

## 〈研究発表〉

全国の下水汚泥焼却プロセスにおける補助燃料使用および  
クリンカ発生状況の把握谷 藤 溪 詩<sup>1)</sup>, 宮 本 豊 尚<sup>1)</sup>, 重 村 浩 之<sup>2)</sup>高 岡 昌 輝<sup>3)</sup>, 岡 安 祐 司<sup>1)</sup><sup>1)</sup> (国研)土木研究所 材料資源研究グループ

(〒305-8516 つくば市南原1-6 E-mail: recycle-imarrc21@pwri.go.jp)

<sup>2)</sup> (前) (国研)土木研究所 材料資源研究グループ

(〒305-8516 つくば市南原1-6 E-mail: recycle-imarrc21@pwri.go.jp)

(現) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部 下水処理研究室

<sup>3)</sup> 京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 環境デザイン工学講座

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1-3-461 E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp)

## 概 要

焼却プロセスは主要な汚泥処理の一つであるが、その補助燃料は下水処理場における温室効果ガス排出の一因となっている。本研究では、従来の補助燃料とは別の廃棄物由来等のエネルギーを利用することを目指し、全国の下水処理場に焼却炉が設置されている公共団体を対象にアンケート調査を実施して焼却炉の現状を調査した。負荷率の低い炉では補助燃料使用量が増加する傾向があった。また、汚水処理において高度処理を行っている処理場のうち、流動床焼却炉フリーボード部を高い温度で運用している炉はクリンカが発生しやすい傾向であった。

キーワード：焼却炉，補助燃料，負荷率，クリンカ

原稿受付 2022.6.28

EICA: 27(2・3) 125-129

## 1. は じ め に

現在、全国の下水処理場(Wastewater treatment plants; WWTPs)で発生する汚泥の約半数の量は焼却され焼却灰としてリサイクルされており、焼却プロセスは主要な汚泥処理方式の一つである。近年では人口減少に伴い、汚泥発生量が減少している処理場も存在する。これに伴い、焼却炉の設計能力に対して汚泥の投入量が少ない処理場も存在する。その場合は焼却プロセスでの補助燃料使用量を多くする必要があり、下水処理場における温室効果ガス排出の一因となっている。下水汚泥焼却炉の補助燃料として主に利用されているものは、重油などの化石燃料や消化ガスがある。

従来の補助燃料とは別の余剰エネルギーもしくは代替エネルギーを利用することができれば、温室効果ガスの排出を削減することができる。環境負荷が低い新しい補助燃料としては剪定枝、木質ペレット等のバイオマスや廃プラスチック、廃タイヤ等の廃棄物由来の固体燃料が想定される。本研究では、このような代替燃料を次世代補助燃料と呼ぶ。

既往の報告において下水汚泥とその他の可燃物を混焼し、補助燃料として代替した事例がいくつかある。特に木質系バイオマスと下水汚泥の混合焼却については実際に運用された実績があり、間伐材である杉の

チップを補助燃料として利用した事例<sup>1)</sup>がある。その他にもおがくず<sup>2)</sup>、微粉炭<sup>3,4)</sup>、建築廃木材<sup>5)</sup>、木質バイオマス<sup>6,7)</sup>および刈草<sup>8)</sup>について実証研究レベルで検討された報告がある。また、プラスチック類を助燃材として運転を実施している例<sup>9,10)</sup>もある。混焼に関する既往の報告では、実運転や実証規模の炉において、焼却システムが問題なく機能することと、その効果の検証(特に補助燃料としての重油等の削減効果)が行われてきた。

一方で、次世代補助燃料の利用を進めると、焼却炉におけるクリンカ発生リスクが懸念される。従来から下水汚泥焼却炉におけるクリンカ生成についてはいくつかの事例が報告<sup>11-13)</sup>されており、焼却炉の運転に悪影響を及ぼすことが分かっている。クリンカの生成は、脱水汚泥中に含まれるリンの濃度が、汚水処理における高度処理の影響等で増加することにより焼却灰の融点が低下し、灰や流動砂を結合させて塊状の物質を生成することが一因と言われる。また木質バイオマスを燃料としているバイオマス発電所においてもクリンカの発生が報告されているが、その原因物質としてカリウムの存在が指摘されている<sup>14)</sup>。

本研究では、次世代補助燃料の適用を目指す上での基礎的知見となる下水汚泥焼却プロセスの現状を把握するため、全国の下水汚泥焼却炉が設置されている公

共団体を対象にアンケート調査を実施した。特に流動床焼却炉に注目し、第一に、流動床焼却炉に投入される補助燃料（A 重油）のエネルギー量について調査した。第二に、流動床焼却炉内の温度と高度処理を行っている場合のクリンカ発生の有無について調査した。

## 2. 調査方法

アンケート調査は焼却炉を設置している全国の処理場（245 基）を対象とした。回答は全ての焼却炉から得たが、休止中等の炉が 21 基あり、回答を得られた炉は 224 基であった。炉の種類については、流動床焼却炉、多段吹込燃焼式流動床炉、二段燃焼式循環流動床焼却炉、多段焼却炉、階段ストーカー炉、回転乾燥焼却炉、ガス化炉、過給式流動床炉およびその他の中から選択式として回答を求めたが、最も多い回答は流動床焼却炉で 192 基であった。

本研究の補助燃料のエネルギーに関する調査では、最も回答の多かった流動床焼却炉で且つ補助燃料として A 重油を単独で平常運転時に使用する焼却炉を対象とした。燃料の低位発熱量はアンケート回答を用いたが、回答がない場合や高位発熱量と思われる回答については、A 重油：36.7 MJ/L<sup>15)</sup>とした。燃料の使用量にその低位発熱量を乗じてエネルギー（GJ）に換算した。汚泥由来のエネルギー量については、汚泥の年間焼却量（wet-t）に汚泥の低位発熱量（MJ/wet-t）を乗じて求めた。次に、式（1）により、全投入エネルギーに対する補助燃料の割合（%）を算出した。

$$R = E1 \div (E1 + E2) \times 100 \quad \dots (1)$$

ここで、

R： 全投入エネルギーに対する補助燃料の割合 [%]

E1： 補助燃料（重油）の年間投入エネルギー [GJ]

E2： 汚泥の年間投入エネルギー [GJ]

である。

負荷率は式（2）に従い求めた。

$$L = W \div (C \times D) \times 100 \quad \dots (2)$$

ここで、

L： 負荷率 [%]

W： 実際の汚泥処理量 [wet-t/年]

C： 設計汚泥処理能力 [wet-t/日]

D： 実運転日数 [日/年]

である。

本研究のクリンカ発生についての調査では、高度処理を行っている処理場の汚泥にリンが蓄積していると予想し、高度処理を実施している処理場で且つ重油の

みを補助燃料として使用している焼却炉を対象とした。流動床焼却炉の温度については、砂層部とフリーボード（FB）部について回答を求めたが、砂層部が FB 部の温度を上回る回答や 1000℃ を超える回答は不適と判断して除外した。また、高度処理実施の有無は H30 年度下水道統計の記載<sup>16)</sup>によって抽出した。統計学的検討は、Welch の *t* 検定を用い、有意水準を 5% ( $p < 0.05$  で有意差あり) とした。

## 3. 結果と考察

### 3.1 流動床焼却炉における補助燃料使用状況

流動床焼却炉（192 基）を対象に、定常運転時に使用している補助燃料の種類を整理した。その結果を Fig. 1 に示す。重油を使用している炉が多く、次いで都市ガス・LPG を使用している炉が多かった。消化を行っている場合は消化ガスを補助燃料として利用している炉もあった。また複数の燃料を併用している炉はいずれも消化ガスとその他の燃料を併用していた。

重油を使用している炉は 84 基であり、このうち汚泥の低位発熱量の回答があった炉は 49 基であった。

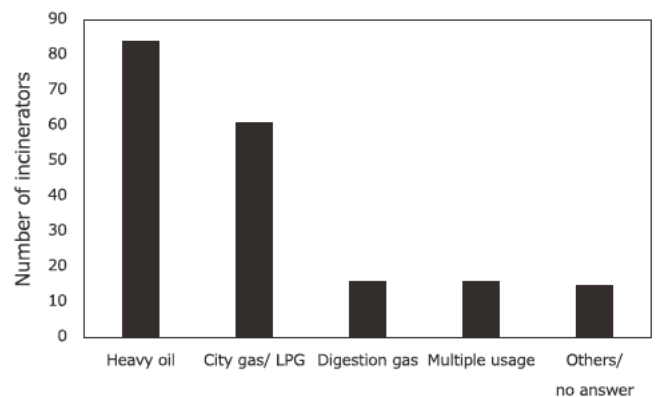


Fig. 1 Types of auxiliary fuel used during normal operation of fluidized bed incinerator.

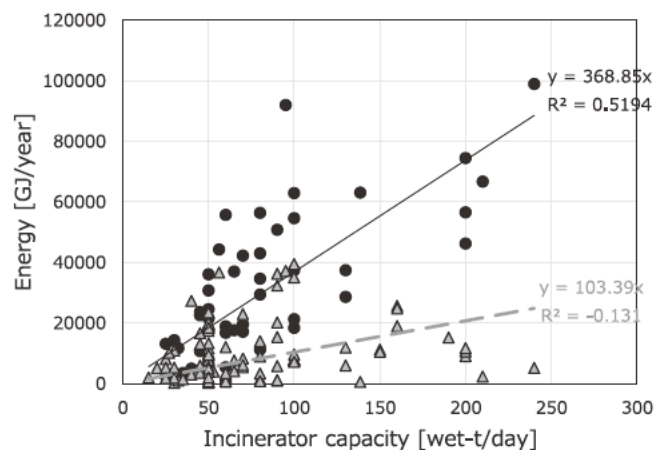


Fig. 2 The relationship between incinerator capacity and both heavy oil and total input energies.

Legends: ●, —; Sludge + Heavy oil and ▲, - -; Heavy oil.

重油および汚泥と重油の合計エネルギー量と設計処理能力との関係を Fig. 2 に示す。設計能力の増加と共に汚泥および重油の投入エネルギー量も増加する傾向がみられ、それぞれの傾きの値 (汚泥+A 重油: 369 [GJ/wet-t・日/年] および A 重油のみ: 103 [GJ/wet-t・日/年]) から、合計した投入エネルギーに対し、重油が約 25% 分 (≒103÷369×100) に相当していることが示された。

全投入エネルギーに対する重油のエネルギーの割合と、負荷率の関係を Fig. 3 に示す。負荷率が低いと、全投入エネルギーに対する重油の割合が高い傾向が見られた。また、消化汚泥 (一部消化を含む) を焼却する場合には、負荷率が 80% 程度でも、投入エネルギーの 40% 以上を重油で補っている場合も見られた。Fig. 4 に重油のエネルギーの割合と設計処理能力との関係を、Fig. 5 に負荷率と設計処理能力との関係をそれぞれ示す。本研究で得られた全ての回答を対象とした全投入エネルギーに対する重油の割合の平均値は 31.0% であり、Fig. 2 で示した傾きから概算した結果と概ね一致した。また、負荷率の平均値は 76.4% で

あった。しかし、これらの平均値に対して重油の割合が高く、負荷率が低い炉も見られ、特に重油のエネルギーの割合が 30% 以上の炉 (Fig. 4) および負荷率が 70% 以下の炉 (Fig. 5) は 75 t/日未満の炉に多く見られた。Table 1 に生汚泥を焼却している炉を対象とした 75t/日未満とそれ以上の規模の炉における重油の割合と負荷率の平均値の比較を示す。75t/日未満の比較的小さな炉では、それ以上の規模の炉と比較して重油のエネルギーの割合が高く (38.4%)、負荷率は低い (71.1%) 結果であった。また、Welch の t 検定の結果では、どちらも  $p < 0.05$  であり、75t/日未満の炉とそれ以上の能力の炉において有意な差が認められた。

以上のように、負荷率が低い (設計能力に対して汚泥の供給量が少ない) 炉では重油の使用が増加する傾向が見られ (Fig. 3)、特に設計能力が小さい焼却炉では負荷率が低く、重油の割合が高くなる傾向であった (Fig. 4, Fig. 5 および Table 1)。また消化汚泥を焼却している場合には負荷率が高くても、重油の使用が多い傾向であった (Fig. 3)。これらの結果から、焼却炉の規模が小さい処理場や消化によって汚泥の発

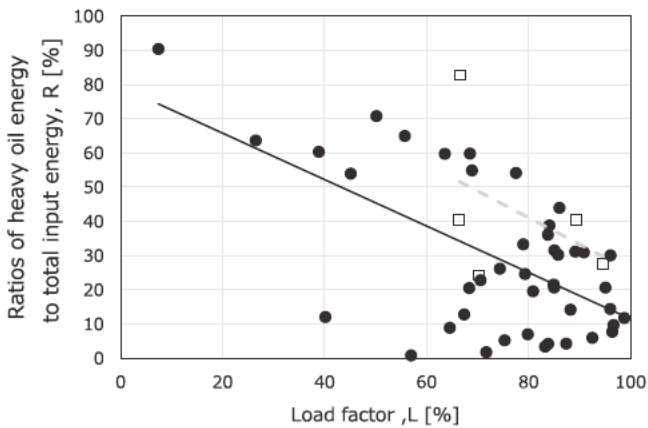


Fig. 3 The relationship between load factor and the ratios of heavy oil energy to total input energy.  
Legends: ●, —; Not digested sludge, □, - - -; Digested sludge

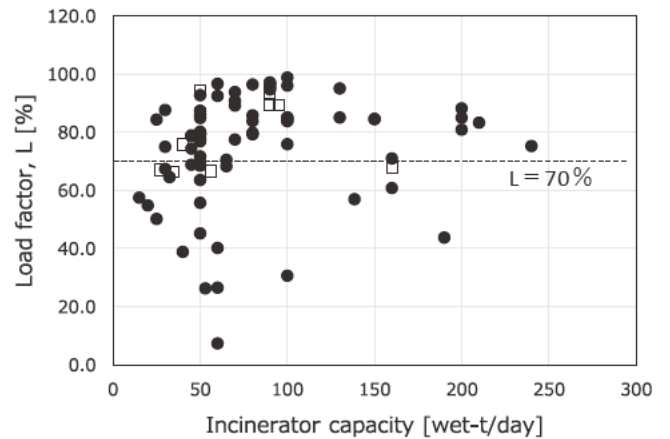


Fig. 5 Incinerator capacity and load factor.  
Legends: ●; Not digested sludge, □; Digested sludge.

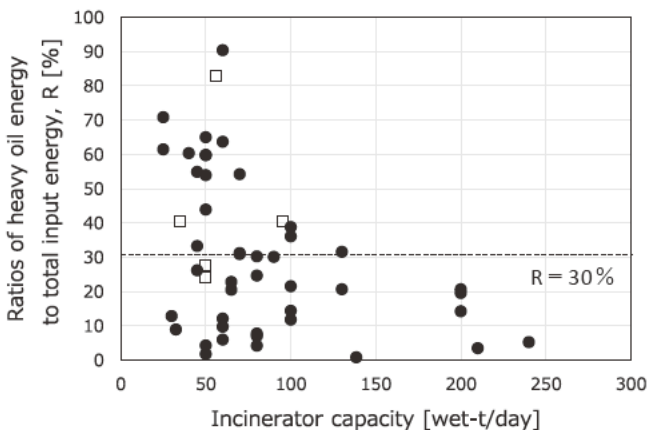


Fig. 4 Incinerator capacity and the ratios of heavy oil energy to total input energy.  
Legends: ●; Not digested sludge, □; Digested sludge.

Table 1 Comparison of the ratios of heavy oil energy to total input energy (R) and load factor (L) between incinerator capacity less than 75 t/day and 75 t/day or over.

		Incinerator capacity	
		less than 75 t/day	75 t/day or over
Ratios of heavy oil energy (R)	Average (%)	38.4	18.1
	Standard deviation	24.7	11.4
	The number of data	25	19
	$p$ value*	0.0108	
load factor (L)	Average (%)	71.1	81.9
	Standard deviation	18.0	15.4
	The number of data	38	31
	$p$ value*	0.0104	

\*: Welch's t-test was used to compare two groups. Difference was assessed with two-side test with a significance level of 0.05.

熱量が低くなっている場合については、特に次世代補助燃料の適用が望まれることが示された。

### 3.2 クリンカ発生経験と高度処理

高度処理を実施している処理場で重油を補助燃料として使用している流動床焼却炉（55基）におけるクリンカ発生経験の有無について集計した。その結果を Fig. 6 に示す。約半数の焼却炉においてクリンカ発生経験があるとの回答であった。次に、これらの流動床焼却炉 FB 部温度の分布を Fig. 7 に示す。クリンカ発生ありと回答した炉の FB 部温度は 860℃ 以上～870℃ 未満の回答が最も多く、クリンカ発生なしと回答した炉の範囲（840℃ 以上～850℃ 未満）よりも高い温度であった。尚、クリンカ発生ありと回答した炉の平均値は 864℃（中央値 862℃）であり、クリンカ発生なしと回答した炉の平均値は 856℃（中央値 854℃）であったが、 $p > 0.05$  ( $p = 0.19$ ) であり、有意な差ではなかった。ただし、高度処理を行っている処理場においては、高い FB 部温度で運転している炉ほど、

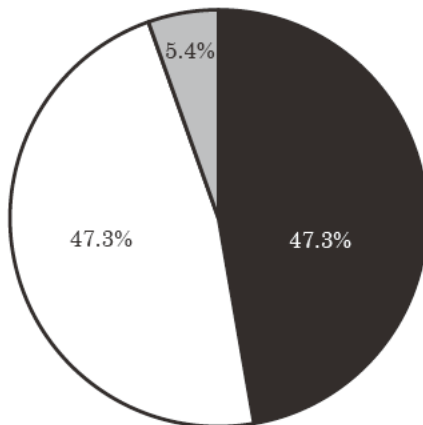


Fig. 6 Experience of clinker occurrence during the operation of fluidized bed incinerator using heavy oil installed in WWTPs with advanced treatment.

Legends: ■; Yes, □; No and ◐; Unclear.

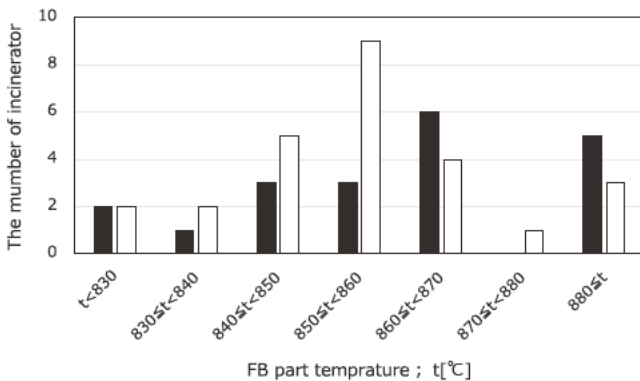


Fig. 7 FB part temperature of fluidized bed incinerator using heavy oil installed in WWTPs with advanced treatment.

Legends: Answers of clinker occurrence experience were ■; Yes and □; No.

クリンカが発生しやすい傾向が見られており、これは高温で焼却する場合、融点の低いリンの影響が顕著に見られやすいことが一因と考えられる<sup>11-13)</sup>。

一方で次世代補助燃料（例えば草木由来の廃棄物）を用いる場合ではリンとは別の元素が影響する可能性がある。一例として Table 2 に文献調査<sup>17,18)</sup>によって得た下水汚泥と草木バイオマスのリンとカリウム含有量の比較を示す。リン含有量は下水汚泥が草本類および木本類の植物に比べて高い値であることが分かる。一方でカリウムは特に草本類の値が高く、木本類では枝葉部の含有量が下水汚泥よりも高い値であり、下水汚泥の組成とは異なることが分かる。佐藤ら<sup>14)</sup>は木質バイオマス発電所で使用するクリンカ発生量が異なるスギペレットの灰分組成に注目し、クリンカ発生量が大きいペレットでは灰分中の K<sub>2</sub>O 含有量が高く（41.7%）、ほとんどクリンカが発生しなかったペレットの K<sub>2</sub>O 含有量は低い（26.0%）ことを報告している。さらに、この報告では熱力学平衡計算によりクリンカ発生量が大きいペレットでは 910-950℃ における K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> の融液が存在し、クリンカ発生量の小さいペレットではその融液はほとんど存在しないことを示しており、クリンカの原因物質として K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> の融液を指摘している。尚、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> の融点は 891℃ であり<sup>19)</sup>、本研究においては、高度処理を行っている処理場では FB 部温度がこれと比較的近い温度（870℃ 以上～880℃ 未満）、またはこれよりも高い温度（880℃ 以上）で運転されている場合でもクリンカの発生がないと回答した処理場もあった（Fig. 7）。これは、これまでクリンカの発生経験がなかった焼却炉においても次世代補助燃料として木質ペレットや草木のような燃料を使用した場合、その元素の影響を受けてクリンカが発生する懸念があることを示している。また草木以外の補助燃料（廃タイヤ等）についても同様の可能性はあり、次世代補助燃料の適用にあたっては、下水汚泥および補助燃料由来の元素組成とこれらがクリンカ発生に与える影響を事前に十分調査する必要がある。

Table 2 Comparison of the phosphorus and potassium content between digested sludge and plant biomass.

	Digested sludge*	Herbaceous plant**	Woody plant***		
			Trunk	Leaves/Blanches	Bark
K [% on DS]	0.29	1.80	0.27	0.52	0.19
P	3.35	0.17	0.03	0.07	0.03

Note:

\*: Average value of digested sludge (8 points) obtained from WWTPs of separate system reported in ref. 17 were listed in here.

\*\* : Average value of herbaceous plant (45 points) reported in ref. 18 were listed in here.

\*\*\*: Average value of trunk (8 points), leaves/blanches included non-separated part (25 points) and bark (2 points) obtained from woody plant reported in ref. 18 were listed in here.

## 4. ま と め

アンケート調査から次世代補助燃料の適用について、以下の知見を得た。

① 設計能力に対して汚泥の供給量が少ない（負荷率が低い）炉では補助燃料の使用が増加する傾向が見られた。特に、設計能力が小さい焼却炉では負荷率が低い傾向であった。消化汚泥を焼却している場合では負荷率が高くても、補助燃料の割合が高い傾向であった。焼却炉の規模が小さい処理場や消化によって汚泥の発熱量が低くなっている場合については、特に次世代補助燃料の適用が望まれる。

② 高度処理を行っている処理場では、流動床焼却炉フリーボード部を高い温度で運用している炉ほどクリンカが発生しやすい傾向が見られた。これはリンが影響しているものと考えられる。次世代補助燃料を用いた場合では他の元素（カリウム等）も影響する可能性があり、適用にあたっては調査する必要がある。

## 謝 辞

本研究の一部は、令和3年度下水道応用研究（国土交通省水管理・国土保全局下水道部）により実施した。また、アンケート調査にご協力頂いた処理場の関係各位に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 室本俊：下水汚泥と木質系バイオマスの混合焼却について、第47回下水道研究発表会講演集，pp.230-232（2010）
- 2) 岸上邦男：汚泥流動焼却システムにおける無公害技術の開発，環境研究，No22，p.67（1978）
- 3) 佐藤昌之：微粉炭を利用した下水汚泥の脱水および流動焼却実験，下水道協会誌，Vol.16，pp.1-10（1979）
- 4) 中川崇：調質汚泥（汚泥と微粉炭の混合物）の焼却試験，第39回下水道研究発表会講演集，pp.893-895（2002）
- 5) 諏訪田正美：建築廃木材を利用した下水汚泥焼却施設の運転結果について，第22回下水道研究発表会講演集，pp.616-618（1985）
- 6) 喜多照行：木質系バイオマスと汚泥とのバイオマス混焼による化石燃料由来CO<sub>2</sub>の削減，第42回下水道研究発表会講演集，pp.49-51（2005）
- 7) 飯塚健，斎藤典久，上古関久欣：木質バイオマスの混焼実験，第48回下水道研究発表会講演集，pp.217-219（2011）
- 8) 宮本豊尚，岡本誠一郎，落修一，長沢英和，小関多賀美，鈴木善三：過給式流動炉を用いた草木バイオマスと下水汚泥の混合燃焼，土木技術資料，Vol.52，No.4，pp.22-25（2010）
- 9) 中平哲也：廃プラを使った汚泥焼却と熱の有効利用ーゴミをつかってゴミを燃やすー，環境制御，岡山大学環境管理センター報，Vol.26，pp.2-6（2004），[https://ousar.lib.okayama-u.ac.jp/files/public/2/20284/20160528011333112198/erc\\_026\\_002\\_006.pdf](https://ousar.lib.okayama-u.ac.jp/files/public/2/20284/20160528011333112198/erc_026_002_006.pdf)（24 May 2022 Accessed）
- 10) 平山敦：廃プラスチック助燃材の汚泥焼却炉への適用技術の開発，第58回下水道研究発表会講演集，pp.455-457（2021）
- 11) 上野勇：流動焼却設備における灰の焼結事例と焼結防止対策に関する報告，第51回下水道研究発表会講演集，pp.994-996（2014）
- 12) 太田淳一，加野善久，田村英輔，伊東賢洋，針生崇史，神谷秀博：焼却設備異常（流動不良・煙道閉塞）事例と流動砂性状解析による検証，第55回下水道研究発表会講演集，pp.1142-1144（2018）
- 13) 大熊健治：リンおよび関連元素の挙動と焼結リスク簡易診断法について，第55回下水道研究発表会講演集，pp.1145-1147（2018）
- 14) 佐藤龍磨，角間隆司，藤元祐輔，尾形直亮，二宮善彦，堀尾正朝：スギバレットを燃料としたガス化プラントにおけるクリンカの特徴およびクリンカ抑制の対策技術，第16回バイオマス科学会議発表論文集，pp.13-14（2021）
- 15) 資源エネルギー庁：エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数（2018年度改訂）の解説，p.52-83（2020），[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/stte\\_028.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf)（24 May 2022 Accessed）
- 16) 日本下水道協会：下水道維持管理指針 実務編，pp.927-928（2014）
- 17) Mahzoun Yahya，大下和徹，高岡昌輝，藤森崇：下水汚泥脱水ケーキの全国組成調査による有機物構成元素を中心とした変遷推定と高位発熱量の予測，下水道協会誌，Vol.54，pp.86-96（2017）
- 18) 土木研究所：草木系バイオマスの組成分析データ集（修正版），土木研究所資料第4095号（2008）
- 19) 日本化学会：化学便覧 改訂3版 基礎編I，p.I-142（1986）