

下水・工業排水処理向け省エネルギー・省スペース型膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”

安永 望* 古川誠司***
時盛孝一*
今村英二**

Energy and Space Saving Membrane Bioreactor "EcoMBR" for Municipal and Industrial Wastewater

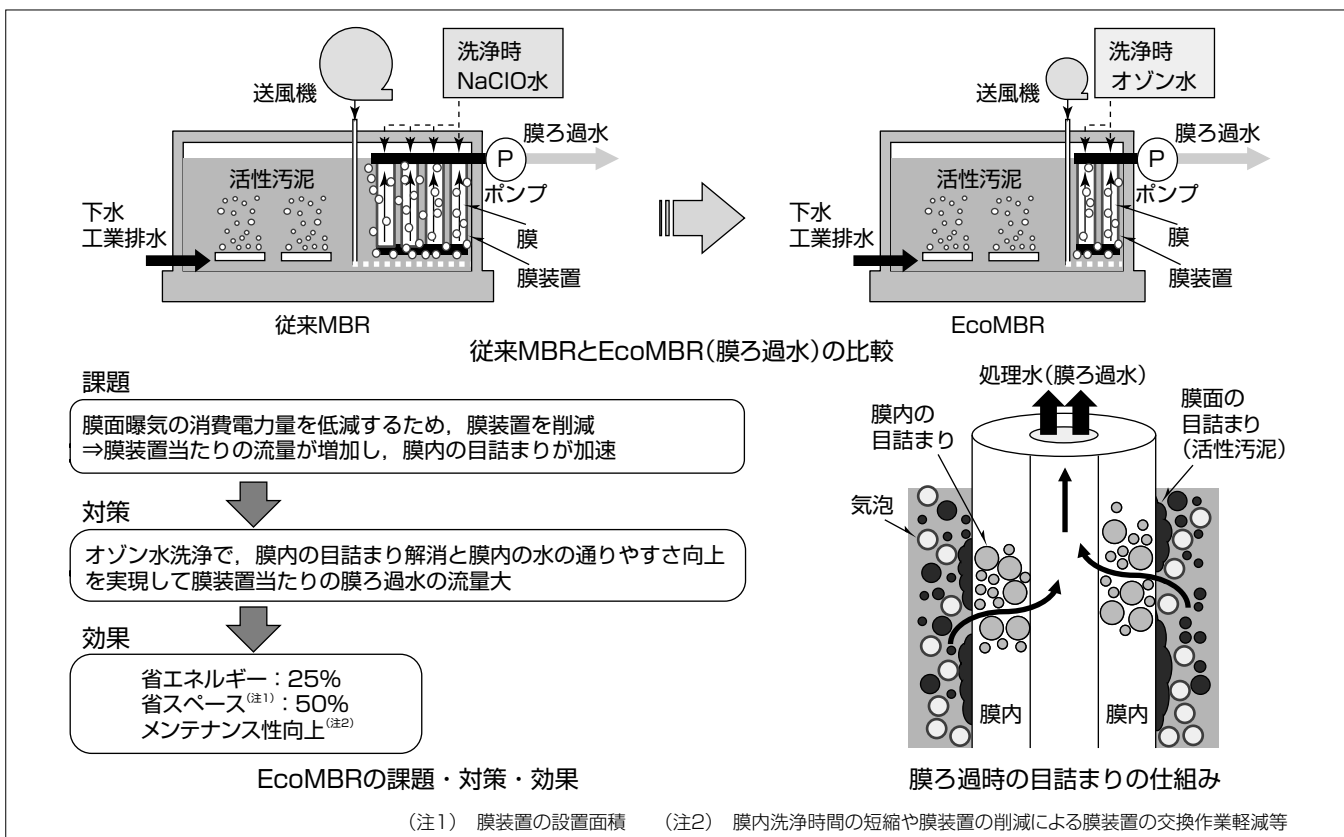
Nozomu Yasunaga, Koichi Tokimori, Eiji Imamura, Seiji Furukawa

要 旨

気候変動による水資源の偏在、人口増加・産業発展による水需要の拡大、人口集中による水質汚濁等によって、水資源不足が地球規模で問題となっている。そのため、下水や工業排水の農業・工業用水としての再利用が進められ⁽¹⁾⁽²⁾、水再利用装置が果たす役割はますます重要となっている。

水再利用装置としては、膜分離バイオリアクタ(Membrane BioReactor: MBR)、オゾン処理装置、逆浸透膜等がある。MBRは膜装置で処理水と活性汚泥を分離する。膜の利用によって、浮遊物のない再利用に適した処理水が得られる一方で、膜面及び膜内の目詰まり対策が必要となる。膜面は目詰まりしないよう常時、送風機で曝気(ばっき)し膜面を洗浄する必要があり、その消費電力量が大きいことが課題である。消費電力量を低減するには、膜装置を削減

して曝気する膜の表面積を小さくすることが考えられるが、この場合、膜装置当たりの流量を大きくする必要が生じるため、膜内の目詰まりが加速される。三菱電機は、従来膜内の洗浄に使用されているNaClO(次亜塩素酸ナトリウム)水より酸化力の大きいオゾン水を使用することによって目詰まりを解消し、さらに膜内の透水性(水の通りやすさ)を向上させた省エネルギー・省スペースの膜分離バイオリアクタ“EcoMBR”を開発中である。EcoMBRは従来のMBRと比較して消費電力量25%低減、膜装置の設置面積50%低減を見込む。さらに、膜装置の削減等によってメンテナンス性の向上も期待できる。EcoMBRの実用化によって豊かな水循環社会の実現に貢献する。



“EcoMBR”の特長

EcoMBRは、従来の膜内洗浄剤であるNaClOより大きい酸化力を持つオゾン溶解した水(オゾン水)を用いた膜分離バイオリアクタである。膜装置当たりの流量を大きくして膜装置を削減し、膜面の洗浄に必要な膜面曝気風量を低減して省エネルギー・省スペースとメンテナンス性向上を実現する。

1. ま え が き

1.1 開発の背景と課題

MBRは、被処理水中の有機物を微生物である活性汚泥で除去し、膜装置で処理水、すなわち膜ろ過水と活性汚泥を分離する水再利用装置である。従来の活性汚泥法と比較すると、膜で活性汚泥と膜ろ過水を分離することから、処理水に浮遊物質が含まれず、再利用に適した処理水が得られる。さらに活性汚泥法では最終沈殿池で時間をかけて活性汚泥を沈降させて処理水と分離するが、MBRではこの最終沈殿池を膜分離槽で代替するため、水再利用装置の設置面積を低減できる。これらの利点から、現在は下水・工業排水の再利用処理に広く活用されている。

しかしMBRは活性汚泥による膜面及び膜内の目詰まり対策が必要である。通常、膜面の目詰まりは送風機で曝気して洗浄することによって除去する。一方、膜内の目詰まりはNaClO水等の洗浄水をろ過時と反対方向に注水することによって除去する。膜面は常時曝気して洗浄する必要があり、その消費電力量はMBRの消費電力量の最大で約8割と大きい⁽³⁾。

膜面曝気に要する消費電力量を低減する方法として、洗浄する膜の表面積を小さくするために、膜装置を削減することが考えられる。ただしその場合、同じ水量を処理するために膜装置当たりの流量を大きくする必要があるが、膜内の目詰まりが加速されるため、それを解消する手段が必要となる。

1.2 開発の狙い

当社はこれらの課題を解決するため、従来の洗浄水であるNaClO水より大きな酸化力を持つオゾン水に着目した。高濃度オゾン水で膜内を洗浄することによって目詰まり物質をほぼ完全に除去でき、さらに、高濃度オゾン水で膜を構成する材料の表面を酸化し、水になじみやすくさせて透水性を向上させた。これによって、膜装置当たりの流量を大きくすることで膜装置を削減しても従来と同じ膜ろ過水量を確保でき、曝気風量、すなわち送風機動力を低減してMBRを低コストで運転できる。膜装置の削減によって膜装置の設置面積も低減でき、MBRの省スペース化やメンテナンス性向上も可能である。

本稿では、この省エネルギー・省スペースを実現する膜分離バイオリアクタEcoMBRのシステム構成、及びその特長について述べる。さらにEcoMBRの適用によって得られるユーザーメリットについて整理する。

2. EcoMBRシステム

2.1 EcoMBRのシステム構成

図1にEcoMBRのシステム構成と動作フローを示す。EcoMBRは膜ろ過と膜面洗浄、及び膜内洗浄を繰り返しながら運転する。次にこのシステムの動作フローを述べる。

(1) 膜ろ過と膜面洗浄

膜ろ過を継続すると、徐々に膜面及び膜内が目詰まりする。常時、膜面曝気(図1①)することで膜面の目詰まりを抑制し、膜装置で活性汚泥から分離された膜ろ過水は処理水槽に貯留される(図1②)。膜ろ過を継続すると活性汚泥中の有機物等が徐々に膜内に蓄積し、目詰まりが進行することによって膜内の目詰まりを示す指標である膜間差圧が上昇する。

(2) 膜内洗浄

膜間差圧が所定値に達すると、一旦膜ろ過を停止して、膜内洗浄に切り替える。高濃度オゾン水による膜内洗浄では、膜ろ過水の一部をオゾン水タンクに引き込み(図1③)、高濃度オゾンガスをオゾン水タンクに注入して(図1④)高濃度オゾン水を生成する。

続いて、膜ろ過とは反対方向から高濃度オゾン水を膜装置に注入し(図1⑤)、高濃度オゾン水で膜内の目詰まり物質を酸化させることで膜内を洗浄する。膜内の洗浄完了後、膜ろ過を再開し、これらを繰り返してEcoMBRの運転を継続する。なお、オゾンは膜内の目詰まり物質と反応して消費されるが、膜装置を介して余剰のオゾン水が活性汚泥中に溶出する。溶出する余剰オゾン水中のオゾン量は大幅に低減しており、活性汚泥を構成する微生物の活性を低下させないため、活性汚泥へのオゾンの影響は無視できる。また膜分離槽内でオゾンは全て消費されるため、排オゾンガスは発生しない。

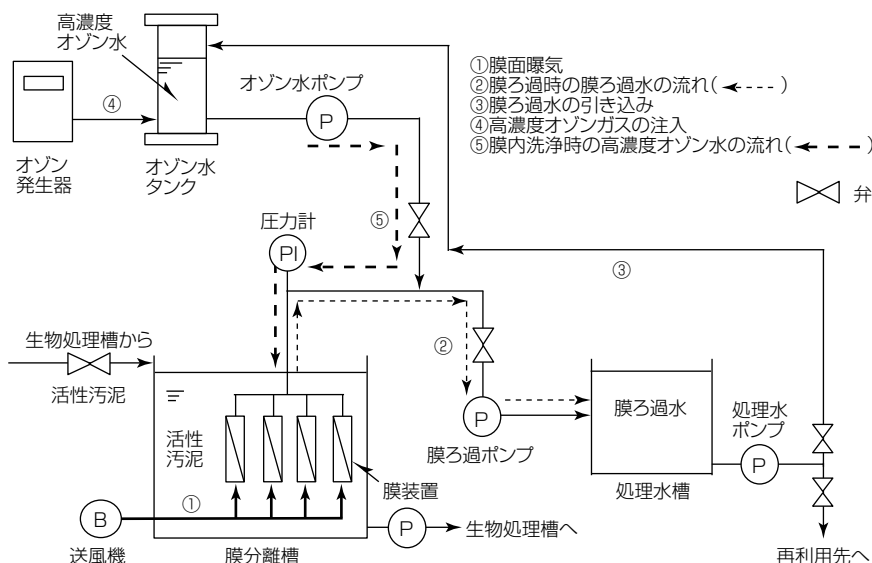


図1. EcoMBRのシステム構成と動作フロー

省エネ・創エネ

2.2 EcoMBRの特長

EcoMBRには次の3つの特長がある。それぞれについて小規模実験でその効果を確認しているため、検証結果も併せて述べる。

2.2.1 高濃度オゾン水による膜内洗浄と膜装置削減

EcoMBRでは、NaClO水より酸化力の大きい高濃度オゾン水で膜内を洗浄するため、目詰まりをほぼ完全に解消できる。その結果、膜装置当たりの膜ろ過水を増大させることが可能になり膜内の目詰まりが加速されても、長期的に安定した運転が可能となり膜装置を削減できる。

これについて、図2に示す試験装置を用いてEcoMBRの連続運転を実施し、運転安定性について検証した。MBR用の膜としては、一般的な使用材質であるPVDF (Poly Vinylidene DiFluoride) 製の中空糸型の膜装置(膜ろ過面積0.1m²)を用い、図2に示すとおり、膜装置の下部から送風機としてエアポンプを用いて常時膜面曝気を実施した。

結果としてフラックス、すなわち膜面積当たりの膜ろ過

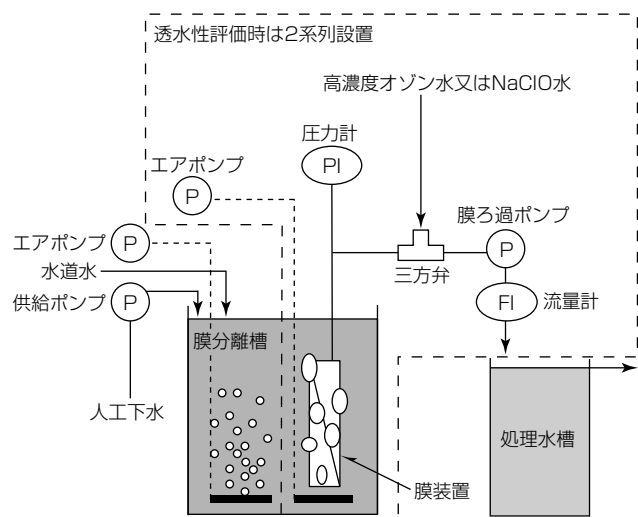


図2. 試験装置の模式図

水の流量を従来比2倍以上の1.6m³/日(=m³/m²/日)とし、膜装置を従来の半分に削減した。被処理水には人工下水を用いて膜ろ過運転を行った。膜間差圧が所定の値に到達した時点で膜ろ過運転を停止し、膜装置を膜分離槽に浸漬(しんせき)した状態で高濃度オゾン水を膜ろ過とは反対方向から注入する膜内洗浄を約30分間実施した。以上の動作を定期的に繰り返し、膜間差圧の推移を確認した。

EcoMBRを24日間連続して運転した際の膜間差圧の推移を図3に示す。図中の矢印で、高濃度オゾン水で膜内を洗浄した結果、図3中の破線で示したように膜間差圧は膜内の目詰まりの解消を示す膜ろ過前の約5kPaまで低減した。これによって、高濃度オゾン水で膜内を洗浄することで、膜装置を削減してフラックスを従来比2倍以上の1.6m³/日とした条件でも膜内の目詰まりを十分に解消でき、長期安定運転が可能であることが確認できた。

図3に示すようにEcoMBRでは、従来は1週間~1か月に1回程度であった膜内洗浄の頻度が数日から1週間に短くなるものの、膜装置当たりの流量を大きくし、さらに後述するように洗浄時間は従来のMBRより短縮できるため、従来のMBRと同等の膜ろ過流量を維持できる。EcoMBRでは、膜内洗浄用の高濃度オゾン水を生成するために必要な動力が増加するが、これによる消費電力の増加量は、膜装置を従来の半分以上に削減して低減した膜面曝気に要する送風機の消費電力量と比較して十分に小さく、全体の消費電力量低減が見込める。また、膜装置を従来のMBRの半分にすることで膜装置の設置面積を50%低減でき、EcoMBRによって省スペースなMBRを実現できる

なお、EcoMBR連続運転時の水質変化について、この実験期間中の総有機炭素(Total Organic Carbon : TOC)除去率、及び膜分離槽内の微生物(Mixed Liquor Suspended Solid : MLSS)濃度はそれぞれ約90%、8,000mg/Lでほぼ一定で、膜内洗浄後のオゾン水の膜分離槽流入による微生物への影響はなく、膜ろ過水の水質が良好であったことも確認できた。

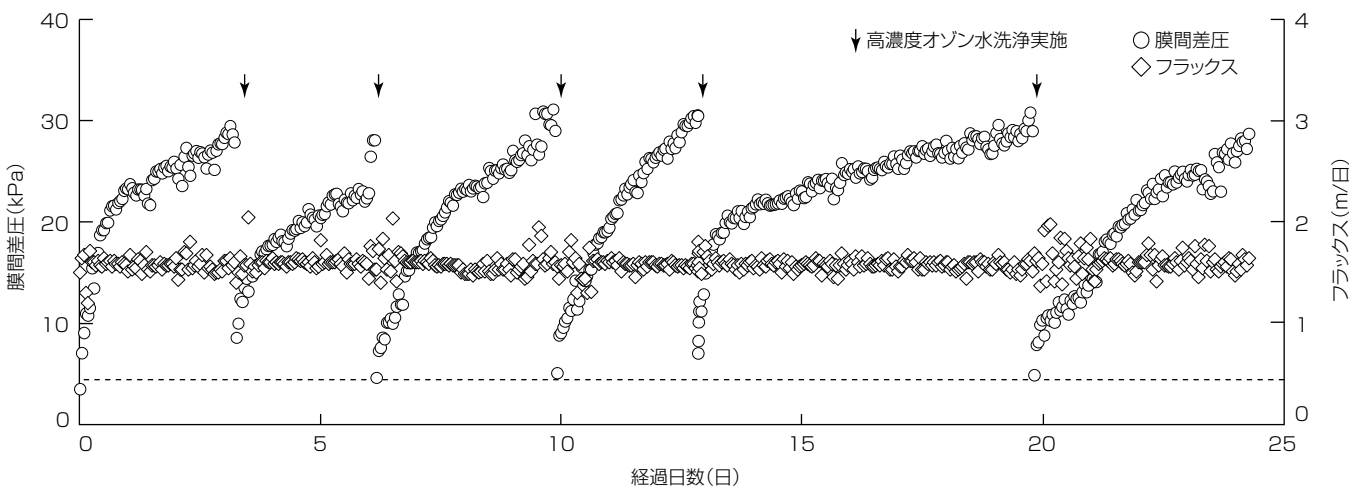


図3. 時間経過に伴う膜間差圧の推移

省エネ・創エネ

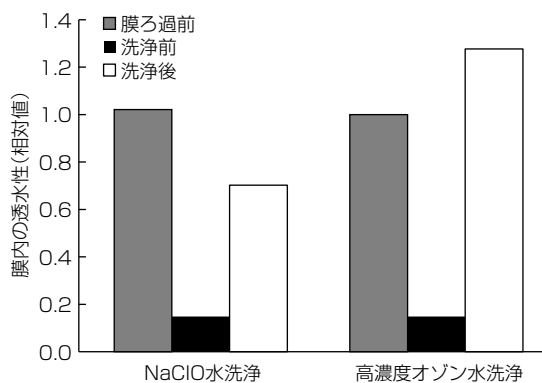


図4. 透水性の比較

2.2.2 膜内の透水性向上

膜内を高濃度オゾン水で洗浄することで膜内の目詰まりが十分に解消されるだけでなく、膜を構成する材料の表面が酸化されて、膜内が水になじみやすくなる。その結果透水性が向上し、膜装置当たりの流量の増大に有利になる。

この透水性向上についても試験装置を用いて検証した。図2と同じ試験装置を使用してMBRを運転し、NaClO水及び高濃度オゾン水で洗浄した場合の膜内の透水性を比較した。この試験ではNaClO水、高濃度オゾン水洗浄用に各1つ、計2つの膜装置を用意し、同条件でそれぞれ膜ろ過運転を実施して膜内を目詰まりさせた。続いて膜ろ過運転を停止し、各膜装置をそれぞれNaClO水、及び高濃度オゾン水で洗浄した。その後、各膜装置を膜分離槽から取り出して清水を通水し、その際の膜間差圧と通水流量から膜内の透水性を評価した。

膜ろ過前の透水性を1.0とし、NaClO水と高濃度オゾン水でそれぞれ洗浄した膜内の透水性を比較した結果を図4に示す。膜ろ過運転によっていずれも0.2未満まで膜内の透水性が低下した。続いてNaClO水で膜内を洗浄した場合、透水性は約0.7まで回復したが、高濃度オゾン水で洗浄した際の透水性は1.2以上まで向上した。高濃度オゾン水洗浄によって透水性が膜ろ過前より0.2以上向上したことから、オゾンによって膜内が水になじみやすくなったことを確認できた。

2.2.3 膜内の洗浄時間の短縮

洗浄水中のオゾンと膜内の目詰まり物質がすみやかに反応するため、高濃度オゾン水による膜内洗浄時間は、従来のNaClO水による膜内洗浄時間の約1/3~1/4と大幅に短くなる。図2に示した試験装置で膜内洗浄に要した時間は、NaClO水による膜内洗浄時間が90~120分であるのに対し、高濃度オゾン水洗浄の膜内洗浄時間は約30分であった。

表1. EcoMBR適用によるユーザーメリット

項目	ユーザーメリット
①省エネルギー	膜面曝気風量低減によるブロウ消費電力量の低減(25%)
②省スペース	膜装置削減による膜装置設置面積の低減(50%)
③メンテナンス性向上	膜内洗浄時間の短縮や膜装置削減による交換作業時間短縮

3. EcoMBR適用によるユーザーメリット

EcoMBRは、従来よりも膜装置当たりの流量を増大させて膜装置を削減して運転する。EcoMBR適用によるユーザーメリットを表1に示す。

EcoMBRでは、従来のMBRと比較して高濃度オゾン水生成に必要な動力が増加するものの、膜面曝気風量の低減による送風機動力の低減量が高濃度オゾン水生成に必要な動力の増加量より大きいため、約25%の省エネルギーを実現できる見込みである。さらに、膜装置を半分に削減することで膜装置の設置面積を50%低減でき、従来のMBRよりも省エネルギー・省スペースを実現できる。その上、高濃度オゾン水による膜内洗浄時間や、膜装置削減で定期的な膜装置の交換作業に要する時間も短縮できることから、メンテナンス性も向上する。

4. むすび

膜分離バイオリアクタEcoMBRのシステム構成、及びその特長について述べ、さらにEcoMBRの適用によって得られるユーザーメリットについて述べた。今後、従来よりも省エネルギー・省スペースでメンテナンス性を向上させたEcoMBRによって、下水や工業排水の再利用拡大に貢献できると考えられる。

現在はシンガポールで、実下水を対象とした連続運転を実施中である。さらに今後は、実規模で工業排水を対象にした実証試験を経て、EcoMBRの実用化を目指す。

参考文献

- (1) 山縣弘樹：米国カリフォルニア州モンレー郡における下水処理水の農業灌漑利用、環境システム計測制御学会誌, 14, No.2・3, 83~86 (2009)
- (2) 伊藤禎彦：下水処理水の飲用再利用におけるリスクの取り扱いについて、水環境学会誌, 39, No.6, 187~196 (2016)
- (3) 橋本敏一：日本下水道事業団における膜分離活性汚泥法の省エネ化に向けた取り組み、造水シンポジウム2014講演集, 13~24 (2014)

省エネ・創エネ