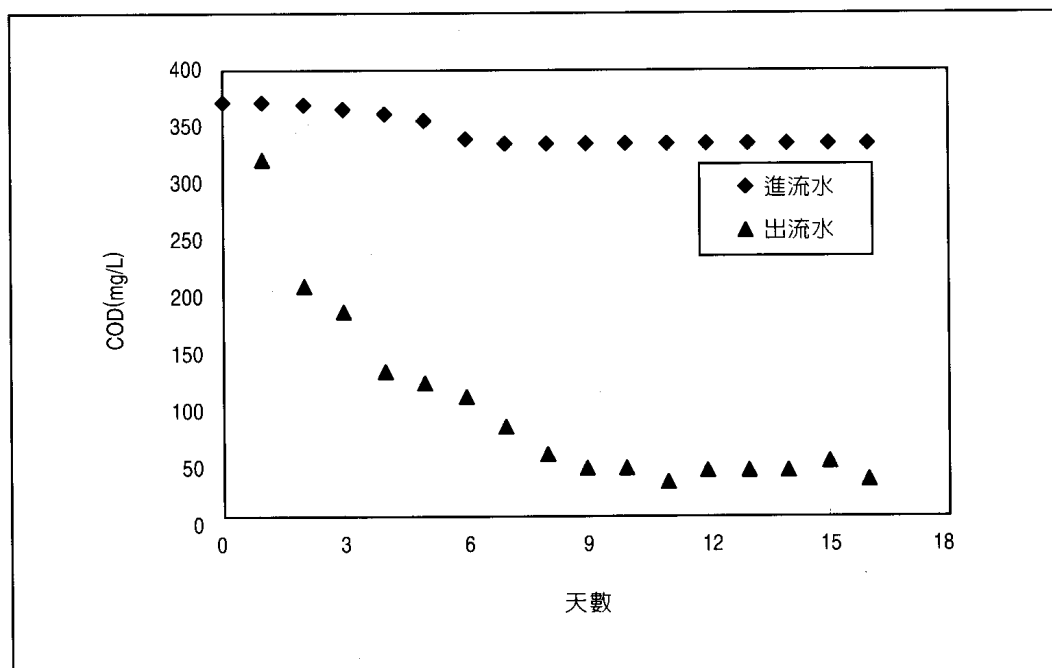


圖 7 MBR 模型廠進流水及放流水 COD 濃度變化

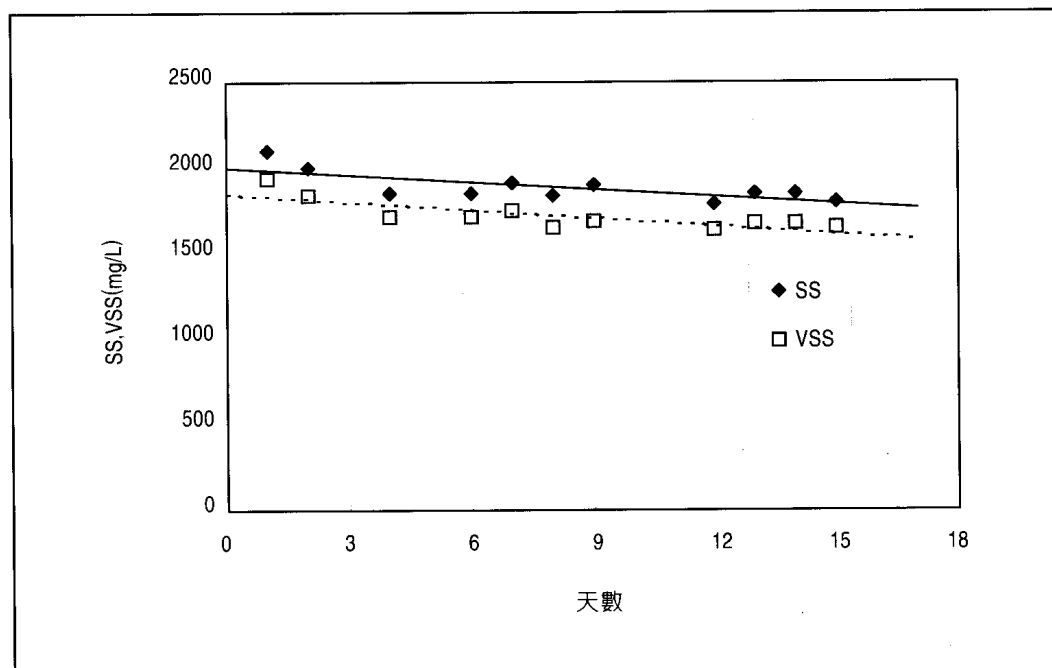


圖 8 MBR 模型廠槽中 MLSS 及 MLVSS 濃度變化

結語

新發展之膜離生物處理技術，結合生物處理與薄膜分離功能，加強了生物處理之效率與可靠性，由於反應槽內可維持相當高之微生物濃度，因此反應槽的體積可縮小，具有省空間與高效率之優點；另由於其處理水水質佳，提高廢水回收再利用之可行性。更經濟有效膜材之開發應用，及提高其比表面積與薄膜通量，將是本技術未來推廣應用之主要關鍵。不織布 MBR 技術，具有價格低、操作壓力低與比通量高等優點，為一極具實用性之技術。■

參考資料

1. Stephenson T., Judd S., Jefferson B, and Brindle K. (2000) Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, IWA Publishing, London, UK.
2. Gunder B and Krauth K. (1999) "Replacement of Secondary Clarification by Membrane Separation - Results with Tubular, Plate and Hollow Fiber Modules," Wat. Sci. Tech., 40(4-5), 311-320.
3. Walsh D. C. (1996) "Recent Advances in the Understanding of Fibrous Filter Behaviour under Solid Particle Load," Filtration & Separation, June, 501.
4. Cheryan M. (1998) Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA, USA.
5. Gunder B. (2001) The Membrane-coupled Activated Sludge Process in Municipal Wastewater Treatment, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA, USA.

作者簡介

張王冠—

現職：工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心研究員
學歷：美國密西根州立大學環工博士、國立清華大學化工碩士
經歷：工研院化工所副研究員、博士後研究、工研院化工所研究員
專長：水及廢水處理技術研究開發與工程應用

鄒文源—

現職：工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心研究員
學歷：大華工專食品工程科
經歷：1977 年入工研院服務迄今
專長：水及廢水處理技術研究開發與工程應用

張敏超—

現職：工業技術研究院環境與安全衛生技術發展中心研究員
學歷：國立清華大學化學碩士
經歷：1974 年入工研院服務迄今
專長：水及廢水處理技術研究開發與工程應用