

下水乾燥汚泥の高効率流動床ガス化による 二酸化炭素誘発量の削減効果に関する分析

渡部 隼¹・吉田 登²

¹学生会員 和歌山大学 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)
E-mail:s094066@sys.wakayama-u.ac.jp

²正会員 和歌山大学准教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)
E-mail:yoshida@sys.wakayama-u.ac.jp

本研究では、産業連関分析を用いて、下水乾燥汚泥の高効率流動床ガス化による二酸化炭素誘発量の削減効果について、特に施設規模と効率との関係を考慮した分析を行った。まず、ガス化炉の実証データより、従来型汚泥焼却と汚泥ガス化との物質・エネルギーフローを比較し、次に、下水道統計をもとに下水汚泥焼却炉の規模別の更新スケジュールを求め、各ケースでの二酸化炭素誘発量の変化を考察した。分析の結果、直接・間接排出を併せた誘発負荷量で評価すると、全体で4.0~9.6万トン-C（下水道部門からの誘発二酸化炭素排出量の2~5%）を削減する結果を得た。また下水道業部門以外に、化学、電力部門等での間接負荷削減の効果も大きいことが示された。

Key Words : *sewage sludge, fluidized-bed gasifier, carbon dioxide, input-output analysis*

1. はじめに

現在、地球温暖化問題への速やかな対応が求められる中、下水道事業分野では国内電力消費量の約0.7%を占める大量のエネルギー消費が行われている。下水汚泥焼却時の N_2O 排出と併せて地球温暖化への寄与が懸念されている。また、近年、エネルギー資源としての下水汚泥に着目し、メタン発酵、ガス化、等のさまざまな先端技術によるバイオマス利活用の技術開発や実証への取り組みが進められている。2005年9月には「下水道ビジョン2100」がとりまとめられ、その施策方針の1つとして、下水道の有する資源回収・供給機能を積極的に活かして、下水処理場のエネルギー自立、地球温暖化防止等に貢献する「資源のみち」の創出が盛り込まれ、下水道分野におけるエネルギー利用、地球温暖化対策の中期的な施策のあり方等について検討が行われてきた。

このような背景のもと、本研究では、熱分解ガス化による下水汚泥バイオマスのエネルギー利用に着目し、従来の汚泥焼却とガス化とのエネルギーフローを比較し、また今後の焼却施設更新による導入スケジュールを想定した上で、産業連関分析を用いることにより、下水乾燥汚泥の高効率流動床ガス化による二酸化炭素誘発量の削減効果について分析を行うことを目的とする。

2. 下水汚泥のエネルギー転換技術

下水汚泥のエネルギー転換についてはいくつかの技術が開発されているものの実際の適用事例は未だ少ないのが現状である。その中でも実用化されているのはほとんどメタン発酵であり、用途としては熱利用（発酵槽加熱）と発電（所内電力用）である。NEDOが作成したバイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ策定に関する調査の成果報告書¹⁾では、メタン発酵、熱分解ガス化、水熱ガス化の技術開発、実用化が期待されている。以下、この3つの技術の概要を述べ、さらに本研究で扱う高効率流動床ガス化技術について述べる。

(1) 各転換技術の概要^{1),2)}

a) メタン発酵

高い含水率のバイオマスに対して、低温（最大60℃程度）下で変換が可能なシステムである。メタン発酵技術そのものは商用化もしくは実証試験段階であり、また排熱を利用した高効率なシステムを構成することも可能である。低温システムであるが故に処理速度が遅いため、メタン発酵の更なる高速化・高効率化を目指した技術開発が行われている。また、メタン発酵の残渣となる消化汚泥の処理に関する技術も開発されつつある。下水汚泥中には活性汚泥の余剰汚泥を多く含む。このような微生

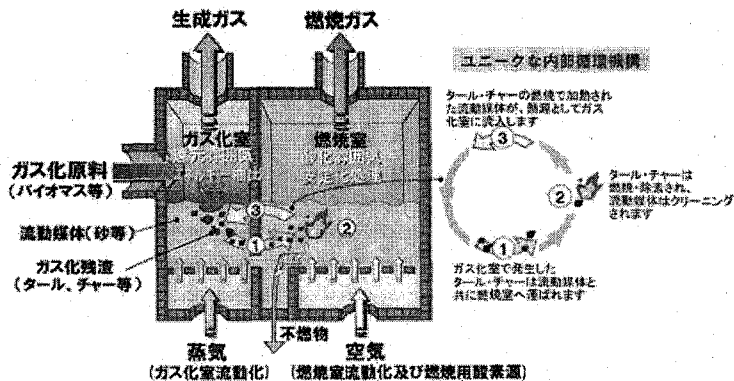


図-1 高効率流動床ガス化炉（内部循環型流動床炉）のしくみ

物バイオマスの分解速度・分解率は遅いため、それを補うために水熱反応やアルカリ処理などの前処理法の研究開発が進められている。

b) 熱分解ガス化

バイオマスを高温場において、熱分解と化学反応によって、ガス燃料または化学原料ガス（合成ガス）のガス状態に変換するプロセスをガス化と呼ぶ。バイオマスの熱分解ガス化では、常圧・直接ガス化プロセスが大半を占める。ガス化炉としては固定床炉、流動床炉、噴流床炉が主な形式である。下水汚泥のガス化システムは、その技術レベルが現状で既に実証試験段階のものが多く、商用化が期待されている。その変換特性から高温下（700～1,000℃）の雰囲気が必要であるが、高含水という下水汚泥の最大の特質から下水汚泥の乾燥（濃縮）の高効率化が課題であり、これには排熱回収等による効率向上、発酵ガス中の水蒸気潜熱を回収して補助熱源に利用するプロセス等、様々な解決案の開発が進められている。また、含水による加温ロスが少なく済む脱水汚泥（含水率75～80%）への適用が望まれている。

c) 水熱ガス化

大気圧（0.1MPa）で水を加熱すると100℃で沸騰して気化し、一気に体積が1000倍に膨張する。その際、圧力を上げていくと沸騰する温度が上がり生成する水蒸気は圧縮されるため、膨張率は小さくなる。高圧の22.1MPaにすると沸騰して生成する水蒸気の密度と水の密度が等しくなりこれ以上の圧力では沸騰は起こらなくなる。このような温度圧力（22.1MPa, 373℃）を水の臨界圧力、臨界温度と呼び、この温度圧力より高い状態を超臨界、この周辺の比較的高密度で反応性に富んだ状態を水熱状態という。バイオマスをこの水熱状態に置くと、有機物の分解が迅速に進み、ガス化の反応が容易に進行する。水熱ガス化技術は含水率の高い下水汚泥に対しても原料乾燥の必要がない点でトータルシステムでの高効率も可能となる技術であり、未だ基礎試験の段階ではあるが将

来的に期待されている。水熱ガス化システムは、比較的低温（500～600℃）雰囲気での処理技術であり、主な課題としては触媒の開発に加え、反応温度等の操作条件の最適化、機器の低コスト化が挙げられる。

(2) 高効率流動床ガス化（内部循環型流動床）

前述の熱分解ガス化炉の1つである流動床ガス化炉は炉底に砂やアルミナを入れ、これを下から供給されるガス化剤（空気、酸素、水蒸気）によって流動化させベッド部という熱分解反応空間を形成する。ベッド部に供給されたバイオマス等の原料は流動材に攪拌されながら流動材からの熱を受けて揮発分のガス化とチャー生成が起こる。熱エネルギーのカスケード利用による下水汚泥からの高効率エネルギー回収を行う流動床炉の先導技術の代表的なものに、内部循環流動床ガス化（ICFG: Internally Circulating Fluidized-Bed Gasifier, 図-1参照）³⁾がある。下水汚泥を内部循環流動床ガス化炉によりガス化し、ガスエンジン発電、コジェネレーション利用する技術システムの適用が可能である。この技術の最大の特徴は、仕切壁により炉内をガス化室と燃焼室とに分離している点にある。同一の室内でガス化と燃焼を行う従来の部分燃焼型ガス化炉では生成ガスが燃焼ガスと混ざり希釈されるのに対し、この内部循環型流動床炉では生成ガスを分離して高濃度のまま抽出できる。この他、燃焼室より排出されるガスには未燃分が含まれないので後段に複雑な排ガス処理設備が不要なこと、燃焼用の酸素源としてコストのかかる純酸素ではなく空気が使用可能などのメリットも得られる。加えて、内部循環流動床炉では単純に燃焼させる量が減ることや、無酸素状態のガス化室では高い温室効果を持つ亜酸化窒素の発生量を抑制できるなど、地球温暖化抑制に対しても優れた特性を有する。

欧州でもギュッシング社（オーストリア）、ルルギ社（スイス）、ベルナモ社（スウェーデン）、ARBRE社

(イギリス)などでバイオマス流動床ガス化技術が開発されている。例えばオーストリアのギュッシング⁴⁾ではこの内部循環流動床炉と同様、ガス化室と燃焼室を分離させたガス化炉を開発している。

3. 分析方法

(1) エネルギー・フローの比較

内部循環流動床ガス化炉の実証試験報告⁵⁾及び現地でのヒアリング調査に基づき、既存の污泥焼却炉と内部循環流動床ガス化炉でのエネルギー・フローを比較する。従来型の買電及び化石燃料の助燃による污泥焼却と下水污泥をガス化してガスエンジン発電を場内利用する場合とを比較する。

(2) 下水污泥焼却炉へのガス化導入シナリオの設定

下水道統計⁶⁾をもとに、既存下水污泥焼却炉において20年の更新周期を仮定した場合の規模別の更新スケジュールを求める。今後2011年～2030年までの20年間に、1炉あたりの処理能力として

- i) 200t/D以上の大規模炉の更新時に導入
- ii) 100t/D以上の中・大規模炉の更新時に導入
- iii) 100t/D未満を含む全ての污泥焼却炉の更新時に導入の3ケースでのガス化導入しうる規模を污泥処理能力ベースで推計する。

(3) 産業連関分析による誘発二酸化炭素排出量の計算

産業連関表から得られる最終需要と生産額との関係は

(1)式のように表される。

$$Ax + f = x \quad (1)$$

ここで、 x は国内生産額の列ベクトル、 f は最終需要の列ベクトル、 A は投入係数行列

いま、第 j 部門における生産活動1単位あたりの CO_2 排出量を CO_2 排出係数とし、(2)式のように定義する。

$$e_j = \text{CO}_2 / x_j \quad (2)$$

ここで、 e_j は第 j 部門の CO_2 排出係数、 CO_2 は第 j 部門からの CO_2 排出量、 x_j は第 j 部門の国内生産額

この各産業部門の CO_2 排出係数を対角行列に並べた行列を E とすれば最終消費から1年間に誘発される各部門の CO_2 排出量は(3)式のように表わされる。

$$e_f = E(I - A)^{-1} * f \quad (3)$$

ここで、 e_f は各部門の CO_2 誘発量の列ベクトル、 E は CO_2

排出係数の対角行列、 I は単位行列、 A は投入係数行列、 f は最終需要の列ベクトル

本分析では総務省が提供する産業連関表中分類を用いて分析を行う。各ケース毎に、下水污泥投入量、都市ガス投入量、電力回収量、污泥焼却用の重油代替量、機器の維持補修需要を求め、これらを廃棄物産業連関表の下水道部門における石油製品部門（第20部門）、電気業部門（第62部門）、ガス業部門（第63部門）からの投入係数変化として計上し、あわせて、都市ガスの追加投入及び污泥焼却用の重油削減を考慮した下水污泥部門での二酸化炭素直接排出係数変化を推計、計上した。以上の分析の流れを図-2に示す。

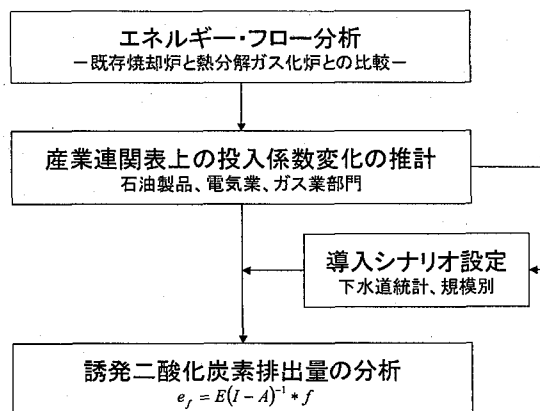


図-2 分析フロー

4. 分析結果

(1) エネルギー・フローの比較

従来型の污泥焼却を行い所内動力を買電する場合と污泥を熱分解ガス化（100t/D規模）し自家発電で所内動力を確保する場合とのエネルギー・フローを比較して図-3に示す。従来型の場合、処理場での所内動力2.4MWを賄うためには需要端発電効率を36%として1次エネルギーは7.8MW必要とされ、さらに污泥焼却の助燃のために重油・都市ガスが0.6MW消費されるため、合計の1次エネルギー投入量は8.4MWとなる。これに対して熱分解ガス化の場合、処理場での所内動力分2.4MWとガス化炉の運転動力0.6MWを合わせた3.0MWの電力をガスエンジン発電により確保するためにガス化炉からの生成ガスをカロリーアップして助燃するための都市ガス供給が5.1MW、また污泥の造粒乾燥設備、ガス化剤供給のための小型ボイラでの燃焼、燃焼脱臭設備への都市ガス投入が1.1MW必要となり、合計6.2MWの1次エネルギーが投入される。この過程では発電排熱1.6MWの熱回収と炉でのカスケー

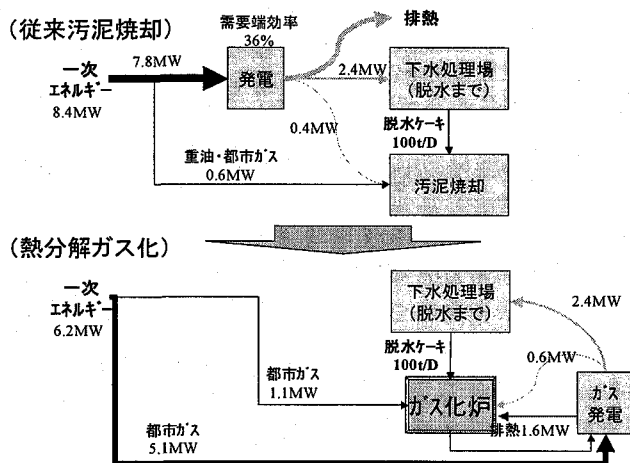


図-3 従来型汚泥焼却と熱分解ガス化とのエネルギー・フローの比較

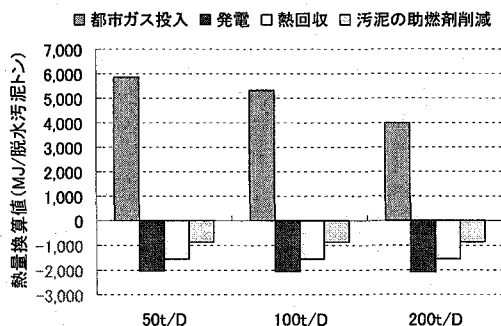


図-4 ガス炉の規模ごとのエネルギー投入変化

ド利用がおこなわれる。これにより、1次エネルギー消費を従来型より約26%削減することができる。

次に規模による効果を調べ、同様のエネルギー・フローを比較して50t/D、100t/D、200t/Dでの脱水汚泥トンあたりの都市ガス投入量、発電量、熱回収量、汚泥の助燃剤削減量を比較したものを図-4に示す。規模が大き

なるにつれ冷ガス効率（生成ガス収率）の向上及び熱ロスの削減により、都市ガス投入エネルギーが削減される。特に200t/D規模での都市ガス投入の削減が大きいことが顕著に伺われる。

(2) 下水汚泥焼却炉の更新とガス化炉の導入シナリオ

下水汚泥焼却炉の更新スケジュールは各処理場ごとに多様であり、また更新履歴の詳細を全国規模で追える情報は整備されていない。ここでは、下水道統計から各下水汚泥焼却炉の建設年次を抽出し、そこから20年の更新周期を仮定して、かつ複数基ある場合は実態に即して20年ごとに1基ずつの更新を仮定した。ただし、将来の処理量の変化に伴う施設規模の増減は想定していない。これにより求まる、2011年以降2030年の20年間における焼却炉の更新がどのようなスケジュールで進むかを処理能力区分ごとに求めたものを図-5に示す。ここで設定した更新条件下では、200t/D以上、100t/D以上200t/D未満、100t/D未満の各処理能力ごとに今後の20年間でそれぞれ処理能力に換算して1670t/D、2186t/D、1908t/D、累計の

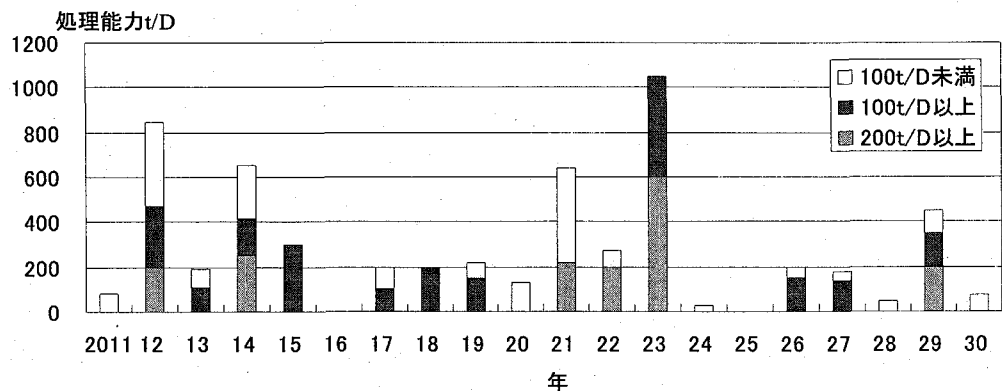


図-5 2011～2030年における各処理能力ごとの汚泥焼却炉の更新

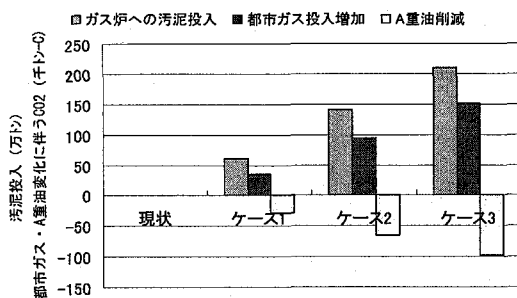


図-6 規模ごとの下水道部門 CO2 直接排出量の変化

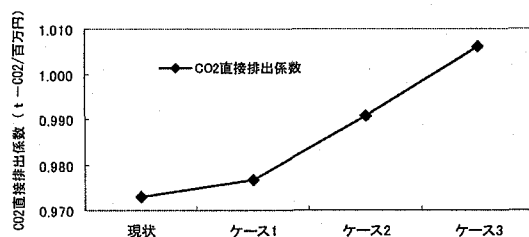


図-7 下水道部門の CO2 排出係数の変化

合計で脱水汚泥576t/D分の汚泥焼却炉が更新されることになる。これに対して、

- i) 200t/D以上の大規模炉の更新時に導入
 - ii) 100t/D以上の中・大規模炉の更新時に導入
 - iii) 100t/D未満を含む全ての汚泥焼却炉の更新時に導入
- の3ケースでのガス炉へ導入した場合の誘発CO₂排出量の変化を推計する。

(3) 誘発二酸化炭素量の削減効果

ガス化炉への更新に伴って、更新する処理規模に応じたエネルギー投入変化が直接、間接を合わせた誘発負荷量の変化となって表れる。まず、各ケースにおける下水道部門での直接CO₂排出量の変化を図-6に示す。汚泥投入量の増加に伴い、A重油の削減、また電力部門からの投入量が削減される一方で都市ガスの投入増加に伴う直接CO₂排出量が増加する。これにより、図-7に示すように、CO₂直接排出量原単位は増加を示す。200t/D以上の場合と100t/D以上の場合とを比較すると規模効率の低下が避けられないため100t/D以上のケースのほうがCO₂排出係数は増加する。全規模を対象にするケースではさらにCO₂排出係数は増加する。一方で電力由来の間接的な排出量削減効果を含め誘発負荷量の削減が期待されるため、ケースを拡大すると削減の効率自体は低下するものの、削減量そのものは拡大することが期待される。

結果としてのCO₂誘発負荷量の変化を図-8に示す。ここでは、下水道部門と下水道部門以外に分けた誘発負荷量を示している。縦軸の誘発CO₂排出量の数値がマイナ

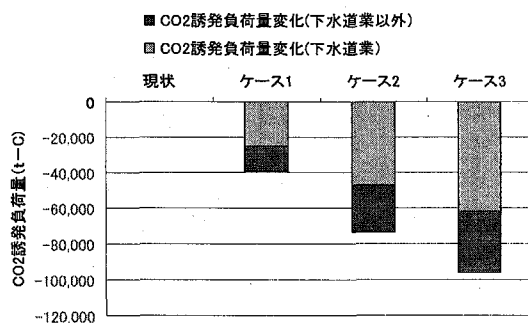


図-8 ガス化に伴う誘発 CO2 排出量の変化

スの場合、CO₂排出量が削減されることを意味している。図に示されるとおり、ケース1では約40千t-C、ケース2では約73千t-C、ケース3では約96千t-Cの二酸化炭素排出量を削減する効果をもたらすことが分かる。これは下水道部門が誘発するCO₂負荷量1850千t-Cの約2.1%、4.0%、5.2%にそれぞれ相当する。施設更新は1年ずつ少しづつ行われるため、20年間にわたる累計でもたらされる効果であることに留意する必要がある。ケースを拡大すると直接排出量の増大により削減量が相殺される部分が大きく削減量自体は増加するものの限界的な効果は小さくなる。さらにこの図からは間接的な削減効果が大きいことが分かる。下水道部門以外にも、化学、電力などで一定量の間接CO₂負荷量が削減されることが示されている。

5. 結論

本研究ではエネルギー・フローの比較及び産業連関分析を用いることにより、下水汚泥の高効率流動床ガス化による二酸化炭素誘発量の削減効果について、特に施設規模と効率との関係を考慮した分析を行った。分析の結果、直接・間接排出を併せた誘発負荷量で評価すると、全体で25万トン-Cを削減する結果を得た。また下水道業部門以外に、化学、電力部門等での間接負荷削減の効果も大きいことが示された。

参考文献

- 1) エネルギー総合工学研究所: バイオマスエネルギーテクノロジ・ロードマップ策定に関する調査, pp.52-101, 2004.
- 2) 日本エネルギー学会: バイオマスハンドブック, pp.86-199, オーム社, 2002.
- 3) Kei MATSUOKA: "Fluidized-bed Gasification Technology for Waste-to-Energy", Proc. 9th China-Japan Symposium on Fluidization, Beijing, pp.255-258, 2006

- 4) 吉川邦夫・森塚秀人監修: バイオマス発電の最新技術, pp.1-259, シーエムシー出版, 2006. 排出抑制対策事業費等補助金（民間団体）事業者当技術開発事業成果報告書, pp.1-62, 2006.
- 5) 荏原製作所: 下水処理場における汚泥を活用した高効率エネルギー供給システムの開発・実証, 平成 17 年度二酸化炭素
- 6) 日本下水道協会: 下水道統計 H12 年度版, 2002.

ANALYSIS ON EMBODIED CARBON DIOXIDE REDUCTION BY HIGHLY EFFICIENT FRUIDIXZED BED GASIFICATION FOR SEWAGE SLUDGE

Jun WATANABE and Noboru YOSHIDA

In this research, changes in embodied carbon dioxide emission by introducing highly efficient fluidized bed gasification was calculated using input-output analysis. First, energy flows in existed sludge incineration and the gasification were examined, based on field and document survey data. Then, renewal schedule of domestic sewage sludge incinerators were estimated using sewage statistics. As a result, it was found that 96 thousand ton-C would be reduced annually for the period of 2011-2030, instead of increasing direct carbon dioxide emission due to increasing input of natural gas.