

環境研究総合推進費補助金
循環型社会形成推進研究事業
総合研究報告書

都市廃棄物からの最も費用対効果の高い
資源・エネルギー回収に関する研究
(3K143016)

平成 26 年度～平成 28 年度

A Study on Cost-Effective Energy and Resource Recovery Systems
from Municipal Solid Wastes

平成 29 年 5 月

国立研究開発法人国立環境研究所 藤井 実

都市廃棄物からの最も費用対効果の高い
資源・エネルギー回収に関する研究

(3K143016)

| | | |
|-------------------|-------|-----|
| I. 成果の概要 | ..... | i |
| 1. はじめに (研究背景等) | | |
| 2. 研究目的 | | |
| 3. 研究方法 | | |
| 4. 結果及び考察 | | |
| 5. 本研究により得られた主な成果 | | |
| 6. 研究成果の主な発表状況 | | |
| 7. 研究者略歴 | | |
| II. 成果の詳細 | | |
| 要旨 | ..... | 1 |
| 1. はじめに | ..... | 1 |
| 2. 研究目的 | ..... | 2 |
| 3. 研究方法 | ..... | 3 |
| 4. 結果及び考察 | ..... | 29 |
| 5. 本研究により得られた成果 | ..... | 119 |
| 6. 国際共同研究等の状況 | ..... | 120 |
| 7. 研究成果の発表状況 | ..... | 120 |
| 8. 引用文献 | ..... | 125 |
| 研究概要図 | ..... | 128 |
| 英文概要 | ..... | 129 |

補助事業名 環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業（平成26年度～平成28年度）

所管 環境省

研究課題名 都市廃棄物からの最も費用対効果の高い資源・エネルギー回収に関する研究

課題番号 3K143016

研究代表者名 藤井 実（国立環境研究所）

国庫補助金 49,851,000 円（うち平成28年度：17,315,000 円）

研究期間 平成26年5月30日～平成29年3月31日

本研究のキーワード 低炭素社会、ライフサイクル評価、バイオマス利活用、産業共生、都市・地域環境創生

研究分担者

| | |
|-------|------------|
| 藤井 実 | （国立環境研究所） |
| 藤田 壮 | （国立環境研究所） |
| 田崎 智宏 | （国立環境研究所） |
| 稲葉 陸太 | （国立環境研究所） |
| 後藤 尚弘 | （豊橋技術科学大学） |
| 田畑 智博 | （神戸大学） |
| 大西 悟 | （東京理科大学） |

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

廃棄物からの効率的な資源・エネルギー回収による低炭素社会への貢献は、これまでも重要な課題であったが、東日本大震災以降その重要性が増大し、分散型のエネルギー供給手段としても注目されている。一方、とりわけ地方部においては少子高齢化等による人口減少が予測され、将来の廃棄物量変化にも備えた無駄のないリサイクル・廃棄物処理システムの計画が求められる。

そこで本研究では、大小の各都市において発生する廃棄物から、経済的かつ極めて効率的に資源・エネルギーを回収する発電・熱供給と廃棄物収集のシステムについて提案するとともに、自治体が計画作成・評価に利用可能なモデルを作成する。具体的には、マテリアルの回収や原燃料化のための前処理施設、バイオガス発電や焼却発電の施設は、規模の増大とともに効率の向上が見込まれるため、規模に対する発電・エネルギー回収効率、経済性の関係を示す施設のプロセスモデルを作成する。一方、収集は広域にするほど高コストとなるが、分別収集のモデルを作成し、施設と収集のバランスから、エネルギー効率と経済性の両面で望ましい分別数や今後整備すべき施設の種類や規模を示す。その際、既存施設の耐用年数などの制約条件を踏まえた上で、効率向上のための選択肢として、分別収集したプラスチックや雑紙類等の素材産業利用、焼却とバイオガス化を複合させた高効率発電、周辺の工場等への熱供給のオプションについても評価可能なモデルを作成し、都市の規模や様々な地域条件に合わせて、高度なエネルギー利用の計画作成を可能とする。これらの成果を統合して、人口変化に合わせた経年的シミュレーションを実施可能なモデルのプロトタイプを作成し、自治体等において中長期的にも最適な計画作成・評価を行う支援ツールとする。

2. 研究開発目的

化石燃料を含む天然資源の消費削減と、温室効果ガスの排出削減、廃棄物の適正な処理は、持続可能な社会の構築にとって重要かつ喫緊の課題である。これらに同時に対応する対策として、可燃廃棄物からのエネルギー回収効率を最大化する技術・システムを提案し、その費用対効果を評価し、自治体の政策担当者をはじめと

する関係者に知見を提供し、計画作成を支援することを目的とする。このために、本研究課題では主として以下の4項目の研究を実施するものとした。

サブテーマ1：複合発電施設のプロセス設計とモデル化

従来の焼却発電、メタン発酵発電の規模別評価に加えて、焼却とメタン発酵を適切に組み合わせた複合型高効率発電システムを検討し、その施設規模別、廃棄物組成別のプロセス設計を実施する。複合化の一例として、発酵によるメタンガスで焼却炉の蒸気をスーパーヒートして高温、高圧化することで発電効率を上昇させ、タービン廃熱による発酵槽の加温、発酵残渣の焼却などにより熱効率や経済性を高めるケースを想定する。

サブテーマ2：資源・エネルギーの地域利用モデルの作成

地理的条件に合わせて、施設周辺への熱供給及び分別廃棄物の産業利用を行う場合の費用・効果の算定するモデルを作成する。周辺熱供給は熱導管の建設コストや熱量低減を評価する。プラスチックや紙類の前処理と産業での原燃料利用は、申請者らの既存の研究成果を活用して評価する。

サブテーマ3：施設と収集の総合的最適化モデルの作成

地理情報システム（GIS）を活用する分別収集モデルと組み合わせて、施設の建設・運転と収集が総合的に最適化される分別収集のパターンと規模を検討可能なモデルを作成する。また、モデルで利用するための、施設の規模別の費用に関するインベントリを整備する。

サブテーマ4：長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言

地域の人口動態等の変化を含め、廃棄物からのエネルギー回収と費用を長期間評価するシミュレーションツールのプロトタイプを作成する。地域の特性に合わせてエネルギー回収のオプションを選択し得るシステムを設計し、都市規模別に費用対効果の高いエネルギー回収の最大化方を提案する。日本国内の地域その他、アジア各国にも適用可能な政策提言を行う。

なお、本課題採択時の審査や中間評価時に頂いた審査コメントを踏まえ、特にサブテーマ2の、エネルギーの地域利用モデルの作成に、より多くの研究資源を投入して検討を実施した。また本研究は行政推進課題であるが、自治体担当者にとっては、効率的なエネルギー回収方法に関して、利用にハードルを感じるシミュレーターよりも、地域条件別に整理された事例集が望ましいとの環境省のご意見を踏まえ、サブテーマ4では事例集の作成を実施した。

3. 研究方法

(1) 廃棄物からの資源・エネルギー回収の高度化に向けた技術指針（全サブテーマ共通）

本課題で提案する廃棄物、バイオマスのアップグレード利用は、エネルギー回収を高度化する上で重要な視点である。多くの選択肢が存在する中で、適切な方法を選択するための有用な指針となると考えられる。エネルギー利用の高度化に関わる既存の知見や方法を集約し、廃棄物からのエネルギー回収の高度化を、アップグレード利用という視点で再構築し、技術者や政策担当者が効率的な利用方法を選定する際の参考となることを目的とする。

廃棄物・バイオマスのアップグレード利用は後述するように、産業において化石燃料と何らかの形で直接・間接的に利用することで、産業プロセス内の化石燃料がもつ、エネルギーの質（エクセルギー）の観点での余力を活用することにより達成される。産業における廃棄物、バイオマスの利用は、セメント工場、製紙工場、製鉄所等において既に進められているが、更に廃棄物やバイオマスの活用を一層拡大する、いわば産業のハイブリッド化を進めることは、産業の低炭素化推進にも重要である。

(2) 複合発電施設のプロセス設計とモデル化（サブテーマ1）

廃棄物の持つエネルギーを活用できる産業が近隣に十分に存在しない場合には、廃棄物を利用した発電の効率を高めることが重要となる。メタン発酵と焼却を組み合わせ、発酵ガスでボイラー蒸気を過熱する仕組の複合発電施設が、山口県防府市において既に実用化・運転されている。しかし、事例に限られるため、焼却炉の規模が変化した際の効率性の変化、ごみ組成の影響、メタン発酵の乾式・湿式などの差異など、条件別にどのような発電効率となるかの知見に乏しい。複合発電施設は、今後素材別のリサイクルが進展した場合や、サブテーマ2で述べるような、混合プラスチックや雑紙類を分別して産業で利用するようなケースでは、焼却対象となる廃棄物の低位発熱量の低下が進むが、そのような状況でも高い発電効率を維持できることも期待される。

そこで、熱力学的な計算を基に発酵・焼却の複合発電施設をモデル化し、各自治体で条件別に導入の検討を行うための基礎情報を提供する。

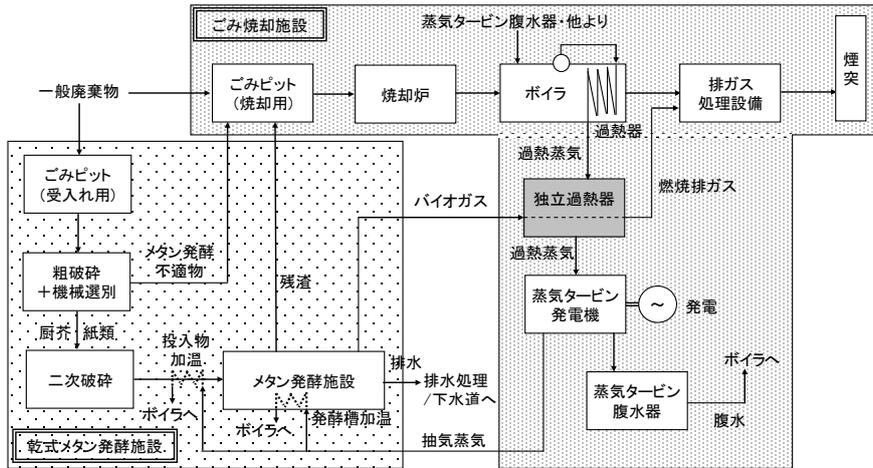


図1 乾式メタン発酵施設との複合発電システム

(3) 資源・エネルギーの地域利用モデルの作成 (サブテーマ2)

従来の一般廃棄物の焼却発電は、高くても発電効率が20数%に留まる。同様に個体燃料である石炭が、40%をやや超える発電効率で発電に利用されている状況を考えると、2倍程度の利用効率の開きが存在する。廃棄物は様々な異物や、ボイラー等を腐食する物質に富むため、エネルギー回収を効率的に行うことが困難な特性を基本的に有するが、利用先や利用方法を工夫することにより、効率の大幅な向上を目指すことが可能であると考えられる。鍵となるのは、発電のみに頼らず、地域で素材の代替、燃料代替、熱エネルギー代替などとして利用することである。特に本課題では、エネルギーとしての地域の産業での利用について中心に検討を行う。

しかし、産業では使用する原料や燃料に対して品質基準があり、どのような廃棄物でも受け入れられる訳ではない。異物等が混入する一般廃棄物を産業で有効活用するには、一定のフィルターの役割を果たす機能が求められる。フィルター機能には大きく分けて2つが考えられる。1つ目は、炉を腐食する塩素系の化合物や混合物や、低位発熱量の低い厨芥類等を除去するための選別プロセスを設け、発熱量の高い再生(原)燃料を製造し、これを産業で利用する方法である。2つ目は、焼却炉で焼却し、ボイラーで蒸気を製造して、この蒸気を周辺の工場にパイプラインで供給する方法である。



図2 廃棄物の産業利用のためのフィルター機能

本課題の採択時や中間審査等において頂いた審査コメントでも、地域利用に注力して検討を行うことが望ましいとの示唆を頂いた。特に、熱利用についてはその有効性が従来から指摘されてきたが、実態として国内で

はそれほど進んでいない。そこで、どのようにすれば熱利用が進むかについて、関係者へのヒアリング、海外の事例調査等を行うと共に、これらの調査で有望と考えられた、産業団地における発電所や工場等からなる熱利用のネットワークに、清掃工場を接続するケースについて、具体的な設計と評価を行った。

(4) 施設と収集の総合的最適化モデルの作成（サブテーマ 3）

廃棄物処理を費用面で最適化するには、施設の建設及び運転管理費と、収集・運搬、輸送費用とを合わせた、総合的な費用を考慮する必要がある。一般に、広域化（施設を大型化）するほど、単位廃棄物処理量当たりの施設建設や運転のための費用は低減するが、収集範囲が拡大するため、輸送関連の費用は増加する。これらのトレードオフを考慮できるよう、施設規模別の費用情報を整備するとともに、地理情報システム（GIS）を利用した廃棄物収集・運搬モデルを構築し、愛知県を事例として、広域化のシミュレーションを実施した。

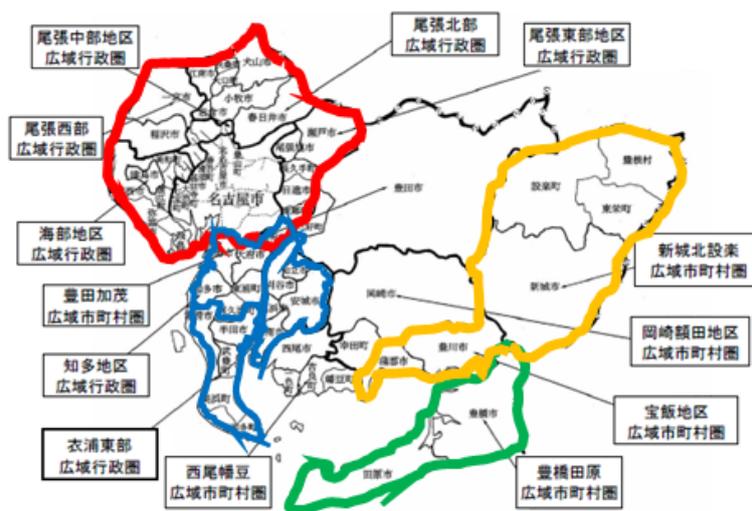


図 3 本研究で検討した広域化ブロック

(5) 長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言（サブテーマ 4）

1) 検討の概要

少子高齢化による人口や年齢構成の変化、今後の 3R の進展の可能性等を踏まえた上で、無駄な投資を極力少なくしつつ、廃棄物の高効率な資源・エネルギー回収方法を計画し、導入する必要がある。前章までに、廃棄物の持つエネルギーの産業での高効率利用や、それが難しい地域条件下における、焼却・メタン発酵の複合発電施設の計画、効果の評価方法の構築や、特に熱の利用促進に関する制度や政策面での課題の整理を実施してきた。ここでは、高齢化が分別収集に与える影響について検討した結果と、本研究課題の成果を活用しつつ構築した効率的な対策を推薦するシミュレーションツールについて述べる。シミュレーションツールは、簡単に利用できるよう、極力シンプルな構造となるようにした。加えて、自治体の担当者等が参照し、対策案として検討できるよう、効果的な対策の事例集を作成しており、その例示を行う。

4. 結果及び考察

(1) 廃棄物からの資源・エネルギー回収の高度化に向けた技術指針（全サブテーマ共通）

1) 資源の LCA という視点

供給量の限られる廃棄物を最大限に活用し、社会全体としてその効果を最大化するには、相対的に最も適した用途に利用する必要がある。従来のライフサイクルアセスメント（LCA）は、製品やサービスに着目したものであるが、このようなニーズに対しては資源に着目し、その資源が有効利用されているかを評価する、資源の LCA という視点が重要になると考えられる。単位量の資源が、そのライフサイクルにおいてどれだけの機能を提供できるかを比較、評価する視点である。図 4 に示すように、ケース 1 では廃棄物は発電に利用され、天然ガスの一部が熱の製造に利用されているが、ケース 2 において廃棄物の焼却熱を熱として利用することで、石炭がより高温の熱の製造、天然ガスが高効率発電に利用され、順次より適切な用途に利用することができるよう

になることで、各資源のライフサイクルで提供できる機能が変化し、重要な機能である発電量が大きく増加することになる。

| Life cycle of resources | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------|----|----|---------|---------|----------------|-----------------------|----|----|------------|----|----|
| Case 1 | Material | | | Heat | | Electricity | Waste | | | Pollutants | | |
| | M1 | M2 | M3 | L-Temp. | H-Temp. | | W1 | W2 | W3 | P1 | P2 | P3 |
| NG (1GJ) | | | | | 0.40 GJ | 0.30 GJ | | | | | | |
| Coal (1GJ) | | | | 0.80 GJ | | | Omitted in this paper | | | | | |
| Waste (1GJ) | | | | | | 0.20 GJ | | | | | | |
| Total | | | | 0.80 GJ | 0.40 GJ | 0.50 GJ | | | | | | |
| Case 2 | Material | | | Heat | | Electricity | Waste | | | Pollutants | | |
| | M1 | M2 | M3 | L-Temp. | H-Temp. | | W1 | W2 | W3 | P1 | P2 | P3 |
| NG (1GJ) | | | | | | 0.60 GJ | | | | | | |
| Coal (1GJ) | | | | | 0.40 GJ | 0.20 GJ | Omitted in this paper | | | | | |
| Waste (1GJ) | | | | 0.80 GJ | | | | | | | | |
| Total | | | | 0.80 GJ | 0.40 GJ | 0.80 GJ | | | | | | |

図4 資源のライフサイクル分析の枠組み（例）

2) アップグレード利用

産業における化石燃料の利用状況は、必ずしもエクセルギー効率の観点で絶対的に効率的であるとは限らない。焼却炉では300~400度程度の蒸気を製造することができる。火力発電所の蒸気条件はこれより高温であるが、工場における反応、蒸留、乾燥などの工程で必要とする温度は300度未満である場合も多い。これらの工程に焼却炉で製造した蒸気を利用した場合、直接的にはエクセルギー率が低下することになる。しかし、高温域ではヒートポンプの適用が難しいため、化石燃料を燃焼して、低いエクセルギー率で熱を得ているのが現状である。これを廃棄物、バイオマスから回収した熱で代替した場合、化石燃料の消費を抑制することができ、代替された化石燃料は、例えばガスであれば、高効率のガス火力発電所で利用することで、そのエクセルギー率が高まることになる。廃棄物、バイオマスから回収した熱の産業での利用は、直接的にはアップグレードにならなくても、代替された化石燃料が高効率利用されることを通して、間接的なアップグレード利用が可能である（図5）。

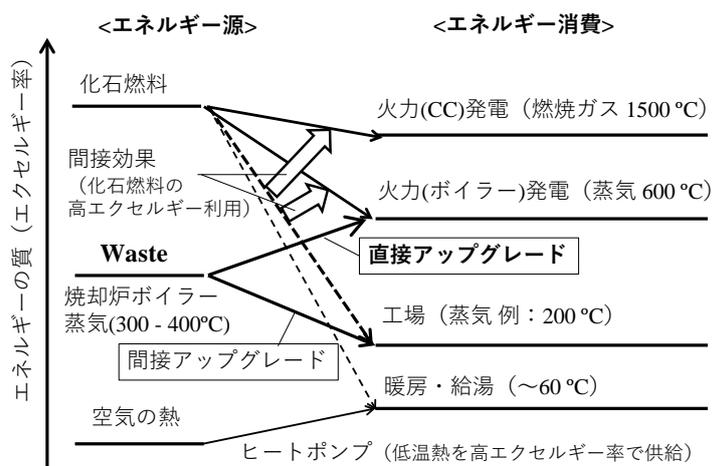


図5 廃棄物・バイオマスの直接・間接アップグレード利用

廃棄物・バイオマスのアップグレード利用は、それぞれの単位投入量当たり提供可能な機能量の拡大に資するため有効である。資源のLCAの観点からは、資源のライフサイクルにおける非効率な利用が解消されることにより、社会全体としてエクセルギー効率が高まることになる。本課題では、このような技術選択の方針を

立てた上で、資源・エネルギー回収を高度化し、経済的な側面も考慮して、大きな費用対効果が得られる方策を提案し、その効果を分析するとともに、普及のための方策を検討している。

(2) 複合発電施設のプロセス設計とモデル化（サブテーマ 1）

結果の一例として、焼却とメタン発酵の複合発電施設の施設規模と発電量、売電量の関係を図 6 に近似式と共に示す。

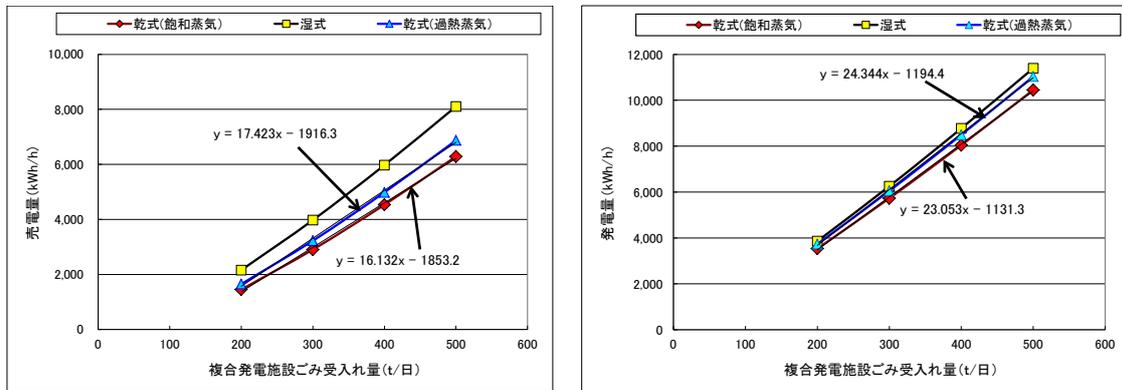


図 6 施設規模と発電量、売電量の関係

(3) 資源・エネルギーの地域利用モデルの作成（サブテーマ 2）

焼却炉で製造した蒸気を産業で総て利用できれば、発電効率 23%で発電のみを行うケースと比較して、およそ 2 倍の化石燃料消費削減効果が得られる（図 7）。また、近隣に十分な産業熱需要が存在しない際には、発電を犠牲にすることなく、廃熱を利用して製造した温水を住宅、オフィス、商業施設等で利用できれば、産業利用にはやや劣るものの、全体として同程度の化石燃料消費削減効果を得ることができる。ただし、60℃の温水需要は季節変動も大きいと考えられることから、通年ではその効果を十分に得られない可能性もある。焼却炉から近隣工場への蒸気供給は、実現すれば極めて効率の高いエネルギー回収・利用方法であることが分かる。

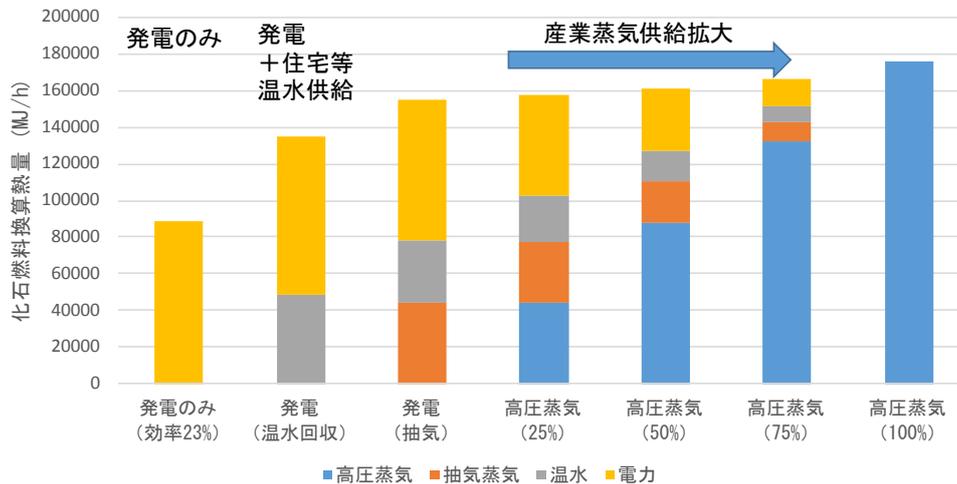


図 7 廃棄物の熱利用・発電により削減される化石燃料の熱量換算値

また、特に熱利用の促進について、国内外の制度や政策動向を整理し、課題を明らかにした。地域熱利用のステークホルダーである自治体や工場関係者からは、産業での熱利用について、高い関心が示された。ケーススタディでは、大規模な工業団地に焼却炉や火力発電所が接続される場合を想定して、効果を検討したが、近年は、バックアップボイラーの遠隔監視や自動運転が普及しており、立地条件さえ許せば、小型の焼却炉と工場の 1 対 1 の蒸気供給も成立し得ると考えられる。

(4) 施設と収集の総合的最適化モデルの作成（サブテーマ 3）

施設規模と収集・運搬の空間スケールの変化によるトレードオフの効果を評価し、最適な計画作成に資するため、施設規模ごとに費用情報等を整理した。また、広域化の評価では、CO₂排出量については、焼却施設集約化を行いブロック全体の焼却施設設置数が減少した年に減少した地域もあったが、いずれの地域もほぼ横ばいで推移していくことが予想された。CO₂排出については焼却施設運転に起因する部分が大きく、焼却施設設置数を減らしたとしてもごみ量が減らなければ大きな削減効果は得られにくいことも示された。総コスト削減の為には焼却施設の集約化が効果的であることが、定量的に確認された。

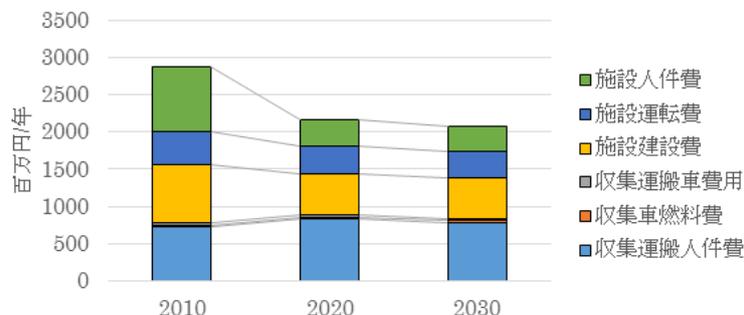


図8 総コスト内訳（知多南部）（2020年に広域化を行ったとした場合の結果）

(5) 長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言（サブテーマ 4）

1) 高齢化社会のさらなる進展がごみ分別および再資源化に与える影響の分析

図9に、年齢階級別世帯人数別での分別割合の結果を示す。単身世帯よりも2人以上世帯の方が、分別割合は高くなっている。年齢階級別でみると、年齢階級で浮き沈みはあるものの、80～84歳までは上昇していく傾向が読み取れる。しかし、85歳以上になると、分別割合は下がってくる傾向にある。

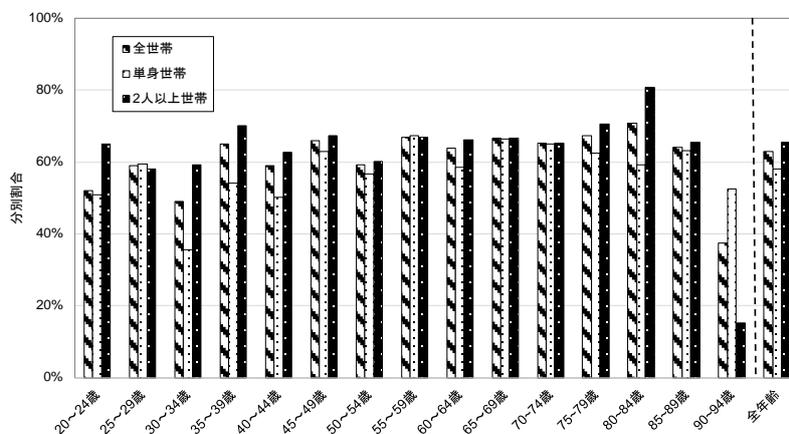


図9 5歳年齢階級別、世帯人数別での分別割合

2) 廃棄物のエネルギー回収の高度化のためのシミュレーションツール

ツールに付随する事例集のサンプルを以下に示す。シミュレーションで推奨される事例を、自治体担当者等が確認し、計画を検討するための基礎資料となる。

高度なエネルギー回収事例集

事例1：韓国・蔚山（ウルサン）市 焼却熱の産業利用「エコインダストリアルパーク事業」

1 蔚山（ウルサン）市の取り組み

蔚山は人口約100万人、2019年（2020年推定）で440万kW（2019年）に達し、化学工業が中心。石油化学製品が中心で、2019年（2020年推定）のGDPは約1兆5000億ウォン（約1兆2000億円）に達している。また、2019年（2020年推定）のGDPは約1兆5000億ウォン（約1兆2000億円）に達している。また、2019年（2020年推定）のGDPは約1兆5000億ウォン（約1兆2000億円）に達している。

2 地域の特徴

蔚山は、釜山に次ぐ人口規模を有する。2019年（2020年推定）の人口は約100万人、面積は286km²、人口密度は350人/km²に達している。また、2019年（2020年推定）のGDPは約1兆5000億ウォン（約1兆2000億円）に達している。

高度なエネルギー回収事例集

事例1：韓国・蔚山（ウルサン）市 焼却熱の産業利用「エコインダストリアルパーク事業」

3 推進体制

この事例は、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークの共同事業として推進されている。蔚山市は、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

また、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークは、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

高度なエネルギー回収事例集

事例1：韓国・蔚山（ウルサン）市 焼却熱の産業利用「エコインダストリアルパーク事業」

4 事業化の経緯

この事業は、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークの共同事業として推進されている。蔚山市は、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

また、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークは、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

エコインダストリアルパーク

この事例は、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークの共同事業として推進されている。蔚山市は、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

また、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークは、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

スチームハイウェイ事業

この事業は、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークの共同事業として推進されている。蔚山市は、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

また、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークは、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

段階的なビジネスモデルの強化

この事業は、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークの共同事業として推進されている。蔚山市は、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

また、蔚山市と蔚山エコインダストリアルパークは、焼却熱の供給と回収の調整を行い、エコインダストリアルパークは、焼却熱を利用した産業プロセスの開発と実施を行う。

3) 大幅な低炭素化の推進と、将来の人口変化に備えた政策提言

焼却熱を産業で利用する場合、焼却施設では発電設備を省略または簡素化でき、発電を行わない場合には、ボイラーの運転条件を 300℃程度以下の緩慢な条件とすることができるため、小型の焼却施設においても比較的容易に実施でき、かつ大規模な焼却施設と比べても大きな遜色のない化石燃料消費削減効果が期待できる利点がある。海外の既存事例や、国内でのモデルによる評価では、焼却炉近隣（数 km 以内）の工場への蒸気供給は、投資回収年数が数年以内となることが期待される。将来、工場が操業停止する可能性もあるが、投資回収期間が短ければ、投資の無駄を最小化することができる。

粗い推計であるが、東京、神奈川、埼玉、千葉の一都三県において、焼却炉から道路距離で 5km 以内に、蒸気を受け入れ可能な工場が存在するケースを列挙し、焼却炉の蒸気供給可能量と、工場の蒸気受け入れ可能量を比較して、焼却熱の工場での利用量を推計し、それに伴う化石燃料消費削減による CO₂ 排出の削減効果を求めた結果、220 万トン/年と推計されており、ある程度大きなポテンシャルを有していることが分かる。今後詳細な地理的条件を踏まえて、焼却炉と工場の距離が近接し、蒸気配管の敷設が容易なケースから順に、詳細なフィージビリティスタディーを実施し、可能なところからその実装を進めることが望ましい。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- 主として可燃性の一般廃棄物を対象に、その効率的なエネルギー回収の指針として、産業施設を利用したアップグレード利用を提案し、その燃料消費削減効果等を熱力学計算やライフサイクル分析等により評価して有効性を示した。
- 焼却（発電）施設、廃棄物の再生原燃料化施設、焼却とメタン発酵の複合発電施設等について、規模別や廃棄物組成別にエネルギー回収効果や費用を求めるモデル化を実施した。これにより、様々な地域条件下において、エネルギー回収を高度化する対策の予備的検討に利用することが可能となった。
- 上記の施設のモデルに、地理情報システムを利用した収集運搬のモデルを組み合わせ、廃棄物の処理計画の作成と評価を可能とした。また愛知県を事例に、広域化の費用や二酸化炭素の排出削減面での効果を評価した。
- ごみ焼却施設から外部施設への熱供給の実態調査を行うことで、地方公共団体が熱供給を含むごみ処理計画の立案を検討することが可能な基礎的知見を得た。
- 生ごみと下水汚泥の混合によるバイオガス生産および都市ガス導管による環境的・経済的効果を試算することで、ごみ処理事業と下水処理事業を組み合わせたシステムの構築方法を提案した。
- アンケート調査に基づき、高齢化により住民によるごみ分別が将来どのように変化する可能性があるかについて、シミュレーションすることが可能な基礎的知見を得た。
- 査読付き論文 12 報、学会等での報告 38 件などにより、研究成果を国内外に発信した。

(2) 環境政策への貢献

- ・ 検討した、産業を活用したエネルギー回収の高度化の手法（産業での再生原燃料利用、工場や火力発電所への焼却炉からの蒸気供給）は、従来の焼却発電（発電効率約 20%）の 1.5 倍から 2 倍程度大きな化石燃料消費削減効果を期待できる上、条件次第で経済的にもより安価な対策となり得る。低炭素化を推進する施策としても重要な選択肢となる。
- ・ 焼却熱の産業での活用について、蒸気の潜在的な需給の対象者になる自治体や産業側の関係者にヒアリング調査を実施し、蒸気供給事業に対する高い関心が示されるとともに、実現に向けた課題等も指摘された。これらの結果を踏まえて、焼却熱の利用方法のより効率的な選択肢として自治体等の計画策定に資することが期待される。
- ・ 高度なエネルギー利用を進めるための制度的な課題を整理し、欧州等の事例調査も踏まえて、熱版 FIT 制度などの改善案をまとめた。
- ・ 成果の一つである全国のごみ処理施設における熱利用の状況調査は、地方公共団体が熱利用を進めるための基礎データの作成に貢献できる可能性がある。
- ・ 生ごみと下水汚泥の混合バイオガス化および家庭での熱利用方法の提案は、導管工事や家屋の改造を伴わない熱利用に貢献できる可能性がある。

<行政が既に活用した成果>

- ・ 本研究課題の成果の一部（焼却熱の産業利用の提案や事例調査）は、環境省による平成 27 年度廃棄物発電の高度化支援事業の成果報告書に引用されるとともに、当該事業の調査方法の一部に対し課題代表者が助言を行った。また、課題代表者や分担者の一部は、廃棄物からの資源・エネルギー回収の高度化に関わる国や地方自治体の複数の委員会等に参画し、本課題の成果を踏まえて助言等による貢献を行っている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ 収集モデルを含む廃棄物処理工程のモデル化により、地域特性別に費用面からも合理的なシステムの提案に繋げることができる仕組みを構築した。事例集として整理し、関係者で活用できる仕組みとした。
- ・ 高齢者のごみ分別行動の分析は、超高齢社会を見据えたごみ処理施策の検討に貢献できる可能性がある。構築したモデルと合わせて、今後の人口構成等の変化を見据えた、将来の廃棄物処理計画の策定に貢献することができる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) 大西悟, 藤田壮, 藤井実, 戸川卓哉, Dong Liang : 日本 LCA 学会誌, 10 (3), 299-306 (2014)
「地域循環による各主体の GHG アカウンティングへの影響分析」
- 2) Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Liang Dong, Chengpeng Lu, Yong Geng, Shishir Kumar Behera, Hung-Suck Park, Anthony Shun Fung Chiu : Journal of Cleaner Production , Vol. 114, p376-386 (2016)
“Possibility of developing low-carbon industries through urban symbiosis in Asian cities”
- 3) Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Toru Matsumoto, Liang Dong, Hiroyuki Akiyama, Huijuan Dong : Journal of Cleaner Production, Vol. 114, p95-102 (2016), “Comparative analysis of recycling industry development in Japan following the Eco-Town program for eco-industrial development”
- 4) Liang Dong, Tsuyoshi Fujita, Ming Dai, Yong Geng, Jingzheng Ren, Minoru Fujii, Yi Wang, Satoshi Ohnishi : Journal of Cleaner Production, Vol. 114, p387-400 (2016), “Towards preventative eco-industrial development: an industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China”
- 5) Chen W., Liu W., Geng Y., Ohnishi, S., Sun, L., Han, W., Tian, X., Zhong, H : Journal of Cleaner Production, 131(10), 272-279 (2016), “Life cycle based emergy analysis on China’s cement production”
- 6) Dou Y., Togawa T., Dong L., Fujii M., Ohnishi S., Tanikawa H., Fujita T. : Resources, Conservation and Recycling (2016), “Innovative Planning and Evaluation System for District Heating Using Waste Heat

Considering Spatial Configuration: A Case in Fukushima, Japan” (In press)

- 7) Ohnishi S., Fujii M., Ohata M., Inaba R., Fujita T. : Resources, Conservation and Recycling, (2016), “Efficient energy recovery through a combination of waste-to-energy systems for a low-carbon city “ (in press)
- 8) Kim, H.W., Ohnishi S., Fujii M., Fujita T., and H.S. Park. : Journal of Industrial Ecology, (2016), “Evaluation and allocation of greenhouse gas (GHG) reductions in industrial symbiosis using GHG protocol and life cycle approaches “ (in press)
- 9) Tabata, T., Tsai, P. : Waste Management & Research Vol. 34, No. 2, pp.148-155 (2016), “Heat Supply from Municipal Solid Waste Incineration Plants in Japan: current situation and future challenges “
- 10) Ohnishi S., Dong H., Geng Y., Fujii M., Fujita T. : Journal of Ecological Indicators, 73, 513-524 (2017), “A comprehensive evaluation on industrial & urban symbiosis by combining MFA, carbon footprint and emergy methods-Case of Kawasaki, Japan “
- 11) Inaba, T., Tabata, T., Tsai, P. : Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2017 “Development of a Basic Rate of Household Energy Consumption Considering Usage Time and Quantity of Consumer Durables” (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 藤井実：日本 LCA 学会誌, 12(4):239-242 (2016) 「都市廃棄物からの高効率なエネルギー回収」
- 2) 田畑智博, 小田実紀, 宮本一毅, 蔡佩宜, 片桐恵子：日本 LCA 学会誌, 12(4):243-251 (2016) 「超高齢社会に対応した廃棄物処理システムのあり方に関する考察」

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Minoru Fujii, Satoshi Ohnishi, Yi Dou, Lu Sun, Rokuta Inaba : The International Society for Industrial Ecology (ISIE) 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan, (2016.9), “Sophistication of energy recovery system from municipal solid waste “
- 2) Inaba R., Tasaki T., Fujii M., Yamaguchi N. : the 12th Biennial International Conference on EcoBalance (EcoBalance 2016), Kyoto, Japan, (2016.10), “Benefits from Integration of Municipal Solid Waste Incinerators as a Measure for Decreasing Combustible Waste in the Future “
- 3) 野浪志太, Phengpaseuth Souksavanh, 後藤尚弘：土木学会第 44 回環境システム研究論文発表会, 2016 年 10 月「廃棄物処理広域化地域への都市の規模が及ぼす影響に関する研究」
- 4) 小田実紀, 蔡佩宜, 田畑智博, 片桐恵子：第 12 回日本 LCA 学会研究発表会論文集, pp. 410-411, 茨城県つくば市 2017 年 3 月「超高齢社会の進展が自治体のごみ処理システムにおよぼす環境的影響の評価－神戸市でのケーススタディ」

他 37 件

7. 研究者略歴

研究代表者：藤井 実

東京大学大学院工学系研究科単位取得退学、工学博士、現在、(国研) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター 環境社会イノベーション研究室 室長

研究分担者

1) 藤田 壮

東京大学工学部卒業、米国ペンシルバニア大学大学院修士課程修了、博士 (工学)、現在、(国研) 国立環境研究所 社会環境システム研究センター センター長

2) 田崎 智宏

横浜国立大学工学研究科博士課程修了、博士 (学術)、現在、(国研) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 循環型社会システム研究室 室長

3) 稲葉 陸太

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、（国研）国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 循環型社会システム研究室 主任研究員

4) 後藤 尚弘

東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、東洋大学 情報連携学部情報連携学科 教授

5) 田畑 智博

名古屋大学大学院環境学研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、神戸大学大学院人間発達環境学研究科 准教授

6) 大西 悟

東洋大学大学院工学研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、東京理科大学理工学部経営工学科 助教

3K143016 都市廃棄物からの最も費用対効果の高い資源・エネルギー回収に関する研究

[要旨]

気候変動、資源枯渇、少子高齢化などの諸問題に対応するため、費用対効果に優れる方法で、廃棄物からの資源・エネルギー回収を高度化して化石燃料消費や二酸化炭素排出の削減に貢献し、今後ひっ迫する自治体等の予算制約下で、廃棄物処理を着実に実施する必要がある。本研究では、これらの課題に対応するため、主として可燃性の一般廃棄物を対象に、費用対効果の高い廃棄物のエネルギー利用の方法を検討した。

まず、技術選択の指針として、廃棄物のアップグレード利用を提案し、分別収集した雑紙・混合プラスチック類を再生原燃料として産業で利用するオプション、混合焼却して製造する蒸気を近隣の工場（群）で利用するオプション（いずれも焼却発電に比べ2倍程度削減効果が高い）について、特に後者の熱力学的な分析や、環境負荷や費用面の分析を行い、様々な地域での計画作成及び評価が可能となるよう、施設の規模別等のモデル化を実施した。モデルを具体的な地域に適用し、詳細な計画作成と有効性の評価を実施した。また、近隣の産業に十分な需要が存在しないケースにおいて有効で、再生原燃料化後の残渣となる焼却対象廃棄物からも高効率に発電する方法となる、焼却とメタン発酵の複合発電施設について、同様に規模別や廃棄物組成別に検討可能なモデルを作成した。これらオプションの効果を、収集・運搬の過程を含めて総合的に判断できるツールを作成するとともに、地域条件別に推奨されるオプションの概要を確認できる事例集を作成した。高齢化の分別収集への影響の評価など、将来を見通した分析や政策提言も実施した。

研究成果を示しながら、自治体や工場関係者に対して実施したヒアリング調査では、産業における廃棄物焼却熱の利用について、これまで検討が不十分だった経緯や、社会的な情勢変化により、今後実現できる可能性が十分あると評されるなど、本研究への高い関心が示された。また焼却熱の利用について、広く自治体へのアンケート調査や、国内外の支援制度・政策等の調査を実施し、推進に向けた課題を整理した。

本研究課題の成果の一部は、環境省による廃棄物発電の高度化支援事業でも引用されている。メンバーが参画する環境省や自治体の、廃棄物利用の高度化等に関する複数の委員会等にも、その知見を提供した。

1. はじめに

廃棄物からの効率的な資源・エネルギー回収による低炭素社会への貢献は、これまでも重要な課題であったが、東日本大震災以降その重要性が増大し、分散型のエネルギー供給手段としても注目されている。一方、とりわけ地方部においては少子高齢化等による人口減少が予測され、将来の廃棄物量変化にも備えた無駄のないリサイクル・廃棄物処理システムの計画が求められる。

そこで本研究では、大小の各都市において発生する廃棄物から、経済的かつ極めて効率的に資源・エネルギーを回収する発電・熱供給と廃棄物収集のシステムについて提案するとともに、自治体が計画作成・評価に利用可能なモデルを作成する。具体的には、マテリアルの回収や原燃料化のための前処理施設、バイオガス発電や焼却発電の施設は、規模の増大とともに効率の向上が見込まれるため、規模に対する発電・エネルギー回収効率、経済性の関係を示す施設のプロセスモデルを作成する。一方、収集は広域にするほど高コストとなるが、分別収集のモデルを作成し、施設と収集のバランスから、エネルギー効率と経済性

の両面で望ましい分別数や今後整備すべき施設の種類や規模を示す。その際、既存施設の耐用年数などの制約条件を踏まえた上で、効率向上のための選択肢として、分別収集したプラスチックや雑紙類等の素材産業利用、焼却とバイオガス化を複合させた高効率発電、周辺の工場等への熱供給のオプションについても評価可能なモデルを作成し、都市の規模や様々な地域条件に合わせて、高度なエネルギー利用の計画作成を可能とする。これらの成果を統合して、人口変化に合わせた経年的シミュレーションを実施可能なモデルのプロトタイプを作成し、自治体等において中長期的にも最適な計画作成・評価を行う支援ツールとする。

2. 研究目的

化石燃料を含む天然資源の消費削減と、温室効果ガスの排出削減、廃棄物の適正な処理は、持続可能な社会の構築にとって重要かつ喫緊の課題である。これらに同時に対応する対策として、良質なマテリアルリサイクルが一定規模で実施されることを前提としながら、残りの可燃廃棄物からのエネルギー回収効率を最大化する技術・システムを提案し、その費用対効果を評価し、自治体の政策担当者をはじめとする関係者に知見を提供し、計画作成を支援することを目的とする。このために、本研究課題では主として以下の4項目の研究を実施するものとした。

サブテーマ1：複合発電施設のプロセス設計とモデル化

従来の焼却発電、メタン発酵発電の規模別評価に加えて、焼却とメタン発酵を適切に組み合わせた複合型高効率発電システムを検討し、その施設規模別、廃棄物組成別のプロセス設計を実施する。複合化の一例として、発酵によるメタンガスで焼却炉の蒸気をスーパーヒートして高温、高圧化することで発電効率を上昇させ、タービン廃熱による発酵槽の加温、発酵残渣の焼却などにより熱効率や経済性を高めるケースを想定する。

サブテーマ2：資源・エネルギーの地域利用モデルの作成

地理的条件に合わせて、施設周辺への熱供給及び分別廃棄物の産業利用を行う場合の費用・効果の算定するモデルを作成する。周辺熱供給は熱導管の建設コストや熱量低減を評価する。プラスチックや紙類の前処理と産業での原燃料利用は、申請者らの既存の研究成果を活用して評価する。

サブテーマ3：施設と収集の総合的最適化モデルの作成

地理情報システム（GIS）を活用する分別収集モデルと組み合わせて、施設の建設・運転と収集が総合的に最適化される分別収集のパターンと規模を検討可能なモデルを作成する。また、モデルで利用するための、施設の規模別の費用に関するインベントリを整備する。

サブテーマ4：長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言

地域の人口動態等の変化を含め、廃棄物からのエネルギー回収と費用を長期間評価するシミュレーションツールのプロトタイプを作成する。地域の特性に合わせてエネルギー回収のオプションを選択し得るシステムを設計し、都市規模別に費用対効果の高いエネルギー回収の最大化方策を提案する。日本国内の各地域の他、アジア各国にも適用可能な政策提言を行う。

なお、本課題採択時の審査や中間評価時に頂いた審査コメントを踏まえ、特にサブテーマ2の、エネルギーの地域利用モデルの作成に、より多くの研究資源を投入して検討を実施した。また本研究は行政推進課題であるが、自治体担当者にとっては、効率的なエネルギー回収方法に関して、利用にハードルを感じ

るシミュレーターよりも、地域条件別に整理された事例集が望ましいとの環境省のご意見を踏まえ、サブテーマ4では事例集の作成を実施した。

3. 研究方法

(1) 廃棄物からの資源・エネルギー回収の高度化に向けた技術指針（全サブテーマ共通）

気候変動への対応、資源枯渇への対応、さらに廃棄物では適正処理を経済的に推進する必要がある。廃棄物やバイオマスは限られた資源であり、それを高度に、かつ既存施設等を活用して経済的に利用することが、これら問題に同時に寄与するために重要である。

理想的には廃棄されたマテリアルは、同じ用途のマテリアルとして繰り返し水平リサイクルすることが望ましいが、一方でマテリアル用途よりもはるかに大きなエネルギー需要が存在するため、エネルギー用途における化石燃料の代替も含めて、社会全体での低炭素化を試みることが重要である。高品質なマテリアルリサイクルが難しい対象については、高度なエネルギー回収も重要な選択肢となる。

本課題で提案する廃棄物、バイオマスのアップグレード利用は、エネルギー回収を高度化する上で重要な視点である。多くの選択肢が存在する中で、適切な方法を選択するための有用な指針となると考えられる。しばしば、一般的に低付加価値の素材を高付加価値の製品に利用することをもって、アップグレード利用と言われる場合がある。これはリサイクルの経済性向上にとって重要であるが、必ずしも環境負荷の低減につながるとは限らない。その製品は、本来であればより低品位の素材でも製造できたということを意味している。エネルギー回収の場合、アップグレード利用はエネルギーの質（エクセルギー率）の観点で判断される。廃棄物やバイオマスが、それ単独で利用される場合の現状で達成し得るエクセルギー効率よりも、更に高いエクセルギー効率で利用される方法でエネルギー回収を行うことで、より多くの化石燃料を代替し、高い資源消費の削減効果と、環境負荷の削減効果が得られる。廃棄物・バイオマスのアップグレード利用は後述するように、産業において化石燃料と何らかの形で直接・間接的に利用することで、産業プロセス内の化石燃料がもつ、エクセルギー的観点での余力を活用することにより達成される。産業における廃棄物、バイオマスの利用は、セメント工場、製紙工場、製鉄所等において既に進められているが、更に廃棄物やバイオマスの活用を一層拡大する産業のハイブリッド化を進めることは、産業の低炭素化推進にも重要である。低温の熱を、化学エネルギーを用いて高温の熱や、化学物質に変換する方法は、エクセルギー再生として発電や化学プロセス等でしばしば用いられる方法でもある。これらの既存の知見や方法を集約し、廃棄物からのエネルギー回収の高度化を、アップグレード利用という視点で再構築し、技術者や政策担当者が効率的な利用方法を選定する際の参考となることを目的とする。

(2) 複合発電施設のプロセス設計とモデル化（サブテーマ1）

1) 検討の概要

廃棄物からのエネルギー回収を高効率化する方策として、本研究課題では、サブテーマ2「資源・エネルギーの地域利用モデルの作成」において、廃棄物の持つエネルギーの地域利用、特に産業での活用を検討しているが、周辺に需要先となる工場が十分に存在しない場合には、発電が適当なエネルギー回収方法であり、この発電効率を高めることが重要となる。一般廃棄物からの発電では、廃棄物焼却発電が一般的に用いられるが、その発電効率は国内で最も効率的なケースでも、20数%に留まっている。焼却発電の発電効率の大幅な増加が困難な理由の1つは、蒸気の温度を高めることが困難な点である。一般に、タービンに通す燃焼ガスや蒸気の温度を高めるほど、発電効率は高くなるが、焼却炉においては燃焼ガスが腐食性に

富むため、高温状態におけるボイラー配管の腐食を防止する観点から、蒸気温度を 400℃程度以下に抑制している（火力発電所では 500～600℃程度）。この改善方策として、スーパーごみ発電と呼ばれる仕組みが提案、運用されてきた。都市ガス等を用いてガスタービンを回して発電した上で、タービン廃熱で焼却炉のボイラーで製造した蒸気を過熱（スーパーヒート）し、蒸気温度を高めて発電効率を高める試みである。これにより、総合的な発電効率は 30%超に向上するが、都市ガスを消費する難点がある。ガス価格が高騰すると、燃料費が増大し、経済的に見合わなくなる可能性があり、また天然ガスは大型の複合サイクルのガス火力発電所で利用すれば、60%近い発電効率で発電できるため、資源の LCA の観点から、社会全体として都市ガスのこのような使い方が適当であるかの判断も必要である。そこで、ガスは厨芥のメタン発酵で得られるメタンガスを利用し、焼却炉ボイラーで製造した蒸気を過熱する複合発電方法が考えられる。メタンガスを焼却発電の補強に消費する点はスーパーごみ発電と同ではあるが、メタン発酵で生産されたガスは都市ガスや天然ガスに比べて発熱量が低いため、これを都市ガスとして利用するには、ガス組成等を調整して都市ガス配管に供給しなくてはならない。複合発電では、その場でガスを有効利用できる点が大きな利点となる。

厨芥を分別収集して嫌気発酵させ、残りの破棄物は焼却炉で焼却して、ボイラーで蒸気を製造する。メタン発酵によるガスが大量に得られるのであれば、スーパーごみ発電と同様に、ガスタービンを設置することもできるが、発電効率は下がるものの、過熱のみを行う方が、装置は簡素化される。このような、発酵と焼却を組み合わせ、発酵ガスでボイラー蒸気を過熱する仕組の複合発電施設が、山口県防府市において既に実用化・運転されている。しかし、実例が限られるため、焼却炉の規模が変化した際の効率性の変化、ごみ組成の影響、メタン発酵の乾式・湿式などの差異など、条件別にどのような発電効率となるかの知見に乏しい。複合発電施設は、今後素材別のリサイクルが進展した場合や、サブテーマ 2 で述べるような、混合プラスチックや雑紙類を分別して産業で利用するようなケースでは、焼却対象となる廃棄物の低位発熱量の低下が進むが、そのような状況でも高い発電効率を維持できることも期待される。そこで、熱力学的な計算を基に発酵・焼却の複合発電施設をモデル化し、各自治体で条件別に導入の検討を行うための基礎情報を提供する。

2) 廃棄物焼却・メタン発酵の複合発電施設の概要

メタン発酵と焼却の複合発電システムは焼却施設で発生した蒸気を、メタン発酵で発生したバイオガスの燃焼熱で過熱し、高効率の発電を行うものである。メタン発酵には湿式と乾式の両方を検討するが、ここでは乾式のケースで説明を行う。乾式メタン発酵施設との複合発電施設を図 1 のように設定する。乾式メタン発酵の場合、高温発酵（55℃）であるため、発酵槽の加温に蒸気タービン排気（54℃）では温度が低く過ぎて利用できず、蒸気タービン抽気を使用するところが、湿式メタン発酵と異なる。

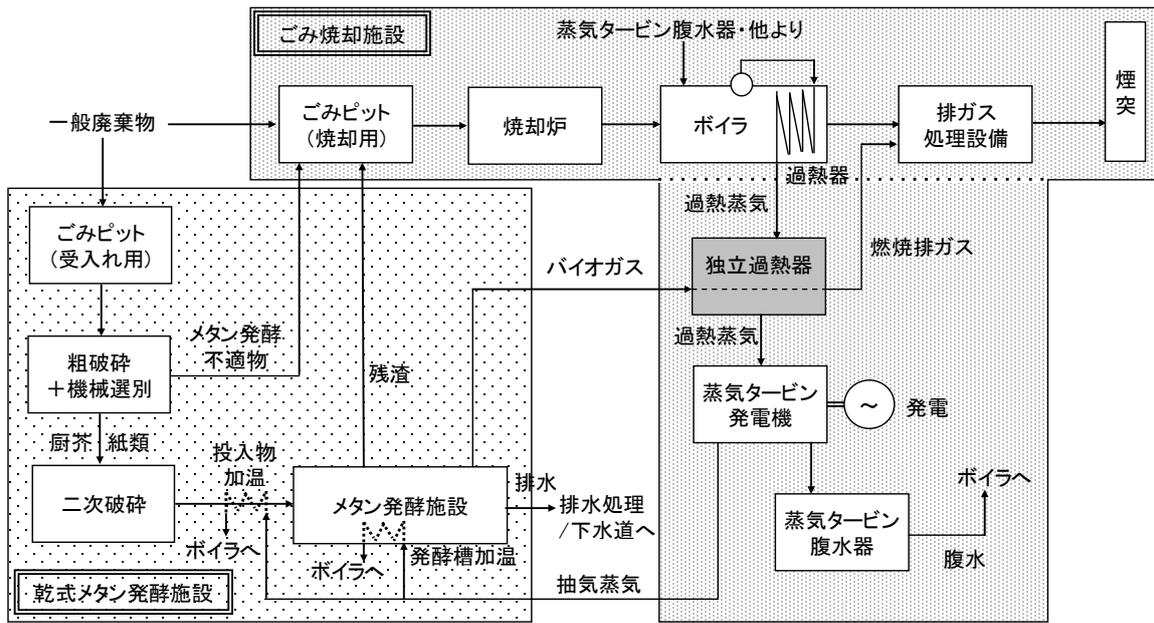


図1 乾式メタン発酵施設との複合発電システム

3) 計算条件

乾式メタン発酵施設は異物混入に対する許容度が高く、機械選別装置との組合せで、混合収集でもメタン発酵ができる特徴がある。しかし、発酵槽が横型円筒型であるためスケールアップに制約があり、1系列は最大で30~40 t/日¹⁾とされている。ここでは、分別収集を前提とした湿式メタン発酵の発電量、売電量と比較するため、計算上、発酵槽の系列を増やして検討する。

4) 基準とする物質収支の設定

発電量の試算は物質収支が示されている南但クリーンセンターの情報²⁾を参考に試算する。南但クリーンセンターの乾式メタン発酵のデータを参考とした物質収支を図2に示す。

- ・ バイオガス発生量：190Nm³/t - 発酵槽投入ごみ量（メタン濃度50%換算）
- ・ 機械選別割合（メタン発酵設備へのごみ量の割合）：受入れごみ量に対して45%
- ・ 脱水残渣量（ごみピットに返送し焼却処理する量）：水分60%としてごみ組成から計算
南但クリーンセンターでは受入れごみ量に対して23%

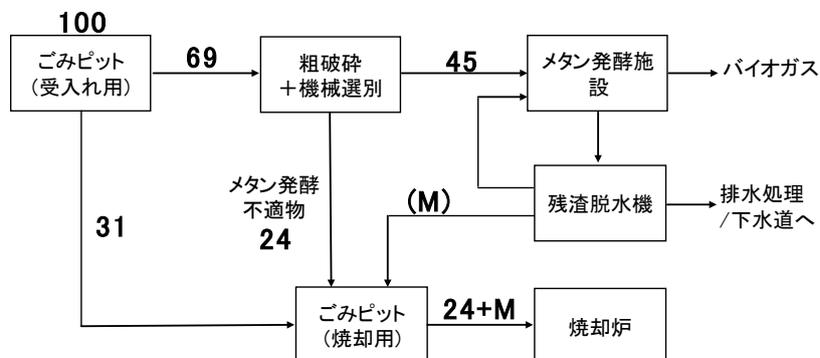


図2 南但クリーンセンターの乾式メタン発酵のデータを参考とした物質収支

5) ごみ組成の設定

防府市クリーンセンターの受入れごみの組成と機械選別後の発酵槽投入ごみのごみ組成³⁾の情報を表1に示す。このデータから各ごみ組成の濃縮率を設定し、湿式メタン発酵と比較するため、全国平均ごみ組成を基準とし、機械選別後のごみ組成を推定した。その結果を表1に合わせて示す。

表1 機械選別による各ごみ組成（乾基準）の設定

単位：%

| 項目 ごみ組成 | 防府市クリーンセンターのごみ | | 濃縮率 | 標準ごみ（試算値） | |
|------------|----------------|-------|-------|-----------|--------|
| | 受入れごみ | 選別ごみ | | 受入れごみ | 選別ごみ |
| 紙類 | 28.0 | 48.5 | 173.2 | 38.47 | 61.57 |
| 布類 | 5.0 | 3.5 | 70.0 | 10.23 | 6.61 |
| プラスチック類 | 21.0 | 12.5 | 59.5 | 21.51 | 11.83 |
| 木・竹・わら類 | 24.5 | 15.5 | 63.3 | 9.28 | 5.42 |
| 厨芥類 | 7.5 | 5.0 | 66.7 | 14.43 | 8.89 |
| 不燃物 | 5.0 | 2.5 | 50.0 | 2.60 | 1.20 |
| その他 | 9.0 | 12.5 | 138.9 | 3.48 | 4.47 |
| 合計 | 100.0 | 100.0 | — | 100.00 | 100.00 |

注) 全国平均ごみ組成は紙・布類が同じ区分であるため、紙類と布類の比率は横浜市のごみ組成（平成22年度）を参考にして、同じ比率で割り振った。

6) ボイラー出口の蒸気条件

蒸気タービン入り口蒸気条件（温度と圧力）は熱効率と経済性の観点から、廃棄物発電で経験上、蒸気温度・蒸気圧力の組合せが図3に示す値が選定される。

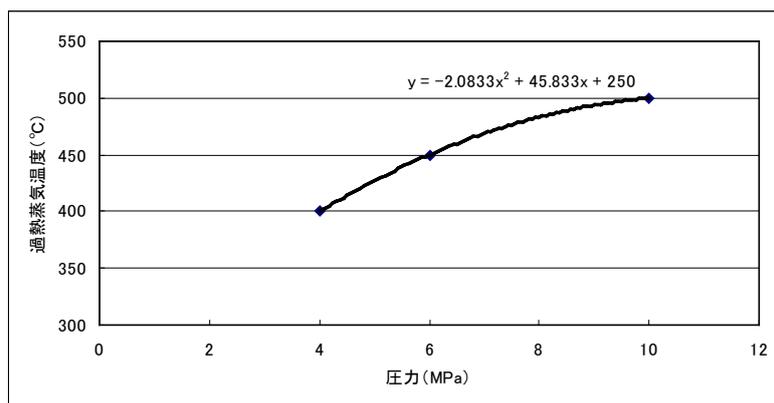


図3 独立過熱器出口の蒸気条件：温度と圧力の関係

圧力は高い方が高い発電効率となるので、独立過熱器においてできるだけ高い圧力で熱バランスする入口蒸気温度（＝ごみ焼却炉過熱器出口の蒸気温度）を求める。ごみ焼却炉過熱器出口の蒸気温度は高温腐食を避けるため、実績の多い400℃を上限とする。

7) 独立過熱器回りのバランス計算の方法

廃棄物焼却炉のボイラーで発生した飽和蒸気が蒸気タービン入口に行く間に、廃棄物焼却炉の過熱器と独立過熱器により図3の蒸気条件まで加熱する。蒸気系のシステム上、蒸気圧力はボイラーと同じ圧力で、温度だけが上昇することになる。独立過熱器回りの熱バランスのモデルを図4に示す。ただし、バイオガス発生量が多い場合、廃棄物焼却施設で発生した蒸気をボイラーの過熱器で過熱せずに飽和蒸気のまま独立過熱器に送り、バイオガスで所定の温度まで昇温することが可能になる。

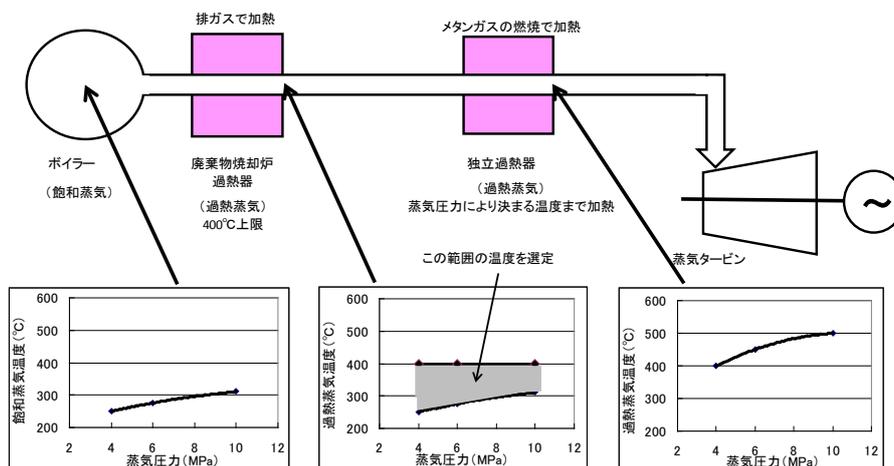


図4 独立過熱器回りの熱バランスのモデル図

100%換算のメタンガス量を求め、独立過熱器でメタンガスの燃焼により加熱できる交換熱量（以下、メタンガス加熱量という）を求める。ここで、メタンガス加熱量と蒸気の必要加熱量が一致する蒸気条件を求める。この算出手順を以下に示す。

乾式メタン発酵ではバイオガス発生量が多くなるため、まず、廃棄物焼却炉の過熱器を設置せず、ボイラー出口の飽和蒸気をそのまま独立過熱器に送り、直接加熱するケース（飽和蒸気ケース）を検討する。次に、廃棄物焼却炉に過熱器を設置して過熱蒸気とし、独立過熱器でさらに加熱するケース（過熱蒸気ケース）を検討する。

① ボイラー出口蒸気が飽和蒸気のケース

- i. 4～10MPaの各蒸気圧力において独立過熱器の出口温度を図3の温度にするために必要な交換熱量を求める。ボイラーの圧力を下げると昇温による蒸気エンタルピーの差が小さくなり、必要熱交換量が少なくなる。
- ii. メタンガス加熱量と一致する必要熱交換量となる飽和蒸気温度 t を、繰り返し計算により求める。蒸気温度 t とエンタルピー h の関係は表2に示す蒸気表から求めた近似式により試算する。

② ボイラー出口蒸気が過熱蒸気のケース

- i. 廃棄物焼却炉の過熱器では高温腐食の関係で400℃までしか加熱できないので、4～10MPaの各蒸気圧力において独立過熱器入口を最高の400℃とし、出口温度が図3の温度にするための必要熱交換量を求める。ボイラーの圧力を下げると昇温による蒸気エンタルピーの差が小さくなり、必要熱交換量が少なくなる。

- ii. ある蒸気圧力の条件の基で、求めた必要熱交換量がメタンガス加熱量より多い場合は、蒸気圧力を下げて必要熱交換量を減らす。独立過熱器入口温度は最高の 400°C の試算であるため、入口温度をさらに高くして交換熱量を増やすことができない。つまり、この蒸気圧力では成立たないことになる。
- iii. 独立過熱器入口 400°C の条件で、メタンガス加熱量より少ない必要熱交換量となる蒸気圧力を繰り返し計算により求める。ここで、蒸気圧力は高いほど発電効率が高くなるので、極力高い蒸気圧力を選定する。
- iv. 選定した蒸気圧力において、飽和温度から 400°C の間で、メタンガス加熱量と一致する必要熱交換量となる蒸気温度 t を、繰り返し計算により求める。蒸気温度 t を下げて温度差を大きくすると蒸気エンタルピーが低下し、エンタルピー差が大きくなるため、必要熱交換量は増加する。蒸気温度 t を上げて温度差を小さくすると、蒸気エンタルピーが増加しエンタルピー差が小さくなり、必要熱交換量が低下する。蒸気温度 t とエンタルピー h の関係は各蒸気圧力により異なるため、表 2 に示す蒸気表から求めた近似式で試算する。

表 2 蒸気温度 t とエンタルピー h の関係 (近似式)

| 蒸気圧力 (MPa) | 過熱蒸気エンタルピー h (kJ/kg) |
|------------|--|
| 10 | $h = -0.0172 * t^2 + 16.4 * t - 692$ |
| 8 | $h = -0.0113 * t^2 + 11.4 * t + 378$ |
| 6 | $h = -0.0071 * t^2 + 7.92 * t + 1,145$ |
| 5 | $h = -0.0054 * t^2 + 6.47 * t + 1,463$ |

8) 施設規模による発電量の補正

ごみ処理の規模が大きなボイラーほど、その比表面積が相対的に小さくなり、熱効率が向上し、発電効率が増加する。同様に、同じごみ処理規模でもごみの発熱量が高くなると回収熱量が増加し、発電量が増加する。そこで、計算上求めた発電量を投入熱量 (= ごみ処理量 * ごみの低位発熱量) で補正するため、実機補正係数を設定した。蒸気条件を変えた場合もこの実機補正係数で投入熱量による補正を行った。国内における廃棄物発電のごみ処理量と発電効率の関係 (4MPa * 400°C の条件) から、投入熱量と発電効率の関係を図 5 に示す。4MPa * 400°C の条件で、試算結果の発電効率が同じになるように実機補正係数を設定した。

注) 出典とした資料ではごみの低位発熱量を 8,800kJ/kg で試算しているため、投入熱量はごみ処理量に 8,800MJ//t を乗じて求めた。

$$\text{実機補正係数} = 0.156 * \ln(x) - 0.368$$

ここで、 x = 投入熱量 (ごみ処理量 * ごみの低位発熱量) (GJ/日)

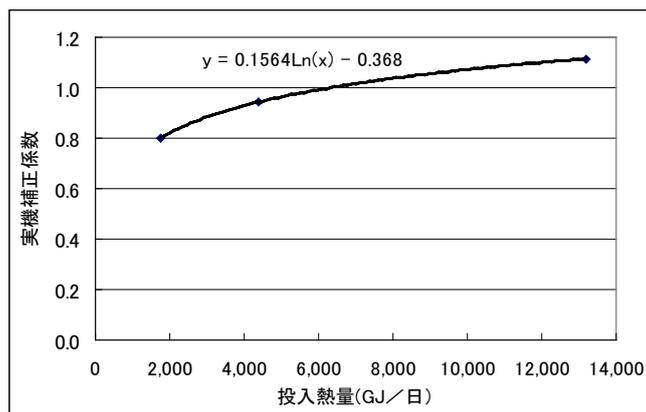


図5 日本における廃棄物発電の投入熱量と実機補正係数の関係

(3) 資源・エネルギーの地域利用モデルの作成 (サブテーマ2)

1) 廃棄物の地域利用の概要

サブテーマ1でも述べたように、一般廃棄物の焼却発電は、高くても発電効率が20数%に留まる。同様に固体燃料である石炭が、40%をやや超える発電効率で発電に利用されている状況を考えると、2倍程度の利用効率の開きが存在する。廃棄物は様々な異物や、ボイラー等を腐食する物質に富むため、エネルギー回収を効率的に行うことが困難な特性を基本的に有するが、利用先や利用方法を工夫することにより、効率の大幅な向上を目指すことが可能であると考えられる。鍵となるのは、発電のみに頼らず、地域で素材の代替、燃料代替、熱エネルギー代替などとして利用することである。特に本課題では、エネルギーとしての地域利用について中心に検討を行う。

熱利用を考える場合、(1)で述べたように、住宅や商業施設等における、冷暖房や給湯の需要では温度帯が外気温からそれほど離れていないため、外気温が氷点下を大きく下回るような日が長く続くような気候条件の地域でない限り、近年の技術水準からは、ヒートポンプを利用することでエネルギー消費を大きく抑制することが可能である。従って、焼却炉で製造した蒸気をそのまま（あるいは熱交換して）住宅、商業施設等の地域冷暖房に利用することは、焼却発電と比較して特段の優位性を持たないか、むしろ効率が低下する可能性もある（後述）。一方、産業の熱需要は、100℃を超える高温であるケースが多く、これに廃棄物を熱源として利用すれば、概ね廃棄物と熱量等価の化石燃料の消費削減に繋がるため、効率的である。

しかし、産業では使用する原料や燃料に対して品質基準があり、どのような廃棄物でも受け入れられる訳ではない。異物等が混入する一般廃棄物を産業で有効活用するには、一定のフィルター役割を果たす機能が求められる。フィルター機能には大きく分けて2つが考えられる。1つ目は、炉を腐食する塩素系の化合物や混合物や、低位発熱量の低い厨芥類等を除去するための選別プロセスを設け、発熱量の高い再生（原）燃料を製造し、これを産業で利用する方法である。その際、産業で利用されない残りの廃棄物については、廃棄物焼却・メタン発酵の複合発電施設でエネルギー回収すると効率的である。2つ目は、焼却炉で焼却し、ボイラーで蒸気を製造して、この蒸気を周辺の工場にパイプラインで供給する方法である。パイプラインの敷設が必要になるが、産業側では、蒸気温度が300℃未満で十分なケースも多いため、周辺に十分な蒸気需要が存在すれば、焼却炉ではボイラーの運転条件を緩和できるとともに、発電設備を省略できるため、焼却炉の建設・メンテナンス費用の点からは有利である。なお、産業での廃棄物の利用を進め

るには、産業側に受け入れ態勢があることも重要である。気候変動への対応のため、今後大幅な二酸化炭素の排出削減が求められているが、産業でも大幅な低炭素化を進める必要がある。住宅やオフィス等の建物では、ゼロエネルギー住宅・建物が現実のものとなり、低炭素化の道筋が見えつつあるが、産業では、省エネルギー化にも限界があり、エネルギー密度が低く、供給が安定しない太陽光や風力の利用拡大も、現状ではそれほど容易ではない。産業において、廃棄物やバイオマスの利用を拡大することが、少なくとも当面は必要になると考えられる。化石燃料と併用しながら、廃棄物やバイオマスを可能な限り利用する産業を、ハイブリッド産業と定義し (Fujii et al., 2016)⁴⁾、産業の受け入れ態勢の拡大により、廃棄物やバイオマスの社会での供給インフラが整備される正の相乗効果が得られることが期待される。ちょうど、ガソリン自動車から電気自動車への転換を、プラグインハイブリッド自動車が担う構造になぞらえることができる。

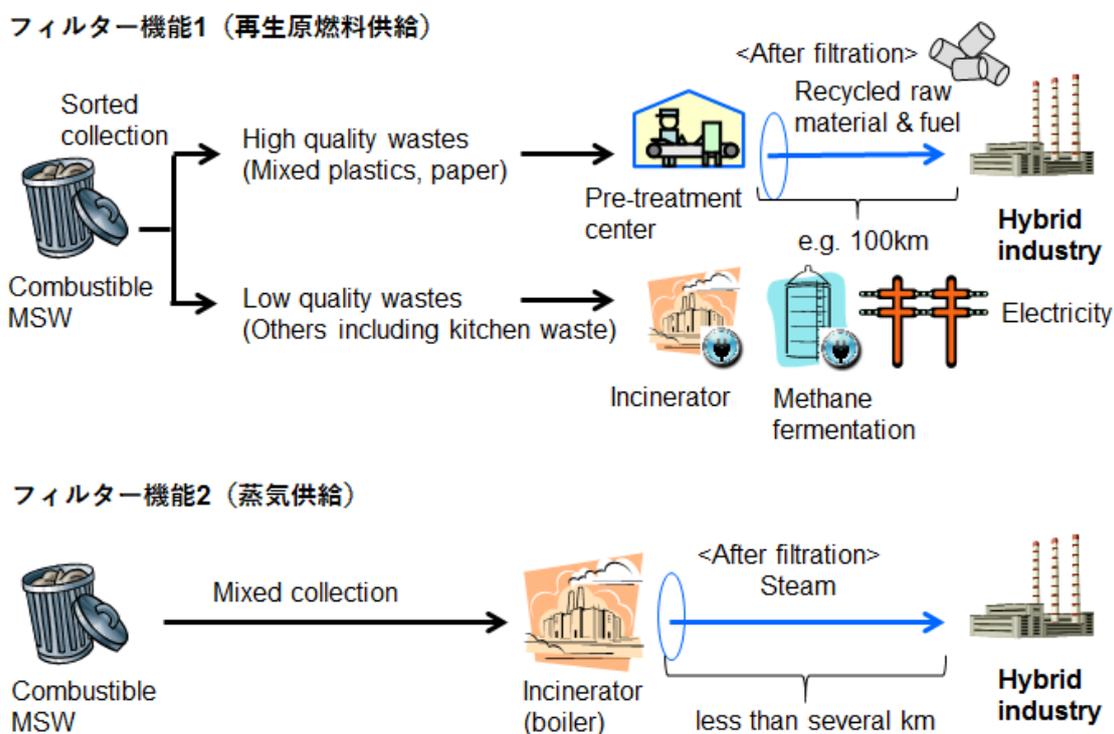


図6 廃棄物の産業利用のためのフィルター機能

本課題の採択時や中間審査等において頂いた審査コメントでも、地域利用に注力して検討を行うことが望ましいとの示唆を頂いた。特に、熱利用についてはその有効性が従来から指摘されてきたが、実態として国内ではそれほど進んでいない。そこで、どのようにすれば熱利用が進むかについて、関係者へのヒアリング、海外の事例調査等を行う共に、これらの調査で有望と考えられた、産業団地における発電所や工場等からなる熱利用のネットワークに、清掃工場を接続するケースについて、具体的な設計と評価を行った。

2) 固形燃料として産業で利用

本課題の代表者及び分担者の一部が参画した先行研究である、環境研究総合推進費補助金課題（アジア都市における日本の技術・政策を活用する資源循環システムの設計手法に関する研究、K22013、代表：松本亨）等において、スマートリサイクル（上記フィルター機能 1 に相当）と呼ぶ、マテリアルやケミカルリサイクルに向く素材はそれぞれのリサイクルでの活用を前提としつつ、残りの一般廃棄物の中から、これらのリサイクルが困難な雑多なプラスチックや紙を分別収集し、各地域（自治体や複数の自治体の単位で設置）の前処理施設で再生固形（原）燃料に成形し、輸送して産業で利用することを提案し、その効果を評価している（Fujii et al., 2016, 2014）^{4, 5)}。産業における固形原燃料の利用は、廃棄物発電と比較して 2 倍程度の化石燃料消費削減効果がある。固形であるため、ガス化等のプロセスを経ない限り、代替するものが多くの場合石炭であるため、販売価格は最大でも 10 円/kg 程度に限られ、経済的に大きな利益を得ることは難しい。しかし、産業での利用を進めることで、焼却すべき廃棄物を削減できるため、これにより焼却炉の設置数を地域で減らせるようなケースにおいては、分別収集のための費用の増加を加味しても、総費用の削減にも繋がることから、シミュレーションで示されている。前処理施設では作業員の人件費が必要となるが、廃棄物処理トン当たりの施設建設費が焼却炉に比べて安価であるため、固定費用が安くなる。このため、長期的に人口減少や 2R (Reduce, Reuse) の推進等により、廃棄物量に減少トレンドがある際にも、施設の減価償却費用を含む処理単価の上昇を抑制することができるため、スマートリサイクルはより頑健なシステムであるとも言える。

固形燃料化の最大ポテンシャルは、分別収集が全国の自治体で効率的に行われ、産業側でも幅広く再生固形燃料を受け入れ、大量に消費されている石炭等で上手く希釈する形で、塩素濃度等の影響を最小化しながら利用することができれば、日本の温室効果ガス発生量の 1%に相当する削減ポテンシャルがあり、廃棄物分野として取り得る対策の中では、非常に大きな可能性を有している。しかし、分別収集を行うことが難しい状況や、分別しても焼却炉の設置数の削減に繋がらない状況、また、産業側で再生固形燃料を広く需給調整することが難しい状況では、実現にハードルがある。そのようなケースにおいては、焼却炉でまとめて焼却して蒸気を製造し、この蒸気を近隣の工場や火力発電所で利用することができれば、化石燃料削減効果は、焼却発電と比較して大きくなることが期待される。これについて、以降に述べる。

3) 焼却廃熱の工場での利用

a. 工場への熱供給の意義

焼却炉では、400℃程度までの温度の蒸気を製造することができる。前述のように、これを最終的な熱需要温度帯が 40～50℃の住宅やオフィス等で利用することは、エネルギーの質的効率である、エクセルギー効率の観点から効率的ではない。熱の需要温度帯が高く、ヒートポンプ等の効率的な熱供給方法の選択肢が少ない、産業で蒸気を利用することで、化石燃料の代替効果を高めることができる。焼却炉から工場への蒸気供給は、韓国・蔚山工業団地などで実績がある。

廃棄物焼却施設の熱回収設備から、外部に供給できるエネルギーの形態として主に次の 4 種類がある。また、高温水としての利用も考えられるが、低圧蒸気で高温水を発生させて熱利用するため、ここでは低圧蒸気のひとつの利用形態と考え、低圧蒸気の検討に含まれるものとして扱う。現状では近隣に大規模な熱利用施設が少ないため、ほとんどは利用先の多い電力に変換している。

- i. 広い利用先のある電力
- ii. 高い熱エネルギーを有する高圧蒸気

- iii. 蒸気タービンで発電をし、中段で抽気した低圧蒸気
- iv. 熱エネルギーは低いが発電後の廃熱を有効利用して加温した温水

施設規模や地域の熱需要により効率的に利用できる廃棄物焼却施設の蒸気系統のモデルを設定する。加えて、住宅やオフィスへの熱供給を行う際に、蒸気タービン発電機による発電を優先した上で、廃熱を利用して 60℃程度の温水を回収するシステムについて検討する。

b. 蒸気系統のモデル設定

廃棄物焼却施設の熱回収設備から外部に供給できるエネルギーの形態として、高圧蒸気のままの利用、蒸気タービン抽気蒸気（低圧蒸気）の利用、温水利用があり、発電による電力利用も加えて、発電量と外部供給熱量の関係を示す。

表3 廃棄物焼却施設の熱回収設備から外部に供給できるエネルギーの形態

| NO. | エネルギーの形態 | エネルギー回収方法 |
|-----|----------|-----------------------------|
| 1 | 電力 | 廃棄物焼却の熱をボイラーで回収し、発電 |
| 2 | 高圧蒸気 | 廃棄物焼却施設のボイラー出口の高圧蒸気をそのまま利用 |
| 3 | 低圧蒸気 | 蒸気タービンで発電をし、中段で抽気 |
| 4 | 温水 | 蒸気タービン排気から 60℃または 50℃の温水を回収 |

蒸気タービン排気から 60℃の温水を回収する場合の蒸気タービン周りの蒸気流れ図と水冷コンデンサーによる温水回収フローを図7に示す。

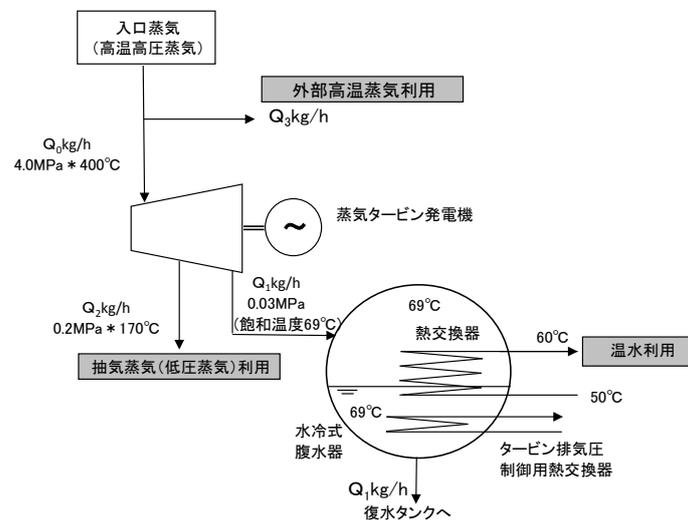


図7 蒸気タービン周りの蒸気流れ図（水冷コンデンサーによる温水回収フロー）

c. 蒸気条件

i. 廃棄物焼却施設の設定条件

- ・ 抽気量 Q_2 は、蒸気タービンの性能上、常時運転時は入口蒸気量 Q_0 の1/3
- ・ 廃棄物処理施設規模：500 t/日を想定、発生蒸気量 $Q_0=156,000\text{MJ/h}$

- ・ ごみの低位発熱量：8,786kcal/kg⁶⁾（平成24年度、全国平均）

ii. 蒸気の条件設定

- ・ 投入熱量による発電効率の実機補正係数 $=0.156 \cdot \ln(x) - 0.368$
ここで、 x =投入熱量（ごみ処理量×ごみの低位発熱量）(GJ/日)
- ・ ボイラー熱回収率：85%
- ・ 発電機効率：0.97（機械効率を含む）
- ・ 蒸気タービン排気エンタルピー h_1 は湿り度10%で計算
- ・ 供給熱量の導管での熱損失は詳細に推計することができるが、ここでは簡略化のため、どのケースも10%と仮定
- ・ 蒸気タービン入口蒸気条件を4.0MPa*400°C（発電なしは3.0MPa*300°C）とする。蒸気タービン抽気条件は0.2MPa*120°Cとする。

iii. 温水回収の条件設定

- ・ 蒸気タービン排気圧=0.03MPaの復水タービンとする。この時の蒸気温度は69°Cで、60°Cの温水を回収するために必要な温度を確保できる蒸気条件とする。
- ・ タービン排気復水器の形式は水冷コンデンサーとし、温水を一定温度で熱回収する。温水で水冷コンデンサー内の温度を一定にしてタービン背圧を制御する。水冷用の水を2系統に分け、一定温度で回収する温水の温度を優先し、実際の運転ではタービン背圧の制御用冷却器を設置する。
- ・ タービン排気復水器での熱交換は、熱回収をタービン排気の潜熱部分（タービン出口の飽和蒸気から飽和水まで熱回収）とし、飽和水から復水タンクへの戻り水温度まで冷却するのは別の熱交換器で温度コントロール用として運転する。

iv. 化石燃料の熱量換算

電力と熱を同じ指標で評価するために、熱量と電力を下記の換算係数で化石燃料の熱量に換算する。

- ・ 熱量：1.26MJ-投入熱量/MJ-回収熱量⁷⁾（ボイラー効率=79.37%に相当）
- ・ 電力：発電効率42%⁸⁾（10電力の火力発電平均、2013年度）

4) 生ごみ由来バイオガスを利用した住宅における都市ガス代替の効果の分析

焼却施設の余熱の外部利用を考える場合、近隣に需要施設があることが重要である。一方、近隣に需要施設がない場合や、現状で外部供給しており更に供給量を増やしたい場合のエネルギー供給方法を検討する必要がある。例えば、都市ガスが供給されている大都市の場合、一つの案は、熱供給の形を変えることである。例えば、生ごみと下水汚泥を混合でバイオガス化し、都市ガスに導管することで、家庭での熱需要を賄うことが可能である。そこで、ライフサイクルアセスメント(LCA)手法を用いて、神戸市において生ごみを分別し、下水汚泥との混合によるバイオガス生産およびバイオガスの都市ガス導管によるCO₂排出量、コストの削減方法を検討する。

2016年度現在において、神戸市では、生ごみを分別回収していない。また、下水汚泥のバイオガス化および都市ガス導管は、2012年度より、神戸市東南部に位置する東灘下水処理場において実証実験が行われ

ている。ここでは、2020 年度に生ごみの分別および下水汚泥との混合によるバイオガス生産を行うと仮定し、現状の生ごみを分別しない処理方法が 2020 年度まで続いた場合との比較評価を実施する。

図 8 に、本研究で対象とするごみ処理のシステム境界を示す。LCA の実施に先立ち、収集・処理に伴う運転データを収集する。神戸沖処分場以外のごみ収集・各処理施設に関するデータは、神戸市に依頼して 2011 年度の実績値を入手した。主な運転データは、電気消費量、燃料・水・薬剤等の使用量、施設の建設費、残渣発生量、発電効率等である。神戸沖処分場は、2011 年度の年次報告書等のデータを用いた。後述する下水汚泥バイオガス化施設は、施設への聞き取り調査により入手した。これらのデータを用いて、収集・各処理施設の建設段階、処理段階に関するインベントリデータを作成した。建設段階では、収集車、処理施設の減価償却費に、建設に伴う環境負荷原単位を乗じて算出した。処理段階では、電気消費量や補助燃料使用量に、電気、燃料の生産や燃焼で直接的、間接的に発生する CO₂ 排出原単位を乗じて計算した。環境負荷原単位は、MiLCA⁹⁾、3EID¹⁰⁾等のデータを用いた。また、売電に伴って、関西電力での電力生産量が減少するものと想定し、これに伴う間接的な環境負荷削減効果を評価に加えた。各処理施設間の廃棄物輸送は、地理情報システムを用いて施設間の実道路距離を割り出し、それに伴う燃料消費量に CO₂ 排出原単位を乗じて算出した。

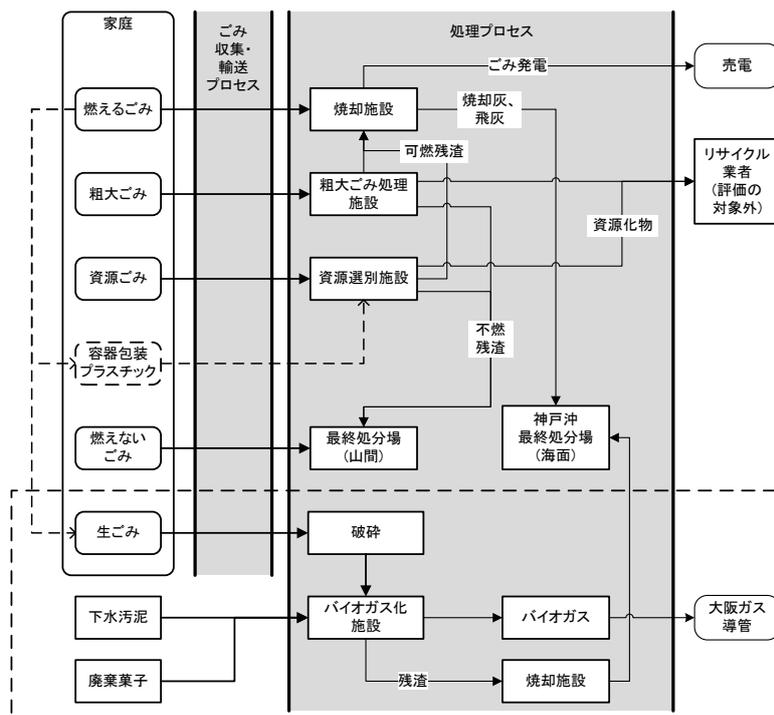


図 8 ごみ処理フロー(点線は、2020 年度の評価で追加するごみ分別とプロセス)

神戸市では 2012 年度よりプラスチック容器包装ごみの分別回収が開始されている。また、焼却施設の老朽化から、2020 年度までに 2ヶ所の焼却施設が廃止され、2016 年度末に、新たに 1ヶ所の焼却施設が建設される予定である。本研究ではこれらを踏まえ、図 8 のようにフローを拡張して、2020 年度におけるシナリオ分析を行う。なお、ごみ収集、処理に伴う環境負荷は、2011 年度と 2020 年度で変化しないと仮定する。作成したシナリオは、生ごみを分別せずに焼却する場合 (BAU シナリオ)、生ごみを分別し下水汚泥と混合してバイオガスを生産する場合 (生ごみ分別シナリオ) である。なお、東灘下水処理場への聞き取り調査によ

り、生ごみの混合投入が可能であることを確認している。生産されたバイオガスは大阪ガスに導管すると想定し、これに伴う都市ガス減少分から間接的な環境負荷削減効果を計算した。また、ごみ排出量の将来予測は、2015年度の神戸市の一人一日あたりごみ排出量は今後変化しないものと考え、これに人口の将来予測結果¹¹⁾を乗じることで推計した。

5) 地域エネルギー利用に関わるヒアリング調査

廃棄物の地域エネルギー利用について、関係する自治体、業界団体、地域熱供給事業者等にヒアリングを実施し、利用促進への期待や課題等を明らかにすることを試みた。ヒアリング対象は、下記の機関である。

- ・ 潜在的なエネルギー供給事業者（自治体）（さいたま市、北九州市、神戸市、豊橋市、印西市、秩父市、東京二十三区清掃一部事務組合）
- ・ 潜在的な熱需要事業者（工場・業界団体）（7件）
- ・ 地域熱供給事業者（4件）

これらのうち、自治体及び工場・業界団体の結果を以下に示す（一部の自治体は地域熱供給事業者に接続）。

a. 潜在的なエネルギー供給事業者（自治体）へのヒアリング

ヒアリング項目（熱供給を実施している自治体向けの例・抜粋）

- ① 熱供給の状況と年間変動（熱供給の概要、供給蒸気条件、蒸気量の変動など）
- ② 熱供給システムと主要機器の仕様
- ③ 地域熱供給事業所側からの熱供給の制約条件と課題
- ④ 廃棄物焼却施設の定期点検または突発的な故障により熱供給が停止した場合の地域熱供給事業所側の対応方法
- ⑤ 地域熱供給事業所側の熱利用先が計画的、または突発的に休止した場合の廃棄物焼却施設の対処方法
- ⑥ 地域熱供給事業所側の熱交換器の形式と腹水の返送方法
- ⑦ 熱供給量に対する概略の放散熱量の割合
- ⑧ 供給熱の単価（考え方）

b. 潜在的な熱需要事業者（工場・業界団体）へのヒアリング

ヒアリング項目（抜粋）

- ① 熱利用の現状と燃料の種類（廃棄物、再生可能エネルギーの利用割合）
- ② 外部から供給された蒸気を利用できそうなプロセスについて
- ③ 外部から熱供給を受けている事例
- ④ 外部からの熱供給の制約条件と課題、廃棄物焼却排熱の利用の可能性
- ⑤ 定期点検または突発的な故障により外部からの熱供給が停止した場合の対応方法
- ⑥ 外部からの熱供給を受ける場合の工場側に設置する熱交換器の形式と腹水の返送方法
- ⑦ 供給熱の単価の決め方

6) 全国のごみ処理施設を対象とした発電・熱生産の状況に関する調査

地域のエネルギー生産とその利用に着目したモデルを作成するための基礎的データの収集として、まず全国の焼却施設の発電・熱生産およびその利用先等に関する実態調査を行う。また、大都市と地方都市を対象として、エネルギー供給源としての焼却施設およびごみ処理事業の方向性を考察する。

日本では、2013年時点で1,179の焼却・熔融施設が稼働している。まず、環境省¹²⁾の一般廃棄物実態調査より、焼却・熔融施設別の発電・熱供給の現状把握を行う。また、最終エネルギー消費量に占めるごみ由来の発電量・熱供給量のシェアを計算する。なお、ここでは東京23区および政令指定都市に設置されている焼却施設を中心として考察を行う。次に、焼却施設の発電・熱生産および具体的な利用先を知るためのアンケート調査を実施する。アンケート調査の対象は、一部事務組合を含む1,361の地方公共団体である。質問項目は、焼却施設の処理能力、年間処理量、稼働日数、用途別(温水、蒸気(発電以外の用途)、発電)の余熱利用量、場内利用量、外部利用量と供給先、余熱利用を行ってない場合の理由等である。なお、環境省¹²⁾も余熱利用の調査は行っているが、具体的な利用先は未掲載である。調査期間は2014年10月8日～同年12月5日、回答は528件であった(回収率38.8%)。うち、回答があった焼却施設は498であった。本調査結果は、全国の年間ごみ焼却量の約46%をカバーしている。ここでは、焼却施設の処理能力、焼却施設設置地域の人口密度が、温水・蒸気の外部利用の実施状況にどのような影響を与えているかを考察する。また、温水・蒸気の外部利用を実施していない理由についても考察することで、今後の課題を抽出する。

7) 熱供給の推進に向けた検討

a. 国内の熱供給事業の現状

国内の地域熱供給事業の現状について、地域別の導入事例、熱供給事業者の登録状況、「まちづくり」の視点から見た地域熱供給事業の実施状況の観点から情報を整理する。また、地域熱供給事業における廃棄物エネルギーの導入事例についても併せて整理する。

b. 国・自治体による地域エネルギー事業への取組

国、自治体による地域エネルギー事業の推進状況と課題、並びに各課題の克服に向けた対応状況についてとりまとめる。また、熱供給システムの導入を検討するうえで、国、自治体と民間との連携が参考となる。ここでは栃木県の清原工業団地のケースを先行事例として取り上げる。さらに、焼却排熱利用の観点から見た廃棄物発電導入促進策の現状や、省エネ法に基づく未利用熱の活用促進の取組についても情報を整理する。

c. 海外における地域エネルギー事業の動向

本節では、ドイツのシュタットベルケ、イギリスの熱版FITの事例を整理し、今後の国内の自治体における地域エネルギーシステムの普及に必要な取組について検討する。

8) 地域熱供給の設計のための方法論

焼却熱を産業で大規模に利用する計画を具体化するために、蒸気供給が可能な業種の特定、必要な施設規模の推計、具体的な地域を念頭においたシステム設計の試行等を行った。

廃棄物処理施設を分散型エネルギーとして都市規模や地域条件に合わせて、地域の産業に活用した場合を想定し、エネルギー効率面から評価する。そのために、廃棄物処理施設から効率的な熱供給の可能性が

ある産業施設を抽出し、化石燃料消費量の削減等の効果を推定し、蒸気の受け入れ利用の可能性、課題を整理する。その検討手順を図9に示す。

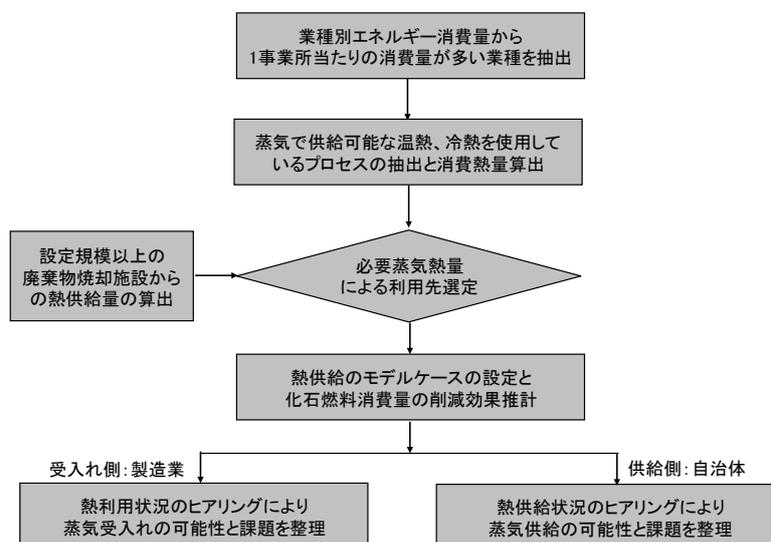


図9 焼却排熱の産業利用の検討手順

(4) 施設と収集の総合的最適化モデルの作成 (サブテーマ3)

廃棄物処理を費用面で最適化するには、施設の建設及び運転管理費と、収集・運搬、輸送費用とを合わせた、総合的な費用を考慮する必要がある。一般に、広域化（施設を大型化）するほど、単位廃棄物処理量当たりの施設建設や運転のための費用は低減するが、収集範囲が拡大するため、輸送関連の費用は増加する。これらのトレードオフを考慮できるように、施設規模別の費用情報を整備するとともに、地理情報システム（GIS）を利用した廃棄物収集・運搬モデルを構築し、愛知県を事例として、広域化のシミュレーションを実施した。

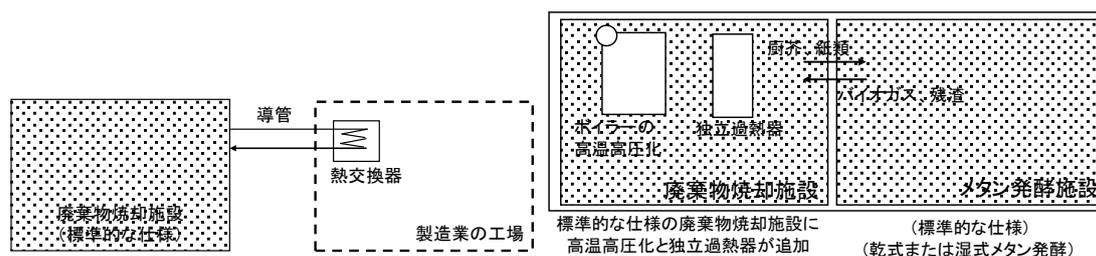
1) 施設の費用情報の基礎データ整備

廃棄物焼却施設のボイラーを高温高圧化すると発電量が増加し、売電収入が増加するが、高温高圧化のための設備費も増加する。このため、廃棄物からのエネルギー利用の費用対効果など、コスト面からの検討が必要になる。

そこで、建設費の情報を整理し、さらにメンテナンス費用、人件費（運転人員）の情報も整理した。その情報を基に、3章で設定した産業への熱供給のモデルケースの中で、抽気蒸気利用について、さらに複合発電施設の300 t/日のケースを選定し、それぞれ概算の建設費を算出した。

ベースとなる標準的な仕様の廃棄物焼却施設とメタン発酵施設の建設費を整理し、次にその他の追加となる設備のコスト情報や運転経費関連を調査する。各ケースの建設費の関係を図10に示す。

産業への熱供給では、標準的な仕様の廃棄物焼却施設の建設費に加えて、蒸気を輸送する導管や製造業側の受け入れ設備（熱交換器）の設備費が必要となる。また複合発電施設では、標準的な仕様の廃棄物焼却施設とメタン発酵施設の建設費に加えて、ボイラーの高温高圧化、独立過熱器の設置などの設備費が必要になる。



ケース 1：産業への熱供給

ケース 2：複合発電施設

図 10 各ケースの建設費の考え方

2) 広域化による焼却炉・収集運搬のシミュレーション

a. 背景と目的

持続可能な産業活動、市民生活のためには持続可能な廃棄物処理システムが必要である。我が国においては、廃棄物発生量の増加に伴う最終処分場の確保難やダイオキシン類の発生抑制対策等の高度な環境保全対策が必要となってきたことなどから、国は各都道府県に対してガイドラインに基づいた広域処理（広域化）を推進するよう通知を行った。

廃棄物処理広域化計画とは、複数の市町村が一般廃棄物の処理を共同で行うための計画である。この広域化の狙いは、①ダイオキシン削減対策、②焼却残渣の高度処理対策、③マテリアルリサイクルの推進、④サーマルリサイクルの推進、⑤最終処分場の確保対策、⑥公共事業のコスト縮減、である。

ケーススタディ地域として採り上げる愛知県は、通知を受けた平成 10 年 10 月から平成 19 年度までの 10 年間の計画期間とする「愛知県ごみ焼却広域化計画」を策定し、原則としてダイオキシン類の排出の少ない全連続式ごみ焼却施設（全連続炉）での安定的な燃焼処理を行う焼却施設を確保できるよう広域化計画を置いた。この計画では、県内を最低焼却能力 100t/日以上を基準とした 24 のブロック、また焼却能力 300t/日以上を基準とした 13 のブロックに区画割を行い、各ブロックに広域化ブロック会議を設置し、ブロックごとにおけるごみ焼却を具体的に推進する計画を策定し、300t/日以上を有する全連続炉への集約化を目指すこととした。

計画期間を満了するにあたり、市町村合併の進展により広域化ブロックと市町村区域との間に不整合が生じていることや、ごみ処理技術が進歩していること等の状況の変化を受け見直しが必要となっている。愛知県は「第 2 次愛知県ごみ焼却広域化計画」を策定し、計画を見直しながら処理を行っているところである¹³⁾。愛知県は第 2 次愛知県ごみ焼却広域化計画にて広域化地域を 13 ブロックに分割している。本研究は、こうしたブロックの広域化による処理コスト及び環境負荷（CO₂）量の変動を評価することによって持続可能な廃棄物処理の在り方を検討することを目的とする。

b. 広域化検討の手法

i. 対象地域

本研究で検討した広域化のパターンと該当ブロックを表 4、図 11～13 に示す。10 万人以下の自治体を小規模自治体、10～40 万人程度の自治体を中規模自治体、40 万人以上の自治体を大規模自治体とした。

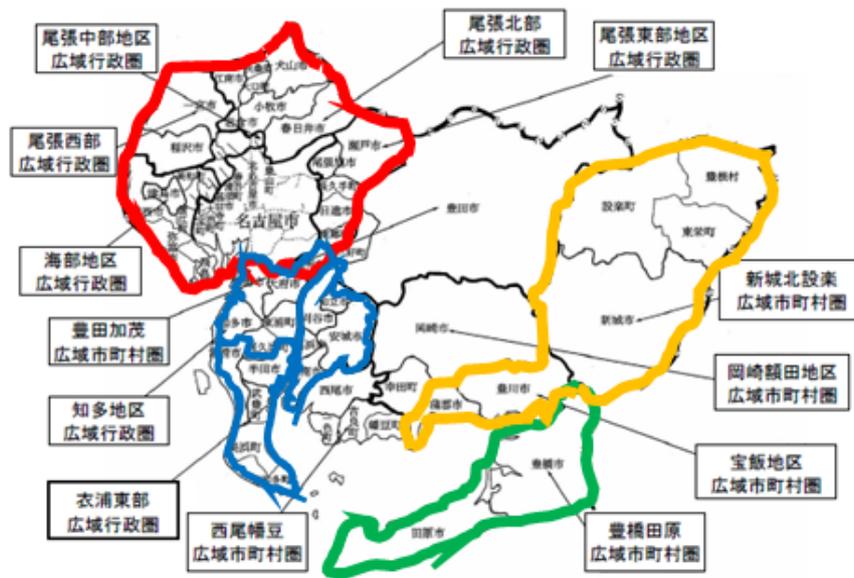


図 11 本研究で検討した広域化ブロック

表 4 本研究で検討した広域化のパターンと該当ブロック（ゴシック体が本報告書記載）

| | ブロック |
|------------------------------|----------------|
| 1) 中規模自治体と小規模自治体の 1 対 1 の広域化 | 豊橋・田原、尾張西部 |
| 2) 中規模自治体群と小規模自治体群の広域化 広面積の例 | 東三河 |
| 3) 中規模自治体群と小規模自治体群の広域化 | 尾張北部 |
| 4) 中規模自治体群と小規模自治体群の広域化 狭面積 | 知多北部、知多南部、衣浦東部 |
| 5) 大規模自治体と小規模自治体群の広域化 | 名古屋市 |
| 6) 達成済み | 春日井、海部津島 |



図 12 愛知県北部広域化 5 ブロック

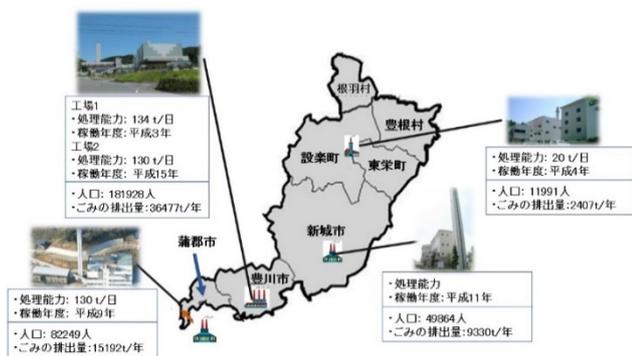


図 13 東三河ブロック

ii. 広域化シナリオ

比較対象年として基準年を2013年と置き、比較対象年を2001-2009年と2020年、2030年、2040年を置いた。廃棄物処理体制並びに廃棄物排出源単位については、各広域化ブロック及び各市町村の廃棄物処理計画書等に準じ評価を行った。2020年以降の人口データ（表5）については、人口問題研究所統計資料¹⁴⁾より引用し推計した。豊橋・田原、東三河ブロックにおいては焼却施設や中継施設の位置についていくつかのシナリオを設定した。

表5 対象都市データ 単位：人口[万人] 排出源単位[kg/人/年]
(名古屋、尾張北部、春日井、海部津島・尾張西部 他のブロックは省略)

| ブロック名 | 都市名 | 2001-2009 (広域化実施前) | | 2013 (基準年) | | 2020 | | 2030 | | 2040 | |
|-------|------|-----------------------|-----------|---------------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| | | 人口 | 排出源 単位 | 人口 | 排出源 単位 | 人口 | 排出源 単位 | 人口 | 排出源 単位 | 人口 | 排出源 単位 |
| 名古屋 | 名古屋 | 229.61 | 185.60 | 225.78 | 185.60 | 227.81 | 185.60 | 220.41 | 185.60 | 200.81 | 185.60 |
| | 北名古屋 | 8.41 | 235.06 | 8.14 | 142.65 | 8.41 | 209.51 | 8.32 | 209.51 | 8.09 | 194.18 |
| | 豊山 | 1.51 | 235.06 | 1.41 | 182.19 | 1.49 | 213.16 | 1.47 | 213.16 | 1.44 | 213.16 |
| | 清須 | 6.73 | 160.05 | 6.52 | 157.84 | 6.72 | 173.01 | 6.65 | 173.01 | 6.48 | 173.00 |
| | 甚目寺 | 4.63 | 151.56 | 5.42 | 151.56 | 4.58 | 151.56 | 4.35 | 151.56 | 4.06 | 151.56 |
| 尾張北部 | 岩倉 | 4.86 | 190.90 | 4.79 | 180.30 | 4.58 | 160.60 | 4.29 | 160.60 | 3.91 | 160.60 |
| | 小牧 | 15.34 | 167.50 | 15.33 | 162.90 | 14.42 | 157.00 | 13.67 | 153.30 | 12.64 | 153.30 |
| | 犬山 | 7.56 | 166.40 | 7.48 | 159.30 | 7.43 | 152.10 | 7.06 | 151.90 | 6.60 | 151.90 |
| | 江南 | 10.17 | 162.60 | 13.12 | 142.40 | 9.72 | 152.10 | 9.14 | 151.90 | 8.42 | 151.90 |
| | 大口 | 2.21 | 152.10 | 2.28 | 144.90 | 2.32 | 152.10 | 2.32 | 151.90 | 2.28 | 151.90 |
| | 扶桑 | 3.36 | 172.20 | 3.41 | 178.90 | 3.39 | 152.10 | 3.31 | 151.90 | 3.19 | 151.90 |
| 春日井 | 春日井 | 30.06 | 260.60 | 30.98 | 262.90 | 31.09 | 253.20 | 30.37 | 253.20 | 29.06 | 253.20 |
| 海部・津島 | 愛西 | 6.65 | 175.50 | 6.61 | 200.00 | 6.15 | 195.00 | 5.61 | 195.00 | 5.01 | 195.00 |
| | 弥富 | 4.21 | 175.50 | 4.44 | 200.00 | 4.28 | 195.00 | 4.10 | 195.00 | 3.86 | 195.00 |
| | 飛島 | 0.45 | 175.50 | 0.45 | 200.00 | 0.40 | 195.00 | 0.36 | 195.00 | 0.31 | 195.00 |
| | 津島 | 6.61 | 175.50 | 6.61 | 200.00 | 6.61 | 195.00 | 6.61 | 195.00 | 6.61 | 195.00 |
| | 蟹江 | 3.75 | 175.50 | 3.75 | 200.00 | 3.55 | 195.00 | 3.33 | 195.00 | 3.04 | 195.00 |
| | あま | 4.64 | 175.50 | 4.73 | 200.00 | 4.00 | 195.00 | 3.80 | 195.00 | 3.59 | 195.00 |
| | 大治 | 2.70 | 175.50 | 3.03 | 200.00 | 3.11 | 195.00 | 3.13 | 195.00 | 3.10 | 195.00 |
| 尾張西部 | 稲沢 | 13.69 | 217.90 | 13.87 | 211.70 | 13.15 | 177.80 | 12.26 | 171.90 | 11.18 | 171.90 |
| | 一宮 | 37.84 | 327.86 | 38.64 | 221.00 | 37.47 | 162.00 | 35.75 | 162.00 | 33.55 | 162.00 |

文献 14) を参考に作成

iii. 推計方法の概要

対象地域に対して石川¹⁵⁾のGrid City Modelを基礎モデルとしつつ、1km×1kmメッシュ地図を作成し、各メッシュに対象地域の市町村区の有する平均的な人口密度を配置した仮想都市を作成した。仮想都市内で発生する廃棄物は、収集日毎に平均的に発生するという条件で推計した。廃棄物収集・輸送時の走行距離 (L_T)、実働時間 (T_T)、燃料消費量 (F_T) などはこの仮想都市上に創りあげた格子状の座標軸上で廃棄物輸送を行う際の動き及び各メッシュ内で廃棄物収集・輸送にかかる動きを基に推計を行った (図14)。走行距離などの推計結果から、処理コスト及び環境負荷量の推計・評価を行った。

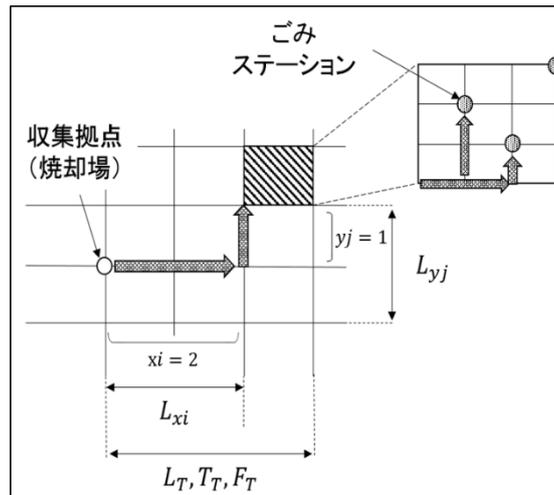


図14 廃棄物収集・運搬時の概念図¹⁵⁾

iv. 推計式

本研究では藤井ら¹⁶⁾、松藤¹⁷⁾による推計式を引用・参考にした。以下に主な推計式を示す。

可燃系一般廃棄物発生量の推計式

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{WE \times WR \times P_i}{1000} \quad \text{式 1}$$

W : 可燃系一般廃棄物発生量[t/年]

WE : 一般廃棄物排出源単位[kg/人/年]

WR : 可燃系一般廃棄物発生割合[-] P_i : i 番目メッシュの人口[人/km²]

可燃系一般廃棄物収集・運搬時の総走行距離の推計

$$L = \sum_{i=1}^n \left(F \times a \times \sqrt{\frac{P_i}{P_{sta}}} \right) + \left\{ W \times \frac{\sum_{i=1}^n 2 \times P_i \times (|x_i| + |y_i|)}{B_s + B_1} \right\} \quad \text{式 2}$$

L : 総走行距離[km/年]、 W : 可燃系一般廃棄物発生量[t/年]、 F : 廃棄物収集回数[回/年]、 x_i 、 y_i : メッシュ上座標位置[-]、 P_i : i 番目メッシュの人口[人/km²]、 B_s : 2t 収集車の実積載量[kg]、 P_{sta} : 各ごみステーションの人口[人/箇所]、 B_1 : 4t 収集車の実積載量[kg]

表 6 可燃系一般廃棄物収集・運搬に関する推計に用いたパラメーター一覧^{16), 17)}

| 項目 | 単位 | 値 |
|----------------------|---------|-------|
| 廃棄物収集回数 | 回/週 | 2 |
| ごみステーション人口 | 人 | 50 |
| 収集車作業員 | 人/台 | 2 |
| 作業員実働時間 | h/人 | 6 |
| 積み込み作業速度 | kg/sec. | 0.77 |
| ごみステーション準備時間 | sec. | 16.7 |
| ごみ積み下ろし時間 | sec./台 | 600 |
| 収集車売却年数 | 年 | 7 |
| 2t収集車重量 | kg | 3,500 |
| 2t収集車実積載量 | kg | 1,400 |
| 4t収集車重量 | kg | 6,240 |
| 4t収集車実積載量 | kg | 2,800 |
| 燃料消費率（積み込み作業時） | L/min. | 0.011 |
| 2t収集車燃料消費率（メッシュ内） | L/t/km | 0.053 |
| 2t収集車燃料消費率（メッシュ間移動時） | L/t/km | 0.040 |
| 4t収集車燃料消費率（メッシュ内） | L/t/km | 0.027 |
| 4t収集車燃料消費率（メッシュ間移動時） | L/t/km | 0.020 |
| ステーション間移動速度 | m/sec. | 2.80 |
| 焼却施設 - メッシュ間移動速度 | m/sec. | 11.11 |

可燃系一般廃棄物収集・運搬時の総燃料消費量の推計

可燃系一般廃棄物収集・運搬時の総燃料消費量は式3に示すように3つのパートに大別できる。

$$TFC = BFC + BFFC + FSFC \quad \text{式3}$$

TFC: 総燃料消費量[L/年]、*BFC*: メッシュ内収集時の燃料消費量[L/年]

BFFC: 焼却施設 - メッシュ間の往復時の燃料消費量[L/年]

FSFC: 焼却施設での積み下ろし時の燃料消費量[L/年]

可燃系一般廃棄物広域化実施時における総コスト推計

広域化実施時のコストは焼却施設の建設費や収集車の購入費等のイニシャルコストと、収集時の燃料費や人件費等のランニングコストに大別できる。ただし用地の費用については、各広域化ブロックの一般廃棄物処理計画書に準じて各市町村が保有している用地を使用すると前提条件を置いたため、考慮していない。

$$TC = PE + VE + FE + CM + CR \quad \text{式4}$$

TC : 総コスト[百万円/年]、 FE : 収集車燃料費[百万円/年]、 PE : 人件費[百万円/年]、 CM : 焼却施設補修費[百万円/年]、 VE : 収集車購入費[百万円/年]、 CR : 焼却施設運転費[百万円/年]

$$PE = PE_C + PE_{INC} \quad \text{式 5}$$

PE : 人件費[百万円/年]、 PE_C : 収集車人件費[百万円/年]、 PE_{INC} : 焼却時人件費[百万円/年]

可燃系一般廃棄物広域化実施時における総 CO₂ 排出量推計

広域化実施時に発生する CO₂ は廃棄物の収集・運搬に起因して発生するものと焼却施設の運転に起因するものが挙げられる。さらに焼却施設運転に起因するものは、廃棄物の焼却によって直接発生するものと、施設の補修等により間接的に発生するものに分けられる。

$$TCO_2 = VRCO_2 + ICO_2 + FRCO_2 \quad \text{式 6}$$

TCO_2 : 総 CO₂ 排出量[t-CO₂/年]、 $VRCO_2$: 収集車走行時 CO₂ 排出量[t-CO₂/年]、 ICO_2 : 焼却施設補修時 CO₂ 排出量[t-CO₂/年]、 $FRCO_2$: 焼却施設運転時 CO₂ 排出量[t-CO₂/年]

(5) 長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言 (サブテーマ 4)

1) 検討の概要

少子高齢化による人口や年齢構成の変化、今後の 3R の進展の可能性等を踏まえた上で、無駄な投資を極力少なくしつつ、廃棄物の高効率な資源・エネルギー回収方法を計画し、導入する必要がある。前章までに、廃棄物の持つエネルギーの産業での高効率利用や、それが難しい地域条件下における、焼却・メタン発酵の複合発電施設の計画、効果の評価方法の構築や、特に熱の利用促進に関する制度や政策面での課題の整理を実施してきた。ここでは、高齢化が分別収集に与える影響について検討した結果と、本研究課題の成果を活用しつつ構築した効率的な対策を推薦するシミュレーションツールについて述べる。シミュレーションツールは、簡単に利用できるよう、極力シンプルな構造となるようにした。加えて、自治体の担当者等が参照し、対策案として検討できるよう、効果的な対策の事例集を作成しており、その例示を行う。

2) 高齢化社会のさらなる進展がごみ分別および再資源化に与える影響の分析

わが国の高齢化率は緩やかに上昇し続けており、2014 年の 26.0%から、2060 年には 39.9%まで増加すると予想されている。この問題は医療・介護だけでなく、自治体のごみ処理施策にも影響を及ぼす可能性がある。高齢者は、認知機能や体力の衰えにより、煩雑なごみ分別等の日常行動が十分に行えないケースが指摘されている。超高齢社会の進展により分別が十分でないごみが増加することで、自治体のリサイクル計画に影響が及ぶ可能性がある。現在は、自治体はごみ出し、ごみ分別に関する各種支援事業を実施することで、問題を対処している。しかし、自治体の支援事業は、職員やボランティアのようなマンパワーを使って対処するいわゆるエンドオブパイプ的な対策である。今後、さらに高齢化が進展し、支援を要する高齢者が増加することで、現在の支援事業を維持することが難しくなる可能性がある。また、高齢者の増加により排出されるごみの量や質の変化が予測される。WHO[®]は、現状にのみ対応した、時代遅れの社会モデルにもとづいた政策立案をすべきではないと指摘している。将来のごみの量、質の変化に対応した、廃棄物処理システムのあり方について検討することが必要である。LCA やライフサイクルコスト(LCC)のような各手法を用いて廃棄物処理システムの構築方法を検討する際、その出発点は家庭におけるごみ分別お

びごみ出しである。高齢化の進展により紙おむつや医療系ごみ等の排出量の増加が予想されるが、これらはごみ量の増加を引き起こし、輸送や処理・リサイクルに伴う環境負荷・コストの増加に繋がる。また、複雑なごみ分別に対応できない高齢者が増えることで、分別が十分でないごみ出しも増加する可能性がある。これが引き金となることで、自治体が行政サービスとして行っているごみ処理施策を、将来、現行の状態が続けることが難しくなる可能性がある。なぜならば、住民関与によるごみ分別や分別のための洗浄等といった行動は、自治体が行っているごみ処理の出発点となっているためである。言い換えると、住民は皆「ボランティア」となって、規範意識のもとで分別を行っているといえる。これがわが国のごみ処理やリサイクルの仕組みを支えているといっても過言ではない。しかし、高齢者人口の増加によりごみ分別が十分にできない住民が多くなることで、住民の分別に依存した自治体のごみ処理施策を大きく変更せざるをえない可能性がある。これは結果として、再資源化量の減少や焼却に伴うCO₂排出量の増加に効いてくる可能性がある。そこで、容器包装プラスチック(以下、容リプラ)の分別を事例として、高齢者を含む年齢階級別でのごみ分別割合と洗浄度合の現状調査を行う。また、2035年までのごみ分別割合の将来変化とごみ処理に伴うCO₂排出量との関係を分析する。

研究の対象地域は神戸市とし、本市に居住する住民に対して、容リプラの分別に関する Web アンケート調査を行った。質問は、デモグラフィック属性(性別、世帯数、年収など)と本質問である。本質問では、容リプラの種類別での資源ごみへの分別頻度(5段階)、ごみ分別・ごみ出しを行う主体(本人、その他家族、ボランティアなど)である。容リプラは、環境省¹⁹⁾に基づき、6種類(表7)に分類した。アンケート調査は以下に示すように、2回に分けて実施した。

- ・1回目：2015年11月16日～同月24日・・・対象年齢：20～69歳、回収サンプル数：1,242
- ・2回目：2016年6月14日～同月17日・・・対象年齢：70歳以上、回収サンプル数：413

但し、2回目は、神戸市のみではモニター数が極めて少なかったため、神戸市から近く、本市と同様に容リプラの分別収集をしている大阪市に居住する住民に対しても同じ調査を行った。

表7 容リプラの種類と組成割合

| 容リプラの種類 | 組成割合 |
|-------------------------------------|------|
| ①パック・カップ・弁当容器 | 34% |
| プリン、ヨーグルト、アイス等のカップ | |
| 弁当、豆腐、納豆、マーガリン等の容器 | |
| 卵、果物等のパック | |
| ハム、ソーセージ、レトルト食品等のパック | |
| ②商品の袋・包装(アルミなし) | 27% |
| 菓子、カップ麺等の外装フィルム | |
| 衣料品、日用品、詰め替え用洗剤等の袋 | |
| ペットボトルのラベル | |
| ③PET以外のプラスチックボトル | 17% |
| 食用油、ソース、ドレッシング、乳酸飲料等食品のボトル | |
| 洗剤、漂白剤、シャンプー、リンス、カー用品、薬、化粧品等日用品のボトル | |
| ④販売店のレジ袋 | 9% |
| レジ袋 | |
| ⑤複合アルミ箔 | 8% |
| チョコレート、ガム、アイス、バター、レトルト食品等食品の銀色部分 | |
| 石鹸、洗剤、シャンプー等日用品の銀色部分 | |
| ⑥販売店の袋・包装 | 5% |
| 生鮮食品、弁当等を包んでいるラップ | |
| パン、菓子、野菜等の袋 | |

資源ごみへの分別頻度に関する質問では、容リプラの種類別に、燃えるごみではなく資源ごみに入れていくかどうかを、5段階(いつも入れる(100%)、殆ど入れる(75%)、たまに入れる(50%)、殆ど入れない(25%)、全く入れない(0%))でたずねた。アンケート調査で得られた分別頻度の結果について、「いつも入れる」場合は分別頻度を100%、「全く入れない」は0%と仮定し、上記の回答結果を25%刻みの順序尺度に置き換えた。分別、「全く入れない」の場合は0%分別(即ち、燃えるごみに入れる)とし、その間の回答を25%刻みで増減させた。続いて、容リプラを可燃ごみ袋ではなく資源ごみ袋に入れる割合を分別割合と定義し、式7から分別割合を算出した。本結果を用いることで、年齢階級・生活様式別で、容リプラ全体の分別動向がどのように変化するかを定量的に把握することが可能である。

$$s = \sum_{i=1} (\alpha_i \times w_i) \quad \text{式7}$$

但し、 s : 分別割合、 α_i : 容リプラ i の分別頻度(0%, 25%, 50%, 75%, 100%)、 w_i : 容リプラ i の種類別組成割合、 i : 容リプラの種類(1~6)。

続いて、世帯数の将来変化に伴う分別割合の変化を推計するとともに、これが神戸市のごみ処理に与えるCO₂排出量の観点から試算する。ここでは、国立社会保障・人口問題研究所^{20),21)}による将来人口と世帯主年齢別世帯数の推計結果をもとに、2015年~2035年までの神戸市の世帯数の変化に伴う分別割合の変化度合いを、式8から推計した。なお、アンケート調査結果をもとに、単身世帯と複数世帯別での世帯主年齢階級の分別割合を整理した。現時点の世帯主年齢階級の分別割合は、将来も変化しないと仮定した。

$$s = \sum_{f=1} \sum_{y=1} (H_{fy}^j \times S_{fy}^j) / \sum_{f=1} \sum_{y=1} H_{fy}^j \quad \text{式8}$$

但し、 S_{fy}^j : 神戸市における j 年の分別割合、 H_{fy}^j : j 年の単身・複数世帯別世帯主年齢別の世帯数、 s_{fy}^j : j 年の単身・複数世帯別世帯主年齢別の分別割合、 j : 年、 f : 単身・複数世帯(単身:1、複数:2)、 y : 世帯主年齢の年齢階級(20~24:1、25~29:2、30~34:3、35~39:4、40~44:5、45~49:6、50~54:7、55~59:8、60~64:9、65~69:10、70~74:11、75~79:12、80~84:13、85~89:14、90~94:15)。

容リプラが可燃ごみから分別されることで、ごみ焼却量が削減され、それに伴い焼却に由来するCO₂排出量が削減されると想定し、分別割合が焼却由来のCO₂排出におよぼす影響を評価する。神戸市では、2014年度時点における一人一日あたりごみ排出量は996gである²²⁾。また、神戸市全体での可燃ごみの排出量は263,600t、容リプラの収集量は7,900tである²²⁾。一人一日あたりごみ排出量は将来に渡り変化しないと仮定し、これらのデータに本市の将来人口推計結果を乗じることで、2035年までの可燃ごみ排出量および容リプラ収集量を推計した(図15)。また、アンケート調査結果により得られた神戸市の分別割合の数値と容リプラの収集量を対応させることで、分別割合が変化することによる容リプラ収集量の変化量をみる。即ち、分別割合が減ることは、分別収集されるはずだった容リプラは可燃ごみに投入され、容リプラ収集量が減り、可燃ごみ排出量が増えることを意味している。その逆もまた然りである。可燃ごみ排出量に焼却時のCO₂排出原単位、容リプラ収集量プラに資源回収時のCO₂排出原単位をそれぞれ乗じることで、焼却および資源化に伴うCO₂排出量を算出することができる。焼却と資源化でのCO₂排出量のバランスをみることで、分別割合がごみ処理に与える影響を分析することができる。なお、焼却時、資源回収時のCO₂排出原単位は、Tabata et al.²³⁾が作成した原単位(0.91[t-CO₂/kg]、0.079[t-CO₂/kg])を使用した。

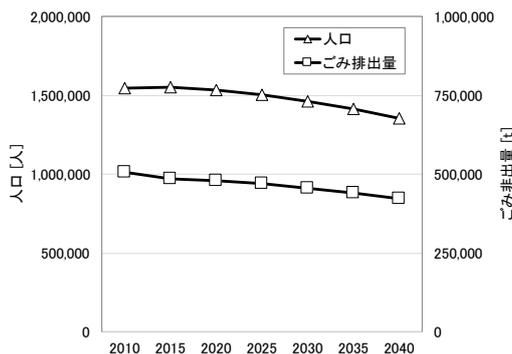


図 15 神戸市における人口とごみ排出量の将来変化

3) 廃棄物のエネルギー回収の高度化のためのシミュレーションツール

政策担当者等が、地域条件等に合わせて効率的なエネルギー回収のオプションを検討するため、極力簡易な構造で評価するツールを試作した。本ツールでは、廃棄物処理方式とエネルギー回収の面から、地域条件に従い、適切な廃棄物処理システムを提案するとともに、幾つかの都市条件を入力し、事例集を参照することで、現在および将来の廃棄物処理計画作成を支援するものである。図 16 は本シミュレーションの概要を表したものである。

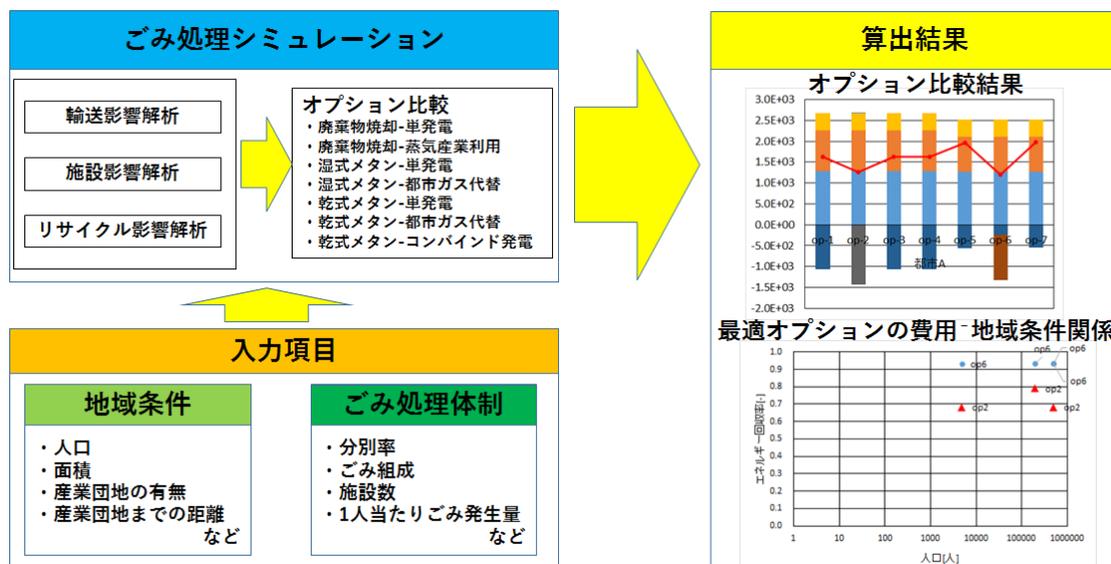


図 16 シミュレーションの概要

本シミュレーションでは各対象地の特性に合わせて、処理方法としてごみ焼却、メタン発酵を、リサイクル方法として単発電、蒸気産業利用、都市ガス代替、コンバインド発電を対象とした廃棄物処理システムの方式(以後、オプション)を対象に、事業コスト及びエネルギー回収効率から比較することで妥当な廃棄物処理システムを提案するものである。

また、施設についての評価だけでなく、対象地で発生する廃棄物の回収に伴う影響についても評価を行う。対象地が円状に存在、均一な人口分布となると仮定し、その中心に施設が立地するとした場合のごみ

収集・運搬の影響評価を行った。施設が 2 つ以上になる場合には面積を施設数で分割し、同様に円状に広がる施設数分の範囲を回収すると仮定した。

そのほか、蒸気利用可能な距離を最長で 5km とし、この距離内の蒸気量可能な工場の事業所数に従って利用可能量が決まるものとした。また、輸送時の損失を考慮して、蒸気生産量の最大 80% を使用可能と仮定した。加えて、乾燥メタン発酵から発生する残渣の量を処理量の 20%、乾燥に必要な蒸気量を 5,000MJ/t と仮定した。

表 8 は本モデルの入力項目、対象とする廃棄物処理システムのオプション、評価項目を記載したものである。

表 8 開発モデルの入力項目、対象オプション、評価項目

| | | | | |
|----------------|------------------------------|------------------|---------|------------------------|
| 入力項目 | 人口 | | 対象オプション | 1. 廃棄物焼却-単発電オプション |
| | 面積 | | | 2. 廃棄物焼却-蒸気産業利用オプション |
| | 施設数 | | | 3. 湿式メタン-単発電オプション |
| | 5km 以内の蒸気 利用可能な事 業所数 | パルプ・紙・紙加工品 | | 4. 湿式メタン-都市ガス代替オプション |
| | | 化学工業(無機化学) | | 5. 乾式メタン-単発電オプション |
| | | 化学工業(有機化学) | | 6. 乾式メタン-都市ガス代替オプション |
| | | 化学工業(医薬品) | | 7. 乾式メタン-コンバインド発電オプション |
| | 分別率 | ゴム製品 | 評価項目 | 費用便益 |
| | | 窯業・土石製品(ガラス・同製品) | | 純費用 |
| | | 厨芥 | | エネルギー回収効率 |
| | 組成 | 紙 | | |
| | | プラスチック | | |
| | | 厨芥 | | |
| | | 紙 | | |
| | 1km ² 当たりのステーション数 | | | |
| 廃棄物発生量 | | | | |
| 収集トラック 1 台の積載量 | | | | |

本シミュレーションは Microsoft Excel で作成し、入力項目を記入することで対象オプションごとの計算を行い、評価項目を自動で算出する。各オプションについてはシートを分けて計算を行い、各オプション中で計算される発電量などの重要な要素についても確認できるものを開発した。

また、計算された結果に応じて、純費用及びエネルギー回収効率を自動でプロットしたグラフを提示し、純費用もしくはエネルギー回収効率から各入力に対して最も妥当と考えられるオプションを提示するシステムも開発した。

計算の詳細については、計算仕様書を本報告書とは別途作成し、計算に使用される原単位、内部計算の詳細及び、結果の提示形式等を確認できるものとした。

本課題では上述のシミュレーションを開発し、人口、面積、産業団地までの平均距離、分別率の異なる仮定の 270 都市を対象にシミュレーションを行った。表 9 は仮想都市で変更される入力項目を示したもので、表 10 は変更のない入力項目である。

表9 仮想都市で変更される入力項目

| 項目 | 区分 |
|-----|---|
| 人口 | 100万(政令都市相当)、30万(中核都市相当)、5万(市相当)、2万(町相当)、5千(村相当) |
| 面積 | 1,000km ² (大)、100km ² (中)、20km ² (小) |
| 工場数 | 各10か所、各1か所、なし |
| 分別率 | 厨芥：0%、50% |
| | プラ&紙：0%、40%、80% |

表10 仮想都市で変更されない入力項目

| 項目 | 区分 | |
|------------------------------|---------------------|-------|
| 施設数 | 1基 | |
| 組成 | 厨芥 | 48.5% |
| | 紙 | 30.5% |
| | プラスチック | 12.2% |
| | その他 | 8.8% |
| 1km ² 当たりのステーション数 | 5箇所/km ² | |
| 廃棄物発生量 | 266kg/人/年 | |
| 収集トラック1台の積載量 | 2t | |

4) 費用対効果の高いエネルギー回収の事例集

効果の高いエネルギー回収の事例について、地域特性や事業の推進体制などの観点から、とりまとめを行った。

5) 大幅な低炭素化の推進と、将来の人口変化に備えた政策提言

本研究課題全体の成果を踏まえ、パリ協定における合意の履行や、持続可能な社会の構築の観点からも重要となる、大幅な低炭素化の推進と、国内において重要な社会問題である、将来の人口変化に備えた廃棄物処理とエネルギー回収の高度化の方針について考察する。

4. 結果及び考察

(1) 廃棄物からの資源・エネルギー回収の高度化に向けた技術指針（全サブテーマ共通）

1) 資源の LCA という視点

廃棄物、再生可能資源の効率的な利用を促進し、環境負荷削減効果を高めるための指針を示すことが本論文の目的であるが、そのためには、ある工場や地域などの単位の部分的な最適ではなく、社会全体（究極的には地球全体）の最適化に繋がる廃棄物利用の用途を評価できる、新たな評価方法が求められる。従来の LCA は、製品の製造時の資源消費や環境負荷を積み上げ法や産業連関法で算定、あるいは推計して求めるものであった。ある製品やエネルギー供給サービスのライフサイクルでの環境負荷を削減するには、気候変動緩和への対応においては、未利用の循環可能資源やバイオマスを活用することや、使用する燃料を石炭から天然ガスへ切り替えることが有効である。しかし、特に供給量がかぎられている循環資源や、持続可能な形で供給量の限られているバイオマスでは、ある製品やサービスの製造にそれらを使用することが、それらの製品の環境負荷の削減にとって有効であっても、社会全体で見た場合にはより環境負荷の削減効果の高い用途が存在する可能性がある。従って、製品やサービスではなく資源に着目し、その資源が有効利用されているかを評価する、資源の LCA という観点が重要になると考えられる。単位量の資源が、そのライフサイクルにおいてどれだけの機能を提供できるかを比較、評価する視点である。

理想的には、社会で求められる機能（製品やサービス）と、それらを製造するための資源（天然資源や循環資源、再生可能資源）のあらゆる組み合わせを考慮し、供給量の制限や、温室効果ガスの排出量の制約などからくる消費可能量の制限を考慮した上で、環境負荷の削減に繋がる、機能と資源の最適な組み合わせを見つけることが求められる。しかし、あらゆる組み合わせを考慮するには多くのデータや作業を要するため、実用的には困難である。そこで、代表的な機能を提供するケースをベンチマークとして、資源間の相対的な性能の大小を比較することで、より相応しい用途に資源が利用されることを推進するための判断材料とする。

化石燃料の使われ方として主要なものは、発電、輸送や動力、熱供給、化学原料などである。このうち火力発電においては、石炭、石油と、ガスとの間に発電効率の差が顕著であり、石炭・石油では40%をやや超える程度、ガスでは60%近い値となっている（高位発熱量基準）。エネルギーの質を表す指標として、エクセルギーがあり、エクセルギー率100%が最高効率で、この場合エネルギーの100%を仕事に変換できる。電気のエクセルギー率は100%であるため、発電効率の差は、そのままエクセルギー効率の差でもある。一方、蒸気などの熱供給においては、ボイラーなど直接燃料を燃焼する方式であれば、燃料間で大きな熱効率の差はない。需要される温度帯によって、エクセルギー効率は大きく異なることになるが、電力は燃料の単位消費量に対してより多く（つまり、高いエクセルギー効率で）生産できるほど優れているのに対し、熱の場合は用途によって求められる温度帯が異なり、需要に見合わない高温を供給しても意味はない。利用温度が高温で、エクセルギー率が高いほど優れているという評価には必ずしもならない。発電と熱供給を組み合わせるコージェネレーションにより、エクセルギー効率の改善が可能だが、その際の高エクセルギー化に重要なのは、まず高い燃焼温度で発電することであり、結果的に発電効率の違いが重要となる。一方、輸送機械の燃料は石油とガスに概ね限られるが、電気自動車の普及とともに、発電を介して石炭を利用する機会も増えており、燃費性能はガソリンハイブリッド自動車と火力発電から供給される電力を利用する電気自動車に大きな差はない。モーターを動力に利用するケースを含め、発電効率の差が重要となってくる。また本論文ではエネルギー回収を対象とするため、化学原料としての利用は扱わないが、化石燃

料の用途の中では限定的である。これらを考慮すると、社会において化石燃料の利用効率の差を生じさせる代表的な機能として、発電を考えるのが合理的であることが分かる。

化石燃料がそのライフサイクルで提供できる機能を最大化する観点で、エクセルギー効率の低い低温の熱需要に対しては、品質の劣る廃棄物やバイオマスを積極的に活用し、消費が回避された化石燃料は、エクセルギー効率の高い用途に利用することが望ましい。また、価格は安い CO₂ 排出強度の大きい石炭と、その反対の特性を持つガスの特性から、経済的要因等で今後も一定割合で天然ガス、石炭を利用すれば、発電には天然ガスを優先的に利用し、熱のみが必要なプロセスには石炭を優先して用いる資源の配分が、限られた化石燃料消費から、得られる電力量を最大化する観点では重要である。図 17 に示すように、ケース 1 では廃棄物は発電に利用され、天然ガスの一部が熱の製造に利用されているが、ケース 2 において廃棄物の焼却熱を熱として利用することで、石炭がより高温の熱の製造、天然ガスが高効率発電に利用され、順次より適切な用途に利用することができるようになることで、各資源のライフサイクルで提供できる機能が変化し、重要な機能である発電量が大きく増加することになる。このように、資源の特性に合わせた利用方法を行うことが、各資源のライフサイクルにおける機能提供量を、社会全体で最大化する観点で非常に重要であり、資源のライフサイクルという視点でシステムを設計、評価することが重要であることが分かる。

| Life cycle of resources | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------|----|----|---------|---------|----------------|-----------------------|----|----|------------|----|----|
| Case 1 | Material | | | Heat | | Electricity | Waste | | | Pollutants | | |
| | M1 | M2 | M3 | L-Temp. | H-Temp. | | W1 | W2 | W3 | P1 | P2 | P3 |
| NG (1GJ) | | | | | 0.40 GJ | 0.30 GJ | | | | | | |
| Coal (1GJ) | | | | 0.80 GJ | | | Omitted in this paper | | | | | |
| Waste (1GJ) | | | | | | 0.20 GJ | | | | | | |
| Total | | | | 0.80 GJ | 0.40 GJ | 0.50 GJ | | | | | | |
| Case 2 | Material | | | Heat | | Electricity | Waste | | | Pollutants | | |
| | M1 | M2 | M3 | L-Temp. | H-Temp. | | W1 | W2 | W3 | P1 | P2 | P3 |
| NG (1GJ) | | | | | | 0.60 GJ | | | | | | |
| Coal (1GJ) | | | | | 0.40 GJ | 0.20 GJ | Omitted in this paper | | | | | |
| Waste (1GJ) | | | | 0.80 GJ | | | | | | | | |
| Total | | | | 0.80 GJ | 0.40 GJ | 0.80 GJ | | | | | | |

図 17 資源のライフサイクル分析の枠組み (例)

2) アップグレード利用

エネルギー回収における効率向上においては、エネルギーの量的な効率（回収効率）を高めることに加えて、質的な効率向上が重要である。エネルギーの量的効率は高くても質的効率が劣る典型例は石油ヒーターで暖房を行う場合で、石油の燃焼熱は、ほとんどロスなく室内の空気を加熱できるため、エネルギーの量的効率は 100%に近いが、エクセルギー率の高い石油（98%程度）を、20 度の空気の熱に変えてしまう

と、エクセルギー率はわずかに 3% (外気温 0 度の場合) ほどとなってしまう、大きなエクセルギーロスが生じる。暖房であれば、火力発電で発電し (コンバインドサイクルで、送電ロスを含めた総合的なエクセルギー率 50%)、その電力で成績係数 6 のヒートポンプを駆動すれば、エクセルギー率は 10% 程度になり、3 倍程度改善される。

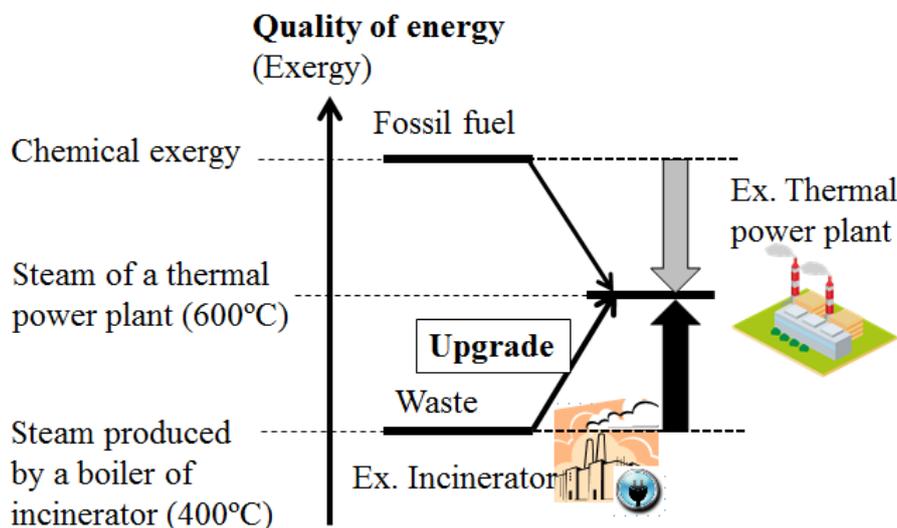


図 18 廃棄物・バイオマスのアップグレード利用の概念図

化石燃料自体は、エクセルギー率の高い化合物であるが、実際にそれが利用される場面では、そのエクセルギー率が十分には活かされていない。例えば火力発電であれば、蒸気タービンの温度を高くするほど発電効率を高くすることができるが、高温・高圧に耐えられる機械的構造を用意することが難しいため、限定的な温度条件で運転され、高温のガスタービンを併用するコンバインドサイクルのガス火力でも発電効率はせいぜい 60% 未満程度であり、エクセルギーの 40% 近くを失っている。蒸気タービンのみを利用する石炭火力では、発電効率は 40% 程度に留まる。いずれの場合も意図的に温度を抑制して運転している状況のため、化石燃料は余力のある状態で燃焼されていることになる。従って、廃棄物やバイオマス化石燃料と混焼、あるいは、焼却炉で製造した蒸気を火力発電所のボイラー給水等の予備加熱に利用するなどして、化石燃料を一部廃棄物やバイオマスに置き換えることで、その消費量を抑制しても、化石燃料のみを利用していた場合と同等の温度、圧力に到達させることができる。結果的に、品質面や安定供給の面で劣る廃棄物、バイオマスが、化石燃料と同等の条件で利用されることとなり、それらが単独で利用された場合と比較して、エクセルギーの観点でアップグレードされた状態で利用することが可能となる (図 18)。廃棄物やバイオマスがアップグレード利用により高効率で利用されれば、結果的に高い CO₂ 削減効果が期待できる

廃棄物、バイオマスのアップグレード利用は、既に数多くの省エネルギー技術が導入済みである先進国の工場や、省エネルギーだけでは CO₂ 削減に限界のある、産業の低炭素化を更に進めるための、産業の使用原燃料の複合化、つまりハイブリッドインダストリー構築の推進にとっても重要である。しかし、産業における化石燃料利用は、必ずしもエクセルギー効率の観点で絶対的に効率的であるとは限らない。焼却炉では 300~400 度程度の蒸気を製造することができる。火力発電所の蒸気条件はこれより高温であるが、工場における反応、蒸留、乾燥などの工程で必要とする温度は 300 度未満である場合も多い。これらの工程に焼却炉で製造した蒸気を利用した場合、直接的にはエクセルギー率が低下することになる。しかし、100

度を超える温度帯については、低温域でヒートポンプの導入が試みられているものの、外気温との温度差が大きいため、効率はそれほど高くない。化石燃料を燃焼して、低いエクセルギー率で熱を得ているのが現状である。これを廃棄物、バイオマスから回収した熱で代替した場合、化石燃料の消費を抑制することができ、代替された化石燃料は、例えばガスであれば、高効率のガス火力発電所で利用することで、そのエクセルギー率が高まることになる。廃棄物、バイオマスから回収した熱の産業での利用は、直接的にはアップグレードにはならなくても、代替された化石燃料が高効率利用されることを通して、間接的なアップグレード利用が可能である（図 19）。

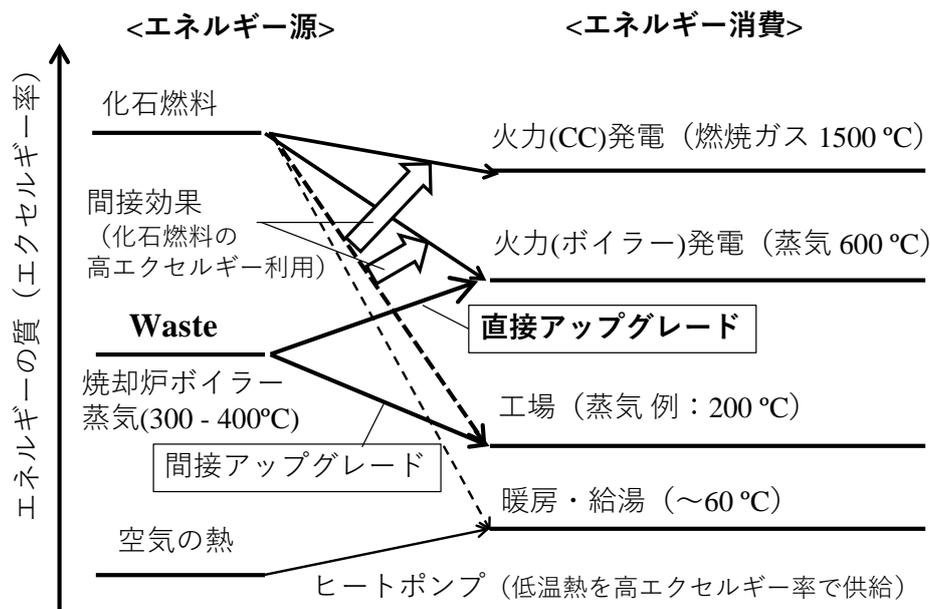


図 19 廃棄物・バイオマスの直接・間接アップグレード利用

廃棄物・バイオマスのアップグレード利用は、それぞれの単位投入量当たり提供可能な機能量の拡大に資するため有効である。資源の LCA の観点からは、資源のライフサイクルにおける非効率な利用が解消されることにより、社会全体としてエクセルギー効率が高まることになる。

本課題では、このような技術選択の方針を立てた上で、資源・エネルギー回収を高度化し、経済的な側面も考慮して、大きな費用対効果が得られる方策を提案し、その効果を分析するとともに、普及のための方策を検討している。

(2) 複合発電施設のプロセス設計とモデル化（サブテーマ 1）

1) 処理規模を変化させた場合の発電量の試算

a. 処理規模に対する依存性

乾式メタン発酵施設のスケールアップは海外の実用施設から最大 100 t/日程度²⁴⁾（受入れごみ量基準で 220 t/日）とされていることから、試算規模はその 2 倍程度までとし、下記に示す 4 ケースについてバイオガス発生量を算出し、発電量、売電量を試算する。

- ・ 試算規模（受入れごみ量）： 200 t/日、300 t/日、400 t/日、500 t/日

試算結果を表 11 に示す。また、この結果を図 20 に示し、施設規模と発電量、売電量の関係を近似式として示す。ごみ焼却量が増加すると発電量、売電量も増加する。

表 11 処理規模を変化させた場合の発電量の試算結果

| 規模 受入れ量 t/日 | メタン発酵 方式 | メタンガス量 | 発酵槽 | 脱水残渣量 ²⁾ | ごみ焼却炉 | ごみ焼却炉 | 蒸気条件 | 発電量 | 消費電力 | 売電量 |
|-------------------|------------------|------------------------------|--------------|---------------------|--------------|------------------|--------------------|--------|-------|-------|
| | | 100%換算 Nm ³ /日 | 投入ごみ量 t/日 | t/日 | 投入ごみ量 t/日 | ごみ低位発熱量 kJ/kg | | | | |
| 200 | 乾式 | 8,550 | 90 | 90 | 200 | 7,943 | 6.18MPa 飽和蒸気 | 3,533 | 2,082 | 1,451 |
| | | | | | | | 10MPa*331℃ 過熱蒸気 | 3,731 | 2,082 | 1,649 |
| 300 | 乾式 | 12,825 | 135 | 135 | 300 | 7,943 | 6.18MPa 飽和蒸気 | 5,728 | 2,824 | 2,904 |
| | | | | | | | 10MPa*331℃ 過熱蒸気 | 6,049 | 2,824 | 3,225 |
| 400 | 乾式 | 17,100 | 180 | 180 | 400 | 7,943 | 6.18MPa 飽和蒸気 | 8,042 | 3,511 | 4,531 |
| | | | | | | | 10MPa*331℃ 過熱蒸気 | 8,493 | 3,511 | 4,982 |
| 500 | 乾式 | 21,375 | 225 | 225 | 500 | 7,943 | 6.18MPa 飽和蒸気 | 10,446 | 4,160 | 6,286 |
| | | | | | | | 10MPa*331℃ 過熱蒸気 | 11,031 | 4,160 | 6,871 |
| 200 | 湿式 ¹⁾ | 2,612 | 27 | 5 | 178 | 9,500 | 6MPa*382℃ 過熱蒸気 | 3,860 | 1,702 | 2,158 |
| | | | | | | | 6MPa*382℃ 過熱蒸気 | 6,252 | 2,277 | 3,975 |
| 300 | 湿式 ¹⁾ | 3,919 | 40 | 7 | 267 | 9,500 | 6MPa*382℃ 過熱蒸気 | 6,252 | 2,277 | 3,975 |
| | | | | | | | 6MPa*382℃ 過熱蒸気 | 8,773 | 2,800 | 5,973 |
| 400 | 湿式 ¹⁾ | 5,225 | 53 | 10 | 356 | 9,500 | 6MPa*382℃ 過熱蒸気 | 8,773 | 2,800 | 5,973 |
| | | | | | | | 6MPa*382℃ 過熱蒸気 | 11,390 | 3,289 | 8,101 |

注：1)湿式は厨芥を50%分別収集

2)湿式の残渣の脱水後の水分は50%、乾式の脱水残渣の水分は60%で試算

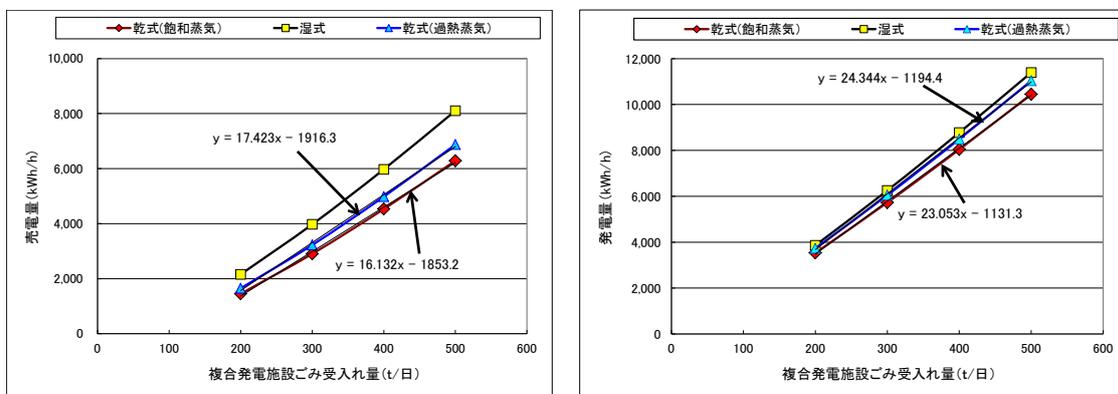


図 20 施設規模と発電量、売電量の関係

飽和蒸気：発電量 (kWh/h) = 23.1X - 1,130 売電量 (kWh/h) = 16.1X - 1,850 式 9

過熱蒸気：発電量 (kWh/h) = 24.3X - 1,190 売電量 (kWh/h) = 17.4X - 1,920 式 10

ここで、X=ごみ処理量(t/日)

乾式メタン発酵は湿式メタン発酵より、発酵槽投入ごみが多く、メタン発生量が多い。ただし、乾式メタン発酵は残渣の水分が高いため、この残渣を混合したごみ（廃棄物焼却炉に投入するごみ）の低位発熱量は低くなる。このため、発電量は湿式メタン発酵の91%～97%、売電量は67%～85%と、共に少ない結果となった。

以上の試算結果から、乾式メタン発酵と湿式メタン発酵を比較し、乾式メタン発酵のメリットとデメリットを下記に示す。

b. 乾式メタン発酵のメリット

- ① 一般廃棄物の場合、湿式メタン発酵は厨芥が対象であり、乾式メタン発酵は厨芥の他、紙類、草木類を対象としている。紙類は厨芥に比べて水分が少なく有機分が多いため、乾式メタン発酵の方がバイオガスの発生量が多くなる。

注：有機物の乾ベースの単位重量当たりのバイオガス発生量はほぼ同じ（800Nm³-dry/t-VS 分解量）であることが確認されている。

- ② 湿式メタン発酵との複合発電の計算では、廃棄物焼却施設で発生する蒸気量に対してバイオガス発生量が少なく、廃棄物焼却施設で発生した蒸気をボイラーの過熱器である程度、過熱しないと、所定の温度まで昇温できなかった。

これに対して乾式メタン発酵ではバイオガス発生量が多くなるため、廃棄物焼却施設で発生した蒸気をボイラーの過熱器で過熱せずに飽和蒸気のまま独立過熱器に送り、バイオガスで所定の温度まで昇温することが可能になる。このシステムを採用した場合は、廃棄物焼却のボイラーの過熱器が不要となり、過熱器は高温腐食対策のために高級材を使用しているため、経済的なメリットがある。

c. 乾式メタン発酵のデメリット

- ① 乾式メタン発酵の発電量、売電量は湿式メタン発酵より少ない。その理由として乾式メタン発酵は発酵槽への投入ごみ量が湿式メタン発酵よりも多く（湿ベースで 3 倍）、紙類など固形分割が多いため、発酵後の残渣の量が湿式メタン発酵の 18 倍にもなる。発酵残渣は脱水されるが、含水率が 60% もあり、ごみ焼却炉への投入ごみの低位発熱量を低下させることになる。このため、ボイラーでの熱回収が少なくなり発電量が湿式メタン発酵の 93.8% になる。なお、湿式メタン発酵は低位発熱量の低い厨芥を分別するのでごみの低位発熱量が上昇し、脱水残渣の量が少ないので、これを混合してもごみ焼却炉投入ごみの低位発熱量の低下はわずかである。
- ② 乾式メタン発酵は発酵温度が 55℃ と高いため、発酵槽の加温のために蒸気タービン抽気を使用する必要があり、その分、発電量が低下する。さらに発酵槽へのごみ投入量が湿式に比べて多い（湿ベースで 3 倍）ため、消費電力も多く、結果として売電量が少なくなる。

2) 廃棄物組成を変化させた場合の発電量の試算

受入れごみ中の紙類、厨芥の割合を全国平均ごみ組成の 0.5～1.5 の範囲で変化させ、表 12 に示すように紙類 7 ケース、厨芥 5 ケースについてバイオガス発生量を算出し、発電量、売電量を試算する。

表 12 紙類、厨芥の割合設定

単位：%

| 組成 / 割合 | 0.5 | 0.6 | 0.75 | 1.0 | 1.25 | 1.4 | 1.5 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 紙類割合 | 19.24 | 23.08 | 28.85 | 38.47 | 48.09 | 53.86 | 57.71 |
| 厨芥割合 | 7.22 | — | 10.82 | 14.43 | 18.04 | — | 21.65 |

<計算条件>・受入れごみ量：200 t / 日

表 13 ごみの組成ごとの有機物分解率とバイオガス発生量¹⁰⁾ :

| 項目 ごみ組成 | 有機物濃度 (%) (固形分中) | 有機物分解率 (%) | 有機物 1 t 当たりの バイオガス発生量 (Nm ³ /t-VS) |
|-------------|---------------------|---------------|---|
| 紙類 | 95.8 | 66.0 | 546 |
| 木・竹・わら類 | 91.5 | 20.0 | 165 |
| 厨芥類 | 92.0 | 84.0 | 679 |
| (参考) 湿式の厨芥類 | 85.0 | 80.0 | 500 |

ただし、全体のバイオガス発生量は南但クリーンセンターの 190 Nm³/t - 湿ごみ で補正した。

- ・機械選別ごみ量の設定：ごみ組成によって濃縮率が異なる（表 1）ため、ごみ組成の変化によって選別ごみ量が増減すると考えられる。表 1 の標準ごみ組成の場合に南但クリーンセンターの物質収支（図 2：受入れごみ量 200 t/日で、機械選別ごみ量 90 t/日）になるとして、この量を基準としてごみ組成の変化による選別ごみ量を補正した。

廃棄物組成を変化させた場合のメタンガス量と投入ごみ量の試算結果を表 14 に示す。また、発電量の試算結果をボイラー出口蒸気が飽和蒸気の場合と過熱蒸気の場合に分けて表 15、表 16 に示す。さらに、試算結果を図 21～図 25 に図示し、紙類、厨芥の組成変化と発電量、売電量の関係を近似式で示す。

表 14 廃棄物組成を変化させた場合の試算結果（メタンガス量と投入ごみ量）

| 項目 | 組成割合 | メタンガス量 (100%換算) | 発酵槽投入 ごみ量 | 脱水残渣量 | ごみ焼却炉 投入ごみ量 | ごみの低位 発熱量 |
|----|------|--------------------|--------------|-------|----------------|--------------|
| | % | Nm ³ /日 | t/日 | t/日 | t/日 | kJ/kg |
| 紙類 | 50 | 5,422 | 81.7 | 87.0 | 205.3 | 8,360 |
| | 60 | 6,048 | 83.4 | 87.6 | 204.2 | 8,277 |
| | 75 | 6,986 | 85.9 | 88.5 | 202.6 | 8,151 |
| | 100 | 8,550 | 90.0 | 90.0 | 200.0 | 7,943 |
| | 125 | 10,110 | 94.1 | 91.5 | 197.4 | 7,736 |
| | 140 | 11,052 | 96.6 | 92.4 | 195.8 | 7,612 |
| | 150 | 11,680 | 98.3 | 93.0 | 194.7 | 7,531 |
| 厨芥 | 50 | 8,552 | 85.4 | 95.6 | 210.2 | 8,115 |
| | 75 | 8,551 | 87.7 | 92.8 | 205.1 | 8,029 |
| | 100 | 8,550 | 90.0 | 90.0 | 200.0 | 7,943 |
| | 125 | 8,548 | 92.3 | 87.2 | 194.9 | 7,858 |
| | 150 | 8,548 | 94.6 | 84.4 | 189.8 | 7,774 |

表 15 廃棄物組成を変化させた場合の発電量の試算結果（飽和蒸気）

| 項目 | 組成割合 | 独立過熱器 入口蒸気条件 | 発電量 | 消費電力 | 売電量 |
|----|------|--------------------|-------|-------|-------|
| | % | | kWh/h | kWh/h | kWh/h |
| 紙類 | 50 | 過熱蒸気 ¹⁾ | | | |
| | 60 | 3.02MPa 飽和 | 3,195 | 2,082 | 1,113 |
| | 75 | 4.05MPa 飽和 | 3,335 | 2,082 | 1,253 |
| | 100 | 6.18MPa 飽和 | 3,533 | 2,082 | 1,451 |
| | 125 | 9.41MPa 飽和 | 3,632 | 2,082 | 1,550 |
| | 140 | 10.00MPa 飽和 | 3,754 | 2,082 | 1,672 |
| | 150 | 10.00MPa 飽和 | 3861 | 2,082 | 1,779 |
| 厨芥 | 50 | 5.44MPa 飽和 | 3,731 | 2,126 | 1,605 |
| | 75 | 5.79MPa 飽和 | 3,632 | 2,104 | 1,528 |
| | 100 | 6.18MPa 飽和 | 3,533 | 2,082 | 1,451 |
| | 125 | 6.61MPa 飽和 | 3,434 | 2,060 | 1,374 |
| | 150 | 7.09MPa 飽和 | 3,335 | 2,038 | 1,297 |

注 1) 紙類 50%ではバイオガスの発生量が不足し、飽和蒸気を独立過熱器で所定の温度まで昇温できないため、過熱蒸気にする必要がある。

表 16 廃棄物組成を変化させた場合の発電量の試算結果（過熱蒸気）

| 項目 | 組成割合 | 独立過熱器 入口蒸気条件 | 発電量 | 消費電力 | 売電量 |
|----|------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | % | | kWh/h | kWh/h | kWh/h |
| 紙類 | 50 | 5MPa * 305°C | 3,579 | 2,028 | 1,551 |
| | 60 | 10MPa * 368°C | 3,887 | 2,082 | 1,805 |
| | 75 | 10MPa * 353°C | 3,827 | 2,082 | 1,745 |
| | 100 | 10MPa * 331°C | 3,731 | 2,082 | 1,649 |
| | 125 | 10MPa * 312°C | 3,638 | 2,082 | 1,556 |
| | 140 | 10MPa 飽和蒸気 ²⁾ | | | |
| | 150 | 10MPa 飽和蒸気 ²⁾ | | | |
| 厨芥 | 50 | 10MPa * 337°C | 4,035 | 2,126 | 1,909 |
| | 75 | 10MPa * 334°C | 3,881 | 2,104 | 1,777 |
| | 100 | 10MPa * 331°C | 3,731 | 2,082 | 1,649 |
| | 125 | 10MPa * 328°C | 3,585 | 2,060 | 1,525 |
| | 150 | 10MPa * 324°C | 3,442 | 2,038 | 1,404 |

注 2) 紙類 140%及び 150%では 10MPa の飽和蒸気条件でバイオガスの回収熱量の方が多いため、余剰分のバイオガスで発酵槽を加温することができ、タービン抽気蒸気量を減少させる。

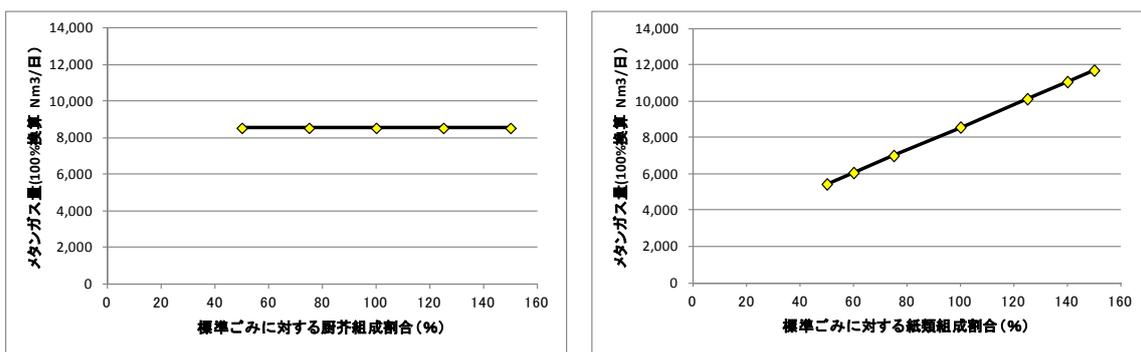


図 21 メタンガス量と紙類及び厨芥の組成変化の関係

厨芥の組成が変化してもメタンガス量の変化は少ない。これは、厨芥は水分が多く、メタンガスの発生源となる有機物の割合が少ないためと考えられる。これに対して、紙類の組成が変化するとメタンガス量の変化は大きい。このため、紙類の組成変化により独立過熱器におけるメタンガスによる加熱量が大きく変化し、表 15 に示すようにボイラー出口蒸気が飽和蒸気の場合は紙類 50% でバイオガスの発生量が不足し、紙類 60% 以上では熱バランスする条件として蒸気圧力が 3MPa から 10MPa まで大きく変化する。また、表 16 に示すようにボイラー出口蒸気が過熱蒸気の場合は 5MPa から 10MPa まで蒸気条件が大きく変化し、紙類 140% 以上ではバイオガスが余剰になるとの試算結果であった。

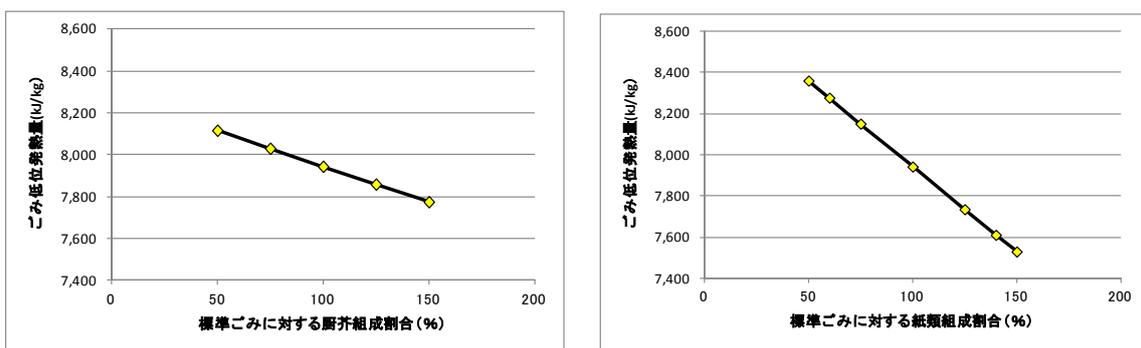


図 22 ごみの低位発熱量と紙類及び厨芥の組成変化の関係

発酵後の脱水残渣を混合したごみの低位発熱量は、厨芥よりも紙類の組成変化の方が影響を受け易い。廃棄物焼却施設への投入熱量を求めると図 23 になる。

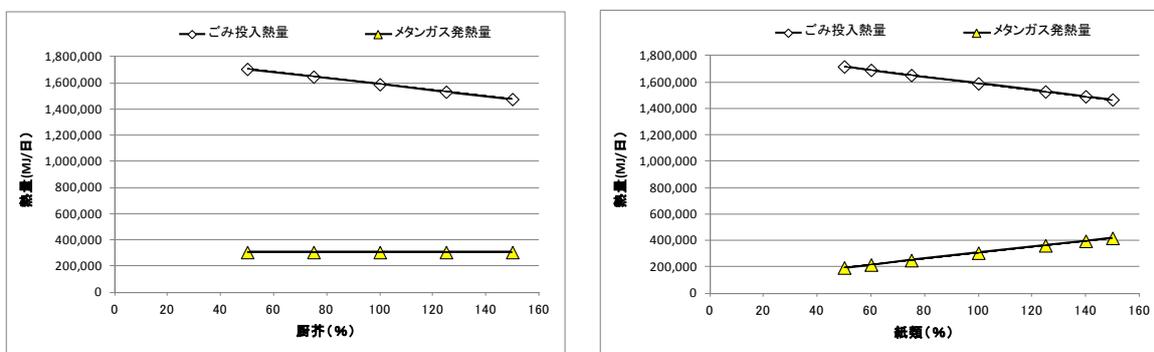


図 23 投入熱量（ごみ、メタンガス）と紙類及び厨芥の組成変化の関係

図 23 において、ごみの投入熱量は紙類と厨芥の組成変化による影響はほぼ同じである。メタンガスの熱量は厨芥の組成が変化してもほぼ同量であるが、紙類の組成変化に対してごみの投入熱量と逆の傾向にある。

発電量、売電量はボイラー出口の蒸気条件ごとに、紙類の組成割合を関数とした近似式として次式で示せる。

$$\text{飽和蒸気：発電量 (kWh/h)} = 6.93X - 2800 \quad \text{売電量 (kWh/h)} = 6.93X - 720 \quad \text{式 11}$$

(ただし、X は 60%以上の範囲)

$$\text{過熱蒸気：発電量 (kWh/h)} = -3.83X - 4120 \quad \text{売電量 (kWh/h)} = -3.83X - 2030 \quad \text{式 12}$$

(ただし、X は 60%から 125%の範囲)

ここで、X=紙類の組成割合(%)

紙類 60%以上の過熱蒸気の場合、蒸気圧力は 10MPa を上限としているため、全て 10MPa となった。同じ蒸気圧力の場合、ボイラーからの蒸気量が少ないほど発電量も少なくなるため、紙類の割合が増加するほど、発電量が減少する傾向にある。(図 24 の赤四角の傾向の説明)

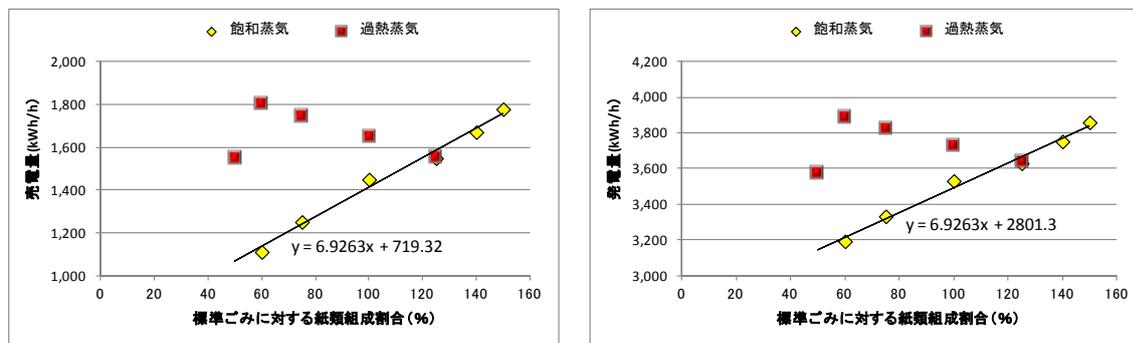


図 24 紙類の組成変化と発電量、売電量の関係

発電量、売電量は厨芥の組成割合を関数として次式のように、ボイラー出口の蒸気条件により近似式で示せる。

$$\text{飽和蒸気：発電量 (kWh/h)} = -3.96X - 3930 \quad \text{売電量 (kWh/h)} = -3.08X - 1760 \quad \text{式 13}$$

$$\text{過熱蒸気：発電量 (kWh/h)} = -5.93X - 4330 \quad \text{売電量 (kWh/h)} = -5.05X - 2160 \quad \text{式 14}$$

ここで、X=厨芥の組成割合(%)

① ボイラー出口の蒸気条件が過熱蒸気の場合

厨芥及び紙類（ただし、組成割合が 60%から 125%の範囲）の組成割合が増加するほど、ごみの投入熱量が少なくなるため、ボイラーでの蒸気発生量も減少し、発電量、売電量とも減少する。

② ボイラー出口の蒸気条件が飽和蒸気の場合

発電量、売電量とも、紙類の組成変化との関係と厨芥の組成変化との関係が逆になっている。これは、図 23 において紙類の割合が多くなると（ただし、組成割合が 60%以上の範囲）、ごみの投入熱量が低下し蒸気量も少なくなるが、メタンガスの発生量が多くなるため独立過熱器で十分蒸気を加熱でき、蒸気圧力を高くできるので、発電量、売電量とも増加するためである。

一方、厨芥の割合が多くなってもメタンガスの発生量はほとんど増加しないため、蒸気圧力の増加もわずかとなる。このため、厨芥の割合が増加するほど、ごみの投入熱量が少なくなり、ボイラーでの蒸気発生量も減少し、発電量、売電量ともに減少する。

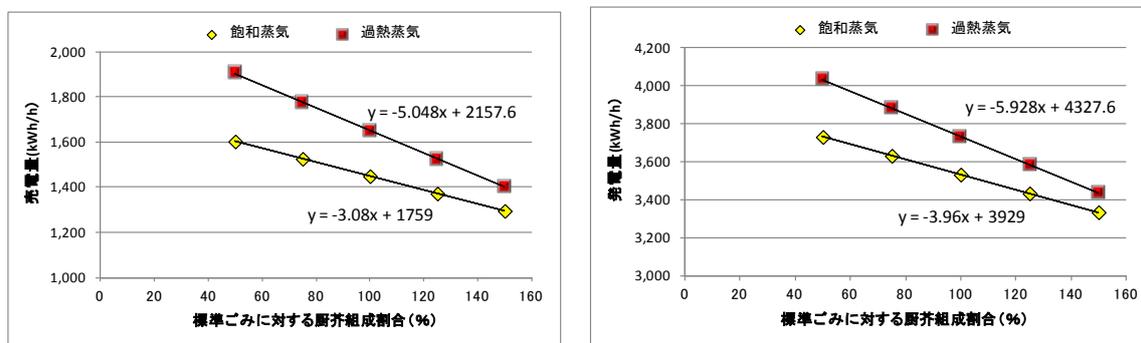


図 25 厨芥の組成変化と発電量、売電量の関係

3) 発酵槽の設置面積の推計

複合発電施設は、発電量の増加に寄与するが、発酵槽での廃棄物の滞留時間が長いために、発酵槽が大型になり、大きなスペースを要することになる。これは、特に都市型の廃棄物処理施設においては大きなネックになる場合もあると考えられるため、ここではその設置に要する面積の検討を行った。発酵槽の容量は下記に示す滞留時間、固形分濃度から算出される。ただし、設計上の制約から発酵槽は1系統当たり最大 30 t-発酵槽投入ごみ/日程度とし、計算上は系列を増やすことで対応する。発酵槽のサイズから必要となる施設面積について推計した。施設の規模は下記の 4 ケースについて検討した。試算結果を表 17 に示す。また、乾式メタン発酵施設全体の概算の必要面積を表 18 に示す。

- ・ 試算規模（受入れごみ量）：200 t/日、300 t/日、400 t/日、500 t/日

表 17 発酵槽の設置面積の試算結果

| 項目 | 単位 | ケース1 | ケース2 | ケース3 | ケース4 | 備考 |
|------------|----------------|-------|-------|--------|--------|---------------|
| 受入れ量 | t/日 | 200 | 300 | 400 | 500 | |
| 選別ごみ量 | t/日 | 90 | 135 | 180 | 225 | |
| 固形分量 | t-TS/日 | 67.7 | 101.5 | 135.3 | 169.1 | ごみ組成計算より |
| 発酵槽投入量 | t/日 | 270.6 | 406.0 | 541.2 | 676.6 | 発酵槽内、固形分濃度25% |
| 有効容積 | m ³ | 5,413 | 8,119 | 10,825 | 13,531 | 滞留時間20日 |
| 発酵槽基数(計算値) | 基 | 4.2 | 6.2 | 8.3 | 10.4 | |
| 発酵槽基数(採用値) | 基 | 4 | 6 | 8 | 10 | |
| 1槽当たりの有効容積 | m ³ | 1,353 | 1,353 | 1,353 | 1,353 | |
| 実容積 | m ³ | 1,592 | 1,592 | 1,592 | 1,592 | 有効容積率85% |
| 内径 | m | 7.72 | 7.72 | 7.72 | 7.72 | 長さ34m |
| 必要な設置面積 | m ² | 2,238 | 3,273 | 4,308 | 5,343 | |

注：最大有効容積：1,300m³（フランクフルト）

<検討条件>

- ・ 滞留時間 20 日間、固形分濃度 25%（防府市クリーンセンターのヒアリング結果）
- ・ 発酵槽のサイズ：長さ最大 34m、有効容積は内容積の 85%（国内実績値より設定）、発酵槽（横型円筒）の間隔はメンテナンススペースや残渣返送ライン設置のため 4m 程度確保する。
- ・ 実証施設の配置図や、防府市クリーンセンターの発酵槽の配置を参考として、必要面積を設定する。レイアウトの基本的な考え方を図 26 に示す。

表 18 乾式メタン発酵施設全体の概算の面積

| 項目 | 単位 | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 | ケース 4 | 備考 |
|------|----------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| 屋外 | m ² | 2,610 | 3,740 | 4,850 | 5,960 | 発酵槽、ガスホルダー |
| 工場棟 | m ² | 290 | 340 | 410 | 490 | ごみ焼却施設併設 |
| 合計面積 | m ² | 2,900 | 4,080 | 5,260 | 6,450 | |

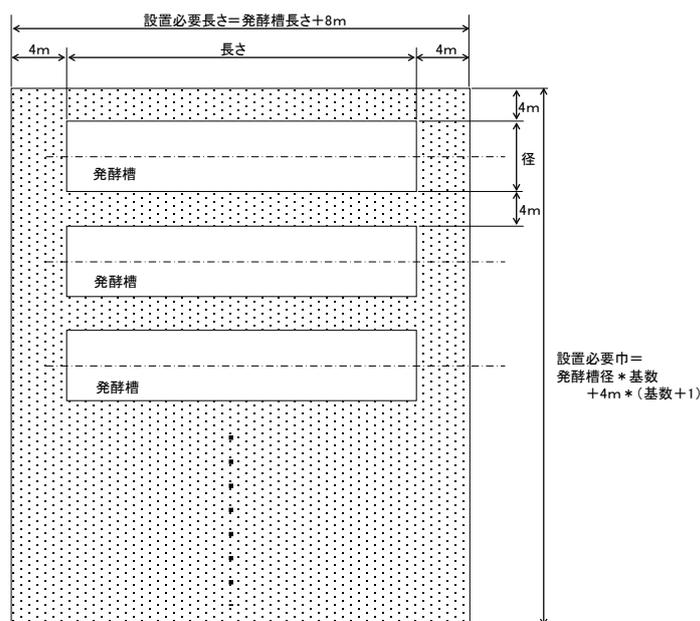


図 26 発酵槽レイアウトの基本的な考え方

検討結果から発酵槽投入ごみが 50 t / 日 増加するごとに発酵槽が 1 基増加することになり、これは 500 m² (42m * 12m) の設置面積に相当する。さらに、乾式メタン発酵設備の実績から 2 系列以上はなく、系列の増加はごみの均等な配分機構など設備的に新たな技術開発の課題があるものと考えられる。

<参考>

国内の乾式メタン発酵の発酵槽のサイズを表 19 に示す。

表 19 国内の乾式メタン発酵の発酵槽（実績）

| 項目 | 南但クリーンセンター | 防府市クリーンセンター |
|----------|---------------------|-------------------------------|
| 発酵槽入口ごみ量 | 20.2 t/日 | 25.75t/日*2系列 選別ごみ67%、汚泥33% |
| 発酵槽のサイズ | φ6.4m*32mL*1系列 | φ6.8m*34mL*2系列 |
| 計算内容積 | 1,029m ³ | 1,235m ³ |
| 有効容量 | 875m ³ | 1,000m ³ |
| 有効容積率 | 85.0% | 81.0% |

4) 湿式メタン発酵と焼却との複合発電施設

同様の発電、売電量の推計を、メタン発酵が湿式である場合について、発電量、売電量はごみ処理量と厨芥分別率により次式で表すことができる。

発電量 (Y kW) はごみ処理量 (X t/日) により次式で示される。

$$Y \text{ (kW)} = a * X \text{ (t/日)} + b \quad \text{式 15}$$

ここで、各係数は厨芥分別率 (G %) により下記の式で示される。

$$a=0.0448 * G + 26.0$$

$$b=-3.94 * G - 2140$$

売電量 (Z kW) はごみ処理量 (X t/日) により次式で示される。

$$Z \text{ (kW)} = c * X \text{ (t/日)} + d \quad \text{式 16}$$

ここで、各係数は厨芥分別率 (G %) により下記の式で示される。

$$c=0.0409 * G + 21.9$$

$$d=-2.200 * G - 3250$$

5) サブテーマ1のまとめ

焼却施設の周辺に適当な産業施設が存在しないケースにおいても、高効率にエネルギー回収することが可能な施設として、廃棄物焼却・メタン発酵の複合発電施設に着目した。複合発電施設は、再生原燃料の産業利用を進めた際に、低位発熱量が低下する焼却対象廃棄物から高効率に発電する際にも有効である。しかし、実際の導入事例が限定的であり、実績データ等の知見に乏しいため、様々な条件でのシミュレーションを可能とするため、熱力学的な計算等に基づくモデル化を行った。本成果により、自治体の今後の廃棄物処理計画策定に資することが期待される。

(3) 資源・エネルギーの地域利用モデルの作成 (サブテーマ2)

1) 焼却廃熱の工場での利用 (発電量と外部供給熱量の試算)

流量 (Q₁、Q₂、Q₃) の分配割合を変化させて、外部供給熱量、発電量を試算する。発電量と外部供給熱量のパターンを6通り設定し、表20に示す。発電量と外部供給熱量の計算結果を、表21に示す。また、化石燃料の熱量に換算して比較した結果を図27に示す。その際、温水についてはヒートポンプに

よる暖房、給湯を代替するものとし、火力発電の効率（42%と、ヒートポンプの成績係数5を加味して、供給熱量の1/2.1を化石燃料消費削減量とした。

表 20 発電量と外部供給熱量のパターン

| NO. | ボイラー出口蒸気の行先 | 蒸気タービン抽気の有無 | 蒸気タービン背圧 (MPa) | 発電と蒸気利用のパターン |
|-----|-------------|-------------|----------------|--------------|
| 0 | 蒸気タービン | なし | 0.015 | 積極発電 |
| 1 | 蒸気タービン | なし | 0.03 | 全量発電抽気なし |
| 2 | 蒸気タービン | あり | 0.03 | 全量発電抽気あり |
| 3 | 蒸気タービン+外部共有 | あり | 0.03 | 高圧蒸気 25% |
| 4 | 蒸気タービン+外部共有 | あり | 0.03 | 高圧蒸気 50% |
| 5 | 蒸気タービン+外部共有 | あり | 0.03 | 高圧蒸気 75% |
| 6 | 外部共有 | なし | 0.03 | 高圧蒸気 100% |

表 21 発電量と外部供給熱量の関係

| NO. | 蒸気の分配割合 | | | 外部供給熱量、発電量 | | | | 化石燃料熱量 (MJ/h) |
|-----|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-----------|------------|---------------|
| | 高圧蒸気 Q_3 (%) | 抽気蒸気 Q_2 (%) | 排気蒸気 Q_1 (%) | 高圧蒸気 (MJ/h) | 低圧蒸気 (MJ/h) | 温水 (MJ/h) | 電力 (kWh/h) | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10,490 | 89,000 |
| 1 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 101,700 | 10,140 | 215,000 |
| 2 | 0 | 30 | 70 | 0 | 35,400 | 71,200 | 8,970 | 211,000 |
| 3 | 25 | 22.5 | 52.5 | 35,000 | 26,500 | 53,400 | 6,410 | 200,000 |
| 4 | 50 | 15 | 35 | 70,000 | 17,700 | 35,600 | 3,970 | 189,000 |
| 5 | 75 | 7.5 | 17.5 | 105,000 | 8,800 | 17,800 | 1,730 | 181,000 |
| 6 | 100 | 0 | 0 | 140,000 | 0 | 0 | 0 | 176,000 |

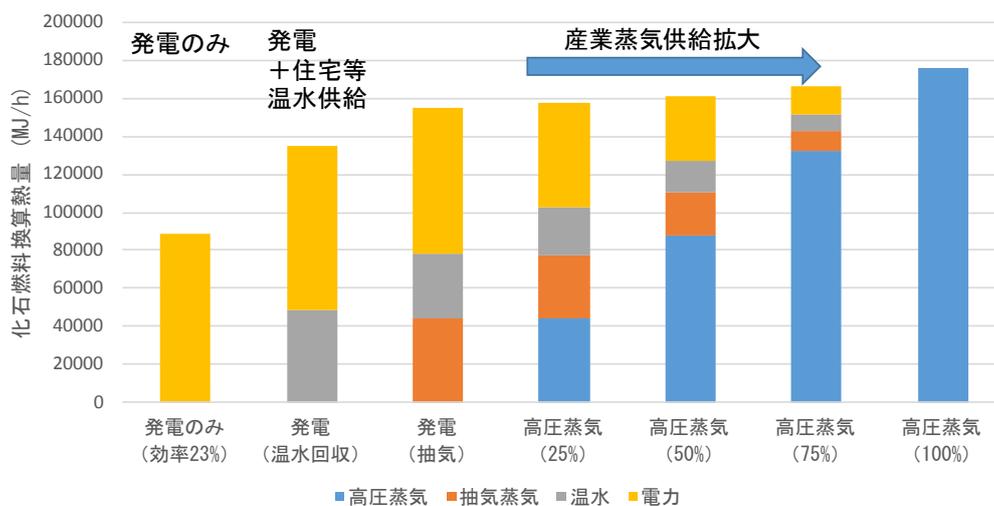


図 27 削減される化石燃料の熱量換算値

図 27 から明らかなように、焼却炉で製造した蒸気を産業で 100%利用できれば、発電効率 23%で発電のみを行うケースと比較して、およそ 2 倍の化石燃料消費削減効果が得られる。また、近隣に十分な産業熱需要が存在しない際には、発電を犠牲にすることなく、廃熱を利用して製造した温水を住宅、オフィス、商業施設等で利用できれば、産業利用にはやや劣るものの、全体として同程度の化石燃料消費削減効果を得ることができる。ただし、60℃の温水需要は季節変動も大きいと考えられることから、通年ではその効果を十分に得られない可能性もある。

このように、焼却炉から近隣工場への蒸気供給は、実現すれば極めて効率の高いエネルギー回収・利用方法であることが分かる。

2) 焼却炉から火力発電所への蒸気供給

まとまった量の熱需要が期待できる施設として、火力発電所が挙げられる。廃棄物焼却施設のボイラーで発生した蒸気（3MPa*300℃）をより高温高圧（17MPa 以上*560℃）の火力発電所に供給し、火力発電所側のボイラー給水加熱に利用するシステムが提案されている。このシステムを図 28 のように設定する。

各蒸気タービンの抽気は成り行きで流れる。抽気が逆流するところが熱供給の限界である。火力発電のボイラー水質の純度が高いため、廃棄物焼却炉の蒸気を直接使用しない方が、経済的である。また、お互いに独立したシステムとした方が操業し易いと考えられる。

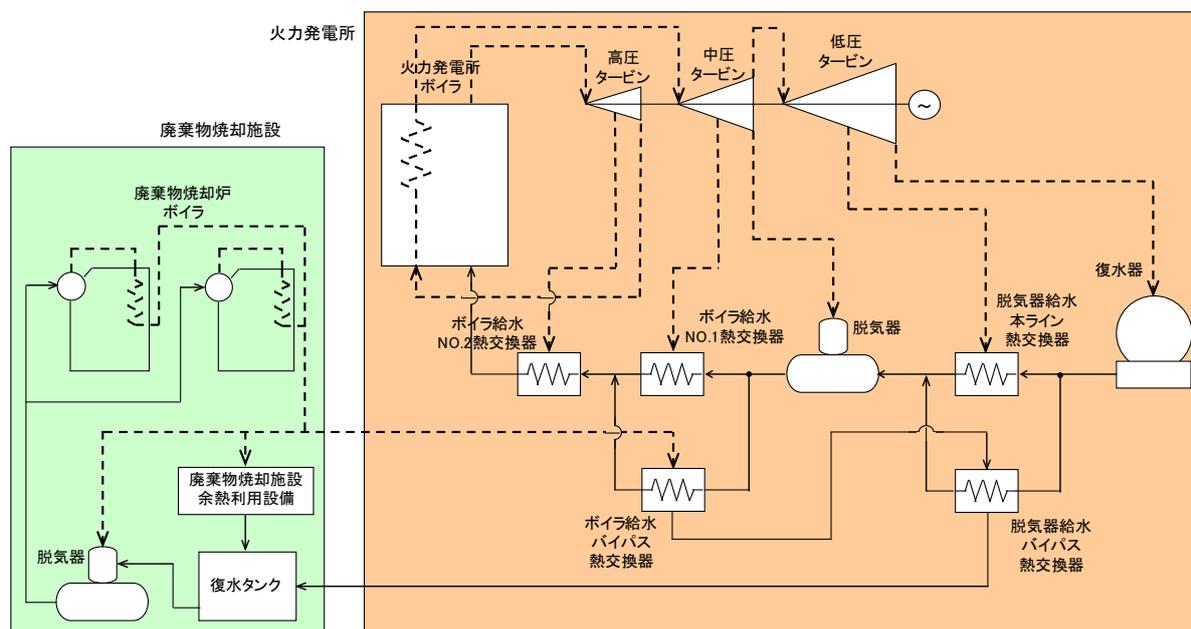


図 28 廃棄物焼却熱の火力発電での熱利用システム

廃棄物焼却炉からの熱利用の検討が行える詳細な火力発電所側のプロセスデータが公開されている例は少なく、下記の資料を参考にする。

文献 1) 小川紀一郎「再生可能エネルギー利用火力発電システム」火力原子力発電、Vol. 65、No. 6、2014. 6

文献 2) 「バイオマス等の高度利用火力発電システムの事業適合性に関する調査成果報告書」(NEDO、2007. 3)

*上記の資料で試算されている火力発電所側の蒸気条件（ボイラー出口）を表 22 に示す。火力発電所の入熱Aは発電効率から求めた。廃棄物焼却施設からの供給蒸気の条件は過熱器伝熱管の高温腐食のおそれが少ない条件として、3MPa*300℃を基準としている。

表 22 火力発電所側の蒸気条件(ボイラー出口)

| ケース | 発電出力 (MW) | 蒸気圧力 (MPa) | 蒸気温度 (℃) | 蒸気圧力 区分 | 発電効率 (%) | 火力発電所の 入熱A(MJ/h) |
|-----|--------------|---------------|-------------|------------|-------------|---------------------|
| 1 | 350 | 17.0 | 566 | 亜臨界圧 | 45.5 | 2,769,000 |
| 2 | 700 | 31.6 | 566 | 超超臨界圧 | 48.2 | 5,228,000 |
| 3 | 1,000 | 24.7 | 566 | 超臨界圧 | 47.0 | 7,660,000 |

火力発電所のボイラー給水加熱に必要な熱量は火力発電所の全入熱Aの10%以下とのシステム上の制約条件があることから、火力発電所の規模にマッチングする廃棄物焼却炉の規模はこの制約条件により設定する。既存の試算では全入熱Aの5%としていることから、この供給熱量を基準としてボイラー効率と熱損出から廃棄物焼却炉の規模を設定する。廃棄物処理施設でのごみ処理量を算出した結果を表 23 に示す。注：1) 全入熱の10%を外部供給熱量の限界としているが、火力発電所を新設する場合には更に高い割合に設定できる。

表 23 廃棄物処理施設のごみ処理量

| ケー ス | 火力発電所側受取熱量 A*0.05 (MJ/h) | 必要なごみ熱量 (MJ/h) | ごみ量(目安) (t/日) | 設定ごみ量 (t/日) | 炉構成 t/日*炉 |
|---------|-----------------------------|-------------------|------------------|----------------|--------------|
| 1 | 138,500 | 164,200 | 449 | 500 | 250*2 |
| 2 | 261,400 | 310,000 | 847 | 900 | 450*2 |
| 3 | 383,000 | 454,200 | 1,241 | 1,200 | 400*3 |

注)ごみの低位発熱量は平成24年度の全国平均値とし、ボイラー効率は3節の試算条件に合わせて85%とし、蒸気の輸送距離は1kmと仮定した。

算定結果を表 24 に示す。焼却炉からの蒸気供給により、火力発電所側で増加した発電量を、焼却した廃棄物のもつ発熱量で割り算して、発電効率を算出した。

表 24 投入したごみの熱量に対する発電効率の比較 単位 (%)

| 方式 | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| 火力発電所熱利用 | 26.5 | 30.9 | 28.8 |
| 単独廃棄物発電 | 19.9~21.3 | 21.9~23.3 | 22.9~24.3 |

実際は、発電出力は認可されている出力を超えることはできない。また、定格出力で運転していない場合でも火力発電所にとっては、発電出力を増加させずに、燃料を削減することを選択することもできる。

3) 生ごみ由来バイオガスを利用した住宅における都市ガス代替の効果

生ごみと下水汚泥を混合でバイオガス化し、都市ガス導管に供給するケースの効果の評価結果を示す。処理施設別の結果の一例として、現状の焼却施設の CO₂排出量の結果を図 29 に示す。内訳をみると、圧倒的にプラスチック焼却による影響が大きいことがわかる。また、焼却施設によって、処理段階での負荷が大きく、これが全体の排出量に影響しているといえる。これは、ごみ焼却時に用いる補助燃料の影響が大きい。各施設とも、ごみ発電による売電を行っており、その効果を見ることはできる。しかし、売電量が少ないため、CO₂削減に与える影響は小さい。

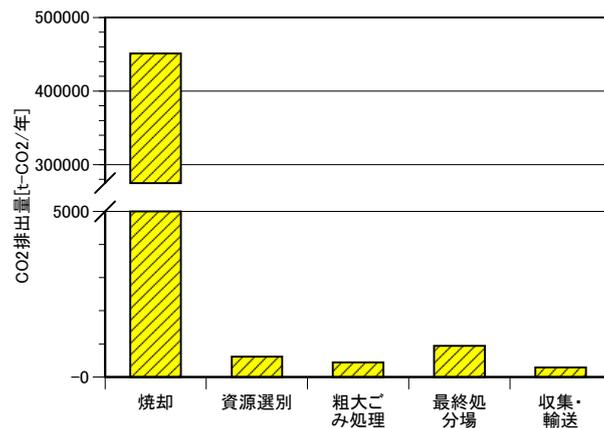


図 29 現状評価 (CO₂排出量)

図 30、図 31 は、神戸市において上述のシステムが導入されたと想定した場合の CO₂排出量とエネルギー生産量の結果である。結果として、生ごみ分別シナリオは、BAU シナリオに比べ、CO₂排出量を約 10%削減可能であり、ごみ由来のエネルギー生産量を約 27%増加できることがわかった。このエネルギー生産量増加分は、一般家庭 2,600 世帯分の都市ガス需要に相当する。これより、生ごみのバイオガス化および都市ガス導管は、一定の効果が期待できることが示された。ごみと下水は区別するという従来の考え方にしぼられず、再生可能エネルギー生産を軸として、行政組織の枠を超えて柔軟にシステム構築を検討していくことが求められる。また、コミュニティの近隣に焼却施設を建設する場合は、NIMBY 問題を解決する必要がある。また、コミュニティを対象とする場合は、人口減少や世帯の高齢化に伴う電力・熱需要の将来変化(ガス調理器から IH 調理器への切り替えなど)も考慮する必要がある。

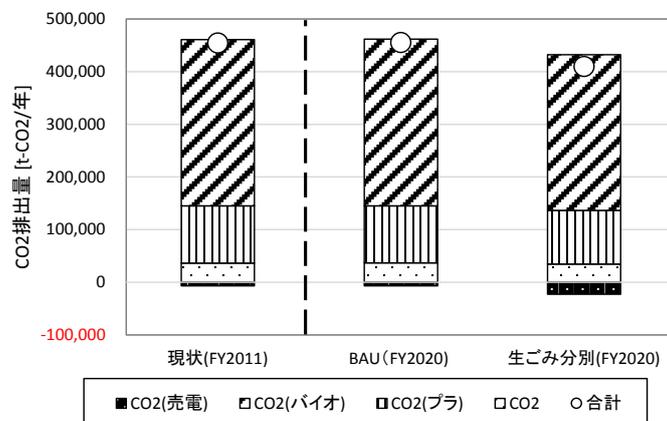


図 30 CO₂排出量の変化

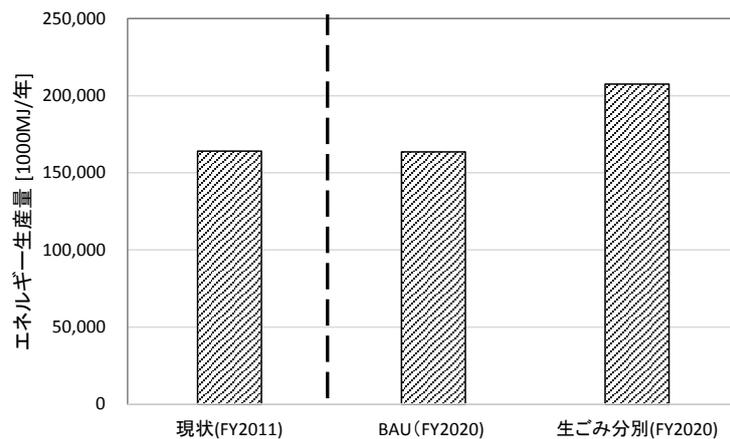


図 31 エネルギー生産量の変化

4) 地域エネルギー利用に関わるヒアリング調査

a. 潜在的なエネルギー供給事業者（自治体）へのヒアリング結果

① 熱供給の状況と年間変動

- ・ 蒸気利用の優先順位は、1. 場内熱利用 2. 発電 3. 外部熱供給
- ・ 蒸気供給の変動=10~20%（熱供給事業会社の需要変動による。変動分はコンデンサーで処理している。
- ・ 季節による変動は夏、冬に需要が多く、春、秋は需要が少ない。
- ・ 時間による変動は昼に多い。特に、7:00~9:00が多い。
- ・ 清掃工場の運転炉数、ごみ量、場内熱使用量によって、供給できる熱量が変動する。1炉毎にそれぞれ2カ月（6週間）停止し、定期点検をするので、その間（12週間）は1炉運転となり、蒸気供給量が減少する。
- ・ 熱供給事業は経済的に優位性がない。

② 熱供給システムと主要機器の仕様

- ・ 廃棄物焼却炉からの高圧蒸気（1.72MPa*280℃）を送り、熱供給事業所側の蒸気発生器で0.78MPa*175℃の蒸気を発生させ、熱交換器で75℃の温水に加熱、または吸収式冷凍機で7℃の冷水にして供給している。
- ・ 熱供給事業所側の蒸気以外の熱源機器として、都市ガスを燃料としたボイラー、電気式のターボ冷凍機がある。
- ・ 清掃工場の責任分担は敷地境界線までで、その先は地域熱供給事業者の責任分担になる。
- ・ 蒸気系統：タービン抽気蒸気 → 抽気蒸気溜め（概略サイズ・径1.0m*長さ5m） → 減温装置 → 輸送管へ
- ・ 高温水系統：タービン抽気蒸気で熱交換 → 高温水熱交換器：高温水を発生 → 高温水タンク → ポンプで供給 → 熱交換して80℃で戻る → 高温水熱交換器で再び130℃に加熱 → （蒸気系とは別系統で循環）

- ③ 地域熱供給事業所側からの熱供給の制約条件と課題
 - ・ 最大熱供給量=4t/h が決められている。他には制約条件は特でない。
 - ・ 熱供給事業の蒸気必要量に合わせて供給することが課題である。
 - ・ 熱需要に合わせてごみ焼却量を増減することはしていない。
- ④ 熱供給が停止した場合の地域熱供給事業所側の対応方法
 - ・ 定期点検で廃棄物焼却施設が全停止するのは電気設備などの共通設備の点検の時で、年1回、期間は10日間程度廃棄物焼却施設からの熱供給が停止した場合、熱供給事業所側の都市ガス、電気の熱供給設備で熱供給する。
- ⑤ 熱利用先が休止した場合の廃棄物焼却施設の対処方法
 - ・ 高圧ヘッダーのバルブを閉めて、余剰蒸気は高圧コンデンサーで処理する。
- ⑥ 地域熱供給事業所側の熱交換器の形式と腹水の返送方法
 - ・ 熱供給事業所側からは低い温度のドレンとして腹水タンクに戻される。
- ⑦ 熱供給量に対する概略の放散熱量の割合
 - ・ 熱供給事業所まで約1kmあるが、設計上は高圧ヘッダーで1.75MPa*280℃、供給先で1.72MPa*280℃。
- ⑧ 供給熱の単価（考え方）
 - ・ 当初は清掃工場の維持管理に必要な経費を基に単価を設定したが、平成21年度からは電気料金を基準に設定している。
 - ・ 蒸気を発電に使用した方が、収入は大きくなる。ただし、大差はない。
- ⑨ その他
 - ・ 現在、新工場の立地計画をしており、地域住民に貢献できる熱利用施設として農業系の施設を考えている。できれば、地元の熱利用業者の誘致を考えている。

b. 潜在的な熱需要事業者（工場・業界団体）へのヒアリング結果

- ① 熱利用の現状等
 - ・ 空調の他に、反応工程など熱利用が多い。
 - ・ 化学プラントでは熱の利用が主体で、副次的に発電も行っている。自家発電はコージェネで、ボイラー圧力は亜臨界の12MPaで、抽気蒸気を高圧（4.0MPa）、中圧（1.0MPa）、低圧（0.3MPa）の3系統で供給している。電力は基本的には電力会社からの買電である。
 - ・ コージェネはガスタービンタイプが多い。230～300℃の蒸気で熱回収している。
 - ・ 化学プラントコンビナートでは中心にボイラープラント（複数のボイラーを保有）があり、それを取り囲むように化学プラント（10～30基）がある。コンビナートの一辺は約2kmあり、この中を3系統の蒸気配管がラック上を走っている。

- 蒸気の需要は変動するのでボイラーの稼働台数を変えたり、ボイラーの負荷を制御して、蒸気配管内の圧力を一定にし、蒸気を安定供給している。

② 外部から供給された蒸気を利用できそうなプロセス

- 廃棄物焼却排熱利用を具体的に検討したことはないが、可能性はある。既存の事業所への熱供給は難しいが、新規工場で距離的条件（例えば5km以内）などが合えば実現の可能性はある。
- 条件が合えば、廃棄物焼却施設からの蒸気を受入れることは可能で、海外移転で空いている土地があるので、そこに自治体の焼却炉を建設することが考えられる。
- 高圧蒸気（3.0MPa）、中・低圧蒸気（1.5MPa～0.3MPa）は問題なく使用できる。ただし、高温水は安全上（熱傷防止）と第1種圧力容器に該当することから使われない。温水80℃は経済的理由で利用できない。

③ 外部から熱供給を受けている事例

| 社名 | 回答 |
|----|--|
| A社 | 1.8MPa 蒸気を受け入れ。（工業団地内） |
| B社 | 蒸気供給を受けている工場・研究所は共に親会社の工場敷地内にあり、親会社の工場から蒸気供給を受けている。 |
| C社 | 同じ工業団地内にあるグループ会社のエネルギー供給センターよりコージェネ+ボイラー（不足時）の蒸気を受給。 |

④ 外部からの熱供給の制約条件と課題

- 東日本大震災以降、エネルギーの安定供給が重視され、自家発電の採用が増えている。製造過程でエネルギーが途切れると生産に甚大な被害が出るので、電気、熱の安定供給が最重要課題になっている。製品に影響を与えないことが前提である。
- 大規模コンビナートでは200～300t/hのボイラーが複数稼働しており、ここに20～30t/h程度の蒸気を供給する場合、影響は少ない。ボイラー工場の会社とホットラインを構築して、ボイラー出力を調整してもらうことが考えられる。
- 化学プラントで300t/hの蒸気を使っている場合、夏季の夕立で配管が冷やされると、急に50t/h（15%減）も蒸気量が減少する。実運転ではこのように変動が激しいが、これに追従する運転をしている。

⑤ 外部からの熱供給が停止した場合の対応

- 高さ7mのラック上に蒸気供給配管を設置しているので、腹水になったものをここに上げるためのヘッド圧が必要になり、最低でも0.1MPaの圧力が必要になる。
- 廃棄物焼却施設からの蒸気は化学コンビナートのヘッダーに接続するだけで利用可能である。熱交換器を経由しないで、直接、蒸気を送る方式になる。ただし、ボイラー水質基準を化学プラントの厳しい基準に合わせる必要がある。
- リスク管理として、非常用発電は何日も電力を供給できる考え方（燃料保有日数の増加）に変わっている。
- 電源が途絶えて空調が管理温度域から外れると元に戻すことが大変なので、自家発電は常時（電力会

社からの買電と並列運転) 使用している。

- ・ ボイラーは大型ボイラー1台から複数の小型ボイラーによる台数制御方式に代わってきている。また、リスク管理として使われなくなったボイラーを残しておく事例もある。

⑥ 外部から熱供給を受ける熱交換器の形式

| 社名 | 回答 |
|----|--|
| A社 | 空調用加熱コイル、2重管板式熱交換器、加熱層ジャケット、多管式熱交換器など |
| B社 | 供給元からの蒸気を一括して熱交換するような設備はない。末端設備用に、空調機の加熱用熱交換器、ピュアスチーム発生装置の2重管式熱交換器など、多数の熱交換器を設置。 |
| C社 | 建屋ごとに異なる |

⑦ 供給熱の単価の決め方

| 社名 | 回答 |
|----|---------------------------------|
| A社 | 固定費・労務費・重油価格により算出される原価をベースに決定。 |
| B社 | 用役供給契約書に基づき算定される。算定方法は非開示。 |
| C社 | 燃料費+経費(人件費)を使用量で実費按分して算出(毎月変動)。 |

- ・ エクセルギー評価方式と買電控除方式(コージェネで発電した電力に相当する価格を差し引いた価格で蒸気の製造単価を算出:電力の単価は電力会社の単価)の2種類がある。蒸気が不足している場合は、買電控除方式を適用するなど、蒸気の過不足の状況により選定される。事例:エクセルギー評価方式=2,700~3,800円/tで、買電控除方式=4,000~5,000円/t。

5) 全国のごみ処理施設を対象とした発電・熱生産の状況に関する調査結果

表25に、全国、東京23区、大阪市、神戸市におけるごみ処理量あたりの余熱利用量と総発電量を示す。ごみ1tあたりの総発電量は全国平均で0.22MWh/tであり、東京23区、大阪市、神戸市の方が、総発電量は1.6~1.9倍大きい。これは、全国平均では1施設あたりの平均処理能力が155t/日であるのに対し、23区および2都市は平均処理能力が555~638t/日と大きいことが一因である。余熱利用量は、全国平均よりも23区および2都市の方が大きい。また、余熱利用量のうちの外部利用に着目すると、全国平均は0.03MWh/tに留まっている。参考として、Themelis²⁵⁾によると、ミュンヘン(ドイツ)では2.57MWh/t、マルメ(スウェーデン)では2.68MWh/tの余熱をそれぞれ地域熱供給しており、日本における余熱の外部利用は極めて少ないことがわかる。ごみ焼却により生産した熱および電力の外部利用量は、それぞれ14,005TJ/y、10,164TJ/yである。これは、日本の最終エネルギー消費量(2012年度)²⁶⁾の0.29%(熱)、0.37%(電力)に相当する。このことから、ごみの熱・電力供給のシェアは極めて小さく、地域分散型エネルギー源の1つとして利用を進めていくのが無難である。

アンケート調査で得られた結果として、表26に余熱利用実施の有無を示す。発電は、場内利用と外部利用を行っている施設が23.7%と最も多かった。発電の外部利用は、電力会社への売電が主である。熱供給の場合は、温水・蒸気ともに、場内利用のみの割合が最も多く、場内利用と外部利用を行っている施設の割合は10%以下であった。

続いて、温水と蒸気(発電以外)に着目して、人口密度との考察を行う。蒸気(発電以外)に関する結果を図32に示す。生産量が600MJ/tを超える施設は、少数である。また、生産量が400MJ/tの規模の焼却施設では、人口密度が1,000人/km²以下の地域で熱利用が多く行われていた。このことから、温水、蒸気(発電以外)ともに、人口密度との関係性はなかった。蒸気について、具体的な利用先と人口密度との関係性を調べた結果を図33に示す。利用先のうち、公共施設は、老人福祉施設や健康施設が含まれている。また、ごみ・下水処理は、焼却施設の外にあるごみ処理施設や下水処理場が含まれている。人口密度との関係性をみたところ、温水の場合は人口密度に関係なく、公共施設や浴場・プールの利用が多かった。また、人口密度が低い地域では公共施設やごみ・下水処理施設への利用が多く、需要施設が限られていることが伺えた。地域熱供給は住宅団地向けであり、人口密度の高い地域で実施されている。

表 25 ごみからの余熱利用および総発電量の状況

| | 人口 [千人] | 焼却率 | 処理量あたり[MWh/t] | | | |
|--------------------|------------|-----|---------------|------|--------|------|
| | | | 合計 | | うち外部供給 | |
| | | | 余熱利用量 | 発電 | 余熱利用量 | 発電 |
| 全国平均 | - | 71% | 0.22 | 0.22 | 0.03 | 0.08 |
| 東京23区 | 9,090 | 84% | 0.05 | 0.41 | 0.05 | 0.21 |
| 大阪市 | 2,686 | 95% | 0.87 | 0.39 | 0.04 | 0.23 |
| 神戸市 | 1,538 | 87% | 1.03 | 0.34 | 0.01 | 0.08 |
| 札幌市 | 1,952 | 66% | 0.82 | 0.33 | 0.03 | 0.18 |
| 仙台市 | 1,073 | 78% | 0.44 | 0.34 | 0.02 | 0.02 |
| 名古屋市 | 2,277 | 85% | 0.58 | 0.34 | 0.01 | 0.16 |
| 京都市 | 1,469 | 86% | - | 0.35 | - | - |
| 北九州市 | 963 | 77% | 0.07 | 0.45 | 0.06 | 0.28 |
| 福岡市 | 1,519 | 91% | 0.02 | 0.38 | 0.00 | 0.01 |
| シンガポール | 5,000 | 41% | - | 0.43 | - | - |
| ベルリン(ドイツ) | 3,400 | 40% | 1.08 | 0.39 | - | - |
| メトロバンクーバー(カナダ) | 2,300 | 8% | 0.73 | 0.46 | - | - |
| ウィーン(オーストリア) | 1,670 | 63% | 1.73 | 0.16 | - | - |
| ミュンヘン(ドイツ) | 1,400 | 49% | - | 0.41 | 2.57 | - |
| コペンハーゲン大都市圏(デンマーク) | 900 | 25% | 2.25 | 0.49 | - | - |
| マルメ(スウェーデン) | 670 | 69% | - | 0.46 | 2.68 | - |
| チューリッヒ(スイス) | 390 | 62% | - | 0.45 | 1.26 | - |
| マリオン郡(アメリカ) | 310 | 34% | - | 0.52 | - | - |
| リー郡(アメリカ) | 600 | 51% | - | 0.56 | - | - |

注釈：海外の事例はThemelis²⁵⁾より引用した。

表 26 余熱利用の有無に関する回答

| | 温水生産 | 蒸気生産 (発電以外) | 蒸気生産 (発電) |
|-----------|-------------|----------------|--------------|
| 場内利用+外部利用 | 26 (8%) | 17 (5.2%) | 71 (21.8%) |
| 場内利用のみ | 58 (17.8%) | 37 (11.4%) | 33 (10.2%) |
| 外部利用のみ | 17 (5.2%) | 14 (4.3%) | 1 (0.3%) |
| 利用なし | 224 (68.9%) | 257 (79.1%) | 220 (67.7%) |

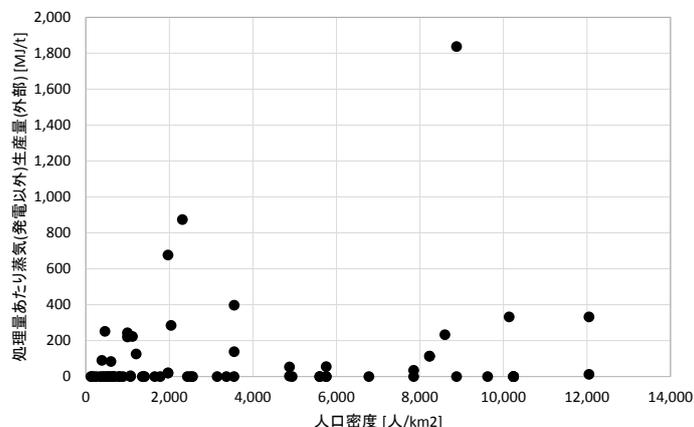


図 32 人口密度別の蒸気生産量(発電以外、外部利用)

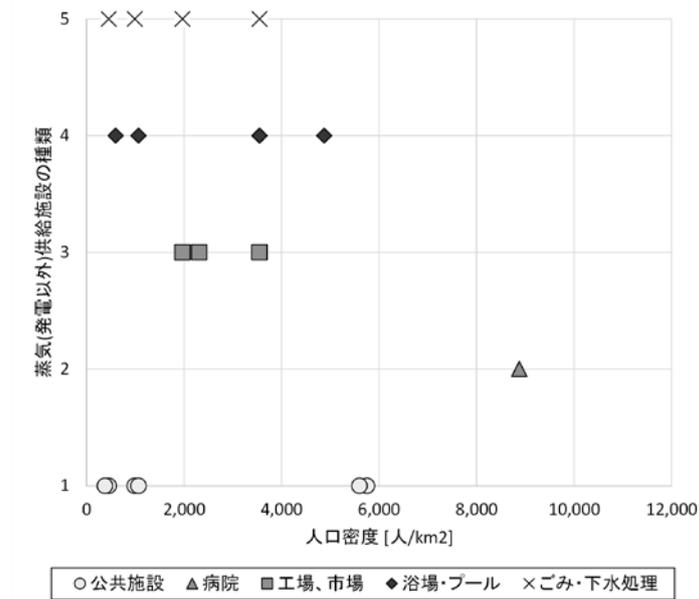


図 33 蒸気(発電以外)の外部利用先

特定の焼却施設に着目し、外部供給先との直線距離、余熱利用の余力を算出した結果を表 27 に示す。余力は、焼却施設の余熱利用(外部利用)の仕様値と実績値の割合から算出した。余力がマイナスになる場合は、便宜的に 0 とした。殆どの焼却施設は、供給先までの熱輸送距離は 1km 以内と非常に短かった。余力に着目すると、プール・浴場や福祉施設等に熱供給をしている場合は余力が多く残っていること、工場や複数の施設に熱供給をしている焼却施設は十分な熱供給が行われていることがわかった。一方、余熱利用を行っていない焼却施設にその理由を尋ねた結果、人口密度が低い地域にある焼却施設ほど、近くに需要施設がない、余熱利用できる規模でない等という回答が多かった。

表 27 余熱利用の外部供給先

| 施設 | 人口密度 [人/km²] | 外部利用量 [MJ/t] | 供給先 | 施設と供給先との 直線距離[km] | 余熱利用 の余力 [-] |
|--------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| ＜温水生産＞ | | | | | |
| A | 685 | 2,023 | プール・浴場 | 0.9 | 0.62 |
| B | 15,613 | 905 | 地域熱供給 | 0.4~1.6 | - |
| C | 15,613 | 186 | 地域熱供給 | 0.1~1.4 | - |
| D | 846 | 396 | 温室団地 | 0.1 | - |
| - | 5,755 | 50 | 福祉施設 | 0.2 | 0.37 |
| - | 51 | 293 | 福祉施設 | 0.5 | 0.00 |
| ＜蒸気生産＞ | | | | | |
| E | 2,311 | 874 | 工場 | 0.3 | 0.00 |
| F | 8,877 | 1,838 | 病院 | 0.9 | 0.53 |
| G | 3,549 | 398 | 工場、運動施設 | 0.3 | - |
| H | 1,967 | 677 | 市場、水処理施設 | 0.6 | 0.31 |
| - | 381 | 91 | 福祉施設 | 0.1 | 0.57 |
| - | 457 | 252 | 福祉施設、プール、 ごみ処理施設 | 0.3 | 0.00 |
| - | 1,967 | 20 | 工場 | 0.29 | 0.00 |

以上の結果より、熱の外部利用は人口密度とは関係なく実施されており、焼却施設の近隣に需要施設があることが主要因であること、人口密度が低い地域ほど需要地が少なく、熱生産のパフォーマンスを活かしきれていないこと、パフォーマンスを活かすためには複数の需要地があること、あるいは工場のような大口需要家の存在が条件になることが伺えた。一方で、人口密度が低い地域ほど、近隣に需要地がないこと、そしてそもそもの焼却施設の処理規模が小さいために、熱生産をすることができないことが伺えた。このような地域の場合は、焼却施設を集約化して、処理規模を大きくするとともに、焼却施設近隣に複数の需要先を確保しておくことが求められる。これはいわゆる広域処理である。また、ニュータウンのような新規需要先を建設することも一案である。熱供給に伴うコストを抑制する方法として、都市ガス供給地域では、生ごみと下水汚泥を混合でバイオガス化し、都市ガスに導管することで、家庭での熱需要を賄うことも考えられる。その一方で、高齢者にとってガス調理器は火災の危険性が高く、住宅のリフォームに伴いIH調理器に切り替えるケースがあることなどから、少子高齢化やそれに伴う家庭内のエネルギー需要の変化を予測しておく必要がある。

6) 熱供給の推進に向けた検討

a. 国内の熱供給事業の現状

i. 地域別の地域熱供給導入事例

日本熱供給事業協会の「地域熱供給導入事例」において、現在 135 件の事例が登録されている。図 34 に我が国における地域別の導入事例を示す。図より、東京都の登録状況が 64 件と最も多く、近畿地区の 22 件、関東地区（東京都を除く）の 15 件、中部地区の 13 件と続く。このうち関東地区では、千葉と神奈川の 2 県で 11 件、中部地区では愛知県が 10 件、近畿地区では大阪府と兵庫県で 19 件の登録となっており、熱供給事業は大都市圏に集中していることが分かる。

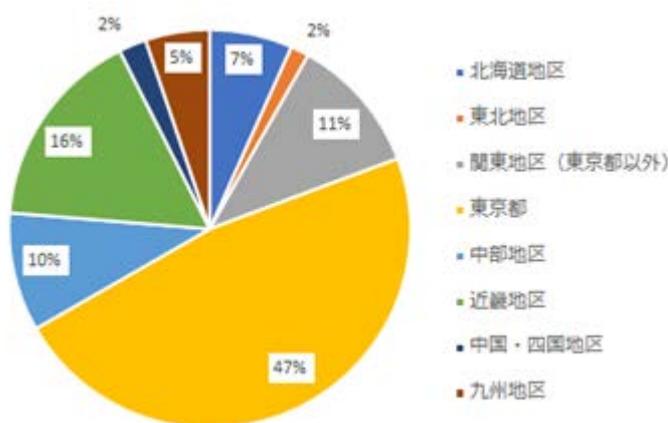


図 34 地域別の地域熱供給導入事例

(出典：日本熱供給事業協会 HP「地域熱供給導入事例」より作成)

ii. 熱供給事業者の登録状況

日本熱供給事業協会では、76の熱供給事業者が登録されている。このうちの62の事業者（全体登録事業者の約80%）については、1つの事業のみの運営に携わっている。表28に3つ以上の事業の運営に携わる熱供給事業者の一覧を示す。表より、1) 5つ以上の事業を展開する熱供給事業者はすべて三大都市圏に位置すること、2) 複数の熱供給事業を実施する事業者は殆どのケースにおいて電力・ガス事業者から出資を受けていること、などが見て取れる。

表28 熱供給事業者の登録状況（登録事業件数が3件以上のケース）

| 件数 | 熱供給事業者 | 主要株主 |
|----|----------------------|-----------------------|
| 15 | 東京ガスエンジニアリングソリューションズ | 東京ガス |
| 13 | 東京都市サービス | 伊藤忠エネクス、東京電力エナジーパートナー |
| 8 | OGCTS | 大阪ガス |
| 6 | 丸ノ内熱供給 | 熱供給エリアの地権者など |
| 5 | 東京熱供給 | 東京都、東京電力、東京ガスなど |
| | 東邦ガス | 東邦ガス |
| | 関電エネルギーソリューション | 関西電力 |
| 3 | 大阪臨海熱供給 | 大阪ガス、関西電力、住友商事 |
| | 福岡エネルギーサービス | 九州電力、西部ガス |

（出典：日本熱供給事業協会 HP「地域熱供給導入事例」より作成）

iii. 「まちづくり」の視点から見た地域熱供給

「まちづくり」の視点から地域熱供給導入事例を分類すると図35のようになる。図より、複合ビル群開発の53件が最も多く、ウォーターフロント開発（22件）、商業・文化施設（16件）、ニュータウン開発（15件）、オフィスビル開発（12件）と続く。これより、多くの熱供給事業は、基本的に安定的な熱需要が見込める「複合施設（商業・オフィスビルなど）」の開発（または再開発）事業が中心であることが分かる。

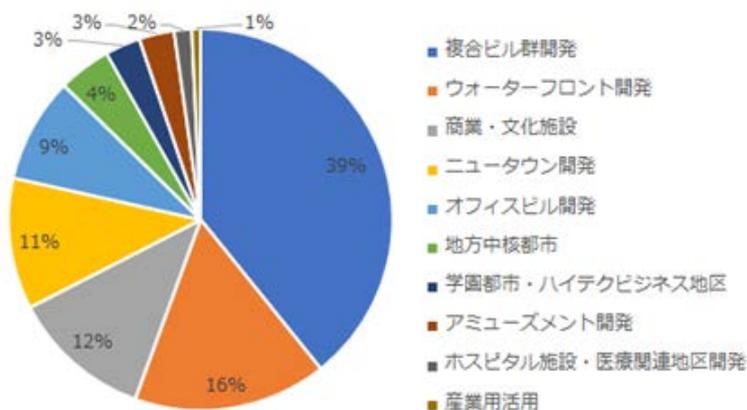


図35 「まちづくり」から見た地域熱供給導入事例の分類

（出典：日本熱供給事業協会 HP「地域熱供給導入事例 まちづくり」より作成）

iv 地域熱供給における廃棄物エネルギーの現状

地域熱供給において、天然ガスコジェネレーションの導入が 46 件と最も多く全体の 40%を占めており、再生可能エネルギー熱の有効利用が 19 件でこれに続く。廃棄物エネルギーの事例は 8 件あり、内訳は、木質バイオマスが 2 件、RDF が 1 件、ごみ焼却が 5 件となっている

b. 国・自治体による地域エネルギー事業への取組

i. 地域エネルギー政策推進上の課題と対応

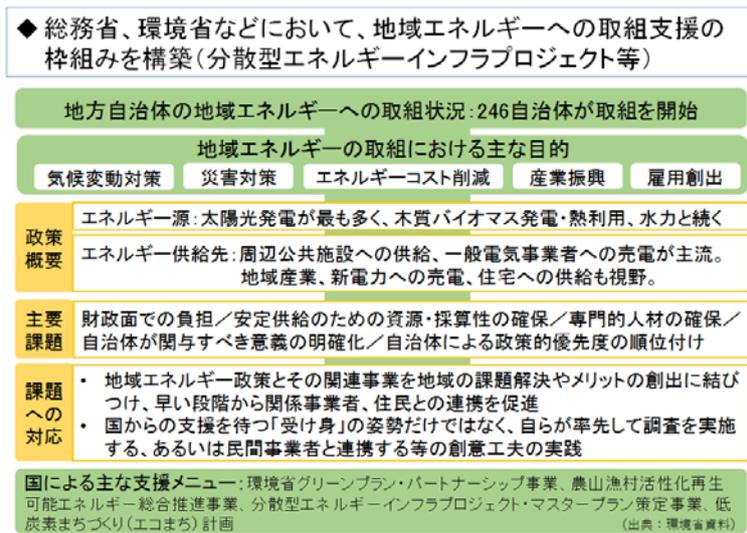


図 36 地域エネルギー政策に係る主要課題と対応策

(出典：環境省、地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた取組状況について（報告）より作成)

現在、国内では 246 自治体が地域エネルギーに関する取り組みを開始している。これらの概要について図 36 に整理する。また、ここでは図 36 における「主要課題」と「課題への対応」について、より詳細を理解するため、表 29 に環境省資料²⁷⁾に整理された地域エネルギー政策推進上のプロセスごとの課題や、各課題に対する対応策の方向性を示す。国による主な支援メニューの概要については表 30 に示す。

表 29 地域エネルギー政策推進上の課題と解決に向けた方向性

| | | 政策推進の段階 | | | |
|-------|---------|---|---|--|---|
| | | 準備段階 | 構想・計画策定段階 | 構想・計画実現段階 | 事業等開始後段階 |
| 課題の種類 | 財政面での負担 | <ul style="list-style-type: none"> 課題：○ 対策の方向性：国による構想・計画等策定費用の支援の活用 | <ul style="list-style-type: none"> 課題：○ 対策の方向性：国による構想・計画等策定費用の支援の活用 | <ul style="list-style-type: none"> 課題：○ 対策の方向性：a) 国による FS 調査、設備導入支援メニューの活用 b) 民間企業との連携強化 | <ul style="list-style-type: none"> 課題：△ 対策の方向性：民間企業との連携強化 |
| | 資源確保 | <ul style="list-style-type: none"> 課題：○ | <ul style="list-style-type: none"> 課題：○ | <ul style="list-style-type: none"> 課題：○ | <ul style="list-style-type: none"> 課題：△ |

| | | | | |
|-------------|--|--|---|---|
| 保・採算性の確保 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>対策の方向性</u> : a) 国が提供するポテンシャル情報の活用 b) 国が整備する採算性を簡易確認できるツールの活用 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>対策の方向性</u> : a) 国が提供するポテンシャル情報の活用 b) 国が整備する採算性を簡易確認できるツールの活用 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>対策の方向性</u> : a) 国による FS 調査、設備導入支援メニュー活用 b) 企業・自治体と連携した需給先確保 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>対策の方向性</u> : a) 民間企業との連携 b) 周辺自治体との連携 |
| 専門的人材の確保 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : ○ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 民間企業との連携強化（人事交流、構想策定、発信面でのコンサルタントの活用） b) 国・都道府県等との人事交流 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : ○ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 民間企業との連携強化（人事交流、構想策定、発信面でのコンサルタントの活用） b) 国・都道府県等との人事交流 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : ○ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 民間企業との連携強化 b) 地元関係者との連携強化 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : △ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 民間企業との連携強化 b) 地元関係者との連携強化 |
| 自治体関与の意義 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : ○ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 経済分析を含めた自地域の分析 b) 関連情報の収集 c) 構想・計画策定を通じた合意形成 | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : △ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 経済分析を含めた自地域の分析 b) 関連情報の収集 c) 構想・計画策定を通じた合意形成 | - | - |
| 政策的優先度の順位付け | <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>課題</u> : ○ ・ <u>対策の方向性</u> : a) 経済分析を含めた自地域の分析 b) 関連情報の収集 | - | - | - |

(○：課題が顕著、△：課題が残る、-：特に課題はない)

(出典：環境省、地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた取組状況について（報告）より作成)

表 30 国による主な支援メニューの概要

| 事業名称 | 担当省庁 | 予算規模 | 事業目的 | 支援概要 |
|--|-------|--------------------------------|---|--|
| 先導的「低炭素・循環・自然共生」地域創出事業（グリーンプラン・パートナーシップ事業） | 環境省 | 53 億円 | 地域の再生可能エネルギーの導入、省エネを促進等して、「低炭素・循環・自然共生」地域の創出を図る | <ul style="list-style-type: none"> 地方自治体、民間団体に対し、地方公共団体実行計画（区域施策編）に位置付けられた再エネ・省エネ設備導入のための FS 調査・事業化計画策定支援等 FS 調査から検討まで含め、取組内容を HP でとりまとめて発信 |
| 農山漁村活性化再生可能エネルギー総合推進事業 | 農林水産省 | 2013 - 2014 年度:総額 2 億 4,000 万円 | 地域の資源を活用した再生可能エネルギーを導入し、そのメリットを地域に還元して地域活性化に寄与する | <ul style="list-style-type: none"> 農林漁業者やその組織に対して、事業構想の作成、導入可能性調査等の支援（定額支援） 個別相談に対応したワンストップ窓口の設置 ワークショップの開催 |
| 分散型エネルギーインフラプロジェクト・マスタープラン策定事業 | 総務省 | 2014 年度:6 億 1,000 万円 | 地域の自立的で持続可能なエネルギーシステムの構築と地域経済循環の創出のために分散型エネルギーインフラ導入を支援する | <ul style="list-style-type: none"> 地方自治体に対し、地域内需要量調査、供給能力調査、エネルギーインフラプロジェクト基本構想策定、事業構造の設計と想定投資額の試算等を支援 「自治体主導の地域エネルギーシステム整備研究会」の開催による検討状況の公表 |
| 低炭素まちづくり（エコまち）計画 | 国土交通省 | | 地球温暖化問題への対応を含め、市民生活を支える持続可能で活力ある都市づくり、地域づくりを進める支援をする | <ul style="list-style-type: none"> 地方自治体の低炭素まちづくり計画策定の支援、コーディネート支援等 地方自治体向けの参考書として「低炭素まちづくり計画作成マニュアル」や「低炭素まちづくり実践ハンドブック」を発行 |

（出典：環境省、地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた取組状況について（報告））

ii. 分散型エネルギーインフラプロジェクトにおける産業セクターの熱・電供給システムの構築

表 30 に示した総務省が推進する「分散型エネルギーインフラプロジェクト」では、主な目的として、1) エネルギーの地産地消による自立的で持続可能な災害に強い地域分散型のエネルギーシステムの構築、2)

電力の小売自由化における地域経済の好循環の創出、3) 林業の振興等を含め、広く地域の雇用を創出、が挙げられている。最近の同プロジェクトの実施状況は以下のとおりである。

- ・ 2013年度は、予備調査として、ビジネスモデルを10パターンに整理し、該当する31団体についてプロジェクトの導入可能性調査を実施
- ・ 2014年度には、抽出した14団体のプロジェクトを4つのタイプに分類して、電力の小売自由化を踏まえた地域経済循環を創出するためのマスタープランの策定、事業実施体制の構築等を実施
- ・ 自治体主導の地域エネルギーシステム整備研究会(2014年11月～2015年11月)での議論を経て、2017年度以降、事業化を推進

ここで、2014年度のマスタープラン策定中の14自治体の資料に基づき、各自治体の取組は、次の4つのタイプに分類された(表31参照)。

表31 分散型エネルギーインフラプロジェクト タイプ別分類

| 分類 | | 事業展開 | 該当自治体 |
|---------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. 自立循環型 | 間伐材等のエネルギー源から最終需要まで、当該地域内の自立循環を目指すタイプ | 離島や中山間地の集落等における自立完結的なエネルギーシステムの構築 | 長崎県対馬市、北海道下川町 |
| 2. タウンリニューアル型 | 熱導管ネットワークエリアでの地域再開発による需要の集約化とサービス・イノベーションを伴うタイプ | 市街地中心部におけるコンパクトシティ化と併せて推進 | 青森県弘前市、鳥取県鳥取市、山形県、大阪府四条畷市 |
| 3. 既存ニーズ先導型 | 重油ボイラー等の既存ニーズを振り替えることで、基本的な需要を確保しながら地域に応じたサービス・イノベーションを伴うタイプ | 工業団地や温泉街等の需要をベースに近隣の市街地でのサービス拡大 | 鳥取県米子市、栃木県、鹿児島県いちき串木野市、北海道石狩市、静岡県富士市 |
| 4. 地域開発型 | 熱導管ネットワーク構築等を軸に、観光、移住、高齢者福祉等による地域開発を伴うタイプ | 熱導管ネットワーク沿いに各種施設整備を含んだ地域開発計画とともに推進 | 岩手県八幡平市、群馬県中之条町、兵庫県淡路市 |

(出典：総務省「自治体主導の地域エネルギーシステム整備研究会 第2回資料」より作成)

このうち、3.の既存ニーズ先導型に属する栃木県では、以下の取組を進めている(表32参照)。これは産業構造に応じた効果的な地域エネルギー需給管理システムを検討する上で参考となるため、当該取組の具体的内容について記載する。

表 32 栃木県・工業団地を中心とした地域の産業構造に根差したエネルギー事業の概要

| 主な諸元 | 経済循環ストーリー | 成否に係るキーファクター |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ ガスコジェネレーション ・ 木質バイオマスボイラー | <ul style="list-style-type: none"> ・ ガスコジェネの余熱と木質バイオマスボイラーを併用し、工業団地内で熱需要のある工場と近接の農業施設群へ熱供給を行う熱インフラを構築 ・ 県が実施するメリットを生かし、工業団地内の企業の一元化、広範囲にわたる間伐材等のバイオマス資源の調達とチップ加工の販路開拓を行うモデルを構築 ・ 県市が共同して近接の住宅団地等の新たな需要先の開拓も行い、コンパクトシティ化へとつなげる | <ul style="list-style-type: none"> ・ 清原工業団地内での意見集約 ・ 近隣の農地や住宅地への供給が拡大できるか |

(出典：総務省「自治体主導の地域エネルギーシステム整備研究会 第2回資料」より抜粋)

表 33 清原工業団地の地域エネルギー事業の概要

| |
|---|
| <p>【清原工業団地（栃木県宇都宮市）における地域エネルギー事業】</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 既存ニーズ先導型：民間主導での事業化を指向 <ul style="list-style-type: none"> ・ カルビー、キャノン、久光製薬と東京ガスエンジニアリングソリューションズ（TGES）は、工業団地内の隣接する既存7事業所における省エネ・CO₂削減及びBCP（事業継続計画）の強化を目的とした電力と熱（蒸気や温水）の供給契約を締結 ・ TGESは3万kW級のガスコジェネレーションシステムを備えた「清原工業団地エネルギーセンター（仮称）」及び電力自営線などの供給インフラの建設に2016年10月より着手し、2019年1月の竣工を目指す ➤ 国内初の「工場間一体省エネルギー事業」 <ul style="list-style-type: none"> ・ 概略設備仕様）コジェネレーション：3万kW級、ガス焚き貫流ボイラー：45t/h級 ・ 概略供給量）供給先：工業団地7事業所、電力需要：188,000MWh/年、蒸気需要：96,000t/年、温水需要：88,000GJ/年、熱導管総延長：25,050m ・ 内陸型工業団地で「異業種複数事業所向けに電力と熱を合わせて供給する」取組 ・ 時間や時期により異なる異業種複数事業所の電力と熱の需要情報をエネルギーマネジメントシステムに集約 ・ 電力と熱を効率的に供給することで、事業所単独では実現できない規模の環境負荷低減を可能とし、約20%の省エネ及びCO₂排出量の約20%削減を見込む ・ さらに、ガスコジェネにブラックアウトスタート仕様の採用により、停電時における各事業所への電力と熱の供給が可能となり、供給安定性が向上 ➤ 事業実施に至るまでの経緯とステークホルダーの役割分担（概要） |
|---|

- ・ 2012年：工場間一体省エネルギー事業の構想検討（東京ガス）
 - ・ 2013年：工業団地内のエネルギー調査（栃木県実施、協力：東京ガス）
 - ・ 2014年：マスタープラン策定（栃木県実施、協力：東京ガス）
 - ・ 2015年：詳細事業性評価（東京ガス、TGES）
 - ・ 2016年：実施確定（カルビー、キヤノン、久光製薬、東京ガス、TGES）⇒基本契約書締結、補助金申請・採択（経産省）
- 清原工業団地において当該事業が推進された理由：強い省エネニーズを持つ需要家、安定した熱需要（蒸気・温水）の存在、整備された都市ガス供給インフラ、確保可能な建設用地といった「地の利」をベースとして、以下の3要素が加わったことが重要な事業推進要件となった。
- ・ 地元自治体の支援：
 - ✓ 当該事業が栃木県にて策定された東日本大震災を契機とした内陸部における災害に強い地域づくりなどを目標に掲げる「とちぎエネルギー戦略」に合致。
 - ✓ 栃木県にて事業プランニングを主体的に行い、需要家各社に対して「分散型エネルギー施策」の重要性を積極的に発信。民間が事業化を円滑に推進できる環境を醸成。
 - ・ 事業推進者（サードパーティー）の存在：
 - ✓ 東京ガスが事業化の推進役として、需要先の各事業所のエネルギー需要を調査・取りまとめ、最大限の省エネ・省コストが図れる最適システムの構築、提案を実施。
 - ✓ 詳細な事業検討内容に加えて、TGESの地域冷暖房など面的供給の豊富な建設・運用実績に基づき、関係者相互の強い信頼関係構築のもと事業化を推進。
 - ・ 国の政策による後押し：
 - ✓ 事業プランニング段階において利用可能な補助制度の存在と、事業実施段階で利用した補助制度における「工場間一体型省エネルギー事業」への対象拡大。
 - ✓ 面的なエネルギー供給に対する需要先における適切な評価方法の確立。

（出典：東京ガス資料²⁸⁾²⁹⁾より作成）

iii. 廃棄物エネルギー導入に関する支援

産業団地における清掃工場の排熱利用について、ここでは一般廃棄物に係るごみ焼却施設の余熱利用、発電設備の現状に関する基本的な情報を整理する。また、高効率な廃棄物発電施設整備事業に対する支援措置など、廃棄物エネルギー導入促進に向けた動向を把握する。

表 34 ごみ焼却施設の現状（2014年度末現在）

| | | |
|---|--------------|----------------------|
| 【概況】 | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・ ごみ焼却施設数は減少。1施設当たりの処理能力は微増。 ・ 発電設備を有する施設は全体の29.1%。総発電能力は増加。 | | |
| 施設数 | 1,162 施設 | 前年度 1,172 施設 (0.9%減) |
| 処理能力 | 183,511 トン／日 | 前年度 182,683 トン／日 |

| | | |
|--------------|------------|-----------------------|
| 1 施設当たりの処理能力 | 158 トン／日 | 前年度 156 トン／日 |
| 余熱利用を行う施設数 | 764 施設 | 前年度 778 施設 |
| 発電設備を有する施設数 | 338 施設 | 前年度 328 施設（全体の 29.1%） |
| 総発電能力 | 1,907 千 kW | 前年度 1,770 千 kW（7.7%増） |

（出典：環境省、一般廃棄物の排出及び処理状況等（平成 26 年度）について）

表 35 廃棄物発電に関する国の主な施策

| <p>【主な目標：廃棄物処理整備計画（2013 年 5 月閣議決定）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 期間中に整備されたごみ焼却施設の発電効率の平均値：16%（2012 年度見込み）⇒21%（2017 年度） ・ 循環型社会形成推進基本法に基づくごみの循環的利用及び処分の基本原則に基づいた上で、焼却せざるを得ない廃棄物について、最近の熱回収技術の進展を踏まえ、一定以上の熱回収率を確保しつつ、熱回収を行い、地域の廃棄物処理システムの省エネルギー化・創エネルギー化に貢献 | |
|---|--|
| 主な支援施策 | 概要 |
| 循環型社会形成推進交付金制度 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 計画策定の対象地域は人口 5 万人以上又は面積 400km² 以上の地域を構成する市町村を対象とする ・ 交付対象施設にエネルギー回収施設（ごみ発電施設、熱回収施設、バイオガス化施設等）を含む ・ 交付率は交付対象経費の 1/3。ただし、高効率ごみ発電施設等の一部の先進的な施設については 1/2 ・ なお「高効率エネルギー利用」に関しては、「従前の高効率ごみ発電施設よりも、さらに先進的な高効率エネルギー利用（ごみ発電、メタン回収、熱供給、省エネ等）を実現する施設」を、交付率 1/2 の交付対象とする |
| 廃棄物熱回収施設設置者認定制度 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄物処理法に基づく一般廃棄物又は産業廃棄物処理施設であって、熱回収施設を設置している者（市町村を除く）は、環境省令で定める基準への適合について、都道府県知事等の認定を受けることができる ・ 認定を受けることで、廃棄物を保管できる日数が 21 日まで認められること、廃棄物処理法に基づく定期検査の義務が免除されること等のメリットがある |
| 再生可能エネルギーの固定価格買取制度 | <ul style="list-style-type: none"> ・ FIT においてバイオマス発電の一つとして廃棄物発電を位置づけ ・ 一般廃棄物・その他バイオマスの 2016 年度調達価格は 1kWh あたり 17 円＋税、調達（買取）期間は 20 年。 ・ なお、廃棄物発電のうち FIT の適応対象となるのはバイオマス分のみであり、バイオマス比率の算定の効率化について課題がある |

（出典：環境省、資源エネルギー庁資料等から作成）

c. 海外における地域エネルギー事業の動向

i. ドイツにおける地域エネルギー管理の概要（シュタットベルケ）

総務省の「地域の元気創造プラン」では、超高齢化・人口減少社会における持続可能な都市・地域の形成を目的とする「民間活力の土台となる地域活性化インフラプロジェクト」として、表 36 に示す取組を進めている。ここでシュタットベルケ（図 37、表 37 参照）は、表の「機能連携広域経営型」の参考となる地域インフラ整備の政策的枠組みとして紹介されている。

表 36 「民間活力の土台となる地域活性化インフラプロジェクト」（総務省）の概要

| プロジェクト | 連携省庁 | 取組概要 |
|--------------|------------|--|
| 分散型エネルギーインフラ | 資源エネルギー庁 | <ul style="list-style-type: none"> 電力の小売自由化を踏まえた地域経済循環を創出 2-2. (2)に内容整理 |
| 公共クラウド | 観光庁、中小企業庁等 | <ul style="list-style-type: none"> 自治体の保有する観光・産業支援・環境等のデータを広く構築し（オープンデータ）、民間サービスの創出を促進（2014 年度に実運用を開始） |
| 機能連携広域経営型 | 関係各省庁 | <ul style="list-style-type: none"> 相当の人口規模と中核性を備える「地方中枢拠点都市」が、圏域全体の経済成長と利便性の向上を強力にけん引し、近隣市町村の住民ニーズにも対応できるよう、地方自治法の改正等を準備中 市町村域を越えて医療や公共交通等を確保する定住自立圏において、産業振興等にも重点をおき、圏域内の経済循環の促進に取り組む |

（出典：総務省資料「地域の元気創造プランの進捗状況について」より抜粋）

- ◆ 上水道、電気、ガス、熱等の需要家（家庭・産業・業務）への供給事業を広域で集約・連携（独国内で約900団体）
- ◆ 各自治体の地域経営の大きな手段（電力自由化:1998、送電会社の法的分離:2009）→地域の経済循環と雇用を創出

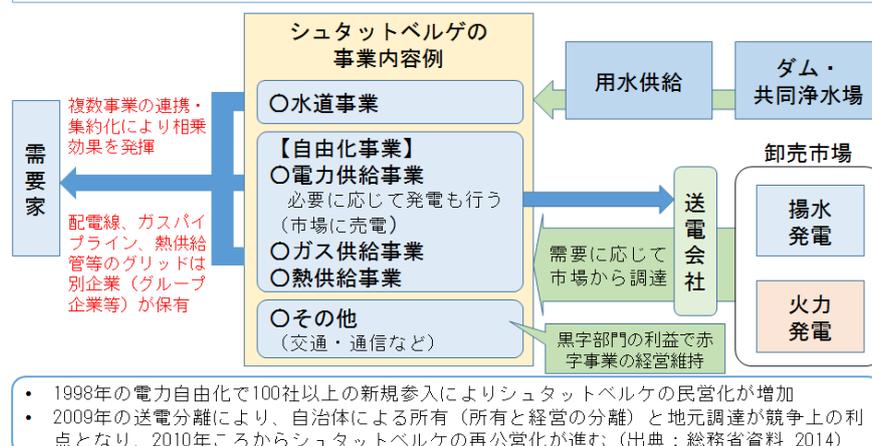


図 37 ドイツのシュタットベルケの概要（出典：総務省資料「分散型エネルギーインフラプロジェクトについて、2014」より作成）

表 37 シュタットベルケの事業の特色

| | 事業概要 ⇒自治体の意向を踏まえ、次のような住民に必要なライフラインの維持・運営を担う |
|---------|---|
| 電力供給事業 | ・ 自身の持つ電力の単価と卸売市場の取引額を比較し、需要とのバランスを見ながら、最適調達を行うことでコスト削減を実現したうえ、一般家庭に供給 |
| 熱供給事業 | ・ ガスボイラーや木質バイオマスボイラー等を活用 ・ 需要家に近接した電源を所有することから、その発電所から発生した排熱を活用する地域コジェネとして行うものもある ・ 1970年代に国策として熱供給管を整備済のため、償却コストが小さい |
| ガス等供給事業 | ・ ガス供給や通信設備の維持・運営を行うものもある |
| 上水道事業 | ・ 自己所有のダム、共同浄水場など様々な水源から用水を確保し、一般家庭に供給（一般に地域での独占事業） |
| 市内交通事業 | ・ 地域に資する事業のため運営 ・ 赤字分は黒字部門から補填することで経営を維持 |

（出典：総務省資料³⁰⁾より抜粋）

本調査では、シュタットベルケの地域エネルギーに係る事業が検討対象となる。松井（2013）³¹⁾はドイツのシュタットベルケの事例に基づき、日本の地域エネルギー事業振興に向けた提案を整理している（表38）。総務省、経済産業省、環境省などの関連省庁のさまざまな取組により、以下の「日本の地域エネルギー事業振興に向けた条件」は整いつつあると考えられる。

表 38 シュタットベルケの事例に基づく日本の地域エネルギー事業振興に向けた提案

| 【日本の地域エネルギー事業振興に向けた条件整備】 | |
|--------------------------|--|
| ➤ 自治体関与による地域事業者の育成支援 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本において地域エネルギー事業を立ち上げる際、技術・ノウハウを持つ企業の支援を得ることが必要であるが、ここで <u>地域としての主体性を失わない</u>ことが重要 ・ この主体性の確保において、シュタットベルケのように地域エネルギー事業に <u>自治体が出資</u>することが有効（企業に対する地域の交渉力強化、公共調達の経験の活用） ・ 同時に、<u>自治体自らがエネルギー事業への需要家になる</u>ことで、ベース需要の確保につながり、事業の円滑な立上げに貢献することができる |
| ➤ 地域事業を推進できるための規制緩和 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地域でのエネルギー事業を立ち上げるには、事業推進上の制約を除くための <u>規制緩和</u>が重要 ・ 規制緩和のための検討事項（例）を以下に示す <ul style="list-style-type: none"> ✓ 熱供給事業法対象外の事業における道路占有許可に係る課題の克服 ✓ 電力供給に係る既存の各種規制の徹底的な緩和 ✓ 配電網内の託送に関する料金の低減 など |
| ➤ インフラ整備の支援 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地域エネルギー事業は、地域資源の有効利用や地域での経済的な貢献のみならず、庁舎・病院な |

ど公共施設を中心に地域のエネルギーセキュリティを高める

- ・ ただし、エネルギー事業の枠組みに完結した従来の資金回収への固執は、多様なエネルギー供給のあり方を制約する
- ・ 地域にメリットがあるのであれば、エネルギー事業に用いられる資産でも、道路、上下水道、などエネルギー以外の地域の資金が投入されることも模索されるべき（柔軟な公費投入のあり方の検討促進）

（出典：松井（2013）³¹⁾より作成）

ii. イギリスにおける熱版 FIT の事例

図 38 にイギリスの熱版 FIT の概要を示す。非家庭部門に対して 2011 年から、家庭部門に対しては 2014 年から RHI (Renewable Heat Incentive) の制度の運用が開始された。2011 年以降、再生可能熱エネルギーの利用が増加傾向にある。また、熱供給技術については固形バイオマス燃焼が殆どを占めており、表 39 から多くが木質バイオマスを燃料とするものであることが分かる。

熱版FIT: イギリスでの先行事例 (Renewable Heat Incentive, RHI)

- ◆ 英国・気候変動法(2008) : 2050年CO2排出削減90%(1990比)
- ◆ 英国・再生可能エネルギー行動計画(2010)
 - 冷暖房・熱: 1%(2010)→12%(2020)
 - 英では再生可能熱利用水準が他EU諸国に比べ非常に低い

熱版FIT (RHI): 再生可能熱と化石燃料による熱生産コスト差の縮減が狙い
(非家庭部門: 2011.11-、家庭部門: 2014.04-)

| 熱供給の技術 | 非家庭用 20年間 | | 家庭用 7年間 助成率 p/kWh |
|-----------|------------|------------------------------|-----------------------------------|
| | 熱出力 kW | 助成率 p/kWh (1ペニー: 約1.7円) | |
| 小規模バイオマス | ~ 200 | 8.6 (tier 1), 2.2 (tier 2)** | 12.2 |
| 中規模バイオマス | 200 ~ 1000 | 5.0 (tier 1), 2.1 (tier 2)** | |
| 大規模バイオマス | 1000 ~ | 1.0 | |
| 小規模ヒートポンプ | ~ 100 | 4.8 | ASHP (大気熱) 7.3 GSHP (地中熱) 18.8 |
| 大規模ヒートポンプ | 100 ~ | 3.5 | |
| 太陽熱 | ~ 200 | 9.2 | 19.2 |
| バイオメタン/ガス | ~ 200* | 7.3 | - |

*出力制限はバイオガスのみ

** 小規模のバイオマスの場合、Tier break (設置容量kWh×1.314)まではtier 1、これを超えた場合tier2が適用される

(出典: 週刊環境ビジネスオンライン 2014.3.3 掲載記事)

非家庭用
2011.11-2013.12の実績
熱出力総計: 約70万kW
熱供給技術:
固形バイオマス燃焼
ボイラが殆ど

図 38 イギリスにおける熱版 FIT の制度概要

(出典: 週刊環境ビジネスオンライン記事より作成)

なお一般廃棄物の焼却排熱の利用については、イギリスの RHI では非家庭部門での支援対象となっている (表 39 参照 (廃棄物に該当する箇所を青字で表示))。

表 39RHI における非家庭部門の支援対象

| エネルギー源 | 技術固有の要件 | 規模要件 |
|----------------------|---|---|
| 固形バイオマス | <ul style="list-style-type: none"> バイオマス専焼として設計・設置されたボイラーであること 固形バイオマスで熱生産すること | <ul style="list-style-type: none"> 設備容量制限なし ただし、45kWth 以下の設備は MCS 認証*が必要 |
| 固形バイオマス (都市固形廃棄物を含む) | <ul style="list-style-type: none"> 非都市固形廃棄物を含む固形バイオマスにより熱生産しないこと | <ul style="list-style-type: none"> 設備容量制限なし |
| 地中熱ヒートポンプ及び水熱ヒートポンプ | <ul style="list-style-type: none"> 自然起源エネルギーであること 成績係数 (COP) が 2.9 以上 循環型ヒートポンプは熱のみを計測し、冷却は計測しないこと 地表面より 500m 以下に位置し、抽出するエネルギーを使わないこと | <ul style="list-style-type: none"> 設備容量制限なし ただし、45kWth 以下の設備は MCS 認証*が必要 |
| 地熱 | <ul style="list-style-type: none"> 地表面より 500m 以下に位置し、抽出する自然起源エネルギーにより熱生産を行うこと | <ul style="list-style-type: none"> 設備容量制限なし |
| 太陽熱 | <ul style="list-style-type: none"> 集熱器の形式が平板型もしくは真空管型 | <ul style="list-style-type: none"> 200kWth 未満の設備 ただし、45kWth 以下の設備は MCS 認証*が必要 |
| バイオガス燃焼 | <ul style="list-style-type: none"> 嫌気性消化、ガス化、熱分解起源 埋立ガス起源バイオガスは使用不可 固形バイオマスの熱生産がないこと | <ul style="list-style-type: none"> 200kWth 未満の設備 |
| コージェネレーション | <ul style="list-style-type: none"> 以下のいずれかの技術であること 地熱、バイオガス、固形バイオガス (都市固形廃棄物を含む) | |

*設備容量 45kWth 以下の固形バイオマス、地中熱/水熱ヒートポンプ、太陽熱設備は、Microgeneration Certificate Scheme (MCS) と呼ばれる産業界主導の独立の認証プログラムを用いて設備認定を行うことが要件となっている

(出典：環境省資料「諸外国の再生可能エネルギー熱政策、2014」)

iii. イギリス熱版 FIT (RHI) の運用面での課題

熊崎 (2016)³²⁾は RHI の助成率見直しの仕組み (遁減措置 (Degression Mechanism)) について次のように述べている。

- ・ RHI の補助金は政府の税収で賄われており、助成率は 4 半期ごとに見直される
- ・ 熱供給技術の種類ごとに 4 半期で活用可能な予算の配分額が設定される
- ・ 各熱供給技術に対する予想される支出額がそれらの予算配分額を大きく超えそうな状況になれば、新たに認可されるボイラーへの助成率が機械的に引き下げられる (既存の認可ボイラーへの支払いが優

先され、新規のボイラーに充てられるのはその予算の残額となる)

表 40 に RHI の非家庭部門の小規模バイオマスに対する最近の助成率の変化を示す。表より、小規模バイオマスに対する助成率において、通減措置が適用されたのは 2014 年の 4 月であり、同年 7 月から助成率の通減が見られる。約 2 年間で助成率が半以下になっていることから、小規模バイオマスにおいては初期に応募者が殺到し、予算配分額との関係から急激な助成率の低下につながったと考えられる。このため、今後の RHI に対する新規応募数の減少などが懸念される。

日本において熱版 FIT を検討する際にも、助成率の見直し方法など、現在の再生可能エネルギーを対象とする FIT の経験に基づいて対応策を考える必要がある。

表 40 RHI（非家庭部門）の小規模バイオマスに対する助成率の変化

| 改定助成率の発効年月 | | 当初 | 2014 | | 2015 | | | | 2016 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | Jul. | Oct. | Jan. | Apr. | Jul. | Oct. | Jan. |
| Tire 1 | 助成率 | 8.94 | 8.53 | 7.72 | 6.91 | 5.87 | 4.40 | 4.18 | 3.76 |
| | 通減率* | - | 5% | 10% | 10% | 10% | 25% | 5% | 10% |
| Tire 2 | 助成率 | 2.34 | 2.22 | 2.03 | 1.83 | 1.56 | 1.17 | 1.11 | 1.00 |
| | 通減率* | - | 5% | 10% | 10% | 10% | 25% | 5% | 10% |

*通減率：前改定時の tariff からの引き下げ率

(出典：熊崎実、英国版「熱の固定価格買取制度」その後の展開（前編）、環境ビジネスオンライン、2016)

8) 地域熱供給の設計のための方法論

a. 焼却排熱の産業利用の設計と評価

i. 1 事業所当たりのエネルギー消費量が多い業種の抽出

産業向け熱利用工場の選定条件として、産業用の中でも製造業とし、安定的な熱利用が期待できない農業、鉱業、建設業等の非製造業、及び運輸業、卸売業、宿泊業等の業務部門は除く。製造業の業種ごとのエネルギー消費量と事業所数を集計した資料³³⁾から 1 事業所当たりのエネルギー消費量を算出し、エネルギー消費量（電気、燃焼熱も含む）の多い業種を抽出する。

抽出した業種について、各製造プロセスで必要とされる温度やエネルギー量の情報から、蒸気で供給可能な蒸気、温水、冷水を使用しているプロセスを抽出する。熱利用は 300℃以下の温度域で、焼成など 500℃以上での熱利用の工程は対象外とする。各製造プロセスにおける熱利用情報から 1 事業所当たりの蒸気による供給可能量を算出する。製造業の業種ごとのエネルギー消費量（電気、燃焼熱も含む）を表 41 に示す。ここには、事業所数と 1 事業所当たりのエネルギー消費量の値も示す。

表 41 業種別エネルギー消費量と事業所数¹⁷⁾ (2007 年度) 凡例：網掛け部は 250 TJ/年以上

| 業種 エネルギー種類 | | | | | | | | 単位: GJ/年 | |
|------------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|----------------|----------|----------------------|
| | 石油系燃料 | LPガス | 都市ガス | 石炭・コークス | 電力 | その他 | 合計 | 事業所数(件) | 1事業所当たりの エネルギー使用量 |
| 食料品(食材加工品) | 22,891,288 | 14,395,460 | 16,460,946 | 767,748 | 22,618,647 | 2,773,956 | 79,908,045 | 2,535 | 31,522 |
| 食料品(調理品(中食)) | 12,616,749 | 7,934,193 | 9,072,605 | 423,151 | 12,466,480 | 1,528,892 | 44,042,070 | 1,516 | 29,051 |
| 食料品(調味料) | 23,912,281 | 15,037,524 | 17,195,134 | 801,991 | 23,627,479 | 2,897,880 | 83,472,089 | 508 | 164,315 |
| 食料品(パン・菓子) | 16,818,721 | 10,576,654 | 12,094,210 | 564,081 | 16,618,405 | 2,038,085 | 56,710,156 | 1,427 | 41,142 |
| 食料品(冷凍食品) | 4,531,599 | 2,849,750 | 3,258,637 | 151,985 | 4,477,627 | 549,137 | 15,818,735 | 674 | 23,470 |
| 飲料・たばこ・飼料(清涼飲料) | 11,127,355 | 3,818,118 | 11,950,569 | 427,552 | 9,888,032 | 790,549 | 38,002,175 | 208 | 182,703 |
| 飲料・たばこ・飼料(酒類) | 7,442,947 | 2,553,891 | 7,993,585 | 285,984 | 6,613,980 | 528,788 | 25,419,175 | 265 | 95,921 |
| パルプ・紙・紙加工品 | 132,752,340 | 3,733,359 | 55,652,276 | 134,392,807 | 138,213,078 | 225,060,135 | 689,803,995 | 1,557 | 443,034 |
| 化学工業(無機化学) | 209,933,228 | 8,315,918 | 13,809,888 | 70,601,566 | 94,269,170 | 20,993,323 | 417,923,093 | 237 | 1,763,389 |
| 化学工業(有機化学) | 1,928,913,529 | 264,285,130 | 62,373,503 | 475,977,779 | 90,161,192 | 28,479,148 | 2,850,190,281 | 456 | 6,250,417 |
| 化学工業(医薬品) | 131,363,503 | 7,286,531 | 42,276,435 | 0 | 56,067,481 | 0 | 236,993,950 | 519 | 456,636 |
| 石油製品・石炭製品 | 657,942,367 | 39,905,888 | 3,792,062 | 9,032,394 | 48,027,436 | 61,036 | 758,761,183 | 98 | 7,742,461 |
| プラスチック製品 | 25,670,067 | 6,345,521 | 14,180,551 | 1,495,046 | 69,817,682 | 34,491 | 117,543,358 | 3,192 | 36,824 |
| ゴム製品 | 9,893,865 | 125,644,142 | 13,848,265 | 0 | 16,557,198 | 812,603 | 166,756,073 | 631 | 264,273 |
| 窯業・土石製品(ガラス・同製品) | 36,798,594 | 7,635,205 | 9,676,719 | 52,820,628 | 23,117,643 | 4,738,641 | 134,787,430 | 356 | 378,616 |
| 鉄鋼業 | 144,821,235 | 27,081,519 | 112,562,000 | 3,014,537,866 | 283,180,352 | 615,883,374 | 4,198,066,346 | 1,272 | 3,300,367 |
| 非鉄金属 | 34,944,021 | 12,782,257 | 17,296,645 | 10,923,064 | 54,212,455 | 1,414,472 | 131,572,914 | 835 | 157,572 |
| 一般機械器具 | 18,681,853 | 9,212,297 | 17,323,092 | 372,318 | 86,303,786 | 197,174 | 132,090,520 | 6,660 | 19,833 |
| 電子部品・デバイス・電子回路 | 17,009,612 | 6,809,662 | 30,065,601 | 0 | 110,831,883 | 7,424 | 164,724,182 | 2,196 | 75,011 |
| 輸送用機械器具(自動車) | 27,447,478 | 20,227,849 | 67,080,556 | 15,327,904 | 114,123,206 | 31,553 | 244,238,546 | 2,988 | 81,740 |
| 合計 | 3,475,512,633 | 596,430,870 | 537,963,279 | 3,788,903,862 | 1,281,193,210 | 908,820,462 | 10,588,824,316 | 28,130 | 376,425 |

< 目安とする消費熱量 >

熱供給量のおおよその規模を設定するため、平均的な規模の製造工場が立地する都市として、中規模以上の都市（10 万人以上の都市圏）に設置される廃棄物焼却施設を想定する。

廃棄物焼却施設の規模 = 100 t / 日以上 (100,000 人 * 0.958kg / 日 * 人³⁴⁾ = 95,800kg / 日) 式 17

ごみの低位発熱量を国内平均の 8,953kJ/kg、ボイラー熱回収率を 85%、場内熱利用率を 50%、実負荷運転 70% の場合の廃棄物焼却施設からの供給熱量（目安とする最低の熱量）を次式で求める。ここで求めた熱量よりも多い業種を選定する。

目安の熱量：100 t / 日 / 24h * 8,953kJ/kg * 1,000kg / t * 0.85 * 0.5 * 0.7 = 11.1GJ/h (88TJ/年) 式 18

12 業種の内、表 41 の食品製造関連の 3 業種（食料品（調味料）、飲料・たばこ・飼料（清涼飲料）、飲料・たばこ・飼料（酒類））は熱供給に適さないと考えられる。これは、食品産業の多くの工場では各工程がバッチ運転であり、安定した熱利用が期待できないため、廃棄物焼却施設の操業に悪影響を与えてしまうことが心配されるためである。

ii. 蒸気使用が可能な業種（製造プロセス）の抽出

事業所当たりのエネルギー使用量（電気、燃焼熱も含む）が 88TJ/年以上の 12 業種の内、食品製造関連の 3 業種を除く 9 業種について、各製造プロセスにおける熱利用の情報を整理した。各製造プロセスで必要とされる温度や量を把握し、蒸気で供給可能な温熱、冷熱を使用しているプロセスを抽出した。

各製造プロセスにおける熱利用情報から全エネルギー消費量に対する蒸気使用割合を合計し、事業所当たりの蒸気使用可能熱量を求めた。この結果を表 42 に示す。1 事業所当たりの蒸気使用量が 88TJ/年以上

の5業種（製紙業、無機化学工業、有機化学工業、製薬工業、ゴム工業）を網掛けして示した。この5業種について、蒸気使用が可能な各製造プロセスと熱の利用の内訳を表43に示す。

熱利用システムには蒸気を必要としている場合と温水または高温水の比較的低い温度でよい場合があり、下記の2ケースに分けられる。

- i. 蒸気を必要とする場合：廃棄物処理施設から供給した蒸気をそのまま熱利用して、ドレンとして回収する。
- ii. 温水を利用する場合：製造工場側に熱交換器を設置して、必要な温度の温水に昇温し、蒸気供給の場合はドレンとして回収し、温水または高温水で供給の場合は熱交換後、返送する。（表43で温水の利用が可能なケースに網掛けをした。）

表42 事業所当たりの蒸気使用可能熱量 凡例：網掛け部は88 TJ/年以上

| 業種 | 1事業所当たりのエネルギー使用量 | 蒸気が利用可能な熱消費割合 (%) | 必要蒸気熱量 (GJ/事業所) |
|----------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| パルプ・紙・紙加工品 | 443,034 | 72.0 | 318,985 |
| 化学工業(無機化学) | 1,763,389 | 6.8 | 119,910 |
| 化学工業(有機化学) | 6,250,417 | 7.2 | 450,030 |
| 化学工業(医薬品) | 456,636 | 62.0 | 283,114 |
| 石油製品・石炭製品 | 7,742,461 | 0.0 | 0 |
| ゴム製品 | 264,273 | 35.0 | 92,495 |
| 窯業・土石製品 (ガラス・同製品) | 378,616 | 7.5 | 28,396 |
| 鉄鋼業 | 3,300,367 | 0.0 | 0 |
| 非鉄金属 | 157,572 | 0.0 | 0 |

表43 蒸気使用の製造プロセスの熱利用内容と利用割合（蒸気使用量が多い5業種）

凡例：網掛け部は温水使用（80℃以下）が可能

| 業種 | プロセス | 熱の利用内容 | 熱の割合 (%) |
|--------|--------|--|----------|
| 製紙業 | 蒸解 | 原料のチップを蒸解釜で煮て水に溶かす工程で、150～200℃の蒸気を使用する。投入前に原料を温水で余熱する。 | 30.0 |
| | 乾燥 | 紙の水分が10%になるまで、熱風ドライヤーで乾燥する。この工程で150～200℃の蒸気を使用する。 | 40.0 |
| | 光沢づけ | 光沢を付ける紙は、表面に薬品を塗布しロールで圧力と熱をかける。この工程で100～120℃の蒸気を使用する。 | 2.0 |
| 無機化学工業 | ガス温度管理 | 苛性ソーダの製造プロセスとガスの温度管理のために、100～150℃の蒸気を使用する。反応率を高めるために原料を一定温度に保つ必要がある。原料を70℃程度にするニーズが多い。 | 4.0 |

| | | | |
|--------|--------|--|----------|
| | 乾燥 | 苛性ソーダの脱水工程後、さらに含水率を低減するため乾燥機で乾燥する。乾燥機では100～150℃の熱（蒸気）を使用する。 酸化チタンは洗浄後、乾燥する。乾燥工程では150℃以上の熱が必要とされる。 | 2.8 |
| 有機化学工業 | 重合反応 | 合成ゴムの製造では、原料を攪拌混合した後、反応器で重合反応を行う。重合反応は原料によって異なるが、60～70℃程度で、反応を止める際は冷却水で10℃程度まで冷却する。 | 6.0 |
| | 乾燥 | 脱水後、含水率1%以下まで乾燥する。180℃の蒸気を使用される。乾燥機投入前に温水で余熱する。 | 1.2 |
| 製薬工業 | 溶解 | 溶解釜に熱を加えて化学反応を起こす工程で、短時間で大量の蒸気を使用するが、60℃以下のため温水の利用もある。大容量の温水槽で少しずつ熱交換して温水を貯留しておき、使用時に一気に供給する。 | 15.0 |
| | 滅菌 | 製薬を製造する際に、製薬を滅菌する工程があり、複数ある。120℃程度の蒸気を使用される。投入前に温水で余熱する。 | 3.0 |
| | 凍結乾燥 | 不凍液を装置内部に送り、製剤を凍らせる。-50℃程度で専用のチラーが使用される。 | 6.0 |
| | 乾燥 | 原薬の原料を混合し粒体を製造した後、乾燥機で乾燥する。投入前に原料を温水で余熱する。 | 10.0 |
| | コーティング | 錠剤の表面に均一に皮膜をかける際、60℃程度の蒸気を使用する。投入前に温水で余熱する。 | 2.0 |
| | 反応 | 反応釜に120℃程度の蒸気を当て、内部温度を100℃にし化学反応を起こす工程である。反応釜は小規模であるが、多数ある。投入前に温水で余熱する。 | 4.0 |
| | 脱溶媒 | 脱溶媒釜内で熱を加えて化学反応を起こし、溶媒を除去する。内部温度は30～100℃で、70℃以下では温水の利用が多い。 | 3.0 |
| | 昌析 | 溶液の濃度や温度を下げることによって、結晶を析出させる。-10～30℃の冷熱を使用する。チラーユニットで冷水にする。 | 1.0 |
| | 空調 | 製品保管庫の空調や工場内の空気換気に使用する。 | 18.0 |
| ゴム製造業 | 加硫 | ゴムを硫黄と混合する工程で、バッチ式が多く、負荷変動が激しい。使用する温度帯は160～230℃の蒸気を使用することが多い。蒸気を熱交換する場合と、直接、蒸気を投入する方式がある。 | 25.0 |
| | 加温 | 冬期はゴムの原料が硬くなるので、原料の練り工程の前にゴム原料を暖めている。ドレンの回収時の熱を利用した低い温度の温水を使用している。 | 蒸気のドレン利用 |
| | 乾燥 | 温風で乾燥するが、130～150℃の蒸気で空気を暖め、温風とする。 | 10.0 |

iii. 熱供給のモデルケースの設定

製造工場への熱供給条件により、廃棄物焼却施設の熱の取り出し位置が異なる。概略の蒸気系統図（図39）に高圧蒸気、低圧蒸気（蒸気タービン抽気蒸気）、高温水、温水の場合の各取り出し位置を示す。ここでは、熱供給をする受入れ側の条件として下記の3ケースを検討する。

- ケース A 低圧蒸気：発生した蒸気で発電し、一部を抽気蒸気として供給するケース（熱のカスケード利用）
- ケース B 高温水：発生した蒸気全量で発電し、蒸気タービン排気で熱交換し高温水または温水を発生させて熱供給するケース（熱の効率的利用。背圧タービンの場合は発電効率が低下する。）
- ケース C 高圧蒸気：発電せずに外部熱供給するケース（廃棄物処理施設が小規模でも熱供給が可能）

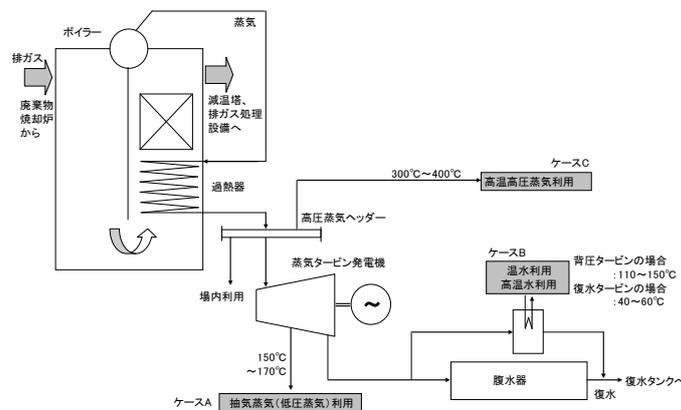


図 39 蒸気、高温水、温水の取り出し位置

熱供給量の多い3業種とゴム製造業をとりあげ、モデルケースを設定し、熱供給量にマッチングする廃棄物処理施設規模を検討する。まず、表43の製造工程での熱利用状況から熱供給条件を表44に示す。製造業側で必要とする温度域から、4業種とも温水での熱供給は温度が低いことから採用できない。同様の理由で製紙業、有機化学工業、ゴム工業は高温水での熱供給はできない。

表 44 代表的な業種の熱供給条件

| 業種 \ 項目 | 製造業側 で必要な 温度 | 廃棄物処理施設からの熱供給形態 | | | |
|---------|--------------------|-----------------|----------------|----------------|----|
| | | ケースA: 低圧蒸気 | ケースB: 高温水 | ケースC: 高圧蒸気 | 温水 |
| 製紙業 | 100 ~ 200°C | 1.5MPa * 200°C | — | 3.0MPa * 300°C | — |
| 有機化学工業 | 60 ~ 180°C | 1.0MPa * 180°C | — | 3.0MPa * 300°C | — |
| 製薬工業 | 60 ~ 120°C | 0.2MPa * 140°C | 0.7MPa * 140°C | 3.0MPa * 300°C | — |
| ゴム工業 | 130 ~ 180°C | 1.0MPa * 180°C | — | 3.0MPa * 300°C | — |

iv 必要な供給熱量

計算条件を下記に示す。

<計算条件>

- ・ 製造工場の年間稼働日：330 日
- ・ 蒸気供給損失熱量率：10%
- ・ 廃棄物処理施設のボイラー熱効率：85%
- ・ 抽気蒸気量：入口蒸気量の 1/3
- ・ 背圧タービン出口圧力：0.5MPa

参考) 火力発電所の蒸気タービンにおける抽気量

事業用火力発電所のヒートバランス³⁵⁾より、抽気量の割合を算出し、表 45 に示す。低圧タービンの方が抽気量は多く、20%程度である。

表 45 事業用火力発電所の蒸気タービン抽気量の割合

| 火力発電 発電出力 | 蒸気タービン | | 流量 t/h | 抽気/入口 % | 入口圧 力 MPa | |
|--------------|---------|----|-----------|------------|-----------------|-------|
| | 種類 | 位置 | | | | |
| 350MW | 高圧タービン | 入口 | 1045.78 | | 17 | |
| | | 抽気 | 73.06 | 6.99 | | |
| | | 排気 | 852.01 | | | |
| | 中圧タービン | 入口 | 852.01 | | | 3.36 |
| | | 抽気 | 47.23 | 5.54 | | |
| | | 排気 | 805.65 | | | |
| | 低圧タービン | 入口 | 805.65 | | | 0.948 |
| | | 抽気 | 169.05 | 20.98 | | |
| | | 排気 | 636.59 | | | |
| 700MW | 超高压タービン | 入口 | 1995.39 | | 31.6 | |
| | | 抽気 | 0.00 | 0.00 | | |
| | | 排気 | 1995.39 | | | |
| | 高压タービン | 入口 | 1707.50 | | | 9.39 |
| | | 抽気 | 115.51 | 5.79 | | |
| | | 排気 | 1489.47 | | | |
| | 中圧タービン | 入口 | 1489.47 | | | 3.67 |
| | | 抽気 | 49.28 | 3.31 | | |
| | | 排気 | 1226.05 | | | |
| | 低圧タービン | 入口 | 1226.05 | | | 0.73 |
| | | 抽気 | 194.51 | 15.86 | | |
| | | 排気 | 1031.54 | | | |
| 1,000MW | 高压タービン | 入口 | 2890.86 | | 24.7 | |
| | | 抽気 | 174.40 | 6.03 | | |
| | | 排気 | 2459.97 | | | |
| | 中圧タービン | 入口 | 2459.97 | | | 4.14 |
| | | 抽気 | 114.99 | 4.67 | | |
| | | 排気 | 2091.68 | | | |
| | 低圧タービン | 入口 | 2091.68 | | | 0.8 |
| | | 抽気 | 411.12 | 19.66 | | |
| | | 排気 | 1680.56 | | | |

焼却炉からの熱供給量に関する計算結果を表 46～48 に示す。

表 46 低圧蒸気の蒸気供給量の試算結果（蒸気タービン抽気の利用）

（製紙業：1.5MPa*200℃、有機化学工業・ゴム工業：1.0MPa*180℃、製薬工業：0.2MPa*120℃）

| 業種 | プロセス | 製造工場側 | | | 廃棄物処理施設側 | |
|------------|---------------------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|
| | | 時間 使用量 | 供給蒸気 エンタルピー | 復水 エンタルピー | 蒸気 供給量 | 蒸気供給量 合計 |
| | | k J/h | k J/kg | k J/kg | kg/h | kg/h |
| 製紙業 | 蒸解 | 16,782,000 | 2,796 | 377 | 7,630 | 18,100 |
| | 乾燥 | 22,375,000 | 2,796 | 293 | 9,830 | |
| | 光沢づけ | 1,119,000 | 2,796 | 845 | 630 | |
| 有機化学 工業 | 重合反応 | 47,352,000 | 2,777 | 377 | 21,700 | 25,900 |
| | 乾燥 | 9,470,000 | 2,777 | 293 | 4,190 | |
| 製薬工業 | 溶解 | 8,648,000 | 2,706 | 377 | 4,080 | 16,700 |
| | 滅菌 | 1,730,000 | 2,706 | 377 | 820 | |
| | 凍結乾燥 | 3,459,000 | 2,706 | 505 | 1,730 | |
| | 乾燥 | 5,766,000 | 2,706 | 293 | 2,630 | |
| | コーティング ^g | 1,153,000 | 2,706 | 293 | 530 | |
| | 反応 | 2,306,000 | 2,706 | 377 | 1,090 | |
| | 脱溶媒 | 1,730,000 | 2,706 | 377 | 820 | |
| | 昌析 | 577,000 | 2,706 | 505 | 290 | |
| ゴム工業 | 空調 | 10,378,000 | 2,706 | 293 | 4,730 | 5,350 |
| | 加硫 | 8,342,000 | 2,777 | 377 | 3,820 | |
| | 乾燥 | 3,337,000 | 2,777 | 377 | 1,530 | |

表 47 高温水の供給量の試算結果（タービン排気蒸気で高温水（140℃）を発生させて利用）

| 業種 | プロセス | 製造工場側 | | | 廃棄物処理施設側 | |
|------|---------------------|------------|-----------------|----------------|------------|--------------|
| | | 時間 使用量 | 供給高温水 エンタルピー | 熱交換後 エンタルピー | 高温水 供給量 | 高温水供給量 合計 |
| | | k J/h | k J/kg | k J/kg | kg/h | kg/h |
| 製薬工業 | 溶解 | 8,648,000 | 586 | 377 | 45,450 | 195,300 |
| | 滅菌 | 1,730,000 | 586 | 377 | 9,090 | |
| | 凍結乾燥 | 3,459,000 | 586 | 505 | 46,770 | |
| | 乾燥 | 5,766,000 | 586 | 293 | 21,640 | |
| | コーティング ^g | 1,153,000 | 586 | 293 | 4,330 | |
| | 反応 | 2,306,000 | 586 | 377 | 12,120 | |
| | 脱溶媒 | 1,730,000 | 586 | 377 | 9,090 | |
| | 昌析 | 577,000 | 586 | 505 | 7,800 | |
| | 空調 | 10,378,000 | 586 | 293 | 38,960 | |

表 48 高圧蒸気の蒸気供給量の試算結果（高圧蒸気（3.0MPa*300℃）の利用）

| 業種 | プロセス | 製造工場側 | | | 廃棄物処理施設側 | |
|-----|------|------------|----------------|--------------|-----------|-------------|
| | | 時間 使用量 | 供給蒸気 エンタルピー | 復水 エンタルピー | 蒸気 供給量 | 蒸気供給量 合計 |
| | | kJ/h | kJ/kg | kJ/kg | kg/h | kg/h |
| 製紙業 | 蒸解 | 16,782,000 | 2,994 | 377 | 7,050 | 16,700 |
| | 乾燥 | 22,375,000 | 2,994 | 293 | 9,110 | |

| | | | | | | |
|--------|--------|------------|-------|-----|--------|--------|
| | 光沢づけ | 1,119,000 | 2,994 | 845 | 570 | |
| 有機化学工業 | 重合反応 | 47,352,000 | 2,994 | 377 | 19,900 | 23,800 |
| | 乾燥 | 9,470,000 | 2,994 | 293 | 3,860 | |
| 製薬工業 | 溶解 | 8,648,000 | 2,994 | 377 | 3,630 | 14,900 |
| | 滅菌 | 1,730,000 | 2,994 | 377 | 730 | |
| | 凍結乾燥 | 3,459,000 | 2,994 | 505 | 1,530 | |
| | 乾燥 | 5,766,000 | 2,994 | 293 | 2,350 | |
| | コーティング | 1,153,000 | 2,994 | 293 | 470 | |
| | 反応 | 2,306,000 | 2,994 | 377 | 970 | |
| | 脱溶媒 | 1,730,000 | 2,994 | 377 | 730 | |
| | 昌析 | 577,000 | 2,994 | 505 | 250 | |
| | 空調 | 10,378,000 | 2,994 | 293 | 4,230 | |
| ゴム工業 | 加硫 | 8,342,000 | 2,994 | 377 | 3,510 | 4,910 |
| | 乾燥 | 3,337,000 | 2,994 | 377 | 1,400 | |

v. マッチングする廃棄物処理施設規模の算出

熱供給量にマッチングする廃棄物処理施設規模の試算結果を表 49、表 50 に示す。この規模は熱を供給するために必要な最小限の規模となる。抽気蒸気を使用するケースでは、産業施設で熱利用がない場合に抽気を停止して、全量発電に利用でき、より効率的に熱を利用できる。

表 49 熱供給量にマッチングする廃棄物処理施設規模の試算結果（その 1）

| 項目 \ 業種 | 単位 | 製紙業 | | 有機化学工業 | |
|----------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 供給熱量 | GJ/年 | 319,000 | | 450,000 | |
| ボイラー出口蒸気 | - | 4.0MPa*400℃ | 3.0MPa*300℃ | 4.0MPa*400℃ | 3.0MPa*300℃ |
| 外部供給熱条件 | - | 抽気蒸気 1.5MPa*200℃ | 高压蒸気 3.0MPa*300℃ | 抽気蒸気 1.0MPa*180℃ | 高压蒸気 3.0MPa*300℃ |
| 導管流速 | m/sec | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 導管径（呼び径） | mm | 200 | 125 | 200 | 150 |
| 蒸気供給量 | kg/h | 18,090 | 16,740 | 25,890 | 23,760 |
| タービン蒸気量 | kg/h | 54,280 | 蒸気タービン無 | 77,670 | 蒸気タービン無 |
| 必要回収熱量 | MJ/日 | 4,927,000 | 1,415,000 | 7,049,000 | 2,008,000 |
| 廃棄物処理量 | t/日 | 560 | 160 | 800 | 230 |
| 発電量 | kW | 9,960 | 0 | 15,220 | 0 |
| 売電量 | kW | 6,410 | 0 | 10,650 | 0 |

表 50 熱供給量にマッチングする廃棄物処理施設規模の試算結果（その 2）

| 業種 | 単位 | 製薬工業 | | | ゴム工業 | |
|------------|------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 必要蒸気熱量 | GJ/年 | 283,100 | | | 92,500 | |
| ボイラー出口蒸気条件 | - | 4.0MPa *400 ℃ | 4.0MPa *400℃ | 3.0MPa *300℃ | 4.0MPa *400℃ | 3.0MPa *300℃ |

| 外部供給熱条件 | - | 抽気蒸気 0.2MPa *120 °C | 高温水 0.7MPa *140°C | 高压蒸気 3.0MPa *300°C | 抽気蒸気 1.0MPa *180°C | 高压蒸気 3.0MPa *300°C |
|-----------|-------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 導管流速 | m/sec | 40 | 2.5 | 30 | 30 | 30 |
| 導管径（呼び径） | mm | 400 | 200 | 125 | 100 | 80 |
| 蒸気供給量 | kg/h | 16,710 | 195,260 | 14,880 | 5,350 | 4,910 |
| 蒸気タービン蒸気量 | kg/h | 50,130 | 27,570 | 蒸気タービン無 | 16,050 | 蒸気タービン無 |
| 必要回収熱量 | MJ/日 | 4,550,000 | 2,503,000 | 1,258,000 | 1,457,000 | 415,000 |
| 廃棄物処理量 | t/日 | 520 | 290 | 150 | 170 | 50 |
| 発電量 | kW | 9,470 | 2,970 | 0 | 2,380 | 0 |
| 売電量 | kW | 6,090 | 720 | 0 | 840 | 0 |

以上の検討結果から産業施設1事業所当たりの供給熱量にマッチングする廃棄物処理施設規模は50～800 t/日と現実的な規模であることが確認できた。

b. 焼却熱の産業利用計画の作成方法

焼却施設の近隣にある工場や産業団地への熱供給システムについて、具体的な地域において計画・評価する手順について示す。

i. 既存情報の整理

対象の地区内に立地する工場の熱需要と熱供給可能量に関して既存の情報を整理する。既存の情報の整理項目を表51に示す。

熱需要の不足情報は算定・報告・公表制度におけるデータ（以下、SHKデータ）のCO₂排出量と業種別燃料構成³³⁾から1工場当たりの熱需要を設定する。

表51 既存の情報の整理項目

| 熱利用施設の項目 | 1. 熱利用の現状と熱の形態 ①一次エネルギー利用量 (MJ/h)、年間稼働日数 ②蒸気の圧力・温度、温水の温度 ③蒸気の使用量 (t/h、m ³ /h)、時間帯別使用量 (連続・バッチ運転) 2. 熱供給の制約条件 ①外部からの熱供給の制約条件 ②外部からの熱供給が停止した場合の対応方法 ③熱供給の停止によって、工場の稼働に重大な影響を与える工程と熱量 |
|----------|--|
| | |

| | |
|----------|---|
| 熱供給施設の項目 | 1. 熱利用の現状と外部供給可能熱量 ①発電量、年間稼働日数（定期点検） ②蒸気タービン入口、出口の蒸気量、圧力、温度 ③ボイラー出口の蒸気量、圧力、温度 ④外部供給可能蒸気量 (GJ/h) と蒸気条件（圧力、温度） 2. 熱供給事業の可能性 ①熱供給の制約条件 |
|----------|---|

ii. 蒸気使用量・供給可能量の設定

熱需要施設で必要とする熱量、蒸気量、蒸気条件（温度、圧力）、将来の熱利用量を整理する。熱需要の中で、蒸気で供給可能な熱量をヒアリング、該当する企業のホームページの情報、文献等より想定する。熱供給施設からの熱供給可能量及び将来の熱供給可能量についても、同様に整理する。焼却炉に加えて、火力発電所が供給元となる可能性もある。

iii. 蒸気量の需給バランス

導管部分の放散熱量は蒸気供給の一般的な熱損失とされる 10%とし、熱供給施設からの供給熱量がマッチングするように、供給熱量を調整してバランスさせる。時間変動が激しい場合は平準化させるために、蓄熱槽やアキュムレータ等の採用を検討する。

供給熱量が過剰な場合は発電効率の高い熱供給施設から優先的に供給量を減少させる。また、供給熱量が不足する場合は熱量調整用ボイラーを設置し、この施設から熱供給する計画とする。

iv. 地域熱ネットワークのモデル設定

熱利用施設と熱供給施設の住所から工場の位置を地図上にプロットし、道路沿いに配管ルートを設定し、地域熱ネットワークのモデルを設定する。蒸気量に応じた配管径を設定し、それを基に配管敷設費を算出する。地域熱ネットワークのモデル設定の手順を図 40 に示す。



図 40 熱融通のネットワークのモデル設定手順

v. エネルギー効率面での評価

蒸気供給の効果を評価するに当たり、比較対象とするベースラインのシステムを図 41 に示す。熱利用施設では供給された熱量によって燃料を削減できるが、焼却炉や火力発電所では熱供給したことにより電力量が減少するため、これに対する焼却炉・火力発電所の操業方法は次の 2 ケースが考えられる。

- i. 抽気蒸気の熱量分の電力量を減少させたままで、その減少分を系統電源で補うとする考え方 (ケース A : 図 42 参照)
- ii. 抽気蒸気の熱量を燃料追加で補い、外部に供給する電力量を維持する考え方 (ケース B : 図 43 参照)

それぞれのケースによる環境負荷削減の評価の考え方を表 52 に整理する。ここで、CO₂削減量の考え方は燃料が化石燃料とバイオマスで異なるため、比較した形で示す。

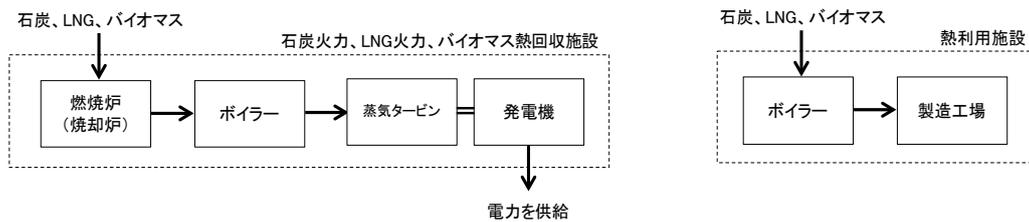


図 41 基準システム (ベースライン)

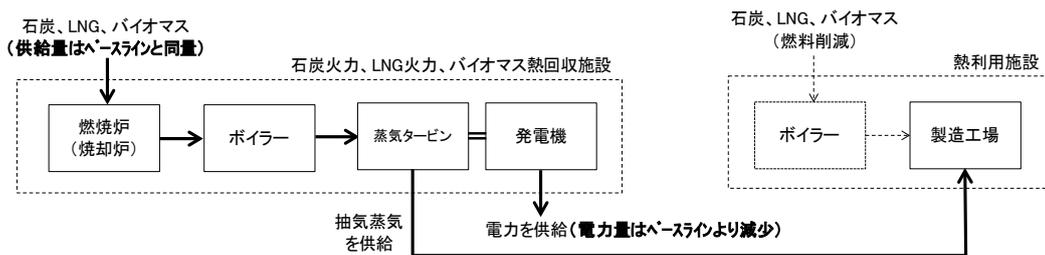


図 42 ケース A : 抽気蒸気により発電量減少

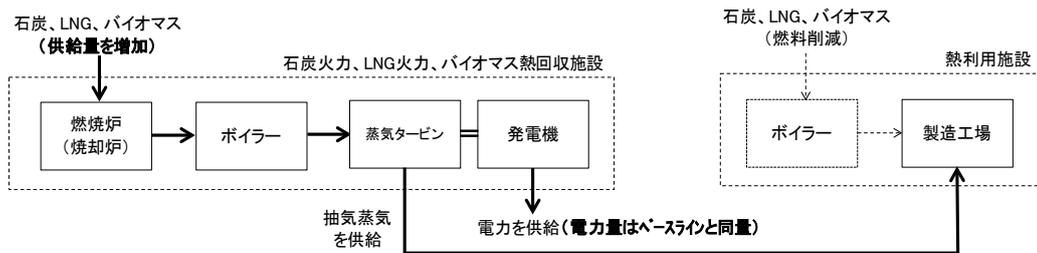


図 43 ケース B : 抽気蒸気分の燃料追加

表 52 環境負荷削減の評価の考え方

| 燃料の種類 | 施設 | 化石燃料 | バイオマス |
|-------|-----|---------------------------|---|
| ケース A | 熱供給 | 基準システムからの電力量の減少分を系統電源から供給 | バイオマス量は基準システムと同じで、電力は系統電源 (ほとんどが他の燃料による電力) から供給 |
| | 熱利用 | 供給される熱量分の燃料が削減 | |

| | | | |
|-------|-----|-------------------|---|
| ケース B | 熱供給 | 抽気蒸気の熱量に相当する燃料を追加 | 抽気蒸気の熱量に相当するバイオマスを追加するが、CO ₂ 削減量、化石燃料換算はゼロカウント |
| | 熱利用 | 供給される熱量分の燃料が削減 | |

注) ケース B の場合、ボイラーでは燃料追加分の蒸気量が増加し、オーバーロードの状態になる。熱供給施設の運転状況、申請蒸発量により燃料の追加可能量が制限される場合がある。

ケース A は抽気量と発電量の関係なので、ある程度の発電効率の仮定が必要となるが算出は可能である。しかし、ケース B では燃料の熱量からボイラー効率により蒸発量を想定し、さらにそれを基に蒸気タービンの途中から抽気する蒸気量との関係を蒸気消費率により推定することになり、多くの仮定が必要で、特に、石炭火力や LNG 火力のような複雑な再熱システムでは推定が困難になる。

ケース A では熱供給側の電力量と熱利用側の燃料消費量を比較するのに対し、ケース B では熱供給側の燃料消費量と熱利用側の燃料消費量を直接比較でき、理解し易いが、反面、ボイラー効率や蒸気タービンの蒸気消費率の設定によってその結果が左右される。このため、本検討ではケース A により評価する。

vi. 熱供給による発電量の減少と熱供給で削減される消費熱量の算出

発電設備の場合、抽気蒸気で熱供給したことにより発電量が減少する。各ケースにおける抽気した場合の発電量と抽気せずに全量発電した場合の発電量を算出し、その差から抽気により減少した発電量を求める。ただし、発電設備を持たない熱供給施設（ボイラー）の場合は、熱供給による発電量の減少はないものとし、熱利用側の熱量にこのボイラーの熱量を加算しないものとして評価する。

一方、ケース毎に熱使用量を整理し、地域熱ネットワークから熱供給が無い場合の各熱利用施設における消費エネルギーを求め、地域熱ネットワーク化による効果を算出する。

vii. 環境負荷削減の評価指標

地域熱ネットワークによる熱供給のケース（熱供給のため減少した電力等）と個別の熱源によるケース（熱供給で削減された燃料等）を比較する。エネルギー（電力と燃料）の効率面での評価を行うにあたり、評価項目は次の 4 項目とする。

評価指標 I：化石燃料の熱量換算（GJ/年）

評価指標 II：犠牲にした電力量と供給熱量の比 エアコンの成績係数に相当する指標となる。COP=供給熱量/減少発電量

評価指標 III：CO₂削減量（CO₂換算）t-CO₂/年（CO₂削減換算係数³⁶⁾により算出）

評価指標 IV：投資回収年数（年）（ここでは簡素化のため、設備投資を燃料消費削減費用で除して算出。実際には熱ネットワークの管理や、各工場での運転要員数の変化などを考慮する必要がある）

注) ここで、評価指標 II の犠牲にした電力量とは送電端における電力量（売電量）であり、（売電量）＝（発電量）－（消費電力）の関係にある。本検討では抽気せずに電力量を犠牲にしない場合も、抽気により電力量を犠牲にした場合も消費電力は同じとし、（犠牲にした電力量）＝（抽気しない発電量）－（抽気した発電量）として扱う。

地域熱ネットワーク化では、この地区にバイオマス熱回収施設が新設されると仮定し、バイオマスより回収した熱エネルギーを供給する場合の効果について、エネルギーの効率面から評価する。バイオマス発

電をせずに熱供給したことによる電力減少量と熱供給による熱利用施設における化石燃料減少量を比較し、課題を整理する。

この場合の熱量調整用ボイラーはバイオマス熱回収施設等が停止時した場合のバックアップ用とする。

c. 蒸気受け入れ先の補助設備の仕様、費用情報に係わる基礎データ整備の実施方法

産業施設への熱供給では工場側に熱の受入れ設備が必要となり、受入れ側で効率的な熱利用をするために、適した熱交換器等の補助設備を選定することが重要になる。そこで、熱の受入先で熱を効率的に利用するための設備について、蒸気による熱供給に適した機器の形式や仕様を整理し、容量ごとに価格が推定できるようにデータを整理する。各設備の価格は建設工事の設備価格の情報誌、メーカーからの見積によって整理し、容量と価格の関係を推計式で示す。

対象とする産業側の熱の受入れ補助設備として、温水で熱利用するための熱交換器、熱使用量の負荷変動を平準化するための蓄熱槽や蒸気アキュムレータ（蒸気溜め）、熱風で熱利用する場合の蒸気式空気加熱器、ドレンを返送するための復水返送ポンプやドレンタンクについても価格情報を整備する。

i. 熱交換器の価格

一般的に使用されている熱交換器として全熱交換器、プレート熱交換器、円筒多管式熱交換器（以下、シェル&チューブ式）が挙げられる。全熱交換器は空気と空気の熱交換に、プレート熱交換器は冷媒と冷水や水と温水の熱交換に、シェル&チューブ式熱交換器は蒸気と温水の熱交換に使用される。ここでは、蒸気の供給を想定しているため、シェル&チューブ式熱交換器を対象とする。

シェル&チューブ式熱交換器は円筒内に多数の細管を収めたもので、温度差の大きい熱交換に適している。価格は熱交換器メーカー（ゼンシン株式会社）のホームページの情報による。熱交換器の伝熱面積ごとの価格を図 44 に示す。横軸が伝熱面積で示されているため、熱交換の温度条件を設定して伝熱面積を交換熱量（MJ/h）に換算し、価格との関係を近似式として表 53 に示す。

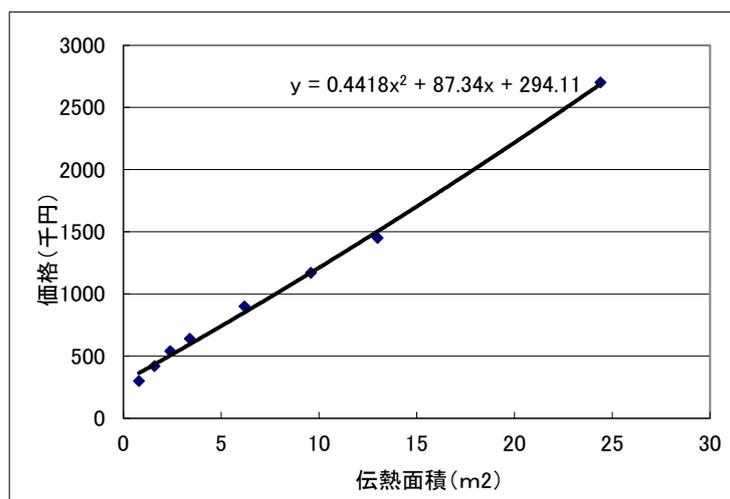


図 44 熱交換器の伝熱面積と価格の関係

価格の近似式を求めるために、下記に示す熱交換の条件を設定した。

- ・圧力を 0.2～0.8MPa の飽和蒸気
- ・温水温度：入口 50℃、出口 60℃

表 53 飽和蒸気の圧力ごとの熱交換器の価格の近似式

| 飽和蒸気の圧力 (MPa) | 価格 A (千円) の近似式 (x は交換熱量 (MJ/h)) |
|------------------|--------------------------------------|
| 0.2 | $A=0.556x+262$ |
| 0.35 | $A=0.425x+262$ |
| 0.5 | $A=0.380x+262$ |
| 0.8 | $A=0.314x+262$ |

ii. 蓄熱槽の価格

熱利用がバッチ式でも温水を安定的に利用するためには、一定温度の温水を貯留する蓄熱槽が必要になる。蓄熱槽には建築物の地中梁を利用した鉄筋コンクリート製の地下水槽（連通管方式等）、パネル水槽、円筒縦型貯湯槽などがある。蓄熱槽は槽内を極力、均一な温度に保ち、効率よく内部循環できる機構が必要であり、ここでは熱損失の少ない円筒縦型貯湯槽を対象に調査した。

価格は設備費の情報誌（「積算資料」、2016.5）により、株式会社島倉鉄工所の貯湯容量と価格の関係を図 45 に示す。また、この図から求めた貯湯容量と価格の関係を近似式として下記に示す。

蓄熱槽の貯湯容量と価格の関係式： A (千円) $=573x+1,540$ (x は貯湯容量 (m^3)) 式 19

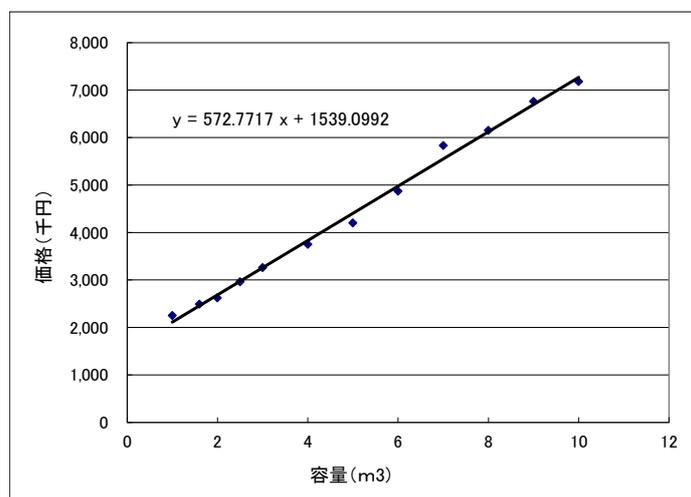


図 45 蓄熱槽の貯湯容量と価格の関係

iii. 蒸気アキュムレータ（蒸気溜め）の価格

蒸気をバッチ的に使用すると蒸気の使用量が急激に増加し、他の機器にも影響を及ぼす。このようなケースでは蒸気アキュムレータの設置により蒸気を熱水で貯留し、必要な時に一次側に影響を与えずに蒸気を取り出すことができる。蒸気アキュムレータは飽和水中に蒸気を注入し、蒸気の凝縮潜熱を熱水に蓄え

ておき、容器内圧力を低下させると、再蒸発し、飽和蒸気が発生する。短時間に大量の蒸気を利用する場合に適している。

価格は専門メーカーの株式会社進栄技研の見積による。貯留容量と価格の関係を図 46 に示す。また、この図から求めた貯留容量と価格の関係を近似式として下記に示す。ただし、貯留量 60m³の価格しか示されなかったため、他の容量は 0.6 乗則により推定した。

アキュムレータの貯留容量と価格の関係式：

$$A \text{ (千円)} = -2.75 x^2 + 588 x + 4640 \quad (x \text{ は貯留容量 (m}^3\text{)}) \quad \text{式 20}$$

<仕様>

- ・形式： 横型
- ・供給蒸気条件： 1.6MPa*205℃（最高使用圧力 1.8MPa*210℃）
- ・出口蒸気圧力： 1.0 MPa
- ・貯留量： 10m³ (2 t/h)、30m³ (8 t/h)、60m³ (15 t/h) *カッコ内は蒸気送気量

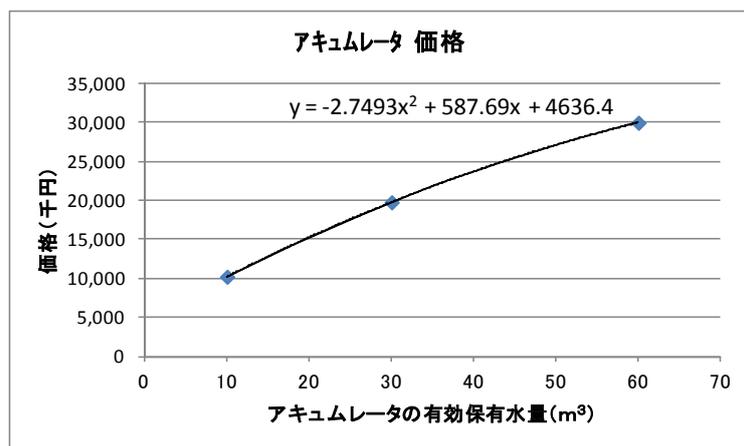


図 46 アキュムレータの貯留容量と価格の関係

iv 蒸気式空気加熱器

蒸気式空気加熱器の形式は蒸気で効率よく熱風を発生させることができるフィンチューブ式とする。価格は専門メーカーの瀬尾高圧(株)の見積による。空気量と価格の関係を図 47 に示す。また、この図から求めた空気量と価格の関係を近似式として下記に示す。

蒸気式空気加熱器の空気量と価格の関係式：

$$A \text{ (千円)} = 0.114 x + 8530 \quad (x \text{ は空気量 (m}^3\text{/h)}) \quad \text{式 21}$$

<仕様>

- ・形式： フィンチューブ式
- ・空気温度： 入口 20℃、出口 150℃
- ・加熱空気の性状： ダストを含まない大気

- ・供給蒸気温度： 1.6MPa*205℃
- ・空気量： 100,000Nm³/h、300,000Nm³/h、500,000Nm³/h

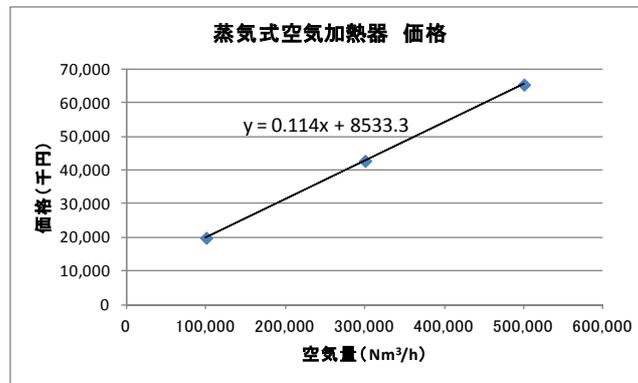


図 47 蒸気式空気加熱器の空気量と価格の関係

v. 復水返送ポンプ、ドレンタンクの価格

ポンプの形式は渦巻きポンプとし、揚程は実揚程を 10m、配管圧損と余裕を 10m 見込み、全揚程を 20m とする。設備費の情報誌（建設物価）の型番から水量（m³/h）と価格の関係を求める。

ポンプメーカー（株式会社日立産機システム）の「吐出量 - 全揚程線図」から型番ごとに揚程が 20m の時の送水量を読み取り、設備費の情報誌（建設物価）の型番から水量（m³/h）と価格の関係を図 48 に示す。また、この図から求めた水量と価格の関係を近似式で示す。

復水返送ポンプの水量と価格の関係式：A（千円）=3.80x + 121 （x は吐出量（m³/h））式 22

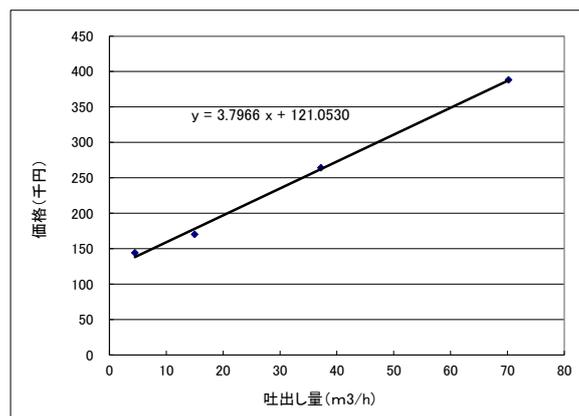


図 48 復水返送ポンプの水量と価格の関係

ドレンタンクについては SUS 製パネルタンクとし、価格は耐熱タンクのメーカー（株式会社シロ産業）のホームページの情報による。タンクの容量と価格の関係を図 49 に示す。また、この図から求めたドレンタンクの容量（m³）と価格の関係を近似式で示す。

ドレンタンクの容量と価格の関係式：

$$A \text{ (千円)} = -3.01x^2 + 149x + 98 \quad (x \text{ は貯留容量 (m}^3\text{)}) \quad \text{式 23}$$

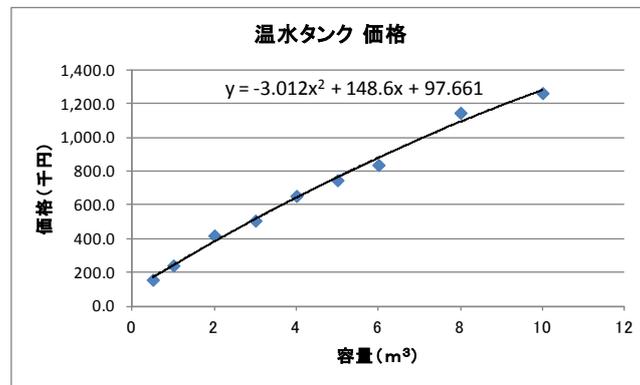


図 49 ドレンタンクの容量と価格の関係

iv. 温水ボイラーの価格

灯油焚きボイラーは A 重油も使用可能な仕様とし、価格は設備費の情報誌（建設物価）に掲載されていた株式会社日本サーモエナー製の灯油焚きボイラーの情報により、温水発生熱量（MJ/h）と価格の関係を図 50 に示す。また、この図から求めた温水発生熱量と価格の関係を近似式で示す。

温水ボイラーの温水熱量と価格の関係式：

$$A \text{ (千円)} = 0.0000616x^2 + 1.26x + 787 \quad (x \text{ は温水ボイラーの発生熱量 (MJ/h)}) \quad \text{式 24}$$

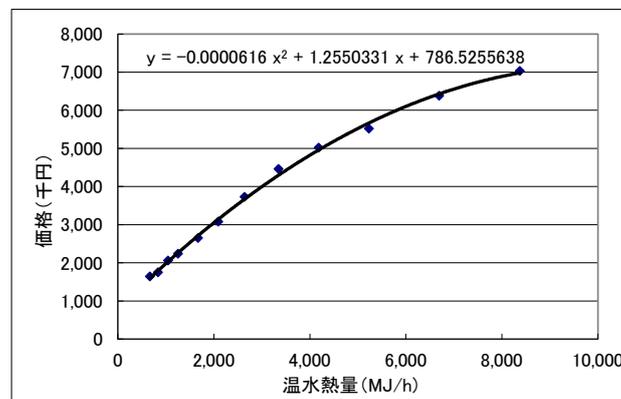


図 50 温水ボイラーの発生熱量と価格の関係

vii. 蒸気ボイラーの価格

灯油焚き鋳鉄製ボイラーは A 重油、都市ガスも使用可能で、水冷壁構造とし、価格は設備費の情報誌（建設物価）に掲載されていた株式会社前田鉄工所灯油焚き鋳鉄製ボイラーの情報により、蒸気発生熱量（MJ/h）と価格の関係を図 51 に示す。また、この図から求めた蒸気発生熱量と価格の関係を近似式で示す。

蒸気ボイラーの発生熱量と価格の関係式：

$$A \text{ (千円)} = -0.0000188 x^2 + 0.723 x + 1050 \quad (x \text{ は蒸気ボイラーの発生熱量 (MJ/h)}) \quad \text{式 25}$$

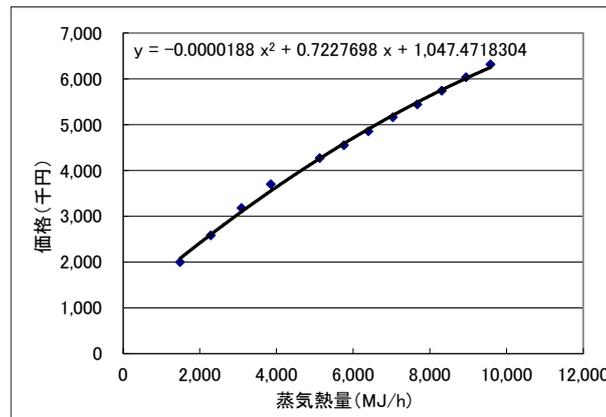


図 51 蒸気ボイラーの蒸気発生熱量と価格の関係

d. 具体的な地域における産業への蒸気供給のケーススタディ

i. 熱受給バランス

ヒアリング調査において、焼却炉は出力変動や点検に伴う休止期間があるため、蒸気の供給元が複数存在し、また工場の熱需要も時間変動があることから、需要側も複数存在する、多対多の熱受給ネットワークに焼却炉が接続されていることが理想的であるとの指摘があった。そこで、火力発電所が立地し、複数の工場がある工業地帯のうち、東西約 3km、南北約 1km 程度の範囲の地域を事例に、蒸気供給の設計と評価を実施した。個別企業の情報等を含むため、結果は一部を省略して記載する。

発電設備の中では焼却炉の発電効率が最も低いので、焼却炉からの蒸気供給を優先すると、蒸気供給に伴う発電量の低下を抑制できる。表 54 のバランス試算から、熱供給に必要なタービン抽気蒸気量を得るために必要な焼却炉のボイラー蒸発量は 77t/h (4.0MPa*400℃) であり、当該地域の廃棄物焼却施設のごみの平均低位発熱量³⁷⁾ (10,867kJ/kg) を基に算定すると、焼却量は 640t/日になる。(発電せずに回収熱量を全量供給する場合は 186t/日になる。)

表 54 工業地帯の焼却熱供給に関する熱バランス

| 需給 | 工場 | 熱量(MJ/h) | 熱量合計(MJ/h) | 蒸気量(t/h) | 備考 |
|----|----|----------|-------------|----------|-----------|
| 需要 | D1 | 記載省略 | 321,300 | 114.56 | |
| | D2 | 記載省略 | | | |
| | D3 | 記載省略 | | | |
| | D4 | 記載省略 | | | |
| | D5 | 記載省略 | | | |
| | D6 | 記載省略 | | | |
| 供給 | S1 | 記載省略 | 357,000 | | |
| | S2 | 記載省略 | 需要先 321,300 | | |
| | S3 | 記載省略 | | | |
| | S4 | 記載省略 | | | バックアップ用熱源 |

| | | | | | |
|--|-----------|--------------------|--|--|-----------------|
| | S5 | 記載省略 | | | |
| | S6 | 記載省略 | | | |
| | S7 | 記載省略 | | | バックアップ用熱源 |
| | S8 焼却炉 | 71,600 ~179,000 | | | バランスする熱量を 供給 |

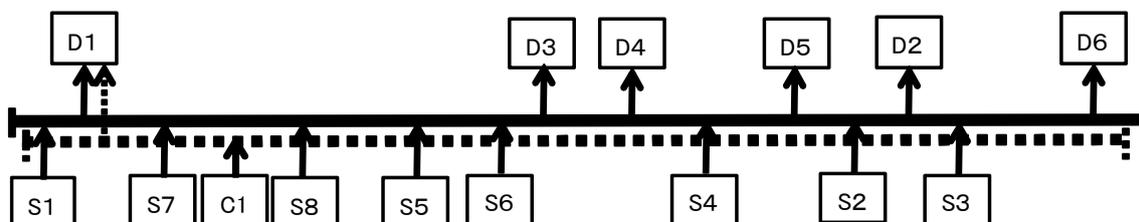


図 52 工業地帯の焼却熱供給 配管ネットワーク図(実際は地図上に作図)

ii. 配管径の試算

配管は将来の蒸気消費量増加と緊急用として使用する蒸気量も考慮して、全ケースで最大の蒸気量を設定し、配管径を算出する。計算結果を表 55 に示す。

表 55 配管径の計算結果

| 区分 | 工場 NO. | 蒸気量 (t/h) | 配管径 (呼び径) | 配管径 (ドレン水) (呼び径) |
|----|--------|--------------|--------------|---------------------|
| 需要 | D1 | 114.56 | 150 | 32 |
| | D2 | | 200 | 0 |
| | D3 | | 350 | 120 |
| | D4 | | 20 | 15 |
| | D5 | | 15 | 15 |
| | D6 | | 32 | 15 |
| 供給 | S1 | 記載省略 | 150 | 65 |
| | S2 | 記載省略 | 300 | 100 |
| | S3 | 記載省略 | 100 | 0 |
| | S4 | 記載省略 | 125 | 50 |
| | S5 | 記載省略 | 300 | 125 |
| | S6 | 記載省略 | 250 | 100 |
| | S7 | 記載省略 | 125 | 50 |
| | S8 | 記載省略 | 200 | 80 |
| | S2+S3 | 記載省略 | 300 | 125 |
| | S7+S8 | 記載省略 | 250 | 80 |

配管の長さや径から配管敷設費を求める。配管敷設費は敷設費単価の式³⁸⁾による。

・設定条件：圧力配管用炭素鋼鋼管（STPG：SCH40）

i. 専用トレンチの場合：

$$\text{配管総敷設費単価 } Y \text{ (円/m)} = 1.128 * X^2 + 157.9X + 172,600 \quad \text{式 26}$$

ここで、X：配管口径mm)

ii. 架空配管の場合：

専用トレンチの敷設費を基に、下記の式により算出する。

$$\text{配管総敷設費単価} = Y * (22/272) * M + Y * (250/272) * C \quad \text{式 27}$$

ここで、M=22（千円/m）／22（千円/m）：蒸気配管の価格比

C=15（千円/m）／250（千円/m）：架空配管と専用溝の価格比

これによると、想定する工業団地（約3km×1km、6つの需要工場、焼却炉、バックアップボイラーを含む8つの蒸気供給施設）での蒸気配管の敷設費用は、専用トレンチで22.5億円、架空配管で3.1億円と試算された（架空配管の敷設費用は過小評価ではないかとのヒアリングでの指摘あり）。

iii. 効果の換算

電力、熱量をCO₂排出量、原油換算、化石燃料換算するための係数を表56に示す。

表 56 換算係数

| 項目 | | 単位 | 備考 |
|-------------------------------|-----------|------------------------|----------|
| 熱利用施設の年間稼動日 ¹⁾ | 240 | 日 | |
| 電気事業者CO ₂ 排出係数（平均） | 0.000579 | t-CO ₂ /kWh | バイオマス分は0 |
| 産業用以外から供給された熱の排出係数 | 0.057 | t-CO ₂ /GJ | |
| 原油換算係数：電力 | 0.0002513 | kL/kWh | |
| 原油換算係数：熱 | 0.03509 | kL/GJ | |
| 熱利用の化石燃料換算 | 79.4 | % | ボイラー効率 |
| 電力の化石燃料換算 | 42.0 | % | 発電効率 |

iv. 熱利用係数 COP

前述のように、発電設備をもつ焼却炉や火力発電所からの蒸気供給は、発電量を減少させる負の面もある。発電効率の低い焼却発電の方が、同じ抽気量の場合、電力減少分Aが少ないので、熱利用係数COPの値は大きくなる。すなわち、熱供給する場合は発電効率の低い施設から供給した方が熱利用係数COPは向上する。ケーススタディにおける全体のCOPは、5.51と算出された。蒸気供給により一部の発電が犠牲になるものの、その5.5倍の蒸気を得られることを意味しており、一般に発電にはその2～2.5倍の燃料消費が必要であることを加味しても、エネルギー収支面で大きな消費削減効果があることが分かる。発電能力を持つ施設について、そのCOPを表57に示す。

表 57 各発電施設の熱利用係数（COP）

| 発電施設NO. | 熱利用係数（COP） |
|---------|------------|
| S1 | 5.504 |

| | |
|----|-------|
| S2 | 5.504 |
| S3 | 4.566 |
| S5 | 5.398 |
| S6 | 5.735 |
| S8 | 5.775 |

蒸気供給を行う発電設備が1つしかない場合、抽気量が増加すると発電量、発電効率が共に低下するため、熱需要が増加すると電力・熱供給の総合的な効率が低下する場合もある。しかし、ネットワークの場合は複数の施設から供給されるため、発電効率の低い施設から優先的に抽気して熱供給するなどして全体として、エネルギー効率を向上させることが可能である。

v. 化石燃料の熱量換算削減効果、CO₂排出量換算値、投資回収年数

表 58 に、熱のネットワーク化の評価結果を示す。いずれのケースでも「熱供給のため減少した電力による化石燃料の熱量増加分」は、「熱供給で削減された燃料による化石燃料の熱量減少分」より少なく、社会全体として、化石燃料消費が削減されたことになる。結果的に、CO₂排出量も削減される。抽気発電を利用した地域熱ネットワークが、熱効率的に効果があることを示していると考えられる。また、投資回収年数は、蒸気配管の敷設費を年間の正味のエネルギー費用の削減効果で除した、簡易な評価であるが、約 2 年と算出された。熱供給に伴う付帯設備や、管理費の変化等を加味すると、この数値はある程度増減し得る（付帯設備等を含む試算例は 4 章に記載）。韓国・蔚山工業団地における、焼却炉から工場への蒸気供給事業の投資回収年数が 1 年未満³⁹⁾であることを考えると、数年以内に投資回収可能な事業として、ある程度実現可能性のあるものと考えられる。

表 58 焼却炉を含む工業団地の熱のネットワーク化の効果（試算値）

| | |
|--|-----------|
| エネルギー消費削減効果 (GJ/年) | 1,550,000 |
| CO ₂ 排出量削減効果 (t-CO ₂ /年) 焼却炉以外の効果を含む。 | 51,500 |
| 投資回収年数 (年)* = トレンチ配管の敷設費/正味のエネルギー支出削減効果 | 2.1 |

*原油価格 47.3US/バレル(ドバイ平均、2015年) FIT 価格 32 円/kWh, 30%、産業用電気 14 円 kWh, 70%

9) サブテーマ 2 のまとめ

可燃性の一般廃棄物からのエネルギー回収と、それに伴う CO₂排出削減を大幅（約 2 倍程度）に向上させる方策として、産業への再生（原）燃料供給や、蒸気供給を検討し、計画策定や評価に必要なモデル群を構築するとともに、様々な条件下での評価に利用するインベントリを整備した。また、特に熱利用の促進について、国内外の制度や政策動向を整理し、課題を明らかにした。地域熱利用のステークホルダーである自治体や工場関係者からは、産業での熱利用について、高い関心が示された。

ケーススタディでは、大規模な工業団地に焼却炉や火力発電所が接続される場合を想定して、効果を検討したが、近年は、バックアップボイラーの遠隔監視や自動運転が普及しており、立地条件さえ許せば、小型の焼却炉と工場の1対1の蒸気供給も成立し得ると考えられる。今後は個別の焼却炉に着目し、具体的な計画作成について事例を増やして検討を行いたい。

(4) 施設と収集の総合的最適化モデルの作成 (サブテーマ 3)

1) 施設の費用情報の基礎データ整備

a. 標準的な仕様の廃棄物焼却施設の建設費

標準的な仕様の廃棄物焼却施設の建設費は環境省の公開データから発電設備の施設を抽出し、処理規模と建設費の関係として推定式で示す。このデータには契約年度ベースで2002年度から2010年度までの建設費 (n=62) が掲載されており、これに2011年度から2014年度の公開データ (発電設備)⁴⁰⁾を追加 (n=68、合計 n=130) する。

廃棄物焼却施設の処理規模と建設費の関係 (契約年度: 2002年~2013年) を図53に示す。この図には蒸気条件が3.0MPa*300°Cの場合と4.0MPa*400°Cの場合が含まれている。建設費のばらつきは必ずしも、蒸気条件が主要な要因でなく (図55~図60を参照)、建設当時の経済状況、市場状況、立地条件 (地盤条件など)、契約方式、炉形式、排ガス処理方式、付帯設備 (見学設備など) などの違いによるところが大きいものと考えられる。そこで、ここでは求めた建設費はある程度の中を持った金額であるとして扱う。

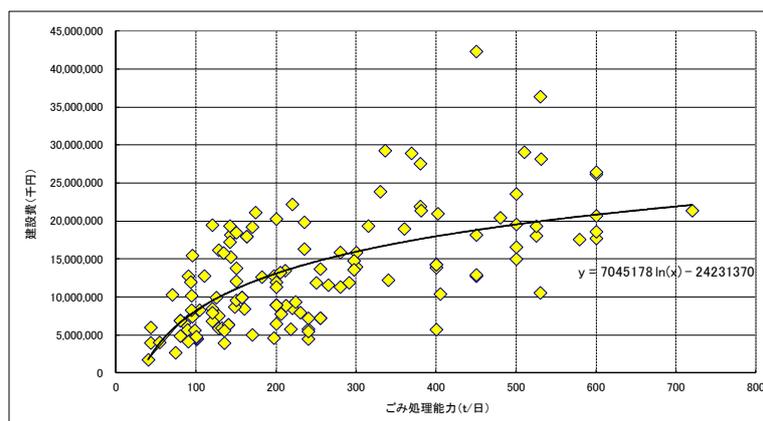


図53 廃棄物焼却施設の処理規模と建設費の関係 (契約年度: 2002年~2014年)

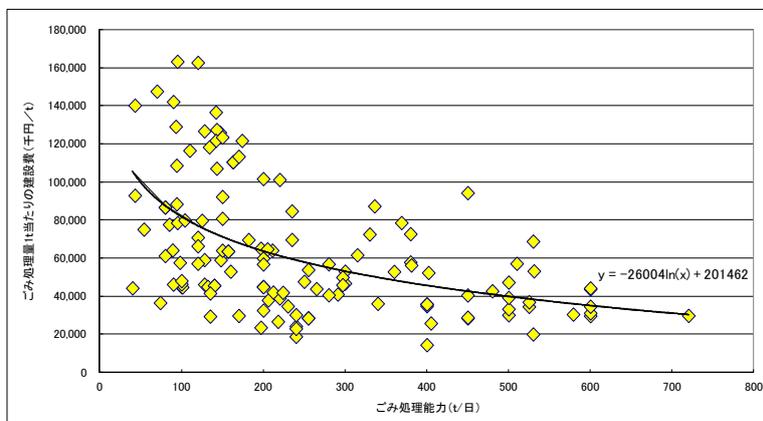


図54 廃棄物焼却施設の処理規模と建設費単価の関係 (契約年度: 2002年~2014年)

処理規模と建設費の関係は次式で示される。

$$\text{標準的仕様の廃棄物焼却施設建設費（千円）} = 7,045,000 * \text{Ln}（X） - 24,230,000 \quad \text{式 28}$$

ここで、X：施設規模（t/日）

b. 高温高圧化による廃棄物焼却施設の建設費

廃棄物焼却施設の蒸気条件を高温高圧化すると、価格面では過熱器や蒸発管などの単体の装置だけでなく、プラント全体の価格に影響する。高温高圧化によるコストアップ要因を表 59 に示す。このため個々の設備の価格でなくプラント全体の増加価格で評価する。

蒸気条件や蒸気量増加と建設費の関係について、詳細に検討された既往の資料⁴¹⁾がある。2.65MPa*300℃を基準とした各蒸気条件(9.81MPa*500℃までの3ケース)の建設費全体の増加比率を表 60 に示す。また、設備費ごとの増加率を表 61 に示す。この比率を基に現在の廃棄物焼却施設の建設費を補正することにより建設費を推定することができる。

表 59 高温高圧化によるコストアップ要因

| NO | コストアップ要因 | 備考 |
|----|--|---|
| 1 | ボイラーの形式をテールエンド型にすることにより、建築面積が増加し建屋のコストが増加する。 | 10MPa*500℃の場合に、灰の付着を防止するために過熱器を吊り下げる構造のテールエンド型を採用し、ダスト払落しをハンマリング式とする。 |
| 2 | 蒸発管の温度上昇に伴い金属溶射、肉盛りによりコストが増加する。 | 燃焼炎に直接さらされる蒸発管を腐食減肉から保護するため、金属溶射や肉盛りをする。 |
| 3 | より高温の過熱蒸気とするため過熱器の伝熱面積を増加させる必要があり、このことにより配管重量が増加するだけでなく、高級材を使用することによりコストが増加する。 | 材料費だけでなく、加工費、据付工事費も増加する。 |
| 4 | 発電出力が増加することにより発電設備、電気設備の容量が増加しコストが増加する。 | |
| 5 | 高圧蒸気配管や高圧用の弁類、継手の採用によりコストが増加する。 | |

表 60 蒸気条件による建設費の増加割合

| 蒸気条件 処理規模 | 300℃*2.65 MPa | 400℃*3.92MPa | 450℃*5.88 MPa | 500℃*9.81 MPa |
|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 100 t/日 | 1.000 | 1.011 | 1.041 | - |
| 300 t/日 | 1.000 | 1.013 | 1.038 | 1.087 |
| 600 t/日 | 1.000 | 1.014 | 1.036 | 1.098 |

| | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 1200 t /日 | 1.000 | 1.012 | - | 1.083 |
| 1800 t /日 | 1.000 | 1.015 | 1.032 | 1.055 |

表 61 設備費増加率の内訳 (300 t /日)

| 蒸気条件 | 300°C*2.65 MPa | 400°C*3.92 MPa | 450°C*5.88 MPa | 500°C*9.81 MPa | 300°C*2.65 MPa の設備費(千円) |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|
| 焼却、ボイラー設備 | 1.00 | 1.01 | 1.06 | 1.09 | 3,556,000 |
| 過熱器 | 1.00 | 11.70 | 24.20 | 55.60 | 14,000 |
| 電気計装設備 | 1.00 | 1.02 | 1.05 | 1.13 | 2,354,000 |
| タービン発電機設備 | 1.00 | 1.02 | 1.04 | 1.06 | 950,000 |
| 土木建築 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.02 | 6,700,000 |
| 全体 | 1.00 | 1.01 | 1.04 | 1.09 | 18,002,000 |
| 発電出力 kW | 4,800 | 5,850 | 6,330 | 6,640 | - |

高温高圧化の廃棄物処理施設の建設費 (千円) = $A_{300} * (\text{表 60 の該当する係数})$ 式 29

ここで、 A_{300} = 蒸気条件 300°C * 3MPa 級の標準的仕様の建設費 = $0.9917 * A_0$

式 28 で求められる建設費には、蒸気条件 300°C * 3MPa 級 23 施設と 400°C * 4MPa 級 42 施設が含まれている。建設費から見た場合、200°C * 2MPa 級 3 施設は 300°C * 3MPa 級に含めた。 A_{300} と A_{400} (蒸気条件 400°C * 4MPa 級の標準的仕様の建設費) から下記の関係式が成り立つ。

$$A_{300} * 23 + A_{400} * 42 = A_0 * 65 \quad \text{式 30}$$

ここで、 A_0 = 標準的仕様の廃棄物処理施設の建設費 (式 28 で求められる建設費)

$$A_{400} = 1.013 * A_{300} \quad (\text{表 60 から 400°C * 4MPa 級の建設費の平均的増加割合の関係式}) \quad \text{式 31}$$

c. 標準的な仕様のメタン発酵施設の建設費

メタン発酵施設の建設費は、受入れ原料の内、生ごみ、厨芥、食品廃棄物が概ね 50% 以上 (家畜糞尿、し尿汚泥、下水汚泥が主体の場合は除外) で、かつ発電設備を備えた施設を抽出し、処理規模と建設費の関係から推定する。

この条件に該当する国内のメタン発酵施設で、建設費が公表されている施設は 10 施設ある。内訳は乾式メタン発酵施設が 2 施設、湿式メタン発酵施設が 8 施設である。メタン発酵施設の処理規模と建設費の関係を図 55 に示す。また、メタン発酵施設の処理規模と建設費単価の関係を図 56 に示す。この図から乾式と湿式の処理方式は建設費にあまり影響しないと言える。処理規模と建設費の関係は近似式として次式で示される。

$$\text{メタン発酵施設の建設費 (千円)} = 597,800 * \ln X - 589,000 \quad \text{式 32}$$

ここで、X : 施設規模 (t /日)

凡例：湿式メタン発酵施設◆、乾式メタン発酵施設★

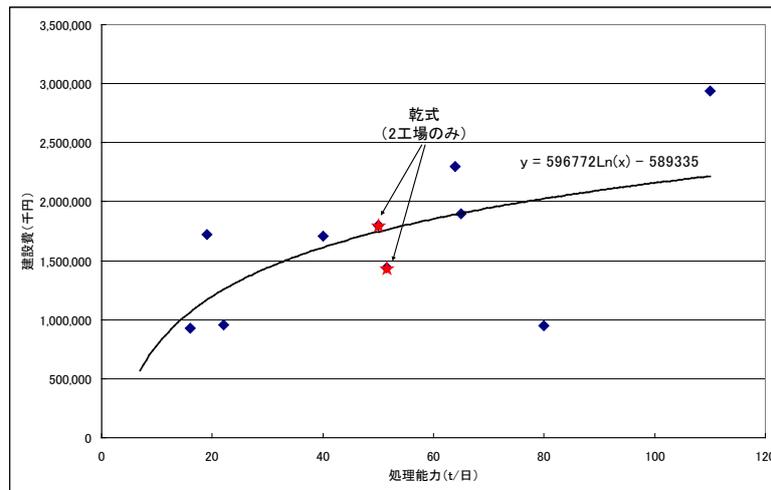


図 55 メタン発酵施設の処理規模と建設費の関係

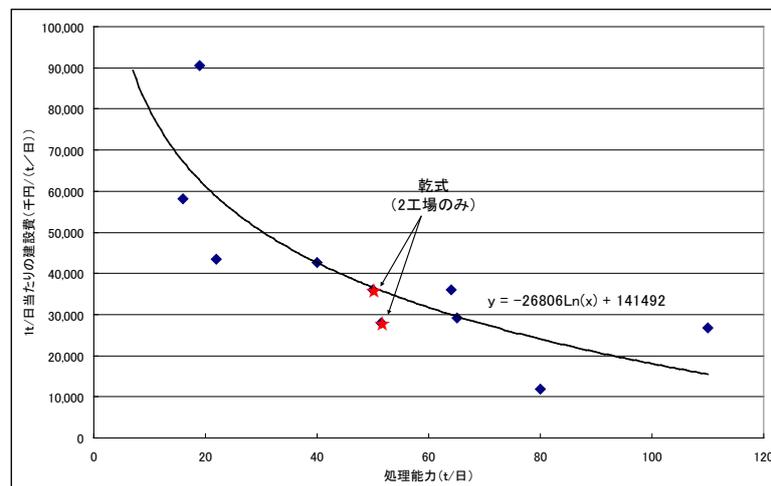


図 56 メタン発酵施設の処理規模と建設費単価の関係

d. 熱交換器の設備費

メーカーカタログ（ゼンシン株式会社 HP シェルアンドチューブ式熱交換器）の情報によって伝熱面積と熱交換器の価格の関係を図 57 に示す。この関係から近似式を導き推定する。この図から伝熱面積と熱交換器の価格の関係は近似式として次式で示される。

$$\text{熱交換器の価格 (千円)} = 0.4418 * X^2 + 87.34X + 294.1 \quad \text{式 33}$$

ここで、X：伝熱面積 (m²)

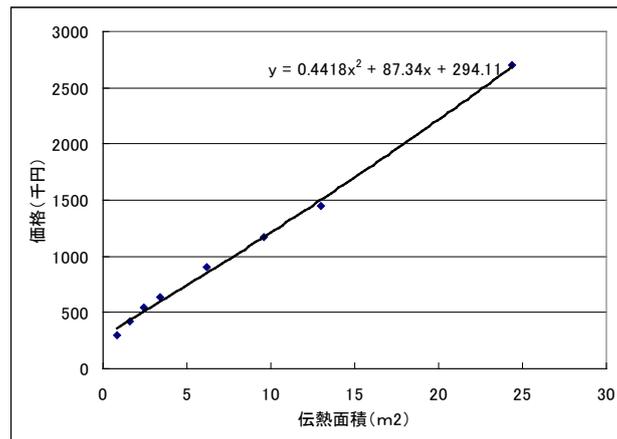


図 57 伝熱面積と熱交換器の価格の関係

伝熱面積の求め方：

$$\text{伝熱面積 } Am^2 = Q / (U * \Delta T)$$

ここで、

伝熱量 Q (kJ/h)

総括伝熱係数 U = 蒸気・温水熱交換：140～160、温水・温水熱交換：90～120

$$\text{対数平均温度差 } \Delta T = (\Delta T1 - \Delta T2) / \ln (\Delta T1 / \Delta T2)$$

$\Delta T1$ (°C)：蒸気入口温度－温水入口温度

$\Delta T2$ (°C)：蒸気出口温度－温水出口温度

e. 複合発電施設の独立過熱器

独立過熱器は構造的に燃料焼きボイラーと過熱器を組合わせたものであるため、燃料焼きボイラー部と過熱器部に分けて算出し、最終的に合計する。

燃料焼きボイラー部：バイオガスの熱量から価格情報誌⁴²⁾における該当する蒸気ボイラーの型番を選定し、横軸を燃料の熱量に換算し、価格との関係を図 58 に示した。

この価格情報誌には灯油消費量により型番が決められているが、熱量に換算して図示した（灯油の発熱量 = $36.7 \text{ MJ} / \ell^{43)}$ ）。この図から投入熱量と燃料焼きボイラーの価格の関係は近似式として次式で示される。

$$\text{燃料焼きボイラーの価格 (千円)} = 0.3983X + 1817 \quad \text{式 34}$$

ここで、 X ：投入熱量 (MJ/h) = $M / 24 * 35.8$

M ：メタンガス量 (Nm³/日)、メタンガス発熱量 = $35.8 \text{ MJ} / \text{Nm}^3$

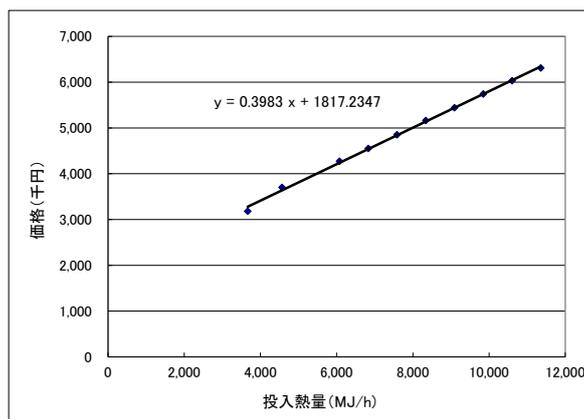


図 58 燃料焚きボイラーの価格

過熱器部：熱交換量、蒸気温度から環境省の公開情報データベースに基づき算出する。データベースでは 300 t /日の過熱器の価格が温度ごとに示されている。過熱器の蒸気条件と装置重量、設備費の関係を表 62 に示す。また、過熱器の価格と蒸気温度の関係を図 59 に示す。

高温高圧化した場合は過熱器での熱交換量が増加するので、広い伝熱面積が必要になり、重量が増加する。ただし、廃棄物焼却炉のボイラーの過熱器では、高温高圧化した場合は高級材を使用する必要があるが、独立過熱器はメタンガスを燃料とするため、高級材を使用する必要がなく、3MPa*300℃と同じ材質が使用できる。このため、価格は 3MPa*300℃の重量との比率になる。

表 62 過熱器の蒸気条件と装置重量、設備費の関係（廃棄物焼却施設 300t/日）

| 蒸気条件 | | 蒸気流量 | 熱交換量 | 装置重量 | 設備費 | |
|------|------|-------|------------|-------|---------|-------|
| ℃ | MPa | t / h | kJ / h | t | 千円 | 千円/MJ |
| 300 | 2.65 | 55.12 | 11,160,000 | 12.3 | 14,000 | 1.254 |
| 400 | 3.92 | 51.81 | 21,480,000 | 61.3 | 69,800 | 3.249 |
| 450 | 5.88 | 50.72 | 26,300,000 | 84.7 | 96,400 | 3.665 |
| 500 | 9.81 | 49.93 | 32,380,000 | 153.4 | 174,600 | 5.392 |

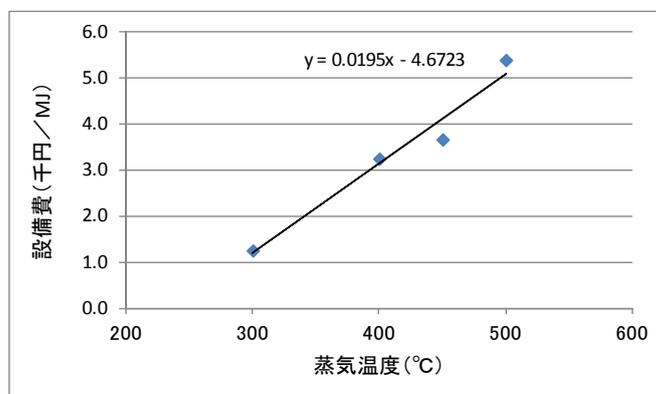


図 59 過熱器の価格と蒸気温度の関係

この図から蒸気温度と過熱器の価格の関係は近似式として次式で示される。

$$\text{過熱器の価格 (千円)} = (0.0195 * T - 4.67) * 35.8 * M / 24 * \eta \quad \text{式 35}$$

ここで、T：蒸気温度（℃）

M：メタンガス量(Nm³/日) メタンガス発熱量=35.8MJ/Nm³

η ：独立過熱器の熱効率 (=0.833) メタンガスバーナでの燃焼熱 900℃と排ガス熱交換（蒸気加熱、燃焼空気予熱）後のガス温度 150℃から設定

f. 運転管理費

廃棄物処理施設の運転管理費は用役費、人件費、補修費から構成される。

運転経費

用役費は電力費（売電と買電の収支）、燃料費、薬品費などからなる。

①廃棄物焼却施設

ごみ1t当たりの運転経費（人件費を含む）は施設規模、稼働年数による傾向が見られなかったため、平均値とする。

$$\text{年間運転経費 (人件費を含む：千円/年)} = 9.61 * W * D - E * 24 * D * Y / 1,000 \quad \text{式 36}$$

ここで、W=廃棄物処理量（t/日）

D=年間稼働日数（一般廃棄物の場合の基準日数：280日）

1t当たりの運転経費（人件費を含む）=9,610円/t

E=売電量（kWh/h）：買電の場合はマイナス

Y=売電単価（円/kWh）=13.4円/kWh（算出根拠：FIT価格⁴⁴⁾=17円/kWh（H27年度）、バイオマス比率60%、非バイオマス分買取り価格⁴⁵⁾=8円/kWh)

②メタン発酵施設：本課題で調査したインベントリデータを基に算出する。

$$\text{年間運転経費 (人件費を含む：千円/年)} = M * W * D / 1,000 \quad \text{式 37}$$

ここで、M=1t当たりの運転経費（円/t）

- ・乾式メタン発酵施設=5,030円/t
- ・湿式メタン発酵施設=-95.4*W+19,800

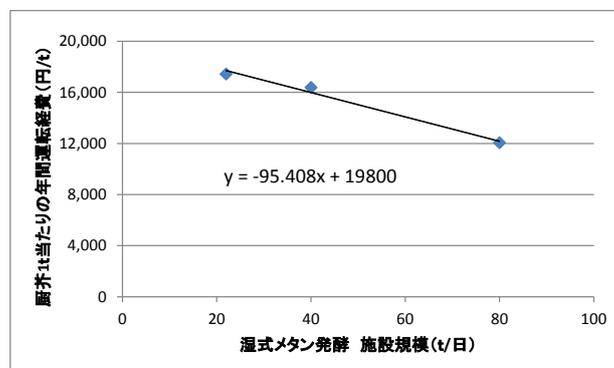


図 60 湿式メタン発酵施設の1t当たりの運転経費（人件費を含む）

人件費

人件費は運転経費に含まれる。人件費の基礎となる運転人員について、廃棄物焼却施設については処理規模と運転人員⁴⁶⁾の関係から、メタン発酵施設については関連資料⁴⁷⁾から推定する。

① 廃棄物焼却施設

運転人員は日勤と直勤務の合計とし、資料⁴⁸⁾から両方のデータがそろっている 255 工場について、処理規模当たりの運転人員と施設規模の関係を図 61 に示す。この図から運転人員は近似式として次式で示される。

$$\text{運転人員 (人/(t/日))} = 5.90 * W^{-0.627} \quad \text{式 38}$$

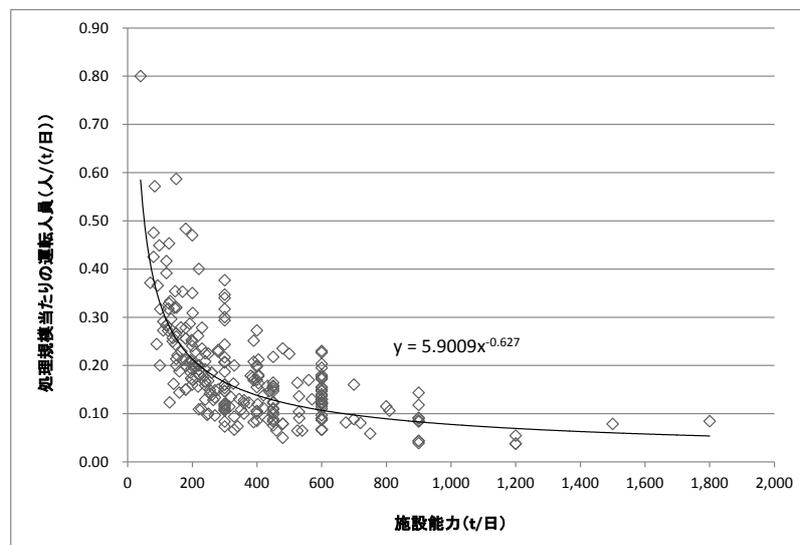


図 61 処理規模当たりの運転人員

② メタン発酵施設

・湿式メタン発酵施設：運転人員 = $0.0817 * W + 0.2$ 式 39

ここで、W：施設規模（t/日）

・乾式メタン発酵施設：運転人員 = 0 人

補修費

①廃棄物焼却施設：累計補修費の推定式⁴⁹⁾から算出する。

推定式で、X年とX-1年のAの値の差からX年の補修費を算出する。

$$A = B * (0.1561X^2 + 0.5501X - 2.0138) / 100 \quad \text{式 40}$$

ここで、A：累計補修費（千円）

B：建設費（千円）：式 28 による。

X：稼動年数（年）

②メタン発酵施設：本課題で調査したインベントリデータを基に算出する。

・湿式メタン発酵施設：補修費（千円） = $283 * W + 18,000$ 式 41

・乾式メタン発酵施設：補修費（千円） = $502 * W + 19,000$ 式 42

ここで、W：施設規模（t/日）

g. モデルケースにおける建設費、運転経費の試算

以上の検討結果を基に、3章で設定した産業への熱供給のモデルケースの中で抽気蒸気を有機化学工業に送る例について、さらに2章の複合発電施設の乾式メタン発酵・過熱蒸気・300t/日のケースについて、それぞれ概算の建設費、運転経費が算出できることを確認した。

産業への熱供給のモデルケースの設備費、年間運転経費の概算を表63に、複合発電施設の設備費、年間運転経費の概算を表64に示す。

以上の試算により、下記のこと明らかになった。

- ・熱交換器や独立過熱器は廃棄物焼却施設の建設費と比較して、十分安価である。
- ・運転経費は売電収入によって低減される。

表 63 産業への熱供給のモデルケース（有機化学工業）の概算

| 項目 | | 算出条件 | 費用（千円） |
|----------------|--------------------|---|------------|
| 設備費 | 標準的な仕様の 廃棄物焼却施設 | 施設規模 800t/日、400℃*4.0MPa (式 28) と (式 29) による | 22,970,000 |
| | 導管 | 距離 1 km、配管径 200A、架空 (3章より) | 105,000 |
| | 製造業側の熱交換 器 | 重合反応:伝熱量 47,352,000kJ/h 蒸気入口/出口温度=200℃/90℃ 温水入口/出口温度=60℃/70℃ 伝熱面積=282m ² (47m ² *6基) (式 33) による | 32,000 |
| | 設備費合計 | | 23,107,000 |
| 年間 運転 経費 | 用役費、人件費 | 売電量 = 10,650kWh/h (売電収入 = 959,000 千円) (式 36)による | 1,194,000 |
| | 補修費 | 稼働年数=5年、(式 40) による | 449,000 |
| | 年間運転経費合計 | | 1,637,000 |

表 64 複合発電施設（乾式メタン発酵）の 300 t/日・過熱蒸気のケースの概算

| 項目 | | 算出条件 | 費用（千円） |
|-----|--------------------|--|------------|
| 設備費 | 標準的な仕様の 廃棄物焼却施設 | 施設規模 300t/日、300℃級 (式 28) と (式 29) による | 15,820,000 |
| | 標準的な仕様の メタン発酵施設 | 施設規模 135t/日（乾式） (式 30) による | 2,343,000 |

| | | | |
|----------------|----------|---|------------|
| | 独立過熱器 | メタンガス量=12,825Nm ³ /h 出口蒸気温度=500℃ (式 34) と (式 35) による | 89,000 |
| | 設備費合計 | | 18,252,000 |
| 年間 運転 経費 | 用役費、人件費 | 売電量 = 3,225 kWh/h (売電収入 = 290,000 千円) (式 36) と (式 37) による | 707,000 |
| | 補修費 | 稼働年数=5年 式 (40) と (式 42) による | 396,000 |
| | 年間運転経費合計 | | 1,103,000 |

2) 広域化による焼却炉・収集運搬のシミュレーション

a. 広域化検討の結果及び考察

i. 名古屋ブロック（大規模自治体と小規模自治体群）

収集・運搬に関わる推計結果

名古屋ブロックは 225 万人の人口を有する大都市・名古屋市を中心として、近隣の小規模都市と共に広域化を行う広域化ブロックである。2013 年以前から小規模都市の清須市及びあま市甚目寺地区のごみは名古屋市へ委託する形で名古屋市とともに共同で処理されていた。一方、北名古屋市及び豊山町のごみに関しては、北名古屋衛生組合が処理を行っていた。

2013 年以降は北名古屋市及び豊山町の 2 市町は名古屋市と共同でごみ処理を行う体制をとっている。さらに地域の西側よりの焼却施設のみを利用して処理を行う処理体制をとっていたが、地域南東部に位置する鳴海工場の焼却処理参加に伴って、地域全体に焼却施設を設置したことにより収集・運搬にかかる総走行距離が 5.8%減少したと考えられる。

2020 年以降は、地域南部に位置し地域最大規模の焼却処理能力を有する南陽工場が設備更新を迎え、設備更新を終えた富田工場・北名古屋工場が処理に参加する計画となっている。それに伴って地域全体の焼却施設設置数は増加するが、各焼却施設へのごみ輸送距離の短縮化となるといえる。よって、総走行距離は 2013 年時比で 26.1%減少すると考えられる。

収集・運搬にかかる総走行距離の推計結果同様に、総時間も減少した。広域化参加前と 2013 年の推計結果を比較すると 39.8%減少し、さらに処理体制の変化に伴って 2020 年時には 14.3%減少し、2030 年、2040 年と徐々に減少していくと考えられる。これは前述したように地域全体に焼却施設を設置し処理能力を平準化したことによって、総走行距離が減少するためであると考えられる。総走行距離が減少した理由としては、焼却施設 - メッシュ間の移動距離を減少できたことが大きいといえる。

最後に総燃料消費量の推計結果については他の推計結果と異なる傾向を示した。広域化実施前と 2013 年と比較すると大きく減少しているが、2020 年以降は 2013 年と比較して 38.5%増加すると予想される。これは推計式に含まれる 4t 収集車の影響が大きいと考えられる。積載量の大きい車輛は一度に収集できるごみ量が大きく総走行距離・総時間の短縮に大きく寄与するが燃料消費率が大きい側面も持つ。そのため 4t 収集車を利用したごみ輸送距離が大きくなると総燃料消費量の増大に繋がる可能性がある。

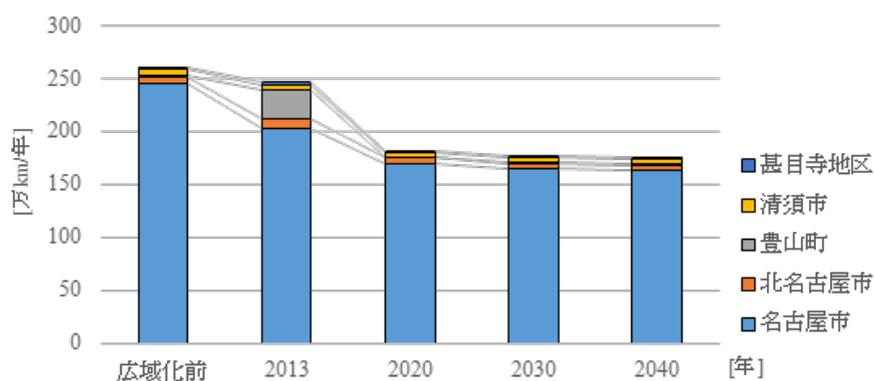


図 62 収集・運搬にかかる総走行距離推計結果 (名古屋ブロック)

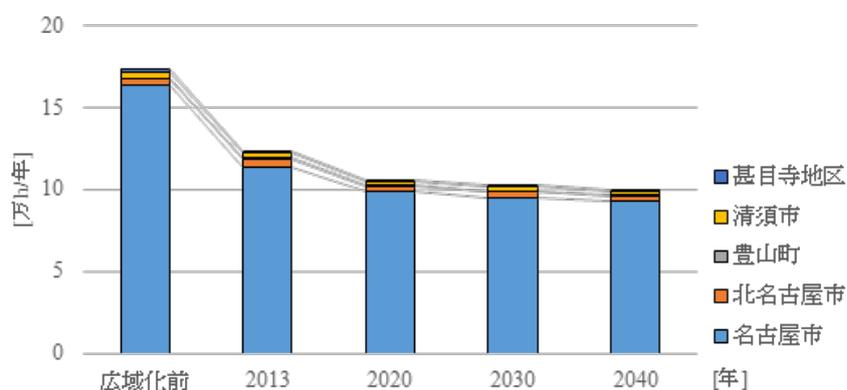


図 63 収集・運搬にかかる総時間推計結果 (名古屋ブロック)

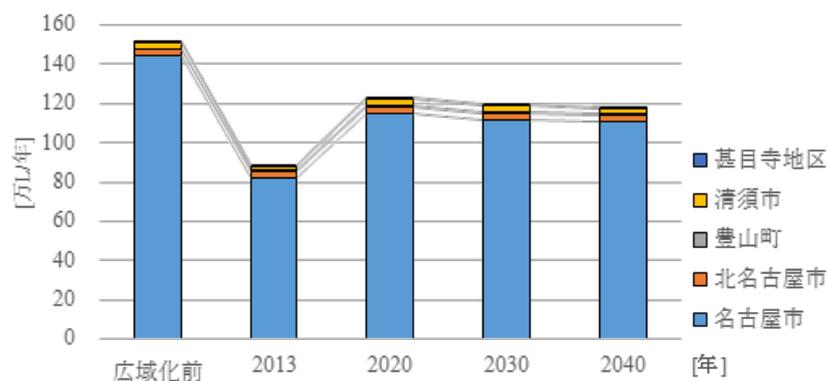


図 64 収集・運搬にかかる総燃料消費量推計結果 (名古屋ブロック)

総コスト推計結果

総コストは北名古屋市・豊山町の2市町が広域化前と2013年を比較すると15.1%減少したと考えられる。2020年以降の総コストは、2013年と比較して2020年時に一時5.9%増加するが徐々に減少し、2040年時には2013年比3.8%減少すると予想される。

さらに都市別に広域化前と2013年を比較すると、名古屋市:10.4%、北名古屋市:53.2%、豊山町:44.2%、清須市:39.8%、あま市甚目寺地区:24.6%といずれの都市も総コストは減少していると考えられる。特に大きなコスト削減効果が得られたのは、広域化に参加した北名古屋市、豊山町の2市町であったことが分かった。一方2013年以前から名古屋市へごみ処理を委託していた清須市、あま市甚目寺地区およびごみ処

理の中心となっている名古屋市のについても、北名古屋市、豊山町の2市町が広域化に参加したことによりコスト削減効果が得られたことが分かる。

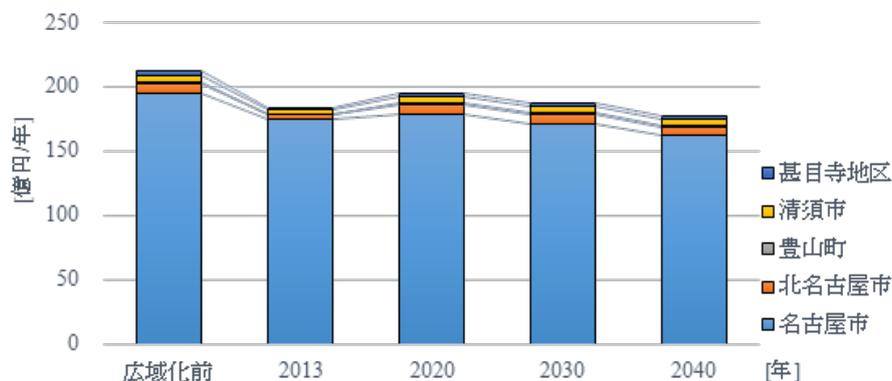


図 65 都市別総コスト推計結果 (名古屋ブロック)

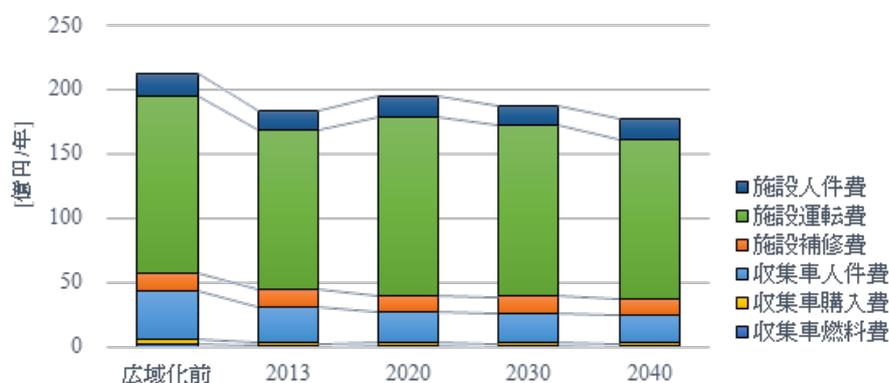


図 66 総コスト推計結果内訳 (名古屋ブロック)

推計項目ごとに内訳を見ていくと、最も多くの割合を占めているのは焼却施設運転費であり、ついで収集車人件費、焼却施設人件費である。総コストの削減に大きな効果を与えられとされる因子は、焼却施設の運転費および人件費であると考えられる。これらは焼却施設の設置個数に関係している。広域化実施前は地域全体で焼却処理に参加していた施設は5つであったが2013年時に4つ、2020年時以降は5つと処理体制が変化していく。それに伴って施設運転費・人件費は増減していると考えられる。

収集車人件費については総コストに占める削減効果は大きくないが、削減が可能な因子として挙げられる。2013年時と2020年時の総コストを比較すると5.9%増加するが、収集車人件費については14.0%減少すると予想される。

一方で削減効果が得られにくい因子としては、収集車購入費や燃料費である。収集車購入費は2013年時と2020年時以降を比較すると、14.0%、16.5%、19.5%と徐々に減少していくと予想される。収集車燃料費は2020年時以降2013年比で30%以上増加すると予想されるが、これらが総コストに占める割合は非常に小さい。

以上のことから焼却施設運転に起因するコストから削減効果を得る為には、焼却施設の数を減らし集約化していくことが必要であるといえる。しかし焼却能力の大きい焼却施設への集約化は、焼却施設運転に起因するコストの削減には効果的であるが、設置や補修といった点ではコスト増大は避けられないと思われる。

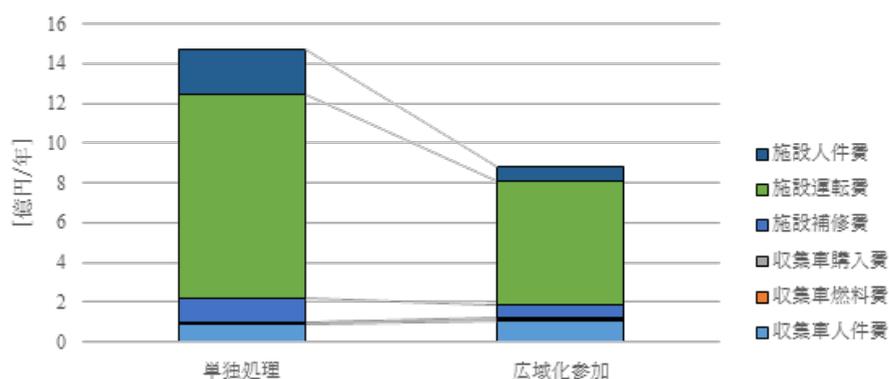


図 67 広域化未実施の場合との比較 (2020 年時北名古屋市・豊山町)

また 2013 年時から広域化に参加した北名古屋市と豊山町が 2020 年以降単独で処理を行った場合と比較すると、北名古屋市：40.9%、豊山町：34.1%コスト削減があり、2 市町全体で 39.9%のコスト削減があったと考えられる。推計項目ごとに内訳を比較すると、広域化に参加することにより収集・運搬に関わるコストは 24.9%増加することが予想されるが、焼却施設に関わるコストは単独で処理を行った場合と比較すると 44.6%削減されることが期待できる。中でも施設運転費が 38.4%、施設人件費が 68.2%削減されたことが総コストを大きく削減できた要因であると考えられる。以上のことから、名古屋ブロックにおける比較的小規模な都市であるこれら 2 市町は、広域化の恩恵を大きく受けていることが明らかとなった。

総 CO₂ 排出量推計結果

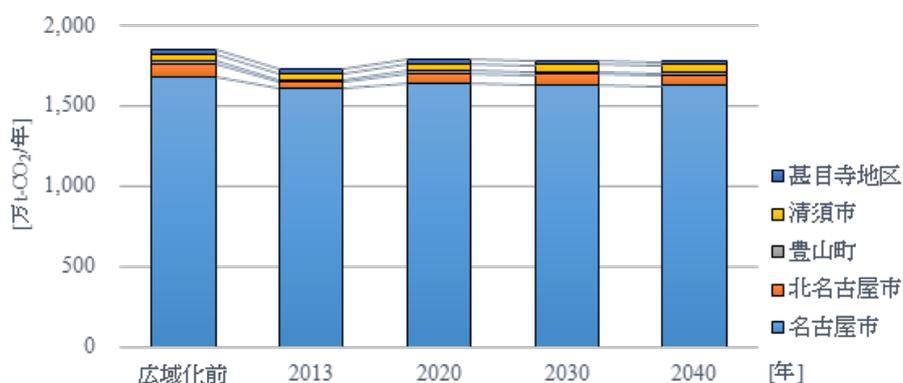


図 68 総 CO₂ 排出量推計結果 (名古屋ブロック)

名古屋ブロックにおける CO₂ 排出量はほぼ横ばいであることが予想される。ごみ収集・輸送、焼却の一連のシステム施設建設や補修、運転時のエネルギー、薬剤投入等に起因する CO₂ (以下、間接 CO₂) が 99% 近くを占めており、ごみ収集・輸送・廃棄物の持つ炭素に起因する CO₂ (以下、直接 CO₂) 直接の合計が占める割合は僅か 1%である。

項目ごとにみると排出量の大半を占めているのは間接 CO₂ であることが分かる。さらに焼却施設設置数を減少させた 2013 年時点で間接 CO₂ の排出量は 3%程度減少しているが、焼却施設に関するコストのような大きな削減は望めないと考えられる。以上のことから焼却施設統合による大きな CO₂ 排出抑制効果は得られにくいと考えられる。

また収集・輸送時のCO₂排出量は広域化前と2013年を比較すると30.4%減少したが2020年以降は約60%増加すると考えられる。また直接CO₂に関しては19.9%減少したが2020年以降は約13%増加すると考えられる。さらに2030年から2040年時の推計結果をみると、直接CO₂の減少に合わせて間接CO₂が減少していることや、焼却施設規模減少といった面をふまえるとCO₂排出量削減のためには、処理すべきごみ量を減らす必要があると言える。

ii. 尾張北部ブロック（中規模都市群と小規模都市群）

収集・運搬に関わる推計結果

尾張北部ブロックは、県北部の中核となる中規模都市・犬山市や江南市を含む広域化ブロックである。現在は施設更新時期の違いや設置する焼却施設が不確定であることなどから広域化が進展していないブロックである。当ブロックの推計結果は処理体制の変化や広域化計画の進展が含まれていないため、推計結果はごみ発生量の変化に大きく依存していると考えられる。以上のことから人口増減やごみ発生量の推移の影響をみるためには、対象とした5つの広域化ブロックの中で最も適しているといえる。

推計結果が大きく減少したのは2013年から2020年へと推移する点である。ここで、地域内の予想人口（特に江南市）が約10%減少する。そのため総走行距離、総時間、総燃料消費量の推計結果が、それぞれ8.8%、9.7%、22.1%減少したと考えられる。

総コスト推計結果

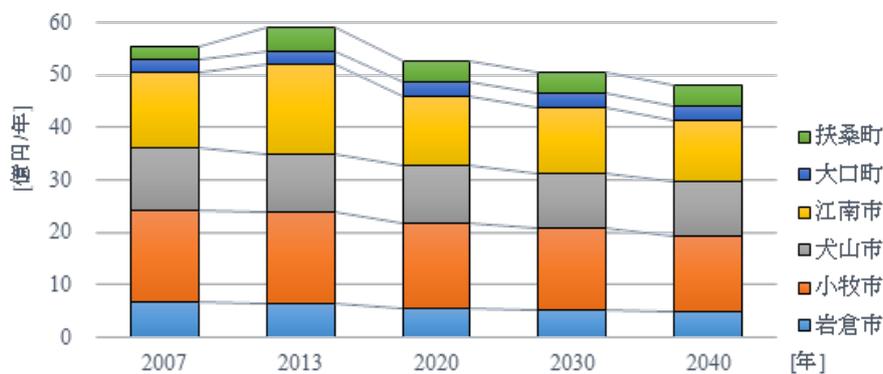


図 69 都市別総コスト推計結果（尾張北部ブロック）

人口の増減が特に大きい江南市において総コストの変化が大きく見られるが、他の市町では大きく減少しないと考えられる。当ブロックは小牧市・岩倉市からなる広域化ブロック内の処理地域（以下、小ブロック）とその他4市町からなる小ブロックが設置されている。いずれの小ブロックも計画は未だ進展していない状況であるが、計画の進展に伴って総コストの削減が期待できる。

名古屋ブロック同様、総コストの内訳で大きな割合を占めているのは施設運転費であり、ついで収集車人件費、施設人件費であることが分かる。当ブロックの中の江南市や大口町など全4市町からなる小ブロックの計画の進展がブロック全体のコスト縮減に大きな影響を与えることが期待できる。

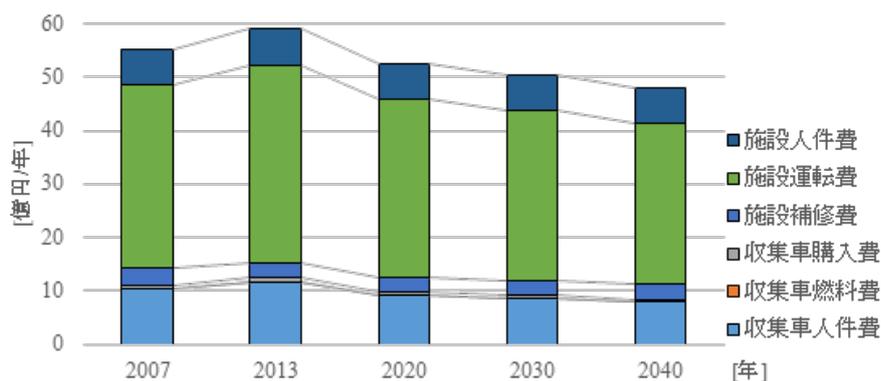


図70 総コスト推計結果内訳 (尾張北部ブロック)

当小ブロックは、現時点で具体的な計画を立案中であるが焼却能力 212t/日程度の焼却施設を設置する可能性を示している。それを基に現在有している焼却施設と同様の処理方式を採用し焼却能力 212t/日程度の焼却施設を設置し焼却処理を行うと仮定した場合と図71の現状推計結果を比較すると約37%のコスト削減が期待できる。特に施設運転費と施設人件費はそれぞれ35.8%、46.8%削減の可能性もある。以上のことから、焼却施設集約化は大きなコスト削減効果があるといえる。

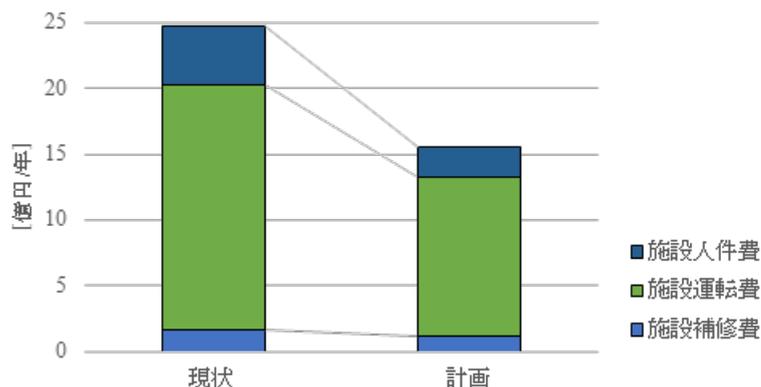
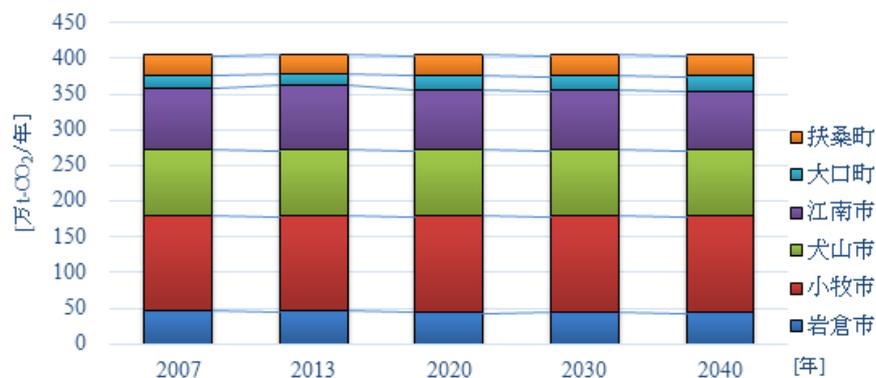


図71 現状焼却施設と予定焼却施設との比較 (小ブロック：江南市、犬山市、大口町、扶桑町)

総CO₂排出量推計結果

図72 総CO₂排出量推計結果 (尾張北部ブロック)

尾張北部ブロックにおけるCO₂排出量もほぼ横ばいであることが予想される。名古屋ブロック同様に、ごみ収集・輸送、焼却の一連のシステムの中で間接CO₂が99%近くを占めており、ごみ収集・輸送・直接CO₂の合計が占める割合は僅か1%である。

項目ごとにみると収集・輸送時のCO₂排出量は広域化前と2013年を比較すると2倍程度増加するが2020年以降は横ばいである。直接CO₂に関しては2013年時点で一度増加すると予想されるが2020年以降は減少傾向である。これはごみ発生量が抑制されたため2020年以降減少しているといえる。さらに当広域化小ブロックの計画案（212t/日の焼却能力を有する施設）に準じて広域化が進展したと仮定すると、焼却施設由来のCO₂排出量が24.9%削減される可能性がある。

以上の点から広域化ブロックにこだわるのではなく、広域化ブロックをさらに小ブロック化し、広域化計画を作成していくことによって、柔軟な対応をすることも重要な方法であるといえる。

iii. 海部津島ブロック（小規模自治体群 広域化達成済み）

海部津島ブロックは広域化達成地域として位置づけられている広域化ブロックである。海部津島ブロックは、平成12年より現広域化ブロック構成都市が共同処理を行っていたことから広域化達成と位置づけられた地域である。収集・運搬にかかる総走行距離、総時間、総燃料消費量の推計結果は2013年時に一度増加し、2020年以降徐々に減少することが予想される。このような推計結果の推移を示したのは、2001年に処理を行っていた焼却施設が2013年以降処理を行っている処理施設に所在地が変更され、焼却施設-メッシュ間の移動距離が増加したためであると考えられる。2020年以降は人口の減少に伴って推計結果は徐々に減少していると考えられる

総コスト推計結果

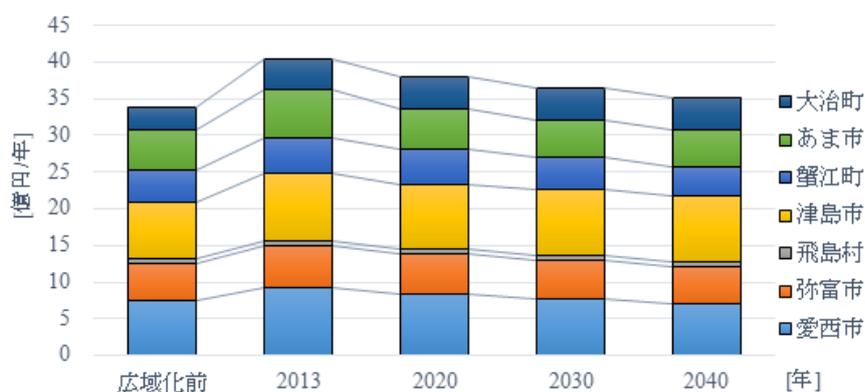


図 73 都市別総コスト推計結果（海部津島ブロック）

焼却施設を新設し、能力を増加した2013年に、総コストは一度増加したが2020年以降は徐々に減少していくことが予想される。2013年時の総コストを都市別にみると最も増加した都市は大治町：24.9%、ついで愛西市：17.6%、津島市：16.3%であった。名古屋ブロックにおいて小規模都市は経済的に広域化の恩恵を受けていたが、当ブロックにおいては小規模都市にあまり大きな恩恵を与えていない。

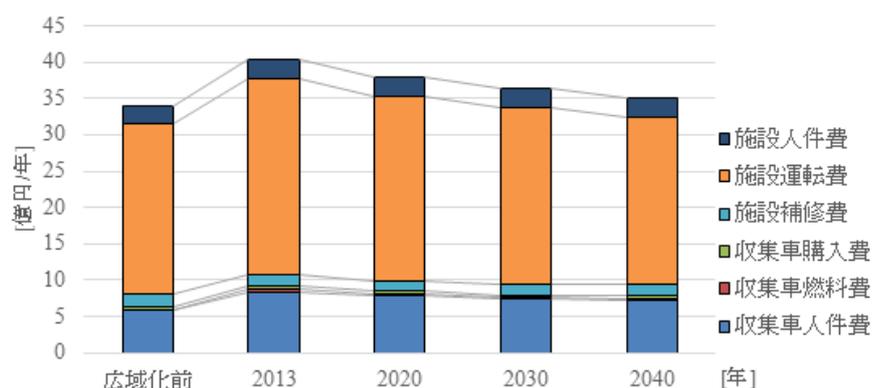


図 74 総コスト推計結果内訳 (海部津島ブロック)

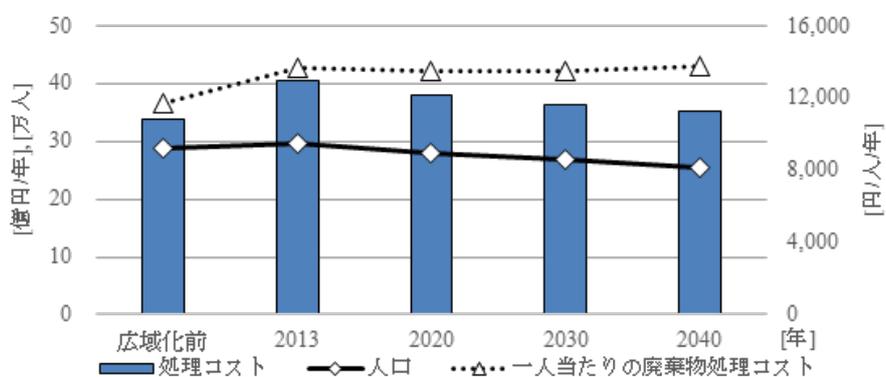


図 75 廃棄物処理原単位の推移

総コストの内訳から、他の広域化ブロック同様総コストに占める施設運転費の割合が非常に高く、ついで収集車人件費、施設人件費が占めていることが分かる。海部津島ブロックについては、今後も現在の処理体制に基づき焼却施設の設備更新を行いながら処理を進めていく予定となっている。

しかし人口の減少に伴って総コストが減少していく一方で一人当たりの処理コストの増加があることが予想される。春日井ブロックとは異なり当ブロックは、歳出削減の直近の対策とし、積極的にごみ処理の民間委託を行う案を講じるとしている。春日井ブロックのように資源化施設の導入ではなく、歳入と歳出のバランスを調整していくことを重要視している理由としては、人口減少に伴って資源（特定の廃棄物発生量）の安定供給が難しいことや、構成市町村からの税収増が見込めないためではないかと考えられる。また熱回収や売電等での歳入確保についても将来的に安定的かつ確実に見込める収入でなく、現状以上の発電効率の発電技術等の技術革新がない限り導入は難しいだろうと思われる。

以上のことから、ブロック人口が比較的少なく資源の安定供給が難しい地域や人口減少が予想され税収増が難しい地域には、資源回収施設の導入は適していないと考えられる。これは資源売却による歳入確保などに関して、経済状況に左右されることから安定的に歳入を得ることがめ難いためであると考えられる。

総 CO₂排出量推計結果

海部津島ブロックにおける CO₂排出量もほぼ横ばいであることが予想される。海部津島ブロックについても、現在の処理体制に基づき焼却施設の設備更新を行いながら処理を進めていく予定となっているが CO₂

排出量を削減することも難しいのではないかと考えられる。ただし海部津島ブロック単独で資源化施設の導入を考えるのではなく、近隣の他ブロックとの連携し資源化施設を設置しCO₂排出量抑制を図っていくことで削減を実現できる可能性は考えられる。

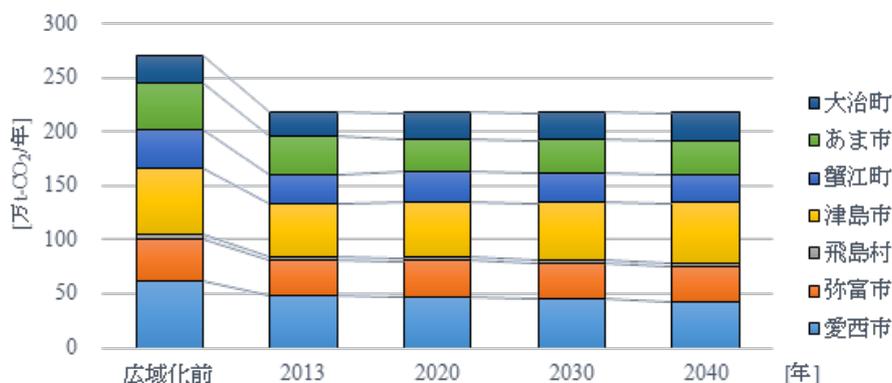


図 76 総CO₂排出量推計結果（海部津島ブロック）

iv. 知多南部ブロック（中規模都市群と小規模都市群 狭面積）

知多南部ブロックでは、2020年度に広域化を実施予定であるため、2020年に収集運搬距離が増加している。このブロックは海沿いの平野部が多く、面積の狭い市町村で形成されている。中規模都市の半田市以外はすべて小規模都市である。広域化によって、3つの施設に統合されるため、焼却施設から遠い市町村ほど運搬距離の増加率が大きい。そのため、焼却施設から離れている市町村では、収集運搬費が増大する。このように収集運搬経費の負担に差が生じることは、広域化が進んでいない理由の一つであると考えられる。

また、廃棄物排出量・人口が多い地域ほど収集運搬距離は長くなるため、より大きい都市の周辺に焼却施設を建設することで収集運搬距離を少なくすることができると考えられる。また収集運搬時間、燃料消費量についても、2020年に大きく増加することが予想される。これは収集運搬距離に依存するため同じような傾向になっている。よって知多南部ブロックにおいては、半田市周辺に焼却施設を建設することが理想的であるといえる。また収集運搬経費を減少させるためには、収集回数を減らすことや大きい収集車を利用することが有効である可能性が考えられる。

総コスト推計結果

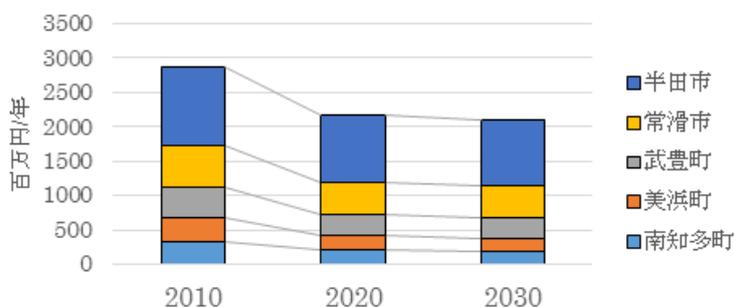


図 77 総コスト推計結果（知多南部）

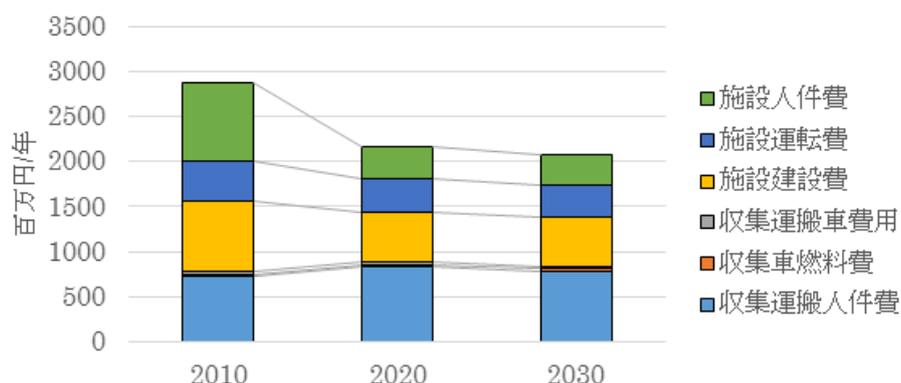
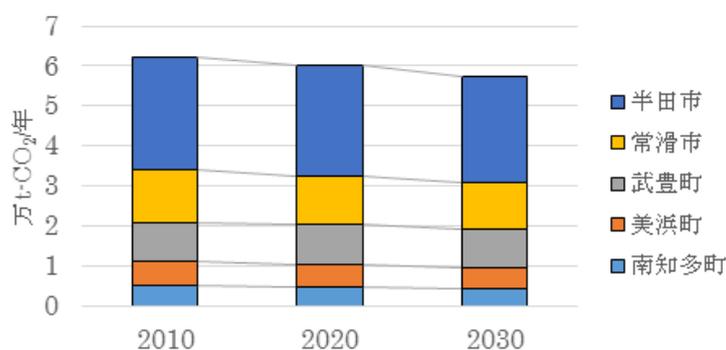


図 78 総コスト内訳 (知多南部)

知多南部ブロックのコストに関しては、2020年に大きく減少している。常滑市、半田市で約20%、武豊町、美浜町、南知多町では約40%の減少が見られる。そのため、広域化は小規模都市により大きい効果があるといえる。内訳としては、収集運搬人件費は約15%増加しているが、施設人件費が約60%と大きく減少している。コスト全体で見ると25%削減されている。よって、広域化の主な効果である焼却施設統合によるコスト削減が見られた例であるといえる。

CO₂排出量推計結果

図 79 CO₂排出量推計結果 (知多南部)

知多南部ブロックでは、それぞれの市町村でCO₂排出量がわずかに減少した。しかし、燃料消費量は増加していることから、収集・運搬に関するCO₂排出量は増加している。またCO₂排出源のほとんどが焼却施設の運転に起因するものである。そのため、処理する廃棄物量が大きく減少しない限り、CO₂排出量を減らすことは難しいといえる。知多南部ブロックは、人口の減少幅が大きい地域であり可燃性一般廃棄物量は減少すると予想されることから2030年のCO₂排出量がわずかに減少した。

v. 東三河ブロック広域化 (中規模都市群と小規模都市群 広面積)

東三河ブロックでは、東三河ごみ焼却施設広域化計画を参考に、表65に示す4つのシナリオを設定した。シナリオ1は豊川市・新城市に焼却施設を、北設地区に中継施設を建設し、シナリオ2は豊川市に焼却施設を、新城市・北設地区に中継施設を建設する。シナリオ3では豊川市に焼却施設を、北設地区に中継施設を

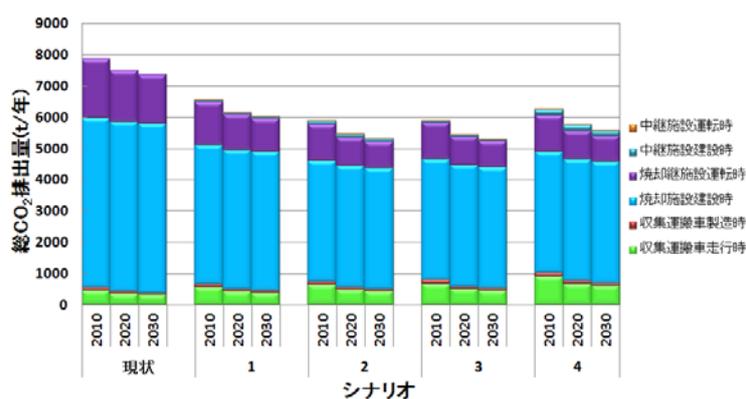
設を建設し、シナリオ4は新城市に焼却施設を、豊川市・北設地区に中継施設を建設する。比較基準として、現状と同じ地区に焼却施設を新たに建設するシナリオも仮定した。

表65 東三河ブロック広域化のシナリオ

| シナリオ | 新焼却施設 | | | | | 中継施設 | | | | |
|------|-------|-----|-----|------|----|------|-----|-----|------|----|
| | 豊川市 | 蒲郡市 | 新城市 | 北設地区 | 箇所 | 豊川市 | 蒲郡市 | 新城市 | 北設地区 | 箇所 |
| 現状 | ○ | ○ | ○ | ○ | 4 | × | × | × | × | 0 |
| 1 | ○ | × | ○ | × | 2 | × | × | × | ○ | 1 |
| 2 | ○ | × | × | × | 1 | × | × | ○ | ○ | 2 |
| 3 | ○ | × | × | × | 1 | × | × | × | ○ | 1 |
| 4 | × | × | ○ | × | 1 | ○ | × | × | ○ | 2 |

可燃系一般廃棄物広域化実施時の総CO₂排出量を図80に、総コストを図81に示す。図によると全てのシナリオのCO₂排出量および総コストは現状に比べ減少した。特に焼却施設の建設、運転におけるCO₂排出量および総コストの低減が全体の結果に大きく影響している。一方で収集運搬に関しては収集運搬距離の延長によりCO₂排出量およびコストが増加している。

広域化のシナリオ同士で比較すると、シナリオ2、3において、総CO₂排出量・総コスト共にほぼ同じ値である一方で、収集・運搬時のCO₂排出量はシナリオ2のほうが38t/年少なく、シナリオ2の処理体制がCO₂排出量の削減に貢献できると考えられる。広域化を実施する際にはごみ排出量の密度が高い豊川市の近くに焼却施設を、ごみ排出量の人口密度が低い新城市・北設地区には中継施設を建設することが有効である。この人口密度に基づく傾向は豊橋・田原ブロックの結果と同様であった。人口は豊川15万、蒲郡8万、新城5万であるのに対して、豊橋38万、田原6万である。東三河ブロックの人口の差は豊橋・田原ブロックのそれよりも小さい。広域化は市町村単位で検討することが多いが、全域の人口分布を元にして広域化を進めることが有効であることが示唆される。

図80CO₂ 排出量推計結果（東三河）

また、市別の総コストの変化を図82に示す。広域化によっておおむね市の負担は減少するが、シナリオ1もしくはシナリオ4では豊川市の負担が増加することが分かった。広域化のやり方によっては市町村間での負担が異なる可能性がある。

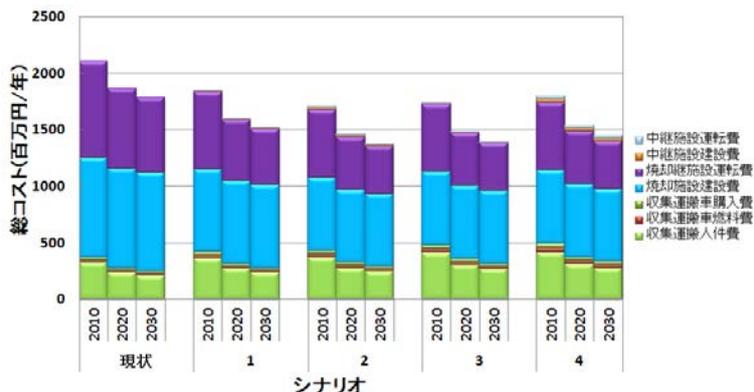


図81 総コスト内訳 (東三河)

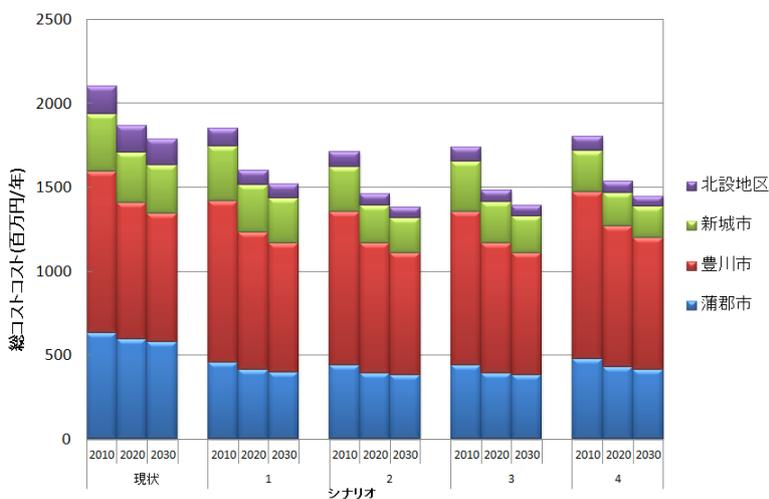


図82 総コスト推計結果 (東三河)

vi. 豊橋・田原ブロック広域化 (中規模都市と小規模都市群 1対1)

本ブロックでは収集・運搬に関して 5 つのシナリオを検討した。A. 現状、B. 豊橋市に全て運搬、C. 田原市に全て運搬、D. 燃えるごみ、生ごみを別の曜日に分別収集後、豊橋市に全て運搬、E. D に加え田原市に中継施設を設置とする。施設及び小型、大型の収集車は全て更新するものとした。

表 66 豊橋・田原ブロックで検討したシナリオ

| シナリオ | 広域収集 | 分別 | | 焼却処理 | | 生ごみ処理 | 中継施設 | |
|------|------|------|-----|------|----|-------|------|----|
| | | 焼却ごみ | 生ごみ | 豊橋 | 田原 | 豊橋 | 豊橋 | 田原 |
| A | × | ○ | × | ○ | ○ | × | ○ | × |
| B | ○ | ○ | × | ○ | × | × | ○ | × |
| C | ○ | ○ | × | × | ○ | × | ○ | × |
| D | ○ | ○ | ○ | ○ | × | ○ | ○ | × |
| E | ○ | ○ | ○ | ○ | × | ○ | ○ | ○ |

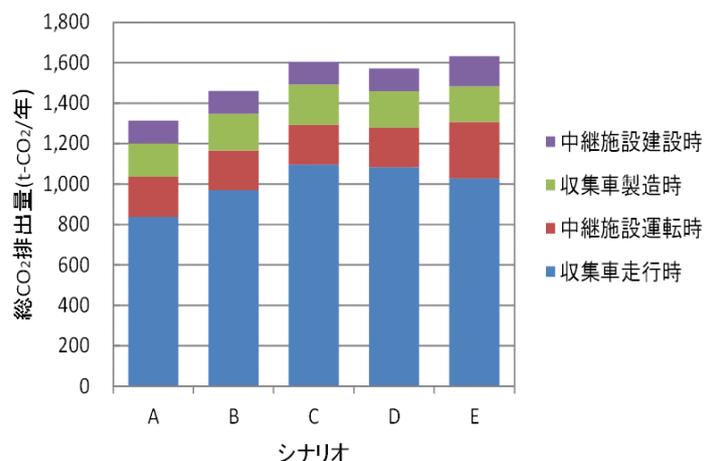
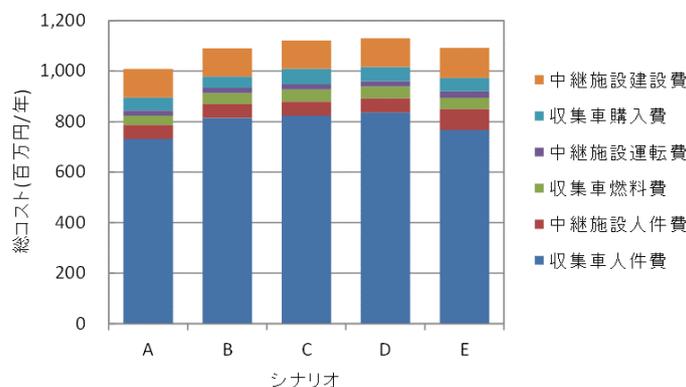
図 83 収集・運搬における総 CO₂排出量

図 84 収集・運搬における総コスト

可燃系一般廃棄物収集・運搬における CO₂排出量およびコストの推計結果を図 83、84 に示す。最も CO₂排出量が多いのはシナリオ E（田原市に中継基地を置く）、最もコストが多いのはシナリオ D（田原市に中継基地を置かない）であった。E はシナリオ A と比べ、CO₂排出量、コスト共に増加している。シナリオ E はシナリオ D に比べて収集頻度が増加することによって総収集距離は長くなるが、収集車両が少なくなるために全体の CO₂排出量、コスト共に減少している。シナリオ D に比べてシナリオ E の CO₂排出量が増加した理由として、田原市の廃棄物排出量が少ないために、田原市のごみを運ぶ際に大型の中継輸送車の CO₂排出量効率は悪く CO₂排出量の増加が考えられる。よって、中継基地を設けず中継車を用いないシナリオ D の方が CO₂排出量が少なくなる。シナリオ E ではシナリオ D に比べコストは減少するが、CO₂排出量は増加することから、燃えるごみ、生ごみの分別を行い 1 日の廃棄物排出量を少なくすることで CO₂排出量、コスト双方で低減ができると考えられる。

3) サブテーマ 3 のまとめ

施設規模と収集・運搬の空間スケールの変化によるトレードオフの効果を評価し、最適な計画作成に資するため、施設規模ごとに費用情報等を整理した。また、地理情報システムを活用した収集・運搬モデル

を愛知県の広域化計画に適用し、その効果を評価した。CO₂排出量については、焼却施設集約化を行いブロック全体の焼却施設設置数が減少した年に減少した地域もあったが、いずれの地域もほぼ横ばいで推移していくことが予想された。CO₂排出については焼却施設運転に起因する部分が大きく、焼却施設設置数を減らしたとしてもごみ量が減らなければ大きな削減効果は得られにくいことも示された。総コスト削減の為に焼却施設の集約化が効果的であることが、定量的に確認された。

(5) 長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言（サブテーマ4）

1) 高齢化社会のさらなる進展がごみ分別および再資源化に与える影響の分析

図 85 に、年齢階級別世帯人数別での分別割合の結果を示す。全年齢でみた場合、全世帯の平均分別割合は 62.7%であった（単身世帯は 58.1%、2人以上世帯は 65.6%）。世帯数で見ると、単身世帯よりも2人以上世帯の方が、分別割合は高くなっている。この世帯は、既婚者や子供を有する世帯が該当し、独身者に比べてごみの分別意識が高いためであると考えられる。年齢階級別で見ると、年齢階級で浮き沈みはあるものの、80～84歳までは上昇していく傾向が読み取れる。高齢者の数値が高いこと理由の一つとして、その多くが仕事を退職して自由になる時間が多く持っていることが考えられる。また、新たな生きがいを見つけるため、積極的に環境問題に関する勉強を行っている人も多い。このような高齢者のなかには、孫やひ孫のために現在の自然環境を次世代に残したいという強い意志を持っている人も多い。例えば、消費者庁⁵⁰⁾が2016年1月に実施した消費者意識基本調査の中で、環境に配慮した商品やサービスを選択するという質問に対し、心掛けていると回答している60歳以上の年齢層の割合は、60歳未満の年齢層に比べて高くなっている。しかし、85歳以上になると、分別割合は下がってくる傾向にある。これは、体力や認知機能の衰えにより、ごみ分別作業が十分にできなくなるためであると考えられる。

図 85 の結果を踏まえて、神戸市全世帯の分別割合を推計し、2015年～2035年までの世帯数の変化を考慮した分別割合の将来変化の結果を図 86 に示す。社人研による世帯数の将来推計では、2020年まで世帯数は増加し、その後緩やかに減少していく。また、世帯数に占める80歳以上人口の割合は、2015年に10%であったものが、2035年には17%まで増加する。これに伴い、分別割合も変化していくが、その変化は緩やかである。全世帯をみた数値では、2015年の62.7%から、2035年は62.5%であり、約0.2%の減少にとどまっている。20年間でみた場合は大きな影響はなく、2035年以降の推計も必要である。

図 87 に、分別割合とCO₂排出量との関係を表した結果を示す。分別割合が大きくなるほど容リプラは資源化に回されるため、焼却に伴うCO₂排出量は少なくなる。2015年の全世帯平均でみた場合、焼却と資源化を合わせたCO₂排出量は1,864tである。もし、全市の分別割合が、分別割合が最も低かった30～34歳(49.0%)と最も高かった80～84歳(70.8%)並になった場合、排出量の差分は約1,322tとなる。そのため、現状の分別割合を上昇させることが、環境面からみて重要であることが分かる。このような数値を用いることで、分別割合が低い年齢階級における教育はもちろんのことであるが、分別割合が減少してくる85歳以上についても何らかの対策を検討する必要がある。例えば、2035年までの短中期であれば、自治体によるごみ分別支援は有効であるし、高齢者のごみ分別は免除して、そのかわり機械選別を用いて自治体が分別を代理で実施することも考えられる。

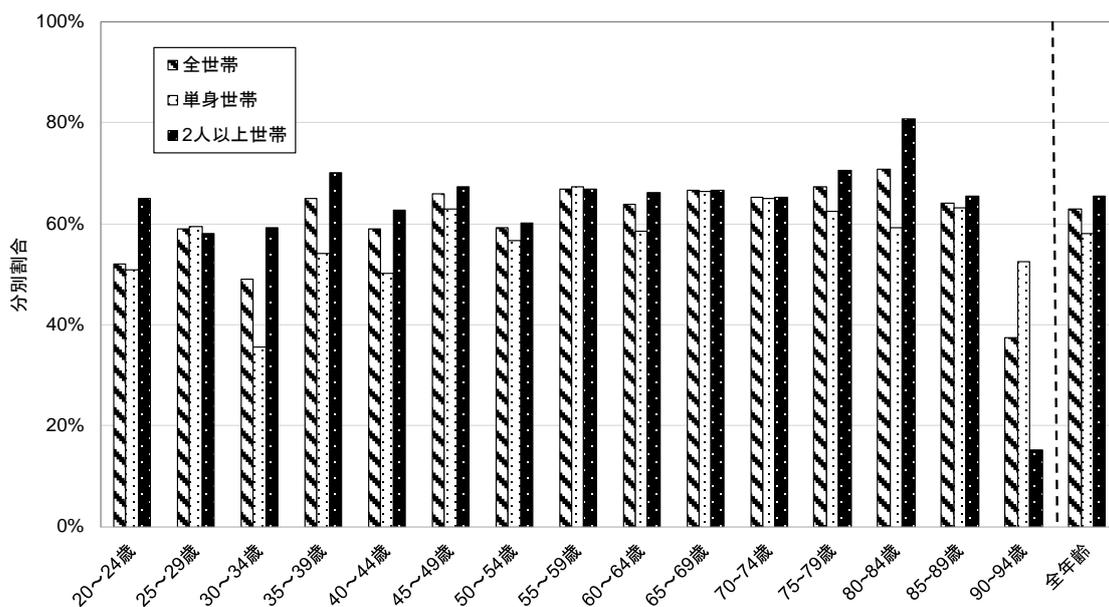


図 85 5歳年齢階級別、世帯人数別での分別割合

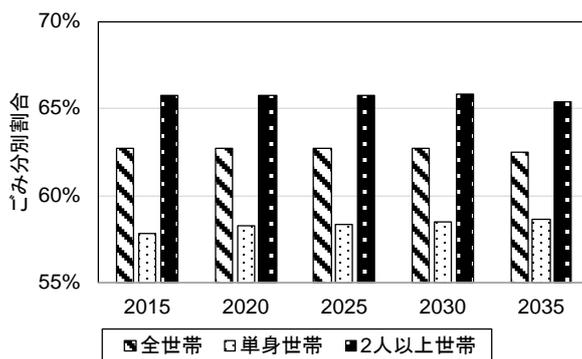


図 86 分別割合の将来変化

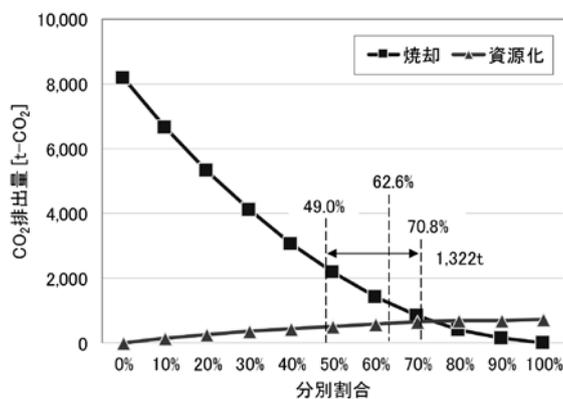


図 87 分別割合と CO₂排出量との関係

2) 廃棄物のエネルギー回収の高度化のためのシミュレーションツール

a. 出力例

本シミュレーションではオプションごとの純費用及びエネルギー回収効率を概算することができる。すべてを提示するのは難しいため、表 67 に示した地域条件の異なる 7 都市における費用便益の詳細を図 88 に表した。

対象とした都市のうち、費用面からみた場合にはすべてオプション 6 が最も純費用が小さくなった。これはメタンガスの販売単価を LNG 輸入価格と同等と仮定したことで、安価な契約の都市ガス程度(70 円/Nm³)となり、販売便益が大きくなったことによるものである。

表 67 費用便益を示した 7 都市の地域条件

| 分類 | | 都市 A | 都市 B | 都市 C | 都市 D | 都市 E | 都市 F | 都市 G |
|---|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| 人口 | | 500000 | 500000 | 200000 | 200000 | 500000 | 5000 | 5000 |
| 面積 | | 1000 | 20 | 100 | 100 | 1000 | 100 | 20 |
| 施設数 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5km 以内 の蒸 気利 用可 能な 事業 所数 | パルプ・紙・紙加工品 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| | 化学工業(無機化学) | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| | 化学工業(有機化学) | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| | 化学工業(医薬品) | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| | ゴム製品 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| | 窯業・土石製品(ガラス・同製品) | 10 | 10 | 10 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| 分別 率 | 厨芥 | 0 | 50 | 0 | 50 | 50 | 0 | 50 |
| | 紙 | 0 | 80 | 40 | 80 | 80 | 0 | 80 |
| | プラスチック | 0 | 80 | 40 | 80 | 80 | 0 | 80 |
| 組成 | 厨芥 | 48.5 | 48.5 | 48.5 | 48.5 | 48.5 | 48.5 | 48.5 |
| | 紙 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 | 30.5 |
| | プラスチック | 12.2 | 12.2 | 12.2 | 12.2 | 12.2 | 12.2 | 12.2 |
| | その他 | 8.8 | 8.8 | 8.8 | 8.8 | 8.8 | 8.8 | 8.8 |
| 1 km ² 当たりのステーション数 | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 廃棄物発生量 | | 266 | 266 | 266 | 266 | 266 | 266 | 266 |
| 収集トラック 1 台の積載量 | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

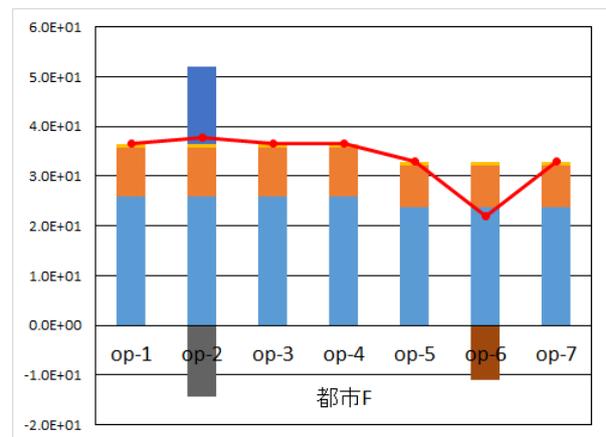
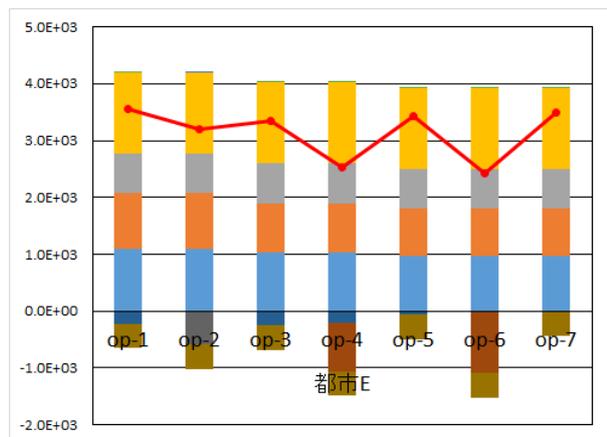
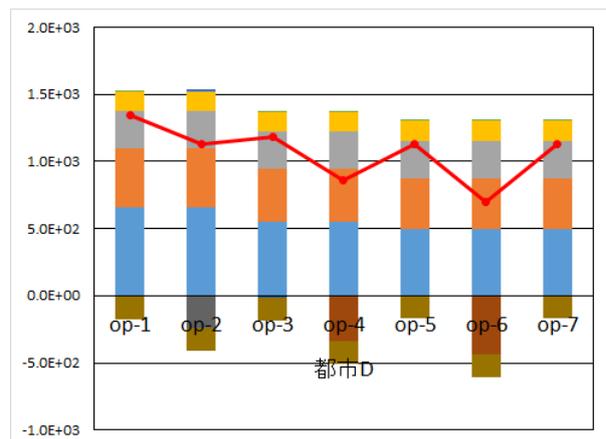
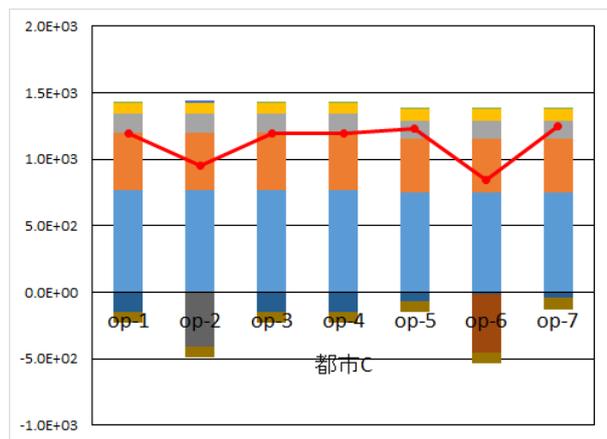
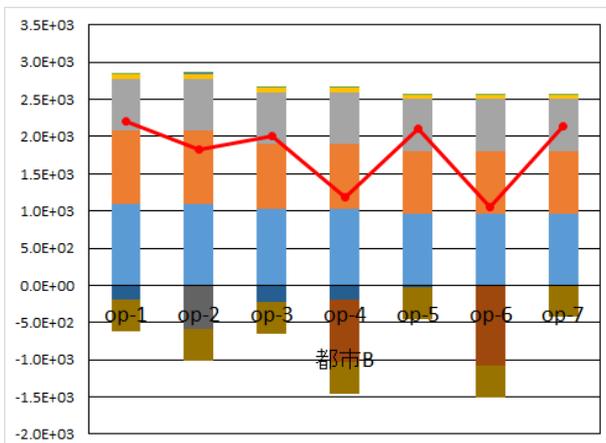
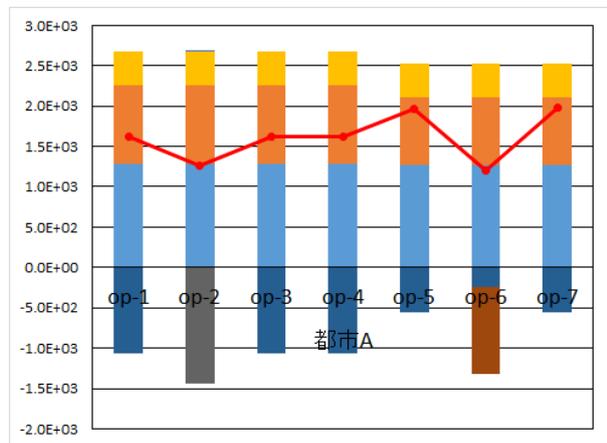
図 89 は対象とした 7 都市について、純費用及びエネルギー回収効率から最適なオプションを選択し、人口との関係を表したものである。

純費用から見た場合、すべての都市でオプション 6 が選ばれる結果となったが、都市ガスへの接続に要する施設建設費等が十分に考慮されていないことも一因であると考えられる。一方、エネルギー回収効率から見た場合、分別率の低い都市ではオプション 2 が採用され、分別率が高い都市ではオプション 6 が採用される傾向が示された。このことから、地域条件やごみ処理体制に伴い、最適なオプションは異なるとともに、純費用とエネルギー回収効率のどちらの側面から判断するかによっても選択されるオプションが異なることが示された。

エネルギー面からみた場合、焼却を行い、回収エネルギーを蒸気にして産業へ利用するオプション 2 が選ばれた都市 A、C、F があることから、条件によっては蒸気利用には高いエネルギー回収ポテンシャルが

あることが確認された。しかし、蒸気利用は生産できた蒸気の80%を使用できるという仮定に基づいており、条件に依存する。適用可能な地域条件を整備することでより明確な条件を確認できると考えられる。

また、費用や蒸気利用可能量は仮定に基づいて入力されており、ほかの原単位に比べて精度が低いため、現実の条件に合わせた補正を行っていく必要がある。



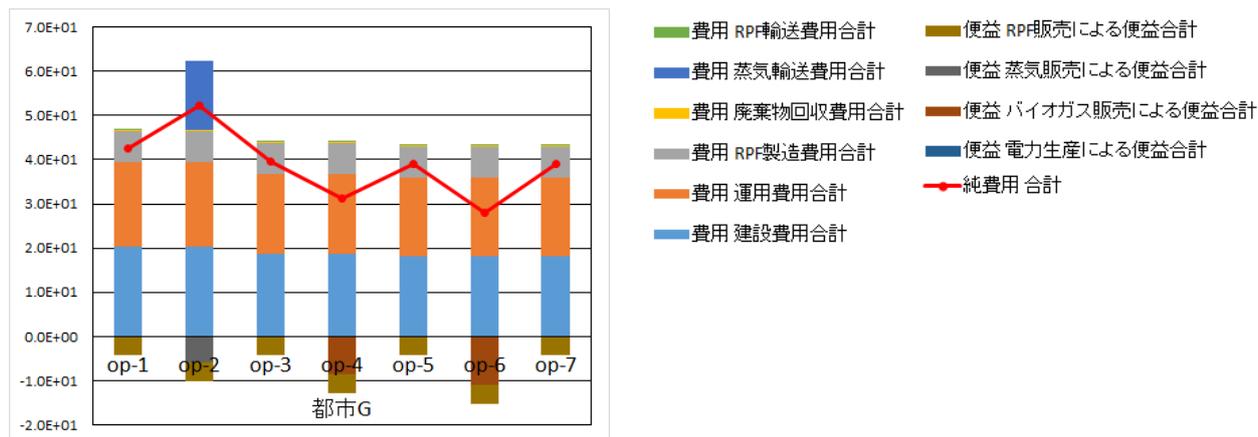


図 88 対象 7 都市の費用便益評価結果

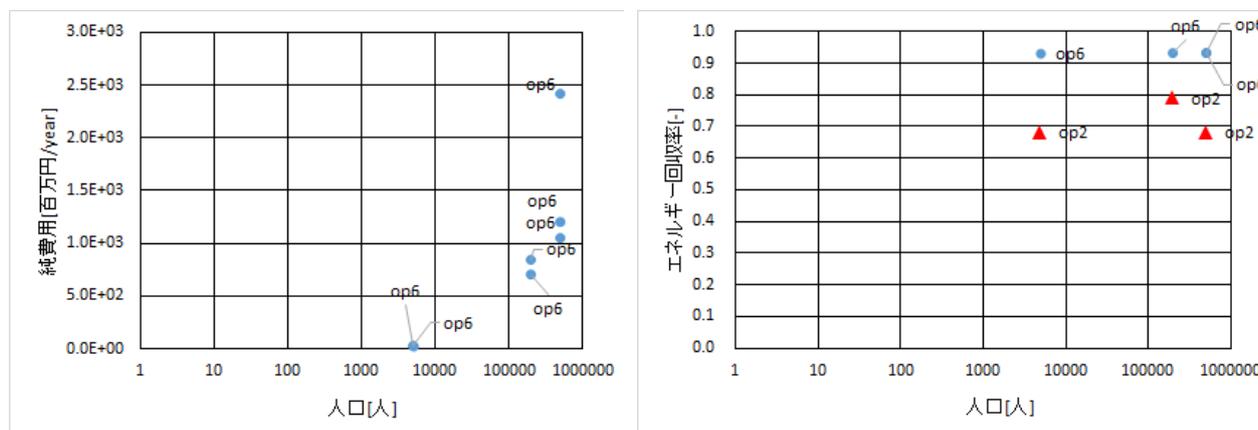


図 89 対象 7 都市における純費用及びエネルギー回収効率と人口との関係

上記のように、本シミュレーションでは地域条件の違いによる廃棄物処理システムの純費用及びエネルギー回収率による比較をすることができ、その詳細な費用便益についても確認できるものが開発できた。

本報告書では紙面で簡易に確認できるものとしたため、図 89 のようにプロット数が少ないが、地域条件と各オプションの純費用及びエネルギー回収率を比較することのできるシステムも開発している。本シミュレーションを確認することで、地域条件ごとの各オプション選択時の費用便益や純費用及びエネルギー回収率から見た最適オプションを知ることができ、自治体担当者がごみ処理計画を作成する際の一助になると考えられる。

b. 費用対効果の高いエネルギー回収の事例集

効果の高いエネルギー回収の事例について、とりまとめを行った。以下に、上述のオプション 2 に相当する事例について例示する。

高度なエネルギー回収事例集

事例1：韓国・蔚山（ウルサン）市 焼却熱の産業利用「エコインダストリアルパーク事業」

1 蔚山(ウルサン)市の取り組み

韓国の蔚山(ウルサン)市にあるSungam第一・第二清掃工場では、清掃工場の焼却熱を回収し、近隣の化学工場に中圧・高圧熱を供給している。同事業は、韓国政府が2005年から実施している国家エコインダストリアルパーク事業(以下、EIP事業)の一環として、自治体と産業が協働しながら実現した、清掃工場からの高度なエネルギー回収のベストプラクティスの一例である。

清掃工場は、自治体である蔚山広域区が管轄し、200トン/日が2基、250トン/日が1基の計3基の連続式ストーカー炉を有し、下水汚泥処理施設、最終処分場と併設した施設である。第一清掃工場は、2008年6月に実現したテレフタル酸を生産する化学工場(Hyosung社)への中圧熱供給を実現するために、45t/時の蒸気(圧力：1.57MPa)の回収施設を建設し、15t/時を清掃工場での自家消費、30t/時を化学工場に送る改修を実施した。その後、第二清掃工場が新設される際に、ほぼ同時に新設される予定であった太陽光発電パネルに利用するトリアセチルセルロースを製造する化学工場への高圧蒸気の供給が計画され、35t/時の高圧蒸気(圧力：4.4MPa)の供給設備が建設された。熱供給事業は、2012年10月に実現し、Sungam第一・第二清掃工場は、中・高圧蒸気の産業熱供給事業を継続的に実施している。

本事業での蒸気販売は、実施開始後も年々増加しており、経済的にも環境的にもメリットが報告されている。清掃工場の収益は、

供給先の拡大に伴い、25億KRW(2009年)から74億KRW(2013年)に増加し、化学工場側では、化石燃料の代替により、37億KRW(2012年)の節約になった。また、この事業で45,500トン-CO₂/年の二酸化炭素排出削減の効果があるとされている。なお、建設費は、72億KRW/kmであり、事業当たりの投資回収年は約1年と報告されている。

2 地域特性

蔚山(ウルサン)市は、韓国の南東海岸部に位置する人口120万人、面積1,060km²、一人当たりGDP5万6千ドル(2014年)の産業都市である。現代(Hyundai)グループの城下町として発展し、自動車、造船、石油化学のコンビナートが形成され、韓国の工業生産量の15.2%を占め、アジアの4大産業都市のひとつとされている。Ulsan Mipo(土地面積：46.2km²、企業数：629社、生産額：73.8US\$)、Onsan(土地面積：17.3km²、企業数：232社、生産額：18.5US\$)の2つの国家レベルの産業団地がある。

Sungam第一・第二清掃工場は、Ulsan Mipo産業団地に位置し、SKグループの石油化学コンビナートと近接している。Sungam地区は、もともと最終処分場が立地しており、清掃工場は、最終処分場への負担を軽減するために、2000年に建設された。一般廃棄物・産業廃棄物の双方を受け入れる最終処分場に近接することで、収集運搬による近隣への影響などNIMBY問題、産業

エコインダストリアルパーク

従来の大量生産・大量消費型の工業団地から、環境に配慮した工業団地(エコインダストリアルパーク)への転換が、世界各国で進められている。エコインダストリアルパークでは、異なる工場が近接している立地特性を活かして、ある工場の副産物、廃棄物、廃熱等を他の工場で利用する、いわゆる産業共生の取り組みが進められているケースも多い。韓国では、国が主導してエコインダストリアルパークの同国内への普及やその機能の高度化を推進している。

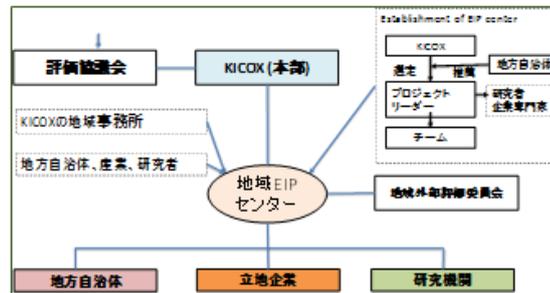


高度なエネルギー回収事例集

用地の所得などの障壁があまりなく、産業団地に建設することができたと考えられる。同地区は、EIP事業を活用して促進したスチームハイウェイ事業を推進しており、清掃工場の焼却熱の供給事業だけでなく、地域全体での熱利用ネットワーク（産業共生）を進めている。化学産業を中心に13施設が参画し、5段階に分けて、全長6.0kmの施設が参画し、5段階に分けて、全長6.0kmのパイプラインが整備され、14の熱利用ネットワークが実現し、90トン/時の熱のやり取りが行われている。スチームハイウェイ事業は、総投資額27.5百万KRWで、年間19.68百万KRWの経済的便益があり、14.6万トン-CO₂の温室効果ガス削減効果があると報告されている。Sungam第一・第二清掃工場とHyosung社の第一・第二・第三工場はの熱ネットワークは、スチームハイウェイ事業に接続することで、余剰熱や不足分を考慮した安定的な熱供給を実現している。

3 推進体制

韓国のEIP事業は、第一フェーズ2005-2010年（5か所のEIPパイロット事業）、第二フェーズ2010-2015年（38か所のEIPに拡大）、第三フェーズ2015-2020年（EIP間のネットワーク化）の15年にまたがるプロジェクトで、蔚山(ウルサン)の2つの国家レベルの産業団地は第一フェーズのEIPに選定された。当時、韓国では、産業通商資源部(MOTIE)を中心に産業戦略について議論を進めており、エコインダストリアルパーク(EIP)のコンセプトに強い関心を示していた。自国の産業の分析の結果、世界的にも産業が集約的に立地している地域特性を活かして熱/副産物の利活用ネットワークを構想し、国策としてEIP事業を推進することになった。ただし、EIPに関する社会的な認知度が低く、専門家も不足していたため、人材育成を含めた体系的なマネジメント体制を作ることに力点を置いて制度・計画が設計された。



スチームハイウェイ事業

韓国・蔚山エコインダストリアルパークでは、異なる工場間で蒸気を融通する取り組みが進められている。工場間が蒸気配管で結ばれており、蒸気を供給された工場での化石燃料消費の削減に繋がっている。このうち、工業団地内の2つの焼却炉から近隣の工場に蒸気を供給している事例も存在する。焼却炉からの蒸気供給の事例を含め、多くの事業が投資回収年数が1~2年以内と、収益性が高く、経済的にも大きなメリットをもたらしている。



高度なエネルギー回収事例集

事例1：韓国・蔚山（ウルサン）市 焼却熱の産業利用「エコインダストリアルパーク事業」

その中心的な役割を担ったのが、韓国産業団地公団(KICOX)であった。KICOXは、EIPの戦略や実施に係るワークショップや研修プログラムを頻繁に実施し、EIP事業を実施できる人材育成を継続的に実施してきた。同時に、地域社会への情報発信もTVや地域紙等を通じて積極的に行うことでEIP事業への理解を醸成してきた。そして、事業の推進組織として産業団地ごとに地域EIPセンターを設立し、実際の熱/副産物の地域ないで利活用ネットワークを検討、設計、事業化を進める体制を整えた。地域EIPセンターは、地方自治体、産業、研究者で構成され、KICOXの支援の下、①中立な立場での交渉の仲介、②企業の紹介と事業化の契約(MOU)への合意とサインの、③熱/副産物の利活用ネットワークの候補者の支援、④熱供給の停止などのリスクを軽減するための交渉、⑤障壁の緩和と参加者の公平な利益分担の確保を目的として活動している。

熱/副産物の利活用ネットワークの事業化では、事業の特定、実現可能性調査(FS調査)、ビジネスモデルの設計のステージごとにそれぞれの関係者が役割を担っている。事業の特定のステージでは、地域EIPセンターが生産と廃棄に係るデータを分析することでトップダウンの構想を練るとともに、地域の大学・研究機関・企業団体が、対象施設を訪れ、工場長などと議論するなどボトムアップでの検討を重ね、ポテンシャルを特定し、参加企業を募る。蔚山(ウルサン)の産業団地では、第1フェーズで40のポテンシャルが特定され、FS調査、事業化が検討された。FS調査のステージでは、KICOXが必要な予算の最大75%を負担する支援策がある。ただし、外部のアセスメントを受ける必要がある。そして、自治体が残りの25%を負担することで実質的な金銭負担がなくFSを実施できる。事業化のステージは、中立的な立場の地域EIPセンターが企業間の

利益配分の交渉などで重要な役割を果たす。なお、この枠組みで40のポテンシャルのうち2012年現在では、13の熱/副産物の連携(熱利用が5つ、副産物利用が8つ)が事業化している。これらの事業化に費やした時間は、FS調査におよそ12か月、交渉期間が4～34か月との報告がある。13事業総計で、1.9MUS\$の研究開発費であった。

このように蔚山(ウルサン)の事例では、政府(MOTIE)の強いイニシアティブのもとKICOXが実質的に事業のマネジメントを担い、地域ごとの地域EIPセンターを設置し、自治体・地域産業が共同で事業化することを見据えた体制が整っている。

4 事業化の経緯

Sungam清掃工場は、第一フェーズからEIP事業に参画し、化学工場(Hyosung社)への蒸気供給を開始し、その後、第二工場の建設を含めた連携を段階的に強化していった。

2000年に建設されたSungam第一清掃工場は、もともと生成される45トン/時の蒸気のうち、23トン/時を発電(1,500kW)、11トン/時を隣接するコンポスト化施設への熱供給に利用し、残りは復水していた。その後、EIP事業に参画し、需要先としてBC重油を67リットル/時消費していたテレフタル酸の製造工場が候補として挙がり、4か月間のFS(費用は、1万ドル)を実施した結果、事業化が進みパイプラインの敷設などに5百万US\$の投資し、結果として7.1百万US\$の利益を生み出し、0.7年で投資を

段階的なビジネスモデルの強化

韓国・蔚山エコインダストリアルパークにおける、焼却炉から化学工場への蒸気供給の事業では、中圧蒸気の供給から事業が開始されたが、安価なエネルギー供給が受けられることから、工場側では新規工場が建設され、高圧蒸気の供給に切り替えるとともに、工場の既存のボイラーを撤去して、施設の維持管理費の削減を行うなど、段階的にビジネスモデルを強化し、新たな雇用の創出に繋がるなど、相乗的な効果が得られている。



高度なエネルギー回収事例集

回収したと報告されている。

この事業で信頼関係を構築してきたSungam清掃工場と化学工場(Hyosung社)は、第2清掃工場の建設計画が進んだ時期に、蒸気の追加的な利用可能性について協議し、新たなビジネスモデルの設計を開始した。化学工場(Hyosung社)側は、現状の熱供給事業で中圧蒸気は十分賄われていたが、一方で、高圧蒸気(4.4MPa)が必要なトリアセチルセルロース製造施設の建設候補地を検討しており、蔚山(ウルサン)を有力な候補地とみなしていた。Sungam第2清掃工場側は、当初、発電施設を併用した中圧蒸気供給を検討していたが、化学工場(Hyosung社)側の要望を受け、発電施設の設置をせずに高圧蒸気を供給できるボイラーの設置を決定した。高圧蒸気の供給事業は、高い蒸気価格での販売を可能にし、発電を犠牲にしたにもかかわらず、Sungam第2清掃工場は利益を高めている。化学工場(Hyosung社)側も化石燃料の価格と比較して立地を決定しており、燃料費の削減に成功している。また、トリアセチルセルロース製造施設の新設によって140人の雇用も創出する効果もあった。

蔚山(ウルサン)の産業団地では、EIP事業の推進体制を通じて、地区内での連携体制が段階的に形成されてきた。また、1事業の成功を受け、発展的な連携事業の検討が進み、より高利益のビジネスモデルを実現した事例と言える。現在は、GHG排出削減などの環境利益も含めた関係者間の費用・利益配分が新たな議題として挙がっており、カーボンプライスが実施された際の新たなビジネスモデルを模索している。

5 政策的な支援

日本では、現在のところ、焼却熱の産業利用の事例はほとんどなく、コンセプト自体が普及していない。だが、以下のように、その機運が高まっていると考えられる。

- 地域エネルギー計画におけるEIP事業の可能性の再評価
- 廃棄物を含むバイオマス利活用施設での熱利用の推進

清掃工場からの熱供給は、これまでは主に民生用が主であったが、燃料消費の削減効果や、それに伴う二酸化炭素の削減効果は、産業への熱供給が有利であり、高効率な焼却発電と比較しても、約2倍程度の効果が期待できる。このような産業での焼却熱の利用を推進するため、国や自治体为主导するFS事業の実施や、ステークホルダー間の会合の開催、情報共有の強化など、法制度の拡充以外の面でも、事業推進の支援を行っていくことが可能である。

なお、本事例で採り上げたのは、大規模な産業団地の例であるが、焼却炉から工場への蒸気供給は、個別に見れば1対1の蒸気供給となっており、より小規模自治体と工場の間でも成立し得ると考えられる。



実現のポイント

- ✓ 産業（コンビナート）との近接性
- ✓ 公的なプロジェクトとの連携
- ✓ 関係者間での継続的な連携体制・ビジネスモデルの強化

【参考文献】

H.S. Park, 2013. Ulsan Ecopolis and Eco-Industrial Parks Challenges towards Sustainability. Ecoforum on "Pathway to I-EA-T Eco Industrial Town", Bangkok, Thailand

g. シミュレーションツールの課題

本シミュレーションでは乾式メタン発酵の残渣発生量や蒸気の利用可能量について、簡易的な仮定をもとに計算を行っている。これら、特にオプション採用の結果に大きく影響する蒸気の利用可能量については、自治体担当者が入力しやすく、かつエネルギー回収の可能性を検討できるものへと改良していく必要がある。加えて、本事業で対象とした地域条件は、その条件に対して適切なオプションを確認し、現在および将来の廃棄物処理計画の支援に使用するのに十分な数が検討されているとは言えない。また、ごみ処理体制についての比較は行っていない。そのため、今後、各地域条件・ごみ処理体制を対象とした感度分析を行い、地域条件と採用されるオプションとの関係を明確にしていくことが必要になる。

また、7都市を対象に詳細な費用便益についてのグラフ及び散布図を提示したが、都市の選択は制作側の意図によって行われ、使用者が必要とする任意の都市を対象とした費用便益をグラフ化し、確認することができていない。今後、感度分析等を進めることで、オプション選択の分岐条件を明示できるように改良していく予定である。

3) 大幅な低炭素化の推進と、将来の人口変化に備えた政策提言（まとめ）

低炭素化の強力な推進や、経済効率性にも優れる廃棄物処理システムの構築のためにも、無駄の少ない設備投資で、最大限の化石燃料代替効果を得られる対策の推進が求められている。焼却炉の大型化（収集範囲の広域化）は、経済的にメリットがあることは、従来から指摘されており、環境政策の方針の1つともなっているが、本調査でも地理情報システム（GIS）を利用した詳細な定量評価により、その効果を確認した。

しかし、高効率な発電設備を持つ焼却炉は建設費が高額で大きな初期投資であり、将来の人口減少や3Rの推進等による焼却対象廃棄物量の減少に対して、将来に無駄を増大させる可能性がある。また、発電効率は大規模な最新の焼却施設でも、せいぜい20数%に留まっており、エネルギー利用効率は高いとは言えない。投資の無駄を抑制すると同時に、エネルギー消費削減効果を飛躍的（2倍程度）に高める方法として、廃棄物の持つエネルギーの産業利用が有効である。

一般廃棄物中の雑紙類や混合プラスチック等を分別収集し、再生原燃料利用として産業で利用するオプションは、サブテーマ2で述べたように、再生原燃料の加工設備の建設・運転費用が焼却炉に比べて安価であるため、可住地人口密度が数千人/km²を超え、分別収集が効率的に行える地域で、焼却対象廃棄物の削減による焼却施設の縮小や削減が可能な条件下では、経済的にも有利である（Fujii et al., 2016）⁴⁾とともに、固定費用が小さいために、廃棄物量が減少しても、処理単価の上昇を抑制することができる利点がある。一般廃棄物の産業原燃料利用については、中国・上海交通大学、韓国・蔚山大学等と連携して、それぞれの国の都市に適用した場合の評価を実施するなど、アジアへの展開の可能性も検討している。

焼却施設で製造した蒸気を、近隣の工場に供給して利用するケースでは、工場側の既存の化石燃料ボイラーと、大きな遜色の無いエネルギー効率で蒸気が供給できるため、一般の火力発電所と比べて大きく発電効率の劣る焼却発電と比較して、化石燃料消費削減効果が大幅に向上する。分別収集の必要もないため、高齢化の進展等により高度な分別収集が難しい地域にも適用できる。焼却施設では発電設備を省略または簡素化でき、発電を行わない場合には、ボイラーの運転条件を300℃程度以下の緩慢な条件とすることができるため、小型の焼却施設においても比較的容易に実施でき、かつ大規模な焼却施設と比べても大きな遜色の無い化石燃料消費削減効果が期待できる利点がある。緩慢な条件により、ボイラー配管に高価な素材を利用する必要がなくなり、配管の劣化も抑止できるなど、建設・運転費用の削減にもメリットがある。

海外の既存事例や、国内でのモデルによる評価では、焼却炉近隣（数 km 以内）の工場への蒸気供給は、投資回収年数が数年以内となることが期待される。将来、工場が操業停止する可能性もあるが、投資回収期間が短ければ、投資の無駄を最小化することができる。また、工場撤退の可能性がある場合には、焼却施設に発電設備を追加できるスペースを設けておくなどして、将来の不確実性に対応することが可能である。韓国・蔚山工業団地における焼却炉から工場への蒸気供給の実例については、産業団地を統括する韓国産業団地公団（KICOX）と職員の人事交流を行い、そのノウハウ等を前述の事例集にもまとめている。

粗い推計であるが、東京、神奈川、埼玉、千葉の一都三県において、焼却炉から道路距離で5km以内に、蒸気を受け入れ可能な工場が存在するケースを列挙し、焼却炉の蒸気供給可能量と、工場の蒸気受け入れ可能量を比較して、焼却熱の工場での利用量を推計し、それに伴う化石燃料消費削減によるCO₂排出の削減効果を求めた結果、220万トン/年と推計されており、ある程度大きなポテンシャルを有していることが分かる。今後詳細な地理的条件を踏まえて、焼却炉と工場の距離が近接し、蒸気配管の敷設が容易なケースから順に、詳細なフィージビリティスタディーを実施し、可能なところからその実装を進めることが望ましい。

焼却炉の近隣に産業の十分なエネルギー需要のないケースでは、焼却とメタン発酵の複合発電施設を建設することも、発電効率向上の観点からは有効である。焼却対象廃棄物の組成が変化し、厨芥類の割合が増えて低位発熱量が低下した場合にも、高効率で発電することができる。ただし、施設の建設費は、通常の焼却発電施設に比べて高額になる可能性が高いため、慎重に費用対便益を検討する必要があると考えられる。近年、アジアの発展途上国においても、従来の埋め立て処分から、焼却に移行する流れがある。その際、焼却発電を検討する前に、産業での蒸気利用をまず検討することが望ましいが、それが難しい地理的条件下では、日本と比較して一般廃棄物に占める厨芥の割合が高く、低位発熱量の低いアジアの都市廃棄物でも、高効率な発電が可能な複合発電施設は、有効であると考えられる。その際、建設費を現地に合わせて低減することや、やや複雑なシステムを容易に運転できるよう、遠隔監視や自動最適運転制御などの仕組みを整えることも重要であると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 主として可燃性の一般廃棄物を対象に、その効率的なエネルギー回収の指針として、産業施設を利用したアップグレード利用を提案し、その燃料消費削減効果等を熱力学計算やライフサイクル分析等により評価して有効性を示した。
- ・ 焼却（発電）施設、廃棄物の再生原燃料化施設、焼却とメタン発酵の複合発電施設等について、規模別や廃棄物組成別にエネルギー回収効果や費用を求めるモデル化を実施した。これにより、様々な地域条件下において、エネルギー回収を高度化する対策の予備的検討に利用することが可能となった。
- ・ 上記の施設のモデルに、地理情報システムを利用した収集運搬のモデルを組み合わせ、廃棄物の処理計画の作成と評価を可能とした。また愛知県を事例に、広域化の費用や二酸化炭素の排出削減面での効果を評価した。
- ・ ごみ焼却施設から外部施設への熱供給の実態調査を行うことで、地方公共団体が熱供給を含むごみ処理計画の立案を検討することが可能な基礎的知見を得た。
- ・ 生ごみと下水汚泥の混合によるバイオガス生産および都市ガス導管による環境的・経済的効果を試算することで、ごみ処理事業と下水処理事業を組み合わせたシステムの構築方法を提案した。
- ・ アンケート調査に基づき、高齢化により住民によるごみ分別が将来どのように変化する可能性があるかについて、シミュレーションすることが可能な基礎的知見を得た。
- ・ 査読付き論文 12 報、学会等での報告 38 件などにより、研究成果を国内外に発信した。

(2) 環境政策への貢献

- ・ 検討した、産業を活用したエネルギー回収の高度化の手法（産業での再生原燃料利用、工場や火力発電所への焼却炉からの蒸気供給）は、従来の焼却発電（発電効率約 20%）の 1.5 倍から 2 倍程度大きな化石燃料消費削減効果を期待できる上、条件次第で経済的にもより安価な対策となり得る。低炭素化を推進する施策としても重要な選択肢となる。
- ・ 焼却熱の産業での活用について、蒸気の潜在的な需給の対象者になる自治体や産業側の関係者にヒアリング調査を実施し、蒸気供給事業に対する高い関心が示されるとともに、実現に向けた課題等も指摘された。これらの結果を踏まえて、焼却熱の利用方法のより効率的な選択肢として自治体等の計画策定に資することが期待される。
- ・ 高度なエネルギー利用を進めるための制度的な課題を整理し、欧州等の事例調査も踏まえて、熱版 FIT 制度などの改善案をまとめた。
- ・ 成果の一つである全国のごみ処理施設における熱利用の状況調査は、地方公共団体が熱利用を進めるための基礎データの作成に貢献できる可能性がある。
- ・ 生ごみと下水汚泥の混合バイオガス化および家庭での熱利用方法の提案は、導管工事や家屋の改造を伴わない熱利用に貢献できる可能性がある。

<行政が既に活用した成果>

- ・ 本研究課題の成果の一部（焼却熱の産業利用の提案や事例調査）は、環境省による平成 27 年度廃棄物発電の高度化支援事業の成果報告書に引用されるとともに、当該事業の調査方法の一部に対し課題代表者が助言を行った。また、課題代表者や分担者の一部は、廃棄物からの資源・エネルギー回収の高

度化に関わる国や地方自治体の複数の委員会等に参画し、本課題の成果を踏まえて助言等による貢献を行っている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ 収集モデルを含む廃棄物処理工程のモデル化により、地域特性別に費用面からも合理的なシステムの提案に繋げることができる仕組みを構築した。事例集として整理し、関係者で活用できる仕組みとした。
- ・ 高齢者のごみ分別行動の分析は、超高齢社会を見据えたごみ処理施策の検討に貢献できる可能性がある。構築したモデルと合わせて、今後の人口構成等の変化を見据えた、将来の廃棄物処理計画の策定に貢献することができる。

6. 国際共同研究等の状況

- ・ 一般廃棄物の産業原燃料利用については、中国・上海交通大学、韓国・蔚山大学等と連携して、それぞれの国の都市に適用した場合の評価を実施するなど、アジアへの展開の可能性も検討している。成果は国際論文誌にも掲載された。
- ・ 韓国・蔚山工業団地における焼却炉から工場への蒸気供給の実例については、産業団地を統括する韓国産業団地公団（KICOX）と職員の人事交流を行い、そのノウハウ等を本研究課題で作成した事例集にもまとめている。また、共同研究の成果は国際論文誌への掲載が決定している。

7. 研究成果の発表状況

（1）誌上发表

<論文（査読あり）>

- 1) 大西悟, 藤田壮, 藤井実, 戸川卓哉, Dong Liang : 日本 LCA 学会誌, 10 (3), 299-306 (2014)
「地域循環による各主体の GHG アカウンティングへの影響分析」
- 2) Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Liang Dong, Chengpeng Lu, Yong Geng, Shishir Kumar Behera, Hung-Suck Park, Anthony Shun Fung Chiu : Journal of Cleaner Production , Vol. 114, p376-386 (2016)
“Possibility of developing low-carbon industries through urban symbiosis in Asian cities”
- 3) Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Toru Matsumoto, Liang Dong, Hiroyuki Akiyama, Huijuan Dong : Journal of Cleaner Production, Vol. 114, p95-102 (2016)
“Comparative analysis of recycling industry development in Japan following the Eco-Town program for eco-industrial development”
- 4) Liang Dong, Tsuyoshi Fujita, Ming Dai, Yong Geng, Jingzheng Ren, Minoru Fujii, Yi Wang, Satoshi Ohnishi : Journal of Cleaner Production, Vol. 114, p387-400 (2016)
“Towards preventative eco-industrial development: an industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China”
- 5) Chen W., Liu W., Geng Y., Ohnishi, S., Sun, L., Han, W., Tian, X., Zhong, H : Journal of Cleaner Production, 131(10), 272-279 (2016)
“Life cycle based emergy analysis on China's cement production”
- 6) Dou Y., Togawa T., Dong L., Fujii M., Ohnishi S., Tanikawa H., Fujita T. : Resources, Conservation and Recycling (2016)

- “Innovative Planning and Evaluation System for District Heating Using Waste Heat Considering Spatial Configuration: A Case in Fukushima, Japan” (In press)
- 7) Ohnishi S., Fujii M., Ohata M., Inaba R., Fujita T. : Resources, Conservation and Recycling, (2016)
“Efficient energy recovery through a combination of waste-to-energy systems for a low-carbon city” (in press)
 - 8) Kim, H.W., Ohnishi S., Fujii M. , Fujita T., and H.S. Park. : Journal of Industrial Ecology, (2016) “Evaluation and allocation of greenhouse gas (GHG) reductions in industrial symbiosis using GHG protocol and life cycle approaches” (in press)
 - 9) Tabata, T., Tsai, P. : Waste Management & Research Vol.34, No.2, pp.148-155 (2016)
“Heat Supply from Municipal Solid Waste Incineration Plants in Japan: current situation and future challenges”
 - 10) Ohnishi S., Dong H., Geng Y., Fujii M., Fujita T. : Journal of Ecological Indicators, 73, 513–524 (2017)
“A comprehensive evaluation on industrial & urban symbiosis by combining MFA, carbon footprint and emergy methods—Case of Kawasaki, Japan”
 - 11) Inaba, T., Tabata, T., Tsai, P.: Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2017 “Development of a Basic Rate of Household Energy Consumption Considering Usage Time and Quantity of Consumer Durables” (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 藤井実：日本 LCA 学会誌, 12(4):239-242 (2016)
「都市廃棄物からの高効率なエネルギー回収」
- 2) 田畑智博,小田実紀, 宮本一毅, 蔡佩宜, 片桐恵子：日本 LCA 学会誌, 12(4):243-251 (2016)
「超高齢社会に対応した廃棄物処理システムのあり方に関する考察」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 藤井実：生活と環境, 2017年2月号, p17-21 (2017)
「廃棄物処理・リサイクル分野での IoT 導入促進の取り組み」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Minoru Fujii : International Conference on Eco-Industrial Development, Shanghai, China, (2014.10)
“Apparent upgrade use of wastes and waste heat for low-carbon industries”
- 2) Minoru Fujii : International Workshop on Eco-city, Kawasaki, Japan, (2014.11)
“Promoting low carbon industries through urban symbiosis”
- 3) Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Satoshi Ohnishi, Takuya Togawa, Liang Dong, Huijuan Dong : The 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, (2014.11)
“A study on the cost-effective energy recovery system from municipal solid wastes”
- 4) Liang Dong, Tsuyoshi Fujita, Minoru Fujii, Satoshi Ohnishi, Takuya Togawa, Huijuan Dong : The 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, (2014.11)
“Achieving sustainable industry and urban development: planning and assessment on industrial and regional

symbiosis in China“

- 5) Satoshi Ohnishi, Tsuyoshi Fujita, Minoru Fujii, Liang Dong, Huijuan Dong : The 4th ISIE Asia-Pacific Conference, Melbourne, Australia, (2014.11)
“Social transitions in eco-industrial development: From eco-towns to a regional symbiosis in Japan“
- 6) 藤井実：第4回グリーン・スチール・セミナー，フクラシア東京ステーション（東京），2014年11月
「鉄鋼の利用に伴う環境影響の評価手法と環境負荷削減」
- 7) Tabata, T. & Chiba, D : Proceedings of the 5th International Symposium on Energy from Biomass and Waste, CD-ROM (2014,11, Venice/ Italy)
“Environmental impact assessment of municipal solid waste treatment system by combining with biogas production that uses sewage sludge“
- 8) 藤井実：平成26年度全国エコタウン会議，かながわサイエンスパーク，2015年2月
「地域循環圏の形成に向けて」
- 9) 後藤尚弘，栗原啓斗：平成26年度土木学会中部支部研究発表会，2015年3月
「一般廃棄物広域収集におけるエネルギー効率化に関する研究—愛知県豊橋市、田原市を例にして—」
- 10) 田畑智博，蔡佩宜：第10回日本LCA学会研究発表会，2015年3月
「一般廃棄物焼却施設の発電・熱生産の現状と将来のエネルギー供給に関する考察」
- 11) Satoshi Ohnishi, Huijuan Dong, Tsuyoshi Fujita, Liang Dong, Minoru Fujii: ISIE conference 2015 - Taking Stock of Industrial Ecology (2015.7)
“Evaluation methodology comparison on industrial and urban symbiosis in Kawasaki Eco Town, Japan“
- 12) Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Satoshi Ohnishi, Liang Dong, Takuya Togawa, Huijuan Dong: ISIE conference 2015 - Taking Stock of Industrial Ecology (2015.7)
“Smart eco-industrial city supported by apparent energy upgrade and innovative monitoring“
- 13) Liang Dong, Tsuyoshi Fujita, Minoru Fujii, Satoshi Ohnishi,: ISIE conference 2015 - Taking Stock of Industrial Ecology (2015.7)
“Towards regional low-carbon eco-industrial development: Modeling integrating material and energy circulation in an industrial and urban symbiosis“
- 14) Tabata, T., Tsai, P. : Proceedings of the ISIE Conference 2015, pp.477-478 (2015.7, Guildford/ UK)
“Analysis of the energy generation potential of municipal solid waste incineration plants and the future outlook of energy supplies from waste“
- 15) 田畑智博，蔡佩宜：第24回日本エネルギー学会大会，pp.252-253，札幌市，2015年8月
「一般廃棄物焼却施設の発電・熱生産によるエネルギー供給状況の調査」
- 16) 田崎智宏，稲葉陸太，藤井実，山口直久：環境科学会2015年会プログラム，40，2015年9月
「人口減少とリサイクルの進展を見据えた一般廃棄物焼却施設の統合による環境・経済面の効果推計」
- 17) 大西悟：第5回グリーン・スチール・セミナー，フクラシア東京ステーション（東京），2015年11月
「産業拠点における低炭素型まちづくりのデザインと評価～鉄鋼産業を中心として～」
- 18) Tabata, T. : Workshop on Inclusive Sustainable Development in Asia, Kobe (2015.12)

“Renewable energy, and Environment: A Life Cycle Approach“

- 19) 田畑智博, 宮本一毅, 蔡佩宜 : アクティブエイジング研究センター設立記念シンポジウムポスター発表, 兵庫県神戸市 2016年2月
「年齢階級・生活様式を考慮した住民のごみ分別実施状況に関する考察」
- 20) 田畑智博, 宮本一毅, 蔡佩宜 : 第11回日本LCA学会研究発表会論文集, pp. 178-179, 2016年3月
「年齢階級・生活様式を考慮した住民のごみ分別実施状況に関する考察」
- 21) 藤井実, 大西悟, 稲葉陸太, 田崎智宏, 藤田壮 : 第11回日本LCA学会研究発表会, 2016年3月
「廃棄物からのエネルギー回収の高度化に関する検討」
- 22) 田崎智宏, 稲葉陸太, 藤井実, 山口直久 : 第11回日本LCA学会研究発表会, 2016年3月
「人口減少とごみ排出量の減少を見据えた一般廃棄物焼却施設の統合による環境・経済面の効果推計」
- 23) Tabata, T., Miyamoto, K., Tsai, P. : Proceedings of the 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, pp.359-362 (2016.3, Hanoi/ Vietnam)
“Analysis on Plastic Packaging Waste Segregation Behaviour Taking into Account Inhabitants' Age Groups and Lifestyles“
- 24) 田畑智博, 若林陽平, 蔡佩宜 : 第11回日本LCA学会研究発表会論文集, pp. 178-179, 千葉県柏市, 2016年3月
「災害廃棄物処理システムの構築に関する考察」
- 25) Tabata, T., Tsai, P. : Proceedings of the Japanese-German Workshop on Renewable Energies, p.1 Tokyo (2016.3)
“Electricity and heat supply from municipal solid waste in Japan: Current situation and challenges“
- 26) 大西悟, Kim Hyeongwoo, 藤井実, 藤田壮 : 第11回日本LCA学会研究発表会講演要旨集 pp266-267, 2016年3月「産業共生によるライフサイクル効果の蒸気価格への影響分析」
- 27) Tabata, T., Inaba, T., Tsai, P. : Proceedings of the 2nd south east European conference on sustainable development of energy, water and environmental systems, SDEWES_SEE_2016 1-10 (2016.6, Piran/ Slovenia)
“Development of a Basic Unit of Household Energy Consumption Considering Operational Time and Quantity of Consumer Durables“
- 28) 稲葉琢人, 蔡佩宜, 田畑智博 : 第25回日本エネルギー学会大会, pp.202-203, 東京都, 2016年8月
「耐久消費財の使用時間・保有数量を考慮した家庭のエネルギー消費原単位の作成」
- 29) 小田実紀, 宮本一毅, 田畑智博, 蔡佩宜 : 環境科学会 2016年会講演要旨集, p.98, 横浜市, 2016年9月
「高齢者の生活様式と容器包装プラスチックごみの分別との関係性に関する考察」
- 30) Fujii M., Ohnishi S., Inaba R., Tasaki T., Dou Y., Fujita T. : 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 2016, (2016.9, Lisbon/Portugal)
“Upgrade Use of Wastes for Further Carbon Reduction from Industries“
- 31) Minoru Fujii, Satoshi Ohnishi, Yi Dou, Lu Sun, Rokuta Inaba : The International Society for Industrial Ecology(ISIE) 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan, (2016.9)
“Sophistication of energy recovery system from municipal solid waste“

- 32) Lu Sun, Minoru Fujii, Satoshi Ohnishi, Huijuan Dong, Yi Dou, Zhaoling Li, Tsuyoshi Fujita : The International Society for Industrial Ecology(ISIE) 12th Socio-Economic Metabolism section conference and 5th Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan, (2016.9)
 “Evaluation of cost-benefit and GHG emission reduction potentials of regional municipal solid waste (MSW) management system -- case of Tokyo Metropolis, Japan“
- 33) Goto N. : 21st International Forestry and Environmental Symposium, Sri Lanka (2016.9)
 “Waste management system and energy recover in case of Japan“
- 34) Dou Y., Ohnishi S., Fujii M., Dong L., Togawa T., Tanikawa H., Fujita T. : The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology, Nagoya, Japan, (2016.9)
 “Regional Planning and Assessment System for Heat Exchange Network between Incineration Facilities and Industries: Case of Tokyo Metropolis “
- 35) Dou Y., Togawa T., Fujii M., Ohnishi, S., Okuoka K., Tanikawa H., Fujita T. : the 12th Biennial International Conference on EcoBalance (EcoBalance 2016), Kyoto, Japan, (2016.10)
 “Regional Planning and Evaluation System for Industrial and Urban Symbiosis considering Land Use Changes“
- 36) Inaba R.,Tasaki T.,Fujii M.,Yamaguchi N. : the 12th Biennial International Conference on EcoBalance (EcoBalance 2016), Kyoto, Japan, (2016.10)
 “Benefits from Integration of Municipal Solid Waste Incinerators as a Measure for Decreasing Combustible Waste in the Future “
- 37) Kim, H. W., Ohnishi,S., Fujii, M., Fujita, T., Park,H. S. : the 12th Biennial International Conference on EcoBalance (EcoBalance 2016), Kyoto, Japan, (2016.10)
 “Evaluation and Allocation of Greenhouse gas (GHG) emission reductions of industrial symbiosis (IS) networks using life cycle approaches“
- 38) 野浪志太, Phengpaseuth Souksavanh, 後藤尚弘 : 土木学会第 44 回環境システム研究論文発表会, 2016 年 10 月
 「廃棄物処理広域化地域への都市の規模が及ぼす影響に関する研究」
- 39) Ohnishi, S. : International Symposium on Sustainable City, School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, (2016.11)
 “Energy recovery system from municipal solid waste as symbiotic network hubs“
- 40) 小田実紀, 蔡佩宜, 田畑智博, 片桐恵子 : 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会論文集,pp.410-411, 茨城県つくば市 2017 年 3 月
 「超高齢社会の進展が自治体のごみ処理システムにおよぼす環境的影響の評価－神戸市でのケーススタディ」
- 41) 田畑智博 : 第 1 回 KAARb サロン, 神戸市 2017 年 3 月
 「超高齢社会を見据えた持続可能なごみ処理施策」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般市民が無料参加できる講演会（第4回グリーン・スチール・セミナー、2014年11月27日）で、研究成果を報告。
- 2) 一般市民が無料参加できる講演会（第5回グリーン・スチール・セミナー、2015年11月19日）で、研究成果を報告。
- 3) Workshop on Inclusive Sustainable Development in Asia（主催：神戸大学大学院人間発達環境学研究科、2015年12月16～17日、神戸大学百年記念館、観客約150名）にて講演
- 4) アクティブエイジング研究センター設立記念シンポジウム（主催：神戸大学アクティブエイジング研究センター、2016年2月21日、神戸大学百年記念館、観客約200名）にて講演
- 5) 第4回サイエンスカフェ*SODA/サイエンスカフェひょうご in 南あわじ「これからのエネルギー源をどこに求めるか」（主催：特定非営利法人ソーシャルデザインセンター淡路大学コンソーシアムひょうご神戸公益財団法人ひょうご科学技術協会、2016年12月19日、SODA 島の学舎、観客約30名）にて講演
- 6) 第1回KAARbサロン「超高齢社会を見据えた持続可能なごみ処理施策」（主催：神戸大学アクティブエイジング研究センター、2017年3月17日、神戸大学大学院人間発達環境学研究科、観客約40名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 神戸新聞（2016年2月16日、社会面、32頁、「神戸大アクティブエイジング研究センター設立 活力ある高齢化社会めざして11プロジェクト立ち上げ」）

(6) その他

<受賞>

- 1) 環境科学会 2016 年会優秀発表賞（富士電機賞）（学部生・高専生・高校生等の部）
授賞論文：高齢者の生活様式と容器包装プラスチックごみの分別との関係性に関する考察(小田実紀, 宮本一毅, 田畑智博, 蔡佩宜)
- 2) Excellence in Review Awards 2016, Resource conservation & recycling, Elsevier (2017.1) 受賞者：Satoshi Ohnishi

8. 引用文献

- 1) 検証・確認報告書「コンボガス式メタン発酵技術」社団法人全国都市清掃会議、2001.9
- 2) 高岡好和「南但地域における可燃ごみのバイオガス化と焼却のコンバインドシステム」廃棄物資源循環学会誌、Vol.25, No.1、2014
- 3) 川崎重工業（株）「防府市クリーンセンターごみ焼却バイオガス化複合施設の紹介」再生と利用、Vol.38.No.145、2014.10
- 4) Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Liang Dong, Chengpeng Lu, Yong Geng, Shishir Kumar Behera, Hung-Suck Park, Anthony Shun Fung Chiu, Possibility of developing low-carbon industries through urban symbiosis in Asian cities, Journal of Cleaner Production, 114, 376-386, 2016
- 5) Minoru Fujii, Tsuyoshi Fujita, Satoshi Ohnishi, Naohisa Yamaguchi, Geng Yong, Hung-Suck Park, Regional

- and temporal simulation of a smart recycling system for municipal organic solid waste, *Journal of Cleaner Production*, 78, 208-215, 2014
- 6) 環境省HP 一般廃棄物処理実態調査結果/統計一覧/平成26年度調査結果/焼却施設
 - 7) 「電気事業者ごとの実排出係数及び調整後排出係数の算出及び公表について(別紙6-2)」経済産業省産業技術環境局、資源エネルギー庁、環境省地球環境局、2015.4.1
 - 8) 「エネルギー白書2015」資源エネルギー庁
 - 9) 産業環境管理協会: MiLCA, <http://www.milca-milca.net>
 - 10) 国立環境研究所: 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID), http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm
 - 11) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の地域別将来推計人口(平成25年3月推計), 2013, <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/t-page.asp>
 - 12) 環境省: 平成25年度一般廃棄物実態調査, 2015, http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h25/index.html
 - 13) 愛知県: 第2次愛知県ごみ焼却広域化計画(平成20年度~29年度), 2009
 - 14) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の地域別将来推計人口(平成25年3月推計), 2013, <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/t-page.asp>
 - 15) Ishikawa, M.: A logistic model for post-consumer waste recycling., *Packaging science & technology*, 5, 2, 119-130, 1996
 - 16) Fujii, M., Fujita, T., Ohnishi, S., Yamaguchi, N., and Yong, G.: Regional and temporal simulation of a smart recycling system for municipal organic solid wastes, *Cleaner Production*, 78, 208-215, 2014
 - 17) 松藤敏彦: 都市ごみ処理システムの分析・計画・評価, 技報堂, 2005
 - 18) WHO (World Health Organization): World report on Ageing and Health, 2015, http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/186463/1/9789240694811_eng.pdf?ua=1
 - 19) 環境省: 容器包装廃棄物の使用・排出実態調査, 2016, <http://www.env.go.jp/recycle/yoki/>
 - 20) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の世帯数の将来推計(都道府県別推計), 2014, <http://www.ipss.go.jp/pp-pjsetai/j/hpip2014/t-page.asp>
 - 21) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の地域別将来推計人口(平成25年3月推計), 2013, <http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/t-page.asp>
 - 22) 環境省: 一般廃棄物実態調査結果, 2016, http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/
 - 23) Tabata, T., Hishinuma, T., Ihara, T., Genchi, Y.: Life cycle assessment of integrated municipal solid waste management systems, taking account of climate change and landfill shortage trade-off problems, *Waste Management & Research*, 29, 423-432, 2011.
 - 24) 環境省「エネルギー回収型廃棄物処理施設整備マニュアル」2014.3
 - 25) Themelis N.J.: Global Bright Lights, *Waste Management World*, Vol.12, pp.41-43, 2011.
 - 26) 経済産業省: 2013年度総合エネルギー統計, 2014, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html
 - 27) 環境省総合環境政策局環境計画課、地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた取組み状況について(報告)、2015https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/kuiiki/data/download/seisakujirei.pdf
 - 28) 東京ガスホームページ (<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20160825-01.html>)

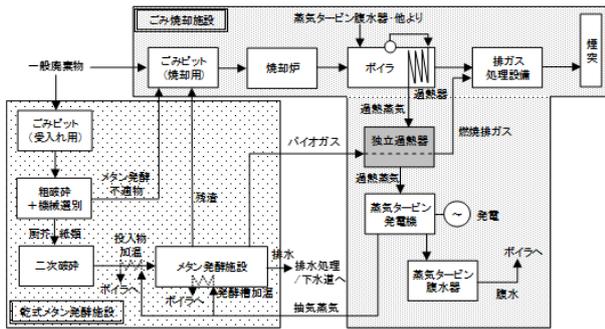
- 29) 東京ガス㈱、工場間一体省エネルギー事業について（経済産業省資料）、2016
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/pdf/019_01_02.pdf
- 30) 総務省、「地域の元気創造プラン」の進捗状況について
(http://www.soumu.go.jp/main_content/000285201.pdf)
- 31) 松井英章、電力自由化と地域エネルギー事業－ドイツの先行事例に学ぶ－、JRIレビュー 2013 Vol.9、No.10
- 32) 熊崎実、英国版「熱の固定価格買取制度」その後の展開（前編）、環境ビジネスオンライン、2016年4月4日号掲載
- 33) 「エネルギー需要家別マーケット調査要覧2010（産業分野編）」富士経済、2010.10.18
- 34) 環境省「一般廃棄物の排出及び処理状況等（平成25年度）について」2015.1.23
- 35) 「バイオマス等の高度利用火力発電システムの事業適合性に関する調査成果報告書」（NEDO、2007.3）
- 36) 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度 2016
- 37) 環境省HP 一般廃棄物処理実態調査結果/統計一覧/平成26年度調査結果/焼却施設
- 38) 「平成27年度 廃棄物からのエネルギー回収施設に関するインベントリ整備業務報告書」JFEテクノロジーサーチ（株）P.52、2016.2
- 39) Shishir Kumar Behera, Jung-Hoon Kim, Sang-Yoon Lee, Sangwon Suh, Hung-Suck Park, Evolution of 'designed' industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrialPark: 'research and development into business' as the enabling framework, Journal of Cleaner Production 29-30, 103-112, 2012
- 40) 「環境関連施設発注状況一覧」環境施設、2011～2015.各6月号
- 41) （一財）エネルギー総合工学研究所「高効率廃棄物発電技術開発 最適トータルシステムの研究」NEDO、2000.3
- 42) 「月刊建設物価」一般財団法人建設物価調査会
- 43) 環境省HP、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度（平成27年度）
<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>
- 44) なっとく！再生可能エネルギー、資源エネルギー庁HP
- 45) 平成25年度廃棄物発電の高度化及び売電支援事業、環境省、2014.3
- 46) 公益財団法人廃棄物・3R研究財団「ごみ焼却施設台帳（平成21年度版）」2011.3
- 47) 環境省「生ごみ等の3R・処理に関する検討会（第6回参考資料）」2006.3.2
- 48) 「自治体主導の地域エネルギーシステム整備研究会（第4回資料）」総務省、2015.5.11
- 49) 環境省「廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引き（ごみ焼却施設編）」2010.3
- 50) 消費者庁：消費者意識基本調査, 2015, http://www.caa.go.jp/adjustments/index_16.html

[研究概要図] 3K143016 研究代表者：国立環境研究所 藤井 実

都市廃棄物からの最も費用対効果の高い資源・エネルギー回収に関する研究

資源・エネルギー回収を高度化するオプション

(1) 複合発電施設のプロセス設計と評価

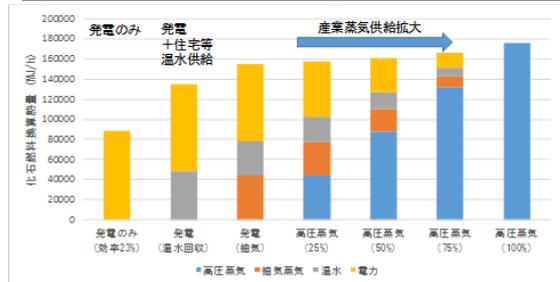


- ・ 焼却炉の蒸気を、メタン発酵のガスで過熱し発電効率を向上させる複合発電システムについて、規模別・廃棄物組成別に効率を評価可能なモデル化を実施

(2) 資源・エネルギーの地域利用モデルの作成

廃棄物の産業でのアップグレード利用

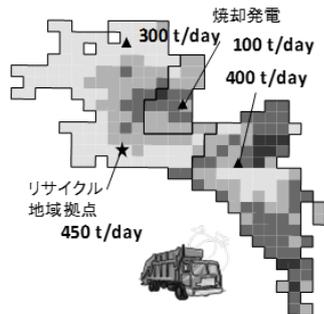
- ・ 廃棄物の産業での原燃料利用
- ・ 地域熱供給(焼却炉から産業への蒸気供給)



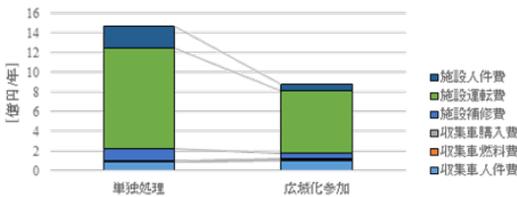
- ・ 焼却発電(効率23%)と比較して、2倍程度の化石燃料消費削減効果が得られる
- ・ 関係者へのヒアリング・国内外法制度等調査により高度化の推進策を検討

都市規模に合わせた最適化

(3) 施設と収集の総合的最適化モデルの作成



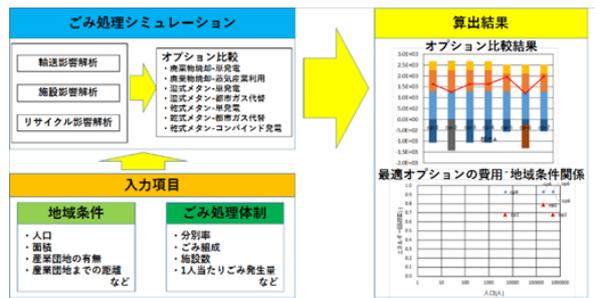
- ・ 施設の規模別のモデルとGIS(地理情報システム)を利用する廃棄物収集モデルにより、都市規模に合わせた最適化評価を可能とした



広域化効果の試算例

中長期のエネルギー回収計画と評価

(4) 長期総合シミュレーションツールの作成と政策提言



- ・ 詳細・簡易に環境・費用面の各シミュレーションが可能なモデル群・ツールを作成
- ・ エネルギー回収の高度化に関する事例集を作成



成果：廃棄物からのエネルギー回収効率を最大化する技術・システムの選択・評価が可能

[英文概要]

A study on cost-effective energy and resource recovery systems from municipal solid wastes

Principal Investigator: MinoruFUJII
Institution: National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Tel: +81-29-850-2447 / Fax: +81-29-850-2572
E-mail: m-fujii@nies.go.jp

Cooperated by: Toyohashi University of technology, Kobe University, Tokyo University of Science

[Abstract]

Key Words:Low-carbon society, Life-cycle assessment, Biomass utilization, Industrial symbiosis, Uurban/Regional environmental revitalization

As a solution to various problems including climate change, resource shortage, ageing and depopulation, it is necessary to steadily implement waste management under budget constraints of municipalities in the future, through which substantial reduction of fossil fuel usage and CO₂ emissions can be achieved by advanced and cost-effective technologies to recovery resource and energy from the wastes.Targeting on solving these problems, this study mainly focuses on combustible general wastes and investigates feasible methods for recovering energy from the wastes with high cost-efficiency.

Based on a technical assessment, upgraded reuse of wastes is proposed wherein separately collected waste papers and mixed plastics are used in industries as fuels, and the steam from mixed combustion is supplied to proximate industrial clusters (either of them is indicated possible to reduce CO₂ emissions double than power generation from waste combustion). Especially,models for different scale facilities are developed to help in planning and evaluation in various regions, according to thermodynamic and environmental cost-benefit analysis. These models are applied to specific regions with detailed design and evaluated on the effectiveness.In addition, models for different scale combined power generation facilities of waste combustion and methane fermentation with different components of wastes are also developed, in which high efficiency power generation is enabled using residuals from recovering wastes into fuels or combustible wastes.Not only supporting tools on comprehensive evaluation including waste collection and transportation for these options are developed,but also a casebook is prepared in which recommended options for different local conditions can be referred.Future prospections and

policy proposals are also provided such as the evaluation on the impact of separated collection to the ageing people.

While presenting the outcomes of this study to the stakeholders in municipal governments and related industries, a hearing survey on heat recovery from waste combustion and utilization in industries is conducted that reveals a deep interest to this study, since the proposal in this study is recognized feasible and important with the socio-economic changes in the future while previous studies are not sufficient. Furthermore, the critical issues for promoting the utilization of heat from waste combustion are summarized due to a broad questionnaire survey to municipalities and a comprehensive survey on related policies and support system both in Japan and abroad.

Notably, part of the outcomes in this study are quoted in the survey for advancing power generation from wastes by the Ministry of Environment.