産業・環境インフラと連携した 下水汚泥の燃料利用がGHG削減に及ぼす効果

奥田 拓也¹・中尾 彰文²・山本 祐吾³・中久保 豊彦⁴・吉田 登⁵

¹非会員 アドソル日進株式会社 (〒108-0075 東京都港区港南4-1-8)

E-mail: okuda.takuya@g.wakayama-u.jp

²正会員 和歌山大学研究支援員 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930番地)

E-mail: nakao601@center.wakayama-u.ac.jp

³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番地)

E-mail: yugo@sys.wakayama-u.ac.jp

⁴正会員 お茶の水女子大学助教 生活科学部人間・環境科学科 (〒112-8610 東京都文京区大塚2-1-1)

E-mail: nakakubo.toyohiko@ocha.ac.jp

⁵正会員 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930番地)

E-mail: yoshida@sys.wakayama-u.ac.jp

下水汚泥のエネルギー利活用の推進が求められる中、本研究は下水処理場と産業工場、ごみ焼却場のインフラとの連携による全国でのGHG削減効果とその影響要因について分析した。まず全国の下水処理施設での未利用汚泥熱量と各地域の汚泥熱量と産業工場、ごみ焼却場の受入可能熱量との関係について考察した。次に、各汚泥燃料化技術のGHG収支をもとに汚泥燃料の産業工場、ごみ焼却場への配分ルールを設定し、下水汚泥の燃料利用による全国レベルでのGHG削減効果を推計した。分析の結果、150km圏内の製紙・セメント・石炭火力での汚泥燃料利用及び下水処理場と同一市町村内のごみ焼却場での汚泥混焼により全未利用汚泥量の約85%のエネルギー利用が可能であり679千t-CO₂のGHGが削減されると推計された。さらに製紙工場での汚泥混焼率の変化がGHG削減量に及ぼす影響の地域的な特徴を明らかにした。

Key Words : sewage sludge, GHG, biomass fuel, collaboration, environmental infrastructure

1. はじめに

2014年4月に政府が閣議決定した第4次エネルギー基本計画¹⁾の中で、バイオマスを含む再生可能エネルギーはエネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源と位置づけられている。下水汚泥は都市部を中心として安定的かつ大量に排出される廃棄物系バイオマスであるが、2015年9月に閣議決定された第4次社会資本整備重点計画²⁾では、下水汚泥エネルギー化率を平成25年度の15%から平成32年度には30%まで拡大する目標を掲げており、現在、下水汚泥のエネルギー利活用方策の推進が強く求められている。

下水汚泥を下水処理場敷地内において全てエネルギー利活用を図ることは難しい。よく知られる消化によるバイオガス利用の場合、バイオガスとして取り出せる割合は汚泥有機分の約半分程度に留まるため、残りの固形分

の利用を考える必要がある。固体の状態からエネルギー回収する方法として熱分解や直接燃焼があるが、廃熱発電を行うには大規模処理が必要となる。

これに対して、汚泥を造粒乾燥や炭化を施し汚泥燃料として処理場外で燃料利用する方策が進みつつある。一部の地方自治体では下水汚泥をごみ焼却場で混合焼却する取り組みも行われている。このような外部の産業工場やごみ焼却場との連携によるエネルギー回収を推進するよう、近年、下水汚泥の固形燃料を原料とする発電や下水汚泥と廃棄物との混焼発電に対する固定価格買取制度が適用された。また下水汚泥燃料の品質の安定化や信頼性を確保するための下水汚泥燃料のJIS化、さらに下水汚泥固形燃料の利用に必要な設備を取得した際の税制優遇措置(グリーン投資減税)など、様々な支援施策が講じられており、処理場外主体との連携によるエネルギー回収に対する社会的な要請は高いものと考えられる。

産業工場や環境インフラと連携した下水汚泥からのエネルギー回収に関して、三浦ら³⁾は廃棄物処理施設と下水処理施設を1つの都市循環システムとして捉え、ごみ焼却廃熱と下水汚泥消化ガスの回収と相互利用によるエネルギー回収効果を分析する先駆的な研究を行っているが、仮想都市のモデル分析に留まっている。木室⁴⁾らは固形燃料化を含む13の下水汚泥のエネルギー回収システムを定義してそれらのエネルギー収支、GHG排出量、経済性の観点からインベントリー分析を行っているが、100kt規模の仮想システムを対象としている。実際の都市を対象とした研究として、中久保ら⁵⁾は神戸市を対象として、また中尾ら⁶⁾は和歌山市を対象に、大都市、地方都市の各特性に応じた下水処理場とごみ焼却場との連携による施設更新や技術選択を含む詳細なシナリオ下でのGHG削減効果を分析しているが、個別都市のケーススタディに留まっている。本研究は、ごみ焼却場及び下水処理場を環境インフラと定義し、全国規模でみた産業工場（動脈）と下水処理場（静脈）、ごみ焼却場（静脈）と下水処理場（静脈）との連携による下水汚泥からのエネルギー回収に伴うGHG削減のポテンシャル、及び連携に影響を及ぼす要因がGHG削減に与える影響の分析を目的とする。

2. 分析の方法

まず、全国の下水処理場における未利用汚泥量の分布と下水汚泥固形燃料の受け皿となる全国の産業工場における受入可能な容量を把握する。次に国内における下水汚泥燃料利用の事例や文献を整理し、各汚泥燃料化技術のGHG収支をもとに汚泥燃料の産業工場、ごみ焼却場への配分ルールを設定する。現状では炭化など固形燃料化施設を有する下水処理場はごく僅かしか存在しないが、前述のような促進施策により今後、下水処理場での固形燃料化施設導入が拡大することを前提に、もし全国各下水処理場で汚泥燃料化や混合焼却の導入が可能と仮定した場合の、下水汚泥の燃料利用による全国レベルでのGHG削減ポテンシャルを推計する。分析フローを図-1に示し、具体的な分析の方法や手続きを以下に示す。

(1) 未利用下水汚泥量

下水道統計⁷⁾において、全国2,089の下水処理施設から排出される汚泥のうち熔融スラグ、コンポスト、固形化汚泥（建設資材）、その他性状（炭化汚泥を含む）のマテリアル等として有効利用されている汚泥を除く最終処分汚泥量1,239千t-DS/y（DS：Dry Sludge）をエネルギー利用可能な未利用汚泥量として設定した。

図-1 分析フロー

(2) 産業・環境インフラでの汚泥燃料等の受入可能量

現在、下水汚泥固形燃料の利用実績がある産業は製紙工場、セメント工場、石炭火力発電所の3業種である。固形燃料は石炭代替となるため、まず各産業施設の石炭消費量を把握する必要がある。石炭消費量に混焼率を考慮して汚泥燃料の受入可能量を算出する。パルプ・紙・板紙工業の石炭消費量⁸⁾は5,418千[t]であり、消費量を各製紙工場における紙・板紙の生産高⁹⁾に応じて按分することで各工場の石炭消費量を算出し、これに石炭の発熱量（26.0[GJ/t]）を乗じて各工場の需要熱量を推計する。製紙工場は全国に120施設あり、位置情報は日本製紙連合会のホームページ¹⁰⁾より取得する。

窯業・土石製品工業の石炭消費量⁸⁾は9,817千[t]であり、石炭消費量を各セメント工場のクリンカ生産高に応じて按分し、石炭発熱量を乗じて各工場の需要熱量を推計する。全国に30施設ある各工場のクリンカ生産高はセメント年鑑¹¹⁾より引用し、位置情報はセメント協会ホームページ¹²⁾より取得する。ただし、ここで用いる窯業・土石製品工業の石炭消費量には石灰製造などセメント製造以外の産業も含まれているため、実際のセメント工場での石炭消費量よりも過剰推計となっていることに留意する必要がある。

全ての石炭火力発電所を網羅する石炭消費量の統計は確認できなかったため、石炭消費量が把握できた一般電気事業者10社と卸売電気事業者1社の石炭消費量¹³⁾を目的変数、各社の発電所の最大出力¹⁴⁾を説明変数として回帰分析を行い（ $y = 2068.8x$, $R^2=0.9004$ ； y : 石炭消費量[千t/y], x : 最大出力[千kW]）、この式を用いて石炭消費量が把握できない発電所の石炭消費量を推計する（推計結果を表-1に示す）。一般電気事業者、卸電気事業者、及び共同火力その他の発電所を含む石炭火力発電所計50の位置情報は国土数値情報ダウンロードサービス¹⁵⁾により得る。受入可能量は石炭消費量（熱量ベース）に混焼率を乗じて算定する。技術的な側面から実証実験におい

表-1 石炭火力発電所の石炭消費量（推計値）

地域	石炭消費量（千t/年）
北海道	5,503
東北	14,326
関東	5,319
北陸	7,046
中部	11,156
近畿	8,669
中国	8,917
四国	8,485
九州	18,809
計	88,230

て石炭消費量に対して熱量比で造粒乾燥汚泥が利用可能な製紙工場において 1%, 炭化汚泥が利用可能なセメント工場、石炭火力発電所においては 5%では問題が生じないと報告¹⁰⁾されており、これを混焼率とした。産業施設における混焼技術の向上により今後、石炭との混焼比は現状より向上する可能性もある。また、下水処理施設で生成した固形燃料は輸送を伴うため施設間距離といった下水処理施設と産業施設の空間的な分布が GHG 収支に影響を及ぼすと考えられる。混焼率や輸送距離の変化が GHG 削減量に及ぼす影響については、後で詳細に検討する。

ごみ焼却施設にて脱水汚泥を受入れる際、焼却ごみと汚泥とのバランスを考慮することが重要である。含水率の高い汚泥は乾燥工程を設け、一般ごみと同程度の含水率まで調整後ごみと併せて焼却する必要がある、また汚

泥焼却量のごみ焼却量に対して多量となった場合、ごみ焼却施設としての機能を十分に果たせなくなる可能性があるために焼却施設の焼却能力と現状のごみ焼却量からみた余力をもとに汚泥投入量を決定する必要がある。乾燥後の汚泥の受入可能量は一般廃棄物処理実態調査結果¹⁷⁾の各施設の年間ごみ焼却量に対し重量比で上限を設ける。事例では下水汚泥やごみの発生状況により、混焼比は約 4%から約 6%の範囲でばらつきがある¹⁸⁾ため、本研究では 5%の上限を設ける。また、5%の受け入れ汚泥により全焼却量が焼却施設の処理能力を超過する場合は余剰能力まで受け入れ可能とする。余剰能力は各施設の処理能力に年間稼働日数 280 日¹⁹⁾を乗じて年間処理能力を算出し、年間処理能力から年間処理量を差し引いた値とする。発電可能なごみ焼却施設 1221 の位置情報を国土数値情報ダウンロードサービス¹⁵⁾より取得する。

(3) 汚泥の固形燃料化とごみ混焼のGHG排出量

まず汚泥の固形燃料化に伴う GHG 排出量は、固形燃料製造時の投入エネルギー量・生成エネルギー量に GHG 排出原単位を乗じて算出する。投入エネルギー量・生成エネルギー量は、下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン等²⁰⁾を参考に電力および燃料の投入に伴う脱水汚泥（含水率80%）あたりのエネルギー消費原単位、固形燃料生成における脱水汚泥（含水率80%）あたりの固形燃料物生成原単位、固形燃料物あたりのエネルギー生成原単位を作成し、これに含水率80%換算した汚泥量を乗じることで算出する（表-2）。なお造粒乾燥法は間

表-2 下水汚泥の固形燃料化技術のエネルギー投入及び生成原単位

工程		固形燃料化技術	中温炭化	低温炭化	造粒乾燥	
		[単位]	(未消化)	(消化)	(未消化)	(消化)
投入	電力	[GJ/t-wet(80%)]	0.46	0.46	0.22	0.22
	燃料	[GJ/t-wet(80%)]	1.32	3.00	3.11	3.11
生成	生成量	[t・(固形燃料)/t-wet(80%)]	0.07	0.16	0.22	0.16
	発熱量	[GJ/t・(固形燃料)]	17.0	14.5	19.0	14.0

表-3 汚泥の固形燃料化技術における CO₂ 排出原単位

工程	[単位]		CO ₂ 排出原単位
投入	電力	[t・CO ₂ /MWh]	0.551
	燃料	[t・CO ₂ /GJ]	0.069
生成	石炭代替	[t・CO ₂ /GJ]	-0.091

表-4 汚泥のごみ混焼におけるエネルギー消費原単位

工程	[単位]		エネルギー消費原単位
投入	電力	[GJ/t-wet(45%)]	0.66
	燃料	[GJ/t-wet(45%)]	0.05

接加熱方式（熱媒油により加温された伝熱盤上で脱水汚泥の乾燥及び造粒を同時に行う方式）であり、炭化に比べて生成燃料の含水率に差がある（消化汚泥由来の場合、低温炭化汚泥の含水率は0～1%、造粒乾燥汚泥の含水率は10%未満）。またガイドラインに提示された発熱量は幅をもっているため、その平均値を採用している（消化汚泥由来の場合、低温炭化汚泥の発熱量は13～16MJ/kg-DS、造粒乾燥汚泥の発熱量は12～16MJ/kg-DS）。これらの要因により、消化汚泥の低温炭化燃料と造粒乾燥汚泥では収率が同等、かつ発熱量は低温炭化が僅かながら高い値を示している。消化汚泥由来のGHG排出原単位は環境省・経済産業省の温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル²⁾より引用する（表-3）。なお、生成エネルギー量に係るGHG排出量は石炭代替燃料利用に伴うGHG削減量と想定し、マイナス計上する。

汚泥のごみ混焼に伴うGHG排出量はごみ焼却施設における混焼に伴う投入エネルギー量・生成エネルギー量にGHG排出原単位を乗じた値とごみ焼却時に焼却炉から発生するGHG排出量を合計して算出する。ごみ焼却炉の投入エネルギー量はごみ焼却施設におけるごみ処理時の電力および燃料の投入に伴うごみあたりのエネルギー消費原単位に脱水汚泥（含水率45%）量に乗じることで算出する（表-4）。汚泥のごみ混焼導入実績²³⁾によると、含水率45%の脱水汚泥はごみと同程度の含水率であり、その発熱量は45%脱水汚泥トンあたり7.5GJである。混焼においてごみ焼却炉投入前に脱水汚泥を45%の含水率まで乾燥させる必要があるため、生成エネルギー量は脱水汚泥（含水率45%）の発熱量と乾燥工程に必要なエネルギー量の差とする（式(1)(2)）。乾燥工程においてはごみ焼却排熱を利用し、その必要エネルギー量は蒸発潜熱2.5GJ/t、熱損失率10%、ごみ焼却施設排熱損失率22.3%を用いる²³⁾。GHG排出原単位は前述の環境省・経済産業省の温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルの値を用いる。生成エネルギー量に係るGHG排出量は電力代替として用いられるとし、GHG削減量としてマイナス計上とする。また、処理プロセスのGHG排出量はCO₂排出原単位0.19[t-CO₂/t-wet(45%)]に乾燥後の汚泥量に乗じて算出する。

$$EPs = Bp \times Sp - LH \times (1 - Hloss1) \times (Sa - Sp) / (1 - Hloss2) \quad (1)$$

$$Sp = Sa \times (100 - w1) / (100 - w2) \quad (2)$$

ここで、

Eps: 生成エネルギー量 [GJ]

Bp: 乾燥後の汚泥発熱量 7.5 [GJ/t-wet(45%)]

Sp: 乾燥汚泥量 [t-wet(45%)]

LH: 蒸発潜熱 2.5 [GJ/t]

Hloss1: 乾燥工程における熱損失率 10 [%]

Sa: 乾燥前の汚泥量 [t-wet]

Hloss2: ごみ焼却排熱損失率 22.3 [%]

w1: 乾燥前の汚泥含水率 [%]

w2: 乾燥後の汚泥含水率 45 [%]

(4) 汚泥燃料及び脱水汚泥輸送時のGHG排出量

下水処理施設から各連携先に固形燃料または脱水汚泥を輸送するため、輸送に伴う GHG 排出量を計上する必要がある。輸送には 10 トンダンプ車での施設間の運搬を想定し、式(3)(4)(5)を用いて施設間の輸送に伴うエネルギー消費量を算出する。施設間の輸送距離は、施設の住所から緯度経度を求め、ヒュベニの公式を用いて求める²⁴⁾。トラックの積載量 10[t]、燃費 2.89[km/l]²⁵⁾、トラック燃料である軽油の発熱量は 0.038[GJ/l]とする。エネルギー消費量に軽油の CO₂排出原単位²¹⁾ 0.069[t-CO₂/GJ]を乗じることで GHG 排出量を算定する。

$$ET = HV \times 2 \times t \quad (3)$$

$$HV = Hlo / M \times R \quad (4)$$

$$t = Bx \times Sa / 10 \quad (5)$$

ここで、

ET: 輸送に伴うエネルギー消費量 [GJ]

HV: 施設間輸送に伴うエネルギー消費原単位 [GJ/回]

t: 施設間の輸送回数 [回]

Hlo: 軽油の低位発熱量 0.038 [GJ/l]

M: トラック燃費 2.89[km/l]

R: 施設間の輸送距離 [km/回]

Bx: 輸送物の生成量原単位 [t/t-wet(80%)]

(Bx は輸送物により決定、固形燃料の場合は表-1 参照、脱水汚泥の場合は Bx=1 とする)

Sa: 汚泥量 [t-wet(80%)]

(5) GHG削減に向けた下水汚泥燃料の配分ルール

一般に下水汚泥燃料や脱水汚泥の供給量、また産業工場やごみ焼却場における受入可能量は各地域により異なり、需給バランスを考慮した汚泥の配分が重要となる。ここでは処理施設等の実情を考慮しつつGHG削減に向けた下水汚泥燃料の配分ルールを設定する（配分ルールをフローチャートとして図-2に示す）。

受入可能な産業工場やごみ焼却場に対して複数の下水処理場からの供給が可能な場合は輸送に伴うGHG削減（及び輸送費用削減）の点から輸送距離が最も短い連携での汚泥配分を優先する。受入可能な最短輸送距離にある産業工場やごみ焼却場での受入量最大に達した場合には、次に輸送距離の短い需要地点への汚泥配分を行う。その際、輸送距離には輸送の人件費等を考慮して輸送可

図-2 GHG削減に向けた下水汚泥燃料の配分ルール

能な最大輸送距離の制約を設けることとし、これを「輸送範囲」と定義する。そして後述するように、輸送範囲を変化させた場合の、下水汚泥燃料の産業工場等への配分への影響について考察する。

まず、GHG削減効果の高い固形燃料化技術を優先して産業施設に汚泥を優先的に配分する。その際、スケールメリットの働かない小規模な固形燃料化施設を中小自治体が導入することは現実的には困難と思われる。そこ

で固形燃料化施設の導入については、政令市、中核市の下水処理場、に加え中小都市については流域下水処理施設のみを対象とする。

ごみ焼却施設における混焼については、下水処理施設の規模による制約は設けないこととする。法制度からみると下水汚泥は産業廃棄物であり、原則として産業廃棄物処分施設で処理する必要があるが、「廃棄物の処理および清掃に関する法律第11条第2項」にて、「市町村が処理することが必要であると認める産業廃棄物」については一般廃棄物処分施設であるごみ焼却施設での混焼が認められ、混焼は「あわせ産廃処理」と位置づけられる。これには一般廃棄物処理施設の設置許可の変更が必要となるため、市町村によっては条例の改正を伴う必要がある。そのため現状では当該自治体外での「あわせ産廃処理」は大変困難と考えられる。そこで、下水処理施設の所在地の同一自治体内に発電能力を有するごみ焼却施設が存在している場合にのみ、汚泥混焼が可能であるとする。ごみ処理広域化の場合、複数の自治体にまたがりごみ処理を実施している焼却施設が存在するが、ごみ焼却施設の所在する自治体の所管と設定する。

なお、この配分ルールはGHG削減量の最大化問題に対する近似解を与えるルールではあるが、必ずしも下水汚泥燃料の配分にかかる総輸送距離の最小化や総GHG削減量の最大化を保証するものではないことに留意する必要がある。厳密にGHG削減の最大化を図るには、線形計画問題や最小費用流問題として定式化を行い、計画問題をモデル化して解く必要がある。

3. 分析結果

(1) 未利用汚泥と産業・環境インフラでの受入量

地域別の未利用汚泥量と産業工場・ごみ焼却場での受

図-3 地域別の汚泥燃料と産業工場での受入可能量

図-4 地域別の未利用汚泥量とごみ焼却場での受入可能量

入可能量とを比較した結果をそれぞれ図-3、図-4に示す。受入れる際の性状（炭化汚泥、造粒乾燥汚泥、乾燥汚泥）を考慮し、産業工場の受入可能量と対比する場合には未利用汚泥量を炭化汚泥、造粒乾燥汚泥の熱量として表し、ごみ焼却場の受入可能量と対比する場合には、未利用汚泥量を乾燥汚泥重量として示す。

産業工場に汚泥固形燃料として供給する場合、汚泥中の有機分をより燃料中に賦存できる造粒乾燥汚泥のほうが供給可能熱量は大きい。受け皿となる製紙工場の受入可能熱量は全国各地域とも造粒乾燥汚泥の供給可能熱量に比べ小さい。炭化汚泥の場合、全国的に見て石炭火力発電所での受入可能量が卓越していることが明瞭である。産業ごとにみるとセメント工場では中国や九州地域、石炭火力発電所では東北、中部、九州での受入可能量が大きい。炭化汚泥や造粒乾燥汚泥は一般に有価物として取引されるため、地域を越えた連携が可能である。例えば関東地域の下水汚泥を燃料化して東北地域の石炭火力へ供給するという地域を越えた連携は、現在でもすでに取組まれているが、さらに推進しうる余地があることが供給量と受入可能量のバランスから読み取れる。

乾燥汚泥とごみ焼却施設とのバランスをみると、関東、中部、近畿の大都市圏での未利用汚泥量が多い。政令市では北海道と九州の汚泥量も多い。また、関東と中部で流域下水道を導入している中小都市での未利用汚泥量が卓越している。流域下水道では一般的に比較的大きな処理規模で汚泥処理を行っており、現状では焼却処分が主流であるが、未利用汚泥からのエネルギー回収を図る上で、今後はこれら大量に賦存する流域下水汚泥への対応が重要と考えられる。

(2) 汚泥燃料利用のGHG収支

先に述べたとおり、GHG削減量の最大化をはかる汚泥の連携先を考える際、汚泥燃料利用のGHG収支を把握することが必要である。2.(3)で取り上げた複数の既往文献ををもとに、同じ設定条件（含水率80%汚泥換算での処理能力90t/d、施設稼働率80%、連携先への輸送距離50km、ごみ混焼の場合の発電効率13%）のもとでのGHG収支を計算した。各汚泥燃料利用のGHG収支を図-4に示す。図中の全ての燃料利用が現状の汚泥高温焼却に比べてGHG削減効果をもたらしている。未消化汚泥を造粒乾燥する場合のみ、純GHG収支がマイナスであり、本当の意味でのGHG削減という結果となっている。また、炭化及び造粒乾燥において「燃料」（燃料製造過程での燃料利用）のGHG排出が大きい。特に消化汚泥では、ほぼ「生成」（石炭代替によるGHG削減）の効果を相殺する排出量である。また、汚泥のごみ混焼では汚泥乾燥熱源としてごみ焼却排熱を用いるために脱水汚泥の状態のままごみ焼却場へ運ぶ設定としている。そのため、炭化及び造粒乾燥での「輸送」のGHG排出量と比較すると、「輸送」のGHG排出量が大きい。汚泥のごみ混焼では、GHG削減の点で下水処理場とごみ焼却場との近接性が重要であることが分かる。

(3) 産業・環境インフラと連携した汚泥の燃料利用によるGHG削減効果

2.(5)の配分ルールにもとづく産業工場、ごみ焼却場との連携による汚泥配分量を図-5に示す。現在稼働中の各自治体の下水汚泥燃料化事業をまとめた文献²⁹⁾によると

図-5 各汚泥燃料利用技術の GHG 収支

平成26年12月時点で稼働中の施設は8件で、輸送距離の最短は10km（宮城県県南浄化センター→製紙工場），最長は200km（熊本市南部浄化センター→電源開発松浦火力発電所），平均は約100kmであった。輸送範囲を最長のケースに相当する150km以内とした場合、未利用汚泥量の約85％に相当する5,270千[t-wet(80%)y]の汚泥が配分され、GHG削減量は679[千t-CO₂y]となった。輸送範囲を200km以内としても150kmの場合と比較して配分される汚泥量及び配分先の構成に変化はない。都市域に位置する政令市や中核市の汚泥は150km圏内で全て連携先があり配分される。一方、地方域も含めて多様な地域特性をもつ流域下水道の場合、汚泥量全体の約3分の1に相当する下水処理場は150kmから200km圏内に輸送範囲を拡大しても受入量に余裕のある産業工場や発電設備を有するごみ焼却場（同一市町村内）が存在しないものと考え

られる。専らこれらの未配分汚泥の燃料利用を図ることを目的に、下水処理場の近隣に産業工場の立地を誘導することは難しい。他方で、例えば同じ流域下水処理計画区域内の市町村のごみ焼却場が連携して下水汚泥を受入可能とする柔軟な制度設計や、乾式メタン発酵のように発電設備を有しないごみ焼却場においてもエネルギー回収可能な技術の導入施策等が期待される。さらには、これらの未配分汚泥については、燃料利用以外の資源化施策の検討も考えられる。

各地域の都市規模別のGHG削減量を図-7に示す。同一の都市規模であってもその連携は地域により差が生じることがわかる。削減効果が最も高いのは関東の中小都市で136[千t-CO₂y]の排出削減であり、次に近畿の中核市で69[千t-CO₂y]である。両地域とも石炭火力発電所による効果大きい。セメント工場との連携による削減効果

図-6 各輸送範囲における未利用汚泥の配分量

表-5 製紙工場における造粒乾燥污泥混焼率変化に伴う GHG 排出削減量変化

地域	[単位]	全国			北海道			東北			関東			北陸		
混焼比	[%]	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
GHG排出削減量	[千t-CO ₂ /y]	679	843	963	56	78	81	48	69	83	200	213	244	22	50	63
増加率	[%]	-	24.2	41.9	-	41.1	45.2	-	45.3	74.2	-	6.5	22.1	-	127.5	187.5
地域	[単位]	中部			近畿			中国			四国			九州		
混焼比	[%]	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
GHG排出削減量	[千t-CO ₂ /y]	98	111	128	146	159	181	34	64	69	14	22	23	61	77	91
増加率	[%]	-	13.4	31.2	-	8.8	23.7	-	86.1	101.0	-	64.0	67.0	-	24.7	48.6

は九州の政令市、関東の中小都市で顕著に示されている。また、製紙工場との連携による排出削減量は全国で161[千t-CO₂/y]で、セメント工場との連携による排出削減量238[千t-CO₂/y]、石炭火力発電所との連携による排出削減量857[千t-CO₂/y]に比べて小さく、製紙工場での受入拡大が期待される結果となった。このように地域ごとに特徴的な連携のポテンシャルに関する情報が明らかにされることは、どのような産業・環境インフラとの連携を促進するかを検討する際に資するものと考えられる。

(4) 製紙工場の混焼率変化がGHG削減に及ぼす影響

3.(3)において、産業工場の中では石炭火力発電所の受入可能性が高いことが示された。一方、GHG削減効果や下水污泥燃料JIS化で重視されている発熱量の観点からは造粒乾燥污泥が注目されるが、製紙工場での混焼率が低いために相対的に削減効果が小さい結果となっている。造粒乾燥污泥の製紙工場の自家発電用石炭ボイラでの混焼に関する実証試験報告では、混焼率の拡大に伴う石炭ボイラに与える影響について長期的に検討すべき課題²⁾とされているが、例えば製紙用ボイラでは不純物混入や発熱量の安定しない廃棄物燃料の投入が珍しくないのに対して、より慎重な操業が求められる石炭火力発電

の発電用ボイラにおいて重量比2%（熱量比に換算して約1.3%）の造粒乾燥污泥の混焼でもボイラや環境への影響がみられないことが確認されていることから²⁰⁾、製紙用の石炭ボイラにおいても混焼率拡大の可能性が考えられる。そこで、産業施設の技術革新が進むことで、石炭消費量に対して造粒乾燥污泥燃料の混焼比が現状より高くなる場合に各地域の連携に与える影響を考察する。石炭火力発電所における炭化污泥の混焼比は変化させず、製紙工場における混焼比を石炭消費熱量に対して熱量比で1%、5%、10%の範囲で変化させて、2.(5)と同じ配分ルールのもと、各下水処理場と産業工場、ごみ焼却場との連携に伴うGHG排出削減量を分析する。なお、3.(3)の考察をふまえて輸送距離は150kmとする。

表-4に示すように、製紙工場の混焼比が拡大すると製紙工場への配分污泥量も増大する。特に、関東、近畿、中国において増加割合が高い。これは混焼比が向上したことで、混焼比1%時に連携していない施設と新たに連携し、連携施設の選択肢が増えたためだと考えられる。

混焼比の変化による各地域のGHG削減量を表-4に示す。石炭消費熱量に対して製紙工場の混焼可能割合が熱量比で5%まで向上した場合の全国のGHG排出削減量は、現状の混焼比1%の679[千t-CO₂/y]に比べ、24%増加の

図-7 地域別都市規模別の GHG 削減量（輸送範囲 150km 以内）

843[千t-CO₂/y], 10%まで上昇した場合は42%増加の963[千t-CO₂/y]となる。地域別にみるとGHG削減量が大きい地域は、関東、近畿であり、それぞれ5%時点で213[千t-CO₂/y], 159[千t-CO₂/y], 10%時点で244[千t-CO₂/y], 181[千t-CO₂/y]である。一方、北陸、中国では削減量は大きくないが、混焼率の変化によりGHG削減量の増加率が高く、北陸で混焼比1%時点の場合と比べ削減量は5%時点で約2.3倍、10%時点で2.9倍の削減量となる。中国では5%時点で1.9倍、10%時点で約2倍となる。

4. 結論

本研究では、下水処理場と産業工場、ごみ焼却場のインフラとの連携による全国でのGHG削減効果とその影響要因について分析し、地域ごとに特徴的な連携のポテンシャルを明らかにすることにより、産業・環境インフラとの連携方策を検討する際に資する基礎的な情報を提示することができた。本研究で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- a) 地域別の未利用汚泥量（各燃料換算）と産業工場・ごみ焼却場での受入可能量（熱量、重量）とを比較した結果、製紙工場での混焼率が低いいためGHG削減効果の高い造粒乾燥汚泥燃料の受入可能量が限定的であること、セメント工場では中国や九州地域、石炭火力発電所では東北、中部、九州での受入可能量が大きく、ごみ焼却場とのバランスでは関東と中部で流域下水道を導入している中小都市での未利用汚泥量が卓越しているなど汚泥量と産業・環境インフラの受入可能量とのバランスには各地域の特徴が把握され、これらをふまえて各地域での推進が効果的な連携を検討することが重要であると示唆された。
- b) 既往文献をもとに汚泥燃料利用のGHG収支を産業・環境インフラとの連携という観点から整理し、配分ルールの基本となるGHG削減効果からみた技術選択の優先順位を明らかにした。また汚泥のごみ混焼では、脱水汚泥の輸送に伴うGHG排出が大きいいため、GHG削減の点で下水処理場とごみ焼却場との近接性が重要であることが示唆された。
- c) 産業・環境インフラと連携した汚泥の燃料利用によるGHG削減効果を分析した結果、汚泥燃料の輸送範囲150km以内の条件下で、未利用汚泥量の約85%に相当する5,270千[t-wet(80%)/y]の汚泥が配分され、GHG削減量は679[千t-CO₂/y]となった。一方で、流域下水道接続の市町村から排出される汚泥の約3分の1の産業・環境インフラとの連携を得ることができない結果となったことに対し、同じ流域下水道処理計画区域内の市町村のごみ焼却場の連携や、乾式メタン

発酵のように発電設備を有しないごみ焼却場においてもエネルギー回収可能な技術の導入施策等、GHGのさらなる削減のために必要とされる対応について考察した。

- d) 製紙工場の混焼率変化がGHG削減に及ぼす影響を分析した結果、特に、関東、近畿、中国においてこれまで連携対象でなかった工場との連携効果でGHG削減量の増加割合が高くなること。北陸や中国では削減量の増加率が大きく拡大することが示された。

謝辞：本研究は、環境省・環境研究総合推進費（3K143006）及び科研費（15K06272, 16K06560）の研究助成の支援を受け実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：エネルギー基本計画、2014（参照元：http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf, 最終閲覧：2016年2月1日）。
- 2) 国土交通省：第4次社会資本整備重点計画、2015（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/001104256.pdf>, 最終閲覧：2016年2月1日）。
- 3) 三浦浩之, 中野加都子, 和田安彦, 村岡治, 藤井亮：都市循環システムにおけるエネルギーネットワークの構築, 土木学会論文集, No.636, VII-13, 47-59, 1999
- 4) 木室 洋介, 古林 敬顕, 中田 俊彦：下水汚泥エネルギー利用システムのインベントリ分析による性能評価, 日本エネルギー学会誌, Vol. 90, No. 3, 247-257, 2011
- 5) 中久保 豊彦, 東海 明宏, 大野 浩一：下水処理場とごみ焼却場の連携を軸とした静脈系社会資本更新計画の立案と評価, 土木学会論文集 G（環境）, Vol. 68, No. 2, 152-171, 2012
- 6) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登：処理規模の変化に応じた下水汚泥処理施設更新の将来計画－和歌山市におけるケーススタディー, 土木学会論文集 G（環境）, Vol.70, No.6, II_381-II_392, 2014
- 7) 社団法人日本下水道協会：平成 25 年度版下水道統計, 2015
- 8) 総務省統計局：日本統計年鑑 平成 27 年第 10 章エネルギー・水, 2015（参照元 <http://www.stat.go.jp/data/nenkan/10.htm>, 最終閲覧：2015年8月1日）
- 9) 日本製紙連合会：:紙・板紙統計年報平成 26 年度版, 2015
- 10) 日本製紙連合会：製紙工場所在地一覧（参照元：<http://www.jpa.gr.jp/about/member/factory/index.html> , 最終閲覧：2016年2月1日）
- 11) セメント新聞社：セメント年鑑第 66 巻, 2014
- 12) 一般社団法人セメント協会：セメント産業の概要（参照元：<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc.html> , 最終閲覧：2016年2月1日）
- 13) 経済産業省資源エネルギー庁：電力調査統計/汽力発電, 2012 年（参照元：http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html#headline4, 最

終閲覧：2016年2月1日)

- 14) 電気事業連合会統計委員会編：電気事業者便覧，2014
- 15) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>，最終閲覧：2016年2月1日）
- 16) 日本下水道事業団技術評価委員会：下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書，2008年（参照元：<https://www.jswa.go.jp/g4/g4g/pdf/gihyo24.pdf>，最終閲覧：2016年2月1日）
- 17) 環境省：一般廃棄物処理実態調査，平成25年（参照元：http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html，最終閲覧：2016年2月1日）
- 18) 公益社団法人日本下水道協会：下水汚泥エネルギー利用調査報告書（参照元：<http://www.jswa.jp/energy/index02.html>，最終閲覧：2016年2月1日）
- 19) 社団法人全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領2006改訂版，2006年
- 20) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン改訂版-，2015年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/001083170.pdf>，最終閲覧：2016年2月1日）
- 21) 環境省・経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver4.0)，2015年（参照元：<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual>，最終閲覧2016年2月1日）
- 22) 田所伸悟：金沢市西部環境エネルギーセンター運転報告書-下水汚泥混焼について-，タクマ技報，Vol20，No.2，2012
- 23) 菅洋輔，中久保豊彦，東海明宏：消化槽熱需要の季節変動を踏まえた下水処理施設・ごみ焼却施設の連携型更新計画の評価，土木学会論文集 G（環境），Vol. 69，No.6，pp.II_283-II_291，2013
- 24) 森田匡俊・鈴木克哉：日本の主要都市における直線距離と道路距離との関係に関する実証的研究，Theory and Applications of GIS，Vol. 22，No.1，1-7，2014
- 25) 環境省：サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース（ver.2.2）2015（参照元：https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/business/files/tools/DB_v2.2.pdf，最終閲覧2016年6月26日）
- 26) 福岡市：福岡市下水汚泥等有効利用研究会中間報告，2014（参照元：http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/31152/1/odeiken_shiryou.pdf，最終閲覧2016年2月1日）
- 27) NEDO：平成18年度～平成20年度成果報告書，新エネルギー技術フィールドテスト事業，地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業，造粒乾燥法による脱水汚泥燃料化システムを活用した熱利用フィールドテスト事業，2009（参照元：http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_200910/20090000000692.html，最終閲覧2016年2月1日）
- 28) 當間久夫，臼井肇，田中寿史，村田雄一：ジェイコンビシステム（造粒乾燥方式）による下水汚泥の石炭代替燃料化について～地球温暖化の抑制に向けて～，新日鉄エンジニアリング技報，Vol.3，19-24，2012

(2016. 3. 22 受付)

STUDY ON REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSION WITH SEWAGE SLUDGE FUELS BY COLLABORATION OF INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL INFRASTRUCTURES

Takuya OKUDA, Akifumi NAKAO, Yugo YAMAMOTO, Tohohiko NAKAKUBO and Noboru YOSHIDA

This study aims to clarify the effects of GHG reduction by utilizing various sewage sludge fuels based on collaboration among sewage, industrial, and environmental infrastructures. As a result, the followings are observed: a) a low mixed combustion ratio causes limited GHG reduction in pulp industry, and it is important to take balances of regional sludge fuel and industrial fuel demand into account corresponding to industries; b) GHG inventory are compared for various sludge fuel utilization technologies based on reference materials, and adjacent of sewage and garbage incineration plants to reduce GHG caused by transportation of dewatered sludge; c) collaboration of sewage, industry and environmental infrastructures can reduce 679 thousand tons of carbon dioxide per year, which is given by 85% of un-utilized sewage sludge; d) increase of mixed combustion ratio in pulp industry give great GHG reduction effects.