

技報

Vol.18
(通巻36号) **No.2**

ENGINEERING REPORTS
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO.,LTD.



Keep the Earth Sky-blue
神鋼環境ソリューション

目 次	CONTENTS
1 <巻頭言> 仰望，成熟から俯瞰力へ	
2 迅速バイオアッセイ（BIOecs SM ）の開発	Development of a swift bioassay (BIOecs SM)
10 最終処分場における浸出水処理設備への バイオアッセイ適用研究	Study of bioassay application in leachate treatment system at a solid waste landfill site
15 本山浄水場膜ろ過設備における膜交換サイクルの延長 -簡易薬品洗浄方法の見直し-	Extension of the membrane replacement cycle of the membrane filtration equipment of the Motoyama water purification plant - Improvement of the chemical cleaning method -
19 鋼板製消化タンク1号機の運転実績および性能評価	Operation and performance evaluation of our first commercial steel plate digestion tank for sewage
24 SD（金属ナトリウム分散体）を用いた PTFEの表面改質技術	Surface modification of Polytetrafluoroethylene (PTFE) with sodium dispersion
30 廃棄物処理施設の運転管理における 拡張現実（AR）技術の活用事例と課題	Applications of Augmented Reality (AR) technologies in operating municipal waste treatment plants
34 施設・技術紹介	
38 TOPICS	

仰望，成熟から俯瞰力へ



特定非営利活動法人
環境技術支援ネットワーク理事長

福岡大学名誉教授 **樋口 壯太郎**

問題点を把握し、対策を考えることは技術開発等の基本である。その中で環境関連技術は問題解決型技術開発の代表的存在といえる。1960年代にはじまった我が国の高度経済成長は多くの廃棄物を発生させ、まず最終処分場不足に陥った。そこで最終処分場の確保が極めて困難である国土事情から世界に先駆けて焼却施設の導入と普及を図ってきた。さらに排ガス規制やダイオキシン類問題等が発生し、これらをその都度、優れた技術により克服してきた。最終処分場では高度な遮水技術や浸出水処理技術が開発されてきた。これらの開発プロセスの多くは先行する欧米技術^{ぎょうぼう}を仰望、導入し、さらなる改良や改善を加えて成熟し、国際的にも最先端の技術となった。しかし高度経済成長から半世紀以上経過した現在、新たな問題点が浮上し始めた。例えば最終処分場では焼却施設で使用するキレート剤や脱塩処理に伴う副生塩問題が挙げられる。これは廃棄物管理システムが機能していないことに起因している。廃棄物管理システムは排出抑制に始まり収集運搬、焼却・破碎等中間処理、資源化、最終処分で構成される。これらは本来、有機的に結合してシステムを構成しなくてはならないが実際には、単なる処理移行プロセスとなっている。各プロセスではその機能を満足するための努力（技術開発）は行われているが、それが他のプロセスに及ぼす影響については殆ど配慮されてこなかった。このため上流側プロセスのバトンを受けた下流側プロセスでは新たな問題に直面し、技術開発を行わなければならない。すなわち我が国の中間処理プロセスや最終処分プロセスの技術はこれまで対症療法的、事後処理的対応により形成されてきたと云える。このため廃棄物管理システム全体としてみた場合、経済性や効率性は必ずしも最適システムとは云えない状況となっている。これからの総合環境装置企業は各プロセスの技術の向上を図ると共に環境問題をシステムとしてとらえ各プロセスの技術の向上に伴う副次的影響を経済面、環境面等総合的に予測、分析評価することが求められる。すなわち俯瞰^{ふかん}し評価するシステムが必要である。これにより企業価値を高め、さらなる社会貢献をすることが可能である。そのためには廃棄物管理に携わる方々がこれらの問題を共有し、縦割り組織を超え、理想的な廃棄物管理システム構築のために協働することが必要不可欠である。

迅速バイオアッセイ (BIOecsSM) の開発

Development of a swift bioassay (BIOecsSM)



藤原尚美*
Dr.Naomi Fujiwara
工学博士



豊久志朗**
Shiro Toyohisa



野中信一*
Shinichi Nonaka



三浦雅彦*
Dr.Masahiko Miura
農学博士



樋口壮太郎***
Dr.Sotaro Higuchi
工学博士

最終処分場の浸出水には多種多様な化学物質が含まれており、化学物質の複合影響や未規制物質までを評価するために、バイオアッセイの研究が行われている。しかし、バイオアッセイは一般的に大量の採水を必要とし、試験期間が長く、高額であることから維持管理に活用できるまでの実用化には至っていない。このような状況下、少量の採水で、かつ、短時間で容易に結果が得られる手法の検討を行なった。その結果、少量の採水で試験が可能なアカヒレと、化学物質の毒性データが豊富にあるオオミジンコを組合わせた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM) を開発した。

Leachate from solid landfill sites contains a wide variety of chemicals, including unregulated substances. Bioassay studies have been conducted to evaluate the combined effects of chemicals; however, bioassays have not been commercialized to the point where they can be used for maintenance management as they are expensive and generally require a large amount of water sampling and a long testing period. Under these circumstances, we investigated a method to obtain results faster and more easily with less water sampling. To this end, we developed a swift bioassay (BIOecsSM) by combining *Tanichthys albonubes* (red finfish), which can be tested with a small amount of water, and *Daphnia magna*, on which there are abundant data on the toxicity of chemical substances.

Key Words :

最 終 処 分 場
浸 出 水
バ イ オ ア ッ セ イ
ア カ ヒ レ
オ オ ミ ジ ン コ

solid landfill site
leachate
bioassay
Tanichthys albonubes
Daphnia magna

【セールスポイント】

- ・迅速バイオアッセイ (BIOecsSM: BIOassay Environment Comprehensive System) は、短期間・低コストで浸出水を評価できる。
- ・設備の整った研究所のみならず、最終処分場の現地においても十分な精度を得ることができる。

ま え が き

最終処分場は国民の生活環境保全のため、必要不可欠な施設である。近年、廃棄物処理及び清掃に関する法律にもとづき、製品が廃棄されるまでの管理が製造者に義務付けられ、産業活動において廃棄に

関する製造者責任の重要性が認識され始め、かつ、国民の環境問題についての意識の高まりから、最終処分場管理の重要性がますます高まっている。

2019年度に開催された産業廃棄物最終処分場維持管理マニュアル¹⁾の全国説明会では、埋立地の安

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

**㈱イー・アール・シー高城

***福岡大学

定化が進まず閉鎖から廃止に踏み切れない状況が長期に続く事例が多く、事業者にとって問題となっており、廃止を見据えた維持管理の重要性が述べられている。このため最終処分場には構造的な安定化と、埋立廃棄物が早期に安定化し、早期に廃止されることが望まれている。

廃棄物を埋立てることで、埋立地から多種多様な化学物質を含む浸出水²⁾が流出し、ガスが発生するのは安定化のプロセスである。浸出水は、最終処分場の排水基準にて管理されているが、各物質濃度の基準値を満足していても浸出水中に含まれる多種多様な化学物質の複合的な影響まで評価するには不十分であり、この対応策として浸出水そのものの影響を評価できるバイオアッセイによる浸出水管理が求められている。

バイオアッセイは浸出水そのものを総合的に評価できる特長があるものの、その多くは外部機関への委託に頼らざるをえず、試験期間も時間を要するためコストも嵩み、日常の管理には適していない。このような背景下、少量の採水と24時間という短い評価時間で容易に結果が得られることで最終処分場の現場で完結できるアカヒレとオオミジンコを用いた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM) の開発について報告する。

1. 供試生物の選定

アカヒレ (*Tanichthys albonubes*) はコイ目コイ科に属する小型の淡水魚で、AOD 試験 (水族環境診断法: Aquatic Organisms environment Diagnostics) に用いられてきた生物である³⁻⁵⁾。アカヒレ (図1) はヒメダカ (図2) と比較して個体が小さく、少ない溶存酸素でも生存できることが期待され、飼育も容易である⁶⁾。このため、小規模な設備で試験を行うことができ、最終処分場の現場であっても、日常的なモニタリングに活用が可能であると考えた。

ヒメダカ (*Oryzias latipes*) はダツ目メダカ科の本邦在来種であり、OECD TG203⁷⁾ の供試魚のひとつとして広く毒性試験に使用されている。ヒメダカはメダカの突然変異型 (品種) の一つである⁸⁾。国内においてはヒメダカを用いた研究が多く行われて



図1 アカヒレ (*Tanichthys albonubes*)



図2 ヒメダカ (*Oryzias latipes*)

おり、排水に対するバイオアッセイのデータが比較的豊富であり、なじみのある魚であるため、アカヒレとヒメダカの比較を行った。

一方、試験精度の向上と魚類以外の環境生物への影響も評価するために、感受性の異なるオオミジンコを用いた。オオミジンコ (*Daphnia magna*) は鰓脚綱双殻目に属する甲殻類で、化学物質に対する感受性が高く、国際的な試験ガイドラインにおいて供試生物に推奨されており⁹⁾、化学物質の毒性データも豊富であり、省スペースで飼育することができ繁殖は容易である。

アカヒレおよびヒメダカは、ともにペットショップ (熱帯魚通販ネオス、アクアノースビーチ) から購入し、1週間馴化した後、試験に供した。両種ともに150～300尾を脱塩素水道水 (粒状ヤシガラ活性炭で処理後、ばっ気し、孔径0.2 μm のメンブレンフィルターでろ過したもの) を満たしたガラス製50 L水槽に收容し、水温 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、13時間明/11時間暗の照明条件下で飼育した。飼育は半止水 (週2回、2/3の水量を交換) で行い、アルテミアのノープリウス幼生および市販の魚類用餌料 (キョーリン株式会社、ひかり Labo450) を1日2～3回適量を与えた。オオミジンコは国立研究開発法人国立環境研究所水環境実験施設から分譲を受け、3週間以上馴化・育成した親個体から生まれた生後24時間以内の仔虫をバイオアッセイに供した。

2. 実験方法

2.1 標準物質によるアカヒレとヒメダカの感受性比較

国際的な試験ガイドライン (例えば、OECD TG201¹⁰⁾) で標準物質として用いられている二クロム酸カリウム (特級、関東化学㈱)、水生生物の塩分耐性の指標となる塩化ナトリウム (特級、関東化学㈱)、環境ホルモン物質として知見が集積されているノニルフェノール (環境分析用、関東化学㈱) を被験物質とした。希釈水はいずれの被験物質にも飼育水と同じ脱塩素水道水 (pH 7.6、電気伝導率 $165 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、塩分0.01 % 以下) を用いた。各被験物質の溶液は次のように調製した。二クロム酸カリウ

ム 1 g を希釈水に溶解し、1 000 mL に定容した。この原液を順次希釈して、1, 3, 10, 30, 100 mg/L の試験溶液を作製した。塩化ナトリウムは、それぞれ所定量を希釈水に直接溶解、定容して0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100 g/L の試験溶液を作製した。ノニルフェノールは、0.5 g を Dimethylformamide (DMF, 試薬特級、関東化学) に溶解し、5 mL に定容した。この原液を DMF で希釈して各濃度用の DMF 二次原液を作製した。二次原液0.3 mL を希釈液に投入、3 L に定容して、0.1, 0.3, 1, 3, 10 mg/L の試験溶液を作製した。各濃度区とも DMF 濃度は0.1 mL/L とした。

曝露は表 1 に示す条件で行った。被験物質ごとにアカヒレとヒメダカは同時に試験した。24時間以内に結果が得られることも最終処分場の現場作業での要件であると考え、曝露期間は24時間とした。生死は暴露開始直後、6, 24時間後に目視により判定した。鰓蓋運動が停止し、外部刺激に反応しない個体を死亡と判定した。各観察時に水温をデジタル温度計 (アズワン (株) 製, 39240) で測定するとともに、暴露開始時および終了時に各容器の pH および溶存酸素 (DO) をそれぞれ pH 計 (HORIBA 製, F-22) および溶存酸素計 (東亜ディーケーケー (株) 製, DM-32P) を用いて測定した。各濃度の死亡率から24時間後の半数致死濃度 (LC₅₀) をグードロフ法 (被験物質の濃度を対数目盛に、死亡率を普通目盛にとってプロットし、50 % に最も近い上下二つの測定値を結ぶ直線を引き、死亡率50 % の線との交点に相当する濃度を LC₅₀ とする)¹¹⁾ により算出した。

2.2 アカヒレとヒメダカの飼育密度比較

現場にてバイオアッセイを実施する場合、その多くは広い試験スペースを確保することが出来ないため、少量の試料水で曝露個体数を増やす必要がある。

そこで、アカヒレとヒメダカがどの程度の高密度で飼育可能であるかを調べた。DO を測定後、アカヒレとヒメダカそれぞれ1連の3尾、5尾、7尾および10尾を40 mL の飼育水に投入し、24時間までの生存数と24時間経過後の DO を測定した。曝露は、先の表 1 に示す条件で行った。

2.3 浸出水によるアカヒレとヒメダカの感受性比較

最終処分場浸出水として、図 3 に示す浸出水原水 (A) と浸出水原水 (B) をそれぞれ250 mL ポリプロピレン製容器に採水後、速やかに試験に供した。試験には、浸出水原水を 5 から80 % に希釈したものを用いた。各濃度調整後の供試水は50 mL 程度とし、希釈には飼育水を用いた。曝露は現場実施を目的とし、先の表 1 に示す条件で行った。浸出水原水ごとにアカヒレとヒメダカは同時に試験した。曝露期間、生死判定時間と判定方法は2.1項の標準物質によるアカヒレとヒメダカの感受性比較に記載した内容と同じとした。各観察時に水温をデジタル温度計で測定するとともに、曝露開始時および終了時に各容器の pH および DO をそれぞれ pH 計および溶存酸素計を用いて測定した。評価は各浸出水濃度における生存率を算出して実施した。

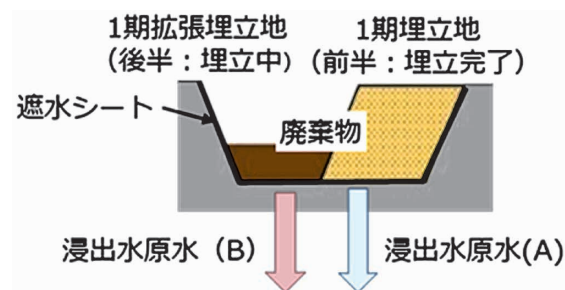


図3 浸出水原水採水箇所

表 1 各試験の曝露条件

	標準物質による 感受性比較	飼育密度比較	浸出水を用いた 感受性比較	浸出水を用いた簡略化バイオアッセイ (BI0ecs SM)	
供試体	アカヒレ, ヒメダカ	アカヒレ, ヒメダカ	アカヒレ, ヒメダカ	アカヒレ	オオミジンコ
容器の材質	ガラス製ビーカー	ガラス製ビーカー	ガラス製ビーカー	ガラス製ビーカー	ガラス製ビーカー
1 容器当たりの水量	3 L	40mL	50mL	50mL	50mL
個体数密度	5 尾/ 3 L	3, 5, 7, 10 尾/40mL	3 尾/50mL	3 尾/50mL	5 頭/50mL
連数	1 連	1 連	1 連	1 連	1 連
暴露時間	24 時間	24 時間	24 時間	24 時間	24 時間
換水	なし, 止水式で実施	なし, 止水式で実施	なし, 止水式で実施	なし, 止水式で実施	なし, 止水式で実施
水温	25±1℃	25±1℃	25±1℃	25±1℃	20±1℃
照明時間	13 時間明/11 時間暗	13 時間明/11 時間暗	13 時間明/11 時間暗	13 時間明/11 時間暗	16 時間明/8 時間暗

2.4 アカヒレとオオミジンコを用いた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM) による浸出水評価

研究対象処分場の浸出水原水に対して、廃棄物の処理及び清掃に関する法律に規定されている化学分析と、アカヒレとオオミジンコを用いた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM) を実施し比較した。

2.4.1 浸出水の化学分析

分析項目は、一般廃棄物及び産業廃棄物の最終処分場からの放流水の基準水質項目に加えて、塩化物イオン (Cl⁻) と全有機体炭素 TOC を追加した以下の7項目とし、工場排水試験方法 JIS K0102¹²⁾ に準拠して測定した。なお、各試験では必要に応じて溶存酸素量 (DO) を測定した。

pH は、ガラス電極法をもとに pH 計 (HORIBA 製, F-72) を用いて測定した。生物学的酸素要求量 (BOD) は、植種希釈隔膜電極法を用いて測定した溶存酸素量 (DO) をもとに算出した。化学的酸素要求量 (COD) は、過マンガン酸カリウムによる酸素消費量をもとに算出した。浮遊物質 (SS) は、網目 2 mm のふるいを通した試料を孔径 1 µm 程度のガラス繊維ろ紙 (GFP: glass fiber filter paper) でろ過し、GFP に捕捉された物質を 105 ~ 110℃ で乾燥し、質量を測定して SS を求めた。窒素含有量 (T-N) は、紫外線吸光度法をもとに分光光度計 (JASCO corporation 製, V-650) を用いて定量した。塩化物イオン (Cl⁻) は、イオンクロマトグラフ法 (サーモフィッシャーサイエンティフィック (株) 製, ICS-2100) によって定量した。全有機体炭素 (TOC) は、燃焼酸化-赤外線式 TOC 分析法をもとに TOC 計 (SHIMADZU 製, TOC-V) を用いて測定した。溶存酸素 (DO) は、溶存酸素計 (東亜ディーケーケー製, DM-32P) を用いて測定した。

2.4.2 浸出水を用いた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM)

曝露は、先の表 1 に示す条件で行った。アカヒレの死亡判定は 2.3 項に記載のとおりとし、オオミジ

ンコについては、試験容器を軽く動かした後、15 秒間に一度も動かない個体を死亡とした。アカヒレおよびオオミジンコの各濃度の死亡率から 24 時間後の半数致死濃度 (LC₅₀) をダートロフ法¹⁵⁾ により算出した。さらに、化学分析と比較するために、毒性の強さが数値に比例する指標である毒性単位^{13, 14)} (Toxic Unit: TU = 100 / LC₅₀) を算出した。

3. 結果および考察

3.1 標準物質によるアカヒレとヒメダカの感受性比較

試験に用いたアカヒレの平均体重 (±標準偏差) は 0.05 ± 0.03 g、平均標準体長は 1.4 ± 0.27 cm、ヒメダカの平均体重は 0.21 ± 0.1 g、平均標準体長は 2.2 ± 0.36 cm であった。アカヒレとヒメダカの死亡率と各被験物質の 24 時間 LC₅₀ 値を比較すると (表 2)、ノニルフェノールでは死亡率に差は見られず、LC₅₀ 値はアカヒレ、ヒメダカともに 0.55 mg/L であった。

試験開始時の pH, DO は、アカヒレとヒメダカともに、pH 7.6 ± 0.1, DO 7.4 ± 0.1 であった。試験終了時の pH, DO は、アカヒレ pH 7.4 ± 0.2, DO 7.5 ± 0.4, ヒメダカ pH 7.4 ± 0.2, DO 7.6 ± 0.3 であった。カナダ環境省は、ファットヘッドミノー、ブルーギル、ニジマス、シープスヘッドミノーを試験生物としたノニルフェノールの急性毒性試験について調査し、96 時間 LC₅₀ は 128 ~ 310 µg/L の範囲にあったと報告している¹⁵⁾。今回得られたアカヒレとヒメダカの LC₅₀ 値は、96 時間曝露と 24 時間曝露の差であることを考慮すると、他の魚種とはほぼ同程度の値と言える。二クロム酸カリウムでは、今回の設定濃度範囲ではアカヒレ、ヒメダカともに死亡率 100 % の濃度は得られなかった。このため、二クロム酸カリウムの LC₅₀ の推定はできなかった。しかし、設定濃度の最高濃度である 100 mg/L において、ヒメダカの死亡は見られなかったもののアカヒレの死亡率は 40 % であったことから、アカヒレの LC₅₀ 値はヒメダカの LC₅₀ 値より小さいと考えられる。試験開

表 2 各濃度の 24 時間後の死亡率 (%) と各被験物質の LC₅₀

塩化ナトリウム			二クロム酸カリウム			ノニルフェノール		
濃度 (g/L)	アカヒレ	ヒメダカ	濃度 (mg/L)	アカヒレ	ヒメダカ	濃度 (mg/L)	アカヒレ	ヒメダカ
100	—	100	100	40	0	10	100	100
30	100	100	30	0	0	3	100	100
10	80	0	10	0	0	1	100	100
3	0	0	3	0	0	0.3	0	0
1	0	0	1	0	0	0.1	0	0
0.3	0	—	対照区	0	0	対照区	0	0
0.1	0	—						
対照区	0	0						
LC ₅₀ 値*	6.4	17	LC ₅₀ 値*	Ca.100	>100	LC ₅₀ 値*	0.55	0.55

* LC₅₀ の単位は、塩化ナトリウムは g/L, その他は mg/L である。

始時の pH, DO は, アカヒレとヒメダカともに pH 7.8 ± 0.1 , DO 8.0 ± 0.1 であった。試験終了時の pH, DO は, アカヒレ pH 7.4 ± 0.1 , DO 8.4 ± 0.1 , ヒメダカ pH 7.1 ± 0.4 , DO 7.5 ± 0.2 であった。塩化ナトリウムでは, アカヒレとヒメダカの LC₅₀値はそれぞれ 6.4, 17 g/L であり, 明らかな差がみられた。この差はメダカが広塩性魚であることから^{8,16)} 妥当な結果であると考えられる。試験開始時の pH, DO は, アカヒレ pH 7.4 ± 0.1 , DO 7.9 ± 0.1 , ヒメダカ pH 7.1 ± 0.1 , DO 8.6 ± 0.1 であった。試験終了時の pH, DO は, アカヒレ pH 7.9 ± 0.1 , DO 7.8 ± 0.1 , ヒメダカ pH 7.9 ± 0.1 , DO 7.7 ± 0.1 であった。本研究で得られた 24 時間 LC₅₀値と, 14 化合物のアカヒレとヒメダカの 24 時間 LC₅₀値¹⁷⁾ が広範囲であるため対数比較すると (図 4), クロルピリホスの LC₅₀値はアカヒレ 240 mg/L に対してヒメダカ 13 mg/L と桁違いに異なっていたが, 他の被験物質では両者に大きな違いはなかった。

クロルピリホス以外の多くの化合物のプロットは 1:1 の直線より上 (ヒメダカの側) にあり, アカヒレの LC₅₀値がヒメダカに比べやや小さい傾向がみられた。したがって, アカヒレの感受性は総じてヒメダカよりやや高いと考えられる。

3.2 アカヒレとヒメダカの飼育密度比較

試験に用いたアカヒレの平均体重 (±標準偏差) は 0.10 ± 0.02 g, 平均標準体長は 1.8 ± 0.15 cm, ヒメダカの平均体重は 0.25 ± 0.11 g, 平均標準体長は 2.2 ± 0.31 cm であった。試験開始時の飼育水の DO は 9.0 mg/L であった。アカヒレは, 40 mL の飼育水に対して 7 尾までは 24 時間の生存を確認し, DO は 7.4 ~ 9.3 mg/L であった。10 尾では 1 時間で 1 尾死亡, 24 時間でさらに 2 尾の死亡を確認し, DO は 6.4 mg/L であった (図 5)。一方, ヒメダカは 3 尾では 24

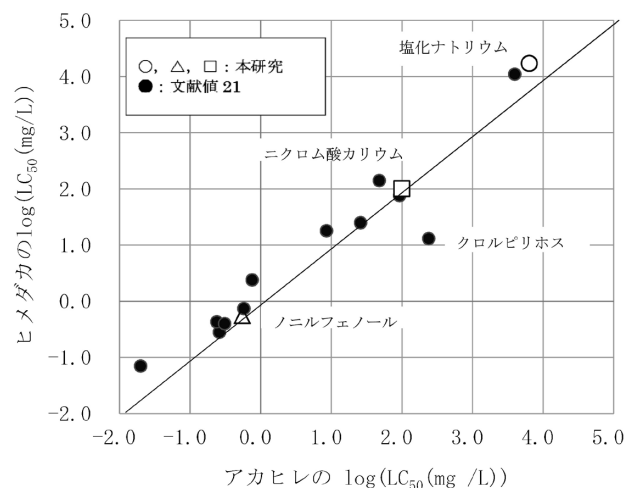


図 4 アカヒレとヒメダカの LC₅₀値の関係

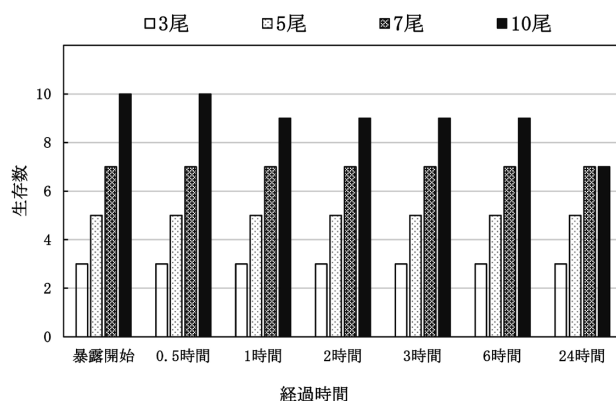


図 5 アカヒレの各密度における経時生存数

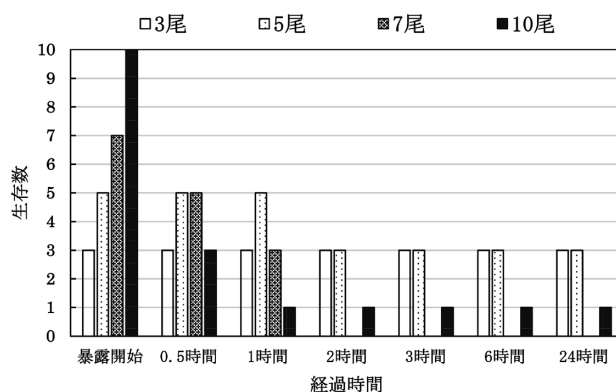


図 6 ヒメダカの各密度における経時生存数

時間生存し, 試験終了時の DO は 5.0 mg/L であった。5 尾では 2 時間で 2 尾死亡し, 24 時間後の DO は 5.0 mg/L, 7 尾では 2 時間で全例死亡し, 24 時間後の DO は 4.6 mg/L, 10 尾では 1 時間で 9 尾死亡し, 24 時間後の DO は 4.6 mg/L であった (図 6)。よって, アカヒレの方がより少量の飼育水で生存できることがわかった。これらのことから, アカヒレはヒメダカよりも高密度での試験が可能であり, 最終処分場の現場における浸出水の日常的なモニタリングに適していることがわかった。

3.3 アカヒレとヒメダカの浸出水による感受性比較

浸出水を用いた感受性試験においては, アカヒレ, ヒメダカともに 24 時間後まで全量生存していた 3 尾 / 40 mL よりも低い飼育密度である 3 尾 / 50 mL を採用した。

試験に用いたアカヒレの平均体重 (±標準偏差) は 0.09 ± 0.02 g, 平均標準体長は 1.7 ± 0.15 cm, ヒメダカの平均体重は 0.13 ± 0.02 g, 平均標準体長は 1.8 ± 0.17 cm であった。アカヒレとヒメダカの生存率を比較した (図 7)。2020 年 4 月 1 日採水の浸出水原水 (B) では, アカヒレの生存率は濃度 20 % 以下で 100 % であったが 40 % 以上において生存はみられなかった。ヒメダカの生存率は濃度 20 % で 100

%であったが40 %では67 %となり、80 %においては生存がみられなかった。2020年5月12日採水の浸出水原水 (B) では、アカヒレの生存率は濃度20 %以下で100 %であったが40 %では67 %となり、80 %においては生存がみられなかった。ヒメダカの生存率は濃度40 %以下で100 %であり、80 %では生存がみられなかった。2020年4月1日採水の浸出水原水 (A) では、アカヒレおよびヒメダカともに全ての濃度区において生存率100 %で死亡はみられなかった。浸出水を用いたアカヒレの生存率は、ヒメダカと同様の傾向であるものの、浸出水原水 (B) では生存率が低く、アカヒレはヒメダカに比べて感受性が高いことがわかった。

3.4 アカヒレとオオミジンコを用いた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM) による浸出水評価

3.4.1 浸出水の化学分析

各浸出水原水は毎月初旬の雨の降っていない日に採水した。浸出水原水 (A) と浸出水原水 (B) の2020年4月から9月の浸出水水質分析結果を表3に示す。浸出水原水 (A) は一般水質環境項目の放流

基準を満足していた。一方、浸出水原水 (B) ではCOD, T-N が一般水質環境項目の放流基準を満足していなかった。

3.4.2 浸出水を用いた迅速バイオアッセイ (BIOecsSM)

3.1および3.2の結果から魚類にはアカヒレを用いた。曝露は表1に示す条件で行った。

浸出水原水 (A) と浸出水原水 (B) の2020年4月から9月の浸出水のバイオアッセイ結果を表4に示す。採水月によって、アカヒレとオオミジンコのTU値が変動している。この要因は、浸出水中に含まれる化学物質が、ミジンコに対して影響が強いが魚に対しては弱い化学物質がある一方で、魚に対して影響が強いがミジンコに対しては弱い化学物質もあるためである¹⁸⁾。したがって、浸出水の評価にはアカヒレとオオミジンコの2種類の生物を用いる必要がある¹⁹⁾。

一般水質環境項目である個々の化学分析と浸出水そのものの影響を評価するためにバイオアッセイの総毒性単位との相関係数を確認したところ、浸出水

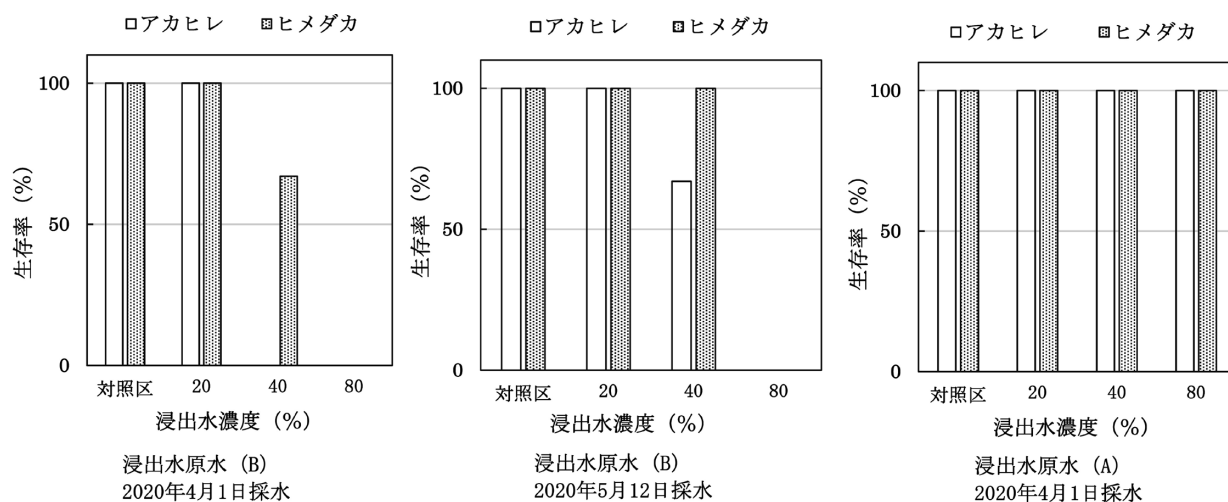


図7 浸出水による感受性比較

表3 浸出水水質分析結果

試料名 採水年月	処理水 水質基準 -	浸出水原水 (A)						浸出水原水 (B)					
		2020年						2020年					
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
pH	5.8~8.6	7.3	7.2	7.3	7.1	6.9	7.1	7.8	7.8	7.8	7.6	7.6	7.8
BOD (mg/L)	≤60	11	8	8	16	13	9	23	20	23	42	26	23
COD (mg/L)	≤90	34	34	26	41	38	32	130	118	133	223	168	131
SS (mg/L)	≤60	4	6	4	10	9	4	8	2	3	37	6	4
T-N (mg/L)	≤120*	56	56	48	50	60	62	110	88	140	220	197	156
Cl (mg/L)	-	3 360	3 810	3 120	2 510	3 020	3 370	4 300	4 480	4 640	3 560	2 900	3 030
TOC (mg/L)	-	32	30	24	37	35	33	112	98	121	187	145	125

*最大値を示す。

表4 浸出水のバイオアッセイ結果

試料名	浸出水原水 (A)						浸出水原水 (B)					
	2020年						2020年					
採水年月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
アカヒレ LC ₅₀ (%)	>80	>80	>80	34	57	>80	28	48	28	14	14	14
アカヒレ (TU)	1.3	1.3	1.3	2.9	1.8	1.3	3.6	2.1	3.6	7.1	7.1	7.1
オオミジンコ LC ₅₀ (%)	>80	71	71	57	57	57	18	22	22	15	26	28
オオミジンコ (TU)	1.3	1.4	1.4	1.8	1.8	1.8	5.6	4.5	4.5	6.7	3.8	3.6

原水 (A) では BOD 0.88, COD 0.76, SS 0.87 および TOC 0.73 と強い相関があったものの T-N と CI はそれぞれ -0.17, -0.85 と負の相関であった。浸出水原水 (B) では, BOD 0.87, COD 0.89, SS 0.81, T-N 0.91 および TOC 0.94 と強い相関があり, CI は -0.69 を示した。このため, 個々の化学分析とバイオアッセイの相関は, 浸出水ごとに異なることがわかった。坂本ら²⁰⁾の研究によると, BOD ならびに COD が廃止基準を満たしていたにもかかわらず, 処分場の安定化が進行していない可能性が示されている。バイオアッセイは一般水質環境項目以外の化学物質も含めた複合的な影響を評価することができ, 最終処分場の安定化評価のモニタリングに有効であると言える。

む す び

標準物質によるアカヒレとヒメダカの感受性を比較しアカヒレの感受性は総じてヒメダカよりも高いことがわかった。また, アカヒレはヒメダカよりも少量の飼育水で生存できることがわかった。さらに, 浸出水を用いた感受性比較においても, アカヒレはヒメダカよりも感受性が高いことがわかった。また, 感受性が異なるオオミジンコを加えることで, 短時間の試験ではあるが, 一定の精度のあることを確認した。これらのことから, アカヒレとオオミジンコを用いた BIOecsSM (図8) は最終処分場の浸出水管理に寄与できると考えられる。

図8 BIOecsSM のロゴ

(株) イー・アール・シー高城 ERC エコセンターの皆さまには, 試料の提供および現場での試験を実施頂き感謝します。

[参考文献]

- 1) 公益社団法人全国産業資源循環連合会：産業廃棄物最終処分場維持管理マニュアル (2019)
- 2) 結城修, 富永泰子, 石橋幸三：産業廃棄物最終処分場における未規制物質の挙動に関する研究, 新潟県保健環境科学研究所年報, 第20巻, pp.88-94 (2005)
- 3) 赤崎千香子, 松本啓：AOD 試験を活用し, 魚類へい死の主原因物質アルミニウムを特定した事例, 宮城県保健環境センター年報, 第36号, pp.59-62 (2018)
- 4) 清水直美, 青木一永, 内山道春：AOD (水族環境診断法) による新たな水質評価方法の検討 (第1報) 改善 AOD 法の検討, 静岡県環境衛生科学研究所報告, pp.71-75 (2009)
- 5) 内山道春, 青木一永, 濱口浩太, 清水直美, 小池明：AOD (水族環境診断法) による新たな水質評価方法の検討 - 第二報 河川の水質評価静岡県環境衛生科学研究所報告, pp.73-83 (2011)
- 6) 杉浦宏, 藤川清：増補カラー熱帯魚淡水魚百科, 株式会社平凡社 (1980)
- 7) OECD: Fish, Acute Toxicity Testing, Guidelines for Testing of Chemicals No.203 (2019)
- 8) 岩松鷹司：メダカ大全書, 大学教育出版 (2006)
- 9) OECD : Daphnia sp., Acute Immobilization Test, Test Guidelines for Testing of Chemicals No.202 (2004)
- 10) OECD: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, Guidelines for Testing of Chemicals No.201 (2011)
- 11) P. Doudoroff, Chairman, B. G. Anderson, G. E. Burdick, P. S. Galtsoff, W. B. Hart, P. Patrick, E. R. Strong, E. W. Surber, and W. M. Van Horn : Bio-assay Method for the Evaluation of Acute Toxicity of Industrial Wastes to Fish. Sewage and Industrial Wastes, Vol. 23, No. 11, pp. 1380-1397 (1951)
- 12) JIS K 0102 : 工場排水試験方法 (2013)
- 13) Pooja Ghosha, Indu Shekhar Thakurb, Anubha: Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review, Kaushik Ecotoxicology and Environmental Safety 141, pp.259-270 (2017)
- 14) Jun Jin, Xiaoyin Zhang, Takashi Kusui : Preliminary Toxicity Assessment of Combined Sewer Overflows in

- Toyama, Japan, Vol.16, No.5, pp. 185-198 (2018)
- 15) Canadian Council of Ministers of the Environment :
Canadian water quality guidelines for the protection of
aquatic life: Nonylphenol and its ethoxylates (2002)
 - 16) 柳島静江, 森主一: 魚類の適応変異に関する研究1
メダカ (*Oryzias latipes* T.S.) の塩水適応, 第2報 実
験的研究, 動物学雑誌, 第66巻, pp. 359-366 (1957)
 - 17) 国土交通省水文水質データベース: 7. 地質環境そ
の他の項目「平成8年2月 水質調査の基礎知識(近
畿地方整備局近畿技術事務所)より抜粋」, [www1.
river.go.jp/100308.html](http://www1.river.go.jp/100308.html), 2020年7月7日参照
 - 18) 若林明子: 化学物質と生態毒性, 丸善(株)(2003)
 - 19) 楠井隆史: 環境管理におけるバイオアッセイの役割,
安全工学, 第39巻, 第4号, pp.247-255 (2000)
 - 20) 坂本広美, 福井博, 高橋通正, 斎藤邦彦, 金子栄廣:
閉鎖後10年以上が経過した最終処分場浸出水中のビス
フェノール A および 4-ノニルフェノール濃度の変
動特性とその要因, 廃棄物学会論文誌, 第17巻, 第4
号, pp.259-270 (2006)

最終処分場における浸出水処理設備へのバイオアッセイ適用研究

Study of bioassay application in leachate treatment system at a solid waste landfill site



豊久志朗*
Shiro Toyohisa



森岡あゆみ*
Ayumi Morioka



宮後靖浩*
Yasuhiro Miyago



藤原尚美**
Dr. Naomi Fujiwara
工学博士



藤崎泰士*
Yasushi Fujisaki



樋口壮太郎***
Dr. Sotaro Higuchi
工学博士

循環型社会形成のための最後の砦である最終処分場では、埋立地の早期安定化が重要な課題である。今回、安定化の指標のひとつである浸出水に関して、埋立完了箇所および埋立中箇所から流出する各浸出水に対して、従来の化学分析に加えて（株）神鋼環境ソリューションで開発した迅速バイオアッセイ（BIOecsSM）の有効性を検証した。その結果、埋立完了箇所からの浸出水原水は化学分析の処理水基準値を満足し、バイオアッセイでも低い毒性を示した。埋立中箇所からの浸出水は、化学分析とバイオアッセイ共に水質改善に向けた施策が必要な結果であった。さらに、実用化に向けた迅速バイオアッセイ（BIOecsSM）は、現場においても研究所と同等の結果を得ることができた。このことから、最終処分場の新たな維持管理として、当該バイオアッセイを併用することの有効性が示唆された。

The early stabilization of solid waste landfill sites, which are the last bastion for the formation of a recycling-based society, is an important issue. In this study, we evaluated the effectiveness of a swift bioassay (BIOecsSM) developed by Kobelco Eco-Solutions Co., Ltd., in addition to conventional chemical analysis of leachate from completed and in-process landfill sites. We found that the raw leachate from the completed landfill site satisfied the standard value of treated water by chemical analysis and showed low toxicity in the bioassay. However, both chemical analysis and the bioassay showed that measures to improve the water quality of the leachate from the in-process landfill site are necessary. Furthermore, the swift bioassay (BIOecsSM) for practical use showed similar results in the field as in the laboratory. This suggests the effectiveness of the swift bioassay (BIOecsSM) in combination with a new maintenance method for solid waste landfill sites.

Key Words :

産業廃棄物管理型最終処分場
浸出水
バイオアッセイ
急性毒性試験

Landfill sites for controlled industrial waste
Leachate
Bioassay
Acute toxicity test

【セールスポイント】

- ・最終処分場から流出する浸出水に関して、従来の化学分析に加えて水生生物を用いたバイオアッセイを活用することで、その安全性を総合的に評価する先進的な取り組みを行なっている。
- ・今回紹介する迅速バイオアッセイ（BIOecsSM）は、現場においても精度の高い結果を得ることができ、実用的である。

*（株）イー・アール・シー高城

**技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

***福岡大学

まえがき

(株)イー・アール・シー高城（以下、当社と称す）は、(株)神鋼環境ソリューション（以下、SKSと称す）のグループ企業であり、産業廃棄物管理型最終処分場を運営している。最終処分場では、廃棄物が計画埋立容量に達し、受入を終了する「閉鎖」から、埋立廃棄物の影響がなくなり維持管理が不要となる「廃止」までの期間は一般的に10年以上の長期間を要し、埋立地の早期安定化が大きな課題となっている¹⁾。このため、当社では、埋立地の安定化を図るために重要な、自然の浄化機能とその分解メカニズムを利用することを基本としたバイオリアクター型の準好気性埋立機能²⁾を発揮させるための施策を講じている。例えば、埋立地から流出する浸出水原水や埋立ガスのモニタリングを継続し、受入廃棄物の選定や埋立方法を工夫することで、埋立地の好気状態の維持に取り組んでいる。今回、埋立地の安定化の状況を把握する重要な指標である浸出水原水の水質に関して、最終処分場に係る技術上の基準を定める省令に規定されている化学分析に加えて、現場で実施可能な迅速バイオアッセイ（BIOecsSM）によるモニタリングを1年間継続し、当バイオアッセイの実用性を考察したので以下に報告する。

1. バイオアッセイとは

バイオアッセイとは、生物作用性物質について、化学薬品のかわりに生物材料を用いて、化学反応の代わりに生物応答を利用し、物質量の代わりにその生物作用量を分析値として評価する方法である³⁾。本研究で採用したバイオアッセイは、急性毒性試験を参考にSKSが開発した迅速バイオアッセイ⁴⁾（BIOecsSM）である。生物は魚類としてアカヒレ、甲殻類としてオオミジンコを用い、曝露時間は24時間で生死判定による評価であり、現場においても実施可能な方法である（図1）。

SKSによるこれまでの浸出水処理に関するバイ



図1 現場でのバイオアッセイ試験の状況

オアッセイの研究においては、浸出水そのものを総合的に評価できる特長を生かして、浸出水処理設備での過剰な処理工程を省略できることや低薬注率の指標による省エネルギー・低コスト化に寄与できる事例⁵⁾などの成果を得ている。これらの研究は、最終処分場の廃止に関して、浸出水処理設備の段階的廃止にも寄与できる（図2）。化学分析による技術上の基準を満足した上で、バイオアッセイによる安全性を確認することで、各処理工程水を適切に判断することができる。

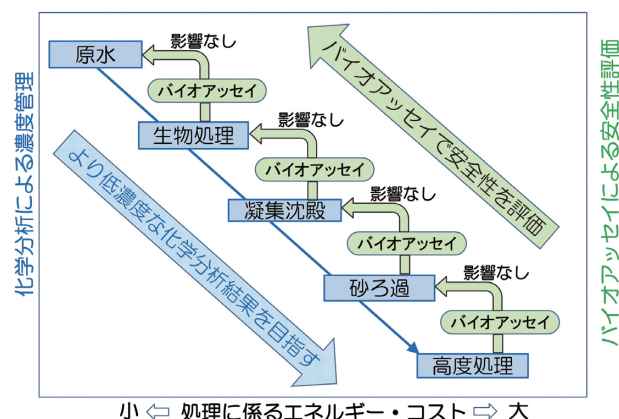


図2 バイオアッセイによる浸出水処理設備の段階的廃止

2. 研究対象処分場

研究対象とした管理型最終処分場は、宮崎県都市に位置し、計画埋め立て容量は93万m³で、2021年3月末にはその約7割の埋め立てが進捗している（図3）。埋立対象廃棄物は、廃プラスチック類、ガラス・コンクリート・陶磁器くず、無機性汚泥、土壌、燃え殻など15種類である（図4）。埋立地は準好気性埋立構造を採用し、準好気性埋立機能が發揮できるように、多降水地域のため埋立表層への移動式シートキャッピングの施工やガス抜管への空気供給などに取り組み、ガス抜管のガス濃度測定や埋立地への外気取込量のモニタリングを継続している⁶⁾。



図3 研究対象処分場の全景

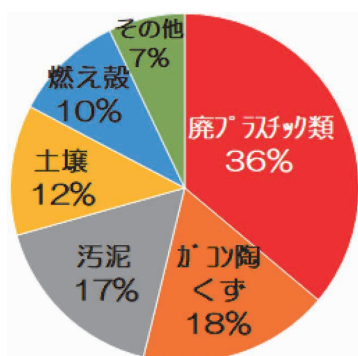


図4 受入廃棄物の種類

3. 研究方法

3.1 水質分析

当該最終処分場の埋立地は、前半（以降、1-1期と称す）と後半（以降、1-2期と称す）に分けて埋め立てており、1-1期は計画埋立容量に達し、現在1-2期を埋め立て中である（図5）。浸出水は、概ね1-1期と1-2期埋立地からそれぞれ1-1期浸出水原水、1-2期浸出水原水として流出している。埋立地の安定化の評価のため、これら1-1期および1-2期浸出水原水を対象に、化学分析とバイオアッセイを実施し比較した。

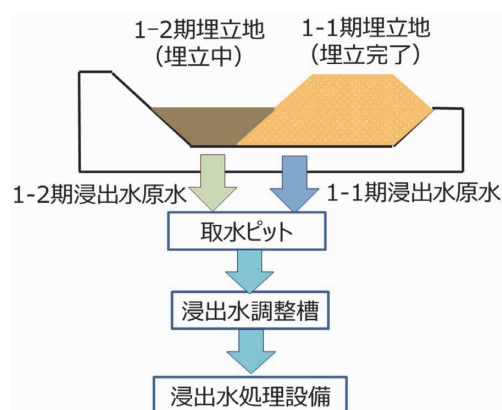


図5 研究対象処分場の模式図

3.2 化学分析

化学分析は、廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以降、廃掃法と称す）の放流水基準項目を参考に、1-1期浸出水原水と1-2期浸出水原水に対して毎月、BOD、COD、SS、T-Nについて実施した。

3.3 バイオアッセイ

1-1期浸出水原水と1-2期浸出水原水に対して、現場とSKS研究所でそれぞれBIOecsSMによる試験を実施した。生物はアカヒレとオオミジンコを用い、曝露時間は24時間で、生物の生死の判定からダートロフ法⁷⁾（浸出水の濃度を対数目盛に、死亡率を普通目盛にとってプロットし、死亡率50%に

最も近い上下2つの測定値を結ぶ直線を引き、死亡率50%の線との交点に相当する濃度をLC₅₀（半数致死濃度）とする）によりLC₅₀を算出した。

また、データ表示は、化学分析と比較するため、毒性の強さが数値に比例する指標である毒性単位(TU)⁸⁾を(1)式から算出した。

$$TU(\text{Toxic Unit}) = 100 / LC_{50} \quad \dots(1)$$

4. 結果および考察

4.1 化学分析とバイオアッセイ

2020年度の1-1期浸出水原水に対する化学分析とアカヒレおよびオオミジンコによるBIOecsSMの結果を図6および図7に示す（4月の現場TUデータは欠損）。1-1期浸出水は、2017年3月に埋立を完了した箇所から流出している浸出水である。このため年間を通じて受入廃棄物の安定化が進行し、化学分析値は廃掃法の放流水基準値（BOD：60 mg/L以下、COD：90 mg/L以下、SS：60 mg/L以下、T-N：最大120 mg/L以下）を満足した。BIOecsSMでは、TUは年間を通じて2.5以下であった。このため、浸出水原水のTU値2.5以下は、埋立地の安定化を把握するための良い指標になると考えられる。

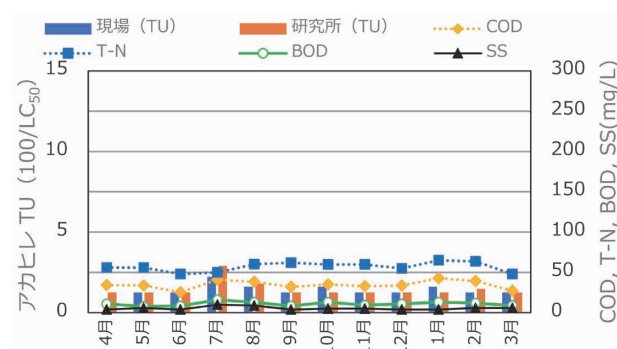


図6 1-1期浸出水原水（アカヒレ）

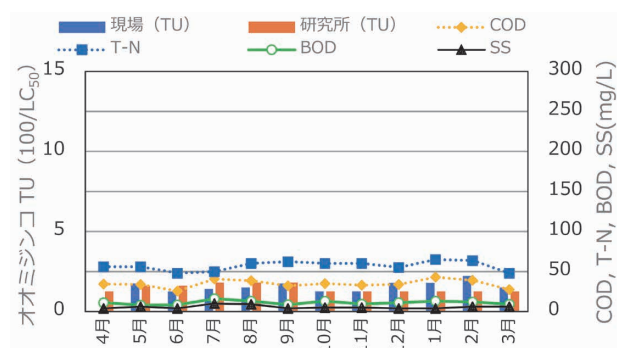


図7 1-1期浸出水原水（オオミジンコ）

一方、埋立中の1-2期浸出水原水に対する化学分析とBIOecsSMの結果を図8、図9に示す。1-2期埋立地から流出する1-2期浸出水原水では、

BOD と SS は廃掃法の放流水基準値を満足したが、COD と T-N は放流水基準値以上の値であり、受入廃棄物の影響を受けており、安定化に向けた埋立施工の工夫を継続することが望ましい。また、降水量の多い7月が最も高い値となり、これは降水による廃棄物の洗出しの影響と考えられる。BIOecsSMでは、TU 値は2.5を超過し、COD と T-N と同様の傾向を示した。このため浸出水原水を24時間で評価できるBIOecsSMは、現場での早期アラームシステムとして活用できると考えられる。

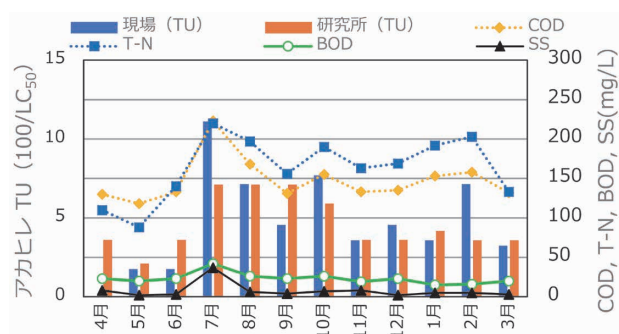


図8 1-2期浸出水原水（アカヒレ）

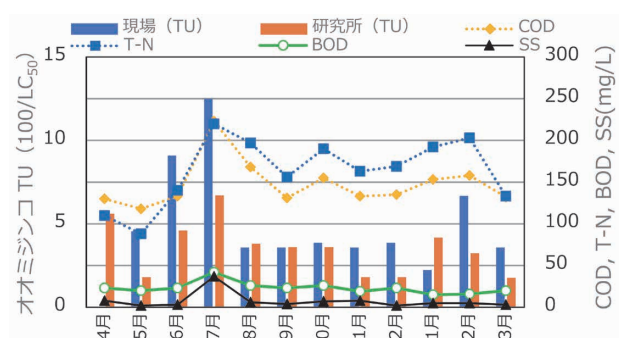


図9 1-2期浸出水原水（オオミジンコ）

4.2 研究所と現場でのバイオアッセイデータ比較

アカヒレのBIOecsSMにおいて、設備の整った研究所（神戸）と現場で実施した結果を比較した（図10）。研究所でのBIOecsSMの試験条件は、水温25 ± 1℃、照明13時間明期 / 11時間暗期とした。生物の飼育時の給餌は、1～2回 / 日、適量を与えた。一方、現場では会議室で試験を実施し、夏季の水温が上昇した際はエアコンを作動、冬季は飼育水槽にヒーターを設置し水温を管理した。給餌は休日を除いて1回 / 日適量を与えた。このように試験・飼育条件が異なっても、研究所と現場でのTU 値に大きな差はなく、決定係数は0.73と強い相関を示した。オオミジンコについても図11に示すとおり決定係数は0.69で強い相関を示した。このことから、これらの生物は扱いやすく、日々水質の変動する浸

出水原水に対して現場で実施できるBIOecsSMは有効な手法であることがわかった。

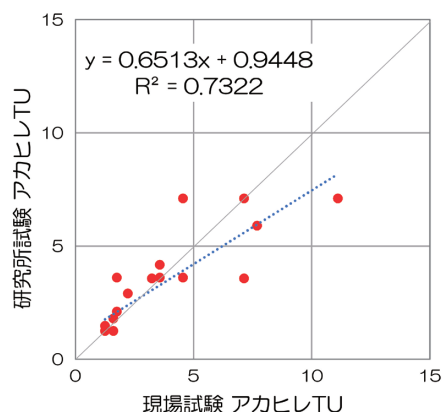


図10 現場と研究所の比較（アカヒレ）

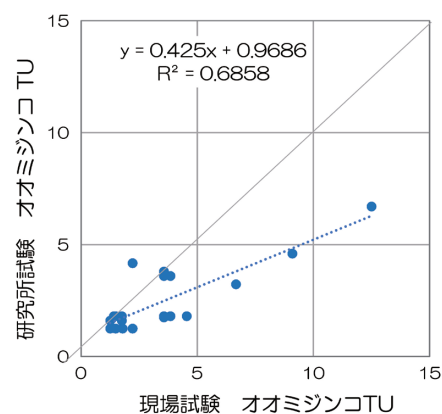


図11 現場と研究所の比較（オオミジンコ）

5. まとめと今後の課題

本研究では、浸出水原水の化学分析とバイオアッセイの適用により下記の知見を得た。

- (1) 廃棄物の受入を終了した1-1期埋立地からの浸出水原水は化学分析、BIOecsSMともに安定した結果であった。
- (2) 埋立地の安定化が進捗した場合のBIOecsSMによるTU 値は2.5以下であることが示唆された。
- (3) BIOecsSMは研究所と現場の結果に大差がなく、浸出水が発生する現地でのモニタリングが可能であり、埋立管理ならびに浸出水管理に、観賞魚飼育と同じ条件で簡便かつ有効に活用できることが判った。

今回の試験では、同時採水に対して、現場試験では採水当日に試験を実施し、研究所試験では採水を研究所に冷蔵輸送し1～2週間後に試験を実施した。採水から試験着手までの日数の違いに関して、経時変化の影響が懸念されるが、本件の検討を含め、今後は、BIOecsSMのデータ蓄積により、最終処分

場の立地，運営，廃止にいたるプロセス上，最も重要な「生活環境保全上支障のないこと」に対する日々の維持管理モニタリング指標の一つとなるよう研究を進めたい。

む す び

最終処分場の維持管理で重要な浸出水管理に対して，迅速バイオアッセイ BIOecs は，化学分析と同様の挙動であり，かつ，現場でも精度の高い結果が得られることがわかった。

【参考文献】

- 1) Sotaro Higuchi: Municipal Solid Waste Landfill Technology in Japan, Springer (2018) pp118-129
- 2) Sotaro Higuchi: Municipal Solid Waste Landfill Technology in Japan, Springer (2018) pp97-105
- 3) 楠井隆史：総説環境管理におけるバイオアッセイの役割，安全工学，Vol.39 No4 (2000)，pp247
- 4) 藤原ら：アカヒレとオオミジンコを用いた最終処分場浸出水管理，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.31 (2020)
- 5) 藤原ら：生物応答による水処理設備の省エネルギー，低コスト化，第28回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
- 6) S.Toyohisa et al.: FUNCTION TEST AND EVALUATION CASES OF THE SEMI-AEROBIC LANDFIL, APLAS TOKYO 2018 The 10th Asia-Pacific Landfill Symposium (2018) , pp307-311
- 7) P. Doudoroff, Chairman, B. G. Anderson, G. E. Burdick, P. S. Galtsoff, W. B. Hart, P. Patrick, E. R. Strong, E. W. Surber, and W. M. Van Horn : Bio-assay Method for the Evaluation of Acute Toxicity of Industrial Wastes to Fish. Sewage and Industrial Wastes, Vol. 23, No. 11, pp. 1380-1397 (1951)
- 8) Ghosha et al.: Bioassays for Toxicological Risk Assessment of Landfill Leachate: A Review, cototoxicology and Environmental Safety, Vol.141, pp.259-270 (2017)

本山浄水場膜ろ過設備における膜交換サイクルの延長 ー簡易薬品洗浄方法の見直しー

Extension of the membrane replacement cycle of the membrane filtration equipment of the Motoyama water purification plant – Improvement of the chemical cleaning method –



中嶋友希子*
Yukiko Nakajima



田中裕大*
Yasuhiro Tanaka



隅 晃彦*
Akihiko Sumi
技術士（上下水道部門）



三浦雅彦*
Masahiko Miura
農学博士



長谷川進**
Susumu Hasegawa
工学博士・技術士（上下水道部門）



松山秀人**
Hideto Matsuyama
工学博士

神戸市本山浄水場では、MF（Microfiltration）膜ろ過設備を導入している。当初、オフサイト洗浄＋簡易薬品洗浄での運転を計画していたが、簡易薬品洗浄のみでの長期運転を目指すこととした。各種分析手法を用いたファウリング物質の特定や実モジュールの分解・膜評価、温度・薬品濃度・時間等の洗浄条件がファウリング改善に及ぼす効果の検証を通じて、最適洗浄条件を確立し、実機での運転に反映した。クエン酸洗浄と次亜塩素酸ナトリウム洗浄を組み合わせた改良法により膜ろ過抵抗を低減し、膜交換サイクルを長期化することができ、膜ろ過抵抗シミュレーション手法についても知見を得ることができた。

MF (microfiltration) membrane filtration equipment was installed in the Motoyama water purification plant in Kobe City. Initially, both offsite cleaning and simple chemical cleaning were planned, but the decision was made to reduce costs by performing simple chemical cleaning only. The fouling substances were identified using various analytical techniques as well as via decomposition of actual modules and membrane evaluation, and the effects of cleaning conditions such as temperature, chemical concentration, and time on chemical cleaning were examined. Subsequently, optimum cleaning conditions were established and reflected in the operation of the machines. The membrane filtration resistance was reduced by an improved method combining citric acid cleaning and sodium hypochlorite cleaning. The membrane replacement cycle was extended, and the membrane filtration resistance simulation technique was also obtained.

Key Words :

浄 水
精 密 ろ 過
膜 ファウリング
簡 易 薬 品 洗 浄
膜 交 換 サ イ ク ル

Water purification
Microfiltration
Membrane fouling
Simple chemical cleaning
Membrane replacement cycle

【セールスポイント】

- ・クエン酸洗浄と次亜塩素酸ナトリウム洗浄を組み合わせた簡易薬品洗浄により、膜ファウリングを軽減し、膜交換サイクルの長期化が可能。
- ・槽外洗浄設備を設置しにくい小規模設備において、オフサイト洗浄不要化が可能。

*技術開発センター 技術開発部
**神戸大学先端膜工学研究センター

まえがき

浄水施設への導入が進む膜ろ過法¹⁾は、従来の急速ろ過法と比べて省スペースであり、安定した処理水質が得られるという長所を有する。浄水分野における膜ろ過では、MF膜をはじめとする多孔膜を用いるのが一般的である。

膜ろ過設備の運転における最大の課題は、運転に伴い発生する膜ファウリング（目詰まり）である²⁾。膜ファウリングへの対策としては、前処理や運転条件の最適化、洗浄方法の工夫などが挙げられる。洗浄方法については、一般的に、逆圧洗浄（以下、逆洗）やエアバブリングに代表される物理洗浄を定期的に実施し、物理洗浄で解消することができない膜ファウリングについては薬品洗浄で対応する。

本検討の対象とした本山浄水場は、2010年3月より供用を開始した。当設備は、処理量2 000 m³/dの比較的小規模の設備であることから、膜モジュールの薬品洗浄はオフサイトとし、安定運転のためオンサイトの簡易薬品洗浄を適切に行う計画であったが、オフサイト洗浄の経費が高かったことから、経費削減のため、オンサイト簡易薬品洗浄を主体とすることに変更した。しかし、運転開始から3年目に膜ろ過抵抗が急上昇したため、EEM（三次元励起蛍光スペクトル）やLC-OCD（有機炭素検出型サイズ排除クロマトグラフ）によるファウリング物質の特定や実モジュールの分解・評価³⁾、前処理としての生物接触ろ過の効果、単糸試験による薬品洗浄条件の最適化等の検討を行い、本場に適した洗浄条件を確立し、膜ろ過抵抗上昇シミュレーション手法の知見を得た⁴⁾。

1. 検証方法

1.1 対象設備

本検討で対象とした本山浄水場の処理フローを図1に示す。住吉川表流水を水源とし、取水された原水は、調整池を經由して生物接触ろ過（BCF[®]：Bio Contact Filter）、MF膜ろ過が行われる。BCFは、臭気やアンモニア性窒素の除去を目的として、前処理として設置されている。

1.2 膜ろ過設備の運転条件

膜ろ過設備は2系列からなり、1系は2016年夏季、2系は2014年夏季に膜交換を行い、以降運転を継続している^{*}。膜ろ過設備で使用しているMF膜は、外圧式中空糸膜（旭化成ケミカルズ製、材質：PVDF、公称孔径：0.1 μm）である。主な運転条件は、ろ過流速1.9 m/d、洗浄は物理洗浄と簡易薬品洗浄を行っている。物理洗浄は、1回/30分の頻度で逆洗（5 mg/L 次亜塩素酸ナトリウム（以下、次亜）含む）+エアバブリングとなっている。

簡易薬品洗浄の方法を表1に示す。従来法は、2週間に1回のクエン酸洗浄である。次亜は有機ファウリングに効果があるのに対し、クエン酸は無機フ

表1 簡易薬品洗浄方法

頻度	1回/2週間
浸漬時間	13時間
薬品種	①クエン酸（0.3 %） ②次亜（500 mg/L）
従来法	①のみ サイクル：①，①，①，①，①，①…
改良法	①と②を併用 サイクル：①，①，②，①，①，②…

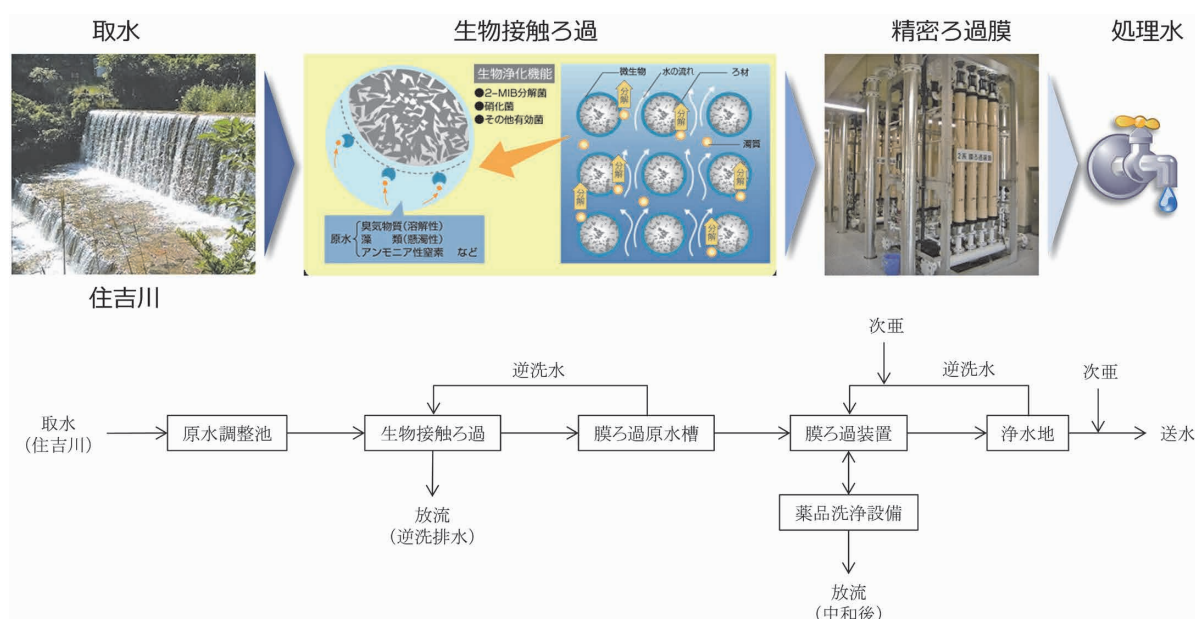


図1 本山浄水場の処理フロー

ファウリングに効果がある。本設備の物理洗浄では、配管の殺菌を目的として洗浄水に次亜を注入しており結果的に膜も次亜で洗浄されるため、有機ファウリングの抑制が期待できる。このことから、簡易薬品洗浄（従来法）では、無機ファウリング抑制を主目的としてクエン酸洗浄を実施することとした。しかし、運転開始から3年目に膜ろ過抵抗が急上昇したため、膜表面に付着するファウリング物質を分析したところ、有機ファウリングの進行が明らかとなり、次亜洗浄を組み込む洗浄に変更した（改良法）。各系列の洗浄履歴を表2に示す。

1.3 膜ファウリング進行の検証方法

膜ファウリングの指標としては膜間差圧が代表的であるが、これは水温によって変化する。そこで、水温の影響を排除し膜ファウリングの度合いをより明確に表すため、下記式（1）にて算出される膜ろ過抵抗を指標として用いた。

$$R = \Delta P / (\mu \cdot J) \quad \dots(1)$$

ここで、 R : 膜ろ過抵抗 [m^{-1}], ΔP : 膜間差圧 [Pa], μ : 粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$], J : ろ過流速 [m/s] である。

1.4 膜ろ過抵抗のシミュレーション手法

膜ろ過抵抗シミュレーション手法の概念図を図2に示す。各運転年ごとに、簡易薬品洗浄後の膜ろ過

抵抗 R_{base} を線形近似で、日当たりの膜ろ過抵抗上昇速度 r を指数近似で整理した。各運転年ごとの膜ろ過抵抗 R の計算値は、下記式（2）にて求めた。

$$R = R_{\text{base}} + dr \quad \dots(2)$$

ここで、 R_{base} : 簡易薬品洗浄後の膜ろ過抵抗 [m^{-1}], d : 薬品洗浄までの運転日数 [day], r : 膜ろ過上昇速度 [$\text{m}^{-1} / \text{day}$] であり、 $d=13$ である。

さらに、季節変動による膜ろ過抵抗の変化を表現するために、各月ごとの関係式の係数は、膜ろ過抵抗がもっとも大きくなる2月と小さくなる8月における係数を算出の上、線形で補完した値を用いた。

2. 検証結果および考察

2.1 簡易薬品洗浄の改良法による効果

2系の運転状況を図3に示す。図中の着色部は、クエン酸洗浄と次亜洗浄を組み合わせた改良法を実施している期間を示している。

クエン酸洗浄のみ（従来法）で運転したところ、3年目の2016年12月に膜ろ過抵抗が急上昇し、前述の通り有機ファウリングを原因と特定し、洗浄方法を改良法に変更した。これにより、膜ろ過抵抗は改善した。4年目の膜ろ過抵抗は、冬季から改良法を実施したことにより、急上昇することはなかった。5年目の膜ろ過抵抗は、冬季の水温が例年より高い

表2 各系列の簡易薬品洗浄履歴（前回膜交換後以降）

系列	西暦	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1系				----->	----->	----->	----->	----->	----->
2系		----->	----->	----->	----->	----->	----->	----->	----->

-----> 従来法 -----> 改良法

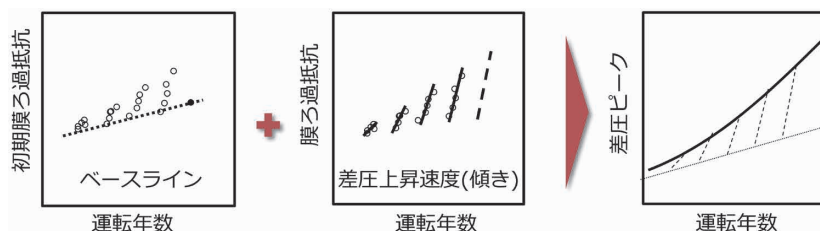


図2 膜ろ過抵抗シミュレーション手法の概念図

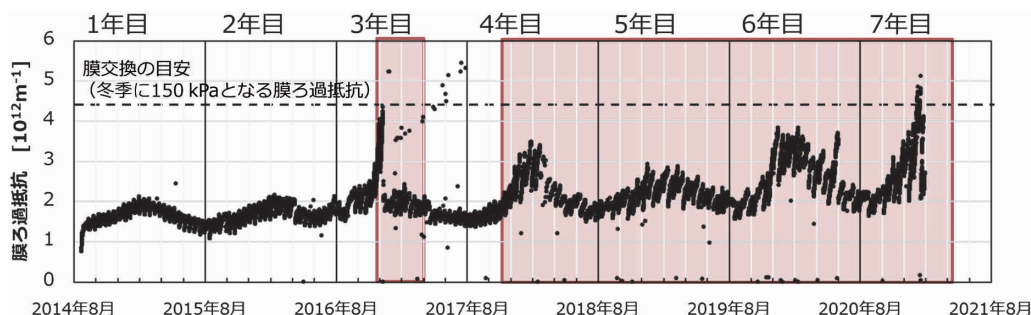


図3 2系の運転状況

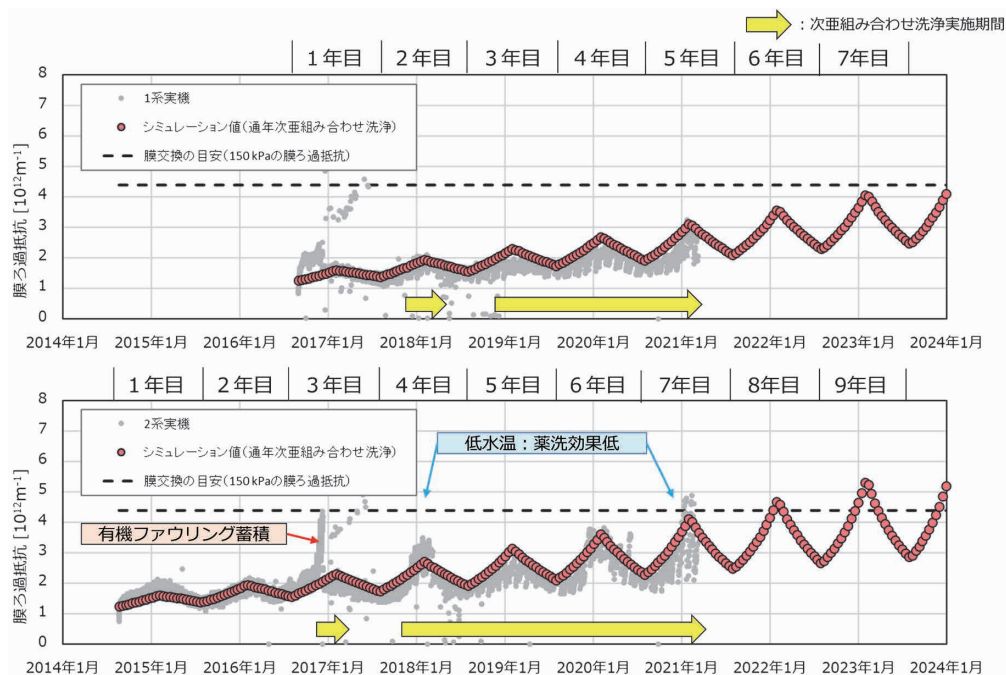


図4 膜ろ過抵抗シミュレーション結果

こともあり、4年目よりもさらに低く推移した。6年目の膜ろ過抵抗は、冬季は5年目より上昇しているが、膜交換の目安より低く推移した。7年目には、突発的な膜ろ過抵抗の上昇により、一時的に膜交換の目安を超えることがあった。これは、ファウリングが進んでいることに加え、冬季の水温が例年より低くなり（最低水温：例年4℃程度に対して7年目2℃）、洗浄効果が低下したためと推察する⁵⁾。洗浄間隔を一時的に短縮することで、ろ過流速を落とさずに運転を継続できた。

2.2 膜ろ過抵抗上昇シミュレーション

1系および2系のシミュレーション結果を図4に示す。

1系／2系ともに、クエン酸洗浄と次亜洗浄を組み合わせた改良法により、十分に有機物を洗浄することで、膜交換サイクルが7年となることが示唆された。

1系では、これまでに膜ろ過抵抗が急上昇することなく運転を継続している。2系より1年早く改良法を実施しており、その効果によるものと推察する。膜ろ過抵抗上昇シミュレーションともよく一致した。

2系では、冬季において、急な大雨による無機物流入や低水温により洗浄効果が低下した際、一時的に膜ろ過抵抗がシミュレーション値を上回る現象がみられた。この突発時を除き、2系においても、膜ろ過抵抗上昇シミュレーションとよく一致した。

むすび

有機／無機の複合的なファウリングが起こっている本山浄水場膜ろ過設備において、各種分析手法を用いたファウリング物質の特定や実モジュールの分解・膜評価、温度・薬品濃度・時間等の洗浄条件がファウリング改善に及ぼす効果の検証を通じて最適洗浄条件を確立し、実機での運転に反映した。

簡易薬品洗浄のみでの運用において、クエン酸洗浄と次亜洗浄を組み合わせた改良法により、膜ろ過抵抗を低減し、膜交換サイクルを長期化することができた。また、膜ろ過抵抗シミュレーション手法についても知見を得ることが出来た。引き続き、膜ろ過抵抗の推移を確認し、シミュレーション結果と照合していきたい。

最後に、本検証は、神戸市水道局、神戸大学との共同研究として実施した。関係各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 水道技術研究センター、<http://www.jwrc-net.or.jp/jigyuu/gijyutsu-shien.html>
- 2) 中尾真一：日本海水学会誌，62（2008），p234-237
- 3) S. Hasegawa ほか：Water Supply，19（8）（2019），p2330-2337
- 4) 隅晃彦ほか：令和3年度全国会議（水道研究発表会）講演集，p278-279
- 5) 長谷川進ほか：令和元年度全国会議（水道研究発表会）講演集，p306-307

＊）2系は2021年春季まで運転継続後に膜を交換。

鋼板製消化タンク 1 号機の運転実績および性能評価

Operation and performance evaluation of our first commercial steel plate digestion tank for sewage



井上智行*
Tomoyuki Inoue



齋藤典久*
Norihisa Saito



鈴木一弘*
Kazuhiro Suzuki

従来、下水処理場における消化タンクはコンクリートで建設されてきたが、当社ではより経済性、施工性、機能性に優れた鋼板製消化タンクを開発し、全国初となる実機 1 号機を愛知県矢作川浄化センターに建設した。実機 1 号機は2016年に定格運用を開始してからこれまで安定した運転を継続している。今回、鋼板製消化タンク 1 号機の運転実績および諸性能（消化性能、省エネルギー性、機能性等）について追跡調査した結果、所定の性能を満足することを確認した。

The digestion tanks in sewage treatment plants are generally constructed using concrete; however, Kobelco Eco-Solutions developed a steel plate digestion tank that is superior in terms of economy, constructability, and functionality. We constructed the first commercial plant at the Yahagigawa Sewage Treatment Center in the Aichi Prefecture in October 2016. Up to the moment of writing, the plant is in stable operation. In this study, we evaluated the operation results and various performance criteria (digestive performance, energy savings, and functionality) of our first commercial steel plate digestion tank and confirmed that they satisfied the predetermined performance.

Key Words :

鋼板製消化タンク
下水汚泥のエネルギー利用
温室効果ガスの削減

Steel plate digestion tank
Energy utilization of sewage sludge
Reduction of greenhouse gas emissions

【セールスポイント】

- ・鋼板製消化タンクは下水汚泥エネルギー化による温室効果ガス削減に有効、かつ、従来のコンクリート製消化タンクに比べ建設費が低く建設期間も短いため導入ハードルを下げる技術である。
- ・省エネルギー性に優れ、沈砂などの堆積進行がなく機能面でも優れた製品である。

まえがき

近年、地球温暖化防止のため温室効果ガス排出量削減が世界共通の課題となり、再生可能でカーボンニュートラルなバイオマスエネルギーの利用が促進される中、下水汚泥は都市から生じる集約型の安定した再生可能エネルギー資源として注目されている。消化は下水汚泥減容化ならびに再生可能エネルギーであ

るバイオガス（消化ガス）を創出するプロセスであり、鋼板製消化タンクは従来のコンクリート製消化タンクと比較して、建設費・ライフサイクルコストなどに優れる技術として開発された製品である。今回、愛知県矢作川浄化センターに建設した鋼板製消化タンク 1 号機の運転実績について追跡調査を行い、諸性能について所定の性能を満足することを確認

*環境エンジニアリング事業本部 水環境技術本部 資源循環技術部

表1 設備概要・設計条件

消化対象汚泥	生 汚 泥	汚 泥 量 [m ³ /d]	163
		汚泥濃度 [%]	3
		固形物量 [t-DS/d]	4.96
	余 剰 汚 泥	汚 泥 量 [m ³ /d]	125
		汚泥濃度 [%]	4
		固形物量 [t-DS/d]	4.99
	合 計 (消化対象汚泥)	汚 泥 量 [m ³ /d]	290
		汚泥濃度 [%]	3.4
		有機分率 [%]	84
消 化 方 式	中温1段消化（汚泥温度35℃）		
消 化 日 数	20日		
消化タンク型式	全溶接円筒形 鋼板製消化タンク 公称容量 5 800 m ³ ×1基		
加 温 方 式	間接加温		
加 温 熱 源	焼却炉の洗煙排水+ヒートポンプ		
バイオガス利用	脱硫後、焼却炉の補助燃料として使用		

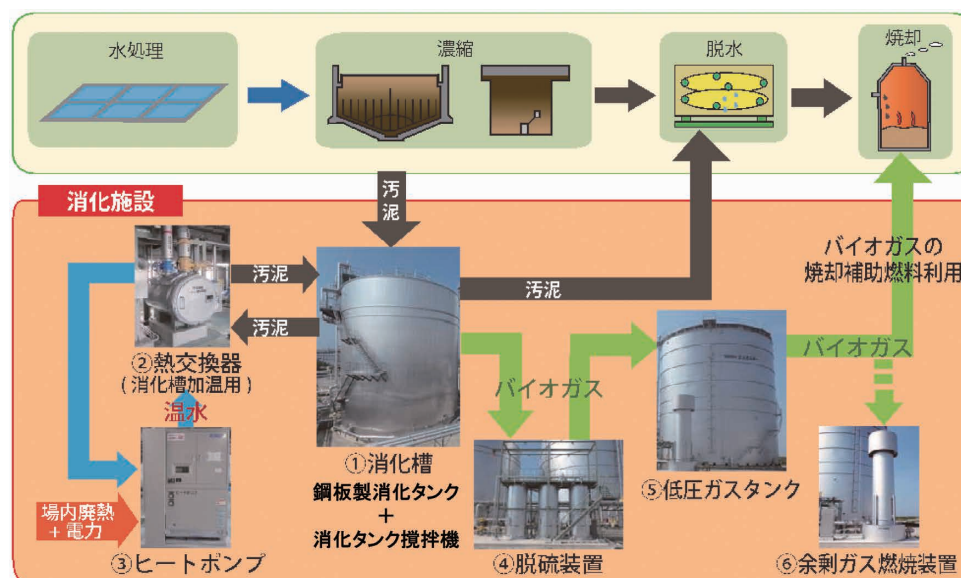


図1 概略汚泥処理フロー

認した結果を示す。

1. 設備と建設の概要

1.1 設計条件

当社が愛知県矢作川浄化センターに納入した鋼板製消化タンク1号機を含む消化設備の各設計条件およびバイオガスの利用方法を表1に示す。

1.2 設備構成

図1に概略汚泥処理フローを示す。既存の濃縮汚泥の一部を本消化設備へ送泥し、消化した汚泥は既存の脱水設備を経て焼却炉で処理される。鋼板製消化タンクで発生したバイオガスは、焼却炉の補助燃料として有効利用し、さらに焼却炉で発生する温度の高い洗煙排水の熱エネルギーをヒートポンプにて回収し、鋼板製消化タンクの加温熱源として利用する。

鋼板製消化タンクはタンク本体とタンク内汚泥を攪拌する消化タンク攪拌機で構成される。タンク本体は内径21 m、高さ19.5 m、公称容量5 800 m³で、

腐食雰囲気であるタンク内には防食塗装を施している。

従来の消化タンクでは経年使用で生じる、消化タンク内の沈砂などの堆積により有効容量が減少し、消化性能が低下することが課題の一つである。鋼板製消化タンクでは攪拌機運転とタンク内汚泥の排出を組み合わせることにより、堆積物を蓄積しない運転を可能とする。¹⁾ 加えて、タンク外から超音波式センサを用いることで堆積高さを測定でき、適切な浚渫時期の把握も可能とする。

消化タンク攪拌機はインペラ式機械攪拌機で、大型インペラを10 min⁻¹程度の低速で回転させることで下降流を発生させ、タンク内を低動力で攪拌する。

加温設備はヒートポンプと熱交換器から構成される。消化タンクの加温熱源にはバイオガスおよび重油を燃料としたボイラを用いるのが一般的であるが、本設備では従来使われていなかった焼却炉の洗

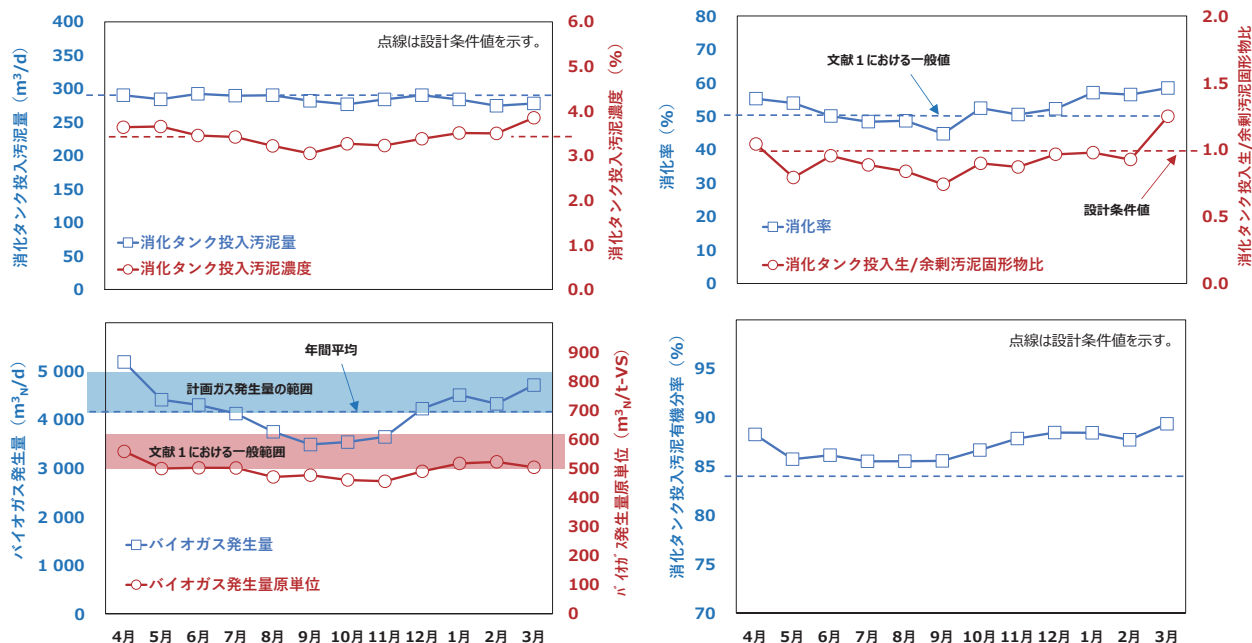


図2 鋼板製消化タンク1号機の運転実績(2019年度、各月で日平均化しプロット)

煙排水を利用する。熱交換器を介してヒートポンプにて洗煙排水の熱エネルギーを回収し、温水として消化タンク加温用の熱交換器に供給する。ここで電力を補助熱源として必要とするが、それは供給する熱量の6分の1程度に留まる。国土交通省通知における「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術」²⁾では、「消化槽を加温する場合のヒートポンプ」の性能指標として「エネルギー消費効率COP2.7以上(水温20℃※処理水等)」とあるが、本ヒートポンプは熱源が異なるため単純比較はできないものの、最小加熱COP3.44と性能指標と同等以上の性能を有する。

1.3 鋼板製消化タンクの建設

鋼板製消化タンクの現地建設期間は、土木杭打設から試運転開始まで約8.5カ月であった。これは同規模のコンクリート製消化タンクの建設期間実績が約19カ月である³⁾のに対して十分に短いと言える。

1.4 消化タンクの立上げ

消化タンクの立上げは、場内もしくは近隣の下水処理場から消化汚泥を運搬し、種汚泥として消化タンク馴養に用いるのが一般的であるが、本設備では種汚泥の調達が困難であったため、種汚泥を用いず場内汚泥から消化タンク立上げを行う手段を当社として初めて採用し、立上げ達成に至った。⁴⁾

2. 運転実績と性能評価

2.1 消化設備の運転実績

図2に鋼板製消化タンク1号機の運転実績を示す。消化タンクに投入された汚泥量・濃度・有機分率はおおむね設計条件(最大値)に近く、年間を通

じて高負荷での運転を継続していることが示される。

バイオガス発生量は年間で比較的大きな変動が見られる。平均ガス発生量としては下限付近であるものの、計画ガス発生量の範囲内に収まっている。バイオガス発生量原単位は $500 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{t-VS}$ 前後と、一般的な $500\sim 600 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{t-VS}$ (文献⁵⁾)と比較して低い傾向にある。これらバイオガス発生量および原単位については、消化タンク投入生/余剰汚泥固形物比が低い(バイオガス化し易い生汚泥の消化タンクへの投入比率が低い)ためであると考察される。

消化率は投入汚泥中の有機物が分解される割合であり、消化タンク運用の良否判定指標となる。時期にもよるが、一般的な消化率である50%程度⁵⁾を維持している。

バイオガス発生量、消化率および消化タンク投入生/余剰汚泥固形物比は季節変動の影響を受けることが一般に知られている。特に夏季は外気温と下水処理場への流入水温が高く、消化タンクに汚泥を投入するまでに有機物の分解が進行し、消化に悪影響(バイオガス発生量および消化率の低下)を及ぼす。今回の運転実績においても同様の傾向が見られる。

2.2 性能評価①(バイオガス発生等消化性能)

運転実績より、下水汚泥エネルギー化の観点からバイオガス発生および消化率に係る指標データを抽出・整理した結果を図3に示す。前述のとおりバイオガス発生量に影響する因子として消化タンク投入生/余剰汚泥固形物比に着目し、バイオガス発生量原単位との相関を整理した(図3(a)、本来、有機物量で整理するべきであるが、結果に大きな差がな

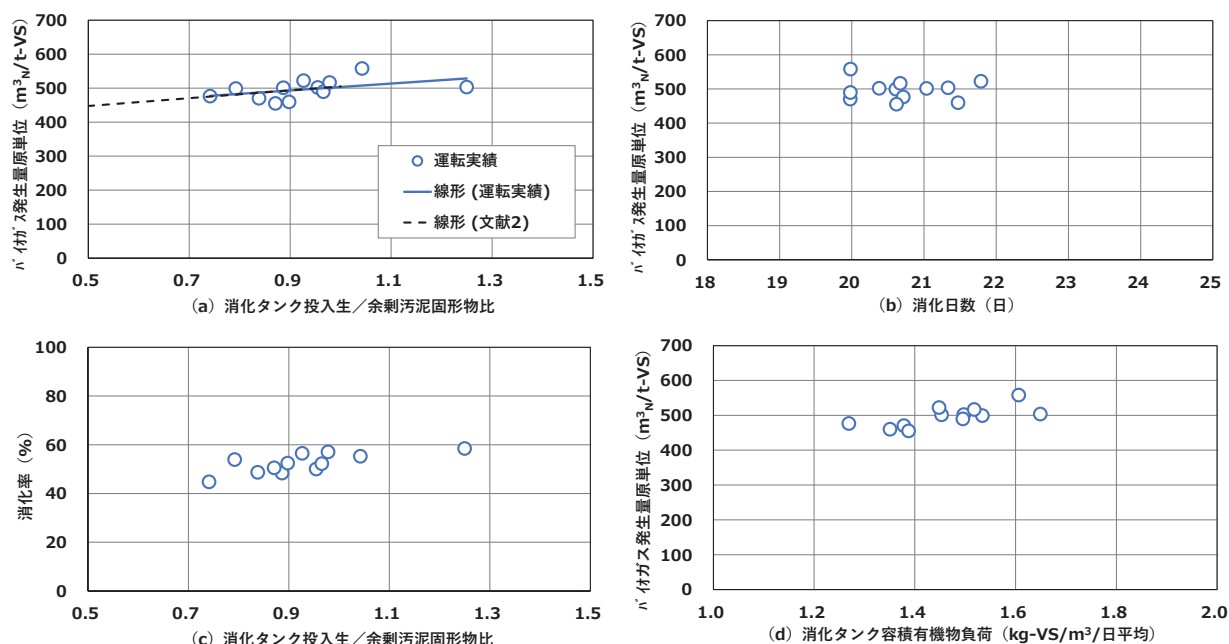


図3 バイオガス発生量原単位および消化率に係る指標データ

いことから、ここではデータ採取の容易な固形物量とする)。文献⁶⁾では消化タンクに投入する生汚泥と余剰汚泥量の比によって得られるバイオガス発生量原単位は異なることが示されている。その代表値を線形図示しているが、今回、運転実績から得られた近似線と合致する。このことから、運転実績におけるバイオガス発生量原単位は、文献⁵⁾における一般的な範囲と比べると低いが、消化タンク投入生/余剰汚泥固形物比で見ると妥当であると判断できる。

図3 (b) に、消化日数とバイオガス発生量原単位の相関を示す。消化日数が不十分であるとバイオガス発生量原単位の低下が見られることが一般に知られるが、本結果では最短20日の消化日数で十分に消化されていることが示唆される。

図3 (c) に、消化タンク投入生/余剰汚泥固形物比と消化率の相関を示す。バイオガス発生量原単位における傾向と同様に、生汚泥の比率が高いほど消化率が高い傾向にある。

図3 (d) に、消化タンク容積有機物負荷とバイオガス発生量原単位の相関を示す。容積有機物負荷は消化タンクの汚泥投入負荷を示す指標で、上限付近ではバイオガス発生量原単位と負の相関があることが知られているが、今回の結果では負の相関が見られないことから、運転にある程度余裕があることが示唆される。

これらの結果より、銅板製消化タンク1号機は安定的に消化性能を十分発揮していると判断される。また、設備が安定している状態においては、消化タ

ンク投入汚泥量と、生/余剰汚泥固形物比より求められるバイオガス発生量原単位で、バイオガス発生量がある程度予想可能であることが示唆される。

2.3 性能評価②（その他諸性能）

図4 に銅板製消化タンク1号機の諸性能検証データを示す。

攪拌動力は消化タンク内濃度（粘性）に影響を受けるため汚泥濃度が高いほど上昇するが、攪拌機設計条件（当社で設定した低動力の指標として、バイオガス発生量・消化率が従来同等、かつ、単位容積当たりの攪拌動力密度1 W/m³）を満足している（図4 (a)）。

本機では、試験片を設けて消化タンク内に曝すことで防食塗装の劣化を定量的に評価している。防食塗装試験片の膜厚測定結果（図4 (b)）より膜厚の経年減少が見られるものの、消化タンク本体の標準耐用年数として定めた20年間（消化タンク内部補修を行う場合、35年以上の運用も可能とする）に対して膜厚を十分確保できるものと判断される。

消化タンク内底部における堆積高さは運用開始初期から増加していない（図4 (c)）。また、有効容量も十分確保されており、消化性能に悪影響は見られないことから健全な状態を維持している。

消化タンク本体の板厚は防食塗装を施しているため、素材時の厚さから有意な減少は見られない（図4 (d)）。経年劣化に関しては、サンプル数が少なく現時点における経過評価となるが、大きな改修なく標準耐用年数を満足するものと判断できる。

「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技

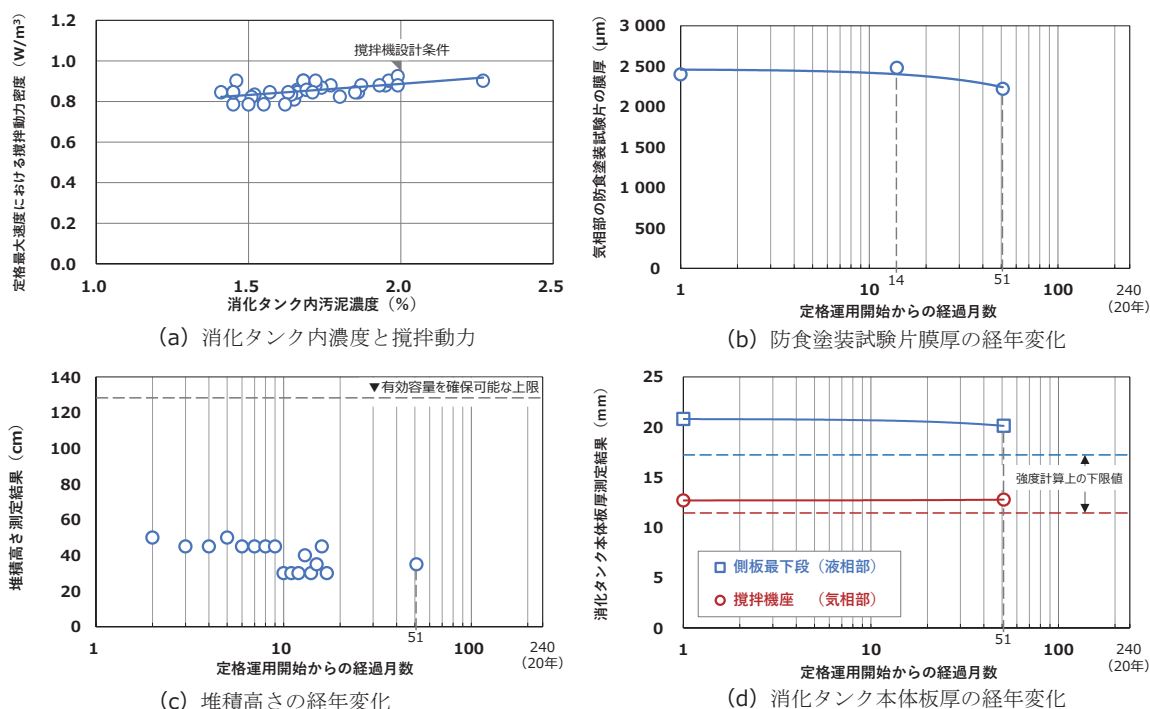


図4 鋼板製消化タンク1号機の諸性能検証データ

術」²⁾では消化タンクの性能指標として「分解有機物量あたり消費電力280 kWh/t-分解 VS」とあるが、表2に示すとおり、本設備の実績における消費電力は約120 kWh/t-分解 VS と、性能指標を十分に満足する、エネルギー効率に非常に優れた技術と言える。

2.4 後段設備への影響

消化プロセスを経た汚泥は脱水性が悪化すると一般に知られるが、本設備については場内発生汚泥の4分の1程度を処理するに留まるため、後段の脱水・焼却設備へ支障をきたす悪影響は見られないと運営管理事業者より聞いている。

2.5 課題

バイオガス発生量および消化率など消化性能に問題は無いものの、消化タンク内液面にスカムが生じている。発生したスカムは、運転管理で対応（鋼板製消化タンク本体に設置されたスカム排出ノズルよ

り排出）している。そのため、運転継続に大きな支障はないが、より容易な管理に向け、スカム発生要因の調査および抑制に取り組んでいる。

むすび

消化は下水汚泥エネルギー利用の核となり得る汚泥処理プロセスであり、カーボンニュートラルな下水処理を実現する上で今後ますます重要性が上がって行くものと予想される。鋼板製消化タンクは消化プロセスの導入ハードルを下げる設備・技術であり、当社製品のみならず、ひとつのジャンルとして市場を醸成しつつある。今回得られた知見を踏まえ、鋼板製消化タンク技術の発展・拡大に向け更なる鋭意努力を行う所存である。

最後に、矢作川浄化センターの運転データをご提供頂いた愛知県様に深く感謝致します。また、本調査の一部は、地方共同法人 日本下水道事業団の調査の一環として実施しています。

【参考文献】

- 1) 特許第5412598号
- 2) 国水事第38号
- 3) 川嶋淳, 三浦雅彦, 榎本修一, 「鋼板製消化タンクによる下水汚泥エネルギー化」神鋼環境ソリューション技報, Vol 10 No.2 (2014/2)
- 4) 中嶋雄大, 小久江仁志, 「矢作川浄化センターにおける鋼板製消化槽の運転状況」神鋼環境ソリューション技報, Vol 14 No.1 (2017/9)
- 5) 日本下水道協会 下水道施設計画・設計指針と解説 後編 2019年版 pp.482, 498
- 6) 野池達也編著「メタン発酵」技報堂出版 (2009)

表2 分解有機物量あたりの消費電力試算

2019年度消化設備の運転実績より年間分解有機物量 1 600 t-分解 VS/年

機器名称	①	②	③	④	⑤
	運転 台数	電動機 出力 kW	稼動時間 (想定) h/年	負荷率 (実測値)	電力量 ①×②×③×④ kWh/年
鋼板製消化タンク	1	—	—	—	—
消化タンク撹拌機	1	7.5	8 760	0.60	39 420
汚泥循環ポンプ	1	11	8 760	0.78	75 161
温水循環ポンプ	1	5.5	8 760	0.78	37 580
熱交換器	1	—	—	—	—
消化汚泥貯留槽撹拌機	2	5.5	8 760	0.42	40 471
消化汚泥移送ポンプ	1	3.7	0(非常用)	—	—

計 192 632kWh/年

↓
分解有機物量あたりの消費電力試算値 120 kWh/t-分解 VS < 性能指標値 280

SD（金属ナトリウム分散体）を用いた PTFE の表面改質技術

Surface modification of Polytetrafluoroethylene (PTFE) with sodium dispersion



片山裕美子*
Yumiko Katayama



村上吉明*
Yoshiaki Murakami



坪内 源*
Gen Tsubouchi

金属ナトリウム分散体（SD）は微粒化した金属ナトリウムを油中に分散させたスラリー状の流体であり、これまで当社ではポリ塩化ビフェニル（PCBs）を処理するための薬剤として用いてきた。SD を PTFE の表面改質に用いると有機化合物の中で最も強い結合である C-F 結合を親水化することが可能である。この性質を利用し、化学的に安定で加工に制約のあるポリテトラフルオロエチレン（PTFE）の表面改質への適用を検討した。この方法は従来の方法に比べて改質後の表面状態を平滑に保つことができるうえ、作業者の健康保持の観点からも優れている。さらには表面改質後の PTFE に銅めっきを付けることで高速通信分野において注目されている PTFE 基板を製造することができるを見出した。

Sodium dispersion (SD), a slurry-like fluid in which particulate metallic sodium is dispersed in oil, is often used as a chemical for treating polychlorinated biphenyls (PCBs). The use of SD makes it possible to hydrophilize the C-F bond, which is the strongest bond among organic compounds. Taking advantage of this property, we investigated the application of polytetrafluoroethylene (PTFE), which is chemically stable and restricts processing and surface modification. This method can keep the surface condition smoother than the conventional method and is excellent in terms of maintaining the health of the worker. Furthermore, by attaching copper plating to the surface-modified PTFE, it is possible to manufacture PTFE printed circuit boards, which are gaining attention in the field of high-speed communications.

Key Words :

金属ナトリウム分散体	Sodium dispersion (SD)
ポリテトラフルオロエチレン	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
表面改質	Surface modification
プリント基板	Printed circuit board (PCB)
伝送損失	Transmission loss (TL)

【セールスポイント】

- ・ SD を用いると、PTFE の平滑性を維持しながら最表面を親水化可能。
- ・ 表面改質した PTFE に銅めっきを行うことで電気回路を形成できる。
- ・ 誘電特性に優れる PTFE を用いたプリント基板を製造可能。

*技術開発センター 新技術インキュベーション部

まえがき

近年のデジタルトランスフォーメーション（DX）社会の広がりにより、情報通信量が急速に増加している¹⁾。より多くの情報を短時間で伝達する、すなわち情報通信速度を増加させるには、高周波信号を用いる必要がある²⁾。特に、近年実用化が進みつつある第5世代移動通信システム（5G）やミリ波レーダーにおいては、24 GHz以上の高周波信号が用いられる³⁾。しかし、特に高周波領域においては、基板材料と交流電流との相互作用によって電気信号が減衰してしまう。電気信号が減衰する割合は基板材料の材質や表面粗さによって定まり、より高性能な材料が求められてきた。高性能な基板材料として、ポリテトラフルオロエチレン（以下、PTFE）が特に注目されている⁴⁾。

当社はこれまでに中間貯蔵・環境安全事業株式会社や中国電力株式会社絶縁油リサイクルセンター向けにPCBs処理技術を提供してきた。当社が保有するPCBsの脱塩素化技術（SPプロセス）は、PCBsを金属ナトリウム分散体（Sodium Dispersion：SD）及びプロトン供与体と反応させることで、無害なビフェニル類に変化させる⁵⁾。

SDは10 μm 程度まで微粒化させた金属ナトリウムを油中に分散させたもので、写真1のようなスラリー状の物質である。金属ナトリウムと比較して安全性、反応性、操作性に優れるというメリットを有する⁶⁾。

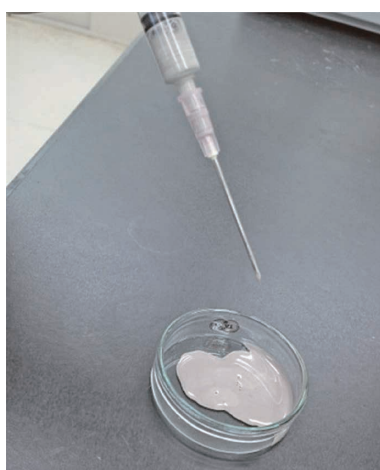


写真1 SDの外観

当社はこれまでPCBs処理用途に用いてきたSDの新たな用途検討を通じて、PTFE表面を改質した上でさらに銅めっきを可能とする方法を見出した。以下では当社のPTFEへの表面改質技術について報告する。

1. 高周波回路材料について

高速通信においては短時間でより多くの情報伝達が求められるが、情報量を増加させるためには信号の周波数を高める必要がある。しかし、周波数を高めると信号は減衰しやすくなる。信号の減衰は基板材料である絶縁体と導体の双方によって引き起こされる。

1.1 信号減衰のメカニズム⁴⁾

一般的な電気回路は銅張積層板から製造される。銅張積層板は絶縁体で作られる基板材料の両面に電解銅箔を熱圧着することにより製造されている⁷⁾。基板材料と電解銅箔との密着性を高めるため、銅箔の表面は小さな凹凸を持っている⁸⁾。回路上における電気信号は以下の2つの要素によって減衰する。

(1) 絶縁体による損失

電気信号の減衰のうち、誘電損失の寄与は以下の式によって与えられる。

$$(\text{減衰}) \propto (\text{周波数}) \times (\text{誘電正接}) \times (\text{比誘電率})^{1/2}$$

つまり、高周波信号を遠方まで伝達するには、比誘電率や誘電正接の小さな素材が求められる。図1に主要な基板材料の比誘電率と誘電正接を示す。フッ素樹脂は比誘電率と誘電正接が小さいため、近年高周波基板材料として注目されている。中でもPTFEは比誘電率、誘電正接などの物性値が固体としては最も小さい値を示す⁴⁾。

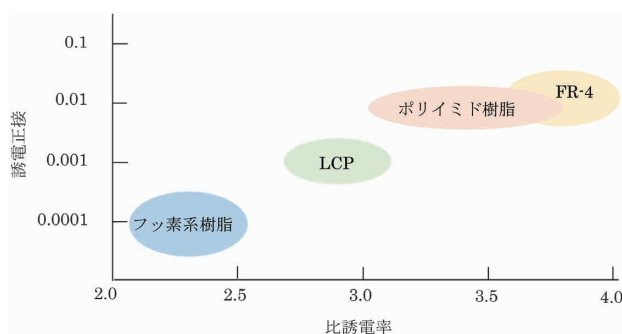


図1 プリント基板材料の誘電特性⁹⁾

(2) 導体による損失

導線に交流電流を流すと、導線表面付近の電流密度が増加する。これは表皮効果と呼ばれ、周波数が高くなるほど顕著になる。例えば、銅線に異なる周波数の電流を流すと、図2に示す通り周波数の増加に従って表皮厚みが低下する¹⁰⁾。電流は表皮厚みの領域に集中して流れるため、銅線のうち導体領域として利用できる範囲が狭くなり電気抵抗の増加につながる。また、導体表面に小さな凹凸があると特に高周波において信号が減衰してしまうことが明らかになっている（散乱損失¹¹⁾）。

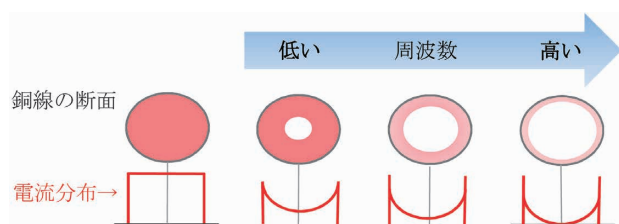


図2 表皮効果

上記の通り、高周波信号は非常に減衰しやすいため、比誘電率、誘電正接が小さな材料であることに加え平滑な導体表面を持つことが求められている。

1.2 PTFE 製銅張積層板の製造方法

既存の PTFE 製銅張積層板の製造方法を以下に示す。PTFE ディスパーションの中にガラスクロスを通した後、焼成乾燥炉で焼き付けを行うことで PTFE が含浸したガラスクロスを製造する¹²⁾。さらに PTFE 含浸ガラスクロスに電解銅箔を熱圧着することにより、PTFE 製の銅張積層板が製造されている。銅張積層板の母材はガラスクロスを含む複合材料であるため、比誘電率や誘電正接は PTFE 以外の素材に大きく影響を受ける。更に接着性が乏しい PTFE に電解銅箔を熱圧着によって接合させるため、散乱損失による減衰も大きくなる。そのため、PTFE 製銅張積層板は優れた物性値を有するものの、高周波特性の観点ではその特性を十分には活かしきれていない。

2. PTFE 表面改質技術

当社は SD の新規用途開拓に向けた実験中に、SD が PTFE を速やかに変色させる条件を偶然発見した。変色した PTFE は表面がザラザラしており、水への濡れ性も向上していたことからメカニズムを検討した結果、当社の表面改質により PTFE 表面の官能基を高い自由度で変換できることが明らかになった（以下、SD 法）。

2.1 PTFE の化学構造

元々 PTFE は図3に示すように C-C の単結合でつながった炭素原子にそれぞれ2つのフッ素原子が結合した構造を繰り返すポリマーである。

2.2 既存の PTFE 表面改質技術との比較

PTFE 表面改質技術には主に (1) 金属ナトリウムを用いる方法、及び (2) プラズマを用いる方法、の2種類が知られている。

2.2.1 金属ナトリウムを用いる方法

金属ナトリウムを用いる PTFE 表面改質技術には、液体アンモニア中に金属ナトリウムを溶解させる方法（アンモニア法）およびナフタレンを溶解させたエーテル溶媒中に金属ナトリウムを溶解させる方法

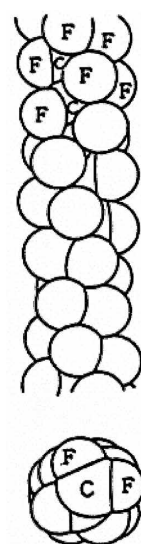


図3 ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)¹³⁾

（ナフタレン法）が存在する。金属ナトリウムが溶解すると溶液が変色する。変色した溶液に PTFE を浸漬させると、PTFE 表面のフッ素原子をフッ化ナトリウムとして取り除くことができる。金属ナトリウムを用いて表面改質された PTFE は改質した面に粘着剤などを塗布することによって“貼れる PTFE”として PTFE の摺動性や電気絶縁性などが求められる用途に用いられている。

(1) アンモニア法

液体アンモニア中に金属ナトリウムを溶解させると青紫色に変色する。液体アンモニア中では電子を放出したナトリウムイオンと放出された電子とがそれぞれアンモニアに取り囲まれて安定化される。この溶液の中に PTFE を浸漬するとフッ素が除去され、Na-C 結合が生成する。さらに液体アンモニアがプロトンを放出することにより PTFE 表面はプロトン化され、アンモニアはナトリウムアミドに変化する。



PTFE 表面のナトリウムがプロトンに置き換わると PTFE 表面の炭素原子は電氣的に中和される。すると電子はより深い場所にも入り込むことが可能になり、更に深い場所のフッ素原子も除去されていく。フッ素原子はより原子サイズの小さなプロトンに置換されるため、PTFE 表面は写真2に示すような多孔質状になる。

ただし、アンモニアは沸点が -33°C と非常に低く、利用には冷凍装置が必要である。更に悪臭物質であることに加え、高圧ガス、劇物にも該当する。そのため、利用に際してのハード面、ソフト面のハードルが高い。また、アンモニア法で処理した PTFE には銅めっきを密着させることが困難である。

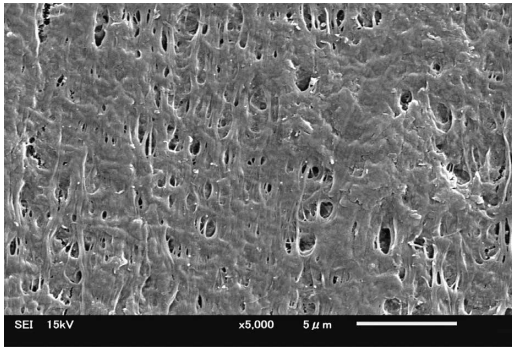


写真2 アンモニア法で表面改質した PTFE の SEM 画像 (5 000倍)

(2) ナフタレン法

ナトリウムはナフタレン (Nap) と反応してナトリウムナフタレニド (NaNap) を形成する¹⁴⁾。



ナトリウムナフタレニドは、ナトリウムから電子を PTFE に渡すことにより PTFE からフッ素原子を引き抜いていく。ナフタレン法で表面改質した PTFE を顕微鏡で観察すると、アンモニア法と同様に表面に凹凸が観察される。ナトリウムナフタレニドを用いた PTFE の表面改質剤はいくつか商品化されているが、ナトリウムナフタレニドにより改質した PTFE への銅めっきの密着強度は低い。さらに、アンモニア法と同様に表面が荒れた状態になる。

2.2.2 プラズマを用いる方法

酸素やアルゴンなどに高周波電圧を印可してプラズマ化し PTFE 表面のフッ素原子を除去する方法である。プラズマ処理とグラフト重合(親水膜の形成)の組み合わせ技術¹⁵⁾、あるいは熱アシストプラズマ¹⁶⁾によって PTFE 表面へのめっきが可能であることが示されている。PTFE 基板のスルーホールにめっきを行うための前処理として実用化されているが、プラズマ処理からめっき処理までを30分以内に行う必要があるなど課題が残っている。

2.2.3 SD 法による PTFE 表面改質

SD による PTFE 表面の官能基化については、以下のように考えている。SD 法では1つの炭素原子に対して1つのナトリウム原子が結合した中間体となる。この中間体ではナトリウム原子が正に帯電し、炭素原子が負に帯電している。ここに電子親和性の高い求電子剤と呼ばれる反応剤を加えれば、PTFE を官能基化することができる。例えば求電子剤に水を用いれば、正に帯電している水の 수소原子 (以下、プロトン) が負に帯電している PTFE 表面の炭素原子に近づき、PTFE 表面上のナトリウム原子がプロトンと置き換わる。

SD 法による PTFE 表面改質では、PTFE 表面のフッ素を選択的に親水化が可能であることを観測している。また、表面改質後の PTFE は写真3に示す通り物理的に粗化されない。表面粗度は改質前と同等以下であり (表1)、従来の金属ナトリウムを用いた方法と比較しても凹凸が少ない。反応条件も常温常圧である上に発がん性物質や劇物等の使用も不要であるというメリットを有する。

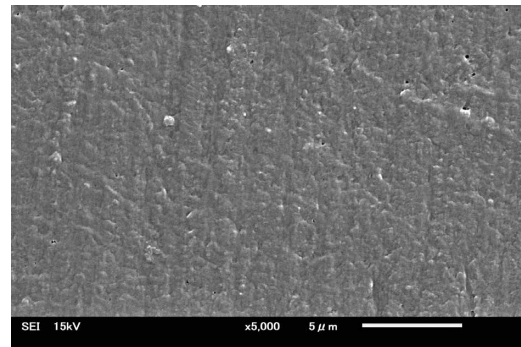


写真3 SD 法で表面改質した PTFE の SEM 画像 (5 000倍)

表1 表面粗度

	ブランク	改質済
Ra (μm)	0.88	0.13

表2に表面改質した PTFE の物性値を示す。SD 法により表面改質した PTFE の比誘電率と誘電正接はブランク状態の PTFE に近い値を示した。

表2 10 GHz における誘電特性

	厚さ (mm)	比誘電率	誘電正接
ブランク	0.1	1.93	0.00020
	0.4	1.92	0.00017
	1.0	1.88	0.00014
改質済	0.1	1.98	0.00034
	0.4	1.92	0.00022
	1.0	1.91	0.00016

3. 表面改質後の PTFE への銅めっき

SD 法の応用先として、PTFE への銅めっきによる高周波回路分野への応用を検討した。PTFE への直接めっきが可能になれば、誘電損失や導体損失の観点において、従来の PTFE 基板よりも優れた高周波特性を有することが期待される。

(1) PTFE 平面への銅めっき

表面改質した厚さ0.1 mm の PTFE フィルムに無電解銅めっき並びに電解銅めっきを行った。電解銅めっきの厚みは25 μm とした。銅をめっきした PTFE の外観を写真4に示す。



写真4 銅めっき後の PTFE

密着強度の測定は、JIS C 6471に準拠して実施した。ピール強度は目標値として設定した1 N/mmを満たしており、PTFE のフィルムに直接銅をめっきできるため、PTFE フィルムを母材にしたフレキシブル基板等多くの用途展開が期待できる。ただし、ピール強度の安定性は本技術の実用化において必須であり、引き続き向上させる必要がある。SD 法で改質した PTFE フィルムに無電解銅めっきを行い、エッチングによって電磁波シールドのパターンを形成したものを写真5に示す。

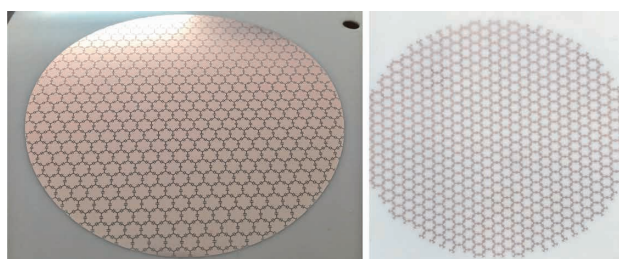


写真5 電磁波シールド回路

(2) スルーホールへの加工性検討

厚さ1.0 mm の PTFE にφ0.3 mm の孔を開けたものを試料としてSD 法による表面改質を行った上で無電解銅めっきと電解銅めっきを行った。めっき厚みは25 μm とした。写真6に電解めっき後のスルーホールの断面を示す。スルーホール断面も綺麗にめっきできており、平面のみならずスルーホールへのめっきも可能である。また、スルーホールにおけるスローイングパワー（均一電着性）、すなわち（スルーホールの銅の厚み）÷（平面部の銅の厚み）は0.8となった。スローイングパワーはプリント基板全体を有効に利用する上で重要なパラメーターであり、SD 法によって改質した PTFE から回路を製作すれば、優れたスローイングパワーを有する回路になることが期待できる。

また、SD 法を用いると図4示すような方法でプリント基板を製造することが可能になる。すなわち、任意の厚みの PTFE に予めスルーホールに相当する

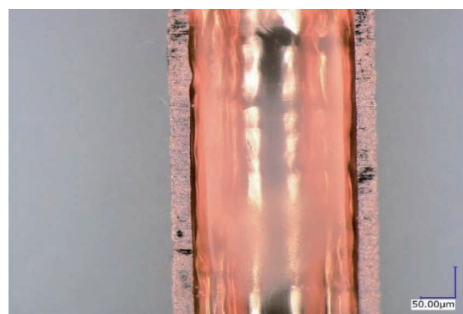


写真6 スルーホール断面

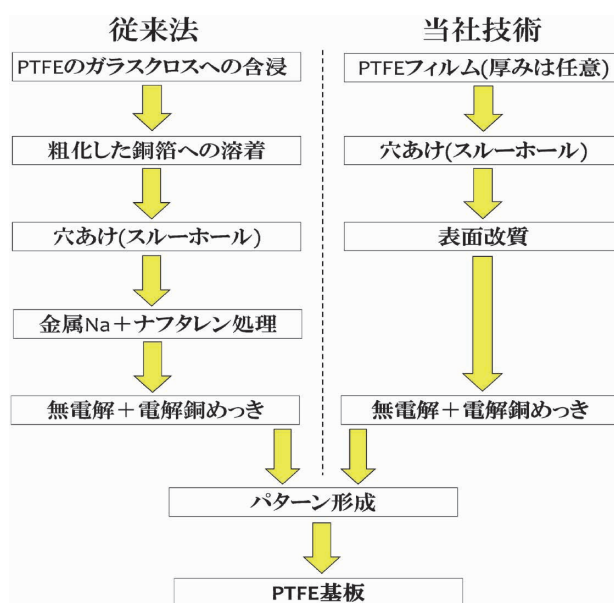


図4 PTFE フィルムからの PTFE 基板製造方法のイメージ

穴をあけておいた上で表面改質と銅めっきを行う。すると、スローイングパワーに優れあらかじめ目的の位置にスルーホールを持つ銅張積層板となりうる。この方法はフレキシブル基板製造におけるセミアディティブ法と呼ばれる方法と親和性が非常に高いと考えられる。前述した不要な銅を取り除いていく方法はサブトラクティブ法と呼ばれ、通常のプリント基板製造では最も一般的に用いられている技術である。一方、セミアディティブ法とは、基板上にシード層と呼ばれる薄い銅箔の層を形成しておき、回路として必要な箇所のみ電解めっきを行った後

に不要な銅を取り除く方法である¹⁷⁾。セミアディティブ法は除去する金属層が薄く、エッチングに伴う銅線の断面形状に与える影響が小さい。そのため、セミアディティブ法は微細なパターンの形成に用いられる手法である。すなわち、PTFEに電解銅めっきまで行った上で不要な箇所を除去していけばサブトラクティブ法による基板製造となり、無電解銅めっきまで行ったPTFEフィルムを基板材料として用いればセミアディティブ法と同様の方法によって回路形成が可能になる。

むすび

本技術はまだ開発途上であり、銅めっきのピール強度をはじめ解決すべき課題は多いが、世の中のニーズにもマッチしているうえ、PTFE表面のフッ素樹脂表面のフッ素原子を種々の官能基に置換することが可能な有望な技術である。引続き、実用化に向けて更なる技術開発を行っていく所存である。

謝辞

最後に、本研究で多くの助言をいただきました岡山大学大学院自然科学研究科高井和彦特命教授および理化学研究所の浅子壮美上級研究員、並びにご協力いただきました関係者各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 令和3年 情報通信白書 第1部 第2節
- 2) 令和2年 情報通信白書 第1部 第1節
- 3) 3GPP, 38101-2-h40 (Release17), (2022), p21
- 4) 技術情報協会：高周波対応部材の開発動向と5G, ミリ波レーダーへの応用 (2019), p.87, 214, 241-242
- 5) 川井ら：神鋼パンテック技報, Vol.41 (2), (1998) p90-97
- 6) 村上ら：神鋼環境ソリューション技報, Vol.16, No1 (2019), p2-8
- 7) 石田 薫：工業材料, Vol.69, No5 (2021), p48-52
- 8) 間瀬一夫：サーキットテクノロジー, Vol.8, No.3 (1993), p234-242
- 9) 日系エレクトロニクス 2017年8月号
- 10) 霜田光一：物理教育, Vol.61, No1 (2013), p18-20
- 11) 小栗ら：プリント基板上高速信号伝送における信号損失要因, 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 (2015), 16P1-17, 2015年3月16日
- 12) JFIA 日本フッ素樹脂工業会：フッ素樹脂ハンドブック改訂13版 (2014) p61-62
- 13) 里川孝臣 (編)：ふっ素樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1991), p34
- 14) Kiryong Ha et al.:J.Adhsion, Adhesion to Sodium Naphthalenide Treated Fluoropolymers Part I-Analytical Methodology Vol.33 (1991), p169-184
- 15) 大久保雅章：日本接着学会誌, Vol.46, No3 (2010), 116-121
- 16) 大久保雄司ら：エレクトロニクス実装学会誌, Vol.19, No.2 (2016), p127-131
- 17) 田嶋和貴：表面技術, Vol.65, No.8, (2014), 357-362

廃棄物処理施設の運転管理における拡張現実 (AR) 技術の活用事例と課題

Applications of Augmented Reality (AR) technologies in operating municipal waste treatment plants



木下 明****
Akira Kinoshita



倉本直哉****
Naoya Kuramoto



上古閑久欣****
Hisayoshi Kamikoga



富濱宗三*
Munemitsu Tomihama



新名達輝*
Tatsuki Shinna



石川 渚**
Nagisa Ishikawa



山村祐介***
Yusuke Yamamura

廃棄物処理施設2施設において効率的な技術伝承および現場作業負荷低減を目的としてAR (Augmented Reality) デバイスを試験的に導入した結果、実操業における利点と課題を見出した。音声や Teams による遠隔支援、ベテラン技術者による作業動画、P&ID や機器図などの資料をハンズフリーの状態を確認しながら現場作業を可能とする一方、AR デバイス過熱による動作停止、足音や機械音などの定期的なノイズによる音声誤認識などの技術的課題がある事が分かった。冷却機構やノイズキャンセラーをデバイスに付与しても課題解消には至らなかったが、稼働時間を延長させ誤作動頻度を低減することができた。

Augmented reality (AR) devices that allow for communication between operators in separate places were experimentally introduced in municipal waste treatment plants to effectively transfer technical knowledge from experts to non-experts and reduce the workload of the operators. The experiments showed that the hands-free devices enabled the uploading and downloading of movies and photographs that the operators had recorded. The AR devices also displayed documents such as P&IDs and equipment drawings on their holographic lenses, thereby reducing the workload of the operator. However, the results showed that the devices sometimes malfunctioned due to overheating and the effects of periodic noise such as footsteps. Cooling and noise-insulating devices were installed to solve these problems, which resulted in extending the uptime and reducing the frequency of malfunctions.

Key Words :

A R 技 術
技 術 伝 承
作 業 負 荷 低 減

Augmented reality (AR) technologies
Technology transfer
Workload reduction

【セールスポイント】

- ・作業標準動画を確認しながら現場作業が可能
- ・リアルタイム動画を用いて遠隔地間での情報交換が可能
- ・危険区域の表示により安全性が向上
- ・共有画面上で遠隔から描画指示が可能

*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント技術本部 メンテナンス統括部 **経営企画部 DX推進室

SKM 廃棄物処理本部 3A 統括部操業技術室 *環境エンジニアリング事業本部 環境プラント技術本部 技術企画部 コストダウン推進室

*****環境エンジニアリング事業本部 環境プラント技術本部 技術企画部 開発室

まえがき

廃棄物処理施設では、メンテナンス業務におけるベテラン技術者の高齢化が進んでいるため、効率的なノウハウの伝承が喫緊の課題となっている。当社はAR（Augmented Reality）技術を導入し、ベテラン技術者による遠隔支援だけでなく、現場作業の映像を記録しQRコードとして作業現場に表示するアプリケーションを開発した。当技術によってメンテナンス業務の技術伝承の効率化と共に、ベテラン技術者の負担軽減や要員配置の最適化を実現し、ライフサイクルコスト（LCC）を低減することが期待できる。本稿では、当社にて導入したARデバイスの活用事例および今後の課題について紹介する。

1. システム概要

AR技術を活用した、現場作業映像記録および検索システムを図1に示す。画像撮影・通信機能を備えたARデバイスを装着したプラント運転員を現場に配置し、インターネットを経由して中央制御室や遠隔地のパソコンと通信を行い、双方向の通話や現場映像を共有する。ハンズフリーで撮影・録画したデータはクラウドへ自動アップロードし、QRコードを自動作成する。このQRコードを現場に設置することで、別の運転員が現場で読み取り録画データを参照することができる。



図1 現場作業映像記録および検索システム

当社にて選定したARデバイス2機種の外観を写真1と写真2、仕様や機能などの選定基準を表1に示す。



写真1 デバイスAの外観



写真2 デバイスBの外観

表1 デバイスAとデバイスBの仕様比較

項目	要求仕様	デバイスA	デバイスB
仕様	使用温度： -6～45℃ 使用湿度： 80％以下 防塵・生活防水	使用温度： -20～50℃ 使用湿度： - IP66(防塵防水)	使用温度： 10～27℃ 使用湿度： 8～90％ IP50(防塵)
デバイスの機能	リモートアシスト	Teamsによる音声指示	Teamsでの通話画面共有 空間アンカー
	作業視点の撮影・録画	対応	対応
	ファイル表示	対応	対応
装着性	ヘルメット・防塵マスクとの干渉が無いこと	干渉無し	干渉無し

2. 活用事例

2.1 デバイスA

日常循環点検や定常作業を行う作業員がデバイスAをヘルメットに装着し、中央制御室のPCとの通信を行った。デバイスAは軽量であったため、通常のヘルメットに装着しても違和感がなかった。また、ガス化炉内での作業の際、保護メガネの着用が義務づけられているが、デバイスAは保護メガネと干渉することなく装着できた。

2.2 デバイスB

デバイスB向けに下記機能を備えたアプリを開発し、当社の廃棄物処理施設であるH施設およびK施設にてARデバイスの実証試験および初期導入を行った。

- ・映像/画像の撮影とクラウドへの自動的なアップロード機能
- ・QRコードの自動作成と読み取りによる現場からのファイル参照

初期導入においては、まずデバイスBを装着したベテランのプラント運転員が点検・清掃業務を行い、その作業内容を動画にて記録した。次に、点検・清掃業務の経験が浅いプラント運転員がデバイスBを装着し、ベテラン運転員の作業動画を確認しながら点検・清掃業務を実施した。この時、運転員視点での作業風景は、デバイスBを通じて離れた場所に配置したパソコンのモニタに表示され、遠隔地にてプラント運転員視点での作業内容をリアルタイムで目視できることを確認した。点検・清掃業務の経験が浅いプラント運転員によるテスト作業時、標準と異なる内容の作業を行う場面が複数回確認されたが、遠隔地からの音声指示によって標準でない作業の実施を回避することができた。また、ベテラン作業員の動画をQRコードとして生成し、点検・清掃業務の経験が浅いプラント運転員が作業時に動画を参照できることを確認した。作業中の装着者がデバイス越しに見ている風景については写真3～写真7を参照のこと。

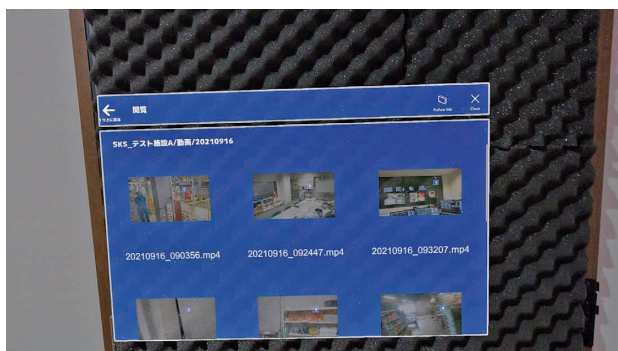


写真3 Sharepoint 上のフォルダ表示

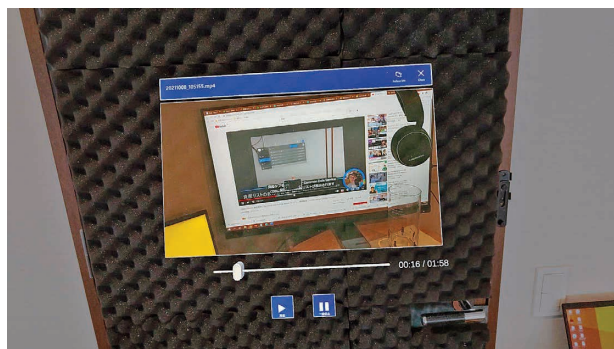


写真4 映像再生

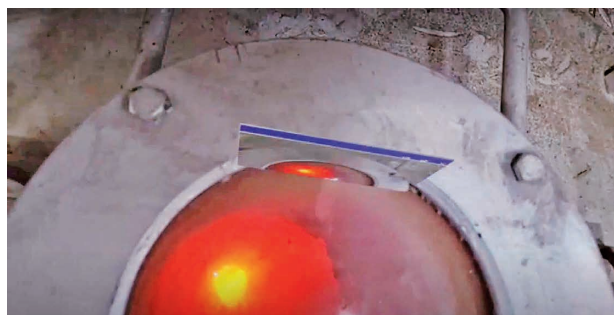


写真5 画像の撮影



写真6 リモートアシスト



写真7 QRコード表示状況

3. 課題

各デバイスとも一長一短があり、利用状況に応じたデバイスの選択が必要となっている。

3.1 デバイスA

デバイスAはバッテリー充電1回あたりの稼働時間が3時間程度と長く、過酷環境での使用が可能となっている一方、ディスプレイが小さく画面が見づらい形状となっている。また、音声への対応がTeamsに限定され、騒音の大きい場における音声の誤認識が生じやすいことが課題である。対策として、マイクにノイズキャンセラーを付属することによってデバイスAの音声誤認識を低減できたが、誤認識を完全に解消することはできなかった。

3.2 デバイスB

デバイスBは大画面のディスプレイを有しており、スムーズな映像表示が可能だった。しかし、高温環境下での作業においては、過熱によってデバイスBが停止した。冷却機構を付属することによってデバイスBの稼働時間を延長できたが、デバイスの重が増加し装着性が悪化した。

む す び

2種類のARデバイスを廃棄物処理施設にて試験的に導入することで効率的な技術伝承および作業負荷低減できる目途がついた。Wi-Fiネットワーク整備によりARデバイスだけでなくカメラやセンサー、ロボット等の情報も一元化し活用することで、メンテナンス現場業務を更に高度化(図2)する計画である。また、AR技術の本格導入後において、省力化や要員配置の最適化およびライフサイクルコスト(LCC)の低減を継続して評価する計画である。

当社のデジタル化推進の一環としてスタートした「AR技術の活用(本著)」について、ご指導・ご鞭撻頂いたPwC(協力会社)の皆様に感謝致します。

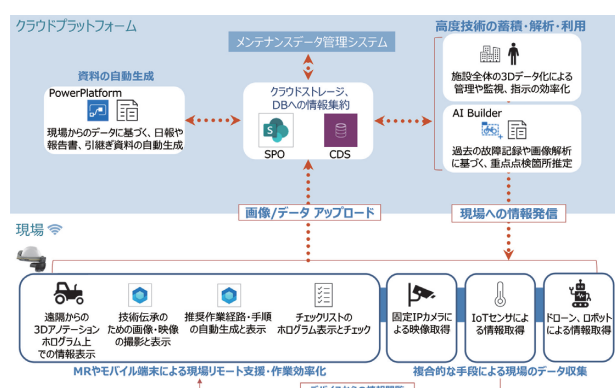


図2 AR本格導入後のシステムのイメージ

「廃棄物処理施設の基幹改良工事」

～施設の長寿命化と CO₂ 削減に貢献～

基幹改良工事では、老朽化した廃棄物処理施設の安定稼働を目的として、主要設備・機器の更新や改良による延命化を図るとともに、CO₂排出量を削減します。施設を適切な管理のもと長期間にわたり使用可能とすることで、廃棄物処理施設の整備に係わるトータルコストの縮減と平準化に寄与し、安定した安心・安全な廃棄物処理の実現に貢献します。

今回の事業は省エネ機器の導入など、施設に最適な改良工事の提案による CO₂ 排出量の削減により、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金ならびに循環型社会形成推進交付金を活用します。また工事は停止中の系列で順次実施することで通常操業に影響なく進めていきます。

今後もこれまで培ってきた計画から設計・建設・運営・維持管理までの一連の基盤技術に最新の技術を導入し、新設工事のみならず高いニーズの基幹改良工事へ最適な提案で応えていくとともに、廃棄物処理関連事業を通じて SDGs 実現に向けて取り組んでいきます。

1. 「中津川市環境センターガス化溶融施設基幹的設備改良工事」 の概要

①工 事 名 称：中津川市環境センター
ガス化溶融施設基幹的設備改良工事

②施 設 竣 工：2004年3月（約18年経過）

③工 期：2021年6月から2025年2月まで

④焼 却 方 式：流動床式ガス化溶融炉

⑤施 設 規 模：98 t/日（49 t/24 h × 2 炉）

⑥本工事の特長：

- ・稼働後約18年経過した同施設の機能回復をさせると同時に、工事後10年間以上の施設延命化を図ります。
- ・プレミアム効率モータ採用、インバータ化等により省電力化を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を 5 % 以上削減することで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用します。



2. 「西条市道前クリーンセンター基幹的設備改良工事」 の概要

①工 事 名 称：西条市道前クリーンセンター
基幹的設備改良工事

②施 設 竣 工：1991年10月（約30年経過）

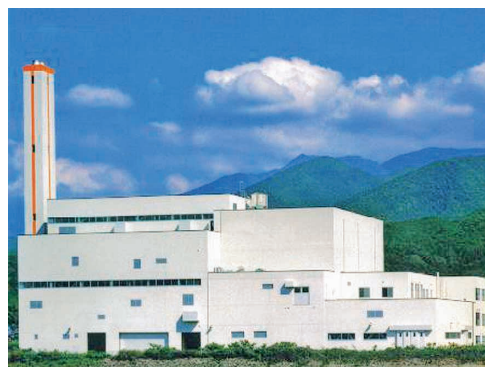
③工 期：2021年6月から2025年3月まで

④焼 却 方 式：流動床式焼却炉

⑤施 設 規 模：焼却施設 200t/日（100 t/24 h × 2 炉）
粗大ごみ処理施設 30 t/5 h

⑥本工事の特長：

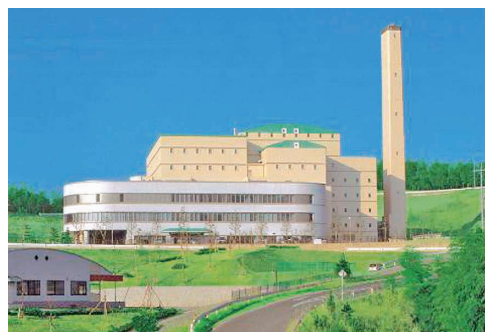
- ・稼働後約30年経過した同施設の機能回復をさせると同時に、工事後10年間以上の施設延命化を図ります。
- ・最新設備の導入、プレミアム効率モータ採用、インバータ化により省電力化を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を 3 % 以上削減することで、環境省の循環型社会形成推進交付金を活用します。



3. 「吉備路クリーンセンター基幹的設備改良工事」の概要

- ①工 事 名 称：吉備路クリーンセンター
基幹的設備改良工事
- ②施 設 竣 工：1997年3月（約25年経過）
- ③工 期：2021年6月から2024年2月まで
- ④施 設 規 模：焼却施設 180 t/日（90 t/24 h × 2 炉）
不燃ごみ処理施設 28 t/5 h
- ⑤焼 却 方 式：流動式焼却炉
- ⑥本工事の特長：

- ・稼働後約25年経過した同施設の機能回復をさせると同時に、工事後15年間以上の施設延命化を図ります。
- ・給じん装置システムの改造により更なる安定燃焼を実現するとともに、プレミアム効率モータ採用、インバータ化等により省電力化を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を 5 % 以上削減することで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用します。



4. 「妙高クリーンセンターごみ焼却施設基幹的設備改良工事」の概要

- ①工 事 名 称：妙高クリーンセンター
基幹的設備改良工事
- ②施 設 竣 工：1996年12月（約25年経過）
- ③工 期：2021年6月から2024年2月まで
- ④焼 却 方 式：流動床式焼却炉
- ⑤施 設 規 模：70 t/日（35 t/16 h × 2 炉）
- ⑥本工事の特長：

- ・稼働後約25年経過した同施設の機能回復をさせると同時に、工事後15年間以上の施設延命化を図ります。
- ・給じんシステム、焼却炉の改造により更なる安定燃焼を実現するとともに、プレミアム効率モータ採用、インバータ化等により省電力化を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を 3 % 以上削減することで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用します。



水電解式水素発生装置「HHOG」を水素ステーションへ納入 ～再エネ由来のCO₂フリー水素を供給～

当社は、再エネ由来のCO₂フリー水素を供給する水電解式水素発生装置「HHOG」を2件の水素ステーションに納入しました。

HHOGは固体高分子電解質膜（PEM）を利用して純水を直接電気分解し、水素ガスをオンサイトで発生させるPEM式の水素発生装置です。当社は、1993年にHHOGを開発・商品化し、これまで電子産業、金属熱処理の工業ガス用途や水素エネルギー用途に200基を超える納入実績を有します。近年、2050年カーボンニュートラルに関連して、再生可能エネルギーを利用して水電解で製造されるCO₂フリー水素が注目されており、当社のHHOGへの期待も大きくなってきております。

当社は、「今を越える発想で、健やかな環境と暮らしを次世代へ」をミッションとする中で、今後も、これまで培ってきた技術力、経験を駆使し、次世代エネルギーとして期待される水素を活用した取り組みを積極的に進め、低炭素化社会の実現に貢献できるよう邁進してまいります。

1. ENEOS 株式会社 横浜旭水素ステーション

この度納入したHHOGは、ステーション内に設置した太陽光パネルで発電した電気と系統から受電した再エネ電力（ENEOS CO₂フリー電力メニュー※）を利用してCO₂フリー水素を製造します。

水素ステーション内に設置した水電解で製造したCO₂フリー水素の供給は商用では国内初となります。

※ ENEOS 株式会社グループ会社のバイオマス発電所由来の再エネ電気（FIT 電気＋トラッキング付き非化石証書）を活用

【概要】

注 文 主：トキコシステムソリューションズ株式会社

納 入 先：ENEOS 株式会社 横浜旭水素ステーション

用 途：燃料電池自動車（FCV）

名 称：水電解式水素発生装置（HHOG）

型 式：SH30D - G II（屋外仕様）

能 力：水素供給量 30 Nm³/h

水素供給圧力 0.82 MPa

水素純度 99.999 %

水素露点 -70℃（大気圧下）

本体寸法：2 200 mm W × 6 500 mm L × 2 500 mm H



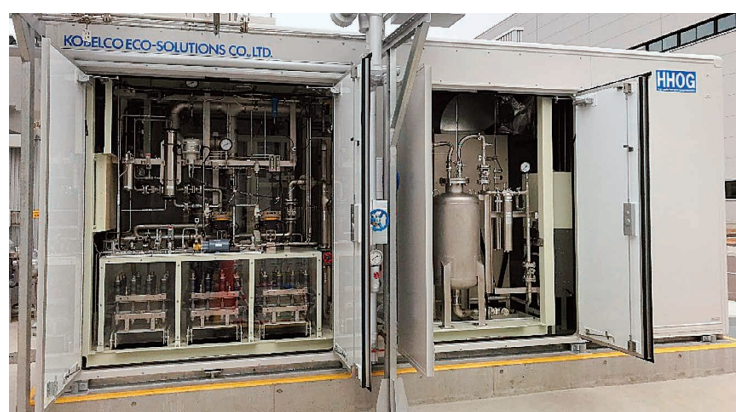
2. トヨタ自動車株式会社大口第2 部品センター 太陽光水電解水素ステーション

この度納入した HHOG は、トヨタ自動車株式会社 大口第2 部品センターの敷地内にある太陽光発電の電力を利用して CO₂フリー水素を製造します。製造された水素は構内の燃料電池フォークリフトに供給されます。この取組みは、愛知県の「低炭素水素認証制度」*の5 件目として2021年3 月に認定されています。

※愛知県が低炭素社会を見据え、水素の製造、輸送、利用に伴う二酸化炭素の排出が少ない水素を「低炭素水素」として認証・情報発信しているもの

【概要】

注 文 主：岩谷産業株式会社
納 入 先：トヨタ自動車株式会社 大口第2 部品センター
用 途：燃料電池フォークリフト（FCFL）
名 称：水電解式水素発生装置（HHOG）
型 式：SH20D - GⅡ（屋外仕様）
能 力：水素供給量 20 Nm³/h
水素供給圧力 0.82 MPa
水素純度 99.999 %
水素露点 -70 ℃（大気圧下）
寸 法：2 300 mm W × 6 000 mm L × 2 800 mm H



ISMIP10 -International Symposium on Mixing in Industrial Processes- にて当社攪拌翼スイングスター® について発表

去る2021年11月29日から12月2日にかけて国際学会 ISMIP10が神戸ポートアイランドの神戸大学先端融合研究環境統合研究拠点コンベンションホールにて開催されました。ISMIP は産業プロセスの攪拌研究に関して3年に1度開催される国際学会です。第10回の今回は1999年の第3回以来の日本開催でしたが、新型コロナウイルス感染拡大の影響で1年延期となり、オンサイトとウェブ上でのオフサイトのハブリッド開催となりました。参加者はウェブ参加も含め100名を超え、4日間に渡って活発な議論が展開されました。当社からは“Mechanical structure and mixing characteristics of SWINGSTIR® reactor”と題して当社攪拌翼スイングスターについて、その特長と構造、また動力特性や混合特性について紹介しました。



発表の様子

○スイングスターの特長と構造

スイングスターは非回転の旋回攪拌方式と回転摺動部の無いフレキシブルシールを採用することで、軸封部からの摺動屑等のコンタミネーションを無くした当社独自の攪拌機です。またフレキシブルシールは従来のメカニカルシール等と比べてシンプルな形状で洗浄性にも優れクロスコンタミの防止にも有効です。

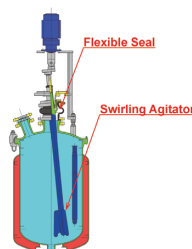
○スイングスターの動力特性、混合特性

スイングスターの攪拌動力は従来の翼回転攪拌と同様の動力式により算出が可能です。翼回転攪拌では翼径を動力算出に用いるのに対し、スイングスターの旋回攪拌では翼径に加え旋回径が重要なパラメータとなります。特に層流域においては各旋回径で動力数をまとめることで、より高い精度で動力推算が可能な結果が得られています。

また混合特性についてはテスト機による混合実験や PIV（Particle Image Velocimetry、粒子画像流速測定法）を用いた流速測定、CFD（Computational Fluid Dynamics、数値流体力学）解析により、翼径と旋回径に最適なバランスがあることを示しました。

○スイングスターの今後

スイングスターは独自の巡回攪拌方式によりコンタミネーション抑制と攪拌との両立が問題となる医薬分野等で採用され、培養分野でも高い効率で培養が可能な結果が得られています。今後もスイングスターを含め、お客様のプロセス開発・改善に役立つ技術開発を進めていきます。



Flexible Seal

Swirling Agitator

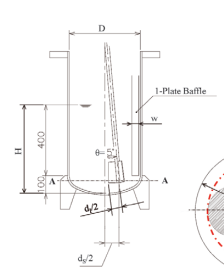
2.1 Features of SWINGSTIR®

Features

- ▶ **No contamination**
SWINGSTIR has no contamination with abrasion particles inevitably brought by mechanical seals.
- ▶ **Easy to clean**
It is easy to clean the flexible seal because its shape is simple and its opening is large.
- ▶ **Excellent agitating performance**
Unique swirling motion produces excellent agitating performance.

→ SWINGSTIR® is used in pharmaceutical field, culture and fermentation.

Keep the Earth Sky-blue
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO., LTD.



3. Experimental Apparatus

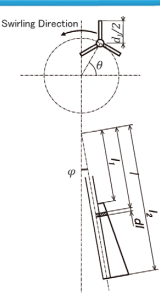
Vessel diameter D [mm]	400
Liquid height H [mm]	500 (1.25D)
Impeller diameter d_i	0.3D - 0.6D
Swirling diameter d_s	0.3D - 0.5D
Swirling angle θ	5°
Baffle width w [mm]	40 (0.1D)

Projected Area of Impeller tip

Maximum projected diameter
 $d \equiv d_{max} = d_s + d_i \cos \theta$
→ Representative Diameter d (for Re and N_p)

Cross Section A-A

Keep the Earth Sky-blue
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO., LTD.



Swirling Direction

θ

ϕ

4. Power Characteristics

Power Consumption

$$P = \frac{C_D}{2} \rho (2\pi n)^3 \sin^2 \varphi \cdot d_i(\theta) \cdot \frac{1}{4} (l_2^4 - l_1^4)$$

$$d_i(\theta) = \alpha(\theta) \cdot d, \quad l_1 = \beta_1 d, \quad l_2 = \beta_2 d$$

$$P = \left\{ \frac{C_D}{2} (2\pi)^3 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \alpha(\theta) \cdot \frac{1}{4} (\beta_2^4 - \beta_1^4) \right\} \rho n^3 d^5$$

N_p

- Power Consumption P is directly proportional to ρ , n^3 and d^5 .
- P of SWINGSTIR is represented by N_p as well as conventional rotating agitators in theory.

Keep the Earth Sky-blue
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO., LTD.

4. Power Characteristics

$N_p - Re$ Curve

Impeller diameter d_i [mm]	Swirling diameter d_s [mm]		
	120 (0.3D)	160 (0.4D)	200 (0.5D)
120 (0.3D)	●	○	○
160 (0.4D)	●	●	○
200 (0.5D)	●	●	●

$d_s = 0.3D$

$d_s = 0.4D$

$d_s = 0.5D$

Less than 10%

Keep the Earth Sky-blue
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO., LTD.

5. Mixing Characteristics

Impeller diameter d_i [mm]	Swirling diameter d_s [mm]		
	120 (0.3D)	160 (0.4D)	200 (0.5D)
120 (0.3D)	①	②	③
160 (0.4D)	④	⑤	⑥
200 (0.5D)	⑦	⑧	⑨

※ $P_v = 0.05 \text{ kW/m}^3$

② 83rpm
 $n = 11.1 \text{ s}$
 $n_{90} = 15.3$

⑤ 72rpm
 $n_{90} = 10.5 \text{ s}$
 $n_{90} = 12.6$

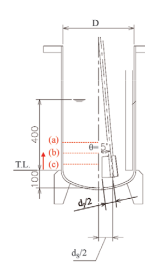
⑧ 55rpm
 $n_{90} = 11.1 \text{ s}$
 $n_{90} = 10.2$

0s, 5s, 7s, 8s, 9s, 11s

• There is an optimum balance between the swirling diameter d_s and the impeller diameter d_i .
• It is confirmed that $d_i = 0.4D$, $d_s = 0.4D$ is the best in these conditions.

Keep the Earth Sky-blue
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO., LTD.

6. Comparison CFD Analysis and Experimental Measurements



Comparison of CFD between analysis and PIV measurements

(a) T.L. + 150mm

(b) T.L. + 100mm

(c) T.L. + 50mm

Good agreement in vertical velocity.

Keep the Earth Sky-blue
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO., LTD.

発表資料

INCHEM TOKYO 2021 プラントショー

2021年11月17日～19日、東京ビッグサイトにて「INCHEM TOKYO 2021」（公益社団法人化学工学会／一般社団法人日本能率協会主催）が開催され、プロセス機器事業部（神戸製鋼所・神鋼 EN & M と一部共同出展）と水素事業推進室が出展を行いました。

コロナ禍での開催ではありましたが、当社ブースには、3日間でプロセス機器事業部に約500名、水素事業推進室に約250名のお客様が来訪されました。

プロセス機器事業部では「Realize the smart factory」のコンセプトの下、最先端のハイブリッドガラスライニング「HYX（ハイクロス）シリーズ」や攪拌式凍結乾燥機「RHEOFREED®（レオフリード）」、次世代高効率バッチ反応機「PI リアクター」、神戸製鋼所・神鋼 EN & M との共同出展「GL 反応機と積層型多流路反応機（SMCR® ※）」との融合の提案など、生産性向上やカーボンニュートラル、SDGs 等の環境負荷低減への貢献を目指した時代に先駆けた新製品、開発品の紹介を行い、多くのお客様から高い評価をいただきました。また既設機器やプロセスの改善に対するお客様から課題やニーズを伺うことができ、今後の製品開発や営業活動の指針となる有効な情報交換ができました。出展者セミナーでは「高機能化ニーズに応えるガラスライニング技術」「攪拌式凍結乾燥機 RHEOFREED®」の2テーマの発表を行い、当社の技術力を PR でき、有意義な展示となりました。

水素事業推進室では本展示会の統一テーマ「DX と低炭素技術が拓くイノベーション」の下、当社の低炭素技術である「高純度水素発生装置 HHOG」の模型を展示しました。来場者の「低炭素技術」への関心が非常に高く、HHOG を多くのお客様へ PR することができ、展示会後も来場した企業より低炭素への取組みに関する引合いを多数いただきました。当社の実績や低炭素社会に向けた現在の取組内容が高く評価され、非常に満足する出展となりました。

※ SMCR® は(株)神戸製鋼所の登録商標です。



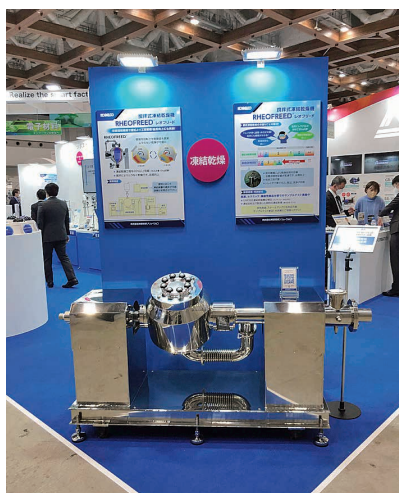
（手前） HYX シリーズ GL サンプル

（奥左から）「ラボスケール機」「オンラインテスト」「マルチリアクター」

TOPICS



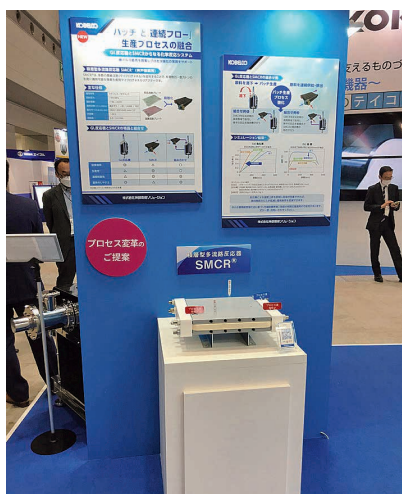
ブース来場者の様子



攪拌式凍結乾燥機「RHEOFREED®」



「マンホールジェット」と
「フェルキャップ」



SMCR® とのプロセス融合の提案



高純度水素発生装置「HHOG」



下水道展 '21大阪に出展

2021年8月17日～20日にインテックス大阪にて、公益社団法人日本下水道協会主催の「下水道展 '21大阪」に神鋼環境メンテナンスと共同でブースを出展しました。

今回の下水道展は同協会による“新型コロナウイルス感染予防対策ガイドライン”に基づいた会場全体の検温・消毒・換気等に加え、出展各社の感染防止に向けた工夫が凝らされたブース展示が行われました。当社ブースでもご来場のお客様に安心してお越しいただけるようアテンド対応者の体調を毎日チェックし、ブース内の人数を管理してソーシャルディスタンスを確保するなど万全を期して製品PR・商談に臨みました。

コロナ禍での開催により下水道展全体の来場者数は例年より少なく約12,000名、うち当社ブースには約400名が来訪されました。

今回は低圧損型メンブレン式超微細気泡散気装置「PABIO TUBE」の実物を用いた散気模型水槽、難脱水対応強化型スクリープレス脱水機や汚泥燃料化技術についてのパネル展示を行いご来訪のお客様に当社注力技術についてご紹介しました。同時に開催された下水道研究発表会では環境配慮型創エネ焼却システムに関する実証研究について発表しました。

当社ブースにお越しのお客様には感染予防対策においてご不便をおかけしましたが、皆様のおかげをもちまして無事に展示会を執り行うことが出来ました。ご協力のほど、誠にありがとうございました。



本 社	〒651-0072 神戸市中央区脇浜町1丁目4-78	☎ (078)232-8018 FAX(078)232-8051
	〒651-0086 神戸市中央区磯上通2丁目2番21号(三宮グランドビル)	☎ (078)232-8018 FAX(078)232-8051
技術研究所	〒651-2241 神戸市西区室谷1丁目1-4	☎ (078)992-6500 FAX(078)997-0550
東京支社	〒141-0033 東京都品川区西品川1丁目1番1号(板橋大橋カテドラル)	☎ (03)5931-3700 FAX(03)5131-5700
大阪支社	〒541-8536 大阪市中央区備後町4丁目1-3(御堂筋三井ビル)	☎ (06)6206-6751 FAX(06)6206-6760
九州支社	〒812-0012 福岡市博多区博多駅中央街1-1(新幹線博多ビル)	☎ (092)474-6565 FAX(092)441-4440
北海道支店	〒060-0004 札幌市中央区北四条西5丁目1-3(日本生命北門館ビル)	☎ (011)241-4647 FAX(011)241-5759
東北支店	〒980-0811 仙台市青葉区一番町1丁目2-25(仙台NSビル)	☎ (022)716-6651 FAX(022)263-2049
名古屋支店	〒451-0045 名古屋市中区名駅2丁目27-8(結晶ファインセントラルタワー)	☎ (052)581-9876 FAX(052)563-2313
北陸支店	〒910-0859 福井県福井市日之出2丁目17-13	☎ (0776)27-7645 FAX(0776)27-0460
播磨製作所	〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島19	☎ (079)436-2500 FAX(079)436-2506
プノンペン事務所	Level 5, OHK Tower, Street 110 and Corner Street 93, Phum 3, Sangkat Srah Chak, Khan Doun Penh, Phnom Penh, Kingdom of Cambodia	☎ +855-23-232-051
ロンドン事務所	Building 3, Chiswick Park, 566 Chiswick High Road, London, W4 5YA, United Kingdom	☎ +44-208-849-5558

神鋼環境ソリューション技報 2021年度 Vol.18 No.2 通巻36号

《本社》株式会社神鋼環境ソリューション 〒651-0072 神戸市中央区脇浜町1丁目4-78

《編集発行》〒651-2241 神戸市西区室谷1丁目1-4 株式会社神鋼環境ソリューション 技術開発センター(神鋼環境ソリューション技報編集委員会事務局)
☎(078) 992-6527 FAX(078) 992-6504 <https://www.kobelco-eco.co.jp>

《編集委員》編集委員長/佐久間英明 委員/細田博之・高橋円・小川正浩・中田哲雄・吉田忠広・荻野行洋・藤田淳・南俊充・須田龍生・松本勝生

《発行》2022年3月16日印刷 2022年3月24日発行 年2回発行《禁無断転載》《発行人》隅晃彦《印刷所》福田印刷工業株式会社

神鋼環境ソリューション