

サウジアラビア工業団地向け排水再生システム (NEDO 実証事業)

Demonstration Project at MODON Dammam 1st Industrial City of the Kingdom of Saudi Arabia Wastewater Reclamation Plant



塩田憲明*
Noriaki Shiota



宮岡 昇**
Noboru Miyaoka

当社は、サウジアラビア王国ダンマン第1工業団地向けに排水再生システム実証設備を納入した。本設備は、工場廃水を生物処理したのち、処理水をRO膜で脱塩して工業用水レベルの水を回収するものである。納入後8カ月にわたる運転で、工場排水は、脱塩率98%以上、TDS 100 mg/L以下にまで処理されている。本システムのエネルギー消費量は、海水淡水化法で造水して工場に工業用水として使用したのち排水処理する場合のトータルエネルギー消費量に比べて32%低く、海水淡水化法に代わる工業用水の供給源として経済的に成立つものである。

This paper describes the system configuration and operating results of a newly installed demonstration plant for wastewater treatment and reclamation in MODON Dammam 1st Industrial City, Saudi Arabia. Industrial wastewater was treated by using membrane bio-reactor (MBR) and reverse osmosis (RO) in order to produce desalinated water for industrial reuse. The plant has been operated for more than 8 months since August of 2017. The reclaimed water quality always meets with the target values of each parameter, which shows 100 mg/L or less of TDS. Average salt rejection in the system was over 98 %, indicating that most of the dissolved salts and inorganic molecules were removed. Total energy consumption of the system seems to be 32 % lower than that of the conventional system of sea water RO desalination combined with wastewater treatment. The results indicate that the proposed system is economically useful for production of industrial water in the cities.

Key Words :

排水回収
工業団地
膜分離活性汚泥法
逆浸透

Wastewater Reclamation
Industrial City
Membrane Bio-reactor
Reverse Osmosis

【セールスポイント】

- ・ 当社の持つ排水回収再利用技術の設計および操業ノウハウをベースに、中東諸国工業団地での排水再生システムの普及を目指します。

まえがき

中東地域で人口の増加や都市化・工業化の進展に伴って水需要がひっ迫しており、地下水以外の新たな水資源の開発が必要となっている。実用化されている新たな水資源としては、海水淡水化に加えて下水・産業廃水のリサイクルが挙げられる。海水淡水化は造水のために多大なエネルギーを消費するため、造水の省エネルギー化が重要な課題となっている。このことから、近年、下水・産業廃水を再利用するニーズが高まっている。下水処理水の再利用率は日本よりも高いにもかかわらず、多くは灌漑用水や修景用水として利用されているのみであり、生活用水や工業用水として利用されるには至っていない¹⁾。一方、飲用用途でない工業用水としての水再利用は比較的ハードルが低く、工業団地内での水リサイクルネットワークの構築が期待されている。

千代田化工建設（株）と当社は、これまでにサウジアラビア工業団地における水再利用を検討しており、膜分離法を用いた省エネ型排水再生システムを新たな造水技術として提案している^{2, 3)}。排水再生システムに適用するコア技術として、膜分離活性汚泥法（MBR; Membrane Bio-Reactor）と逆浸透（RO; Reverse Osmosis）膜からなる膜分離法を採用している。また、油分の流入が多いことを想定して前処理には加圧浮上分離法（DAF; Dissolved Air Flotation）をこれに組合わせている。

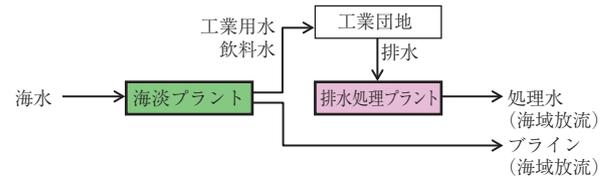
当社は、2013年に千代田化工建設（株）からサウジアラビア工業団地公団（以下、MODON）向け排水再生システム実証設備の設計・機器調達・現地SV業務を受注した。本稿では、この排水再生設備の概要と、2017年8月より実施した設備の試運転、ならびに実証運転の状況について報告する。

1. 実証技術について

図1に従来技術と排水再生システムをおのおの組込んだ工業団地の水利用フローを示す。従来型システムの工業団地では、全量海水から作られた淡水を工業用水として使用したのち、工場廃水は一括して排水処理されて海域に放流される。大量の海水由来の淡水が必要で、造水と排水処理の両方にエネルギーが消費される。

一方、排水再生システムを組込んだ工業団地では、工場廃水から造水した再生水がメインの供給源となるため、海水由来の淡水使用量が減り、トータルエネルギー使用量が30%程度（廃水 TDS 8 000 mg/L ベース）削減されると試算した³⁾。すなわち、建設費が高くエネルギー消費型の海水淡水化プラントの建

<従来システム>



<排水再生システム>

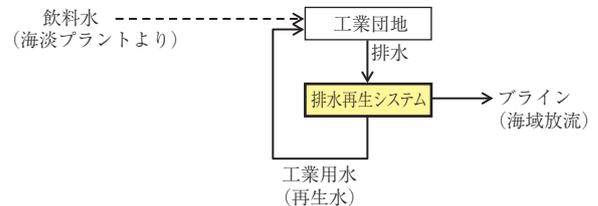


図1 工業団地における水供給システム
(従来システムと提案システム)

設を抑えて、低コスト・省エネルギーの排水再生システムとの共存による水資源のベストミックスが提案できる。そこで、今回対象となる廃水の TDS 3 000 mg/L と予想して、排水再生システムによる動力原単位を試算し、従来システムからのエネルギー削減率40%を目標とし、これを実証設備で検証することを目的とした。

MODON より複数の導入技術実証候補サイトの提示を受け、現地調査の結果、その中からダンマン第1工業団地（以下、DIC-1）が選定された。この工業団地は、200万 m² の敷地に120事業所が入居しており、新たに入居できる余地はほとんどないため工場への用水供給量および工場排水量もほぼ確定している。この工業団地は軽工業が中心で、地下水（井戸水）が用水源となっている。地下水とはいえ、TDSは海水の10分の1程度の数千 mg/L であるため、飲料水レベルの水を造るには脱塩処理が必要となっている。近年、地下水の枯渇への懸念から、地下水の使用制限が進むと見られており、排水再生システムが経済的に成立しやすいサイトと思われる。また、同サイトでは、これまで工場廃水は未処理のままオフサイトの国営下水処理場に放流されており、この下水処理場からは流入廃水の削減が求められていることから、排水処理・再利用に伴う流入廃水量と汚濁負荷量の削減も期待できることも選定理由となった。

2. 実証設備の概要

2.1 プロセス検討の経緯

実証設備の設計条件は以下のとおりである。

設計流入廃水量：5 000 m³/d

設計造水量（再生水量）：3 500 m³/d

水回収率：70 %

設計水質：表 1 参照

事前の DIC-1 実廃水分析値では TSS 濃度、有機物 (BOD, COD) 濃度とも設計値を大幅に下回っていたが、MODON との協議において各工場の廃水排出基準を実証設備の原水設計値とすることを決めた。

除去対象物質は、油分、TSS、有機物 (BOD, COD, TOC)、溶解塩類 (TDS) であり、再生水の要求水質としてとくに TDS を考慮した処理プロセスとした。油分と SS を除去するために DAF を、有機物除去には MBR を採用した。MBR は、従来の活性汚泥法に比べて省スペースで、固液分離が確実に行われるために処理水が非常に清浄であり、処理水の再利用用途には最適である。また、TDS を除去するために RO を採用した。RO ではほとんどの溶存物質を除去することができる。排水再生シス

テムは DAF+MBR+RO の水処理プロセスに汚泥脱水機を加えたシステム構成とした。図 2 に設備の処理フローを示す。

2.2 実証設備の仕様と特徴

表 2 に各設備の主仕様を示す。前処理設備の DAF ユニットの、原水 TSS 濃度に合わせた循環率を設定し、ポリ塩化アルミニウム (PAC) とポリマーの注入装置を備えた。

MBR 設備は 2 系列から成り、高有機物負荷対応のための前処理槽 (Pretreatment A/S tank) に加えて、窒素除去を目的とした無酸素槽 (Anoxic basin) と好気槽 (Aeration basin) からなる循環脱窒法を採用し、活性汚泥の固液分離のための MBR 槽 (MBR basin) を配置した。MBR ユニットの耐薬品性に優れたポリフッ化ビニリデン (PVDF) 製中空糸膜を採用し、膜モジュールを次亜塩素酸ソーダでインライン洗浄できる構造とした。また、必要時に MBR ユニットの槽から吊上げて槽外で浸漬洗浄できるように薬品洗浄槽を設けた。発生する余剰汚泥は、加圧浮上スカムと混合して汚泥脱水機で脱水して場外処分される。

一方、RO 設備も 2 系列から成り、7 本の膜エレメントをベッセルと呼ばれる圧力容器に収めたものを多数本ツリー状に並べて配管接続するとともに、自動弁を組込んだユニット構造となっている。ツリー上に配置されたベッセルは 2 段構成となっており、1st ステージと 2nd ステージの間にはブースターポンプを配置している。RO ユニットの海水淡水化用高圧スパイラル膜を採用し、ファウリング対策として酸または重亜硫酸ソーダ (SBS) ショックと各種薬品を使った半自動インライン洗浄ができる構造とした。RO の水回収率は 70 % を設計ベースとした。

表 1 原水と再生水の水質

項目	単位	原水 (設計値)	再生水 (目標値)
pH	-	6.0-9.0	6.0-9.0
TDS	mg/l	<8 000	<200
TSS	mg/l	<1 500	<10
COD _{Cr}	mg/l	<2 500	<30
BOD	mg/l	<1 000	<10
TOC	mg/l	-	<20
Oil & grease	mg/l	<100	-
T-N	mg/l	<70	-
NH ₄ -N	mg/l	<50	-
T-P	mg/l	<10	-
Ca	mg/l	<400	-
Mg	mg/l	<150	-
SO ₄	mg/l	<900	-
SiO ₂	mg/l	<30	-
T-S	mg/l	<10	-
水温	℃	20-35	-

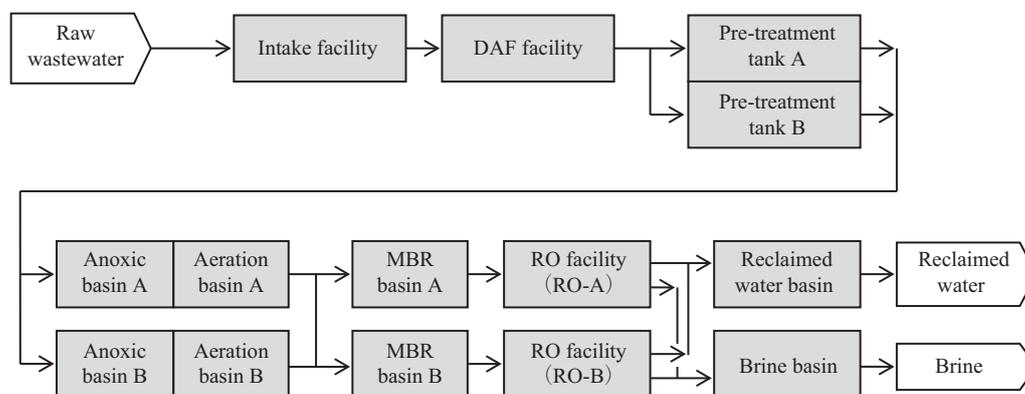


図 2 実証設備の処理フロー

表2 設備の主仕様と設計諸元

設備名	機器名称	主仕様	
前処理	Raw Water Screen	自動ドラムスクリーン	
	DAF Unit	円形浮上分離槽, 循環ポンプ, 薬品注入ユニット	
	薬注率	PAC 60 mg/L, ポリマー 3 mg/L	
MBR	Pretreatment A/S Tank	2 076 m ³ /基 × 2 基, 散気装置	
	Anoxic Basin	378 m ³ /基 × 2 基	
	Aeration Basin	306 m ³ /基 × 2 基, ディスク型メンブレンディフューザ	
	MBR Basin (MBR Module)	膜形状・材質	中空糸, PVDF
		膜面積	1 500 m ² /モジュール
		モジュール数	4 モジュール/基
		ろ過方式	吸引ろ過
		運転 MLSS	10 000 mg/L
		運転制御	定流量制御
		洗浄方法・頻度	次亜塩素酸ソーダによるメンテナンス洗浄・週 1 回 次亜塩素酸ソーダによるリカバリ洗浄・3 カ月間隔
槽外洗浄・頻度	次亜塩素酸ソーダおよび硫酸による浸漬洗浄・年 2 回		
RO	RO Pump	3 台 (うち 1 台倉庫予備)	
	RO Booster Pump	3 台 (うち 1 台倉庫予備)	
	RO Unit (RO Element)	膜材質	芳香族系ポリアミド
		膜形状	8 インチ・高圧スパイラル
		膜本数	17 ベッセル/基, 7 エレメント/ベッセル
		ろ過方式	クロスフロー
		運転制御	定流量制御
		薬品注入・頻度	微生物抑制剤, およびスケール防止剤・常時
		薬品洗浄・頻度	苛性ソーダ, 塩酸による洗浄・3 ~ 4 週間隔
	回収率	70 %	
汚泥処理	Dehydrator	2 台, 遠心式	
	薬注率	ポリマー 1.2 % 対 DS	



写真1 設備全景と主要機器外観

写真1に実証設備の全景と主要機器の外観を示す。

3. 実証結果

3.1 設備の運転状況

3.1.1 実廃水の性状と廃水量

本設備は、2017年8月より MBR 設備における活性汚泥の馴養と試運転を開始した。当初より、取水した原水の有機物負荷が設計値に比べて大幅に低かったため、前処理槽をバイパスしつつ無酸素槽と好気槽の片系列のみ運転し MBR 槽は 2 系列運転するという変則的な運転を採用した。RO 設備については、9月に片系列を、また11月にもう片系列の RO

ユニットを立ち上げたのち、2018年1月に最大能力による性能確認を行った。同年1月以降は、連続した安定運転を目的とした実証運転を継続している。

図3に、試運転から実証運転の期間を通じて流入した原水量と再生水造水量の推移を示す。原水量が5000 m³/dに満たない日が多かったため、回収率を一定に保つと生産水量も定格の3500 m³/d未満で運転されることがほとんどであった。それでも、膜洗浄や大きなメンテナンス時を除いて8カ月以上の連続運転を継続している。

3.1.2 MBR および RO の運転状況

図4に MBR のフラックスの膜間差圧の推移を示す。8台のモジュールのうち A1/A2モジュールのみの運転データを示すが、他のモジュールについても同様の傾向を示している。膜間差圧は試運転開始直後から徐々に上昇し、冬季は水温の影響もあって -40 kPa 前後で推移した。週1回の次亜塩素酸ソーダによるメンテナンス洗浄と1~2カ月毎の次亜塩素酸ソーダまたはクエン酸によるリカバリ洗浄でも差圧の回復率は低かったため、運転開始から半年後に MBR モジュールの槽外浸漬洗浄を実施した。

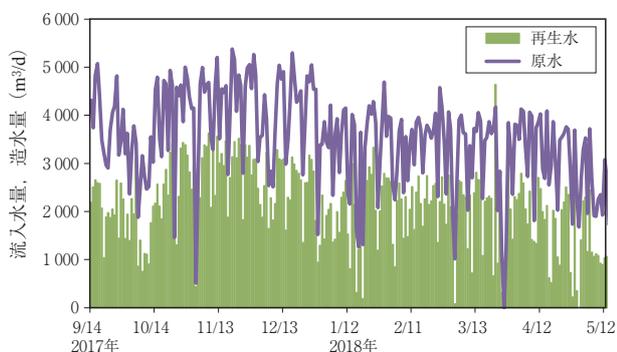


図3 流入水量と再生水造水量の推移

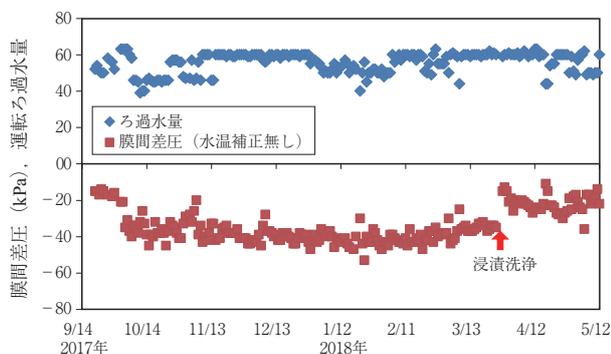


図4 MBR フラックスと膜間差圧の推移

その結果、膜間差圧は運転開始当初の -20 kPa にまで回復させることができ、これを元に安定運転のための各洗浄頻度目安を決定した。MBR 処理水の濁度は0.5 NTU 未満、Silt Density Index (SDI) は2.0 未満の水質が得られている。

図5に RO の透過フラックスと供給圧力、およびステージ差圧の推移を示す。2基の RO ユニットのうち A 系の運転データを示すが、他方についても同様の傾向を示している。RO ユニットの発停頻度を抑えるために、流入する原水量に応じて透過フラックスを定格より下げて運転した。供給圧力2.5 MPa 前後で推移し、かつステージ差圧もほとんど上昇することなく安定運転できた。微生物抑制剤とスケール防止剤は所定量を常時注入しているが、ショック処理については酸ショックのみ週2回実施している。RO エLEMENTの薬品洗浄については、アルカリ洗浄を月1回、酸洗浄を2カ月に1回実施する必要があった。排水リサイクル分野でしばしば問題となる微生物や有機物による膜ファウリングは本実証期間中にはほとんど見られなかった。一方、供給圧力のみが運転開始時から高いレベルで推移し、圧力の洗浄回復性も乏しいことから、原水に含まれる界面活性剤様物質によるケミカルファウリングの可能性が示唆された。今後、ファウリングの進行度合いを監視してゆく必要がある。

表3に、設備に流入した原水、MBR 処理水、および RO 透過水（再生水）の水質を示す。RO 透過水は、いずれの項目も目標値を十分下回る数値であり、工業用水と比べてはるかに良好な水質の再生水が得られた。TDS ベースの脱塩率も98%以上と安定した性能を発揮している。

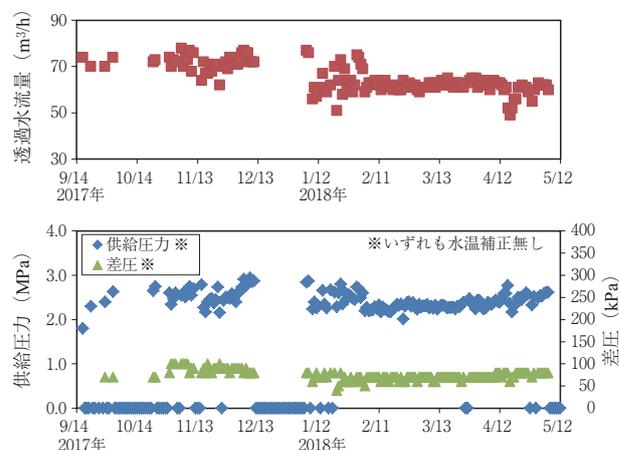


図5 RO 透過フラックスと供給圧力、差圧の推移

表3 原水および処理水の水質実績

項目	単位	実績値（平均値）			再生水目標値
		原水	MBR 処理水	RO 透過水	
COD _{Cr}	mg/l	380	20	< 5（検出下限）	< 30
BOD	mg/l	120	< 2（検出下限）	< 2（検出下限）	< 10
TSS	mg/l	230	< 5（検出下限）	-	< 10
TDS	mg/l	3 950	-	40	< 200
濁度	NTU	-	0.5	-	-
SDI	-	-	0.7	-	-
pH	-	7.4	-	6.4	6.0-9.0
導電率	μS/cm	7 440	-	73	-

対象期間：2017年11月から2018年3月

表4 省エネルギー効果

項目	単位	従来システム (海淡水+排水処理)	再生水システム		
			目標値	実績値（一部、計算値）	
動力原単位	kWh/m ³	5.7	3.4	水処理（実績）	3.8
				汚泥処理（計算）	0.1
				合計	3.9
電力削減率	%	-	40	32	

*性能確認運転時は汚泥脱水機が停止していたため、計算値を加算した。

3.2 省エネルギー性能の評価

表4に従来システムとの動力原単位の比較とエネルギー削減効果を示す。従来システムの動力原単位合計の5.7 kWh/m³に対して、40%の省エネルギー効果（3.7 kWh/m³相当）を目標としたが、実際には性能確認時に行った3 500 m³/d相当の運転において、3.8 kWh/m³の数値が得られた。この時、運転していなかった汚泥脱水機の動力原単位（計算値）を加算すると3.9 kWh/m³となることから、排水再生システムは従来に比べて32%の消費電力削減効果があると結論付けられた。

むすび

MODON DIC-1での実証設備概要とその運転状況を報告した。本システムは、海水淡水化法による従来型造水・排水処理システムに比べて大きな省エネルギー効果が見込まれ、経済的にもメリットが大きかった。

2016年に、サウジアラビア政府は「サウジ・ビジョン2030」, 「National Transformation Program 2020 (NTP2020)」という発展計画と改革案を発表し、その中でも水資源の保存と再生利用に注力する方針が

鮮明に打出されている。国内での水料金値上げによる再生水利用の経済的価値の高まりも相まって、本システムの普及可能性は大いにあると思われる。

最後に、本稿の内容は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より千代田化工建設（株）が委託を受けて実施した「国際エネルギー消費効率化等技術普及協力事業技術実証事業 FS⁴⁾」の中で行われたものである。関係各位に深く感謝の意を表す。

[参考文献]

- 1) 「サウジアラビア王国における下水道関連基礎情報」下水道グローバルセンター（GCUS）ウェブサイト (<http://gcus.jp/global/data/Saudi-info.html>), 2018年8月閲覧
- 2) 板坂直樹：配管技術, no.11 (2010), p11-17
- 3) 平成23年度 NEDO 事業成果報告書「国際エネルギー消費効率化等技術普及協力事業技術実証事業 FS 膜技術を用いた省エネ型排水再生システム技術実証事業（サウジアラビア）」
- 4) 平成24年度～平成27年度 NEDO 事業成果報告書「国際エネルギー消費効率化等技術普及協力事業技術実証事業 膜技術を用いた省エネ型排水再生システム技術実証事業（サウジアラビア）」