

下水汚泥燃料の自然発熱性低減技術の実証

Demonstration of Technology to Reduce Self-Heating in Sewage Sludge Fuel

島村育幸*・福富裕太*・竹田尚弘**

Yasuyuki Shimamura・Yuta Fukutomi・Naohiro Takeda

本研究では、下水汚泥燃料の自然発熱性を低減する養生処理技術の実証試験を実施し、安全な利用に向けた技術的知見を得た。加湿空気の温度、流量、湿度および汚泥燃料の初期含水率を適切に制御することで、酸化反応による温度上昇を抑制し、酸素消費速度（OCR）を亜瀝青炭並みに低減できることを確認した。本技術は、下水汚泥燃料の安定供給と脱炭素化の両立に貢献するものであり、今後の社会実装に向けた有効な手段となる。

This study conducted a demonstration test of an aging process to reduce the self-heating of sewage sludge fuel, aiming to ensure its safe utilization. By appropriately controlling the temperature, flow rate, and humidity of humidified air, as well as the initial moisture content of the fuel, it was confirmed that temperature rise due to oxidation can be suppressed and the oxygen consumption rate (OCR) reduced to the level of sub-bituminous coal. This technology contributes to both stable fuel supply and decarbonization, and offers a practical solution for future implementation.

Key Words :

下水汚泥燃料
自然発熱性
養生処理
加湿空気制御

Sewage sludge fuel
Self-heating
Aging process
Humidified air control

【セールスポイント】

- ・下水汚泥燃料の自然発熱性を、亜瀝青炭と同等の水準まで低減
- ・養生処理中の下水汚泥燃料の温度上昇を、加湿空気制御により効果的に抑制

まえがき

近年、2050年カーボンニュートラルの実現に向けた取組みが国内外で加速しており、日本政府も「グリーン成長戦略」や「新下水道ビジョン」などを通じて、再生可能エネルギーの導入拡大と廃棄物資源の有効活用を推進している。特に国土交通省は、下水道分野における温室効果ガス排出量の削減を目指しており、令和4年度には「下水道脱炭素化推進事業」を創設し、下水汚泥の炭化処理による固形燃料化を含むエネルギー利用の促進を図っている¹⁾。

こうした政策的背景のもと、下水汚泥を炭化処理して得られる下水汚泥燃料（以降、汚泥燃料と記載）は、石炭代替燃料として発電所での利用が進んでおり、資源循環と温室効果ガス削減の両面で高い効果が期待されている。

一方で、汚泥燃料は、100℃以下の低温度域においても酸化反応により発熱が進行するという自然発熱性を有しており²⁾、製品として取り扱う際に十分な注意が必要である。令和4年12月3日には、大阪市の下水汚泥固形燃料化施設において、汚泥燃料を貯留するホッパ内にて少量の汚泥燃料の異常発熱により可燃性ガスが発生し、さらに発熱した汚泥燃料自体が着火源となり、爆発事故が発生した例も報告されている³⁾。

このような事故事例も踏まえ、汚泥燃料の安全な利用に向けて、自然発熱性の低減処理や、貯留、搬送を含むハンドリング方法の確立は、より一層重要な課題となっている。

当社では、電熱スクリュ式炭化炉を用いた下水汚泥からの汚泥燃料化技術の開発を進めており⁴⁾、今

*環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水環境技術部 脱炭素技術室

**技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

後下水処理場で製造した汚泥燃料を石炭代替燃料として発電に利用する計画である。この汚泥燃料の自然発熱性低減技術を確認すべく、当社技術研究所に実証設備を設置し、実証試験を実施した。

本報では、本実証試験結果、および試験を通じて得られた汚泥燃料の安全利用に向けた技術的知見について報告する。

1. 汚泥燃料の自然発熱性とその低減技術

1.1 汚泥燃料の自然発熱性

汚泥燃料の自然発熱は、燃料表面の活性点（メチレン基、アルキル基などの不安定な活性点）が酸化反応することで起こりうる。またこの反応は、時間経過と共に活性点が安定化していくことで低下することが知られている²⁾。一例として、本報の実証試験で使用した自然発熱性低減前の汚泥燃料の酸素消費速度 OCR（Oxygen Consumption Rate）の経時変化を図1に示す。ここで OCR とは、汚泥燃料の単位重量、単位時間あたりの酸素消費量を表しており、酸素消費量に比例して酸化発熱することから、自然発熱性の程度を示す指標となる。図1より空気と接触させる時間の経過とともに OCR が低減することを確認できる。このような汚泥燃料の特性により、汚泥燃料と酸素を反応させることで自然発熱性を低減させることができる。

1.2 自然発熱性低減技術（養生処理）

当社では、汚泥燃料を酸素と十分に反応させるための設備として、炭化炉の後段に養生ホッパを導入した。図2に養生ホッパの概略図を示す。養生ホッパは、下部から加湿空気を供給し、上部から排気できる構造を有している。汚泥燃料は、養生ホッパ上部から供給されて、ホッパ内で一定期間（通常3～4日間）滞留した後、ホッパ下部から排出される。この滞留期間で、汚泥燃料を加湿空気中の酸素と十分に接触させることで、自然発熱性を低減できる。

一方で、汚泥燃料の酸化反応によりホッパ内で汚泥燃料が発熱するため、処理中の発熱を抑制する必要がある。そこで、養生処理プロセスでは、加湿空気温度、流量、湿度およびホッパに投入する汚泥燃料の初期含水率を適切に制御することで、汚泥燃料の酸化反応を促しつつ、発生する熱量を汚泥燃料中の水分の蒸発潜熱によって相殺する。これにより、汚泥燃料の自然発熱性低減と養生処理中の発熱抑制を両立することが可能となる。

以上を踏まえ、下記2点を目的に本実証試験を実施した。

- ①養生処理中の汚泥燃料の発熱を抑制可能な加湿空気および汚泥燃料の初期含水率の制御指針を

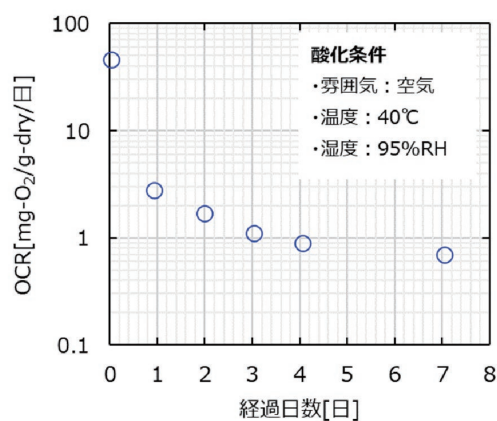


図1 汚泥燃料の OCR 経時変化

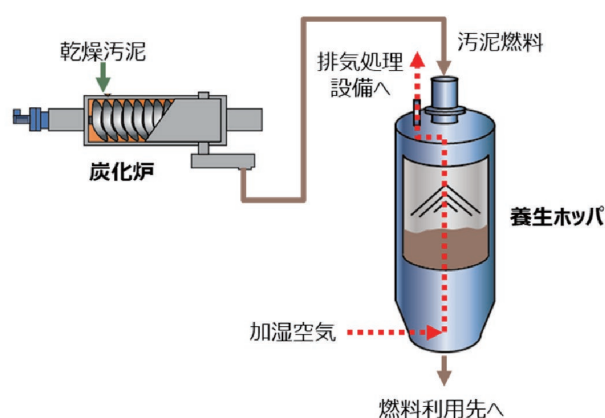


図2 養生ホッパの概略図

確立すること

- ②養生処理によって汚泥燃料の OCR を、市場で広く受け入れられている亜瀝青炭並みの水準（1.3～5.3 mg-O₂/g-dry / 日⁵⁾）まで低減すること

2. 実証試験

2.1 試験設備

本実証設備は、養生ホッパ実証機、加湿空気製造設備、およびホッパ内での異常発熱を抑制するための安全対策設備で構成されている。

図3および4に当社技術研究所内に設置した養生ホッパ実証機の外観写真および機器構成を示した。実証機は、所定の含水率に調製した汚泥燃料を供給ホッパを通じて養生ホッパ内に投入し、ホッパ下部から排出できる構造とした。また、ホッパ下部から上部にかけて加湿空気を通気できるように、加湿空気の供給口と排気口をそれぞれ設けた。

さらに、ホッパ内の汚泥燃料層温度および加湿空気温度を計測するため、熱電対をホッパ内に高さ方向に沿って10点、加湿空気供給口付近に1点設置した。

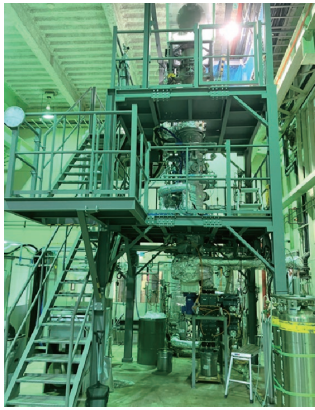


図3 実証機の外観

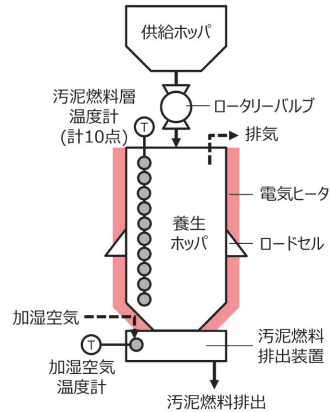


図4 実証機の機器構成

表1 実証機の規模

	実証設備	商用機(一例)
汚泥処理量(定格) [kg-dry/h]	1.52	510
養生空気流量(定格) [m ³ _N /h]	2.5	700
養生ホッパ寸法 [m]	2.5×Φ0.4	16.7×Φ2.8

表2 試験条件

項目			条件No.									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加湿 空気	温度	[℃]	37	41	42	45	41	42	44	41	42	50
	流量	[m ³ _N /h]	2.5	2.5	2.5	2.5	1.1	2.5	3.6	2.5	2.5	2.5
	湿度	[%RH]	92	98	100	100	100	100	100	100	78	80
試験期間		[h]	22	35	122	27	24	128	24	164	122	92

表1に実証機と商用機の設備規模の比較を示した。実証機は商用機と同一形状を維持したままスケールダウンした構造であるが、比較的小型であるため、ホッパ壁面からの放熱の影響を受けやすい。このため、ホッパ壁面には電気ヒータを設置し、内壁面近傍と外壁面の温度を一致させるよう制御することで、放熱の影響を抑制した。

加湿空気製造設備は、汚泥燃料層入口での加湿空気の温度、湿度、流量を個別に制御可能な構成とした。

安全対策設備として、ホッパ下部からの窒素供給設備およびホッパ上部からの散水設備を備えており、万一の温度上昇に対して迅速な対応を可能とした。

2.2 試料

ある下水処理場で製造され、ボイラ燃料や肥料として使用されている乾燥汚泥を当社技術研究所にて炭化処理および調湿処理し、汚泥燃料を製造した。製造後は、常温での酸化による意図しないOCRの低下を防ぐため、酸素不透過性の保管袋に窒素を封入した密封状態で保管した。

2.3 試験条件

本実証試験では、表2に示す10通りの条件で試験を実施した。これらのうち、No.1～4で加湿空気温度、No.5～7で加湿空気流量、No.1～4、8～

10で加湿空気湿度の影響を評価した。

また、養生処理による自然発熱性の低減効果については、No.10で得られた養生後の汚泥燃料を用いて詳細に評価した。

3. 試験結果および考察

3.1 加湿空気が汚泥燃料層温度に及ぼす影響

図5に、加湿空気温度と汚泥燃料層の平均温度との相関を示した。図5より、加湿空気温度と汚泥燃料層の平均温度との間には正の相関が認められた。このことから、加湿空気温度の制御は汚泥燃料層全体の温度調整に有効であると考えられる。

また、すべての試験条件において、汚泥燃料層の上層部が下層部より高温となる傾向が確認された。特に、試験条件によっては上層部と下層部の温度差が顕著に現れる場合と、比較的小さい場合があり、条件に応じた温度分布の違いが示唆された。図6～8には、加湿空気の温度、流量、湿度と汚泥燃料層内の温度差との相関を示し、図9には温度差が大きい条件(No.8)と小さい条件(No.9)における温度分布を示した。図6の結果から、加湿空気温度と温度差との明確な相関は認められなかった。一方図7,8からは、加湿空気の流量が少なく、湿度が高いほど、温度差が大きくなる傾向が確認された。図9に示す温度分布では、湿度が高いNo.8では1～8段目にかけて、湿度が低いNo.9では5～8段目

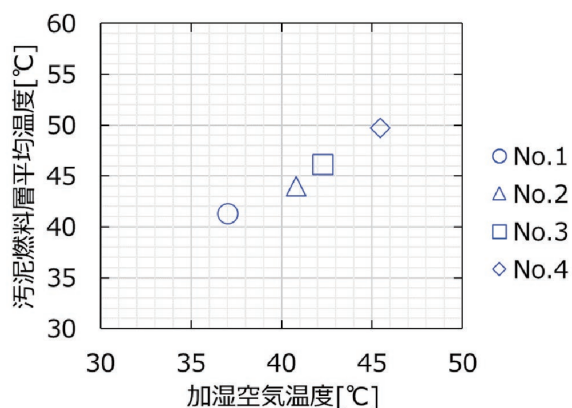


図5 空気温度と汚泥燃料層平均温度

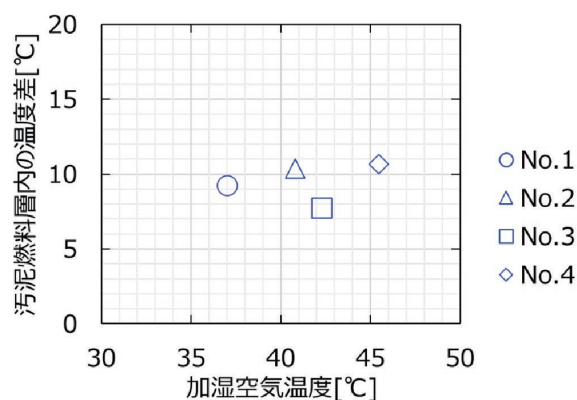


図6 空気温度と汚泥燃料層内の温度差

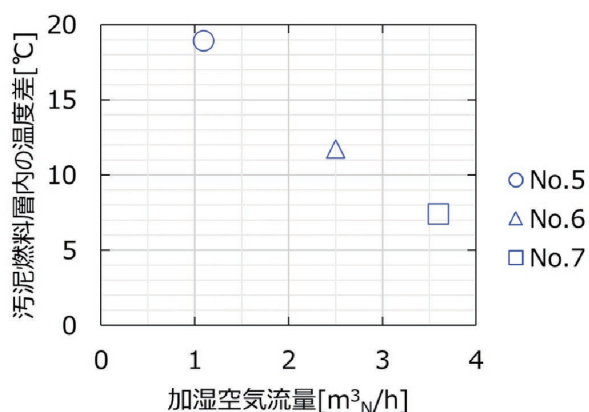


図7 空気流量と汚泥燃料層内の温度差

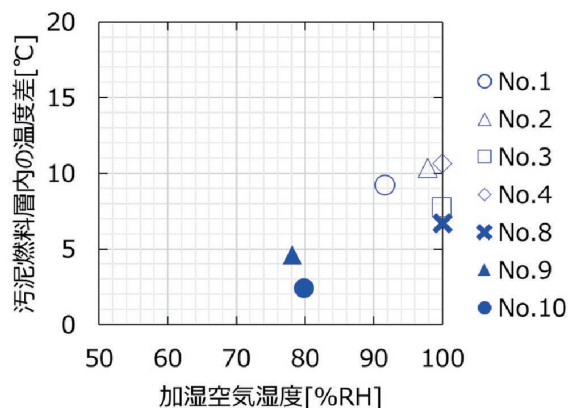


図8 No. 8, 9の汚泥燃料層の温度分布

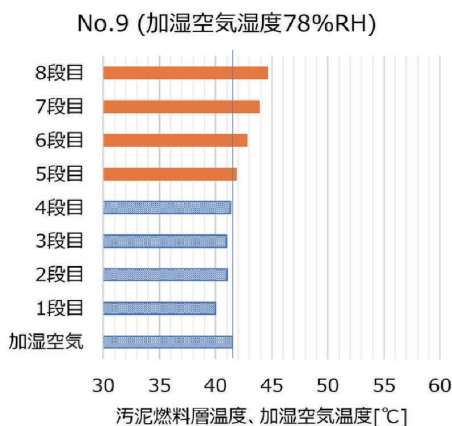
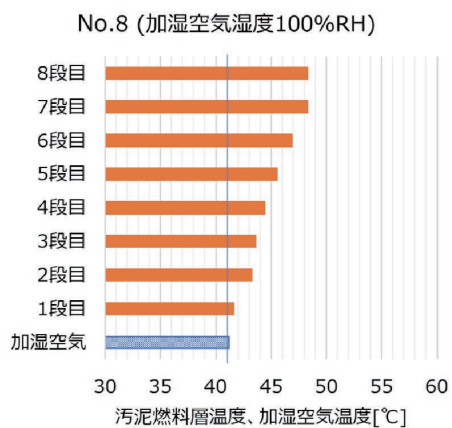


図9 空気湿度と汚泥燃料層内の温度差

にかけて汚泥燃料層温度が上昇する傾向が見られた。

この温度上昇は、汚泥燃料の酸化反応による発熱量が水分の蒸発潜熱によって十分に相殺されず、残余の熱が顕熱として汚泥燃料層に蓄積されたためと考えられる。表3には、汚泥燃料がホッパ内に72時間以上滞留し、排出時の含水率が安定していた試験条件（No. 3, 6, 8, 9, 10）における、養生前後の含水率を示した。なお、含水率は乾燥重量基準で算出した。表3より、加湿空気湿度が高く温度上昇が大きい条件（No. 3, 6, 8）では、加湿空気湿度が低い条件（No. 9, 10）と比較して、水分の蒸発量が少ない傾向が確認されており、温度上昇との関連性が示唆された。

以上の結果から、養生処理中の汚泥燃料層温度を安定化させるためには、加湿空気の流量および湿度を、汚泥燃料からの水分蒸発を十分に促進可能な条件に設定することが重要であると考えられる。

3.2 養生処理による自然発熱性低減効果

図10には、図1の汚泥燃料のOCR経時変化をElovichモデル⁶⁾で近似した曲線上に、No.10における実際の養生前後のOCR測定値をプロットした。図10に示すとおり、養生処理によりOCRが10.5

表3 養生前後の汚泥燃料含水率

条件No.	含水率[%]		養生前後の含水率差[%pt]
	養生前	養生後	
3	17.7	16.2	1.5
6	12.5	11.1	1.4
8	18.6	17.0	1.5
9	17.7	15.3	2.4
10	17.6	14.7	2.9

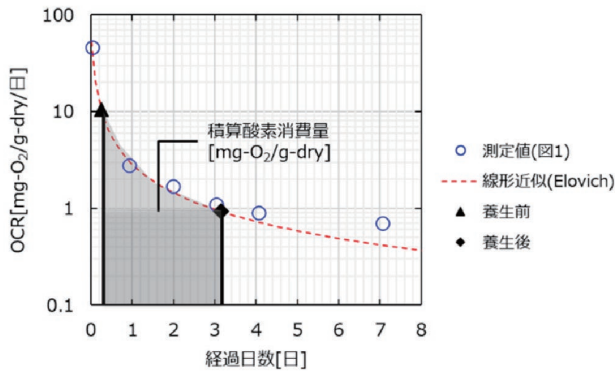


図10 養生処理での汚泥燃料の積算酸素消費量（模式図）

mg-O₂/g-dry/日から0.93 mg-O₂/g-dry/日（反応温度40℃）へと大幅に低減したことが確認された。亜瀝青炭のOCRは反応温度30～50℃の範囲で1.3～5.3 mg-O₂/g-dry/日⁵⁾であることから、本養生プロセスにより汚泥燃料の自然発熱性を亜瀝青炭と同等以下のレベルまで抑制できる可能性が示唆された。

4. 初期含水率および加湿空気条件の制御指針

3項までの試験結果から、養生処理中の汚泥燃料の発熱を抑制するためには、酸化反応による発熱量を把握したうえで、それを相殺できるだけの蒸発潜熱が得られるよう、汚泥燃料の初期含水率と加湿空気の条件を適切に設定する必要があると考えられる。

4.1 初期含水率条件

まず、養生処理前後のOCR変化をもとに、養生期間中に発生した酸化反応による発熱量を試算するため、図10より養生処理中に汚泥燃料が消費した積算酸素消費量を求めた。解析の結果、養生処理中の汚泥燃料の積算酸素消費量は7.2 mg-O₂/g-dryと算出された。

この積算酸素消費量に対し、酸化発熱係数を石炭と同等の8 000 kJ/kg-O₂⁷⁾、水の蒸発潜熱を2 260 kJ/kg-H₂Oと仮定した場合、(1)式より、養生処理中の酸化反応による発熱によって蒸発した水分量は、汚泥燃料の含水率の約2.6%ptに相当すると試算さ

れた。この試算結果は、表3に示したNo.10の養生前後の含水率の測定結果と概ね一致しており、試算の妥当性が裏付けられた。

蒸発量相当の含水率 [%]=

$$\frac{\text{積算酸素消費量 [kg-O}_2\text{/kg-dry}] \times \text{酸化発熱係数 [kJ/kg-O}_2\text{]}}{\text{蒸発潜熱 [kJ/kg-H}_2\text{O}]} \times 100 \dots (1)$$

さらに、上記試算結果を踏まえ、養生処理プロセスにおける汚泥燃料の初期含水率の必要条件を検討した。本実証試験で使用した汚泥燃料の水蒸気吸脱着等温線を図11に示す。なお、水蒸気吸脱着等温線とは、測定対象が一定温度下で水蒸気を吸着および脱着する際の相対湿度に対する吸着量の変化を示す曲線である。図11より、汚泥燃料が100%RHの雰囲気下において含水率5.8%を下回る場合、水分の蒸発が困難となるため、酸化反応による発熱により周囲の湿度を低下させつつ、脱着線に沿って含水率がさらに低下することが予想される。したがって、養生処理中の酸化発熱による温度上昇を抑制するためには、汚泥燃料が少なくとも8.4% (=5.8% + 2.6%pt) 以上の初期含水率を有することが必要と考えられる。

4.2 加湿空気条件

汚泥燃料の発熱を抑制するためには、汚泥燃料が十分な初期含水率を有していることに加え、汚泥燃料中の水分が滞りなく蒸発できるような加湿空気条件設定も重要である。特に、養生ホッパ内に供給される加湿空気湿度が100%RHである場合、空気中の水蒸気量が飽和しているため、汚泥燃料が水分を保持していたとしても蒸発が進まず、結果として汚泥燃料の温度上昇を招く可能性がある。このため、加湿空気は、汚泥燃料から蒸発する水分を十分に受入れ可能な状態、すなわち加湿空気湿度に余裕がある状態で供給される必要がある。

そこで、第4.1章で求めた汚泥燃料からの蒸発量相当の含水率をもとに、以下の(2-1)式および(2-2)式を用いて、汚泥燃料からの蒸発水分量および、それを受入れ可能な加湿空気湿度を試算した。試算に用いた条件は、表4に示した。

汚泥燃料からの蒸発水分量 [g/h]=

$$\text{汚泥燃料処理量 [g-dry/h]} \times \frac{\text{蒸発量相当の含水率 [\%pt]}}{100} \dots (2-1)$$

蒸発水分を受入れ可能な加湿空気湿度 [%RH]=

$$100 - \frac{\text{汚泥燃料からの蒸発水分量 [g/h]} \times 100}{50^\circ\text{Cの飽和水蒸気量 [g/m}^3\text{]} \times \text{加湿空気流量 [m}^3\text{/h]}} \dots (2-2)$$

試算の結果、汚泥燃料からの蒸発水分量を十分に受

入れ可能な加湿空気湿度は84%RH以下と算出された。この結果は、本実証試験において加湿空気湿度を80%RHに設定した条件下で、汚泥燃料の温度上昇が抑制されたという結果と整合しており、試算の妥当性が確認された。

なお、汚泥燃料の性状（積算酸素消費量、水蒸気吸脱着等温線）は、汚泥処理に使用する凝集剤等の影響により、下水処理場毎に大きく異なる場合がある。そのため、下水処理場毎にそれらを分析したうえで、上記と同様の手順で、汚泥燃料の初期含水率と加湿空気条件を決定する必要がある。

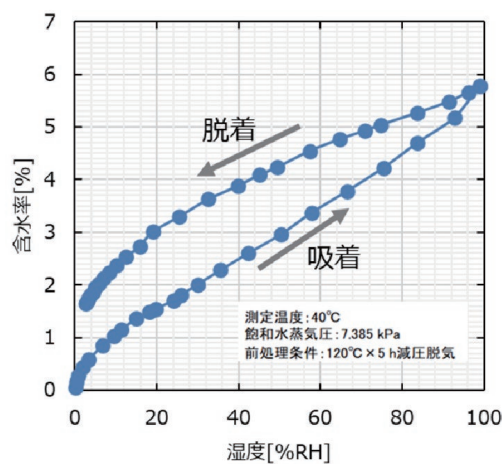


図11 汚泥燃料の水蒸気吸脱着等温線

表4 汚泥燃料からの蒸発水分を受入れ可能な加湿空気湿度の試算条件

項目			数値
汚泥燃料	処理量	[g-dry/h]	1520
	蒸発量相当の含水率	[%pt]	2.6
加湿空気	温度	[℃]	50
	流量	[m³/h]	2.5
	50℃の流量	[m³/h]	3.0
	50℃の飽和水蒸気量	[g/m³]	83

むすび

本実証試験により、下水汚泥燃料の養生処理に関して、以下の2点の知見を得た。

- ①養生処理中の汚泥燃料における酸化反応による温度上昇を抑制するための、加湿空気条件および初期含水率の制御指針を確立した。
- ②養生処理を施すことで、汚泥燃料の自然発熱性を亜瀝青炭と同程度まで低減できることを確認した。

これらの成果により、汚泥燃料の安全な製造・貯留・搬送が可能となり、石炭代替燃料としての実用性が向上することが示された。

得られた知見は、現在当社が建設を進めている兵庫東流域下水汚泥広域処理場、琵琶湖湖南中部浄化センター、福知山終末処理場の下水汚泥燃料化プラントにおける安全かつ安定した汚泥燃料製造の実現に寄与し、下水汚泥の有効利用と脱炭素化の両立に向けた社会実装を加速するものと期待される。

なお、本研究の遂行にあたり、多大なるご協力を賜りました、委託研究先の(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室の皆様、ならびに(株)アントレポの重久様に深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 国土交通省：令和5年度 第一回エネルギー分科会 資料5「国土交通省における脱炭素に向けての取組について」, (2023年), p.15
- 2) 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), p.8
- 3) (株)バイオコール大阪平野：「大阪市平野下水処理場汚泥固形燃料化事業施設内における爆発事故 事故原因と再発防止策および施設の再稼働に向けての取組み」, (2023年)
- 4) 竹田尚弘ら：神鋼環境ソリューション技報, Vol. 18, No.1, (2021年), p.2-7
- 5) 朴海洋ら：神戸製鋼技報, Vol. 64, No.1, (2014年), p.24
- 6) Wu, F.-C. et al.: Chemical Engineering Journal, 150, (2009年) p.366
- 7) 池田志保ら：日本エネルギー学会石炭科学会議発表論文集 (Web), 59, (2022年), p.27