

〈ノート〉

可燃性一般廃棄物の下水汚泥焼却炉補助燃料利用に向けた基礎的調査

宮本 豊 尚¹⁾, 谷 藤 溪 詩¹⁾, 桜 井 健 介¹⁾
重 村 浩 之²⁾, 高 岡 昌 輝³⁾, 岡 安 祐 司¹⁾

¹⁾ (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)

²⁾ (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

³⁾ 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

下水道事業における温室効果ガスの排出削減に向け、可燃性一般廃棄物が下水汚泥焼却炉の補助燃料として利用可能であるか検討した。一般廃棄物の収集・処理に関するヒアリング調査の結果、分別が可能かつ既存リサイクルで全量処理されていない利用可能な資源は草木類のみであった。さらに想定される回収量から、下水汚泥焼却炉の補助燃料である化石燃料の削減効果を試算した。11団体を対象に試算した結果、枝の想定回収量は合計約 350 t-wet/年であり、化石燃料を枝に代替すると CO₂ を 190 t/年削減できることが分かった。

キーワード：下水汚泥焼却炉，補助燃料，一般廃棄物，草木類

原稿受付 2022.6.2 原稿受理 2022.8.27

EICA: 27(2・3) 110-118

1. はじめに

政府は、2050年のカーボンニュートラルを目指しあらゆる分野でグリーン化の取組を加速させることとしており、下水道分野についても、省エネ・創エネ等のさらなる取り組みを期待されている。現在下水汚泥の約半数は焼却処理されているが、下水汚泥は含水率が高いため低位発熱量が低く難燃性であり、多くの補助燃料が利用されてきた。このことは1970年代のオイルショック時点で課題として認識されており、当時の文献¹⁾によると、焼却プロセスの省エネルギー的代替案として、①焼却プロセスに他の余剰エネルギーもしくは代替エネルギーを利用する方法（例えば、都市ごみ焼却炉での混焼、都市ごみ焼却施設からの高温排ガス又は余剰蒸気の利用、補助燃料としてごみ固形燃料(RDF)等の利用)と②焼却プロセスを省エネルギー熱操作プロセスに改善する方法（例えば低空気比化や脱水ケーキ性状改善による自然焼却)の2つの方向性が示されていた。

オイルショックから約半世紀が経過し、下水処理場内では上記②の方向性についてはかなり進展している。空気比については、かつての多段炉では2~2.5²⁾とされていたが現在一般的な流動床炉では1.3での運転³⁾が可能となっており、また脱水機・凝集剤の性能向上に伴う含水率の低減⁴⁾などが図られている。また、上

記①の方向性のうち、都市ごみ焼却炉での混焼については実用化されている⁵⁾。都市ごみと下水汚泥の混焼は、汚泥焼却において補助燃料として重油等の化石燃料を使用し、一方において都市ごみ焼却で発生する熱を大気中に放散するという不合理を解消しようとする省資源・省エネルギー型処理の一方法である。また、都市ごみ焼却施設からの高温排ガス又は余剰蒸気の利用については、一般廃棄物処理施設と下水処理場が隣接する等立地条件の良い事例では実用化されている⁶⁾。RDF等の利用については、実際に実施された事例は多くなく、その多くは実証研究レベルでとどまっている。実用化された事例としては、杉チップの事例⁷⁾や、廃プラスチック(RPF)を助燃材として用いた事例⁸⁾がある。研究レベルでは、おがくず⁹⁾、建築廃木材¹⁰⁾や木質バイオマス¹¹⁾、刈草¹²⁾の事例がある。

下水道事業における温室効果ガス排出削減に向けて、著者らは下水汚泥焼却炉でのバイオマス等の補助燃料利用について検討している。都市ごみ焼却施設においても発電システムが普及しつつあるが、令和元年度末時点で導入されている施設は全体の約36%である384施設にとどまっている¹³⁾。そこで本稿では、都市におけるエネルギー資源の有効利用手法検討の一環として、下水汚泥焼却炉において一般廃棄物として回収された資源について補助燃料としての利用可能性を評価するため、一般廃棄物の収集・処理に関するヒアリング調

査を行った。さらに利用可能な資源量を想定し、下水汚泥焼却炉における温室効果ガスの削減効果についても検討を行った。

2. 一般廃棄物の収集と利用可能性に関するヒアリング調査

2.1 調査方法

一般廃棄物の種類組成は、①紙・布類、②ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類、③木・竹・ワラ類、④厨芥類(動植物性残渣、卵殻、貝殻を含む)、⑤不燃物類、⑥その他に分類される¹⁴⁾。これらはすべてが可燃ごみとして処理されるわけではなく、一部は資源ごみや大型ごみなどとして回収されており、利用可能性については明らかとなっていない。そこで実際の回収状況と利用可能性検討の絞り込みを行うため、中核市クラス(A市:関東地方(約50万人)、B市:中部地方(約30万人))の廃棄物部局担当者に対し、一般廃棄物の収集・処理状況に関するヒアリングを行った。具体的には、下記の各ごみ種類について、処理フローや、資源化量と焼却処分等の資源化されていない量、引き渡し先等である。なお、ヒアリングに際しては、下水汚泥焼却炉の補助燃料としての利用を想定するため、熱量の低い厨芥類や不燃物、機器トラブルが想定される布類については対象から外し、①古紙、②プラスチック類、③草木類、④その他とした。また、既にリサイクルの枠組みが形成されているものについては、ここでは利用可能性がないと整理し、単純な焼却処理がなされているものを利用可能性があると整理した。ただし、一般廃棄物処理施設においてサーマルリサイクルされているものについては利用可能性があったとした。なお、ヒアリング対象とした2市については、いずれも人口一人一日当たりごみ総排出量は約0.8kg/人・日、人口一人当たり年間処理経費は11,000~13,000円/人・年と標準的な団体であり¹⁵⁾、またいずれもバイオスタウンにも該当しないことから、特殊な事例ではないと推察される。

2.2 調査結果

① 古紙

両市とも、分別回収された古紙は資源回収業者に全量引き取られていた(A市8500t/年 B市5,400t/年)。紙のリサイクルにおいて禁忌となるラミネート紙やカーボン紙等は、回収品に含まれていることが想定され、これらが利用可能と予想していた。しかしながらヒアリングによると禁忌物の返品はないとのことであり、全量が既存のリサイクルの枠組みで処理されていた。古紙については単純な焼却処理がなされているものがないため、古紙由来の資源を燃料として新た

に下水処理場への集約・利用を目指すのは困難となることが分かった。

② プラスチック類

プラスチック類については、ペットボトル(A市1,200t/年 B市900t/年)と容器包装リサイクル法で定められたその他のプラスチック製容器包装(A市3,900t/年 B市2,800t/年)のほか、不燃ごみ(A市3,800t/年の内数 B市4,400t/年の内数)、大型ごみ(A市3,600t/年の内数、B市1,700t/年の内数)の形態で収集されていた(Fig.1)。ペットボトルとプラスチック製容器包装については紙ごみ類と同様に、いずれの市においても容器包装リサイクル法の再商品化事業者に取り取られていた。禁忌品などの返品はヒアリングでは確認できず、全量が既存のリサイクルの枠組みで処理されていた。すなわち古紙と同様に利用は困難であることが分かった。

不燃ごみと大型ごみについては清掃工場等で破碎されたのち、鉄やアルミ等と選別され、プラスチックは最終的に焼却施設にて焼却処分されていた。そのため破碎後の輸送ラインを改造すれば下水汚泥焼却炉補助燃料として取り出すことは不可能ではない。しかし、これらのプラスチック類は燃料としての性状が一定でなく、汚れの付着および汚染も想定され、さらに再度集積・下水処理場への運搬等の追加作業やエネルギーを要することから、不燃ごみ等から分別されたプラスチック類のみを下水汚泥焼却炉で利用することは、実現可能性が低いと判断された。

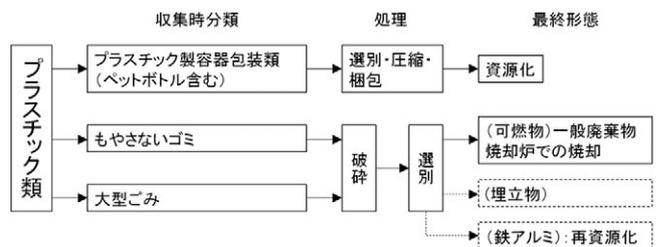


Fig.1 Plastic waste disposal process

③ 草木類

草木類については、民間由来と公共事業由来のものがあった。民間由来のものは、パッカー車等で公共団体の事務として収集される場合と、一般廃棄物焼却施設(清掃工場)に直接持ち込まれる場合の2つの場合があった。あらかじめ収集区分に草木類が位置付けられていない場合は、清掃工場に持ち込まれた後はごみバンクに投入され、焼却処理される。ごみバンクから草木類のみを分別することは不可能であることから、あらかじめ草木類を分別して収集する仕組みを形成しない限り、A市およびB市の現状における下水汚泥焼却炉での利用は難しいと判断された。ただし、3.2

で後述する通り、ごみの収集区分に草木類を位置付け、草木類のみを分別収集している団体もあった。このような団体と同様の仕組みが形成できると仮定すれば、民間由来の草木類は下水焼却炉での利用が可能であると考えられた。

公共事業由来のものには道路や公園管理等の各市内の公共事業（刈草および剪定作業）で発生した草木類が主であり、これらの処理は市によって異なっていた。B市では発生場所から清掃工場に直接搬送して全量焼却されていたが、A市では発生場所から近隣の再資源化施設に直接搬送し、バイオマス燃料等に利用される事例もあった。そのため、公共由来の草木類については発生場所からの搬送先を下水処理場とすることで容易に草木類のみを下水処理場に集約することが可能であり、下水汚泥焼却炉での利用が可能であることが示された。

④ その他

厨芥などが中心となる混合された可燃ごみ（燃えるごみ・燃やすごみ）については、清掃工場等において分別が困難であり、また性状が一定でないことから、下水汚泥の専焼を想定した焼却炉での利用は実現可能性が低いと判断された。

以上より、一般廃棄物の内、分別が可能かつ既存リサイクルで全量処理されていない草木類については、分別して収集する仕組みを形成できれば、下水汚泥焼却炉の補助燃料として利用できる可能性があることが分かった。その他については、既存リサイクルで全量処理されて利用できる資源がないこと（古紙・容器包装リサイクル法対象物）や性状が一定でないこと（容器包装リサイクル法の対象とならないプラスチックや厨芥等）から実現可能性が低いと判断された。

3. 回収草木類の活用による下水汚泥焼却炉での化石燃料削減効果の試算

2.において、可燃性一般廃棄物のうち、草木類のみを分離回収することができれば、下水汚泥焼却炉の補助燃料としての利用可能性が示された。そこで3.においては回収された草木類の活用による下水汚泥焼却炉での燃料削減効果の実行可能性を調査した。

3.1 検討対象団体の抽出

廃棄物を他法人で処理することは、事業の責任分界点や費用等の調整が複雑になることが想定されるため、ここでは同一団体内での有効利用について検討を行った。下水汚泥焼却炉を有している単独公共下水道を実施している団体（東京都区部及び事務組合を除く。市域の一部に流域下水道を有している団体は含む。焼却

炉の運転を休止している団体については除く。）を抽出し、草木類の分別状況について整理を行った。下水道統計（令和元年度）¹⁶⁾の汚泥焼却設備の項より抽出したところ、①焼却設備を有し、②汚泥最終処分の引渡又最終処分・汚泥性状が焼却灰（もしくはブランク）であり、③事業区分名が流域ではなく、④東京都区部及び事務組合を除く条件にすべて合致する団体数は延べ47であった。

3.2 草木類の分別状況と回収量の把握

分別状況は令和4年4月時点での各市のHPで掲載されているごみの分別区分一覧や一般廃棄物処理基本計画等を閲覧し確認を行った。47団体のうち、4団体（札幌市・千葉市・鎌倉市・浜松市）では枝・葉・草を対象に、燃えるごみとは別に分別回収されており、堆肥化等の資源化がなされていた。このうち浜松市のみが、清掃工場等に設置された回収場所に持ち込む形式であり、その他は1～4週に1回の頻度で戸別収集の形式であった。札幌市では5月から12月中旬の間での収集となっていた。

6団体（仙台市・八王子市・立川市・町田市・藤沢市・京都市）は枝のみを対象に、1団体（旭川市）では枝と葉を対象に資源化されていた。このうち京都市は、公園等に設置された移動式の回収拠点に持ち込む形式であり、藤沢市は予約制での戸別収集、その他は1～2週に1回の頻度で戸別収集の形式であった。仙台市と旭川市では、札幌市と同様に冬季における収集を行っていなかった。資源化（堆肥利用）の際に支障をきたす有毒な植物などを対象外と明記する団体もあった。

残りの36団体では枝・葉・草いずれも燃えるごみとして処分をされていた。なお、燃えるごみとして収集している団体の一部においては、収集した枝を清掃工場において別途処理し、チップ化して有効利用している事例も確認された。また、燃えるごみとしては市指定の有料のごみ袋で排出が求められている中で、枝のみもしくは草葉も含めて無料で回収されている事例もあった。この時枝は束ねてそのまま排出することが認められる（市指定のごみ袋を使用する必要がない）事例が多く、枝のみを分別して回収することは、費用負担の観点等から家庭での排出時におけるハードルが低くなり、さらに枝のみの回収とすることで異物の混入率も低下することが想定された。

続いて回収量については何らかの回収を行っている11団体の一般廃棄物処理実施計画もしくは一般廃棄物処理基本計画から回収量の把握を試みたが、うち2団体については回収量の確認ができなかったため、9団体の状況を **Table 1**¹⁷⁻²⁷⁾に示す。なお家庭由来の廃棄物のみを計上しており、事業所由来については計上

Table 1 The amount of collected branches in each city

	都市名	人口 (R2年)	回収量 (t-wet)	市域面積 (km ²)	単位市域面積・日当たりの回収量 (kg-wet/km ² /日)	備考
枝葉草を 回収	札幌市	約200万	19,600	1,100	48	回収量はR4計画値
	千葉市	約100万	7,000	280	71	回収量はR4計画値
	鎌倉市	約20万	5,218	40	360	回収量はR3発生推定値
枝のみを 分離して 回収	旭川市	約30万	403	750	1.5	回収量は計画値(年度不明)
	仙台市	約110万	350	790	1.2	回収量はR4計画値
	八王子市	約60万	631	190	9.3	回収量はR4計画値
	立川市	約20万	514	24	58	回収量はH30実績値
	町田市	約40万	1,299	72	50	回収量はR4計画値
	藤沢市	約40万	510	70	20	回収量はR2実績値

していない。また、一部団体では冬季の回収を行っていないが、このような団体においても日あたりの回収量の計算は年間の回収量を365で除して求めている。

9団体のうち、3団体は地方の拠点都市であり、6団体は東京近郊の団体であった。東京近郊の団体では、地方の拠点都市と比べて単位面積・一日あたりの回収量が大きくなる傾向にあった。緑化率や回収率、一般廃棄物焼却炉の運転の余裕については団体によって異なる。特に、都市化が進んだ団体では、新しい清掃工場を建設する用地の確保が困難となることが予想され、更新の際に既存の清掃工場を撤去し、建て替える場合がある。この時、人口減少をふまえ、一般廃棄物発生量の将来的な低下を見込んだ設計がなされると、更新された一般廃棄物焼却炉の焼却能力は小さくなり、一般廃棄物発生量が設計通りに減少するまで焼却炉の運転の余裕が極めて少ない状況になる。このような場合、少しでも焼却量を減らすため、草木類を積極的に回収し、資源化に取り組む事例もある²⁸⁾。

3.3 枝の回収量と下水汚泥焼却炉で必要とされる補助燃料の比較

(1) 枝のみの回収を実施している団体における回収枝の熱量との比較

3.2において、枝のみの分別回収は、家庭での排出時におけるハードルが低く、草木を資源ごみとして回収している団体の約半数が枝のみを対象としていることから、実現可能性があることが想定された。そこで、回収できる枝の熱量と、現状下水汚泥焼却に必要としている補助燃料の熱量の比較を行い、草木類によってどの程度の化石燃料と置き換えることができる可能性があるのか検討した。枝のみを回収している6団体を対象に、資源ごみとして回収された枝の総回収熱量(資源ごみとして回収された枝の総重量(計画値を含む)に枝の低位発熱量を乗じたもの)と、当該団体が有する焼却炉において使用していた補助燃料の総熱量を比較した。当該団体が複数の下水汚泥焼却炉を有している場合は、その合計の補助燃料の熱量とした。複数の種類の燃料を使用している場合は、合計の熱量と

比較を行った。また市域の一部が流域下水道でも処理されている団体においては、ここでは単独公共下水道のみへの供給を仮定している。使用した補助燃料については、下水道統計により令和元年度の使用量¹⁶⁾及び**Table 2**に示す代表的な補助燃料の単位体積当たりの熱量²⁹⁻³²⁾を乗じた。なお、八王子市においては、使用している燃料がその他となっており、詳細が不明なため検討から除外した。

Table 2 Low calorific value of typical fuel

	低位発熱量	
重油	36.7 MJ/L	参考文献 29), 30)
灯油	34.3 MJ/L	参考文献 29), 30)
都市ガス	36.5 MJ/m ³	参考文献 29), 30)
プロパンガス	26.1 MJ/m ³	参考文献 31)
消化ガス	20.8 MJ/m ³	参考文献 32)

枝の熱量については、筆者らが実施した剪定枝の分析例を参考に低位発熱量を求め、各市の回収量を乗じて求めた。分析に供したサンプルの写真を**Photo. 1**に、組成を**Table 3**に示す。分析の対象とした剪定枝はケヤキであった。高位発熱量はJIS M 8814にしたがって、島津製作所製CA-4AJ自動ボンベ熱量計



Photo. 1 Pruned branch samples and their composition

Table 3 The composition of the pruned branch

高位発熱量	19050 KJ/kg-DS
水分	43%-wet
可燃分率-DS	93.9%-DS
灰分-DS	6.1%-DS
C-VS	49.1%-VS
H-VS	6.3%-VS
O-VS	43.4%-VS
N-VS	1.1%-VS
S-VS	0.1%-VS

を用いて測定したところ 19 MJ/kg-DS であった。含水率は下水試験法によって測定し、43%であった。また水素含有量は CHN 計 (Thermo Fisher Scientific 製 FLASH EA 1112) によって測定し、5.9 質量 %-DS であった。その結果 25℃での低位発熱量は約 9 MJ/kg-wet であり、これは文献値³³⁾と比較しても同等であった。

八王子市を除いた 5 団体における下水汚泥焼却炉の投入補助燃料と回収枝の熱量の関係を Fig. 2 に示す。図中の補助線より上であれば、回収枝の熱量の方が投入補助燃料よりも大きくなる。1 団体のみは年間回収枝の熱量が投入補助燃料の熱量を超過したものの、そのほかは約半分以下にとどまった。

(2) 下水処理区域面積から想定された回収枝の熱量との比較
 続いて、全 47 団体から、下水道統計 (R1 版) に焼却した脱水汚泥量が示されていない 2 団体 (稚内市と乾燥汚泥で焼却されている明石市) と補助燃料の大半が明確になっていない八王子市を除いた 44 団体を対象に、枝のみの仮想回収量を想定して試算を行った。回収できる枝は市街化区域のみから発生しているものと仮定し、想定枝回収量は、Table 1 で最小となった仙台市における市街化区域面積に対する枝の発生原単位を、当該処理場の処理区面積に対して乗じて求めた。実際の枝の回収量は季節による変動が想定されるが、枝を保管できるストックヤードが確保できると仮定し、年間で平準化して利用できると想定した。焼却炉を有

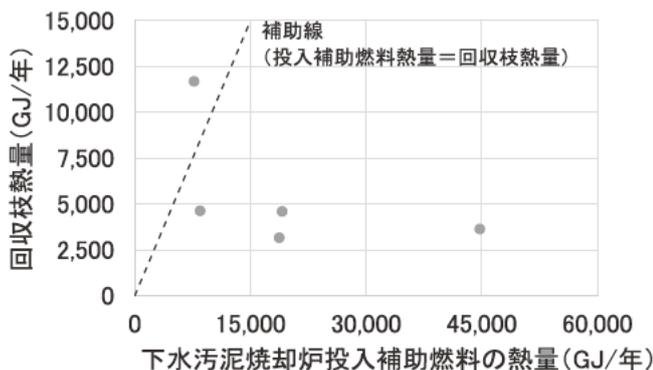


Fig. 2 Calories comparison between recovered branches and fuel input to sewage sludge incinerator

する処理場に汚泥を送泥管やトラック等で輸送して集合処理している処理区についても対象処理区とした。また、焼却炉を有する処理場において、炭化等の焼却以外の処理も実施している場合、回収した枝は下水汚泥焼却炉のみで使用すると仮定した。なお、焼却炉が複数ある場合 (同一市の複数の処理場にまたがる場合も含める) は、その合算の燃料との比較を行った。燃料の原単位は先述の Table 2 の値を用いた。汚泥焼却量に対する試算された枝回収量の比率を汚泥に対する重量比 (湿潤重量ベース) とした。また、焼却炉で使用している補助燃料の熱量に対する枝の熱量の比率を熱量比 (低位発熱量ベース) とした。

縦軸に汚泥に対する重量比および横軸に熱量比をプロットしたグラフを Fig. 3 に示す。焼却汚泥量に対する枝の回収量は概ね 0.1% から 2% となり、団体による違いは明確に表れなかった。通常、発生汚泥量は処理人口に依存することから、市街化されている区域では処理区域面積の増加と共に増加する傾向が予想される。本調査では処理区域面積に対して草木類の発生は一定比率と設定したため、草木類の発生量も処理区域面積の増加と共に増加する試算となった。このため、今回の試算では、汚泥量と枝回収量の比率は概ね一定になったと考えられる。なお、室本らは、実施設で 25 日間、下水汚泥に重量比で約 7% の木質系バイオマスを加えて混焼した実験結果を報告している⁷⁾。そのため、焼却汚泥量に対して 1% 程度であれば、混焼するにあたっては現実的な値であることも確認できた。

一方補助燃料に対する回収枝の総熱量の比率は 1% から 90% まで大きくばらついた (中央値 3.4%)。この原因としては、処理区域面積あたりの焼却炉が必要とされる補助燃料の熱量にばらつきが大きいことが予想される。処理区域面積と発生汚泥量には正の相関 (切片 0 の一次関数で近似すると、 $R^2=0.85$) があることから、最終的には単位汚泥あたりに必要とされる補助燃料の熱量に左右されると考えられる。例えば含水率 78% 前後で焼却処理されることの多い脱水汚泥 (下

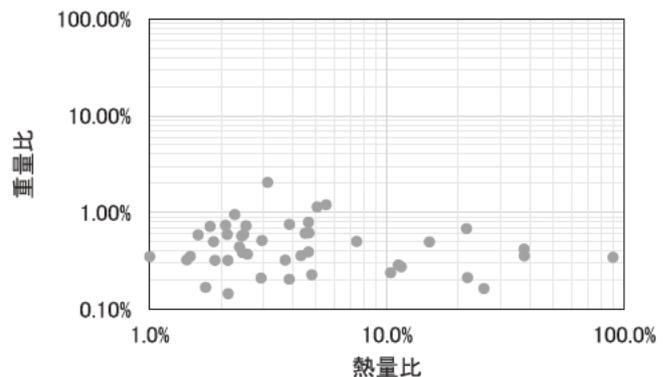


Fig. 3 Relationship between the estimated weight ratio of branch recovery to incinerated sludge and the calorie ratio of branches to auxiliary fuel used in the incinerator

水道統計¹⁶⁾では、各焼却炉に投入される汚泥の平均含水率の中央値は77.6%)を含水率70%前半まで絞っている場合や、高効率な過給式流動床炉等の焼却炉を主に使用している場合は、運転時に使用する補助燃料が少なくなる³⁴⁾。このような団体では、処理区域面積あたりの補助燃料の熱量も小さくなり、今回の試算では補助燃料に対する回収枝の総熱量の比率が10%を超えるような値を示していた。

(3) 温室効果ガス削減効果の試算

実態に即した枝の有効利用を考えると、堆肥化等の既存のリサイクルシステムが確立している団体においては、新たに下水汚泥焼却炉での混焼を実施することは困難を伴うことが予想される。そこで(2)で抽出された44団体のうち、Table 1で記載した団体に該当しない36団体を対象に効果の検討を行った。36団体のうち、一般廃棄物焼却施設で発電されている団体は、R2年度の廃棄物処理技術情報³⁵⁾により確認したところ25団体存在し、残り11団体では発電利用はな

されていなかった。これらの11団体において想定された枝回収量は約350 t-wet/年であり、その低位発熱量は約3,200 GJ/年であった。平均的な一般廃棄物焼却炉での発電効率は14%であった³⁶⁾ので、これを仮に一般廃棄物の発電利用を想定すると年間約440 GJ (3200 GJ/年×14%)÷0.12 GWhの電力が生み出され、電気事業者別排出係数(R2年度実績)代替値(0.000453 (t-CO₂/kWh)³⁷⁾を乗じて求めたCO₂の排出削減は約56 t-CO₂である。

これに対して、枝を下水汚泥焼却炉で補助燃料として利用した場合における燃料削減効果を試算した。補助燃料は、投入熱量が等しくても燃料の組成によって持ち出し熱量等に違いがあるため、所定の燃焼温度を確保するために供給しなければならぬ熱量に差が生じる。ここで、空気比を1.3、燃焼温度は900℃、放熱量を入熱の5%とし、燃料中に含まれる窒素と硫黄はそれぞれ燃焼時にN₂、SO₂として大気に放出されると仮定した燃焼条件で試算すると、例えば重油1 GJ

Table 4 Estimation of heat supply

共通諸元			
空気組成	空気中の水分	0.01kg-H ₂ O/kg-乾燥空気	20℃相対湿度70%を想定 参考文献 38)
	乾燥空気中の窒素	79 %-V/V	参考文献 39)
		77 %-kg/kg	参考文献 39)
	乾燥空気中の酸素	21 %-V/V	参考文献 39)
23 %-kg/kg		参考文献 39)	
基準温度	20℃	仮定	
空気余熱温度	650℃	仮定	
燃焼温度	900℃	仮定	
空気比	1.3	参考文献 40)	
比熱			
比熱	灰の比熱	0.84 kJ/kg-℃	(一般廃棄物と同等と仮定) 参考文献 42)
	CO ₂	2.187 kJ/Nm ³ /℃	0-900℃平均
	N ₂	1.387 kJ/Nm ³ /℃	0-900℃平均
	O ₂	1.467 kJ/Nm ³ /℃	0-900℃平均
	SO ₂	2.22 kJ/Nm ³ /℃	0-900℃平均
	H ₂ O	1.69 kJ/Nm ³ /℃	0-900℃平均
	H ₂ O	1.62 kJ/Nm ³ /℃	0-650℃平均
	空気	1.365 kJ/Nm ³ /℃	0-650℃平均
水の潜熱	2,454 kJ/kg	20℃ 気圧 1 atm	参考文献 44)
燃料組成 (枝)			
燃料組成 (枝)	高位発熱量	19,050 KJ/kg-DS	分析値
	水分	43 %-wet	分析値
	可燃分率-DS	93.9 %-DS	分析値
	灰分-DS	6.1 %-DS	分析値
	C-VS	49.1 %-VS	分析値
	H-VS	6.3 %-VS	分析値
	O-VS	43.4 %-VS	100からCHNSのVS値を減じた
	N-VS	1.1 %-VS	分析値
	S-VS	0.1 %-VS	分析値
	試算 (枝)		
試算 (枝)	必要空気量	乾き空気 3.21 kg	2.49 Nm ³
		水分 0.032 kg	0.040 Nm ³
燃焼ガス			
燃焼ガス	CO ₂	0.96 kg	0.49 Nm ³
	N ₂	3.22 kg	2.58 Nm ³
	O ₂	0.22 kg	0.16 Nm ³
	SO ₂	0.0011 kg	0.0004 Nm ³
	H ₂ O	0.35 kg	0.43 Nm ³
入熱			
入熱		出熱	
補助燃料燃焼熱量	46 MJ	乾き燃焼ガスの持ち去る熱量	18 MJ
乾き空気熱量	13 MJ	燃焼用空気水分の保有潜熱熱量	0.82 MJ
燃焼用空気水分の保有潜熱熱量	0.71 MJ	燃料中の水分の保有潜熱熱量	0 MJ
		燃焼生成水分潜熱熱量	5.1 MJ
		灰持ち出し熱量	0 MJ
		放熱量相当	2.9 MJ
合計	59 MJ	合計	27 MJ
供給可能熱量	32MJ		
低位発熱量	43MJ	比	75%
入熱			
入熱		出熱	
補助燃料燃焼熱量	11 MJ	乾き燃焼ガスの持ち去る熱量	4.3 MJ
乾き空気熱量	2.8 MJ	燃焼用空気水分の保有潜熱熱量	0.18 MJ
燃焼用空気水分の保有潜熱熱量	0.17 MJ	燃料中の水分の保有潜熱熱量	1.9 MJ
		燃焼生成水分潜熱熱量	1.3 MJ
		灰持ち出し熱量	0.026 MJ
		放熱量相当	0.69 MJ
合計	14 MJ	合計	8.3 MJ
供給可能熱量	5.5MJ		
低位発熱量	9.1MJ	比	60%

(低位)が必要な運転条件では、剪定枝 1.2 GJ (低位)の投入が必要となる (Table 4)。そのため、想定した回収枝を焼却炉で利用すると、重油換算では年間約 2,500 GJ (3200 GJ/年 ÷ 1.2) = 約 70 kL (2700 GJ ÷ 重油の低位発熱量 37 MJ/L) 相当が削減され、A 重油の温室効果ガス排出係数 (2.71 t-CO₂/kL)⁴⁶⁾ を乗じて求めた CO₂ の排出削減は約 190 t-CO₂ である。

ただし、対象とした 11 団体すべてが補助燃料として重油を使用しているわけではなく、また、枝の補助燃料利用にあたって運搬や搬送・投入に関するプロセスでも別途エネルギーを要するため、実際の効果はこの値よりも小さくなることが想定される。

4. ま と め

本研究により以下のことが明らかとなった。

- 1) 一般廃棄物の収集と利用可能性に関するヒアリング調査の結果、一般廃棄物の内、既存リサイクルで全量処理されず、分別回収が可能な資源である草木類については下水汚泥焼却炉の補助燃料として利用可能性が想定された。その他の古紙やプラスチックについては直接的な利用は困難であることが確認された。
- 2) 枝のみを回収している単独公共下水道実施団体において、下水汚泥焼却炉における補助燃料投入熱量に対する一般廃棄物として回収された枝の熱量を比較したところ、1 団体のみは年間回収枝の熱量が投入補助燃料の熱量を超過したものの、そのほかは約半分以下にとどまった。
- 3) 下水処理区域面積より試算された枝の回収量は、下水汚泥の重量に対し、0.1 ~ 2% 程度となった。また、この時の焼却炉で使用している補助燃料の熱量に対する枝の熱量の比率は 1% 弱から 90% 弱まで大きくばらつきが生じることが分かった。
- 4) 枝・葉・草の資源化がされていない 36 団体のうち、一般廃棄物焼却施設において発電設備を有していない 11 団体を対象に試算した結果、枝の想定回収量は約 350 t-wet/年となり、重油換算で約 70 kL/年、CO₂ の排出量として約 190 t-CO₂ の削減効果が試算された。

謝 辞

A 市・B 市の関係各位にはヒアリングにご協力頂きました。ここに記して謝意を示します。なお、本研究の一部は国土交通省令和 3 年度下水道応用研究において実施したことを記す。

参 考 文 献

- 1) 笠倉忠夫, 平岡正勝: 多段炉による下水汚泥脱水ケーキの自然焼却について, 環境技術, Vol.9, No.5, pp.371-381 (1980)
- 2) 平岡正勝, 吉野善彌: 汚泥処理工学, 講談社サイエンスフィク, p.134 (1983)
- 3) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説-2019 版, 後編, p.561 (2019)
- 4) 大下和徹, 高岡昌輝, 水野孝昭: 下水汚泥処理における焼却廃熱を利用した発電システムの検討, 土木学会論文集 G (環境), vol.68, No.7, pp.Ⅲ 317-324 (2012)
- 5) 石部健輔, 北川勝, 鮫島良二, 中原則之: 下呂市クリーンセンターにおける汚泥混焼実績, 第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, pp.293-294 (2019)
- 6) 田所伸悟: 金沢市西部環境エネルギーセンター運転報告——下水汚泥混焼について——, タクマ技報, Vol.20, No.2, pp.14-19 (2012)
- 7) 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)
- 8) 中平哲也: 廃プラを使った汚泥焼却と熱の有効利用——ゴミをつかってゴミを燃やす——, 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 (2022/5/31 閲覧)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) 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 CO₂ の削減, 第 42 回下水道研究発表会講演集, pp.49-51 (2005)
- 12) 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)
- 13) 環境省 HP 一般廃棄物の排出及び処理状況等 (令和元年度) について
<https://www.env.go.jp/press/109290-print.html> (2022/5/31 閲覧)
- 14) 厚生省: 環整 95 号 一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について
- 15) 環境省 HP: 市町村一般廃棄物処理システム評価支援ツール (令和元年実態調査結果),
https://www.env.go.jp/recycle/waste/tool_gwd3r/gl-mcs/est_r1.zip
- 16) 日本下水道協会: 下水道統計 (令和元年度版)
- 17) 札幌市 HP: 札幌市告示第 1050 号 令和 4 年度一般廃棄物処理実施計画
https://www.city.sapporo.jp/seiso/keikaku/documents/r4_implementation_plan.pdf (2022/5/31 閲覧)
- 18) 千葉市 HP: 千葉市告示第 255 号 令和 4 年度一般廃棄物処理実施計画
<https://www.city.chiba.jp/kankyo/junkan/haikibutsu/documents/r4gomishorijishikeikaku.pdf> (2022/5/31 閲覧)
- 19) 鎌倉市 HP: 第 3 次鎌倉市ごみ処理基本計画 令和 3 年 (2021 年) 6 月改定
<https://www.city.kamakura.kanagawa.jp/gomi/documents/2shou.pdf> (2022/5/31 閲覧)
- 20) 旭川市 HP: 新・旭川市ごみ処理・生活排水処理基本計画【改訂版】(第 2 版)
<https://www.city.asahikawa.hokkaido.jp/kurashi/271/307/>

- 310/p002764_d/fil/kihondai2.pdf (2022/5/31 閲覧)
- 21) 仙台市 HP: 令和4年度仙台市一般廃棄物処理実施計画
<https://www.city.sendai.jp/kikakukehatsu/kurashi/machi/genryo/chosa/kekaku/documents/r4jissikeikaku.pdf> (2022/5/31 閲覧)
- 22) 八王子市 HP: 八王子市告示第91号 令和4年度一般廃棄物処理実施計画
https://www.city.hachioji.tokyo.jp/kurashi/gomi/keikakudata/keikaku/p002566_d/fil/kokuji.pdf (2022/5/31 閲覧)
- 23) 立川市 HP: 立川市一般廃棄物処理基本計画 改定令和2(2020)年
<https://www.city.tachikawa.lg.jp/gomitaisaku/kurashi/gomi/shisaku/documents/kihonkeikaku.pdf> (2022/5/31 閲覧)
- 24) 町田市 HP: 2022年度一般廃棄物処理実施計画
<https://www.city.machida.tokyo.jp/kurashi/kankyo/gomi/keikakukaigi/keikakutou/gomishigenka/ippaijissikeikaku.files/2022nenndo.pdf> (2022/5/31 閲覧)
- 25) 藤沢市 HP: 一般廃棄物処理基本計画
<http://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/kankyou-s/kurashi/gomi/shisaku/documents/shorikihonkeikaku.pdf> (2022/5/31 閲覧)
- 26) e-stat HP: 国勢調査 令和2年 都道府県・市区町村別の主な結果
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000032143614&fileKind=0> (2022/5/31 閲覧)
- 27) 国交省 HP: 都市計画区域, 市街化区域, 地域地区の決定状況, 都市別一覧
<https://www.mlit.go.jp/common/000167879.xls> (2022/5/31 閲覧)
- 28) 千葉市 HP: 剪定枝等(木の枝・刈り草・葉)の再資源化事業
<https://www.city.chiba.jp/kankyo/junkan/shushugyomu/senteieda-recycle.html> (2022/7/12 閲覧)
- 29) 資源エネルギー庁 HP: エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数一覧表
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/xls/stte_039.xlsx (2022/5/31 閲覧)
- 30) 資源エネルギー庁 HP: 燃料種別の単位物量あたりの高位発熱量から低位発熱量への換算係数一覧変更について
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/green_energy/newenergy/geco2_iinnkai/25ref3.pdf (2022/5/31 閲覧)
- 31) 日本LPガス協会 HP: LPガスの性質
<https://www.j-lpgas.gr.jp/intr/seishitsu.html> (2022/5/31 閲覧)
- 32) 野池達也: メタン発酵, p.156 (2009)
- 33) 土木研究所: 草本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(2008)
- 34) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説(後編), p.566 (2019)
- 35) 環境省 HP: 廃棄物処理技術情報 令和2年度調査結果 施設別整備状況(焼却施設)
https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r2/data/seibi/facility/01.xlsx (2022/5/31 閲覧)
- 36) 環境省 HP: 日本の廃棄物処理 令和元年度版
https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r1/data/disposal.pdf (2022/5/31 閲覧)
- 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) - R2年度実績 - R4.1.7 環境省・経済産業省公表, R4.2.17 一部修正
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r04_coefficient_rev.pdf (2022/5/31 閲覧)
- 38) (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)
- 39) 日本工業規格: JIS Z 9202 熱勘定方式通則 pp.1-2
- 40) 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)
- 41) 日本下水道事業団: 機械設備標準仕様書(平成31年版), pp.13-30 (2019)
- 42) 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)
- 43) 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)
- 44) (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)
- 45) (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)
- 46) 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
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf (2022/5/31 閲覧)

Basic Study on Usage of Combustible General Waste as Auxiliary Fuel in Sewage Sludge Incinerator

Toyohisa Miyamoto ^{1) †}, Keishi Tanifuji ¹⁾, Kensuke Sakurai ¹⁾,
Hiroyuki Shigemura ²⁾, Masaki Takaoka ³⁾ and Yuji Okayasu ¹⁾

- 1) Innovative Materials and Resources Research Center, National Research and Development Agency Public Works Research Institute
- 2) Wastewater and Sludge Management Division, National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan
- 3) Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Toyohisa Miyamoto :
Innovative Materials and Resources Research Center, National Research
and Development Agency Public Works Research Institute
E-mail : recycle-imarrc21@pwri.go.jp

Abstract

We propose the use of auxiliary fuels such as biomass in sewage sludge incinerators to reduce greenhouse gas emissions in sewerage works. In this study, we obtained information on the collection and treatment of combustible general wastes as an auxiliary fuel by interviewing the city officials. Results showed that only plant wastes were extracted as available resources that can be collected from combustible general wastes, and plant wastes were not fully treated by the existing recycling system. Furthermore, the effect of reducing fossil fuels used as auxiliary fuels for the sewage sludge incinerator was studied by estimating recovery amount of branches. The estimation for 11 cities revealed that the estimated recovery amount of branches is about 350t-wet/year, and CO₂ emissions can be reduced by 190t/year if used as auxiliary fuels.

Key words : sewage sludge incinerator, co-firing, general waste, vegetation