

湿式炭化による下水汚泥の燃料化技術の実証

Demonstration of Hydrothermal Carbonization Process for Fuel Production from Sewage Sludge

田中裕大*・隅 晃彦*技術士(上下水道部門)・佐藤朋弘*・井上智行**・宮本博司***

Yasuhiro Tanaka・Akihiko Sumi・Tomohiro Sato・Tomoyuki Inoue・Hiroshi Miyamoto

下水処理場に湿式炭化の実証設備を設置し、汚泥燃料化への適用可能性を検証した。その結果、水分蒸発を伴わず少ないエネルギーで含水率30～40%の炭化物が得られ、これを養生処理することでJIS規格を満足する燃料化物を製造することができた。また、肥料規格への適合性、バイオガス発生量の増加、放流水CODの上昇の抑制効果を確認した。さらに、従来技術に対して、エネルギー自立性・温室効果ガス削減の面で優位性があり、脱炭素化と資源循環に資する技術であることを明らかにした。本技術は2025年3月に日本下水道事業団の新技术Ⅰ類に選定された。

A pilot-scale hydrothermal carbonization (HTC) system was demonstrated at a municipal wastewater treatment plant for processing sewage sludge. The HTC process converted sludge into fuel that meets the JIS Z 7312 standard by achieving a carbonized sludge with a water content of 30-40% with low energy input and without water evaporation, and by curing this. The system demonstrated its conformity with fertilizer standards, improved biogas yield, mitigated increases in effluent COD, and achieved a high level of energy self-sufficiency and carbon-negative performance. This technology was selected by the Japan Sewage Works Agency (JS) as New Technology Category I in March 2025.

Key Words :

湿 式 炭 化
汚 泥 燃 料 化
エ ネ ル ギ 自 立
脱 炭 素
下 水 汚 泥 肥 料 化

Hydrothermal carbonization
Fuel production from sewage sludge
Energy self-sufficiency
Decarbonization
Fertilizer production from sewage sludge

ま え が き

我が国では、2030年度に2013年度比で温室効果ガスを46%削減し、2050年にはカーボンニュートラルを達成するという目標が掲げられており、下水道分野においても温室効果ガスの削減が求められている。

下水処理では、微生物が有機物を分解することで水が浄化される。この過程で、増殖した微生物および下水中に含まれる固形物を主体とする「汚泥」が生じる。温室効果ガスの排出削減のためには、水の浄化過程に加え、汚泥処理時の排出抑制も課題となる。汚泥は脱水処理を行っても多くの水分が残るた

め、焼却処分する場合には補助燃料による加熱などが必要となり、焼却時には温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)および一酸化二窒素(N₂O)が発生するという課題がある。

これを解決する手段として、汚泥を焼却せず燃料として化石燃料の代わりに利用する技術が注目されているが、従来技術では、その製造過程でのエネルギー消費を考慮すると、温室効果ガスの削減効果は限定的であった。本報では、低エネルギーで固形燃料を製造可能な「湿式炭化」に着目し、その適用可能性を検証することを目的に、湿式炭化を用いた下水汚泥の利活用技術の実証を行ったので報告する。なお、

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

**環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 開発室

***環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部

エネルギーが小さいことが特徴である。また、この反応は炭化促進剤の添加により促進され、より低温・低圧・短時間で完結させることができる。

1.3 湿式炭化による下水汚泥燃料化の概要と特徴

図2に湿式炭化設備まわりの詳細フローおよび期待される効果を示す。本技術は湿式炭化、養生、返流水処理の工程からなる。

湿式炭化は、湿式炭化反応器で投入汚泥を加圧状態で加熱処理した後、固液分離機により圧搾することで含水率約30～40%の炭化物を得る工程である。本技術では、代表的な下水汚泥のエネルギー化技術である嫌気性消化（メタン発酵）およびバイオガス発電との組み合わせを基本とする。これによって、バイオガス発電の排熱を利用することができ、規模によっては外部燃料を消費せずに湿式炭化反応器を加熱することができる。

養生は通風により炭化物の含水率および自己発熱性を低減させる工程である。この処理によって得られるものを本報では「燃料化物」と呼称する。

返流水処理は、消化液の脱水工程で発生する消化脱水ろ液を凝集沈殿処理する工程である。湿式炭化の固液分離で発生するろ液（湿式炭化ろ液）には、反応により溶出した有機物が含まれる。湿式炭化ろ液は消化槽へ返送され、分解されることでバイオガスとして回収されるが、有機物の一部は未分解のままとなる。消化脱水ろ液は未分解の有機物とともに下水処理工程へ返流され、処理された後に下水処理場から放流されるため、放流水の水質悪化の要因となりうる。したがって、必要に応じて返流水処理を適用してあらかじめ有機物を除去することで、それを抑制することができる。

加えて、本技術は燃焼工程を含まないため、従来の炭化や焼却技術と異なり燃焼炉を必要としない。そのため安全性が高く、無人化および省人化への対応が比較的容易であることも特徴である。

2. 方法

2.1 実証設備

富士市西部浄化センターに湿式炭化、養生、返流水処理の各設備からなる実証設備を設置した（写真2）。設備の概要を表1に示す。設備能力は5 t-wet/日であり、浄化センターで発生する脱水汚泥の約3分の1を処理可能な規模である。四季を通じた実証試験を行うことにより、湿式炭化の省エネ・創エネ性、温室効果ガス削減効果を検証した。

2.1.1 湿式炭化設備

湿式炭化反応器は、攪拌機付きの鋼製円筒形圧力容器である。槽内の汚泥を加熱するため、バイオガ



写真2 湿式炭化実証設備

表1 湿式炭化実証設備の概要

設備名	処理量	標準運転条件等
湿式炭化	脱水汚泥 5 t-wet/日	反応器温度: 170℃ 反応器圧力: 1 MPa未満 反応器滞留時間: 6時間 固液分離機圧搾圧力: 2.0 MPa
養生	炭化物 1.3 t-wet/日 →燃料化物 0.9 t-wet/日	滞留日数: 3日
返流水処理	消化脱水ろ液 180 m ³ /日	凝集沈殿

ス発電機の排熱から熱回収した熱媒油を流すジャケットを備えている。この反応器は連続式反応器であり、脱水汚泥を投入ポンプと引抜ポンプにて連続的に供給および引抜が可能である。加圧状態（1 MPa 未満）で約6時間加熱（170℃）することで炭化スラリを生成した。固液分離性の良好な炭化スラリを得るため、反応器への投入汚泥には炭化促進剤（実証では硫酸）を添加した。

さらに、得られた炭化スラリをフィルタプレス式の固液分離機にて圧搾することで炭化物を得た。

2.1.2 養生設備

養生設備は鋼製円筒形ホップであり、炭化物を養生空気（約70℃）と約3日間接触させることによって、含水率および自己発熱性が低減した燃料化物を製造した。

2.2 方法

2.2.1 実証設備による評価方法

実証設備にて、平日昼間運転または24時間連続運転により脱水汚泥を処理し、炭化物および燃料化物を製造し、それらの性状を分析した。湿式炭化の特徴である、蒸発を伴わない固液分離機による圧搾によって含水率を約30～40%まで低減できることを検証するため、脱水汚泥と炭化物の含水率を測定した。また、下水汚泥固形燃料のJIS規格（JIS Z 7312）を満足する燃料化物が得られることを検証するために、燃料化物の含水率および高位発熱量を測定した。

燃料化物は常温で酸素と反応して自己発熱するた

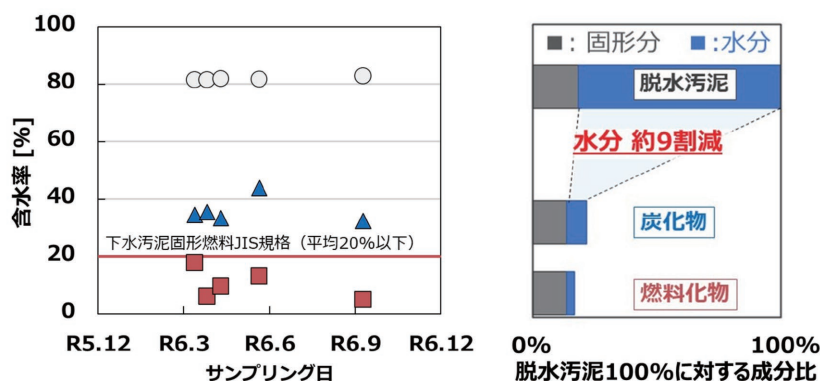


図3 脱水汚泥、炭化物、燃料化物の含水率と、水分のイメージ図

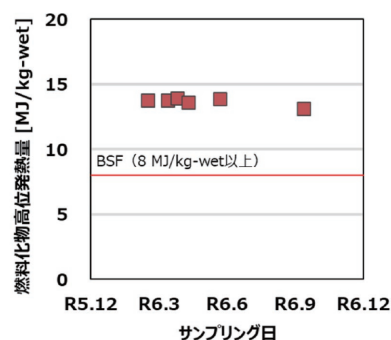


図4 燃料化物の高位発熱量
(含水率20%換算)

め、酸素消費速度 (OCR, Oxygen Consumption Rate) が自己発熱性の大小の目安となる。そこで、燃料化物を容器に密閉して恒温器内で所定時間静置した後、容器内の酸素濃度を測定し、OCR を算出して、自己発熱性を評価した。

2.2.2 ラボスケール試験方法

実証設備では処理場で発生する汚泥の一部のみを処理するため、湿式炭化ろ液の発生量が全量処理の場合と比べて少なくなる。そのため既設の消化槽や実証設備の返流水処理設備では、全量処理を想定した評価ができないことから、全量処理を想定したラボスケールの消化試験と凝集沈殿処理試験をそれぞれ実施した。

湿式炭化ろ液の分解性とバイオガス発生量を評価するため、2系列の50 L ジャー試験装置にて、消化試験を実施した。消化日数25日に相当する濃縮汚泥を投入する対照系と、同量の濃縮汚泥に汚泥全量を湿式炭化処理した場合に相当する量の湿式炭化ろ液を添加した試験系の2系列を設け、有機物の指標である揮発性固形物 (VS) の分解率およびバイオガス量を比較した。この消化試験で得られる試験系の消化汚泥は、汚泥全量処理を模擬したものであり、以下「消化汚泥 (全量処理を模擬)」と呼称する。

返流水処理による放流水の COD (化学的酸素要求量。水中の有機物量を表す水質指標) の上昇抑制を検証するため、消化汚泥 (全量処理を模擬) を固液分離し、上澄みを原水とした凝集沈殿処理試験を実施して、COD 除去率を求めた。pH 調整には硫酸を使用し、凝集剤として塩化第二鉄を使用した。

3. 結果

3.1 湿式炭化による炭化物含水率と燃料化物の JIS 規格適合性の検証

図3に脱水汚泥、炭化物および燃料化物の含水率を示す。含水率約80%の脱水汚泥から、含水率約

30～40%の炭化物が得られた。これは、脱水汚泥中の水分の約9割が蒸発を伴わずに除去されたことに相当する。さらに、養生処理によって炭化物の水分を調整した結果、下水汚泥固形燃料 (JIS Z 7312) の基準を満足する、含水率20%以下の燃料化物が得られることを確認した。

図4に燃料化物の高位発熱量 (含水率20%換算) を示す。高位発熱量は平均で14 MJ/kg-wet であり、JIS Z 7312の BSF (8 MJ/kg-wet 以上) を余裕をもって満足することを確認した。

3.2 燃料化物の自己発熱性の評価

表2に養生工程後の燃料化物の OCR の結果を示す。いずれも亜瀝青炭相当の OCR である 5 mg-O₂/(g-DS・日) 相当²⁾ よりも低い値であった。よって、養生ホッパで炭化物に空気を通風することで、自己発熱性の低い燃料化物が得られることを確認した。

3.3 湿式炭化ろ液の分解性およびバイオガス発生量の評価

図5に、小型消化試験における濃縮汚泥と湿式炭化ろ液の VS 投入量および処理結果を示す。湿式炭化ろ液由来の VS 分解率は65%であり、湿式炭化ろ液の有機物が分解することを確認した。

また、有機物の分解に伴い発生するバイオガスの量についても比較した結果、湿式炭化ろ液を添加した試験系では、非添加の対照系に対してバイオガス発生量が5.6%増加 (湿式炭化ろ液の VS および添加量による補正後では6.3%) することも確認した。

3.4 返流水処理による放流水 COD の上昇抑制確認

図6に凝集沈殿処理試験の結果を示す。pH 5 に調整した場合および pH 調整なしの場合ともに、消化脱水ろ液の COD を除去できることを確認した。ここで、COD 除去率25%は、放流水 COD の上昇を 1 mg/L 以下に抑えられたことに相当する。

表2 燃料化物のOCR [mg-O₂/(g-DS・日)]

冬季	春季					夏季
R6.2.16	R6.3.14	R6.3.27	R6.4.11	R6.5.23		R6.9.10
4.4	2.8	0.53	1.9	2.7		0.30

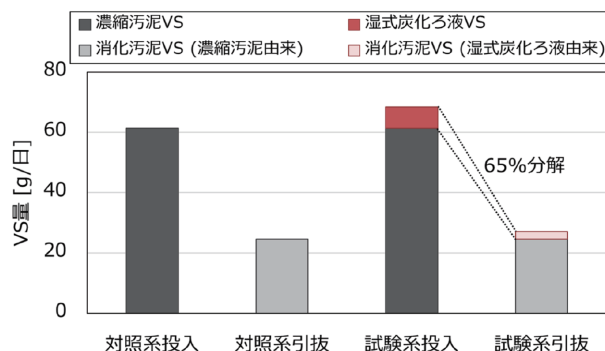


図5 濃縮汚泥と湿式炭化ろ液のVS投入量と処理結果

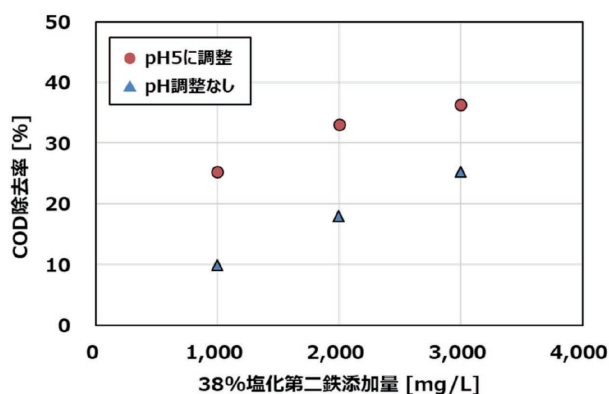


図6 消化脱水ろ液の凝集沈殿試験結果

表3 各試算の対象プロセス範囲

	主ポンプ 水処理	汚泥 処理	汚泥 燃料化	バイオガス 利用	汚泥 燃料利用	検証項目
エネルギー 収支	-	-	○	-	○	燃料化のエネルギー自立
CO ₂ 収支	○	○	○	○	○	下水処理のCO ₂ 収支≤0

表4 試算条件

項目	条件
試算規模	投入汚泥処理量：25 t-wet/日
脱水汚泥（消化汚泥）※1	含水率：81% 高位発熱量：17.23 MJ/kg-dry
CO ₂ 排出係数 ※2	電気：0.00025 t-CO ₂ /kWh 都市ガス：0.00223 t-CO ₂ /m ³ 石炭：2.33 t-CO ₂ /t
温暖化係数 ※3	CH ₄ ：28, N ₂ O：265
主ポンプ/水処理/汚泥処理（燃料化除く）必要エネルギー ※2	
比較技術必要エネルギー ※4	

※1：実証結果等に基づき設定
 ※2：下水道における地球温暖化対策マニュアル等
 ※3：地球温暖化対策推進法施行令
 ※4：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—平成29年度版—
 下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書等

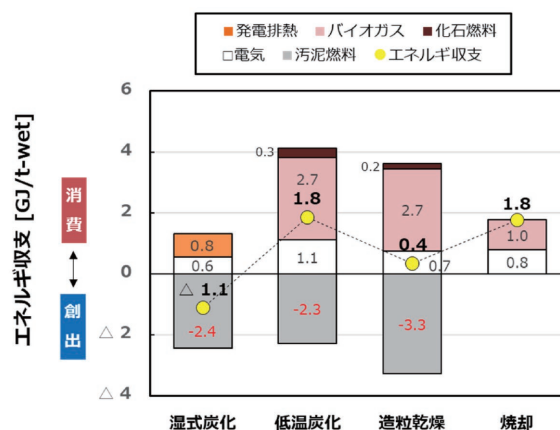


図7 エネルギー収支

4. 下水処理場への導入効果試算

4.1 試算方法

湿式炭化による汚泥燃料化のエネルギー収支、CO₂収支を試算した。燃料化物のエネルギーとその製造に要するエネルギー、および下水処理場の運転で発生するCO₂と汚泥燃料やバイオガス利用によるエネルギー回収により削減されるCO₂の関係を検証・評価するとともに、従来技術である低温炭化、造粒乾燥および焼却との比較を行った。全ての技術において既設の消化槽があることを前提として、消化脱水汚泥を燃料化の対象として試算した。各試算が対象とするプロセスの範囲を表3に、試算条件を表4に示す。試算における処理規模（投入汚泥量）のベース条件は、国内で比較的処理場数が多い範囲を考慮し、日平均25 t-wet/日とした。

4.2 試算結果

4.2.1 湿式炭化のエネルギー自立と発電排熱による熱自給

図7にエネルギー収支を示す。燃料化に必要な熱、電気（一次エネルギー換算値を計上）および製造した汚泥燃料が生み出す発熱量からエネルギーを試算した結果、湿式炭化において、汚泥燃料のエネルギーが燃料化に要するエネルギーを上回り（エネルギー収支<0）、燃料化のエネルギー自立が可能であることが示された。

また、低温炭化、造粒乾燥、焼却などの蒸発による水分除去が必要なプロセスの熱エネルギーより、圧搾による水分除去が可能な湿式炭化の方が、必要な熱エネルギーが小さいことが示された。さらに、湿式炭化において熱収支を試算したところ、発電機から

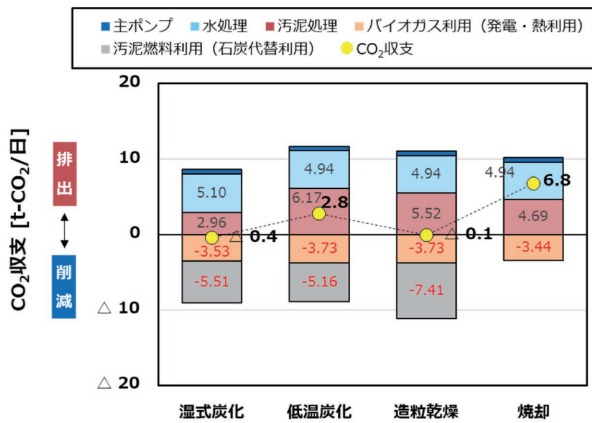


図8 CO₂収支

回収可能な排熱の合計は、消化槽加温熱量および燃料化工程（湿式炭化＋養生）に要する熱量の総和を上回ると試算された。よって、汚泥処理（消化および燃料化）に必要な熱は、発電排熱により自給可能であることが確認された。

4.2.2 湿式炭化導入による下水処理のCO₂収支

図8に、処理場外での燃料化物利用を含む下水処理のCO₂収支の試算結果を示す。消化との組み合わせにより、下水処理（水処理、汚泥処理および主ポンプ）に伴う温室効果ガス排出量を上回る排出削減量が得られ、下水処理のCO₂収支 ≤ 0 の実現が可能であると試算された。これは、湿式炭化の必要なエネルギーが小さいことにより、汚泥処理に伴うCO₂排出量が抑制されるためと考えられる。

5. 炭化物の肥料利用

炭化物の肥料利用の可能性を検証するために、公定規格である菌体りん酸肥料の規格に基づき、肥効成分（りん酸）および重金属の含有量を測定するとともに、植害試験を実施した。

表5に、各シーズンにおける炭化物の肥効成分（りん酸）および重金属の含有量を示す。これらの結果は公定規格である菌体りん酸肥料の基準値をいずれも満足した。さらに、炭化物を用いた植害試験の結果（写真3）、植害は認められず、肥料登録の届出が可能であることを確認した。

表5 菌体りん酸肥料基準値との比較

	単位	基準値	冬季 R6.2.13	春季 R6.4.11	夏季 R6.9.10	秋季 R6.11.15
りん酸全量	%	≥ 1.0	5.36	7.76	11.6	8.18
As	mg/kg-DS	≤ 50	9.6	7.2	3.9	6.2
Cd		≤ 5	0.8	0.8	0.8	1.1
Hg		≤ 2	0.15	0.26	0.44	0.20
Ni		≤ 300	32	27	34	41
Cr		≤ 500	44	34	49	68
Pb		≤ 100	14	14	16	16

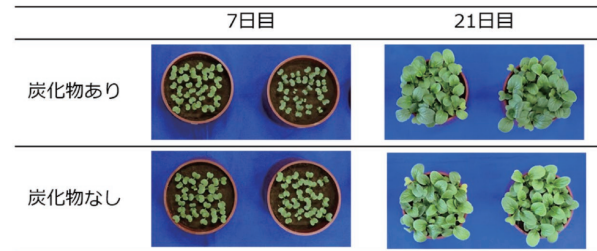


写真3 植害試験の発芽・生育状況の様子

むすび

本研究では、下水処理場に実証設備を設置し、湿式炭化による下水汚泥の利活用技術の実証を行った。湿式炭化技術はエネルギー自立性・温室効果ガス削減の面で優位性を有し、下水処理場と地域双方の脱炭素化、ならびにリン循環の促進に資することが示された。本技術は2025年3月にJSの新技術I類に選定されており、今後JS受託建設事業等への導入が見込まれる。本技術の普及促進に努め、2030年度温室効果ガス削減目標達成、および2050年カーボンニュートラル実現に貢献することをめざす。

最後に、本技術の共同研究者である日本下水道事業団ならびに、フィールドの提供をはじめ試験実施にご協力をいただいた富士市上下水道部関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) Tengfei Wang et al.: "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Vol. 90 (2018), p223-247
- 2) 朴ら：R&D 神戸製鋼技報, Vol.64, No.1 (2014)