

廃棄物焼却施設における水リサイクルシステムの確立

Establishment of Water Recycling System in Waste Incineration Plants

—発電効率向上と排水クローズド化の両立—



平井友希子*
Yukiko Hirai



石山 明*
Akira Ishiyama



細田博之**
Hiroyuki Hosoda



山形成生***
Naruo Yamagata

近年、地球温暖化問題に対する対策が強く求められており、廃棄物焼却施設においてもCO₂排出量削減に配慮した施設の整備が進められている。これら要望に対応するために高温・高圧ボイラの採用などにより発電効率の向上が図られている。一方、廃棄物焼却施設は立地条件の制約等により、施設内で発生した排水を排ガス中で噴霧蒸発処理する排水クローズドシステムの採用を求められるケースが多く、発電効率が向上しない原因の一つになっている。当社は、発電効率をさらに高めるために、膜処理技術を用いて排水を適正処理・再利用することで噴霧蒸発量を大幅に削減できる水リサイクルシステムを確立した。

A plan to address the global warming issue has requested. In waste incineration plants, the upgrading of plants with CO₂ reduction considering have advanced. To comply with this request, we have adopted the use of high temperature and high pressure boiler, as a means to improve our electrical generating efficiency. In the waste incineration plants using closed system, the water drainage that occurs in the facilities is not discharged, because of the constraints of the existing geographical conditions. This is one of the causes to which electrical generating efficiency doesn't improve. To raise electrical generating efficiency further, we have established the water recycling system using membrane filtration technology.

Key Words :

廃 棄 物 焼 却 施 設	Waste incineration plant
水 リ サ イ ク ル	Water recycle
膜 処 理	Membrane filtration
精 密 ろ 過 膜	Microfiltration membrane
逆 浸 透 膜	Reverse osmosis membrane
発 電 効 率	Electrical generating efficiency
排水クローズドシステム	Closed system

【セールスポイント】

当社は様々な業種において、膜処理技術を活用した水リサイクルシステムによる水供給事業を展開している。水リサイクルに関する豊富な知見を廃棄物焼却施設に対して活用することで、より高い発電効率を有する廃棄物焼却施設が提供できる。

ま え が き

CO₂ 排出量の削減が各業界で求められているが、廃棄物焼却施設においても例外ではなく、熱回収率の最大化やシステム効率の向上による発電効率のアップと、それによる CO₂ 排出量の削減が求められている。その一環として、2010年度から高効率発電を達成した施設に対しては、施設建設に係る交付金の交付率を1/3から1/2にアップする施策（5年間時限）が施行（交付要件は施設規模に応じて設定）され¹⁾、発電効率の向上のための技術開発は本ビジネスを推進していく上で不可欠なものとなってきた。

一方で、廃棄物焼却施設は、山間部など下水道が整備されていない場所に建設される場合が多く、その場合は発生した排水を施設内で処理する排水クロードシステムの採用が求められる。一般に排水クロードシステムを採用した場合、場内排水を排ガス（減温塔）中で噴霧蒸発処理させるために、ボイラ出口排ガス温度が高めの設定となりボイラ効率が低下する。より効率的なエネルギー回収のためには、場内排水を適正処理・再利用し、噴霧蒸発処理する排水量を極力削減することが望まれる。

そこで当社は、薄膜トランジスタ液晶工場排水、鉄鋼工場排水、下水処理水等を対象とした水リサイクルシステムで採用の実績があり豊富な知見を持つ「精密ろ過（MF）膜＋逆浸透膜（RO）膜システム」^{2), 3)}を廃棄物焼却施設の排水処理設備に適用することで、蒸発処理水量を大幅に削減できるシステムを開発した。本システムは、場内排水を高度処理しプラント用水等として再利用することで蒸発処理水量を削減するもので、発電効率の向上に貢献できる。また、上水などの取水制限がある地域において

取水量を削減する場合にも有効なシステムである。

本稿では、この水リサイクルシステムを確立するために、石巻広域クリーンセンターで実施したフィールド実験の結果について報告する。

1. 水リサイクルシステム

今回、当社が開発した水リサイクルシステムのフローを図1に示す。施設内で発生した排水は、砂ろ過等の簡易な排水処理設備で処理された後、噴霧水として減温塔で蒸発処理される。そのため、排水量が多いほど蒸発処理に必要な熱量が大きくなり、ボイラ効率が低下する。これに対して、水リサイクルシステムを組込んだ場合、処理水をプラント用水等として再利用できるため、蒸発処理する水量が削減でき、ボイラ効率の向上が図れる。

水リサイクルシステムは、前処理としてMF膜（図2）を、脱塩膜としてRO膜（図3）を使用する2段階処理方式を採用した。

MF膜は、表面がフィルターとなっている直径約1mmのストロー状の中空糸膜を束ねた構造になっている。MF膜には孔径0.1μmの孔が開いており、微粒子・濁質、菌類を除去することができる。よって、原水濁度が変動してもろ過水質はきわめて清澄であり、RO膜への負荷を大きく減らすことができるため、RO膜の前処理として国内・国外で多数の実績を有する。

RO膜は、シート状の平膜をろ過を行う面を外側にして袋状に整形し、袋の開口部分を処理水の集水管に接続して海苔巻き状に巻いた構造となっている。RO膜はポリマーの鎖の間でろ過を行っており、ウイルス、各種塩類やタンパク質等のイオン・低分子類を除去することができる。

施設内で再利用可能な水の回収率は、これまでの

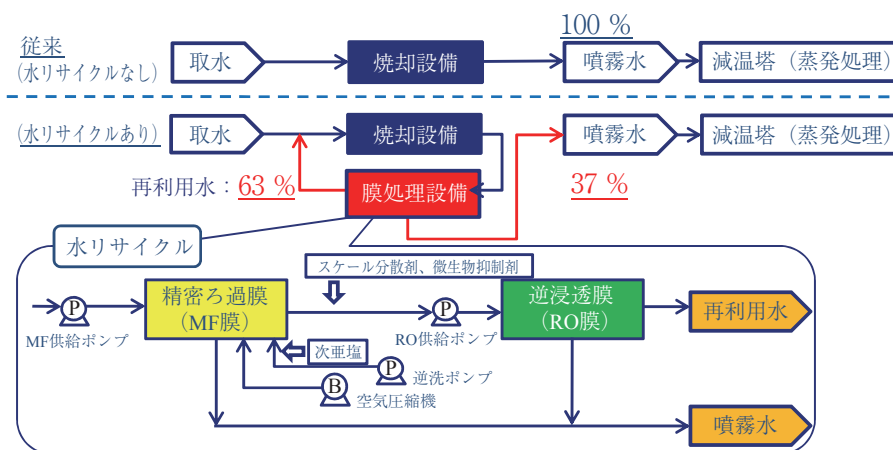


図1 水リサイクルシステムフロー

当社の実績から、水リサイクルシステム全体で63%（MF：90%，RO：70%）を想定し、実証実験を行うものとした。

2. フィールド実験

2.1 実証実験装置

実験装置の概略フローを図4に示す。また、実験

装置の概観を写真1, 2に示す。実験では、砂ろ過水の一部を分岐し実験設備の原水とした。実験設備で処理した後に得られる各種処理水は、施設内の水槽に返送するものとした。

使用した膜の仕様を表1に示す。MF膜には、耐薬品性に優れているポリフッ化ビニリデン（PVDF）

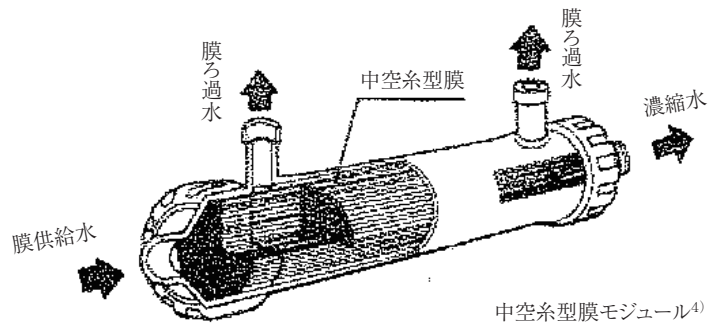
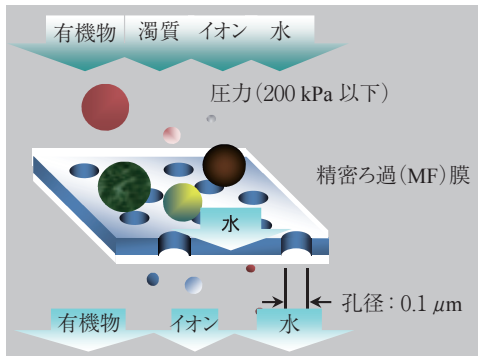


図2 MF 膜

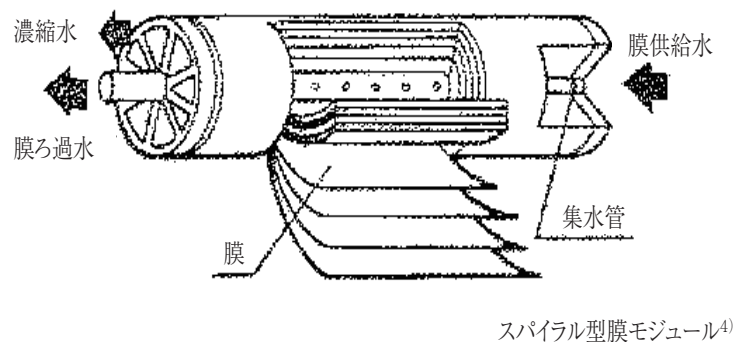
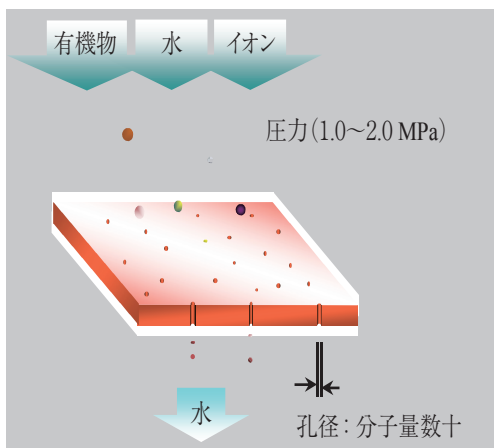


図3 RO 膜

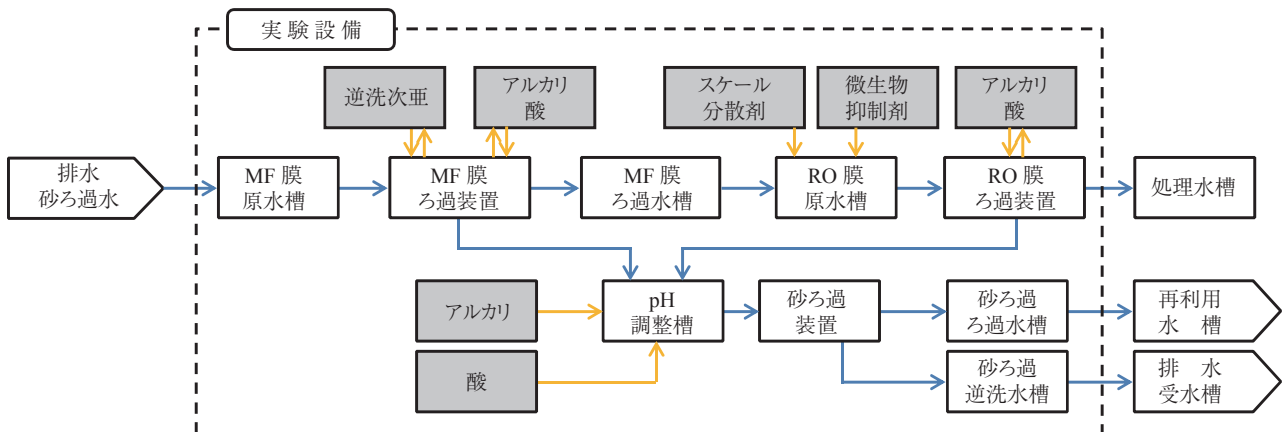


図4 実験装置フロー



写真1 実験装置外観（MF膜側）

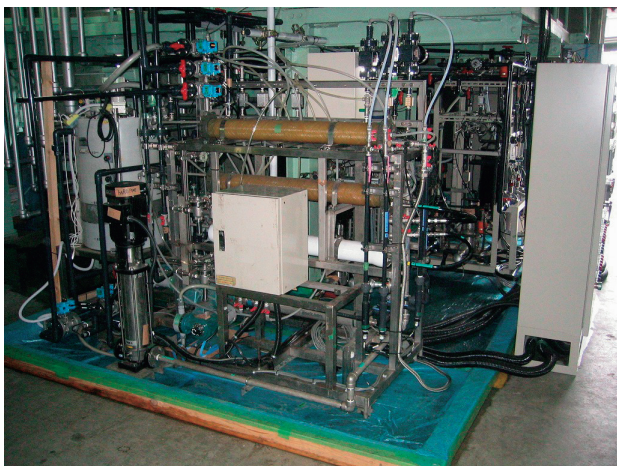


写真2 実験装置外観（RO膜側）

表1 膜仕様

	MF 膜	RO 膜
形 状	中空糸膜	平 膜
膜 材 質	ポリフッ化ビニリデン	ポリアミド
最高使用圧力	300 kPa	6.9 MPa
最高使用温度	40 ℃	40 ℃

製を用いた。RO膜には、ポリアミド系を主体としたものを用いた。実験装置には、膜の差圧上昇を防止するために薬品洗浄装置を設け、実験の中で洗浄方法の最適化を図った。

2.2 実証項目

本システムを実機プラントで採用するためには、排水性状の年間変動等に十分対応し長期間にわたっ

て安定した水質が得られることを実証する必要がある。つまり実証項目は、「長期安定運転」と「処理性能」の確認である。そこで、石巻広域クリーンセンターにて、のべ507日の通水実験を行い、年間を通じた安定運転と目標とする水質が安定して得られることを確認した。

①安定運転の達成

廃棄物焼却施設の排水の特性に適した透過流速、処理圧力・流路圧損の上昇を防止するための逆洗方法、薬品洗浄の方法を確認した。当社の経験および今回の実験を通じて、薬品の選定、洗浄水の薬品濃度、薬品洗浄するタイミングなどを見極め、膜交換頻度を1回／年とすることを目標とした。

他分野における水リサイクルシステムでは、処理水量が多く膜の本数が非常に多いため、水リサイクルシステムに要するイニシャルコストおよびランニングコストのうち、膜に関するコストが主体となる。したがって、洗浄の方法の最適化や適切なメンテナンスにより、膜の交換頻度をいかに少なくするかが重要な課題となっている。これに対して廃棄物焼却施設の場合は、処理水量が少ないため膜本数も数本と非常に少なく、膜自体のコストは非常に安価となる。膜交換コストやメンテナンス負荷などを検討した結果、年1回の定期点検時に膜を交換することが望ましいと判断した。

②処理性能の確認

膜処理水がプラント用水等に再利用可能であることを確認した。また、処理した排水のうち施設内で再利用できる割合（回収率）が、システム全体で63 %（MF：90 %，RO：70 %）以上を安定して確保できることを確認した。この回収率が高いほど、噴霧蒸発処理する排水量が少なくなるため、施設の発電効率は高くなる。

2.3 運転条件

運転条件を表2に示す。

年間を通して安定した運転を実現するためには、運転を継続することにより進行する膜のファウリング（分離対象物の付着や目詰まり）を抑制・制御することが重要になる。当社のこれまでの知見をもとに、薬品の選定や洗浄条件を決定した。

MF膜では、有機物や微生物によるファウリングが生じる。そこで、物理洗浄逆洗時に次亜塩素酸ナトリウムを用いて、有機物ファウリングの酸化および微生物が繁殖し難い環境をつくることとした。それでも除去しきれないファウリングを除去するため

に、薬品洗浄（循環・浸漬）を実施した。薬品洗浄の使用薬品には、廃棄物焼却施設で使用されている苛性ソーダと塩酸を用いた。

RO 膜では、シリカや炭酸カルシウムが溶解度を超えて膜面で析出するスケールや、微生物または分泌物の作用により膜面にバイオフィームが形成するバイオフアウリングが生じる。そこで、スケールに対してはスケール分散剤を用い、また、バイオフアウリングに対しては微生物抑制剤を用いて、抑制を図った。抑制を図っていても蓄積する汚染物質を除去するため、MF 膜と同様、薬品洗浄（循環・浸漬）を実施した。

3. 結果および考察

3.1 安定運転の達成

MF 膜の運転状況を図 5 に示す。原水性状の急な変化で処理圧力が急に上昇することがあっても、逆洗を継続して実施することで速やかに回復した。また、運転を継続することにより、逆洗だけでは取り除けないファウリングが蓄積し、処理圧力が 200 kPa に達した。その時点で薬品洗浄を実施したところ、初期処理圧力まで膜を回復することができ、その後も安定した運転を継続することができた。このことから、設定した条件での逆洗および薬品洗浄が効果的であることを確認できた。

RO 膜の運転状況を図 6 に示す。処理圧力はスケ

ール等の膜細孔内の目詰まりと、流路圧損はバイオフアウリング等の流路閉塞と相関がある。流路圧損の若干の上昇が認められるが、定期的な薬品洗浄により回復しているため、問題なく運転を継続することができた。

以上より、MF 膜・RO 膜ともに逆洗および薬品洗浄を適切に行うことで、膜差圧を上昇させることなく（薬品洗浄で回復できない程度のファウリングを蓄積させることなく）1 年間通じて安定した運転ができ、目標の膜交換頻度 1 回／年を達成することができた。

3.2 処理性能の確認

3.2.1 回収率

回収率の推移を図 7 に示す。MF 膜については、平均で約 95 % で回収率 90 % 以上を維持することができた。RO 膜については、平均で約 74 % で回収率 70 % 以上を維持することができた。したがって、水リサイクルシステム全体の回収率としては、平均で約 70 % となり、当初想定した 63 % を大幅に上回

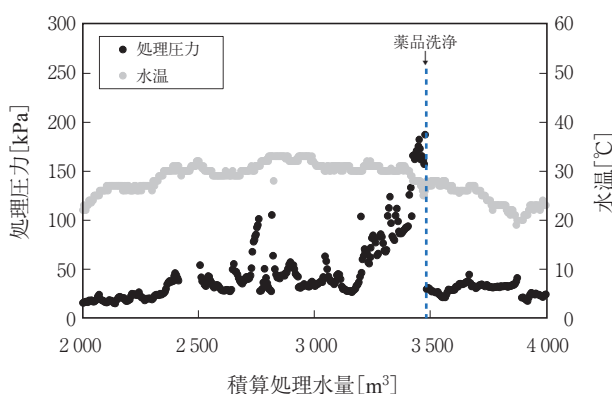


図 5 MF 膜運転状況（一部抜粋）

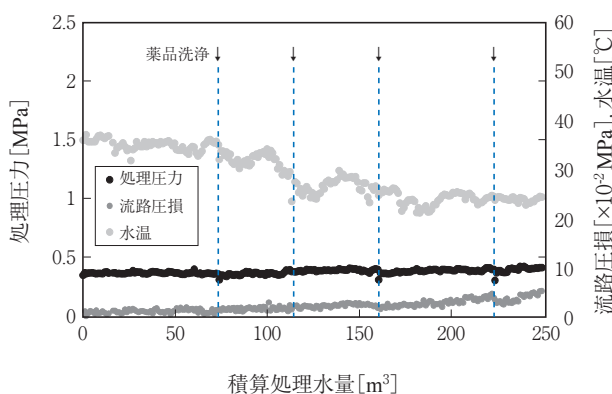


図 6 RO 膜運転状況（一部抜粋）

表 2 運転条件

MF 膜	
透過流量	1.2 m³/m²/d (平均)
回収率	95 %
物理洗浄条件	頻 度：30 min / 回
	工 程：水逆洗＋エアバブリング→フラッシング
	水逆洗時注入薬品：次亜 0～50 mg/L_1min
薬品洗浄条件	使用薬品：（アルカリ）苛性 1 %，（酸）塩酸 1 %
RO 膜	
透過流量	0.3 m³/m²/d
回収率	75 %
薬品洗浄条件	使用薬品：（アルカリ）苛性 pH11～12，（酸）塩酸 pH 1～2

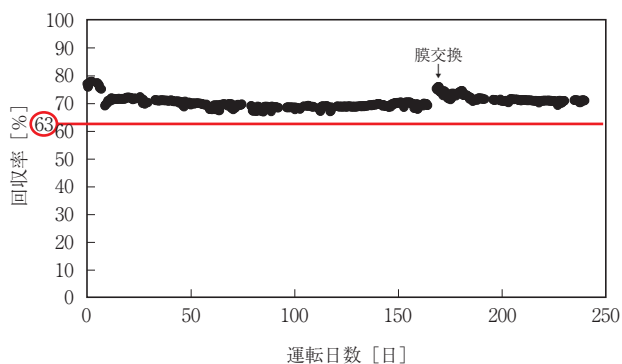


図7 回収率の推移

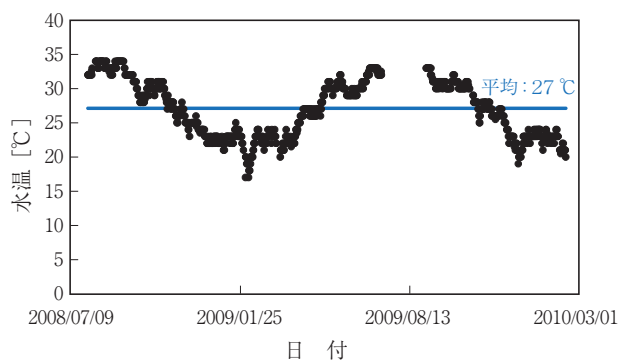


図8 水温の変化

表3 原水水質 分析結果

項 目	平 均	最 大
pH (25℃)	7.0	7.4
電気伝導度 (25℃) $\mu\text{s}/\text{cm}$	1 067	1 260
塩化物イオン mg/L	242	310
硫酸イオン mg/L	91	156
酸消費量 (pH4.8) (M- アルカリ度) mgCaCO_3/L	57	92
全硬度 mgCaCO_3/L	116	143
カルシウム硬度 mgCaCO_3/L	88	104
イオン状シリカ mg/L	24	29

表4 膜処理水質 分析結果

項 目	平均	最大	基準値
pH (25℃)	6.8	7.6	6.0～8.0
電気伝導度 (25℃) $\mu\text{s}/\text{cm}$	61	89	300以下
塩化物イオン mg/L	9	14	50以下
硫酸イオン mg/L	0.3	0.7	50以下
酸消費量 (pH4.8) (M- アルカリ度) mgCaCO_3/L	5.3	8.1	50以下
全硬度 mgCaCO_3/L	2.0未満	2.0未満	70以下
カルシウム硬度 mgCaCO_3/L	2.0未満	2.0未満	50以下
イオン状シリカ mg/L	1.1	1.7	30以下

* 基準値：日本冷凍空調工業会標準規格 JRA-GL-02-1994
補給水水質基準 基準項目

る回収率を得ることができた。

3.2.2 水 質

1) 原水性状

原水（砂ろ過水）水質を表3に示す。廃棄物焼却施設の排水は、硬度が低い、シリカの含有濃度が比較的高いため、スケーリングに注意する必要があるが、それ以外の成分は問題ない濃度であった。

また、膜の最高使用温度は、MF膜、RO膜ともに40℃であるため、本システムを廃棄物焼却施設に導入する際は、水温の変化にも十分留意しておく必要がある。とくに廃熱ボイラがある場合は、ブローした高温のボイラ排水が排水受水槽に流入し原水の温度が上昇する可能性がある。そこで、長期運転において原水の温度を確認した（図8）。その結果、夏季においても最高温度は34℃（7～8月）までしか上昇せず、問題ないことが確認できた。

2) 処理水

膜処理水の水質を表4に示す。日本冷凍空調工業会の冷却水水質基準を全ての項目においてクリアし

た。これにより、膜処理水はプラント用水等として使用可能であることを確認した。

3) 噴霧対象水

本システムを実案件で採用した場合、MF逆洗排水、RO濃縮水は、専用の水槽に一時貯留された後に排ガス中に噴霧され蒸発処理されることになる。実験で得られた各排水の水質を表5に示す。塩類は原水に比べ濃縮されているが従来の噴霧設備で十分対応できるレベルであることが確認できた。

む す び

膜処理技術を用いて、排水を適正処理・再利用することで噴霧蒸発量を大幅に削減できる水リサイクルシステムを開発した。今回、実プラントにおける長期実証実験を通じて安定運転性能および処理性能が確認できたことで、今後計画される高効率発電施

表5 噴霧対象水 分析結果および計算値

項 目	MF 逆洗排水		RO 濃縮水		噴霧対象水
	平 均	最 大	平 均	最 大	計算値
pH (25℃)	7.4	8.2	7.8	8.2	—
電気伝導度 (25℃) $\mu\text{S}/\text{cm}$	124	317	342	483	—
塩化物イオン mg/L	289	735	819	1 300	1 219
硫酸イオン mg/L	93	138	338	849	747
酸消費量 (pH4.8) (M- アルカリ度) mgCaCO_3/L	61	126	184	352	320
カルシウム硬度 mgCaCO_3/L	86.9	103.0	329	419	374
イオン状シリカ mg/L	24	28	81	142	126

*計算値：MF 逆洗排水，RO 濃縮水の最大値より算出

設に採用していく予定である。

① 安定運転の達成

膜差圧の上昇を防止する運転方法を確立した。膜交換頻度1回／年を可能とし，メンテナンス負荷や経済性を考慮した水リサイクルシステムが構築できた。

② 処理性能の確認

処理水はプラント用水等に再利用可能であるため，噴霧蒸発処理する水量が削減できる。水の回収率（施設内で再利用できる割合）は，システム全体で63 %以上（実験結果：70 %）を安定して維持することができ，発電効率向上に貢献できる

システムであることが確認できた。

最後に，本実証実験を実施するにあたり，石巻広域クリーンセンターの関係各位に多大なご助言，ご協力をいただきました。記して深謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 環境省：高効率ごみ発電施設整備マニュアル（平成22年3月改定）
- 2) 長谷川進ほか：神鋼環境ソリューション技報，vol.5, no.1, 2008, p.24-28
- 3) 真鍋恵：神鋼環境ソリューション技報，vol.3, no.1, 2006, p.8-11
- 4) (社) 日本水環境学会：膜を利用した水再生，2008, p.35-36, 技報堂出版

*商品市場・技術開発センター 水・汚泥技術開発部 水処理室 **商品市場・技術開発センター プロセス技術開発部 廃棄物処理室
***環境プラント事業部 第一技術部 技術室