

〈論文〉

下水汚泥焼却炉における付着物の発生可能性を考慮した剪定枝・刈草の補助燃料使用による温室効果ガス排出量削減効果

宮本 豊尚^{1,2)}, 桜井 健介¹⁾, 高岡 昌輝²⁾, 阿部 千雅¹⁾¹⁾ 国立研究開発法人土木研究所 材料資源研究グループ
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 E-mail: recycle-imarrc21@pwri.go.jp)²⁾ 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

温室効果ガス排出削減に向け、下水汚泥焼却炉の補助燃料の転換が期待されている。本研究では剪定枝及び刈草の使用について検討し、焼却炉内での灰の付着性を考慮した混合条件と、温室効果ガスの削減量について試算を行った。刈草を単独で使用する場合、灰が炉内に付着する可能性のある条件が確認された。剪定枝と刈草の発生量の季節変動を考慮した補助燃料利用では、年間を通じて850℃での付着は想定されなかった。また、年間を通じた温室効果ガス削減量は、想定したシナリオの中では最大で約1,600 t-CO₂/年程度と試算された。

キーワード：下水汚泥焼却、剪定枝、刈草、灰付着、温室効果ガス

原稿受付 2024.6.21 原稿受理 2024.9.14

EICA: 29(2・3) 67-78

1. はじめに

全国の下水处理場のうち、汚泥量が3,000 t-DS/年を超える大規模な処理場の半数で焼却プロセスが導入されている¹⁾（平成28年度）など、現在も焼却プロセスは主要な汚泥処理方式の一つである。近年では資源価格高騰に伴う下水汚泥資源の肥料利用が求められているが、下水汚泥焼却灰が菌体リン酸肥料として肥料登録されたり²⁾、肥料の原料として使用されたり³⁾するなど、下水汚泥焼却プロセスはリン資源の循環プロセスの一つとしても位置付けられる。他方、下水道事業からの一層の温室効果ガス排出削減に向けて焼却プロセスも改善が求められており、地球温暖化対策計画にも亜酸化窒素（N₂O）削減のため高温焼却などの取り組みが位置付けられている⁴⁾。筆者らは一層の温室効果ガス排出削減を進めるため、カーボンニュートラルな補助燃料となる草本系バイオマスの使用により温室効果ガスの排出を削減し、サステナブルな下水汚泥焼却システムを提案できると考えている。

一方で、草本系バイオマス燃料の使用を進めると、燃料に含まれる灰分の影響で焼却炉におけるクリンカ発生や炉内付着物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等についてはいくつかの事例が報告⁵⁻⁷⁾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ている⁶⁾。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⁸⁾。下水汚泥焼却炉の閉塞危険性や灰付着性については塚原ら⁹⁾や石井ら¹⁰⁾により、焼却灰中の酸化物換算した主要元素を用いたなど評価・予測式が複数提案されている。しかし、これらは下水汚泥専焼条件で作成されており、バイオマスとの混焼条件における適用条件は不明である。筆者らは、下水汚泥と剪定枝や刈草と電気炉（ゴールドファーネス炉）を用いた混焼実験を行い、FB部の石英管への付着物量を用いた指標により、焼却炉内における付着物発生による不具合発生の可能性に関する実験式を作成した¹¹⁾。

草本系バイオマス燃料を用いた下水汚泥混合焼却に関する運転や検討はすでに実施されているものの、その多くは木質チップ¹²⁾やペレット¹³⁾、おがくず¹⁴⁾等が燃料として用いられてきた。これらは木質系バイオマス発電所等でも燃料として用いられているが、一部の発電所では燃料材の確保が困難な状況となっており¹⁵⁾、本稿ではこれらとの競合が少ないと考えられる公共事業（公物管理）由来の剪定枝や刈草、並びに剪定枝と刈草の混合物の利用を想定した検討を行った。剪定枝や刈草の補助燃料利用についても一部で検討されている¹⁶⁾ものの、焼却時の付着性やバイオマス燃料の非定常性については議論がされていない。

そこで本稿では、下水汚泥焼却に剪定枝や刈草を補助燃料として使用する場合、必要とされる補助燃料量を試算するほか、剪定枝や刈草の燃料使用時における付着物発生危険性について評価を行った。あわせて、温室効果ガス排出量を試算し、事業実施の意義についても整理を行った。

2. 検討方法

2.1 補助燃料として必要とされる剪定枝・刈草量

JIS Z 9202 熱測定通則を用いて、必要な剪定枝・刈草量を求めた。ここでは、入熱として①脱水汚泥と補助燃料としての剪定枝・刈草の高位発熱量、②燃焼に必要な乾き空気の熱量、③燃焼用空気水分の保有潜熱量を、出熱として①乾き燃焼ガスの持ち去る熱量、②燃焼用空気水分の保有潜熱量、③燃料中の水分の保有潜熱量、④燃焼生成水分潜熱量、⑤灰持ち出し熱量、⑥焼却炉からの放熱量とした。単位脱水汚泥量当たりの入熱と出熱が等しくなる剪定枝・刈草量を計算し、混合率（剪定枝・刈草量÷（汚泥量+剪定枝・刈草量）※いずれも湿潤重量）で表現した。剪定枝・刈草の含水率については、草木の破碎を行っている業者へのヒアリングによると、露地で管理している草木破碎物の含水率は40~60%程度で出荷しているとのことであった。そのため、破碎のみの剪定枝・刈草の含水率を60%、破碎後自然乾燥状態の剪定枝・刈草の含水率を40%と仮定した。また、木質ペレットの規格では、含水率を10%¹⁷⁾としているため、ペレット化した剪定枝・刈草の含水率を10%と仮定した。脱水汚泥と、補助燃料としての剪定枝・刈草及び重油の組成等を **Table 1** に示す。脱水汚泥の組成は、分流の消化後の脱水汚泥（29 試料の平均値）の文献値¹⁸⁾、及び比較として分流の未消化脱水汚泥

（40 試料の平均値）の文献値¹⁸⁾を標準的なものとして採用した。ただし、これらは後段で焼却を行っていない処理場も含むことが想定されたため、含水率については谷藤ら（2003）¹⁹⁾（消化は60箇所、未消化は156箇所の処理場の平均値）の文献値を採用した。剪定枝及び刈草については、各1試料の実測に基づく文献値¹¹⁾を採用した。比較としてのA重油の組成は文献値²⁰⁾を採用した。

焼却により発生する灰分量は流動床炉を想定し、炉内に投入した下水汚泥及び剪定枝・刈草に含まれる灰分（文献値より計算）の全量と同値と設定した。

また、実際に剪定枝や刈草を補助燃料として使用する際には、化石燃料と異なり応答性が遅いなどの課題があるが、ここでは定常状態を仮定するため、速度論については議論しない。仮想的に想定した焼却炉は、設計能力を3 t-wet/h (=72 t-wet/day)、汚泥の焼却量を2 t-wet/h (=48 t-wet/day) とした。焼却炉の出口温度は850°C、外気の温度を20°Cとした。また、焼却炉からの放熱量は、設計能力（3 t-wet/h）での汚泥専焼燃焼時（補助燃料A重油使用）での入熱量の7%²¹⁾で一定と仮定した（消化汚泥約1.4 GJ/h、未消化汚泥約1.3 GJ/h）。そのほか、熱収支計算に関するパラメータは **Table 2** の値を用いた。

2.2 付着物発生に関する危険性評価手法

筆者らは草木系バイオマスを補助燃料として使用することを想定し、電気炉（ゴールドファーネス炉）を用いて、4箇所の下水処理場から採取した消化後の脱水汚泥と剪定枝・刈草（各2種類）との混焼実験を行っている¹¹⁾。実験では、FB部での温度及び脱水汚泥と剪定枝・刈草の混合割合を変化させることにより、得られる灰がどのように変化するか調査した。その際、実験系の一部では電気炉内の石英管に付着物が発

Table 1 Parameters of sludge and biomass used in calculations

	単位	消化汚泥 (分流) ^{18,19)}	未消化汚泥 (分流) ^{18,19)}	剪定枝 1 ¹¹⁾	刈草 2 ¹¹⁾	A重油 ²⁰⁾	備考
含水率	%	80	78			0	
強熱減量	%-DS	75.6	85.5	95.3	80.0	100.0	
灰分	%-DS	24.4	14.5	4.7	20.0	0.0	一律で、100%から強熱減量を除いて求めた
C	%-DS	49.5	42.4	46.3	39.2	86.2	
H	%-DS	8.4	6.9	6.6	5.7	13.2	
N	%-DS	8.0	6.3	0.8	1.7	0.0	
O	%-DS	32.7	29.2	42.2	34.0	0.0	強熱減量から、CHNSを除いて求めた
S	%-DS	1.4	0.7	0.1	0.5	0.6	
Al ₂ O ₃	%-灰	9.6	14.7	0.5	2.0	0.0	
P ₂ O ₅	%-灰	31.6	38.7	4.7	11.6	0.0	
K ₂ O	%-灰	1.5	3.2	12.9	38.0	0.0	
CaO	%-灰	9.9	8.9	48.7	9.8	0.0	
Fe ₂ O ₃	%-灰	16.3	13.0	2.9	2.6	0.0	
高位発熱量	kJ/kg-DS	17300	19200	18600	16400	45590	

Table 2 Parameters of heat-balance calculations

	値	単位	備考	出典
潜熱	2454	kJ/kg-H ₂ O	20°C 1 atm	22)
空気比	1.3			23)
基準温度	20	°C	(仮定)	
炉出口ガス温度	850	°C	(仮定)	
燃焼予熱空気温度	650	°C	(仮定)	
大気湿度	0.01	kg-H ₂ O/kg-DA	20°C 相対湿度 70% を仮定	24)
水の比熱	4.19	kJ/kg-°C		25)
空気比熱	1.08	kJ/kg-°C		26)
N ₂ (ガス) の比熱	1.10	kJ/kg-°C	0-850°C の平均値 (文献 ²⁶⁾ の 0-800°C の平均値と 0-900°C の平均値の平均を採用し、 単位換算)	26)
O ₂ (ガス) の比熱	1.02	kJ/kg-°C		26)
H ₂ O (ガス) の比熱	2.09	kJ/kg-°C		26)
CO ₂ (ガス) の比熱	1.10	kJ/kg-°C		26)
SO ₂ (ガス) の比熱	0.772	kJ/kg-°C		26)
排ガス中灰分の比熱	0.84	kJ/kg-°C		27)

Table 3 Coefficients of constants and explanatory variables in Eqs. (3) and (4)

Eqs. (3)	定数項	C _{lnA}	-9.0
	説明変数の係数	k _{P₂O₅}	0.53
		k _{K₂O}	3.1
		k _{Al₂O₃}	-1.2
		k _{Fe₂O₃}	1.3
Eqs. (4)	定数項	C _B	-1.2×10 ⁴
	説明変数の係数	l _{P₂O₅}	5.9×10 ²
		l _{K₂O}	3.4×10 ³
		l _{Al₂O₃}	-1.3×10 ³
		l _{Fe₂O₃}	1.4×10 ³

生し、石英管付着物量 (dry-g) を投入した脱水汚泥の灰分量と剪定枝・刈草の灰分量の和 (dry-灰 kg) で除した値 (付着灰分率) が 20 (dry-g/dry-灰 kg) 以上の場合は運転時間に概ね比例して付着物が成長する傾向がみられた。そこで付着灰分率を推定するため、アレニウス則に基づく推定式 (Eqs. (1) 及び Eqs. (1) の両辺の自然対数をとった Eqs. (2)) を作成した。係数 A の自然対数と B は、投入汚泥の灰分の酸化物を説明変数とした重回帰分析によって求めた (Eqs. (3), (4))。説明変数とする酸化物の組み合わせを複数検討した結果、【P₂O₅, K₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃】の組み合わせが、他の酸化物の組み合わせと比べて、相対的に精度よく付着灰分率を推定できた。Eqs. (3), (4) の諸係数を **Table 3** に示す。

$$\text{付着灰分率 } y = A \exp(-B/T) \quad \text{Eqs. (1)}$$

$$\ln y = \ln A - B/T \quad \text{Eqs. (2)}$$

$$\ln A = C_{\ln A} + \sum_i (k_i \times W_i) \quad \text{Eqs. (3)}$$

$$B = C_B + \sum_i (l_i \times W_i) \quad \text{Eqs. (4)}$$

ここに ln : 自然対数, A, B : 係数, T : 絶対温度 (K)
 ただし, A > 0, B > 0, y > 0, C_{lnA}, C_B : 定数項,
 i : 説明変数として選択した酸化物,
 W : 酸化物の焼却灰中の濃度 (%),
 k, l : ln A 及び B の説明変数の係数

本稿では、この結果を踏まえ、剪定枝及び刈草を補助燃料として使用する際の付着物発生に関する危険性評価について以下の手順で実施した。まず、2.1 の熱収支から得られた混焼割合をもとに、発生する灰分の組成を推定した。灰分の推定は、炉内に投入された汚泥と剪定枝及び刈草の灰分量の比率に基づき計算を行った。続いて、Eqs. (2) を変形した Eqs. (5) により、y=20 (dry-g/dry-灰 kg) となる温度 T₂₀(°C) を求めた。

$$T_{20} = B / (\ln A - \ln 20) - 273.15 \quad \text{Eqs. (5)}$$

最後に、T₂₀ と想定する炉内の温度を比較することで、付着物発生の可能性について議論を行った。実際には FB 部の温度は焼却炉の出口温度より高い部分が存在すると考えられる²⁸⁻³⁰⁾ ほか、今回用いた T₂₀ の適用性や適用範囲についても議論の余地が残されているが、まずは焼却炉の出口温度である 850°C を T₂₀ の閾値と設定した。すなわち、計算で求められた T₂₀ が 850°C を下回る時に、炉内での付着物が成長して不具合が発生する可能性があるため、その条件では補助燃料としての使用は難しいと判断した。

2.3 温室効果ガス排出量試算方法

温室効果ガス排出量の試算は **Fig. 1** の破線の範囲 (剪定枝・刈草の輸送～中間処理～処理場輸送と補助燃料の使用に伴う増加した灰の処分にとまなうもの) で試算を行った。

本稿では、公共物管理に伴って発生した有価物として取引されていない剪定枝や刈草を使用することを想定しており、環境省のガイドライン³¹⁾ を参考に、剪定や除草作業にかかる温室効果ガス排出量は算定外とした (公共物の管理という別事業に関わるプロセスとして整理)。また、収集については、実際にはパッカー車への積載は人力で実施するため温室効果ガス排出量

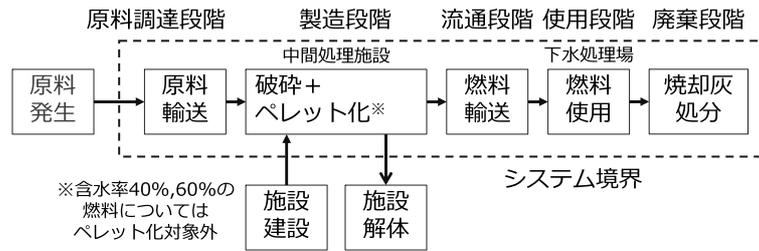


Fig. 1 Scope of GHG emission calculation

Table 4 Parameters for GHG emission calculation

		値	単位	出典
換算係数	N ₂ O (地球温暖化係数)	265		35)
エネルギー消費関係	重油 (比重)	0.86		36) ただし単純平均値を有効数字2桁に処理
	A 重油 (燃料の使用に関する排出係数)	2.75	kg-CO ₂ /l	35)
	軽油 (燃料の使用に関する排出係数)	2.62	kg-CO ₂ /l	35)
	電力	0.000429	t-CO ₂ /kWh	37)
バイオマス諸量	バイオマス発生量	0.018	t-dry/km ²	(実測データを基にした推定値)
	枝 (含水率)	60%		(仮定値)
	刈草 (含水率)	80%		(仮定値)
輸送	使用する車両: 2tパッカー車 (バイオマス発生現場→中間処理施設)			
	積載率	50%		(仮定値)
	燃費	4.3	km/L	38)
	使用する車両: 4tトラック (中間処理施設→下水処理場, 下水処理場→灰の有効利用先)			
	積載率	50%		(仮定値)
	CO ₂ 排出量	0.325	kg-CO ₂ /tkm	34) ※トラック輸送 (4t車・積載率50%) の原単位
燃料製造	破碎 (チップ製造)	73.3	g-CO ₂ /kg-dry	39) ※自然乾燥も投入エネルギーなしと考え同じ値を使用
	ペレット製造	165	g-CO ₂ /kg-dry	39)

はゼロとなる。以上から、積載後のパッカー車による中間処理施設（製造段階）への移送から計算を開始した。剪定枝及び刈草は空間的に均等にかつ一様に混在して発生すると想定し、発生量は人口約100万人、市域面積約270 km²のA市からご提供いただいた、公共物管理を行っている各部局別の月ごとの剪定枝・刈草等の回収量（平成30年度分）に関する調査結果を参考に設定した。

剪定枝及び刈草の収集範囲は各条件で必要となる剪定枝及び刈草量（推定値）を、中間処理施設を中心とした真円の領域から収集すると仮定した。この時、平均的な収集距離は、数学的には半径の2/3となるが、実際の道路網は中間処理施設を中心とした放射線道路と想定することは現実的でなく、過小評価となる。ここで、東京30 km圏の道路網では、道路距離は大まかに直線距離の1.2倍とされている³²⁾ことから、収集範囲として設定した真円の半径に0.8(=2/3×1.2)を乗じた値を収集距離と簡便に設定した。

下水処理場と中間処理施設（資源化施設）の移動距離は、A市での調査結果において下水処理場に最も近い剪定枝等の中間処理施設までの距離を参考に5

kmと仮定し、トラック（4t車・積載率50%）で輸送したと仮定した。また実際の搬入においては、輸送に用いた車両は、空荷で剪定や除草現場（原料輸送時）及び中間処理施設（燃料輸送時）に戻ることが想定されるため、本稿では往復を計算の対象とした。なお、本来であれば燃費やCO₂排出に係る原単位は積載率の影響を受けるが、その影響は軽微と考えられるため簡便に片道の移動距離を2倍して計算した。

中間処理（燃料化）のシナリオとしては、①破碎のみ（含水率60%）②破碎後自然乾燥（含水率40%）③破碎後ペレット化（含水率10%）を設定した。ペレット化については、刈草についても木質と同様のプロセスで処理ができると仮定し、試算を行った。さらに、中間処理施設は十分に能力があり、今回対象とした公共事業由来の剪定枝・刈草以外の草木系廃棄物の破碎業務を請け負っており、試算対象の公共事業由来の剪定枝・刈草の処理は十分に小さく、同施設の建設及び解体に係る温室効果ガス発生量は配分上無視できると仮定した。

下水処理場内での補助燃料とする剪定枝及び刈草の受入や焼却炉への燃料供給に係る温室効果ガスの計算

については、個別の処理場・焼却炉の状況により既存の機器の配置や空間的余裕が異なり、一様な試算は困難である。一方、筆者らが過去に実施した、実処理場の「し渣混焼ライン」として供用されているスクリーコンベア及びフライトコンベアを用いた草木破砕物等の搬送実験において、消費電力については、無負荷状態も含めていずれも実験期間中一定の値を示しており、付着等による抵抗の増大は発生せず、消費電力は増加しなかった結果を得ている³³⁾。さらに、し渣搬送用のスクリーコンベアの消費電力は3.7 A、ベルトコンベアは2.15 Aであったことから、搬送に必要な電力を多くても20 Aと見積もることができる。200 V 三相交流で力率が0.8と仮定すれば3.2 kWの消費電力と考えられる。電力の基礎排出係数の代替値が $4.29 \times 10^{-4} (t\text{-CO}_2/\text{kWh})$ とされているため、搬送に伴う温室効果ガス排出量は約33 kg-CO₂/day程度と想定された。

CH₄やN₂Oの発生量については、使用する燃料が重油や都市ガスから剪定枝及び刈草に変更することに伴い変化する可能性は想定されるが、本稿では便宜的に変化がないと仮定し、計算を省略した。

灰の処分に伴う温室効果ガス排出量については、剪定枝及び刈草の使用により増加した灰分に対して、輸送距離50 kmでトラック輸送(4 t車・積載率50%)の原単位である0.325 kg-CO₂/t/km³⁴⁾と仮定して試算を行った。

そのほか計算に用いた諸量についてはTable 4に示す。

2.4 季節変動を想定した試算

公共事業由来の剪定枝や刈草を使用する場合は、対象とする剪定枝及び刈草の割合が変化するため、事業には季節変動が生じる。そこで2.3に示したA市から提供いただいた調査結果を参考に、(1)月別の剪定枝及び刈草の収集パターンの変化にともなう性状の変化を整理するとともに、(2)必要な剪定枝及び刈草量、(3) T₂₀、(4)温室効果ガス排出量について試算を行った。汚泥は2.2の消化汚泥と同一の条件で試算した。剪定枝及び刈草については、簡便のため、剪定によって発生する剪定枝及び伐根はすべて剪定枝1で、除草により発生する刈草はすべて刈草2で近似できると仮定した。T₂₀の計算方法については、2.2と同じ手法を使用した。また、簡便のため、剪定枝及び刈草の収集面積は剪定枝と刈草で独立事象と考えず、剪定枝と刈草の単位面積当たりの合計発生量(乾物重量)は変化せず、発生割合のみが実態に即して変化すると仮定した。収集時点での含水率は、簡便のため季節によらず一定(剪定枝60%、刈草80%)とし、収集時の剪定枝と刈草の割合を考慮して必要な収集量を求め

た。年間での温室効果ガス排出削減量は、重油を使用した場合の排出量(重油の原単位を使用)から剪定枝及び刈草を使用した際の排出量(Fig. 1の範囲)を引き算して求めた。

剪定枝と刈草の発生割合は、発生量と同様にA市からご提供いただいた公共物管理を行っている各部署別の月ごとの剪定枝・刈草等の回収量(平成30年度分)に関する調査結果から求めた。

3. 結果と考察

3.1 補助燃料として必要な剪定枝及び刈草量

各含水率において必要となる剪定枝及び刈草量をFig. 2に示す。

消化汚泥を対象とした場合、剪定枝1を補助燃料として使用すると、剪定枝の含水率60%であれば混焼率は32%、含水率40%であれば混焼率18%であった。さらにペレット化を想定した含水率10%であれば、混焼率が11%となり、これはし渣混焼時の設計値の最大値とされる10質量%⁴⁰⁾と同等の値となった。一方、刈草2を補助燃料として使用すると、含水率60%であれば混焼率は37%、含水率40%であれば混焼率20%程度であった。刈草についても剪定枝と同様にペレット化することを想定した含水率10%のとき混焼率は12%となった。剪定枝と比べて刈草は高位発熱量が低く、灰分も高いため灰として持ち出す熱量も多いことから、燃焼を行うためには含水率にかかわらず混焼率が高くなる傾向がみられた。

未消化の汚泥を対象とした場合、剪定枝1を補助燃料として使用すると、剪定枝の含水率60%であれば混焼率は19%、含水率40%であれば混焼率10%であった。さらにペレット化を想定した含水率10%であれば、混焼率が5.1%となった。一方、刈草2を補助燃料として使用すると、含水率60%であれば混焼率は24%、含水率40%であれば混焼率12%程度であった。

ここで、室本¹²⁾によると、未消化汚泥を焼却してい

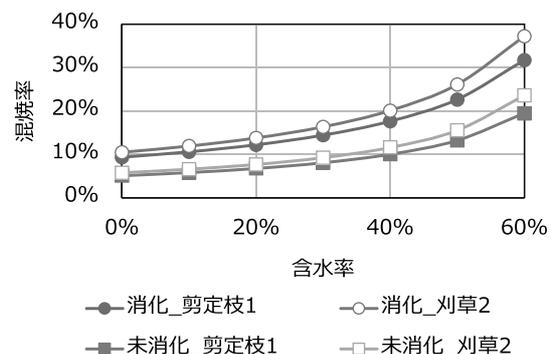


Fig. 2 Water content in biomass fuels and co-combustion rate of biomass fuels during self-combustion

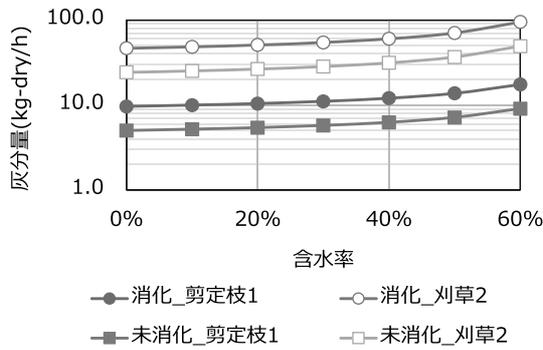


Fig. 3 Water content in biomass fuels and amount of ash derived from biomass fuels during self-combustion

る実処理場で含水率40%の木質チップを25日間補助燃料として使用し、都市ガスの使用量を2/3に削減する結果を得ている。この時使用された木質チップ量を1.5倍し、本稿の混焼率に換算すると、約9%となり、概ね実態と計算結果が合致することが確認できた。

消化汚泥、未消化汚泥にかかわらず、剪定枝及び刈草の含水率が40%から60%に増加すると混焼率が約2倍に増加した。これは、単位質量当たりの焼却炉への入熱から出熱を引いた値（焼却炉の放熱分を除く）が、含水率が40%の場合剪定枝1で約6.7 MJ/kg-wet、刈草2で5.7 MJ/kg-wetであったのに対し、含水率が60%ではそれぞれ3.1 MJ/kg-wet、2.4 MJ/kg-wetと約半分減少したため、汚泥の燃焼に必要な刈草の投入量が約2倍強となったことが影響していた。先述のヒアリングでは、出荷される草木破砕物の含水率が40~60%程度とのことであったが、この範囲での含水率のわずかな違いが混焼率に与える影響は大きいと考えられた。

また、灰の発生量について、Fig. 3に示す。剪定枝1の灰分が4%-DS、刈草2の灰分が20%-DSであるため、使用する剪定枝及び刈草により灰分の発生量は約5倍の差が発生した。また、含水率が高くなる場合は、混焼率が上がり使用する燃料が増加するため、灰の発生量も増加する傾向がみられた。消化汚泥2 t-wet/hを焼却した際の汚泥由来の灰が98 kg/h、未消化汚泥であれば64 kg/hであることと比較すると、刈草由来の焼却灰は汚泥の約半分から概ね同等程度、剪定枝では20%未満という関係であった。今回3 t/hの焼却炉に対して、汚泥の負荷が2 t/hの場合で検討を行っているが、剪定枝及び含水率が10%（消化汚泥の場合）もしくは40%（未消化汚泥の場合）より低い刈草であれば、既存の焼却炉の能力で灰の処理ができると考えてよいという結果が得られた。

3.2 付着物発生に関する危険性評価

Eqs. (5) により、付着灰分率 $y=20$ (dry-g/dry-灰kg) となる温度 T_{20} を求めた結果を Table 5 に示す。

Table 5 Results of T_{20} 単位: °C

バイオマス含水率	消化剪定枝1	消化刈草2	未消化剪定枝1	未消化刈草2
0%	938	865	952	873
10%	937	864	952	872
20%	937	863	951	870
30%	936	861	950	869
40%	935	859	949	866
50%	933	856	947	863
60%	930	852	944	857

なお、自燃あるいは重油や都市ガス等を使用して補助燃料由来の無機物を考慮する必要がない場合（以下専焼時と呼ぶ）、消化汚泥の T_{20} は 950°C 、未消化汚泥は 965°C であった。

いずれのケースでも、剪定枝及び刈草を使用することで T_{20} は専焼時と比べて $20\sim 100^{\circ}\text{C}$ 低下した。また、剪定枝及び刈草の含水率が増加すると T_{20} は小さくなる傾向がみられた。この時、含水率の増加に伴う必要な剪定枝及び刈草量の増加により、下水汚泥では含有量の低い K_2O の灰分に占める割合が増加していた。ここで Eqs. (5) について、両辺を $W_{\text{K}_2\text{O}}$ で偏微分すると

$$\frac{\partial}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} T_{20} = \frac{1}{(\ln A - \ln 20)^2} \times \left\{ (\ln A - \ln 20) \frac{\partial B}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} - B \frac{\partial (\ln A - \ln 20)}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} \right\} \quad \text{Eqs. (6)}$$

Eqs. (6) の分子は、 $\frac{\partial B}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} = l_{\text{K}_2\text{O}}$ 、 $\frac{\partial (\ln A - \ln 20)}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} = k_{\text{K}_2\text{O}}$ であるから、

$$\begin{aligned} & (\ln A - \ln 20) \frac{\partial B}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} - B \frac{\partial (\ln A - \ln 20)}{\partial W_{\text{K}_2\text{O}}} \\ &= l_{\text{K}_2\text{O}} (\ln A - \ln 20) - k_{\text{K}_2\text{O}} B \\ &= l_{\text{K}_2\text{O}} (C_{\ln A} - \ln 20) - k_{\text{K}_2\text{O}} C_B + W_{\text{P}_2\text{O}_5} (l_{\text{K}_2\text{O}} k_{\text{P}_2\text{O}_5} - k_{\text{K}_2\text{O}} l_{\text{P}_2\text{O}_5}) \\ & \quad + W_{\text{Al}_2\text{O}_3} (l_{\text{K}_2\text{O}} k_{\text{Al}_2\text{O}_3} - k_{\text{K}_2\text{O}} l_{\text{Al}_2\text{O}_3}) + W_{\text{Fe}_2\text{O}_3} (l_{\text{K}_2\text{O}} k_{\text{Fe}_2\text{O}_3} - k_{\text{K}_2\text{O}} l_{\text{Fe}_2\text{O}_3}) \end{aligned}$$

となり、 $W_{\text{K}_2\text{O}}$ に依存しない式となった。

ここで、 $W_{\text{P}_2\text{O}_5}$ 、 $W_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 、 $W_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ は0以上であり、また各係数を代入すると

$$\begin{aligned} & l_{\text{K}_2\text{O}} (C_{\ln A} - \ln 20) - k_{\text{K}_2\text{O}} C_B < 0, \quad l_{\text{K}_2\text{O}} k_{\text{P}_2\text{O}_5} - k_{\text{K}_2\text{O}} l_{\text{P}_2\text{O}_5} < 0, \\ & l_{\text{K}_2\text{O}} k_{\text{Al}_2\text{O}_3} - k_{\text{K}_2\text{O}} l_{\text{Al}_2\text{O}_3} < 0, \quad l_{\text{K}_2\text{O}} k_{\text{Fe}_2\text{O}_3} - k_{\text{K}_2\text{O}} l_{\text{Fe}_2\text{O}_3} < 0 \end{aligned}$$

となる。さらに、Eqs. (6) の分母は $(\ln A - \ln 20)^2 \geq 0$ であることから、 $\ln A = \ln 20$ を除き、Eqs. (6) は負となる。すなわち Eqs. (5) の特性である、 K_2O の割合 ($W_{\text{K}_2\text{O}}$) が増加すると、 T_{20} が単調に減少することによるものであった。

Table 6 Existing ash-adherence potential estimation formulas

	指標	計算式
塚原らの式 ⁴¹⁾	閉塞抑制指標	$\left(\frac{Fe_2O_3}{M(Fe_2O_3)} \cdot 2 + \frac{Al_2O_3}{M(Al_2O_3)} \cdot 2 + \frac{CaO}{M(CaO)} \cdot \frac{2}{3} + \frac{MgO}{M(MgO)} \cdot \frac{2}{3} \right) / \left(\frac{P_2O_5}{M(P_2O_5)} \right)$ $Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, P_2O_5$: 焼却灰中の濃度 (wt%) $M(i)$: 化合物 i の分子量 (g/mol)
石井らの式 ⁴²⁾	指標 A	$(Fe_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2) \times P_2O_5 / 100$ 各成分の合計量に対する各構成成分の質量割合 (wt%)

剪定枝については、刈草と比べて灰分率が低いため、補助燃料利用による T_{20} の低下は小さくなっていった。一方、刈草を補助燃料として使用する際は、含水率が60%のものを使用すると T_{20} が今回閾値に設定した850℃に近づくなど全体的に850~870℃前後となり、炉内の状況によっては壁面への付着が発生することも考えられる温度帯となった。

なお、既報¹¹⁾では、剪定枝1又は刈草2と標準的な消化汚泥との混焼実験の結果を示している。標準的な消化汚泥と刈草2 (混焼率30%:ただし刈草の含水率78%) の混焼実験において、 T_{20} は約870℃もしくは約900℃となる結果が得られた。このとき刈草2の含水率を0%に換算すると、同じ灰分率となるみかけの混焼率は8.6%となる。今回の試算では刈草2の含水率を0%で混焼率10%とすると自然する結果が得られ、 T_{20} は865℃となるが、このケースでは既報の実験よりも約2%混焼率が高い条件となる。混焼率が高まるほど T_{20} が低下することを考えると、概ね実験結果に即した計算結果が得られたと考えられた。一方、標準的な消化汚泥と剪定枝1の混焼実験では、必ずしも結果は適合しなかった。混焼率10% (ただし含水率44%相当) では T_{20} が約950℃となる実験系列がみられた。このとき剪定枝1の含水率を0%に換算すると、同じ灰分率となるみかけの混焼率は6%となる。今回の試算では剪定枝1の含水率が0%の場合混焼率9%で自然する結果となり、 T_{20} は938℃であった。このケースは既往の実験よりも約3%混焼率が高い条件であるが、混焼率が高まるほど T_{20} が低下することを考えると、概ね結果が一致した。他方、混焼率30% (ただし含水率44%相当) の際も T_{20} が約950℃となる実験系列がみられた。この実験系では剪定枝1の含水率を60%とすると、みかけの混焼率は38%となる。他方今回の試算では剪定枝1の含水率が60%の場合混焼率32%で自然する結果となり、その時の T_{20} は930℃となるため、相違が生じる結果となった。これはCaが多く含まれている木質系の補助燃料については、推定式にCaに関する項が含まれていないため、 T_{20} の予測精度が劣ることに由来すると考えられた。ただし、これまでに焼却灰中の酸化物換算した主要元素を用いた、下水汚泥焼却炉の閉塞危険性や灰付着性に関する評価・予測式 (Table 6) に

おいても、Caの挙動については判断が分かれている。塚原らが提案した式⁴¹⁾では、Caが多い場合、閉塞抑制指標 (1.0以上で安全) の値は増加するため焼結しにくくなると判定された。一方、石井らが提案した式⁴²⁾でも指標A (指標が0.3以下であれば灰が付着しにくくなる) の値も増加することになるが、こちらは逆に焼結しやすくなると判定された。以上から、Caの増加に伴う付着性の変化は、単純な一次式で示されるものではない可能性も考えられた。

3.3 温室効果ガス排出量試算

消化汚泥に関する結果を Fig. 4 に示す。いずれの条件においても、重油を用いるよりも温室効果ガスの削減に寄与する計算結果となった。

要素別にみると、刈草は灰分量が多く高位発熱量が低いため、剪定枝と比べて全体的に温室効果ガス排出量が多くなる傾向がみられた。また、燃料の含水率が低下するほど、必要とする補助燃料量が減少するため、収集範囲も小さくなり輸送に係る温室効果ガスが低減される傾向がみられた。

一方で、長井³⁹⁾らが検討したペレット化のプロセスでは、破碎 (チップ化) 後、乾燥と成型プロセスを経るものであった⁴³⁾。そのため、ペレット化に伴う温室効果ガスの排出量が破碎 (チップ化) の2倍以上となることから、含水率10%と燃料の価値を高めて必要

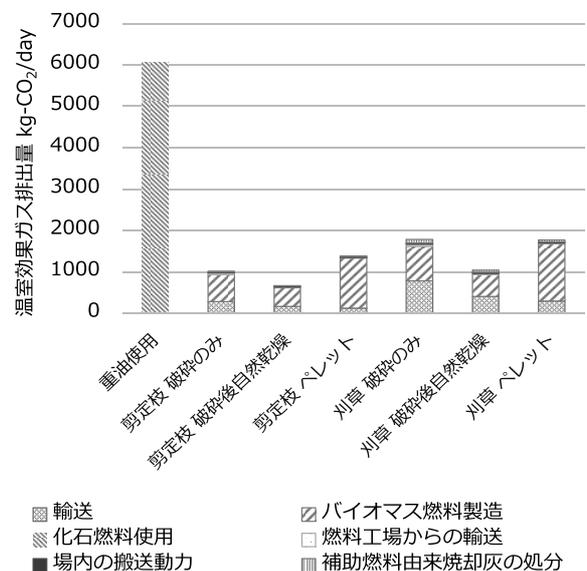


Fig. 4 Calculation of GHG emission from burning digested sludge

量を減らしても、含水率40%の破碎後自然乾燥物を使用する場合と比べて温室効果ガス排出量は約2倍となった。なお、燃料の輸送距離が長くなれば、ペレット化のメリットが発生する可能性がある。今回の事例で、含水率10%のペレットと含水率40%の破碎後自然乾燥物を使用する際の温室効果ガス排出量が等しくなるのは、刈草では運送距離(片道)で約440 km、剪定枝では運送距離を約590 kmとする必要があるという試算結果となった。公共事業由来の剪定枝や刈草を利用する場合、片道400 km以上陸送することは考えにくく、ペレット化するメリットは小さいことが示された。なお、木質ペレットの環境影響評価に関する既往の文献⁴⁴⁾では、CO₂の排出量は製造プロセスが全体の83%、ペレットの輸送が12%、原料輸送が6%という結果であった。この事例でのペレットの輸送は100 kmの輸送が想定されていたが、今回は往復で10 kmの輸送とした。ペレットの生産と輸送に係るCO₂排出量の割合は、文献値(輸送距離が100 km)では7:1、今回の試算(輸送距離が10 km)で140:1~120:1となっており、輸送距離との比例関係を考慮するとおおむね一致した結果と考えられた。

以上から、今回の試算条件においては、温室効果ガス排出量の観点からは、剪定枝を含水率40%の破碎後自然乾燥物を使用することが最も望ましい結果となった。この時、重油使用時と比べて温室効果ガスを約5.4 t-CO₂/day削減することが可能となる試算となった。また、本条件では先の3.2において求めたT₂₀が850℃を上回っており、補助燃料として使用することが可能な条件となった。

3.4 季節変動の影響

(1) 剪定枝と刈草の回収量の月変動

A市の調査によると、公共事業由来で発生する剪定枝や刈草等の回収量のうち、約4割は剪定枝と刈草が混在した状態で回収されていたが、残りの約6割に

ついては、発注形式等により区分することが可能であった(ただし回収物の一部に廃木材や落ち葉を含んだ結果であった)。この6割について、刈草を主とする回収物量と剪定枝を主とする回収物量の割合をFig. 5に示した。5月から7月は約60%、9月は80%以上を刈草で占めているが、10月以降は枝の割合が増加し、1月は約95%が剪定枝となっている。以上を踏まえ、湿潤重量ベースで刈草の割合を10%(1-2月想定)、30%(10-12月及び3-4月想定)、60%(5-7月想定)、80%(8-9月想定)の4段階で設定し、試算を行った。ここで、収集時点での含水率は、簡便のため季節によらず一定(剪定枝60%、刈草80%)として計算すると、乾燥重量ベースでの刈草の割合は5.3%(1-2月想定)、18%(10-12月及び3-4月想定)、43%(5-7月想定)、67%(8-9月想定)となった。

(2) 自然時の剪定枝及び刈草の混焼率

剪定枝と刈草が混合状態のときに、各含水率において自然するのに必要な汚泥との混合率をTable 7に示す。年間を通じて原料となる剪定枝と刈草の混合割合が変化しても、月別の剪定枝及び刈草の混焼率に与える影響はあまり大きくなく、それ以上に含水率の変動に伴う影響の方が大きくなる結果が得られた。このことから、年間を通じて必要とする燃料は、例えば含水率60%の破碎物であれば約23~26 t-wet/day、含水率40%の破碎後自然乾燥物であれば約11 t-wet/day、含水率10%のペレットであれば、約6 t-wet/day必要となる結果となった。

剪定枝及び刈草由来の灰発生量をTable 8に示す。混焼率とは異なり、燃料に占める刈草の割合が増加するに伴い灰の発生量は増加する傾向がみられ、季節によって約3倍変動する結果が得られた。今回、設計が3 t-wet/hに対して2 t-wet/hの汚泥を焼却する条件を想定しているが、この時の焼却灰の処理能力の余裕は汚泥1 t-wet/hで、焼却灰に換算すると約50 kg-DS/hとなる。灰処理の設計に余裕を持たせてい

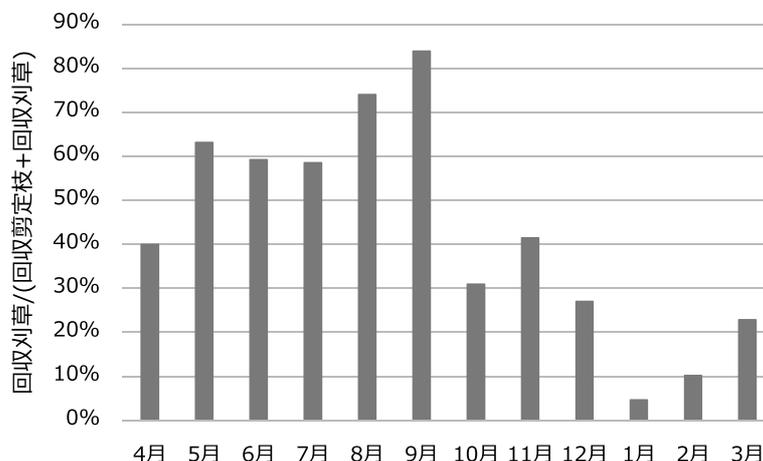


Fig. 5 Percentage of cut grasses in grass and woody biomass derived from the management of public facilities

Table 7 Co-combustion rates by month and the moisture content

含水率	剪定枝	1-2月想定	10-12月, 3-4月想定	5-7月想定	8-9月想定	刈草
		剪定枝: 刈草=9:1	剪定枝: 刈草=7:3	剪定枝: 刈草=4:6	剪定枝: 刈草=2:8	
0%	9%	9%	9%	10%	10%	10%
10%	11%	11%	11%	11%	11%	12%
20%	12%	12%	12%	13%	13%	14%
30%	14%	14%	15%	15%	16%	16%
40%	18%	18%	18%	19%	19%	20%
50%	23%	23%	23%	24%	25%	26%
60%	32%	32%	33%	34%	35%	37%

Table 8 Ash production from biomass fuels by month and the moisture content 単位: kg-DS/h

含水率	剪定枝	1-2月想定	10-12月, 3-4月想定	5-7月想定	8-9月想定	刈草
		剪定枝: 刈草=9:1	剪定枝: 刈草=7:3	剪定枝: 刈草=4:6	剪定枝: 刈草=2:8	
0%	10	11	16	24	33	47
10%	10	12	16	25	34	48
20%	10	12	17	26	36	51
30%	11	13	18	28	39	55
40%	12	14	19	31	42	60
50%	14	16	22	36	49	71
60%	17	21	29	46	65	95

Table 9 T_{20} by month and the moisture content 単位: °C

含水率	剪定枝	1-2月想定	10-12月, 3-4月想定	5-7月想定	8-9月想定	刈草
		剪定枝: 刈草=9:1	剪定枝: 刈草=7:3	剪定枝: 刈草=4:6	剪定枝: 刈草=2:8	
0%	938	927	910	888	875	865
10%	937	927	909	887	874	864
20%	937	926	908	885	873	863
30%	936	925	906	884	872	861
40%	935	923	904	881	869	859
50%	933	921	900	877	866	856
60%	930	915	893	871	860	852

ない施設の場合、8-9月想定でかつ含水率60%の燃料では、灰の処理能力を超過するため、運転が難しいという結果が得られた。

(3) T_{20} の試算結果

T_{20} の試算結果を **Table 9** に示す。刈草の割合が増加するに伴い、 T_{20} が小さくなる傾向が明確にみられた。しかしながら、いずれも閾値とした850°Cを超えており、混合物を補助燃料として使用する上では問題ない数値と考えられた。なお、実際の運用では、安全率を考慮して T_{20} を大きくとる必要があると想定される。例えば約870°Cを閾値とすれば、刈草の割合が原料全体の60%以下となる年間10カ月、約890°Cを閾値とすれば、刈草の割合が原料全体の30%以下となる年間7カ月での使用（いずれも含水率60%での使用も想定）が妥当と考えられた。

(4) 温室効果ガス排出量

月別の温室効果ガスの排出量を **Fig. 6** に示す。い

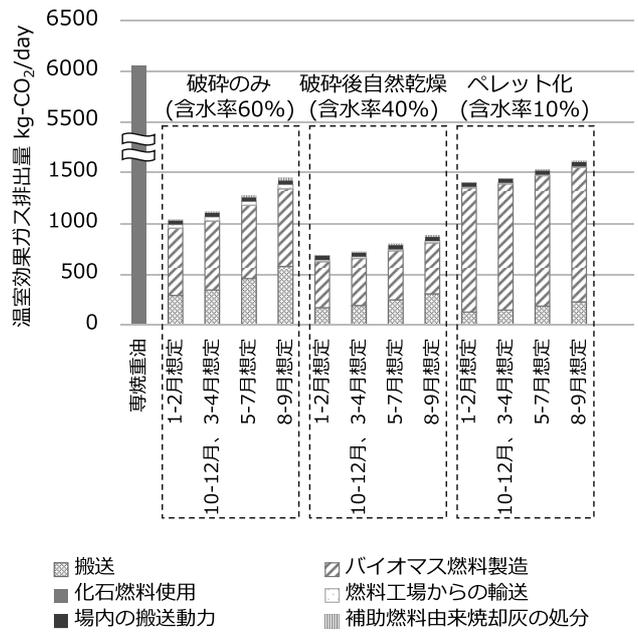


Fig. 6 Estimation of monthly GHG emissions

ずれの時期においても重油を用いた場合と比べて温室効果ガス排出量が削減された。季節による影響は、刈草の割合が高い夏期に増加する傾向がみられたが、それ以上に含水率の違いによる影響の方が大きい結果となった。

(3) で T_{20} の閾値を約870°Cとした際に補助燃料を使用できないと判断された8-9月の2カ月間を定期点検に充てる条件を想定すると、年間での温室効果ガス排出削減量は、含水率40%のチップを使用する場合は約1,600 t-CO₂/年、10%のペレットを使用する場合は約1,400 t-CO₂/年という結果が得られた。また、 T_{20} の閾値を約890°Cとした際に補助燃料を使用できないと判断された5-9月のうちの2カ月間を定期点検に充て、残りの3カ月は通常運転する条件を想定すると、年間での温室効果ガス排出削減量は、含水率40%のチップを使用する場合は約1,100 t-CO₂/年、10%のペレットを使用する場合は約1,000 t-CO₂/年という結果が得られた。

4. ま と め

本稿では、下水汚泥焼却に剪定枝及び刈草を補助燃料として使用する場合、必要とされる補助燃料量を試算するほか、その際の付着物発生に関する危険性について評価を行った。あわせて、温室効果ガス排出量を試算し、事業実施の意義についても整理を行った。得られた結果について以下に示す。

- ・ 消化汚泥を対象とした場合、含水率40-60%の破碎物を燃料として使用する場合は、剪定枝を原料とすると18-32%、刈草を原料とすると20-38%、含

- 水率 10% のペレットでは約 10% の混焼率となった。
- ・ 炉内での灰の付着が想定される付着灰分率 $y=20$ (dry-g/dry-灰 kg) となる温度 T_{20} は、消化汚泥の専焼灰の T_{20} は 950°C であったのに対し、剪定枝及び刈草を使用すると低下した。特に、刈草を使用する際、含水率 60% の条件では T_{20} が 850°C に近づくなど、全体的に $850\sim 870^{\circ}\text{C}$ 前後の値をとっており、炉内の状況によっては壁面への付着等が発生することも考えられる温度帯となった。
 - ・ 温室効果ガス発生量を試算したところ、重油を用いるよりも剪定枝及び刈草を使用することで温室効果ガスの削減に寄与する計算結果が得られた。剪定枝を含水率 40% の破碎後自然乾燥物を使用することが最も望ましい結果となり、重油使用時と比べて温室効果ガスの排出を約 $5.4\text{ t-CO}_2/\text{day}$ 削減することが可能となる試算となった。
 - ・ 刈草と剪定枝の発生は、季節の変動により回収量が異なるため、回収実績に基づき 4 段階で混合状態を想定し、月変動の影響を確認した。想定される刈草の混合率がいずれの場合も、月別の混焼率の違いに与える影響は明確ではなかった。一方、剪定枝及び刈草由来の灰発生量は刈草の割合が増加するに伴い灰の発生量は増加する傾向がみられ、季節によって約 3 倍変動する結果が得られた。 T_{20} については、刈草の割合が増加するに伴い小さくなる傾向が明確にみられた。月別の温室効果ガスの排出状況は、いずれの時期でも重油を用いた場合と比べて温室効果ガス排出量が削減される結果となった。例えば 8-9 月の 2 カ月間を定期点検に充てる条件を想定すると年間での温室効果ガス排出削減量は約 $1,600\text{ t-CO}_2/\text{年}$ 程度と試算された。

今回の検討は、比較的温暖かつ平坦な地域で、また相対的に財政力を有する団体での剪定枝及び刈草の回収結果をもとに試算を行った。実際の導入に当たっては地域の特性を十分に勘案し、コスト等に関する試算などの事業実施の可能性検討を行う必要がある。

謝 辞

ヒアリングにご協力いただいた関係各所の方々に記して感謝の意を表します。また、本研究の一部は、国土交通省 下水道応用研究「サステイナブルな汚泥焼却のための次世代補助燃料の検討」(令和 3-4 年度)により実施したことを記す。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省 HP:平成 29 年度第 1 回 下水汚泥利活用推進検討委員会 資料 (2018 年 1 月 23 日)
- 2) 埼玉県 HP:下水汚泥燃焼灰の肥料登録について (2024 年 4 月 30 日)
<https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/253107/news2024043001.pdf>
- 3) 岐阜市 HP:りん回収事業 (副産りん酸肥料「岐阜の大地」の販売) (2023 年 9 月 14 日更新)
<https://www.city.gifu.lg.jp/kurashi/suidou/1003348/1003354/1020258.html>
- 4) 環境省 HP:地球温暖化対策計画 (2021 年 10 月 22 日)
<https://www.env.go.jp/content/900440195.pdf>
- 5) 上野勇, 秦野正人, 小林俊樹: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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 二宮善彦, 佐藤龍磨, 角間隆司, 藤元祐輔, 尾形尚亮, 堀尾正朝:バイオマスガス化炉に発生するクリンカーの生成に関する研究, 第 16 回バイオマス科学会議発表論文集, pp. 17-18 (2021)
- 9) 塚原純哉ほか:日本特許, 5881260 (2016)
- 10) 石井豊ほか:特開 2010-12425 (2010)
- 11) 宮本豊尚, 中村友二, 高岡昌輝, 伊藤竜生, 谷藤溪詩, 小林俊樹, 宍田健一, 岡安祐司:下水汚泥と草木系バイオマスの混焼に伴う電気炉壁面付着物の特性, 下水道協会誌, Vol. 61, No. 745 (2024) 印刷中 (2024. 2. 16 受理)
- 12) 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)
- 13) Y. Lee, J. Kim, D. Kim and Y. Lee: Experimental study of Co-firing and emission characteristics fueled by Sewage Sludge and Wood Pellet in Bubbling fluidized bed, Clean Technology, Vol. 23, No. 1, pp. 80-89 (2017)
- 14) P. Elbl, T. Sitek, J. Lachman, M. Lisý, M. Baláš, J. Pospíšil: Sewage sludge and wood sawdust co-firing: Gaseous emissions and particulate matter size distribution, Energy, Vol. 256, Article 124656 (2022)
- 15) (一社)日本木質バイオマスエネルギー協会 HP:燃料の調達状況に関する臨時アンケート結果報告 (2023)
<https://jwba.or.jp/wp/wp-content/uploads/2023/02/fuelwood-demand-survey.pdf>
- 16) 山崎廉予, 重村浩之:下水処理場への植物系バイオマス混合脱水システム導入における環境影響評価, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 33, pp. 54-68 (2022)
- 17) (一社)日本木質ペレット協会:改訂版【JPA 木質ペレット品質規格】品質基準 (2023 年 7 月 1 日改訂)
<https://w-pellet.org/download/2885/?tmstv=1715999800>
- 18) 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, No. 659, pp. 86-96 (2017)
- 19) 谷藤溪詩, 宮本豊尚, 重村浩之, 岡安祐司, 高岡昌輝:次世代補助燃料を適用する下水汚泥焼却プロセスに向けた焼却炉運用の全国実態調査, 下水道協会誌, Vol. 60, No. 727, pp. 75-85 (2023)
- 20) (一社)火力原子力発電技術協会:火力発電技術必携 (第 8 版), p. 100 (2019)

- 21) (地方共同法人)日本下水道事業団：機械設備 標準仕様書 H31 年度, p.13-27 (2019)
- 22) (一社)火力原子力発電技術協会：火力発電技術必携 (第8版), p.84 (2019)
- 23) (公社)日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説(後編), p.572 (2019)
- 24) (一社)火力原子力発電技術協会：火力発電技術必携 (第8版), p.79 (2019)
- 25) (一社)火力原子力発電技術協会：火力発電技術必携 (第8版), p.84 (2019)
- 26) 田中信壽：リサイクル・適正処分のための廃棄物工学の基礎知識, p.93 (2011)
- 27) タクマ環境技術研究会：ごみ焼却技術絵とき基本用語(改訂第3版), p.87 (2015)
- 28) 服部修策, 山本昌幸, 佐々木統一郎, 神谷幸資：多層燃焼技術による下水汚泥流動焼却炉からの N_2O 排出抑制効果について, 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, C1-2 (2010)
- 29) 宮本博司, 和泉一也, 矢部幸彦, 吉ヶ江武男, 笠井利雄, 須鎗護：下水汚泥循環流動層焼却炉の開発, R&D 神戸製鋼技報, Vol.51, No.2, pp.27-30 (2001)
- 30) 村上高広, 鈴木善三, 長沢英和, 山本隆文, 小関多賀美, 廣瀬均, 落修一：過給式流動炉における下水汚泥の基礎燃焼特性, 高温学会誌, Vol.34, No.4, pp.166-170 (2008)
- 31) 環境省 HP：再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン第IV部——① 複数の機能を有する事業(国内バイオマス利活用等)編(2021年7月改訂)
<https://www.env.go.jp/content/900447570.pdf>
- 32) 栗田治：都市と地域の数理モデル, p.211 (2013)
- 33) 宮本豊尚, 谷藤溪詩, 大本拓, 重村浩之：し渣混焼ラインを用いた下水汚泥焼却炉に対する草木バイオマス補助燃料の供給可能性, 環境システム計測制御学会誌, Vol.26, No.2/3, pp.60-67 (2021)
- 34) 環境省 HP：3R 原単位の算出方法 (2012)
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/19747.pdf>
- 35) 環境省 HP：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(2024年7月11日一部修正)
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf
- 36) 戒能一成：エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数の改訂案について——2013年度改訂標準発熱量・炭素排出係表——, RIETI Discussion Paper Series 14-J-047, p.37, (財)経済産業研究所 (2014)
<https://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/14j047.pdf>
- 37) 環境省 HP：電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)—R4年度実績—(2023年12月22日)
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r06_coefficient_rev2.pdf
- 38) 建設廃棄物協同組合 HP：2014年度収集運搬データ(アンケート集計)平均燃費回答25社(2016年1月)
https://www.kenpaikyo.or.jp/works/file/pamphlet/av_nenpi.pdf
- 39) 長井翔太郎, 橋本征二：木質ペレット利用推進による環境保全・地域活性化の効果検証, 第11回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.96-97 (2016)
- 40) (地方共同法人)日本下水道事業団：機械設備標準仕様書 平成31年度版, p.13-1 (2019)
- 41) 塚原純哉ほか：日本特許, 5881260 (2016)
- 42) 石井豊ほか：日本特許, 4871329 (2011)
- 43) 川勝康右, 橋本征二：京都ペレットのライフサイクル評価, 第8回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.378-379 (2013)
- 44) 古俣寛隆, 折橋健, 石川佳生, 一重喬一郎, 服部順昭：北海道産木質ペレットのライフサイクルアセスメントによる環境影響評価, 木材学会誌, Vol.56, No.3, pp.139-148 (2010)

Study on Reducing Greenhouse Gas Emissions Using Pruning and Cut Grass as Auxiliary Fuels in a Sewage Sludge Incinerator Considering Potential Ash Adhesion

Toyohisa Miyamoto^{1,2)†}, Kensuke Sakurai¹⁾, Masaki Takaoka²⁾ and Chika Abe¹⁾

¹⁾ Innovative Materials and Resources Research Center, Public Works Research Institute

²⁾ Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Toyohisa Miyamoto:

Innovative Materials and Resources Research Center, Public Works Research Institute

E-mail: recycle-imarrc21@pwri.go.jp

Abstract

Various studies have investigated the use of biomass as an auxiliary fuel in sewage sludge incinerators to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. In this study, the mixing conditions of biomass were determined by considering ash adhesion in the incinerator and the reduction in the GHG emission amount. When only cut grass was used as the auxiliary fuel, ash adhered to the furnace wall. Meanwhile, when biomass fuel was mixed with prunings and cut grasses, no adhesion occurred at 850°C throughout the year. Furthermore, the maximum annual GHG reduction was estimated to be approximately 1,600 t-CO₂/year under the assumed scenarios.

Key words: sewage sludge incineration, prunings, cut grass, ash adhesion, GHG