

微生物燃料電池を用いた発電型水処理技術の開発

ENERGY RECOVERY SEWAGE TREATMENT TECHNOLOGY USING MICROBIAL FUEL CELLS

飯田 和輝*・松原 弘和*・井藤 元暢**・麦田 藍***・
吉田 奈央子****・源田 吉則*****・迫田 光弘*****
Kazuki IIDA, Kazuhiro MATSUBARA, Motonobu ITO, Ai MUGITA,
Naoko YOSHIDA, Yoshinori GENDA and Mitsuhiro SAKODA

Microbial fuel cell (MFC) is a technology that is expected to reduce electricity consumption and excess sludge of aeration by recovering electrical energy and removing organic substances in wastewater at the same time.

This water treatment technology is designed to be installed without changing civil engineering structure of existing sewage treatment plants.

This study evaluates the possibility of MFC's introduction to sewage treatment plants by installing MFC in the plant and conducting tests to examine its production of power and performance of organic matter removal.

The study also estimates energy potential when MFC is introduced to sewage treatment plants across Japan.

Keywords : Microbial fuel cell, Energy saving, Energy reuse, Organic substance removal, Reduction of excess sludge, Energy independence

1. はじめに

現在、下水処理場における年間消費電力量は、国内で消費される電力の約 0.7% を占めており、その削減が求められている。一方、下水や下水汚泥等のエネルギーのポテンシャルに期待が高まっており、我が国では下水処理場のエネルギー自立化を目指し、下水道資源を活用したエネルギー生産技術の開発が進められている。

微生物燃料電池（以下、MFC (microbial fuel cell) とする。）は、下水中に存在する有機物の除去と同時に電気エネルギーの回収が可能であり、曝気に係る電気量および余剰汚泥量の低減が期待される技術であるが、MFC を下水処理場に導入した際の下水処理システム全体の評価はほとんどなされていない。

本研究では、下水処理場に MFC を設置し、生産電力や有機物除去性能を評価し、全国の下水処理場の使用状況から MFC の普及展開の可能性を示すとともに、技術の導入効果を試算することにより、導入可能性を検討したものである。

2. 微生物燃料電池（MFC）について

(1) MFC の概要

MFC は汚水中に含まれる有機物を微生物が酸化分解された際に放出される電子を電流として回収する技術である（図-1）。電流生産菌は、有機物を分解した際に生成した電子を電極に渡すことができる微生物であり、自然界や下水処理場などに存在する。MFC は、陰極（アノード）、陽極（カソード）およびイオン交換膜から構成され、アノード側に汚水を含み、微生物が汚水中の有機物酸化ならびに放出した電子のアノードへの電子伝達反応を行う。アノードで回収された電子は、導線を通じてカソードに渡り、酸素などの還元反応に用いられる。

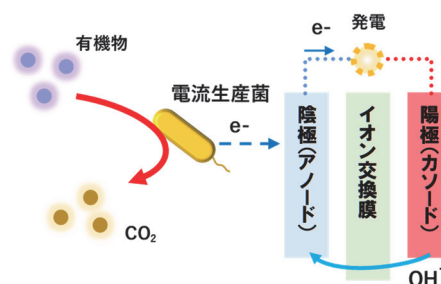


図-1 MFC の概要

* コンサルタント国内事業本部 流域水管理事業部 水工インフラマネジメント部
** コンサルタント国内事業本部 インフラマネジメントセンター
*** コンサルタント国内事業本部 大阪支店 流域水管理部
**** 名古屋工業大学 社会工学科
***** 玉野総合コンサルタント株式会社 統括事業部 上下水道部

(2) 本研究で用いる MFC の特徴

本研究で用いる MFC は、様々な処理槽の形状に合わせて容易に設置できるようユニット化しており、以下のような特徴を有する（図－2）（特許第 6358509 号）。

- 既存の下水処理場へ構造変更なく設置可能
- 既存施設の水位変化に対応できる浮遊構造
- 既存施設の池深さに効率的に対応できるよう深さ方向に連結可能

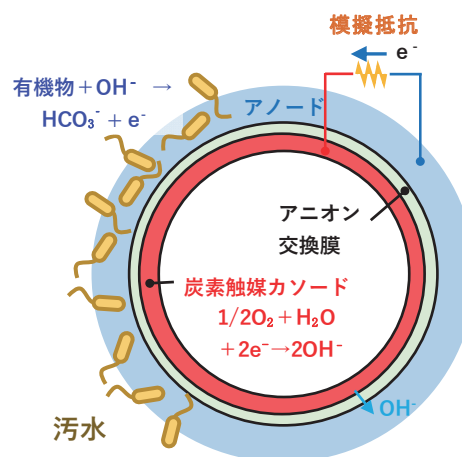
また、装置断面は、円筒形状であり、内側にカソードを配置し、外側にアノードを配置している（図－3）。カソードの内側は空洞となっており、カソードへ酸素供給を行い、カソードでは炭素触媒による酸素還元を行う。

アノード電極とカソード電極を模擬抵抗で接続することにより、アノードからカソードへ電子が移動し、発電する構造となっている。

イオン交換膜は、アニオン交換膜を使用しており、カソード側からアノード側へ、 OH^- を移動する機能を持っている。これまでは、汚水側からプロトン（ H^+ ）が移動するカチオン交換膜が主流であったが、アニオン交換膜を利用することで、汚水側からのイオンの移動がないため、膜の目詰まりが少ないことが考えられ、耐久性が期待できる構造となっている（特許第 6624470 号）。



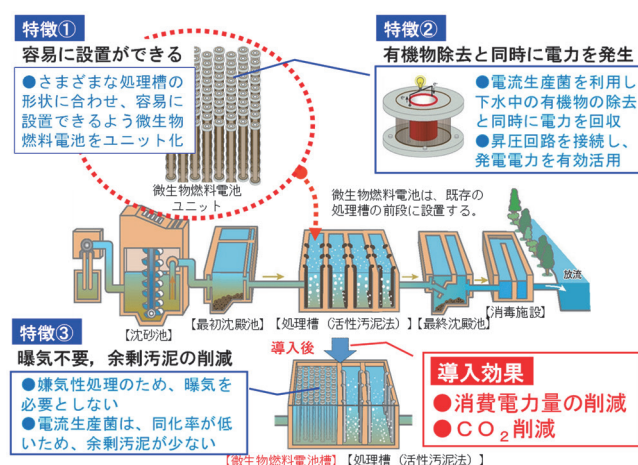
図－2 ユニット化した装置写真



図－3 本研究で用いる MFC の断面図

(3) MFC の導入効果

下水処理場は、最初沈殿池、反応槽、最終沈殿池、消毒施設を経て公共用水域に放流される。MFC は、既存の下水処理場の最初沈殿池流出後の反応槽の前段に設置することを想定しており、さまざまな処理槽の形状に容易に設置できるようユニット化している。また、下水中に存在する有機物の除去と同時に発電することができるため、下水処理場に適用することにより、これまでに利用していない汚水中に含まれる有機物からのエネルギー活用が可能となる。さらに、発電する電流生産菌は、嫌気性であることから、汚水処理に曝気が必要なく、同化率（増殖率）が非常に低いことから余剰汚泥が少ないといった特徴を有している。このため、下水処理場に MFC を導入することにより、消費電力の削減が図られ、 CO_2 の削減に寄与する（図－4）。



図－4 MFC の導入効果

(4) MFC の導入可能性

MFC は既存の余剰となる処理槽へ設置することを想定している。全国の処理場の処理能力に着目すると、表－1 に示すように、現有処理能力が日平均汚水量の 3 倍以上ある処理場は、2,138 施設のうち 418 施設の約 20% が該当し、2 倍以

上ある処理場は 51% が該当する。このため、既存処理場の必要処理能力を日平均汚水量の 2 倍と仮定すると、現段階で全国の約半数の処理場に MFC の設置が可能と評価される。さらに将来的には、人口減少や節水意識の高まりにより、流入汚水量がさらに減少することが予想されることから、MFC の設置可能な処理場は増加する。

表－1 下水処理場の処理能力

処理能力※	施設数	割合
100%未満	26	1%
100%以上150%未満	422	20%
150%以上200%未満	616	29%
200%以上300%未満	656	31%
300%以上	418	20%
合計	2,138	

※処理能力＝現有能力/日平均汚水量
(平成28年度下水道統計¹⁾より算定)

3. 下水処理場での実験結果

(1) 生産電力量の評価

処理場における MFC の生産電力を評価するため、最初沈殿池への流入水路（初沈前）と流出水路（初沈後）に上・中・下の三段構造の MFC（図－5）を水路中に流れる汚水面に浮体より上部が浮かぶように設置した（図－6）。

水路中の MFC の生産電力が安定するまで 120 Ω の抵抗に接続し、その後 27 Ω に接続して測定した。この結果、最初沈殿池流入水路（初沈前）では上部・中部は平均約 6.0 Wh/m³、下部では平均約 3.0 Wh/m³ であった（図－7）。

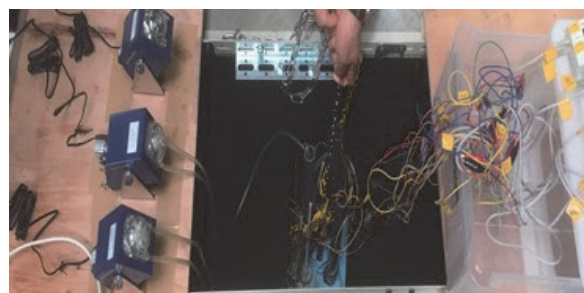
最初沈殿池流出水路（初沈後）では上部は 6.0-8.0 Wh/m³、中部では 4.0-6.0 Wh/m³、下部では 5.0-7.0 Wh/m³ であった（図－8）。

以上より、最初沈殿池前後での生産電力量は大きな差異がなく、MFC の設置場所としては浮遊物質が除去された最初沈殿池流出後の方が適している。いずれも下部で電力が低下した原因として MFC エアカソード内部への浸水およびエアカソード室の空気滞留による酸素不足が考えられた。

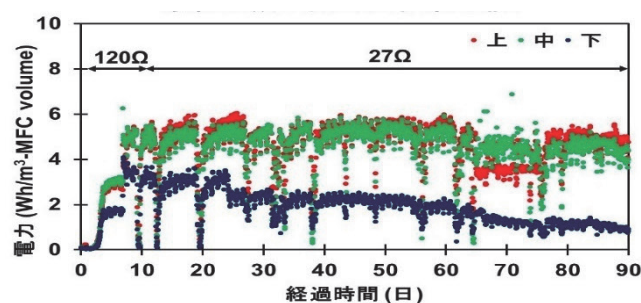
なお、下水処理場に設置した 3 ヶ月は、清掃等の維持管理は実施していない。



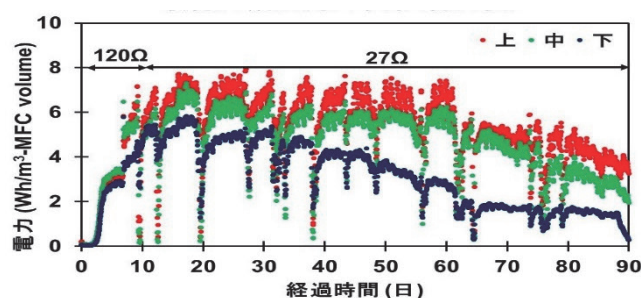
図－5 下水処理場に設置した MFC



図－6 下水処理場への設置状況



図－7 最初沈殿池流入水路（初沈前）における電力推移



図－8 最初沈殿池流入水路（初沈後）における電力推移

(2) 運転条件別の生産電力と生産電流の比較

MFC による運転条件別の生産電力、電流、有機物除去効果、発電効率を評価するため、(1) で用いた MFC を引き上げ、図－9 に示す実験用水槽に再設置した。

運転条件は、表－2 に示すように接続抵抗と滞留時間を変化させた条件とした。対照系として MFC を設置しない水槽 (e) を併せて運転し比較した。

測定項目としては、電流生産を (1) と同様に計測し、SBOD、SCOD_{cr} を計測した。

表－2 連続運転条件

運転条件	抵抗 (Ω)	滞留時間 (h)
27R3H	27	3
27R6H	27	6
27R12H	27	12
3R3H	3	3
3R6H	3	6
3R12H	3	12



図－9 実験用水槽への MFC の設置状況

1) 生産電力の比較

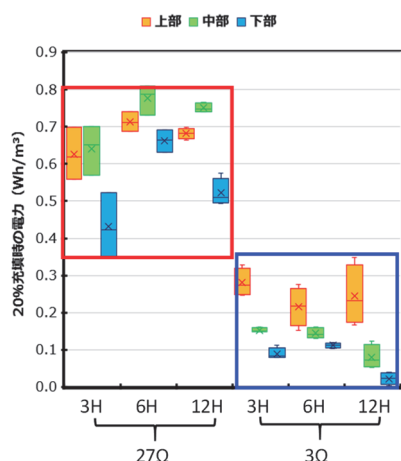
実際の処理場に設置することをイメージし、処理槽に MFC が 20% 充填された条件で各運転条件の生産電力を比較した。抵抗 27Ω 接続時においては、平均約 $0.7\text{W}/\text{m}^3$ –20% 充填時の電力生産が観察され、抵抗 3Ω 接続時では平均約 $0.2\text{W}/\text{m}^3$ –20% 充填時であった（図－10）。

生産電力は、接続抵抗を 3Ω とするよりも 27Ω の方が高い結果が得られた。なお、滞留時間による相違はほとんどなかった。

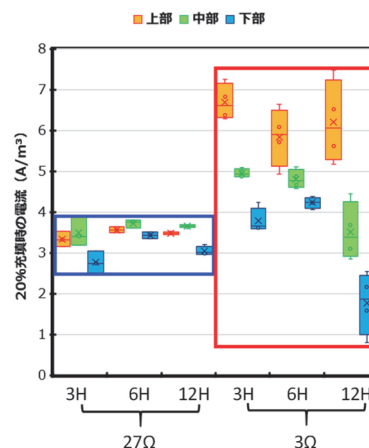
2) 生産電流の比較

電流に着目すると、抵抗 3Ω 接続時に平均約 $5.4\text{A}/\text{m}^3$ –20% 充填時で、抵抗 27Ω 接続時では $3.6\text{A}/\text{m}^3$ –20% 充填時であった。これより、電流は抵抗 27Ω 接続時よりも 3Ω 接続時の方が生産されることが示された（図－11）。

生産電流が大きいことは、電流生産菌が活発に活動したことを示しており、有機物分解すなわち汚水処理が促進されることになる。一方、接続抵抗が小さい場合には、電流が多く得られても電圧が低いいため、生産電力が高くなるとは限らない。



図－10 各運転条件別の生産電力の比較



図－11 各運転条件別の電流の比較

(3) 有機物除去率の比較

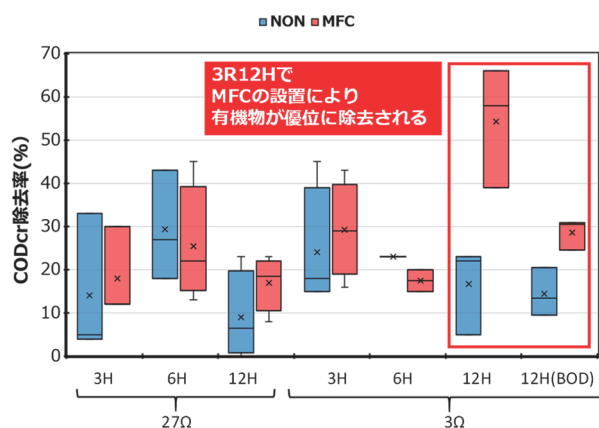
有機物除去効果を比較するため、実験用水槽への流入水質および処理後の水質を測定し、除去率として評価した。

抵抗 27Ω 接続時の SCOD_{Cr} 除去率は、滞留時間により差が見られたものの、滞留時間 12 時間のケースでは MFC 設置時で 19% を示し、非設置の 7% と差異が確認された。

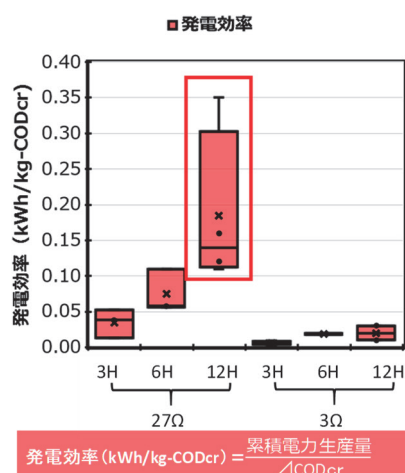
一方、抵抗 3Ω 接続時の SCOD_{Cr} 除去率は、滞留時間 12 時間のケースでは MFC 設置時に 58% を示し、非設置の 23% と比較して大きな差異となった（図－12）。

(4) 発電効率の比較

発電効率は、累積電力量を COD_{Cr} 除去量で除して算定した。発電効率が最大となるのは、抵抗 27Ω 接続時で滞留時間 12 時間の条件の場合であり、発電効率 $0.13\text{ kWh}/\text{kg-COD}$ を示した（図－13）。また、抵抗 3Ω 接続時の発電効率は、抵抗 27Ω 接続時の 1/5 程度であった。抵抗 3Ω 接続時には、有機物分解が優先されるものの、発電効率は低い結果となった。



図－12 各運転条件別の有機物除去率の比較



図－13 各運転条件別の発電効率の比較

4. エネルギーポテンシャルの試算

エネルギーポテンシャルは、全国の下水处理場を対象とし、MFC の導入効果と消化ガス発電の導入効果を試算することで下水道の使用電力量に着目したエネルギー自立化率を検討した（図－14）。

① 下水道の保有ポテンシャル

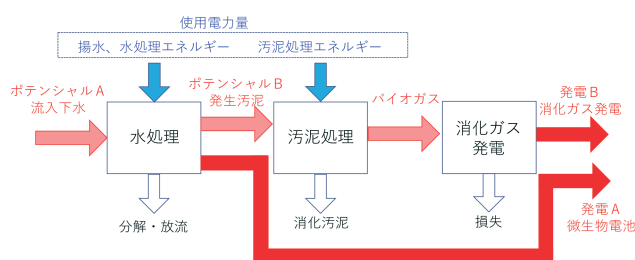
- 流入汚水のポテンシャル（ポテンシャル A）
- 発生汚泥のポテンシャル（ポテンシャル B）

② MFC の導入効果

- 生産電力量（発電 A）
- 使用電力削減量

③ 消化ガス発電の導入効果

- 生産電力量（発電 B）



図－14 下水処理に係るエネルギーフロー

(1) 下水道の保有ポテンシャル

下水道が保有するエネルギーポテンシャルとしては、流入汚水のポテンシャルと発生汚泥のポテンシャルがある。流入汚水のポテンシャルは年間 214 億 kWh と試算され、発生汚泥のポテンシャル年間 112 億 kWh の 2 倍程度ある。これまでは、発生汚泥のポテンシャルに着目し、消化ガス発電が実施され、エネルギーの再利用が図られてきた。しかし、発生汚泥の 2 倍程度と試算される流入下水のポテンシャルは利用されておら

ず、直接エネルギーの回収が可能な MFC の活用が期待されている。

1) 流入汚水のポテンシャル試算

流入汚水のポテンシャルは、有機物（CODcr）のエネルギー原単位を用いると以下の式で算定でき、全国の下水处理場全体で年間 214 億 kWh と試算される。

流入エネルギー（kWh/年）＝年間流入下水水量（m³/年）×流入 CODcr 濃度（kg/m³）×3.49（kWh/kg-CODcr）

- 年間流入下水水量：15,361,509,000 m³/年（H28年度 下水道統計 年間処理水量 p.97¹⁾）
- CODcr 濃度：BOD 濃度（kg/m³）×2.0（BOD 濃度：0.20 kg/m³、2.0：活性汚泥モデルの実務利用の技術評価に関する報告書 H18.3 JS²⁾）
- 有機物のエネルギー原単位：3.49 kWh/kg-CODcr（流域別下水道整備総合計画調査指針と解説 H27.1 p.139³⁾）

2) 発生汚泥のポテンシャル試算

発生汚泥のポテンシャルは、発生汚泥量に汚泥発熱量を乗じて以下の式で算定でき、全国の下水处理場全体で年間 112 億 kWh と試算される。

汚泥エネルギー（kWh/年）＝発生汚泥量（kg-DS/年）×17（MJ/kg-DS）×1/3.6（kWh/MJ）

- 発生汚泥量：生汚泥量（11.5 億 kg-DS/年）、余剰汚泥量（12.2 億 kg-DS/年）の汚泥発生量の合計値（下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン p.141⁴⁾ より算出）
- 汚泥発熱量：17（MJ/kg-DS）（設計指針 2009 年版 p.434⁵⁾ 13～17 MJ/kg-Ds）

(2) MFC の導入効果

MFC の導入効果として、流入下水からの生産電力量と、水処理に係る電力低減量が考えられる。MFC 導入による生産電力量は、全国の下水处理場に適用した場合、年間 8.0 億 kWh と試算され、水処理に係る電力低減量は年間 6.7 億 kWh と試算される。

1) MFC 導入による生産電力量

MFC 導入による流入下水からの生産電力量は、年間の流入有機物量（CODcr）に実験結果より得られた発電効率（接続抵抗 27 Ω、滞留時間 12 時間）を乗じて以下の式で算定し、年間 8.0 億 kWh と試算される。

MFC 発電量（kWh/年）＝年間流入下水水量（m³/年）×流入 CODcr 濃度（kg/m³）×発電効率 0.13（kWh/kg-CODcr）

2) 水処理に係る電力削減量

MFC 導入による水処理に係る使用電力削減量は、年間の水処理に係る電力消費量に実験結果より得られた MFC による有機物除去率（接続抵抗 27 Ω、滞留時間 12 時間）を乗じ

て以下の式で算定し、年間 6.7 億 kWh と試算される。

水処理に係る電力削減量 (kWh/年) = 水処理に係る電力消費量 (kWh/年) × MFC による有機物除去率 0.19

- 水処理に係る電力消費量 : 3,532,389,146 kWh/年 (H28 年度 下水道統計 処理場・電力使用量・水処理¹⁾)
- MFC による有機物除去率 : 0.19 (実験値)

(3) 消化ガス発電による発電量

汚泥資源の有効活用として消化ガス発電が実施されており、平成 28 年度の実績は、2.3 億 kWh となっている。この技術を全国の下水処理場に適用した場合には、消化ガス発生量に発電効率等を乗じて以下の式で算定でき、年間 22 億 kWh と試算される。

消化ガス発電量 (kWh/年) = 消化ガス発生量 (Nm³/年) × 22 × 1/3.6 × 0.35

- 消化ガス発生量 : 10.4 億 Nm³/年 (下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン p.141⁴⁾ より算出)
- 消化ガス低位発電量 : 22MJ/m³ (設計指針 2009 年版 p.359⁵⁾)
- 発電効率 : 0.35 (水環境マネジメント検討会報告書 H25.3 p.28⁶⁾)

(4) 結果および考察

下水道の電力ポテンシャルは、汚水で 214 億 kWh、汚泥で 112 億 kWh と試算される。全国の下水処理場における電力使用量は、平成 28 年度実績で約 66 億 kWh であることから、下水処理場は使用電力を上回る電力ポテンシャルを有している。

MFC の導入により、生産電力量が年間 8.0 億 kWh、使用電力量の削減が 6.7 億 kWh と試算され、合計 14.7 億 kWh の電力削減が見込まれる。これは、下水処理場の電力使用量の 22% に相当する。一方、消化ガス発電では、年間 22 億 kWh と試算され、下水処理場の電力使用量の 33% に相当する。以上より、MFC の導入と消化ガス発電の導入により、下水処理場の電力量の約 5 割を賄えることになる (図 - 15)。

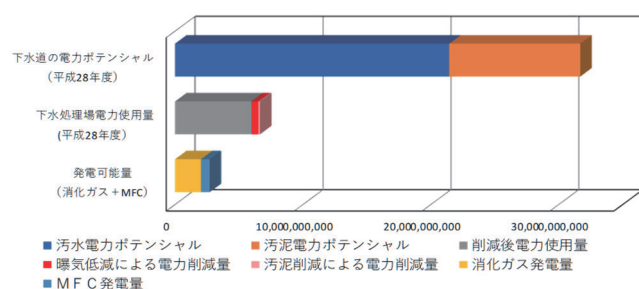


図 - 15 MFC 導入後のエネルギーポテンシャル

5. まとめ

本研究では、MFC を下水処理場に設置し、生産電力や有機物除去性能に関する試験を実施することにより、下水処理場への導入可能性を検討した。また、全国の下水処理場へ MFC を導入した際のエネルギーポテンシャルを算定し、以下のことが言えた。

処理能力に余裕のある施設は、平成 28 年度時点で 20 ～ 51% 程度存在し、今後も、人口減少等により流入汚水量がさらに減少し、MFC が設置可能な余裕のある処理施設が増えてくることが予想される。

MFC を導入した際、MFC の発電量と使用電力削減量と消化ガス発電の汚泥からの発電量と併せると、下水処理場の使用電力量の約 5 割を賄えるポテンシャルを持っていることが明らかになった。

MFC は、国土交通省の平成 30 年度の下水道技術ビジョン・ロードマップ重点課題として掲げられ、実用化が期待される技術である。また、本技術は、下水道分野以外にも有機性で比較的濃度の高い排水が排出される食料品製造業、化学工業、畜産等の業種への適用も望まれる。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本下水道協会 (2017) : 平成28年度版 下水道統計
- 2) 日本下水道事業団 (2006) : 活性汚泥モデルの実務利用の技術評価に関する報告書
- 3) 国土交通省 (2015) : 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説 平成 27 年 1 月
- 4) 国土交通省 (2017) : 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—平成 29 年版—
- 5) 社団法人 日本下水道協会 (2009) : 下水道施設計画・設計指針と解説 —2009 年版—
- 6) 国土交通省 (2013) : 水環境マネジメント報告書 平成 25 年 3 月