

# 電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術の実証

## Demonstration Experiment of Sewage Sludge Fuelization Technology Using Carbonization Furnace with an Electric Heating Screw



竹田尚弘\*  
Naohiro Takeda



島村育幸\*  
Yasuyuki Shimamura



谷山拓生\*\*  
Hiroki Taniyama



鈴木亮介\*\*  
Ryosuke Suzuki



松井 朗\*  
Akira Matsui



坂井義広\*\*\*  
Yoshihiro Sakai

令和3年に閣議決定された第5次社会資本整備重点計画では、下水道バイオマスリサイクル率や下水道分野における温室効果ガス排出削減量に数値目標が設定された。当社では、このような社会ニーズに応えるため、下水汚泥のエネルギー利用を目的に、「電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術」の実証を実施し、本技術が安定した発熱量の汚泥燃料を製造でき、かつ省エネルギー化が可能となる技術であることを確認した。本実証試験の成果をもって、日本下水道事業団の新技术I類に選定された。

In the 5th Priority Plan for Social Infrastructure Development, which was approved by the Cabinet in 2021, numerical targets were set for the sewerage biomass recycling rate and the amount of greenhouse gas emission reduction in the sewerage field. In order to meet such social needs, we have demonstrated "sewage sludge fuelization technology using a carbonization furnace with an electric heating screw" for the purpose of utilizing the energy contained in sewage sludge. And, we have confirmed that this technology can produce sludge fuel of a stable calorific value and can save energy. Based on the results of this demonstration test, it was selected for the "JS Innovation Program" of the Japan Sewage Works Agency.

### Key Words :

|        |                          |
|--------|--------------------------|
| 電熱スクリュ | Electric heating screw   |
| 炭化     | Carbonization            |
| 固形燃料化  | Conversion to solid fuel |
| 汚泥燃料   | Sludge fuel              |

### 【セールスポイント】

- ・電気を熱源とする電熱スクリュを活用したコンパクトな炭化炉と、熱風発生炉等が不要となるシンプルなフローで構成。
- ・安定した発熱量の汚泥燃料を製造でき、かつ省エネルギー化が可能。

### まえがき

下水汚泥は、人間の生活に伴い発生するため、日本全国に点在する地域バイオマスであると同時に、エネルギーの需要地である都市部で集約して発生する都市型バイオマスでもある。この下水汚泥の有効

利用を推進するため、令和3年度に閣議決定された第5次社会資本整備重点計画<sup>1)</sup>では、下水道バイオマスリサイクル率（下水汚泥中の有機物の内、ガス発電等エネルギー利用や緑農地利用等、有効利用された割合）を33.8%（令和元年度）から45%（令

\*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

\*\*技術開発センター プロセス技術開発部 資源循環技術室（開発当時所属）

\*\*\*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

和7年度)に、また、下水道分野における温室効果ガス排出削減量を210万トンCO<sub>2</sub>(平成29年度)から352万トンCO<sub>2</sub>(令和7年度)に引き上げる目標が設定された。

下水汚泥を無酸素状態で熱分解し汚泥燃料にする炭化技術は、汚泥焼却と比較してN<sub>2</sub>O(地球温暖化係数がCO<sub>2</sub>の298倍)の発生量が少ないことと、得られた汚泥燃料を火力発電所等で使用することにより化石燃料の使用量を減らせることから、温室効果ガス削減効果が大きな技術である。

また、下水道の機能・サービス水準の持続可能性の観点から、今後の汚泥処理は広域化・共同化が進むと予想されており、汚泥燃料化技術にも汚泥性状変動への対応が求められている。また汚泥燃料化設備の導入には、得られた汚泥燃料の品質(発熱量、安全性、臭気)の確保と、設備の省エネルギー性能が重要である。

こうした背景のもと、当社は日本下水道事業団(以下、「JS」という。)と平成30年度から令和2年度にわたって「電熱スクリュ式炭化炉を用いた品質制御型汚泥燃料化システムに関する共同研究」と題した共同研究を行った。本研究では、電気を熱源として汚泥を加熱する「電熱スクリュ」を活用したコンパクトで熱風発生炉等が不要となる炭化炉を用い、シンプルなフローで構成された燃料化システム「電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術」(以下、「本技術」という。)を開発した。

本報では、共同研究の成果を踏まえて令和3年3月にJSの新技术I類に選定された本技術<sup>2), 3)</sup>の開発内容について報告する。

## 1. 技術の概要

### 1.1 システムフロー

本技術は、下水処理場で発生する脱水汚泥を対象に、炭化炉から発生する乾留ガスの燃焼熱を熱源として脱水汚泥を乾燥した後、炭化処理により汚泥燃料を製造するものである。本技術で用いる電熱スクリュ式炭化炉は、電気を熱源として汚泥を加熱するため、従来の炭化炉で必要であった熱風発生炉が不要であり、シンプルなフローとなっている。

図1に本技術のシステムフローを示す。脱水汚泥を乾燥機に投入し、水分を蒸発させ含水率30%以下に乾燥した後、電熱スクリュ式炭化炉にて発熱体であるスクリュとの直接接触により乾燥汚泥を炭化し、これを冷却・調湿して汚泥燃料を製造する。次いで、養生ホッパで汚泥燃料表面の酸化を促進させ、発熱発火性のある汚泥燃料を安定化する。また、燃焼炉では乾燥排ガスおよび炭化炉から発生する乾留

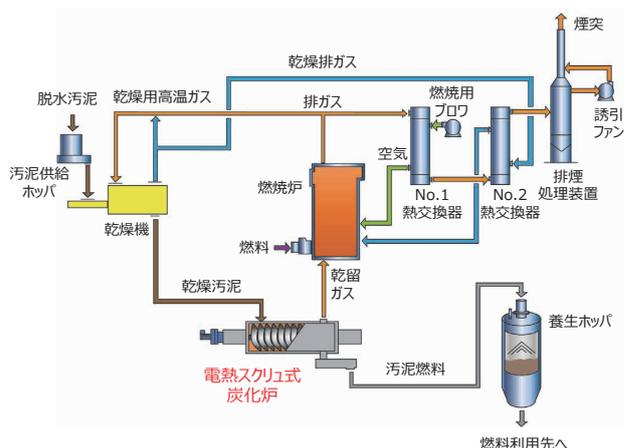
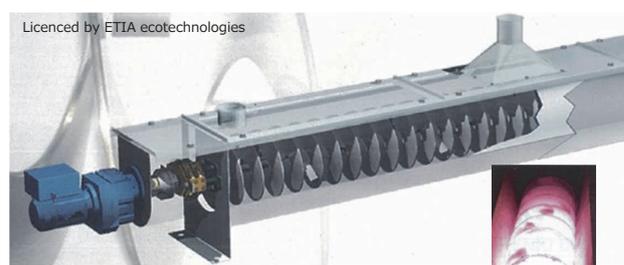


図1 電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術のシステムフロー



電熱スクリュ本体 スクリュ発熱時  
図2 電熱スクリュ式炭化炉の構造

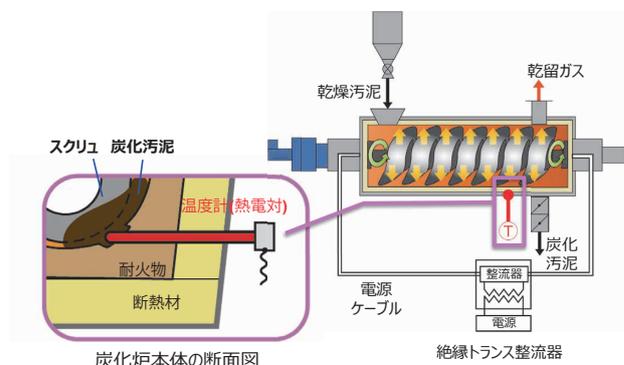


図3 炭化汚泥の温度測定方法

ガスを完全燃焼する。発生する燃焼排ガスの一部を乾燥機の熱源として利用すると同時に、燃焼炉での燃焼空気に熱回収する。

### 1.2 電熱スクリュ式炭化炉の特長

電熱スクリュ式炭化炉は、スクリュに直流電流を流してスクリュ自体をジュール熱で発熱させ、汚泥を搬送しつつ直接接触加熱することで乾燥汚泥を炭化するものである(図2参照)。汚泥は発熱体である一本のスクリュ羽根と広い面積で直接接触しながら炭化されるため、熱伝達効率が高い。さらに、炭化炉の底部に設けた熱電対を炭化汚泥に直接接触させることで、炭化汚泥自体の温度計測を可能として

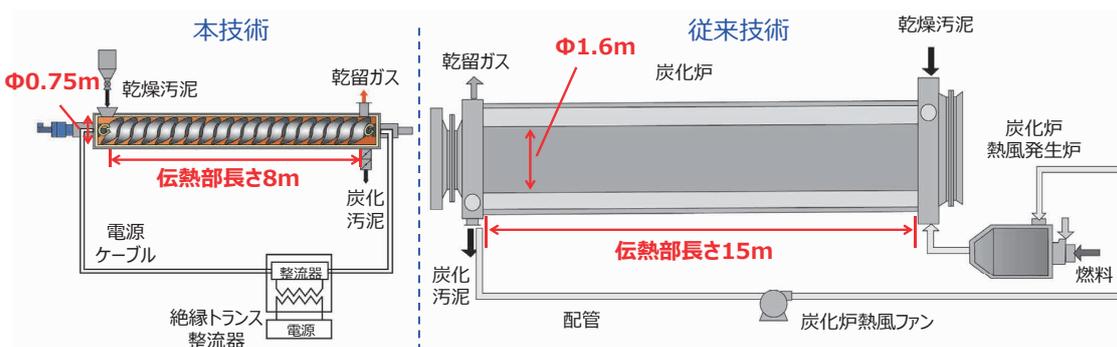


図4 100 t-wet/d 炉における本技術と従来技術の炭化炉比較 (炉サイズと必要な補機類)

いる (図3参照)。

電熱スクリュ式炭化炉は、炭化汚泥の温度を直接接触測定できることと併せ、熱源が電気であることから、応答性良く炭化温度を維持できる。また、搬送形式がスクリュであるため、汚泥性状 (粒径やかさ比重等の物理特性) の変動によらず炉内滞留時間 (炭化時間) を一定に維持できる。これら汚泥燃料の発熱量を決定する炭化温度と炭化時間の制御により、安定した発熱量の汚泥燃料を製造可能という特長を有する。

また、熱伝達効率に優れるため、従来技術である外熱キルン式と比較し炭化炉本体をコンパクト (炉口径、長さ共に約半分) にできることや、熱風発生炉が不要であることから (図4参照)、炭化炉全体の熱損失が少なくなり、投入エネルギーの大幅な削減が可能となる。さらに、炭化炉内部は、U字型トラフにスクリュを載せたシンプルな構造であることから、炭化炉の蓋を開放するだけで炉内に入らず点検が可能であり、メンテナンス性に優れるという特長も有する。

## 2. 実証試験

本技術の導入効果を確認するため、規模の異なる二種類の試験設備を用いて、ラボ試験ならびに実証試験を行った。以下に試験内容を報告する。

### 2.1 試験の概要

開発技術の主要機器である電熱スクリュ式炭化炉の1 t-wet/d 規模 (脱水汚泥量換算) の試験機 (写真1参照) を当社技術研究所内に設置しラボ試験を、脱水汚泥処理能力10 t-wet/d の汚泥燃料化システム実証設備 (写真2参照) を下水処理場に設置して実証試験を実施した。試験概要を表1に、試験設備の概要を表2に示す。

### 2.2 試験結果

試験で得られた汚泥燃料の分析を行い、炭化特性の評価を行った。また、汚泥燃料の品質として、発熱量、発熱発火性、ならびに臭気を評価した。



写真1 電熱スクリュ式炭化炉外観 (脱水汚泥量換算 1 t-wet/d 規模)



写真2 汚泥燃料化システム実証設備外観 (脱水汚泥処理能力10 t-wet/d)

表1 試験概要

| 試験   | ラボ試験                               | 実証試験                             |
|------|------------------------------------|----------------------------------|
| 原料汚泥 | ・未消化汚泥<br>・消化汚泥                    | ・設備を設置した下水処理場の未消化汚泥              |
| 炭化温度 | 350 ~ 500 °C                       |                                  |
| 炭化時間 | 15分                                |                                  |
| 目的   | ・炭化温度、原料汚泥性状の違い (消化の有無) による炭化特性の評価 | ・実機規模での炭化特性の評価<br>・商用規模での導入効果の試算 |

表2 試験設備の概要

| 試験     | ラボ試験                   | 実証試験                     |
|--------|------------------------|--------------------------|
| 設備規模   | 1 t-wet/d<br>(脱水汚泥量換算) | 10 t-wet/d<br>(脱水汚泥処理能力) |
| 設備     | 電熱スクリュエ式<br>炭化炉        | 汚泥燃料化<br>システム一式          |
| 炭化炉サイズ | φ130×L1 700            | φ300×L5 900              |
| 定格電力   | 15 kW                  | 55 kW                    |
| 設置場所   | 当社技術研究所                | 下水処理場                    |

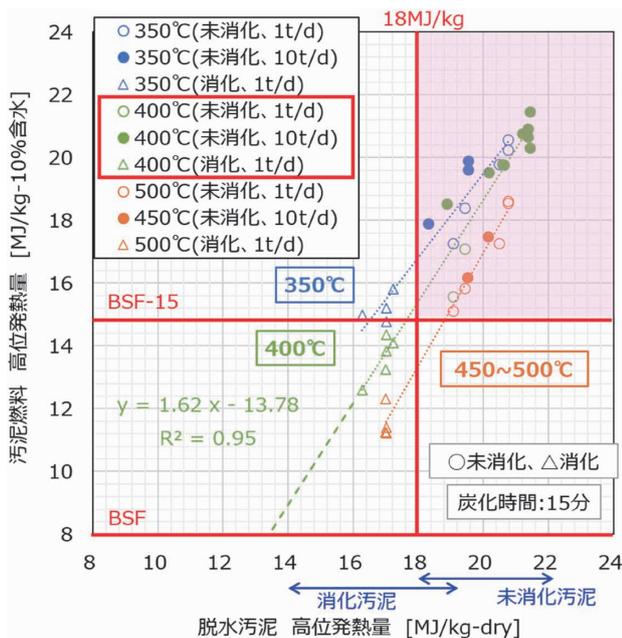


図5 脱水汚泥と汚泥燃料との高位発熱量の相関

### 1) 汚泥燃料の発熱量

本技術の炭化温度と炭化時間を精度良く一定に維持できるという特長から、原料の脱水汚泥と製品の汚泥燃料との高位発熱量（総発熱量）の関係は、消化の有無や設備規模にかかわらず、炭化温度毎に明確な線形の関係があることを確認した（図5参照）。

本技術の標準的な炭化条件である400℃15分では、脱水汚泥の高位発熱量18 MJ/kg-dry 以上の場合に汚泥燃料のJIS規格（JIS Z 7312「下水汚泥固形燃料」）で定めるBSF-15（高位発熱量15 MJ/kg 以上）を、同16 MJ/kg-dry 以上の場合にBSF（同規格、同8 MJ/kg 以上）を満足することが確認された。またBSFを満足する脱水汚泥の高位発熱量の下限値は14 MJ/kg-dry であると試算された。

以上より、本技術は、汚泥燃料の発熱量が消化の有無や設備規模にかかわらず、脱水汚泥の発熱量から炭化温度により一義的に決定されるという炭化特性を有することを確認した。

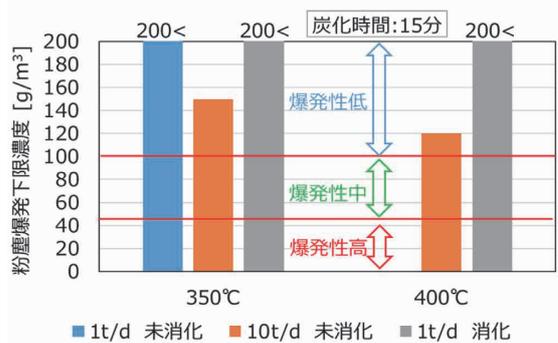
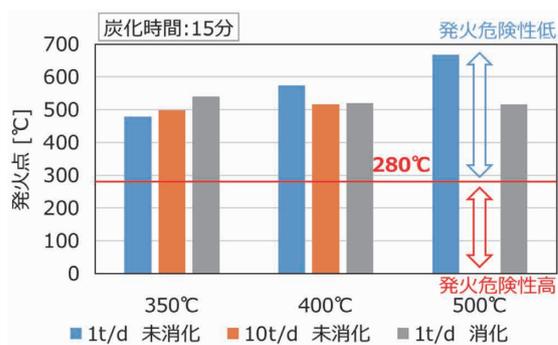


図6 汚泥燃料の発火点、粉塵爆発性

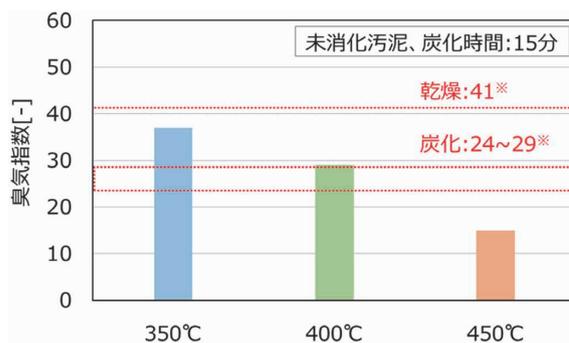


図7 汚泥燃料の臭気

### 2) 汚泥燃料の発熱発火性

汚泥燃料の発熱発火性の指標として、JSの「下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル」<sup>4)</sup>に従い、発火点と粉塵爆発性を評価した（図6参照）。汚泥燃料の発火点はマニュアルに記載の280℃以上であり発火危険性が低いという評価、粉塵爆発性も粉塵爆発下限濃度が100 g/m<sup>3</sup> 以上で爆発性が低いとの評価となった。

本技術で製造した汚泥燃料の発熱発火性は低く、安全性を確認できた。

### 3) 汚泥燃料の臭気

汚泥燃料の臭気は、炭化処理を行うことで乾燥汚泥より臭気指数を低減でき、炭化温度400℃以上の条件にて、日本下水道協会の「下水道施設計画・設計指針と解説 2019年版」<sup>5)</sup>に記載の炭化の臭気指数（図中※印）以下にまで低減可能であることを確認した（図7参照）。

### 3. 下水処理場への導入効果試算

10 t-wet/d の実証試験にて得られた成果をもとに、本技術と従来技術の投入エネルギー、用役費、温室効果ガス排出量の比較を行った。試算条件を表3に示す。比較対象とする従来技術は、「外熱キルン式炭化」による汚泥燃料化技術とした。なお、試算結果は当社試算によるものである。

#### 3.1 投入エネルギー削減効果の試算

未消化汚泥、消化汚泥それぞれに対して、本技術ならびに従来技術の投入エネルギー試算結果を図8に示す。

本技術の特長である炭化炉がコンパクトであること、ならびに熱風発生炉が不要になることにより炭化炉全体の放熱量が削減されるため、従来技術の外熱キルン式と比較し、投入エネルギーを未消化汚泥の場合で46%、消化汚泥の場合で38%削減できると試算された。

また、消化処理を行っている場合、本技術では、場内で発生する消化ガスを燃料として用いることにより、燃料の大半を消化ガスで賄うことが可能であると試算された。

以上より、本技術により従来技術と比べて投入エネルギーを40%程度削減できることが期待される。

表3 導入効果の試算条件

| 比較対象       | 本技術                             | 従来技術                    |
|------------|---------------------------------|-------------------------|
| 方式         | 電熱スクリュ式炭化                       | 外熱キルン式炭化                |
| 試算規模       | 脱水汚泥投入量<br>100 t-wet/d 規模       |                         |
| 汚泥性状       | 含水率                             | 未消化汚泥：78%<br>消化汚泥：81%   |
|            | 可燃分                             | 未消化汚泥：80%<br>消化汚泥：66.7% |
| 消化の場合の試算条件 | ・消化は未消化汚泥を全量消化<br>・消化ガスで都市ガスを代替 |                         |

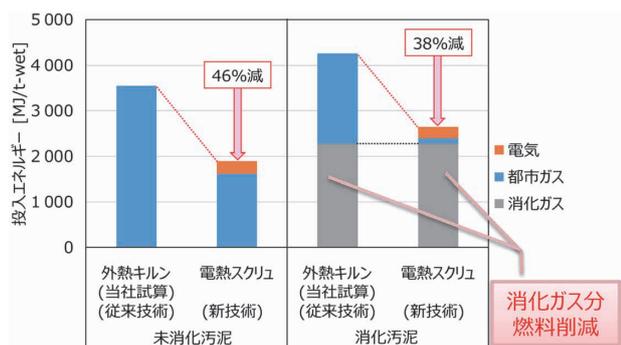


図8 投入エネルギー試算結果

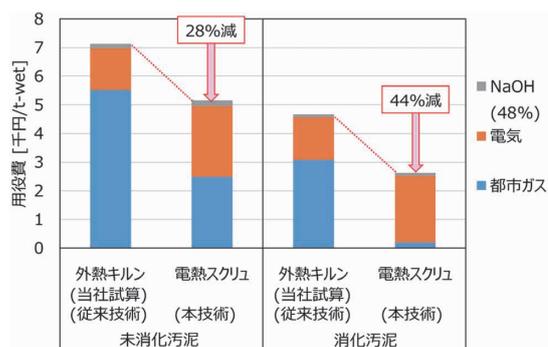


図9 用役費試算結果

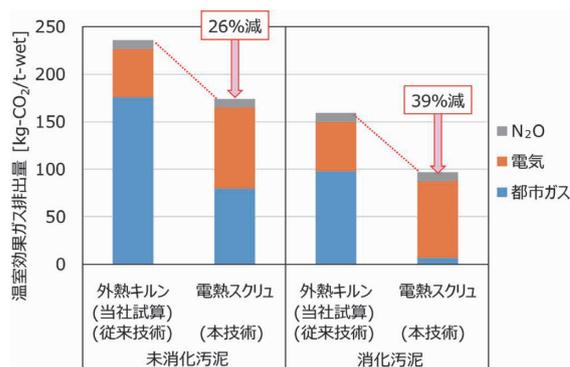


図10 温室効果ガス排出量試算結果

#### 3.2 用役費削減効果の試算

未消化汚泥、消化汚泥それぞれに対して、本技術ならびに従来技術の用役費試算結果を図9に示す。

前項で述べた投入エネルギー削減効果により、用役費についても未消化汚泥の場合で28%削減できると試算された。また、消化ガスを燃料として活用する消化汚泥の場合は、用役費の大半が電気となり、従来技術と比較して44%削減できると試算された。

#### 3.3 温室効果ガス排出量削減効果の試算

未消化汚泥、消化汚泥それぞれに対して、本技術ならびに従来技術の温室効果ガス排出量試算結果を図10に示す。

3.1項で述べた投入エネルギー削減効果により、温室効果ガス排出量についても未消化汚泥の場合で26%と試算され、消化汚泥の場合は、温室効果ガスの大半が電気由来となり、従来技術と比較して39%削減できると試算された。

前項ならびに本項での試算結果から、特に消化ガスを補助燃料として利用可能な処理場において、本技術の大きな導入効果が期待できる。

### むすび

JSとの共同研究にて、電熱スクリュ式炭化炉を用いた汚泥燃料化技術の実証試験を行い、本技術で得られた汚泥燃料の品質の評価、ならびに下水処理場への導入効果試算を行った。汚泥燃料の発熱量は、

汚泥性状（消化の有無）や設備規模にかかわらず、炭化温度毎に明確な線形の関係にあることを確認し、本技術による汚泥燃料への炭化特性を明らかにした。また本技術の導入により、従来技術と比較して投入エネルギー量、用役費、温室効果ガス排出削減の効果が期待できることを確認した。

これらの成果をもって、本技術は下水汚泥固形燃料化技術として初めてJSの新技术I類に選定された。

国内の焼却・溶融・燃料化設備の設置数は約300基であるが、これらの大半は焼却設備である。今後、既設炉の更新等に伴い燃料化設備の採用が進むと同時に、広域化・共同化に伴う集約処理等が進むことも想定される。対象とする汚泥の性状が変化しても安定した発熱量の汚泥燃料を製造でき、省エネルギー化が可能な本技術が、下水汚泥のエネルギー利用に貢献できるものとする。

## 謝 辞

本技術の共同研究者である日本下水道事業団ならびに関係各位の多大なるご協力に深く感謝いたします。

## [参考文献]

- 1) 国土交通省：第5次社会資本整備重点計画（令和3年度～令和7年度：令和3年5月28日閣議決定）
- 2) 日本下水道事業団 技術戦略部：月刊下水道，44巻，9号（2021），p90-95
- 3) 竹田尚弘：再生と利用，45巻，167号（2021），p38-40
- 4) 日本下水道事業団 技術戦略部：下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル，2008年3月
- 5) 公益社団法人 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説－2019年版－，2019年10月