

〈研究発表〉

省エネルギー型セラミック平膜ろ過システムの実証試験

渡 辺 哲 文¹⁾, 中 川 彰 利¹⁾, 土 屋 達¹⁾, 加 藤 直 樹¹⁾, 大 下 晃 司¹⁾

¹⁾ ㈱明電舎 セラミック応用開発部

(〒452-8602 愛知県清須市西枇杷島町一反五畝割496-1 E-mail: watanabe-te@mb.meidensha.co.jp)

概 要

膜分離活性汚泥法（以下、MBR）は、様々な利点を有するが、特に膜曝気洗浄に係るエネルギー多消費な点が課題とされてきた。膜寿命の長さが期待され、海外で採用が進んできたセラミック平膜を用いた浸漬型 MBR においても、これまで膜ろ過に係る省エネルギー化を図るべく、膜ユニットおよび曝気洗浄装置の改良等を行ってきた。今回、この省エネルギー型セラミック平膜ろ過システムの実証試験を、国内の都市下水処理場にて実施し、四季を通じて安定した膜ろ過運転、及び膜ろ過水量当りの膜曝気洗浄空気量の大幅な低減を確認することができたので報告する。

キーワード：省エネルギー、セラミック平膜、膜ろ過、下水処理

原稿受付 2023. 7. 31

EICA: 28(2・3) 90-93

1. は じ め に

膜分離活性汚泥法（以下、MBR）とは、従来の活性汚泥処理における活性汚泥と処理水の分離工程を膜ろ過によって行い、確実な固液分離を可能とする污水处理方法である。MBR による污水处理では、従来法に比べて施設の省スペース化、処理水質の安定化といったメリットがある一方、送風動力に係る消費電力量が大きいというデメリットもある。近年では MBR の省エネルギー化技術の進展による消費電力量抑制効果もあり、日本国内の下水処理場への MBR の導入が徐々に進んできている。

当社では平成 24 年から 28 年まで飯能市、日本下水道事業団と「膜分離活性汚泥法の導入促進に向けた技術開発 —— セラミック平膜を用いた浸漬型 MBR の省エネルギー化・合流対応の研究 ——」¹⁾ を実施したが、それ以降も省エネルギー化に向けた膜ユニットおよび曝気洗浄装置の技術開発を継続し、シンガポールで実証も実施してきた²⁾。

今回国内の都市下水処理場において、セラミック平膜を用いた膜ろ過の省エネルギー性能の実証を目的とした膜ろ過実証プラントでの長期連続運転を行い、四季を通じて良好な膜ろ過運転、曝気洗浄に係る消費電力量の低減効果が得られたので、本稿にて報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 セラミック平膜

今回実証試験に使用したセラミック平膜エレメントは、幅 281 mm×長さ 1046 mm×厚さ 12 mm（膜部

分の厚さ 6 mm）の平板状で、公称孔径 0.1 μm の精密ろ過膜である。アルミナを主成分とするセラミック製で、膜エレメント 1 枚あたりの膜面積は 0.5 m² である。このセラミック平膜エレメントを複数枚収納した膜ユニットを活性汚泥混合液中に浸漬し、ポンプで吸引することで清澄なろ過水を得ることができる。

2.2 曝気洗浄装置

従来のセラミック平膜の曝気洗浄は、膜ユニット底部に設置した散気管から連続的に空気を放出することで膜間に気液混相流を形成させて、その流れに伴うせん断力で膜面を洗浄する。今回の試験では浸漬型 MBR 用ろ過膜の曝気洗浄に係る消費電力量を低減するために開発した間欠曝気装置²⁾を使用した。間欠曝気装置の概要図を Fig. 1 に示す。間欠曝気装置は、膜ユニット底部に設置され、粗大な気泡を数秒間隔で放出する。放出された気泡は、直上に配置された膜エレメントの膜間に流入し、膜間に気液混相流を形成し、

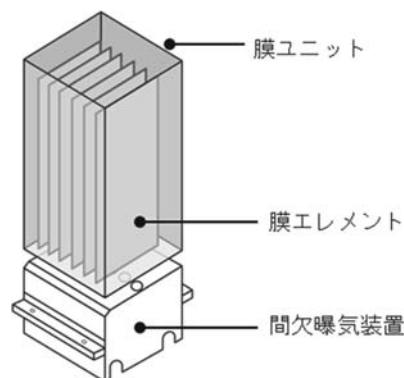


Fig. 1 Schematic of membrane unit with the intermittent aerator

膜面を洗浄する。間欠曝気装置への空気供給は、同装置下部に配置した散気管から連続的に行われる。従来の曝気洗浄に比べて、少ない空気供給量で同等の膜洗浄効果が期待できるものである。

2.3 実証プラント

日本国内の都市下水処理場内に実証プラントを設置した。実証プラントの仕様を **Table 1** に、概略フローを **Fig. 2** に示す。今回の実証プラントは、下水処理場の既設反応タンク下流の活性汚泥混合液をプラントの膜分離槽に供給し、その汚泥混合液をセラミック平膜で膜ろ過する形とし、汚泥の膜ろ過機能に特化して評価するプラントとした。今回のセラミック平膜ユニットは、従来膜ユニットからチューブ、コネクタの消耗部品を削減した省スペース型ユニットを使用し、

Table 1 Specification of the pilot plant

項目	仕様
ろ過対象（流入水）	既設反応タンク汚泥混合液
ろ過方式	吸引ろ過方式
膜分離槽 概略寸法	幅 1.4 m×奥行 1.5 m×高さ 5.6 m
膜分離槽容量	10.5 m ³ （水深 5 m）
使用膜ユニット数	1 基（3 段積み）
使用膜数数	300 枚/基（100 枚/段×3 段）
使用膜面積	150 m ² /基
薬液洗浄	方式：インライン薬液洗浄 使用薬品：次亜塩素酸ナトリウム、クエン酸

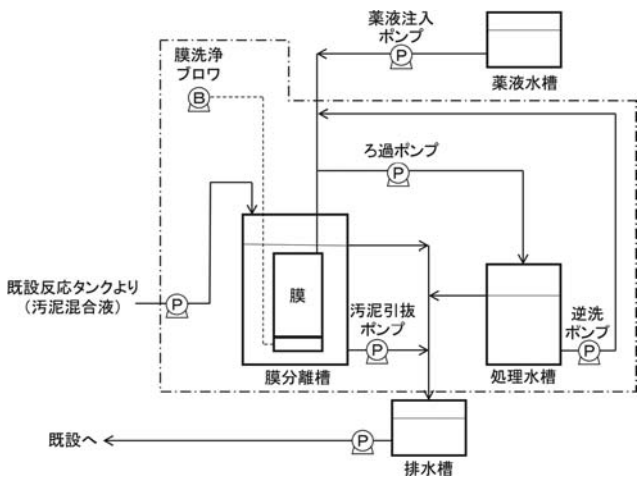


Fig. 2 Schematic flow diagram of the pilot plant

省エネルギー性能を最大限に発揮するために、日本の下水処理場の反応タンクで一般的な水深 5 m に浸漬設置可能な 3 段積み構成とした。なお、長期運転に伴う膜ファウリングによるろ過機能の低下を防ぐため、インライン薬液洗浄が実施可能な構成とした。

2.4 長期膜ろ過実験

実験開始当初、運転フラックス、膜曝気洗浄空気量、インライン薬液洗浄方法と周期等を実験検討し、その結果に基づいて基本運転条件を設定した。基本運転条件を **Table 2** に示す。フラックスは、日平均フラックス（流量比=1）を 0.88 m³/(m²・d) とした。定期的の実施するインライン薬液洗浄直後の 24 時間は流量変動比 1.3 倍のピークフラックスで運転し、その後、流入汚水量の日間変動を模擬した流量変動比 0.5~1.3 倍まで変動させたフラックスで運転した。実験に使用したフラックス変動パターンを **Fig. 3** に示す。**Table 2** の条件、**Fig. 3** のフラックスパターンを基本とし、高水温期と低水温期を含む約 14 ヶ月にわたって水量変動を伴う連続膜ろ過運転を行った。膜ろ過運転の安定性は、膜差圧（以下、TMP）、および定期的の実施したインライン薬液洗浄直後に所定のフラックスで運転した時の TMP（以下、ベース TMP）をモニタリングして評価した。試験結果に基づき、膜曝気洗浄に係る消費電力量原単位を試算し、消費電力量低減効果を評価した。

Table 2 Operating condition of the pilot plant

項目	条件
運転フラックス	日平均 0.88 m ³ /(m ² ・d)
ろ過／逆洗条件	ろ過時間 9.5 min／逆洗時間 0.5 min ろ過流量：逆洗流量=1:1.5
曝気洗浄空気量	375 NL/min/膜ユニット
膜分離槽 MLSS	10000 mg/L 程度
インライン薬液洗浄 次亜洗浄	頻度：週に 2 回定期洗浄 薬液：次亜塩素酸ナトリウム溶液 濃度：高水温期 250 mg/L、低水温期 500 mg/L 所要時間：70 min
インライン薬液洗浄 酸洗浄	頻度：年に 2 回 薬液：クエン酸溶液 濃度：2500 mg/L 所要時間：70 min

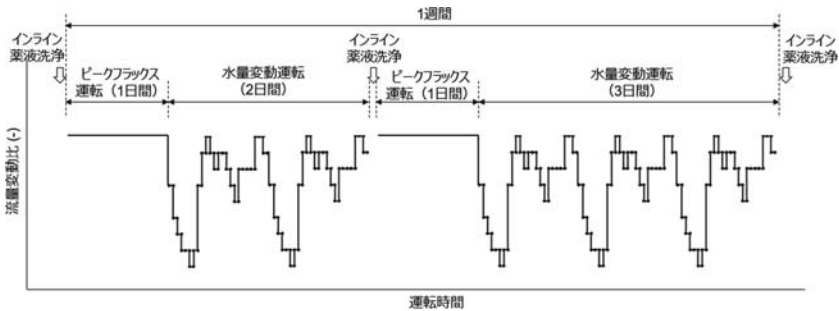


Fig. 3 Operating flux pattern of the pilot plant

2.5 水質分析

膜ろ過運転状況の把握・評価のため、実験プラント流入水（処理場の既設反応タンク汚泥混合液）、膜分離槽内の活性汚泥混合液、膜ろ過水を適宜採取し、MLSS、粘度、有機成分等の水質分析を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 長期膜ろ過実験結果

14 カ月弱にわたる長期膜ろ過実験における膜分離槽水温、TMP およびベース TMP の変動を **Fig. 4** に示す。また、本実験期間の膜ろ過工程水の主要水質分析結果を **Table 3** に示す。

Fig. 4 の経過日数 0 日の前に、膜分離槽にて膜ユニットを次亜塩素酸ナトリウムによる薬液浸漬洗浄を実施し、膜のファウリング物質を除去した後、長期間の膜ろ過運転を開始した。開始以降、膜の引き上げ、膜の交換、薬液浸漬洗浄を実施することなく膜ろ過運転を継続した。今回流入水は処理場の反応タンク後段の活性汚泥混合液であり、生物処理はほぼ終了しているが、処理場の特徴として処理場流入水のノルマルヘキサン抽出物濃度が若干高く、その結果として実証プラント膜分離槽のノルマルヘキサン抽出物濃度も平均 75 mg/L と高い値で推移したが、**Table 3** に示すように膜ろ過水の SS は運転期間を通じて 1 mg/L 未満、ノルマルヘキサン抽出物は 5 mg/L 未満と、良好な膜ろ過水質が得られた。**Fig. 3** のようにフラックス設定を変動させているため、フラックス変動に伴い TMP は上下に変動した。経過日数 30～100 日頃にかけて、一時 TMP が 30 kPa を超える高い時期があったが、

セラミック平膜の使用上限差圧の 60 kPa を上回ることなく運転できた。その後、経過日数 120～400 日頃にかけては、TMP は概ね 30 kPa 以下で推移した。TMP は膜の目詰まりの進行によって上昇するが、インライン薬液洗浄により目詰まりが解消されれば、TMP が低下・回復する。ベース TMP を継続的に測定することで、インライン薬液洗浄による TMP 回復効果と長期間における膜ファウリング状況を監視した。**Fig. 4** 中に○で示したものがベース TMP である。運転開始当初 11 kPa 程度であったベース TMP は、経過日数 30～100 日頃において高く推移したが、その後安定した。経過日数に伴い徐々にベース TMP は上昇し、最終的に経過日数 400 日頃には約 17 kPa になった。定期実施する次亜塩素酸ナトリウムによるインライン薬液洗浄で除去が困難な目詰まりの蓄積の結果だと推測されたため、**Fig. 4** 中に記した「↓」マークのタイミングでクエン酸によるインライン薬液洗浄を実施した。その結果、最終的にベース TMP を運転開始時と同等の 11 kPa 程度まで回復させることができた。本結果より間欠曝気装置を組み合わせた 3 段積み膜ユニットを用いて **Table 3** で示す運転条件で、高水温から低水温期にかけて安定した膜ろ過運転が可能であることが実証された。

3.2 消費電力量低減効果

本実験結果から、膜曝気洗浄に係る消費電力量を試算し、消費電力量低減効果を評価した。試算した結果を **Table 4** に示す。**Table 4** に示す SAD_m は膜面積あたりの曝気洗浄空気量であり、 SAD_p は膜ろ過水量当りの曝気洗浄空気量である。今回、平成 24 年から 28

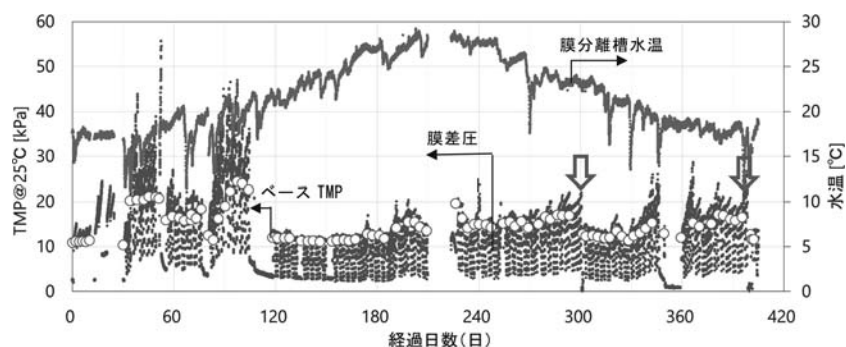


Fig. 4 Time course of TMP and water temperature of the pilot test

Table 3 Main characteristics of the process water

項目	平均（最小～最大）
膜分離槽 MLSS (mg/L)	9200 (6700～14600)
膜分離槽 粘度 (mPa·s)	64 (19～260)
膜分離槽 ノルマルヘキサン抽出物 (mg/L)	75 (16～200)
膜ろ過水 SS (mg/L)	1 未満
膜ろ過水 ノルマルヘキサン抽出物 (mg/L)	5 未満

Table 4 Calculation of specific energy consumption of MBR air scouring

ユニット・曝気装置	フラックス ($m^3/(m^2 \cdot d)$)	SAD_m ($Nm^3/(m^2 \cdot hr)$)	SAD_p (Nm^3/m^3)	膜曝気洗浄に係る 消費電力量原単位 (kWh/m^3)
2 段積みユニット・連続曝気（従来）	0.54	0.18	8.1	0.16
3 段積みユニット・間欠曝気（今回）	0.88	0.15	4.1	0.08

年まで実施した飯能市、日本下水道事業団との共同研究のケーススタディで使用した膜ユニット形式、フラックス、 SAD_m ¹⁾を用いて改めて膜曝気洗浄に係る消費電力量を試算し、今回の実証技術の試算結果と比較した。日最大汚水量 5000 m^3 の下水処理場を想定した場合の必要膜ユニット数と必要な膜曝気洗浄空気量を算出し、その空気量から送風機の動力 kW を算出した。1日当りの消費電力量は、送風機動力に1日当りの運転時間 24 hr/d を乗じて、その値を汚水量 $5000\text{ m}^3/\text{d}$ で除して、最終的に膜曝気洗浄に係る消費電力量原単位 kWh/m^3 として記した。**Table 4** に示すように、今回実証した技術は、従来技術に比べてフラックスが高く、かつ SAD_m が低く、その結果として SAD_p も低くなった。膜曝気洗浄に係る消費電力量原単位は従来技術の $0.16\text{ kWh}/\text{m}^3$ に対し、今回技術は $0.08\text{ kWh}/\text{m}^3$ となり、50% の消費電力量低減効果が得られることを確認できた。文献³⁾によると、日本国内の省エネルギー型 MBR の SAD_m は $0.15\sim 0.20\text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{hr})$ の範囲、 SAD_p は $4.6\sim 8.0\text{ Nm}^3/\text{m}^3$ の範囲であるとの報告があり、今回実証技術の SAD_m 、 SAD_p はこれら既往研究値と比較して同等以下あることを確認した。今回実証した省エネルギー型セラミック平膜を用いることで、MBR のさらなる省エネルギー化を期待することが示唆された。

4. 結 論

間欠曝気装置を組み合わせたセラミック平膜ユニットについて、**Table 2** に示した運転条件により低水温から高水温期を含む 14 カ月弱の長期膜ろ過運転を実施し、安定した膜ろ過が可能であることが実証された。

今回実証結果に基づく膜曝気洗浄に係る消費電力量原単位は、 $0.08\text{ kWh}/\text{m}^3$ と試算され、セラミック平膜の従来技術に比べて原単位が 50% 低減された。今回実証した省エネルギー型セラミック平膜を用いることで、MBR のさらなる省エネルギー化を期待することができることが示唆された。

謝 辞

本実証実験の実施にあたり多大なるご協力ご支援を頂いた下水処理場関係者各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 打林真梨絵, 豊岡和宏, 新井喜明, 佐野勇, 山下喬子, 橋本敏一: セラミック平膜を用いた浸漬型 MBR システムの省エネ化と合流式下水道への対応に関する研究, 下水道協会誌, Vol. 55, No. 665, pp. 66-75 (2018)
- 2) H. No. guchi, Q. Yin, S. Lee, T. Xia, T. Niwa, W. Lay, S. Chua, L. Yu, Y. Tay, M. Nassir, G. Tao, S. Ooi, A. Dhalla and C. Gudipati: Performance of Newly Developed Intermittent Aerator for Flat-Sheet Ceramic Membrane in Industrial MBR System, Water, Vol. 14, No. 15, 2286 (2022)
- 3) 日本下水道事業団 技術評価委員会: 膜分離活性汚泥法の技術評価に関する第3次報告書 —— MBR の省エネ化と流量変動対応 ——, p. 5 (2022)