



省エネ・省スペース水処理用 中空糸膜モジュール・ユニット

Energy- and Space-Saving Hollow Fiber Membrane Module Unit for Water Treatment

池田 啓一*
Keiichi Ikeda

米田 知行
Tomoyuki Yoneda

河邊 真介
Shinsuke Kawabe

三木 博子
Hiroko Miki

森田 徹
Toru Morita

従来品に対し、ろ過膜面積あたりの設置面積が小さく、かつ省エネ化した水処理用ポアフロンの中空糸膜モジュール・ユニットを開発・上市した。成功のポイントは、ポアフロンの中空糸膜が有する耐汚染性・耐閉塞性および高強度・耐屈曲性等の特長に加え、膜モジュール構造をカセット型とし、膜モジュールの膜有効長・充填率アップ、汚れ付着を防止する散気気泡の大径化を実現する新たな散気装置の開発である。日本下水道事業団他との都市下水処理での共同実証試験で、膜分離の普及ポイントと言われる電力使用量原単位目標の処理水1m³あたり0.4kWh以下を達成する試算結果を得、さらにその後、複数の現場での実証を経て商品化した。本稿では、開発実証の経緯、製品仕様、適用事例等について紹介する。

We have developed and marketed a new POREFLON membrane module unit for water treatment. It has a smaller footprint and is more energy saving than conventional products. In addition to the features of the conventional POREFLON hollow fiber membrane such as fouling resistance, high strength, and bending resistance, the module unit features a cassette type module structure, increased effective membrane length, enhanced packing density, and a newly developed air diffuser that generates large air bubbles to prevent fouling. In a pilot test for municipal wastewater treatment jointly conducted with Japan Sewage Works Agency and others, we achieved a power consumption per unit of 0.4 kWh/m³ or lower, which was the target point for the popularization of membrane treatment. The module unit passed another several field trials and is currently commercialized. This report introduces the development process, product specifications, and case studies regarding the new membrane module unit.

キーワード：PTFE、中空糸膜、省エネルギー、省スペース、浸漬型膜モジュール

1. 緒言

下水や工場排水等の有機汚濁排水処理において、水の再利用、放流水質規制強化対応等の必要性および敷地制限のあるケースでは、省スペースかつ高度な処理水質を確保できる膜分離と従来の生物処理とを組み合わせた膜分離活性汚泥法（MBR^{*1}: Membrane Bioreactor）が数多く実用化されている。当社は独自技術で開発したPTFE複合中空糸膜を用いて水処理用膜を商品化しているが、今回、従来品対比でより省エネルギー化および省スペース化した膜モジュール・ユニットを開発・製品化した。本稿では、製品仕様、性能、適用事例等について紹介する。

2. ポアフロンの中空糸膜モジュールの特長

当社の膜素材の商標であるポアフロンは100%PTFE（Polytetrafluoroethylene、フッ化エチレン樹脂）製の多孔質材料であり、フッ素樹脂のもつ耐熱性、耐薬品性等を有する。これを基礎技術とし、水処理に適した構造として、透水抵抗の小さい、大きな孔径を持つ支持層（孔径2μm）

の外側に、より小さな孔径を持つ過層（孔径0.1μm）を設けた二層構造とし、さらに親水性高分子を化学的に固定化した水処理用複合中空糸膜を開発し、これを多数束ねてモジュール化し商品化した（写真1、図1）。

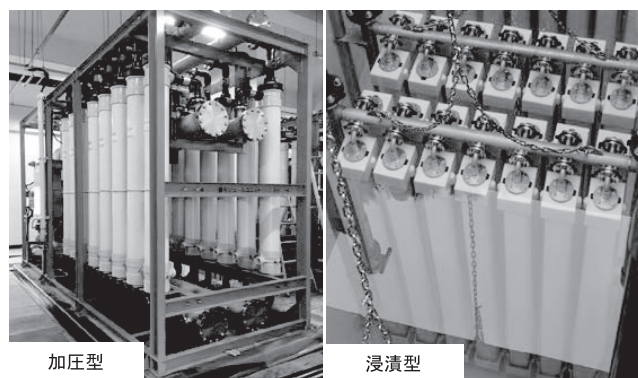


写真1 膜モジュール・ユニット外観写真

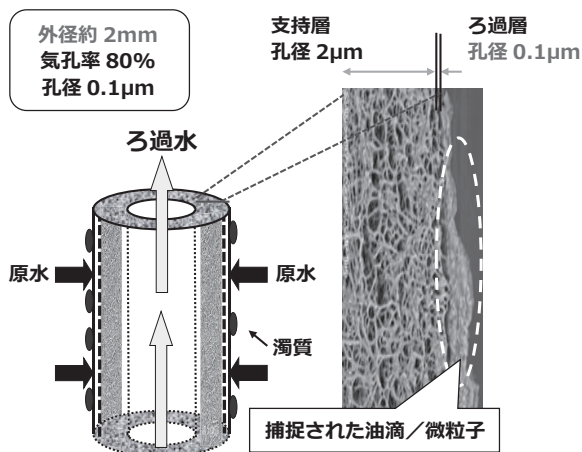


図1 PTFE複合中空糸膜の構造

製品の特長の1つ目は、排水中に含まれる有機物や油分等に対する耐汚染性・耐閉塞性である。PTFE自体は疎水性であるが、親水性高分子を膜表面に化学的に架橋固定化した当社独自の親水処理および特殊微細構造、高気孔率(図2)により膜の目詰まりが起きにくく、安定した処理が可能である。

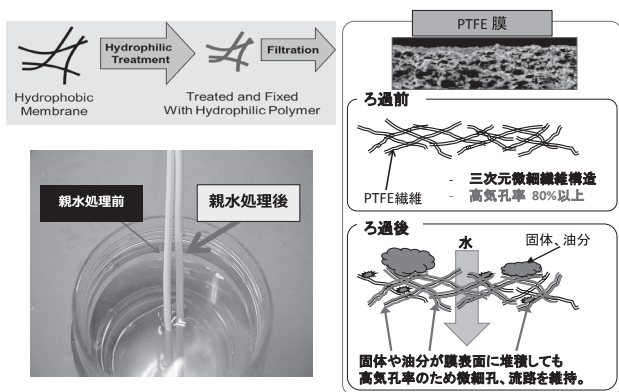


図2 PTFE膜の親水処理と特殊微細構造

2つ目は高強度・耐屈曲性である。引張強度は他の有機膜と比較すると6~10倍であり(均一膜素材での比較)、耐屈曲性においては90倍以上である(図3)。MBR運転時の散気で振動するストレスに対して極めて優秀であり、膜破断リスクが低く、長期間の運転が可能である。

3つ目は耐薬品性である。特に膜に付着した有機物や油分の分解・剥離除去に有効な高濃度アルカリによる洗浄が可能であり、性能回復が容易で、膜の長寿命化につながる。

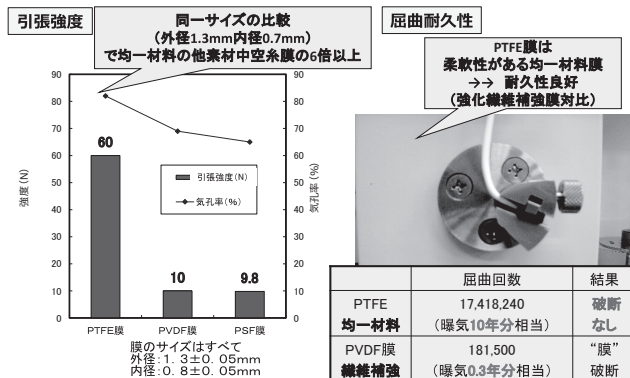


図3 引張強度と屈曲耐久性

3. 膜モジュール・ユニットの改良開発

膜分離活性汚泥法では、膜モジュール下部から散気(空気を吐出)し、その気液混相流の剪断エネルギーにより膜を揺動させて、膜面に付着した汚泥や汚物を除去し、流量を維持させる。しかし、動力源である送風機(ブLOWER)の電力消費量が大きいため、効率的な洗浄が可能な膜モジュールおよび金属フレームを含むユニットの開発が、普及のための最大の課題である。省エネルギーおよび省スペースを達成するための当社の基本的な解決策は、膜モジュールの①膜有効長・充填率アップ②散気気泡の大径化③両端からの処理水集水とした。

3-1 膜有効長・充填率アップ

膜分離活性汚泥法の散気においては、中空糸膜の有効長が長いほどより深い位置から気泡が上昇するため、気泡の会合が進み、その結果、揺動時の振幅が大きくなり、洗浄効果が高くなる。その一方で、膜の両端への応力負荷が大きくなるため、膜破断等のトラブルが懸念される。

2章で述べたように当社中空糸膜は他社膜より物理的耐久性に優れていることから、膜有効長を従来の2mから3mに延長した。一方、中空糸膜封止部の接着用樹脂(エポキシ樹脂等)の注入技術の向上により、設置面積あたりの中空糸膜の充填率を343m²/m²から750m²/m²にアップすることも合わせて、中空糸膜の有効膜ろ過面積を増やすことで、膜面積(処理水量)あたりの散気エネルギーの約40%削減を可能にした。

3-2 散気気泡の大径化

一般に、散気においては、気泡サイズが大きい程、中空糸膜の揺動効果が高くなり、空気量の低減が可能となる。従来の多孔管は、パイプに孔の空いた単純なものだが、気泡サイズを粗大化するために孔径を大きくすると各孔からの空気量がばらつく。そこで多孔管の上方に図4に示すような仕組みの粗大気泡発生機構を設けた。空気が一定量溜まった状態の容器内に空気を送ると、一気に放出され、粗大気泡を間欠的に供給することが可能となる。

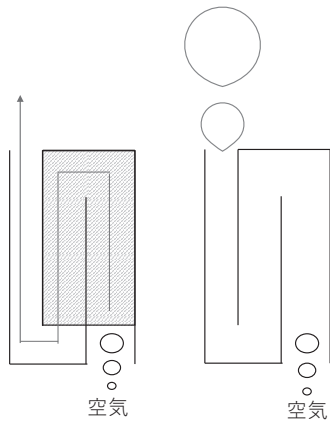


図4 粗大気泡送風の仕組み

3-3 両端からの処理水集水

本製品は原水が中空糸膜外表面より内側に流れてる過され、処理水が中空糸内を流れて端部に集められる。従来は上部片端より集水していたが、上下両端より集水する構造とし中空糸膜内の圧力損失を低減し、ろ過膜差圧の低減を可能とした。実証例を図5に示す。各膜有効長における吸引ろ過圧力-10kPa、水温15℃での片端集水型と両端集水型の透水性比較実験を行った。有効長が長くなればなるほど片端集水型と両端集水型の透水量差が大きくなることが判る。

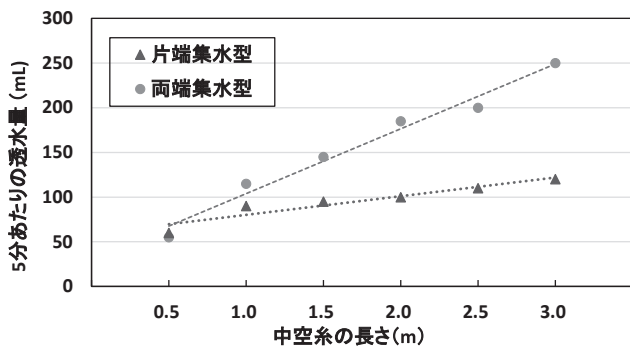


図5 片端／両端集水型の透水性比較

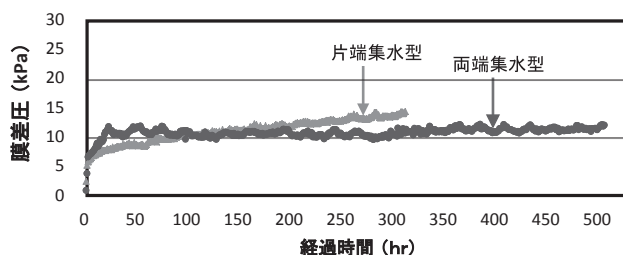


図6 片端／両端集水型の膜差圧比較

また実際の原水（住友電工ファインポリマー(株)の生活排水）でのMBRパイロットスケールでの実証も行った。その結果を図6に示す。同一流量を流す設定を行い同時評価したところ、片側集水型よりも両端集水型のほうが膜差圧の上昇が緩やかであった。

4. パイロット実証実験

4-1 実験条件

3章で説明した開発要素を盛り込んだ小型の改良型膜モジュール・ユニットを用いたMBRパイロットプラントを栃木県真岡市の日本下水道事業団技術開発実験センター内に設置し（写真2）、実証実験を実施した。本実験設備のフローを図7に示す。まず前段のメッシュスクリーン設備で生下水のし渣を除去した後に、後段の好気槽でアンモニアを硝化した硝化液を無酸素槽に返送して脱窒する循環式硝化脱窒型であり、後段の好気槽に写真3の膜ユニットを浸漬させた。また、膜ユニット下部には大口径散気装置（図8）を設置した。

本実証実験では、原水を定量で供給する「定流量運転」と朝夕の下水流入量アップを想定した「流量変動運転」を期間に応じて切り替えて実施した。膜ろ過の運転サイクルはろ過9min：休止1minを基本とし、膜の薬品洗浄はNaOCl (500mg/l) + NaOH (250mg/l) による低濃度インライン洗浄を週1回、NaOCl (2,000mg/l) + NaOH (250mg/l)



写真2 日本下水道事業団・前澤工業との実証プラント

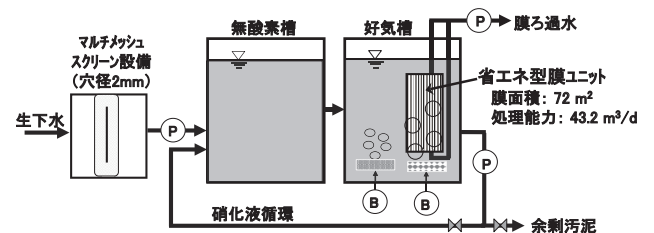


図7 本実験設備のフロー

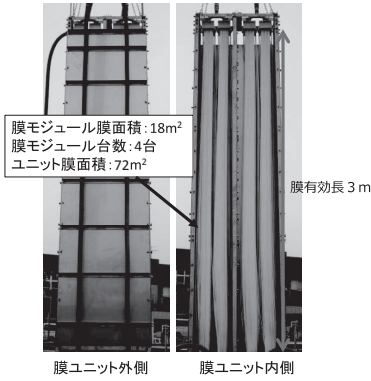


写真3 膜ユニット写真

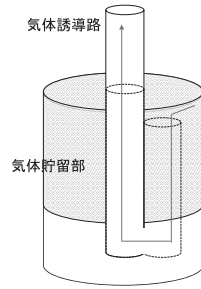


図8 大孔径散気装置

表2 膜ろ過水質結果

項目	単位	定流量運転の平均値		流量変動運転の平均値		目標水質
		流入水	膜ろ過水	流入水	膜ろ過水	
BOD	mg/L	138	0.5	102.0	0.4	3
T-N	mg/L	26.6	6.9	19.8	7.5	10
NH ₄ -N	mg/L	17.6	1.5	13.2	1.1	—
SS	mg/L	152	ND	124	ND	ND
大腸菌群	個/mL	1.6 × 10 ⁵	ND	2.0 × 10 ⁵	ND	—
大腸菌	個/mL	3.5 × 10 ⁴	ND	2.6 × 10 ⁴	ND	—
大腸菌ファージ	PFU/mL	—	—	5.1 × 10 ³	ND	—
ノロウイルスGI	copies/L	—	—	2.4 × 10 ⁶	ND	—
ノロウイルスGII	copies/L	—	—	5.6 × 10 ⁷	ND	—

※SSのNDは0.4mg/L未満

※ウイルス類は流量変動運転時の低水温期に1回測定

※大腸菌ファージのNDは1PFU/100mL未満、ノロウイルスのNDは9.6 × 10copies/L未満

による高濃度インライン洗浄を数か月に1回の頻度で実施した。その他運転条件詳細は表1に示す。

表1 運転条件

項目	定流量運転	流量変動運転
期間	RUN1: 2014/4/1~2014/5/30 RUN3: 2014/8/8~2014/12/8 RUN5: 2015/1/5~2015/2/16	RUN2: 2014/5/30~2014/8/8 RUN4: 2014/12/8~2015/1/5
処理水量	43.2m ³ /d	36.0m ³ /d
平均Flux	0.6m/d	0.5m/d
膜面積	18m ² /モジュール × 4本 = 72m ²	
滞留時間	3h(好気) + 3h(無酸素) = 6h	3.6h(好気) + 3.6h(無酸素) = 7.2h
MLSS	7000~13000mg/L	6000~10000mg/L
循環比	300%	
膜洗浄用風量(粗大気泡)	40L/(分・モジュール) × 4本 = 160L/本	
補助散気風量(微細目気泡)	50~180L/分	

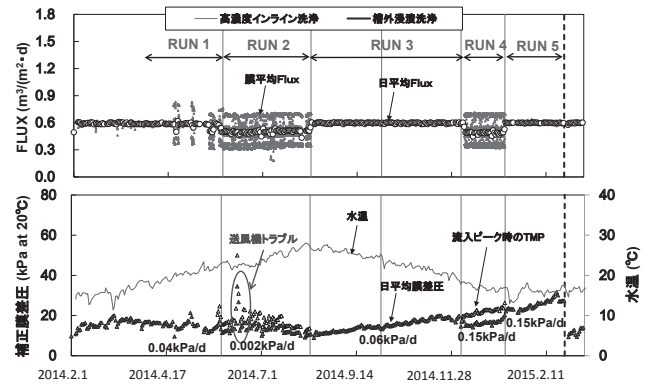


図9 膜差圧およびFluxの経時変化

RUN2、RUN4では流量変動運転を実施した。水温20℃以上の高水温期 (RUN2) には、送風機トラブルにより所定の散気ができず一時的に膜差圧が急上昇したものの、低濃度インライン洗浄により回復し、概ね20kPa以下で安定していた。また水温20℃以下の低水温期 (RUN4) でも、膜差圧は20kPa以下で安定していた。

4-3 省エネ試算

本MBRシステムを処理規模5,000m³/日の案件に導入した場合の電力使用量原単位の試算を行った。試算条件を表3に示す。流入水量の時間変動比を1.4に設定したが、本試算では、流入調整タンクにより対応することを想定し、同タンクの攪拌機および原水供給ポンプも計上対象とした。これらの条件において機器仕様を設定した上で、日平均水量に相当する水量を処理する状態を想定した電気使用量原単位の算出した。

本試算で得られた従来型および省エネ型膜モジュールの機器毎の電気使用量原単位を図10に示す。生下水を対象原水とした省エネ型膜モジュールの電気使用量原単位は

4-2 実験結果

(1) 処理水質

膜ろ過水の平均水質を表2に示す。定流量運転期間、流量変動運転期間ともに有効な有機物除去および窒素除去が行われ、目標水質 (BOD: 3mg/l以下、T-N: 10mg/l以下) を達成することができた。また、膜ろ過水には大腸菌群、大腸菌、大腸菌ファージ、ノロウイルスは検出されず、良好であった。

(2) 運転性 (流量・差圧)

膜差圧およびFlux^{*2}の経時変化を図9に示す。RUN1、RUN3、RUN5では一定流量運転を実施したが、水温20℃以上の高水温期 (RUN1、RUN3) には、膜差圧は10~20kPaで安定推移していた。一方、水温20℃以下の低水温期 (RUN5) では、膜差圧は17~25kPaと高かったものの、急激な上昇は見られなかった。

表3 試算条件

T-N	mg/l	35	30	10
Kj-N	mg/l	-	-	1
T-P	mg/l	4	3.4	0.5
日平均水量		5000		m ³ /d
日最大水量		6650		m ³ /d
時間最大水量		7000		m ³ /d
冬期最低水温		15		℃
平均Flux (定流量)		0.6		m/d
膜洗浄風量 (粗大気泡)		40		L/min/module
膜洗浄散気装置の酸素溶解効率		8		%
補助散気装置の酸素溶解効率		20		%
kLa補正係数 α値		0.6		
酸素飽和濃度の補正係数 β値		0.95		
生下水の汚泥発生量		0.65		kgMLSS/kgSS

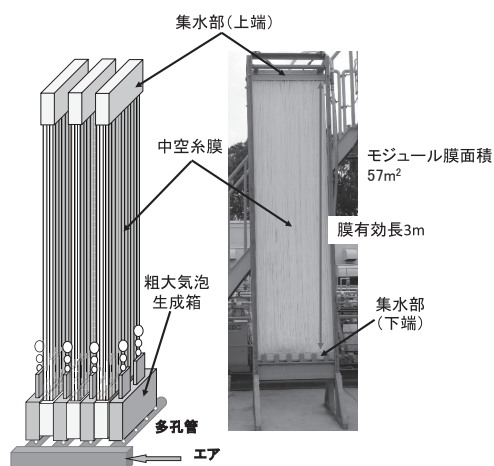


図11 カセット型膜モジュール

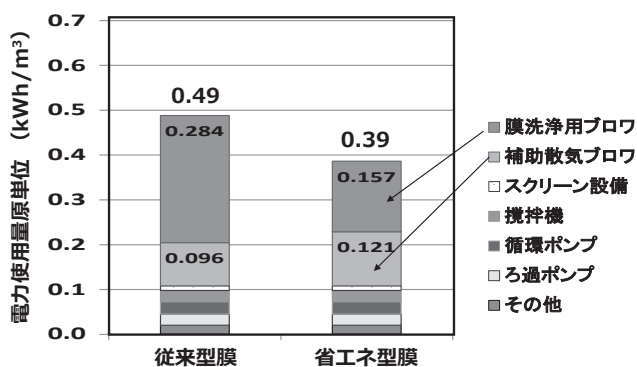


図10 従来型/省エネ型の電気使用量原単位

表4 従来型とカセット型の仕様比較

	従来型	カセット型 (省エネ型)
膜ユニット写真		
モジュール膜面積 (m ²)	12	57
モジュール寸法 (mm)	154×164×2410	840×50×3220
ユニット膜面積 (m ²)	12×20=240	57×48=2736
ユニット寸法 (mm)	1768×400×2920	1750×2084×4015
ユニット投影面積 (m ²)	0.7	3.65
ユニット膜充填率 (m ² /m ²)	343	750
散気構造	多孔管のみ	多孔管+粗大気泡生成箱

0.39kWh/m³と試算され、開発目標であった0.4kWh/m³が達成可能と判断した。また、国内の実規模浸漬型MBR施設の実績と比較すると、膜洗浄用ブロウの寄与率が70～80%から30%弱に低減できており、本MBRにおける省エネの要因は、3章の膜モジュール・ユニットの改良によって膜洗浄用ブロウに係る電気消費量が低減されたことが示唆された。

なお、本章は、日本下水道事業団、前澤工業(株)、当社の共同研究「膜分離活性汚泥法の導入促進に向けた技術開発-PTFE製中空糸膜を用いたMBRの省エネルギー化に関する研究-」の成果の一部である。

5. カセット型膜モジュールユニット

4章の実証実験で省エネ効果を確認できたことから、大規模案件に対応できるよう、カセット型モジュール(図11)およびユニットを開発・製品標準化した。従来型と比較した仕様を表4に示す。

6. 適用事例

本稿記載のカセット型モジュールユニットの適用事例を紹介する。写真4の設置写真に示す通り、2018年4月に国内で

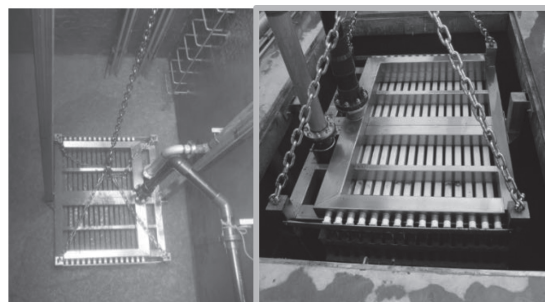


写真4 国内・食品工場 膜ユニット設置写真

は初めて食品工業団地排水処理用途に導入された(1,300m³/日)。膜差圧の経日変化を図12に示す。原水水質の異常により一時的に20kPaを超過する場面もあったが、1年経過した時点での膜差圧上昇は5kPa程度であり、安定な稼働状況を維持している。

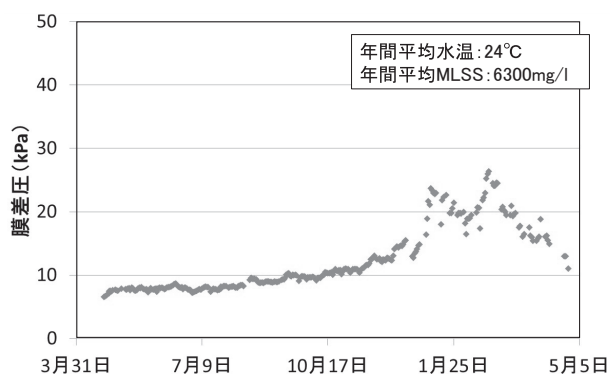


図12 膜差圧の経日変化

一方、水処理需要の大きい海外でも、ライフサイクルコスト優位、設置面積小が評価され、写真5の設置写真に示す通り、中国においては当社としては最大処理規模である中国の都市下水処理場に(35,000m³/日)納入、さらに今年度同用途でさらに大型案件(50,000m³/日)を受注した。また台湾では世界大手の半導体メーカーでの有機排水処理用途にも18、19年度にそれぞれ納入し、安定稼働している。



写真5 中国・都市下水処理場 膜ユニット設置写真

7. 結 言

PTFE 中空糸膜が有する①耐汚染・耐閉塞性、②高強度・耐屈曲性、③耐薬品性等の特長を最大限に活かし、省エネで膜面積あたりの設置面積が小さいカセット型中空糸膜モ

ジュール・ユニットを開発・上市した。近い将来新興国を中心とする世界的な人口増に伴って水資源の汚染や水不足が深刻化すると予想されており、低コストで高度な水処理技術の発展が益々期待されている。更なる省エネや膜コストの低減、維持管理が容易な処理システムを目指して、引き続き、開発を推進していきたい。

用語集

※1 MBR

Membrane Bioreactor：膜分離活性汚泥法。下水や工場排水の浄化を行う「活性汚泥法(かっせいおでいほう)」の一種で、処理された水(処理水)と活性汚泥との分離を、従来の沈殿池に代えて精密ろ過膜(MF膜)または限外ろ過膜(UF膜)を使って行う方法である。

※2 Flux

単位時間・単位膜面積あたりの膜ろ過水量。単位はm³/m²/d、あるいはL/m²/hで表されることが多い。

・ポアフロンは住友電気工業㈱の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) グエン タン フォン、円谷輝美、鈴木辰彦、田中育、森田徹、糸川浩紀、橋本敏一、「PTFE製中空糸膜を用いた浸漬型MBRの省エネルギー化に関する研究」、第51回下水道研究発表会講演集、262-264 (2014)
- (2) グエン タン フォン、円谷輝美、鈴木辰彦、田中育、森田徹、糸川浩紀、橋本敏一、「PTFE製中空糸膜を用いた浸漬型MBRによる省エネ化効果の実証」、第52回下水道研究発表会講演集、203-205 (2015)
- (3) グエン タン フォン、円谷輝美、田中育、森田徹、糸川浩紀、橋本敏一、「PTFE製中空糸膜による省エネ型MBRの処理性能及びピークフラックス対応性」、第53回下水道研究発表会講演集、205-207 (2016)
- (4) 森田徹、PTFE 中空糸膜を用いた膜分離活性汚泥処理による排水処理 OHM 103(1)、39-41、2016-01、オーム社
- (5) T. Miyoshi, T. Nguyen, T Tsumuraya, H.Tanaka, T. Morita, H. Itokawa, T. Hashimoto, Energy reduction of a submerged membrane Bioreactor using a polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow-fiber membrane. Front. Environ. Sci. Eng. 2018, 12(3)

執筆者

池田 啓一* : 水処理事業開発部 主席



米田 知行 : 水処理事業開発部 グループ長



河邊 真介 : 中山住電新材料有限公司 部長



三木 博子 : 水処理事業開発部



森田 徹 : 水処理事業開発部 部長



*主執筆者