

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12611

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18229

研究課題名（和文）下水汚泥エネルギー利用システムの設計支援ツールの開発と低炭素ロードマップの描写

研究課題名（英文）Developing a design support tool for energy utilization systems of sewage sludge and drawing low-carbon technology pathways

研究代表者

中久保 豊彦（Toyohiko, Nakakubo）

お茶の水女子大学・基幹研究院・准教授

研究者番号：70648766

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：下水処理場における下水汚泥エネルギー利用の促進支援を目的として、脱水汚泥をエネルギー変換する焼却・廃熱発電システム、固形燃料化システムを対象とした熱収支解析モデルを開発した。設計支援に向け、消化の有無がどのように脱水汚泥のエネルギー変換に影響するかに着目した評価を行い、焼却・廃熱発電システムでは消化なしが、固形燃料化システムでは消化ありが優位となることを明らかにした。大都市下水処理場を対象とした導入戦略の策定支援に向け、シナリオA（資源化経路分散シナリオ）とシナリオB（外部燃料最小化シナリオ）を設計し、2030年度におけるエネルギー収支の改善効果、温室効果ガス排出量の削減効果を定量化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下水汚泥エネルギー利用システムの設計と導入戦略の具体化にあたっては、嫌気性消化の運用（新設、継続、廃止）の判断、脱水汚泥エネルギー化技術（焼却・廃熱発電、固形燃料化）の選択が求められる。本研究ではシステムの設計に必要な熱収支解析モデル、温室効果ガス排出勘定モデル、事業コスト評価モデルを開発した。これら成果物は技術選択、導入戦略立案の支援ツールとして活用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：I developed a heat balance analysis model for incineration with waste heat power generation systems and solid fuel conversion systems for the purpose of support to promote energy use of sewage sludge in sewage treatment plants. How the presence or absence of digestion affects each energy conversion technology was focused on, and it was cleared that 1) not using digestion is a superior option in the incineration with waste heat power generation systems, and 2) using digestion is superior in the solid fuel conversion systems. Toward a decision making of technology introduction strategy in large cities, two scenarios were formulated: scenario A is the “distribution of recycling and disposal route” scenario, and scenario B is the “minimization of external fuel dependence” scenario. Improvement effect on energy balance and reduction effect on greenhouse gas emission for 2030 by introducing each scenario were estimated.

研究分野：環境システム学

キーワード：下水汚泥 バイオマスエネルギー 固形燃料化 焼却・廃熱発電 熱収支解析モデル 技術導入シナリオ 温室効果ガス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

下水汚泥リサイクルはエネルギー利用に焦点を当てた段階へと移行しており、脱水汚泥の処理・減容化を焼却(汚泥専焼, 850℃での高温焼却)に依存している大都市下水処理場において、エネルギー化技術を実装していくことが求められる。近年、エネルギー化技術が実装されている現場では、熱のカスケード利用等を組み込んだ、高度なシステム設計がなされている。一例として、北九州市日明浄化センターでは乾燥造粒の導入にあたり、乾燥用燃料として消化ガスを利用し、乾燥設備で発生する排ガスから復水器で潜熱回収することにより消化槽の熱需要を賄うことで、化石燃料に依存しない固形燃料化システムを構築している。すなわち、下水汚泥のエネルギー利用システムの設計にあたっては、熱の温度レベルやエンタルピーを踏まえた精緻な熱収支解析が実施された上で、エネルギー収支や温室効果ガス(GHG)排出量を評価することが求められる。これまでに開発されてきたバイオマスエネルギーの導入支援ツールは、個別技術の導入効果を評価する際、投入量×エネルギー回収率、投入量×エネルギー消費原単位、といった形でエネルギー収支を推計する仕組みが大半であった。しかしながら、下水汚泥のエネルギー利用にあたっては、脱水後においても汚泥の含水率が高い(約80%)という課題の解決に向け、システム設計に際して創意工夫が行われる。そうした創意工夫が反映できるツールの開発が求められ、本研究では、下水汚泥エネルギー利用システムの設計と評価を、精緻な熱収支解析に基づき実施するためのツールの開発に取り組むものである。

2. 研究の目的

本研究では、脱水汚泥のエネルギー利用に着目し、3つの焼却・廃熱発電システム(スクリュ式・バイナリー式、復水タービン式、スクリュ式+汚泥乾燥)、2つの固形燃料化システム(乾燥造粒、低温炭化)を対象とした熱収支解析モデルを開発した。同モデルを活用することで以下に示す2つの研究課題を実施した。

(1) 下水汚泥エネルギー利用システムの設計支援：消化の有無を踏まえた優位性の判定

下水処理場が消化槽を有する場合、汚泥中有機物の約50%を分解させてエネルギー回収ができる一方、脱水汚泥の固形物中有機分率は低下し、脱水汚泥変換プロセスでの効率の低下を招く要因となる。そこで本研究では、脱水汚泥のエネルギー変換を踏まえた場合、消化の有無がそれぞれのエネルギー化技術にどのように影響するかに着目した比較評価を行うことを目的とした。評価指標はエネルギー収支、GHG排出量、事業コストの3指標とした。

(2) 大都市下水処理場における温室効果ガス排出削減ロードマップの構築

日本の14の大都市(人口100万人以上を目安)を対象とし、エネルギー化技術の導入シナリオを作成することを目的とした。大都市の多くの下水処理場においては、N₂O排出削減を図るための高温焼却炉(850℃焼却対応)への移行が2005~2015年にかけて行われており、焼却炉の耐用年数(約15年)を踏まえると、2020~2030年に次期更新期を迎えることとなる。本研究では2015年度を基準年として、我が国の地球温暖化対策における中期目標年である2030年度を評価対象年とする。技術導入の戦略策定を支援するため、狙いの異なる2つのシナリオを作成し、それぞれの目標到達度を定量化するとともに、各シナリオ下でのエネルギー収支の改善効果、GHG排出量の削減効果を評価した。

3. 研究の方法

(1) 下水汚泥エネルギー利用システムの設計支援：消化の有無を踏まえた優位性の判定

消化槽の有無に対する比較を目的とし、評価対象とする下水汚泥エネルギー利用システムを表-1に示す。評価バウンダリーは汚泥処理プロセスが対象となる。

処理機能単位は濃縮汚泥処理量30 t-dry/dayと設定した。二液調質型脱水機を導入する場合の直接脱水汚泥の含水率を70%と設定し、同条件下の脱水汚泥処理量が100 t-wet/dayとなる。

表-1 下水汚泥エネルギー利用システムの設計

ケース	システム	消化の有無・適用技術	脱水汚泥処理 / エネルギー化技術
OI-nonAD	単純焼却	消化なし	流動床焼却(エネルギー回収なし)
AI-ST&BC-nonAD	焼却・廃熱発電	消化なし 二液調質脱水機	ストーカ式焼却+発電(スクリュ式) +発電(バイナリー式)
AI-CT-nonAD			ストーカ式焼却+発電(復水タービン式)
OI-GE-AD	単純焼却	消化あり・消化ガス	流動床焼却(エネルギー回収なし)
AI-ST&DRY-AD	焼却・廃熱発電	発電(ガスエンジン)	ストーカ式焼却+発電(スクリュ式) +汚泥乾燥機(蒸気間接熱交換式)
DSF-nonAD	固形燃料化	消化なし	乾燥造粒
CSF-nonAD			低温炭化
DSF-AD		消化あり・消化ガスの乾燥用燃料利用	乾燥造粒
CSF-AD			低温炭化

焼却・廃熱発電システムについて、復水タービン式は脱水汚泥処理量 100 t-wet/day 以上を条件に導入可能とされており、100 t-wet/day に達しない場合はスクリュ式 + バイナリー式が採用される。そこで、分岐点である二液調質脱水汚泥量 100 t-wet/day を踏まえ、両方のケース (AI-ST&BC-nonAD, AI-CT-nonAD) を対象とした。

固形燃料化システムにおいては、乾燥用燃料が大きいことが課題であるが、消化を併用する場合、消化ガスを乾燥用燃料として活用することができる (乾燥設備で発生する排ガス中の潜熱を復水器で回収して消化槽の加温・保温用エネルギーとして用いる)。消化なしのケースでは都市ガスを、消化ありのケースでは消化ガスを乾燥用燃料として使用するとした。

(2) 大都市下水処理場における温室効果ガス排出削減ロードマップの構築

本研究では 14 の大都市、札幌市、仙台市、さいたま市、千葉市、東京都区部、横浜市、川崎市、名古屋市、京都市、大阪市、神戸市、広島市、北九州市、福岡市を対象とした (東京都区部のみ下水汚泥の処理区域を踏まえ東京都区部 I, II, III に分割)。下水処理場で脱水汚泥のエネルギー利用を促進するにあたり、技術導入として主に 2 つの方向性があり、本研究では 2 つのシナリオを設計した。

第 1 の方向性が最終生成物 (乾燥造粒物、炭化物、焼却灰、脱水汚泥) の受入先の確保である。とりわけ固形燃料化システムにおいては、受入先となる石炭需要家 (石炭火力発電所、セメント工場) が継続して汚泥由来の固形燃料を受け入れるかという不安定さがある。焼却灰も同様であり、埋立処分量の削減に向けてセメント工場による受入が進められているが、汚染事故等による下水への有害物質の混入はセメント工場による受入停止のリスクを伴うものである。そこで、複数の処理・リサイクル経路を設けることが技術選択の方向性となる。この方向性を具現化した資源化経路分散シナリオをシナリオ A と定義した。シナリオ A では、最終処理またはリサイクルの委託先を分散化できるようにエネルギー化技術を選択する。具体的には、焼却・廃熱発電システムと固形燃料化システムの両方を選択することを優先し、焼却灰の最終処理、焼却灰のセメント産業による受入、固形燃料の石炭需要家による受入という経路の分散化を図る。

第 2 の方向性が、消化の有無を踏まえた技術設計による、下水処理場における化石燃料の直接消費からの脱却である。電力消費に由来する CO₂ 排出量は系統電力の電源構成の低炭素化、あるいは下水処理場内における太陽光発電の設置などで削減が期待できるため、重要となる対策は処理場内での燃料の直接消費をなくすことである。焼却・廃熱発電システムでは消化を行わず直接脱水汚泥を焼却することにより、固形燃料化システムでは消化を併用して消化ガスを乾燥用燃料として活用することにより、外部からの燃料供給に依存しないシステムの構築が可能となる。この方向性を具現化した外部燃料最小化シナリオをシナリオ B として作成した。

4. 研究成果

(1) 下水汚泥エネルギー利用システムの設計支援：消化の有無を踏まえた優位性の判定

エネルギー収支の評価結果 (一次エネルギー換算) を図-1 に示す。

焼却・廃熱発電システムの消化なしの場合、OI-nonAD を基準として AI-ST&BC-nonAD と AI-CT-nonAD はともに廃熱発電の導入によりエネルギー収支の低下効果がみられる。消化ありの場合、AI-ST&DRY-AD のエネルギー収支は -5.4 GJ となり、OI-GE-AD の 162.1 GJ と比べ大幅に減少したが、AI-ST&DRY-AD での発電量の 87.7% が消化ガス発電に由来するものであり、焼却廃熱に由来する発電量は小さい。消化の有無の視点では、消化なしで廃熱発電を行う AI-CT-nonAD が最も優れたエネルギー収支 (-56.9 GJ) を示した。

固形燃料化システムの評価では、DSF-nonAD (54.6 GJ) と比較して DSF-AD では -34.6 GJ に改善し、同様に CSF-nonAD (104.4 GJ) と比較して CSF-AD では 3.3 GJ に改善する。よって、乾燥造粒、低温炭化とともに、消化なしの場合、石炭代替量が大きくなる一方で都市ガスが乾燥用燃料として大量に消費されるため、消化ありの方がエネルギー収支では優位となる。

次に、3 指標による評価結果の要約を表-2 に示す。

焼却・廃熱発電システムでは、復水タービン式発電が導入できる条件下では、すべての指標において消化なしが優位となる。よって、消化なしでの技術導入が求められる。一方、AI-ST&BC-nonAD と AI-ST&DRY-AD の比較では、環境性 (エネルギー収支、GHG 排出量) において消化あり (AI-ST&DRY-AD) が優れているが、経済性 (事業コスト) では AI-ST&BC-nonAD が優位となる。エネルギー収支での差分が -12.0% に対し、事業コストでの差分は 22.9% と大きいこと、技術選択において事業コストの優先順位が高いことを踏まえると、消化なしの優位性が相対的に高いことが指摘される。

固形燃料化システムについて、最初に乾燥造粒を考察する。事業コストの観点では消化の有無での差はほとんどなく (差分: -3.0%)、エネルギー収支の差分は -24.7% (消化なしが優位)、GHG 排出量の差分は 13.4% (消化ありが優位) となった。環境性においてエネルギー収支の削減効果の方が大きく、エネルギー収支の改善を優先した場合、消化ありが優位となると考察できる。

低温炭化も乾燥造粒と同様の傾向であるが、低温炭化の場合は事業コストでの消化の有無の差分が -8.3% (消化ありが優位) となり、低温炭化と比べて大きい。エネルギー収支の差分 -28.0% (消化ありが優位) は低温炭化の差分と比較して若干大きく、GHG 排出量の差分 9.8% (消化なしが優位) は低温炭化の差分と比較して若干小さい。低温炭化は乾燥造粒と比較して、より一層、消化ありでの導入が優位となる。

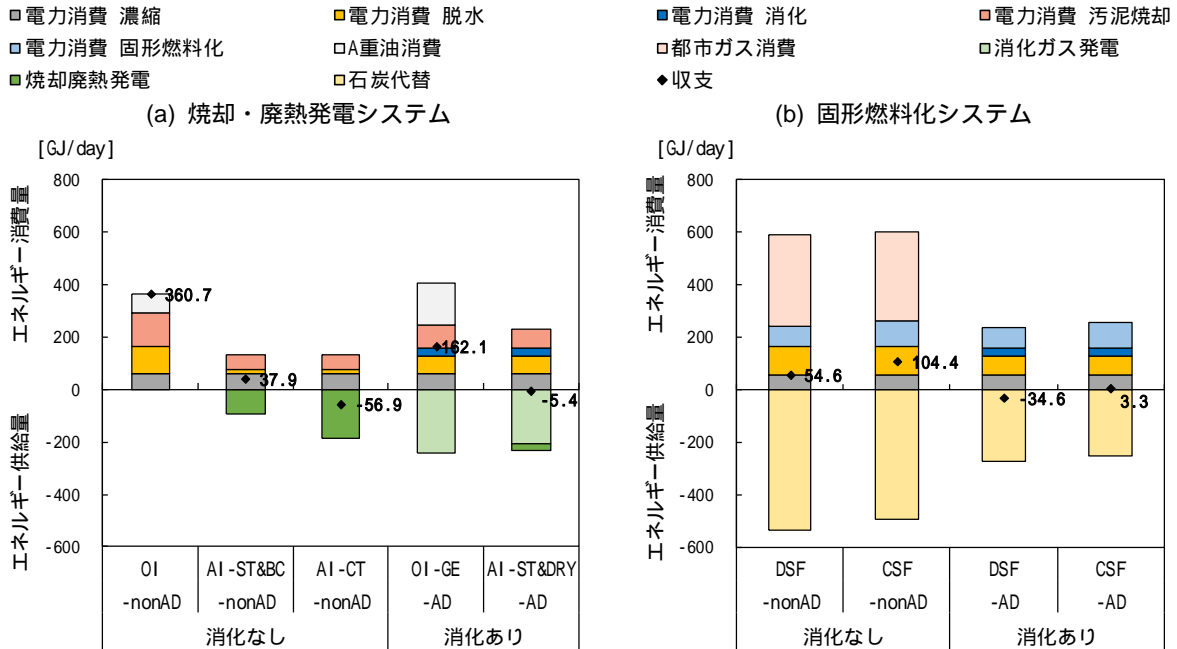


図-1 下水汚泥エネルギー利用システムを対象としたエネルギー収支の評価結果

表-2 消化の有無に対する比較評価結果の要約

		焼却・廃熱発電 ^c		焼却・廃熱発電 ^d		乾燥造粒		低温炭化	
		AI-ST&BC-nonAD	AI-ST&DRY-AD	AI-CT-nonAD	AI-ST&DRY-AD	DSF-nonAD	DSF-AD	CSF-nonAD	CSF-AD
エネルギー収支	削減率 ^a	89.5%	101.5%	115.8%	101.5%	84.9%	109.6%	71.1%	99.1%
	差分 ^b	-12.0%		14.3%		-24.7%		-28.0%	
GHG排出量	削減率 ^a	89.2%	94.6%	100.4%	94.6%	137.1%	123.7%	127.1%	117.3%
	差分 ^b	-5.4%		5.8%		13.4%		9.8%	
事業コスト	削減率 ^a	23.0%	0.1%	38.8%	0.1%	19.2%	22.3%	-2.6%	5.7%
	差分 ^b	22.9%		38.7%		-3.0%		-8.3%	

^a 基準ケースである OI-nonAD の評価値に対する削減率。

^b ケース間の削減率の差分（消化なし - 消化あり）。正の値：消化なしが優位，負の値：ありが優位。

^c 二液調質脱水機導入下での脱水汚泥処理量が 100 t-wet/day 未満の場合に適用されるシステム。

^d 二液調質脱水機導入下での脱水汚泥処理量が 100 t-wet/day 以上の場合に適用されるシステム。

(2) 大都市下水処理場における温室効果ガス排出削減ロードマップの構築

導入戦略の方針の違いを踏まえたシナリオ間比較

経路が分散化されたことを示す指標として、シンプソンの多様度指数を用いた。下水処理場での汚泥の最終生成物と、その委託先を組み合わせた処理・リサイクルの経路（*i*: 最終生成物 × 委託先）に対して同指数を算出する。2030 年度におけるシンプソンの多様度指数の算定結果を図-2 に示す。シナリオ A のシンプソンの多様度指数の平均値は 0.49 となり、シナリオ B は 0.17 である。すべての都市においてシナリオ A の指数がシナリオ B よりも高い（または等しい）結果を示しており、シナリオ A での技術導入は委託経路の分散を達成したと言える。

次に、2030 年度における下水処理場での燃料消費量を図-3 に示す。シナリオ B では導入戦略の目標に従い、すべての都市において燃料の直接消費をなくすことを達成する結果となった。一方、シナリオ A では、エネルギー化技術の導入に伴い消費する化石燃料を A 重油から都市ガスへと移行させるが、合計 6,388 GJ/day の都市ガスを外部からの供給に依存することとなる。

温室効果ガス排出量の削減ロードマップの評価

GHG 排出量のシナリオ解析結果を図-4 に示す。2015 年度の排出量 617 kt-CO₂eq/year に対し、2030 年度にシナリオ A は -178 kt-CO₂eq/year、シナリオ B は -109 kt-CO₂eq/year まで低下し、それぞれ 129%、118% の削減効果が得られる。シナリオ A の方が GHG 排出量の削減効果が 11% 大きい結果を示しており、これは、都市ガスと比較して石炭の CO₂ 排出係数が高いために、直接脱水汚泥の固形燃料化を採用した都市での石炭代替効果に寄るところが大きい。

両方のシナリオにおいて GHG 排出の大幅な削減効果が示された。下水道部門における GHG 排出削減対策はポンプ分野、水処理分野、污泥処理分野の3つから構成される。污泥処理分野では、着実なエネルギー化技術の実装により、正味での収支をマイナスにできると結論付けられる。

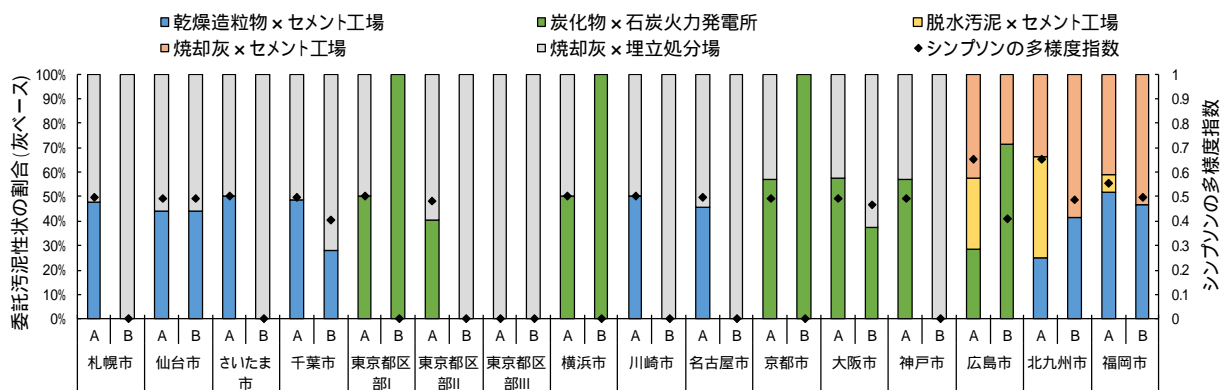


図-2 シンプソンの多様度指数を用いた処理・リサイクル経路の分散化 (A:シナリオ A, B:シナリオ B)

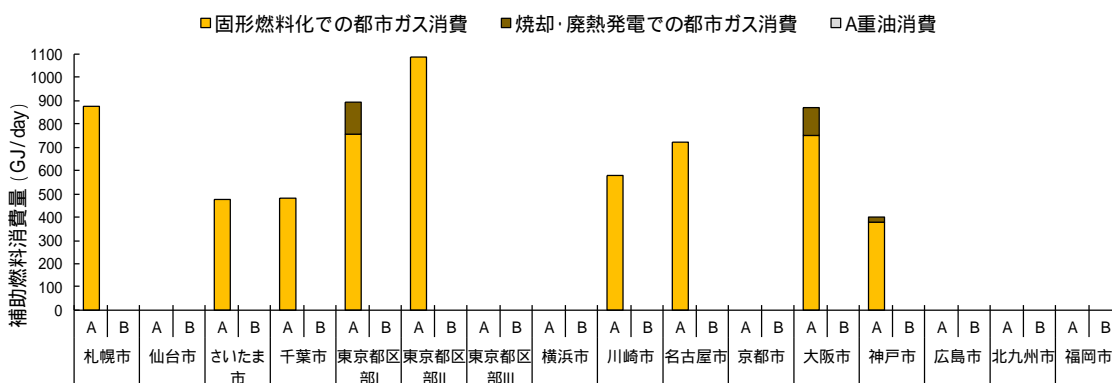


図-3 外部燃料消費量の比較結果 (A:シナリオ A, B:シナリオ B)

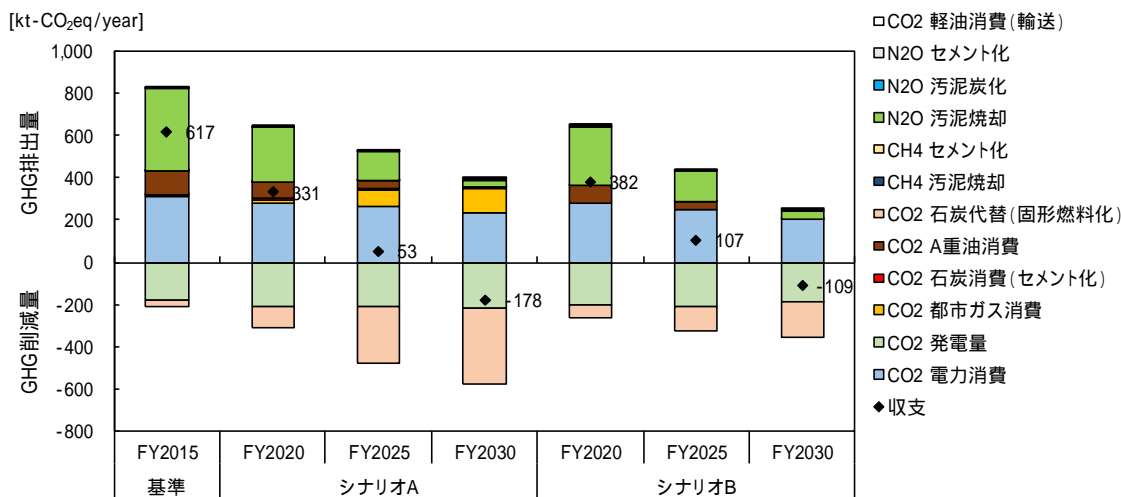


図-4 温室効果ガス排出量のシナリオ解析結果

(3) 得られた成果の位置づけとインパクト、今後の展望

下水污泥エネルギー利用システムの実装にあたり、本研究で開発した熱収支解析を活用することで創意工夫（熱エネルギーの有効利用、カスケード利用等）を反映した設計が可能となる。その際、消化の有無を踏まえた設計の判断を環境性・経済性の側面から提示した。

下水道部門・污泥処理分野における技術導入ロードマップを作成し、大都市下水処理場にエネルギー化技術が実装されることによる GHG 排出削減量を定量化した。得られた数値（削減量）は、下水道部門における中期目標に向けた地球温暖化対策の具体化に役立てることができる。

今後、下水道部門のポンプ分野、水処理分野も含めた評価モデルへと拡張し、下水道部門全体において、施策導入による GHG 排出削減量を積み上げることで、地球温暖化対策の支援へと展開することが求められる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中久保豊彦	4. 巻 74(6)
2. 論文標題 隣接したごみ焼却場と下水処理場の連携によるエネルギーシステムの形成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集G（環境）	6. 最初と最後の頁 11_129-11_140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.74.11_129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Toyohiko Nakakubo, Kehua Wang
2. 発表標題 Strategy for Introducing Sewage Sludge Energy Utilization Systems at Sewage Treatment Plants in Major Cities in Japan: Comparative Assessment
3. 学会等名 3RINCs 2021 (The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kehua Wang, Toyohiko Nakakubo
2. 発表標題 Strategy for Introducing Sewage Sludge Energy Utilization Systems at Sewage Treatment Plants in Major Cities in Japan: Technology Introduction Scenario
3. 学会等名 3RINCs 2021 (The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王柯樺, 中久保豊彦
2. 発表標題 大都市下水処理場の汚泥処理分野を対象とした温室効果ガス排出削減シナリオの設計
3. 学会等名 令和2年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王柯樺, 中久保豊彦
2. 発表標題 下水汚泥エネルギー活用システムを対象とした熱収支解析モデルの開発
3. 学会等名 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 分部茉由子, 中久保豊彦
2. 発表標題 消化ガスの利用方式に着目した下水汚泥固形燃料化システムの比較評価
3. 学会等名 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 分部茉由子, 中久保豊彦
2. 発表標題 熱のカスケード利用を踏まえた下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー収支解析
3. 学会等名 平成30年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中久保豊彦
2. 発表標題 隣接したごみ焼却場と下水処理場の連携によるエネルギーシステムの形成
3. 学会等名 第45回環境システム研究論文発表会(土木学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

学術論文 (Original paper, 査読付き) の投稿
1) Kehua Wang, Toyohiko Nakakubo: Strategy for introducing sewage sludge energy utilization systems at sewage treatment plants in large cities in Japan: Part I Ó A comparative assessment, Journal of Cleaner Production. (2021/03/25, Submission) (2021/05/31, Minor Revision)
2) Kehua Wang, Toyohiko Nakakubo: Strategy for introducing sewage sludge energy utilization systems at sewage treatment plants in large cities in Japan: Part II - Technology introduction scenarios, Journal of Cleaner Production. (2021/03/25, Submission)
学会発表での受賞実績
1) 平成30年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会・優秀ポスター賞 (分部茉由子, 2019/03) 「熱のカスケード利用を踏まえた下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー収支解析」
2) 令和2年度廃棄物資源循環学会関東支部主催研究発表会・優秀発表賞 (王柯樺, 2021/03) 「大都市下水処理場の汚泥処理分野を対象とした温室効果ガス排出削減シナリオの設計」

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------