

<報 文>

ガス化改質技術によるガス生産を核とした 廃棄物処理・エネルギー回収システムに関する研究*

鈴木 和将**・藤原 健史***・川本 克也***

キーワード ①ガス化改質 ②GIS ③最適配置 ④都市ガス ⑤LCA

要 旨

本研究では、開発中のガス化改質プロセスを地域へ導入し、最適な廃棄物処理・エネルギー回収システムを提示することを目的とした。具体的な地域を設定して、産業廃棄物である木くず類及び廃プラスチック類の適用を想定して、それらの発生分布を3次メッシュスケールで推計を行い、廃棄物発生空間分布図を作成した。その後、地理情報システム(GIS)を用いて輸送距離を最小化するためのガス化改質施設または中継輸送施設の最適配置について検討を行った。これらの結果に基づいて、生成ガスであるメタンガスの都市ガス利用システムについてライフサイクルアセスメント(LCA)を実施して、従来型の都市ガス製造・利用と比較・評価した。この結果により、GISを用いた施設の最適配置方法とガス化改質プロセスからの生成ガスをさらに精製して都市ガス利用する方法を組み合わせることにより、効率的な廃棄物処理・利用システムを設計、提案することができた。

1. はじめに

近年、国は、廃棄物処理施設の整備に当たって、廃棄物処理施設の省エネルギー化・創エネルギー化を進め、地域の廃棄物処理システム全体で温室効果ガスの排出抑制及びエネルギー消費の低減を図っていくこととしている¹⁾。廃棄物焼却施設のエネルギー回収施設としての重要性が認められつつあるものの、廃棄物発電の発電効率は、一般廃棄物焼却施設で平均12.03% (328施設)²⁾、産業廃棄物焼却施設で平均6.9% (32施設)³⁾と低い状況にある。低炭素社会を実現していくためには、これら廃棄物発電の高効率化をさらに進めていくことはもちろんのこと、一方で、エネルギー効率の飛躍的な向上が期待できる廃棄物処理・エネルギー回収技術のパラダイムシフトが強く望まれている。このような可能性のある技術の一つとして、熱化学的なガス化技術が挙げられる。本技術は、廃棄物中の有機化合物を酸素、空気及び水蒸気等のガス化剤と化学反応させることによりガスに熱変換するものである。しかし、ガス化により得られるガスそのものには、種々の副生成物が共存しているためガスとしての利用価値が低い状態にある。そこで、生成ガスを改質し、ガス化工程後段でトラブルの原因となるタール等の成分を除去するとともに、水素 (H₂)、一酸化炭素 (CO)、

メタン (CH₄) 等の利用価値の高いガスを得て、ガスエンジン発電機、燃料電池等の燃料ガスや原料ガス等とする。このようなガス化改質技術を核とするプロセスにより、廃棄物の発熱量を高効率にエネルギー変換し回収することが可能となる。これまで、ガス化改質工程で、H₂をターゲットとし、高効率に変換可能で、タール等の阻害物質の除去に優れた効果を発揮する触媒の開発・探査が国内外問わず数多く行われてきた^{4~8)}。しかしながら、ガス化により生成したガス中の二酸化炭素 (CO₂) は一般に変換が困難であるため、CO₂の質変換に関しては、ほとんど研究が行われてこなかった。そこで、著者らは、環境省環境研究総合推進費補助金研究事業「地域エネルギー供給のための廃棄物系バイオマスのガス化/多段触媒変換プロセス」(平成24~26年度)において、廃棄物系バイオマスをガス化改質するプロセスを中核に、多量に発生するCO₂等をガス化工程後段で、CH₄等有用ガスへ効率良く触媒変換するプロセスの開発を行ってきた。本事業の中で、汎用合金を酸化処理して調製する安価な改質用合金触媒の開発^{9~11)}やCO₂を高い転換率でCH₄等に変換することができる独自のメソポーラスシリカ触媒の合成^{12~14)}を報告してきた。今後、低炭素社会の形成に向けて最大限CO₂排出量を低減していくためには、これら各要素技術の

*Study on Waste Treatment/Energy Recovery Systems Featuring Gas Production by Waste Gasification and Reforming

**Kazuyuki Suzuki (埼玉県環境科学国際センター) Center for Environmental Science in Saitama

***Takeshi Fujiwara, Katsuya Kawamoto (岡山大学大学院) Okayama University Graduate School

高効率化を目指すだけでなく、開発中のプロセスを地域へ実装する際、廃棄物処理・エネルギー回収の全体のシステムとして最適化を図る必要がある。特に、廃棄物系バイオマスや廃棄物は、広く薄く地域に偏在しているため、如何に地域で発生する廃棄物を施設まで効率よく収集運搬してくるか、また、ガス化改質施設で生産したガスをどのように利用するかが重要であり、本研究では、これらの点に着目した。

これまで、廃棄物の輸送・処理施設の最適配置を検討するために、地理情報システム (GIS: Geographic Information System) を用いた研究が行われている。藤原ら¹⁵⁾は、岡山県を対象として、家庭ごみの発生マップを作成し、収集輸送距離の最小化には線形検索を用い、中継輸送施設の最適配置を行った。また、田畑ら¹⁶⁾は、愛知県を対象として製造業からの紙くずについて発生分布を推計し、グラフ理論により輸送距離の最小化を行った。収集運搬の効率化のために、詳細な廃棄物発生分布が必要となるが、廃棄物種が限定されており、報告例も少ない。そこで、本研究では、産業廃棄物の木くず類と廃プラスチック類を対象とし、これら廃棄物の1km²メッシュ発生分布の推計方法を考案する。

さらに、ガスの利用方法として、近年、神戸市では、下水汚泥の嫌気消化から発生するバイオガス (主成分CH₄) をさらに、都市ガス13Aと同等の水準に精製し、直接都市ガス導管へ注入するという先進的な取組が行われている¹⁷⁾。都市ガス導管への注入の利点は、中圧導管が通っている場所であれば、需要先や都市ガス製造所といった場所の制限を受けることなく、精製したガスを周辺の家庭の都市ガスとして全量有効に利用することができる。本研究で開発中のガス化改質プロセスから生成するCH₄リッチガスを、神戸の都市ガス導管注入事業と同様に、都市ガス原料として利用することができれば、場所の制限を受けることなく、より一層のシステムの効率化が可能となるのではと着想するに至った。

そこで、本研究では、本研究事業で技術開発を行ってきたガス化改質技術を核とした効率的な廃棄物処理・エネルギー回収システムを提示することを目的とし、まず、地域特性を技術導入の条件に的確に反映させるため、具体的な対象地域として神奈川県及び埼玉県を設定し、それぞれの地域における詳細な廃棄物発生分布を推計し、この発生分布をもとに GISを用いて輸送距離を最小化するガス化改質施設又は中継輸送施設の最適配置について検討を行った。次いで、システムの核となるガス化改質プロセスにおける物質・熱収支を計算するために、プロセスシミュレーターを用いて、シミュレーションモデルを構築した。最後に、これらの結果に基づいて、生成ガスを都市ガス原料として利用する都市ガス製造システムを設計し、ライフサイクルアセスメント (LCA) 手法を適用して温室効果ガス (GHG) 削減量を評価し、従来型の都市ガス製造・利用プロセスとの比較を行った。本研究手法の概要を図1に示す。

2. 廃棄物発生分布と施設の最適配置

2.1 廃棄物発生分布の推計

本研究では、対象地域として神奈川県と埼玉県を設定し、これらの地域の1km²メッシュ廃棄物発生分布の推計を行った。

神奈川県では、県内の産業廃棄物の発生及び処理・処分状況を把握し、産業廃棄物行政の施策の検討に資するとともに神奈川県廃棄物処理計画の策定に活用することを目的として、昭和56年度以降7回の産業廃棄物の実態調査を行っている。特に、平成22年度においては、他の年度に比較して大規模なアンケート調査が実施され、廃棄物種類、業種別だけでなく地区ごと (横浜地区、川崎地区、相模原地区、横須賀地区、県所管地区) に廃棄物発生量の推定が行われ、データが公表されている¹⁸⁾。本研究では、神奈川県の廃棄物排出量分布を推定するために、この地区ごとの廃棄物排出量を地域の地理情報によって按分する方法を用いた。対象とする産業廃棄物は、筆者らが開発した触媒の適用試験で試料として用いている木くず類と廃プラスチック類の2種類とした。木くず類は、排出量を国土数値情報土地利用3次メッシュ (平成22年度) の建物用地データで按分し、分布の推計を行った。また、廃プラスチック類は、(財) 経済産業調査会の工業統計メッシュデータ (平成22年度) の工業製品出荷額で按分して廃プラスチック類排出量分布を推計した。結果は、ArcGIS (ESRI社) を用いて1km²メッシュ地図として可視化した。木くず類発生分布の推定結果を図2に、廃プラスチック類発生分布を図3に示す。入手可能なデータを用いて簡便に廃棄物発生空間分布を得ることができた。

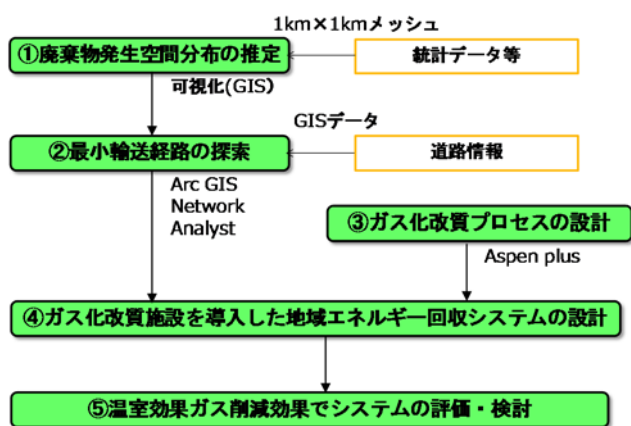


図1 本研究手法の概要

また、さらなる検討として、埼玉県の木くず類発生分布の推定には、産業廃棄物管理票（マニフェスト）データを用いた。1998年に産業廃棄物に関するマニフェスト制度が義務化され、この制度の下、排出事業者は、廃棄物の種類ごとにマニフェストを交付し、産業廃棄物が適正に運搬及び処理・処分されているか管理している。マニフェストには有用な情報が多数記載されているものの、現在それらの情報が十分活用されているとは言い難い。そこで、本研究では、マニフェスト情報の活用事例として、マニフェスト情報を用いた廃棄物発生分布の推定方法を提案した。マニフェスト情報は、平成22年度のマニフェスト情報を使用した。GISを用いて、埼玉県の排出事業所の住所を主な情報としてジオコーディング（座標付与）作業を行った。アドレスマッチングのレベルは、ほとんどが精度誤差1km以下であった。結果の集計・解析に当たり基準地域メッシュ（3次メッシュ）を用いて、セル単位で木くず類の容量・重量を集計し、1km²メッシュの木くず類発生分布図を作成した。結果を図4に示す。これにより、より現実を反映した廃棄物発生分布を得ることができた。さらに、施設の位置探索を行うために、各セルの重心位置に、木くず類の容量・重量を属性に持つ代表点を作成した。

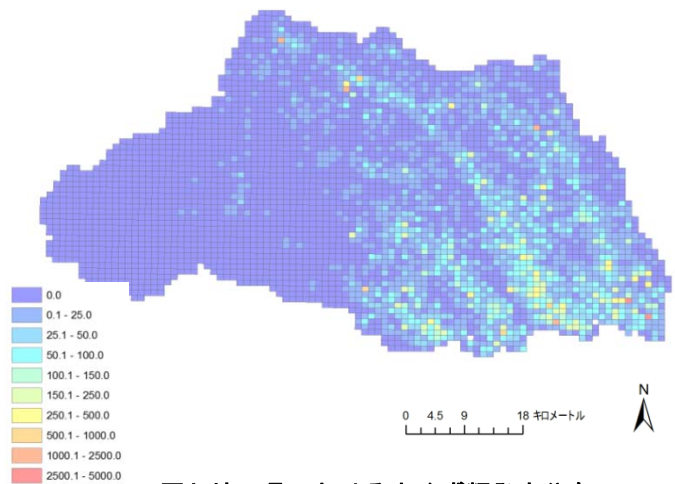


図4 埼玉県における木くず類発生分布

2.2 収集輸送の距離計算と最適位置探索法

前節で推計を行った廃棄物発生分布をもとに、各県内の道路網データをArcGISに取り込み、ArcGISの拡張機能であるNetwork Analystを使用し、最短経路検出アルゴリズムDijkstra法による解析を行い、総輸送距離が最短となる施設の位置を決定し、輸送距離を最適化した。解析に用いた道路情報データは、(株)東京地図研究社の「MapPackage」である。解析に用いた道路網データは、県内の国道及び県道の道路中心線データを抽出して用いた。抽出において、県内の道路のみ切り出しを行うと経路探索において不自然な状況が想定され支障が生じることがあるため、県外近傍の道路中心線を含んだ形で解析を行った。

廃棄物の発生地点と施設の立地候補地点は、1kmメッシュの重心点と仮定した(図5)。輸送距離の算出式を式に示す。

$$d_{ij} = d_{ik} + d_{kl} + d_{lj}$$

ここで、 i は廃棄物発生地点、 j は施設の立地候補地点で、 d_{ij} は i と j 間の距離、 d_{ik} は廃棄物発生地点 i から道路 k までの距離、 d_{lj} は道路 l から施設 j までの距離、 d_{kl} は k と l 間の道路距離である。この式を用いて、廃棄物発生位置から施設までの総輸送距離最小化問題の目的関数は次式で表すことができる。

$$\text{minimize } D_t = \sum_{i=1}^N (2 \times d_{ij} \times x_{ij})$$

ここで、 D_t は総輸送距離、 M は廃棄物発生地点数、 x_{ij} は i と j 間の往復回数である。上記の式から求めた最も総輸送距離の短い施設候補地を最適な施設位置とした。

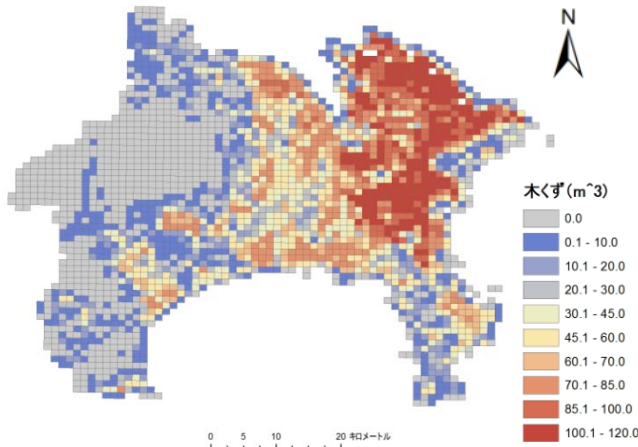


図2 神奈川県における木くず類発生分布

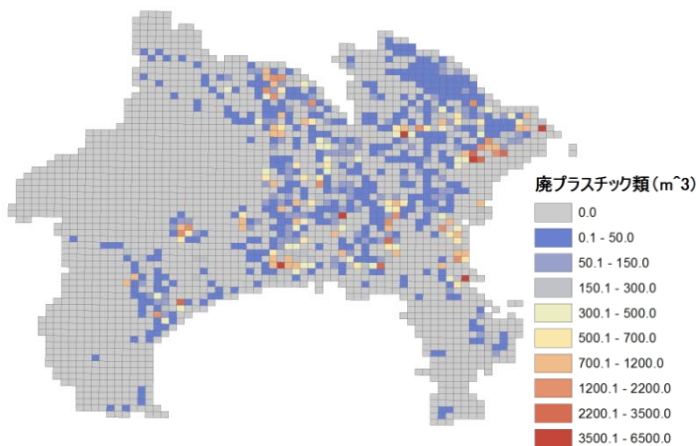


図3 神奈川県における廃プラスチック類発生分布

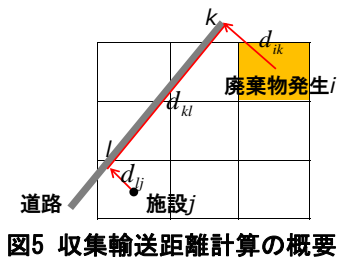


図5 収集輸送距離計算の概要図

2.2.1 中継輸送施設の最適配置 (事例：神奈川県)

神奈川県において、ガス化改質施設から発生するガスを川崎エコタウン内の工場へ燃料ガスとして供給することを想定し、ガス化改質施設を川崎エコタウン内に設置することとした場合、神奈川県の廃棄物発生は、川崎及び横浜地区に集中しているため、これらの地域においては、4tトラックで発生場所からガス化改質施設まで収集輸送することとした。また、それ以外の地域においては、図2及び3に示されているように廃棄物は偏在して薄く存在しているため、収集運搬の効率化を考え、主要幹線道路沿いに設置された中継輸送施設に4tトラックで一旦集め、その後、10tトラックでガス化改質施設へ運ぶものとした。そこで、総輸送距離が最短となるような中継輸送施設の最適位置の探索を行った。対象とした主要幹線道路は、県内を東西に走っている国道1号線、国道246号線及び国道16号線とそれに続く国道413号線（国道16-413号）とした。これらの道路と横浜地区の境界線が交わる点を基準点に取り、主要幹線道路沿いに1km間隔で中継輸送施設の候補地を設定した（図6）。ArcGISのNetwork Analystを用いて、これら候補地の総輸送距離を計算し、最も距離が短くなる候補地の探索を行った。中継輸送施設までの総輸送距離計算結果と基準点からの道路距離との関係を図7に示す。その結果、16号線-413号線では、基準点から1km地点が最も輸送距離が短く、246号線では基準点から15km地点、1号線では4km地点が最も輸送距離が短かった。これらの中で、246号線の15km地点が総輸送距離1,520,898kmと最短距離であり、最適な中継輸送施設候補地点であった。



図6 主要幹線道路沿いのごみ中継輸送施設候補地点

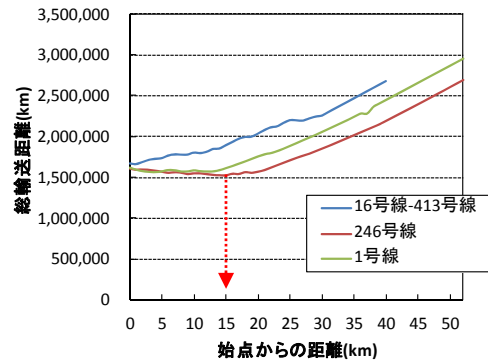


図7 総輸送距離と基準点からの距離の関係

2.2.2 ガス化改質施設の最適配置 (事例：埼玉県)

ガス化改質施設から生成したCH₄リッチガスを都市ガス導管へ注入することを想定した場合、比較的場所の制限を受けることなく施設の立地が可能となる。そこで、廃棄物発生分布を考慮して、輸送距離が最小となる施設の最適配置について検討を行った。埼玉県を対象として、1kmメッシュの重心の全てを施設の候補地点として設定して、Network Analystを用いて、木くず類発生地点からガス化改質施設までの総輸送距離を各候補地点で計算し、輸送距離が最短となる候補地の探索を行った。特に、施設設置場所や施設数の変化による輸送距離の影響について検討を行った。埼玉県を4つの区域（A, B, C, D）に分け、区域ごとに50t/dのガス化改質施設を設置するケース1、埼玉県を2つの区域に分け（A+B, C+D）、区域ごとに100t/dのガス化改質施設を設置するケース2、埼玉県（A+B+C+D）に200t/dの施設を一基設置するケース3を設定した。ケース1においては、総輸送距離を最小化する施設最適配置の比較対象として、既存の一般廃棄物焼却施設の場所にガス化改質を設置した場合の総輸送距離を計算した。輸送距離最小化で決定した施設位置と既存の一般廃棄物焼却施設の位置を図8に示す。既存施設の総輸送距離946,563 kmであったものが、最適配置では、750,772kmと大幅に短縮できた。次に、施設数と総輸送距離の関係を図9に示す。

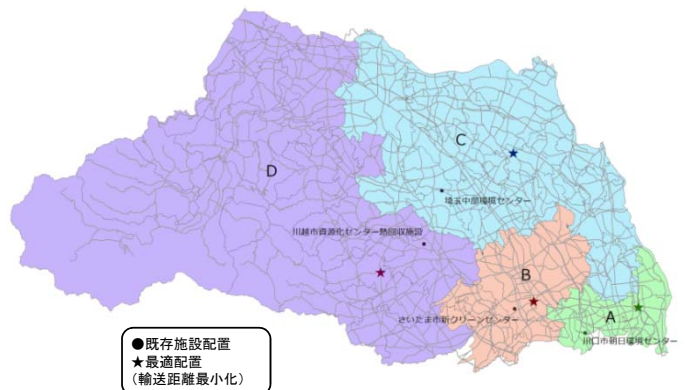


図8 総輸送距離の最小化による施設位置探索結果

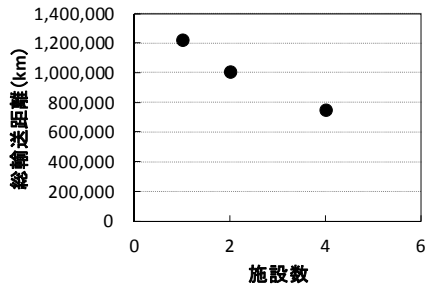


図9 総輸送距離と施設数との関係

施設数が増加するにしたがって、総輸送距離が減少していった。収集運搬の観点のみから見れば施設数が増えれば、収集運搬に係るエネルギーの消費を減らすことができる。しかし、低炭素社会を構築していくためには、収集運搬だけでなく、廃棄物処理全体として、CO₂排出量を最小化していくことが必要となる。そこで、4章でさらなる検討を行った。

3. ガス化改質プロセスモデルの構築

ガス化改質施設におけるガス化改質性能を予測するために、プロセス計算ソフトAspen Plus (Aspen Tech社)を用いてガス化改質プロセスシミュレーションモデルを構築した。構築したガス化多段触媒変換プロセスシミュレーションフローシートを図10に示す。ガス化改質プロセスは、廃棄物をガス化するガス化炉、ガス化炉からの生成ガスを改質する改質反応器(改質器(一段))、さらに生成したCO₂等をCH₄に変換するメタン反応器(改質器(二段))で構成されている。処理対象廃棄物は、木くず類及び廃プラスチック類として、表1に示すこれらの組成を入力値として用いた¹⁹⁾。NC (Nonconventional分子量の定義できない成分) 固体のエンタルピー、密度といった物性値の推定にはAspen Plus内蔵の石炭用モデルを用いて計算した。

表1 廃棄物の設定組成データ

【木くず類】

工業分析値			元素分析値		
分析項目	単位	測定値	分析項目	単位	測定値
水分	wt%	11.4	水素	乾wt%	6.3
揮発分	乾wt%	84.0	炭素	乾wt%	48.5
固定炭素	乾wt%	15.7	酸素	乾wt%	44.9
灰分	乾wt%	0.3	窒素	乾wt%	<0.01
高位発熱量	MJ/kg	19.8	塩素	乾wt%	0.0046
低位発熱量	MJ/kg	16.0	硫黄	乾wt%	0.0063

【廃プラスチック類】

工業分析値			元素分析値		
分析項目	単位	測定値	分析項目	単位	測定値
水分	wt%	3.9	水素	乾wt%	8.1
揮発分	乾wt%	83.6	炭素	乾wt%	50.6
固定炭素	乾wt%	8.4	酸素	乾wt%	33.0
灰分	乾wt%	8.0	窒素	乾wt%	0.3
高位発熱量	MJ/kg	24.0	塩素	乾wt%	0.04
低位発熱量	MJ/kg	21.2	硫黄	乾wt%	0.05

ガス化工程では、導入された廃棄物をRyieldブロックガス化工程 (DECOMP) で元素まで分解し、Rstoicブロック (GASIF) でガス化反応器で起こると想定される表2に示す反応式を記述し、生成ガスが発生するようにモデル化した。

Ryieldの収率はFortranステートメントで各変数を記述し、Calculatorブロックで計算し求めた。改質工程では、ギブス自由エネルギーを最小にすることで化学平衡をモデル化するRgibbsブロック (Gibbs) を用いる。Rgibbsブロックにおいて、表3に示す反応式を記述し、タール成分の改質反応は、Calculatorブロック (TARCONV) を用いて実験データから改質反応の進行度を計算し、その他の反応は、平衡組成計算濃度の温度からのずれ (Temperature approach) で補正する様に設定してモデル化を実施した。さらに、後段のメタン化工程は、実験のCO、CO₂転化率のデータをもとに、転化率ベースの反応器Rstoicブロック (METHANAT) を用いた。反応温度は350°C一定とした。ここでは結果を示していないが、モデルの妥当性を検証するため、モデルによる計算結果とガス化改質実験の結果を比較した¹⁹⁾。これらの結果は、ほぼ一致しており、計算は適正に行われたと考えられた。

そこで、この構築したモデルを用いて、木くず類を原料とした場合と木くず類と廃プラスチック類を重量比で1:1に混合した原料の二条件でシミュレーションを行った。改質反応器出口のガス組成計算結果を表4に示す。

表2 ガス化反応器での化学反応式

反応式	
C+2H ₂ →CH ₄	(1)
C+0.5O ₂ →CO	(2)
C+O ₂ →CO ₂	(3)
2C+H ₂ →C ₂ H ₂	(4)
2C+2H ₂ →C ₂ H ₄	(5)
2C+3H ₂ →C ₂ H ₆	(6)
6C+3H ₂ →C ₆ H ₆	(7)
7C+4H ₂ →C ₇ H ₈	(8)

表3 改質反応器での化学反応式

反応式		反応式	
CO+H ₂ O→CO ₂ +H ₂	(1)	C+O ₂ →CO ₂	(9)
CH ₄ +H ₂ O→CO+3H ₂	(2)	C+H ₂ O→CO+H ₂	(10)
C ₂ H ₆ +2H ₂ O→2CO+5H ₂	(3)	C+2H ₂ →CH ₄	(11)
C ₂ H ₄ +2H ₂ O→2CO+4H ₂	(4)	H ₂ +S→H ₂ S	(12)
C ₂ H ₂ +2H ₂ O→2CO+3H ₂	(5)	H ₂ +0.5O ₂ →H ₂ O	(13)
C ₆ H ₆ +6H ₂ O→6CO+9H ₂	(6)	N ₂ +3H ₂ →NH ₃	(14)
C ₇ H ₈ +7H ₂ O→7CO+11H ₂	(7)	CH ₄ +NH ₃ +1.5O ₂ →	(15)
C+0.5O ₂ →CO	(8)	HCN+3H ₂ O	

表4 改質反応器出口ガス組成計算結果 (V/V %)

ガス	木くず類	木くず類+廃プラスチック類
CH ₄	31.3	42.9
CO ₂	33.9	27.2
N ₂	2.6	1.3
CO	32.3	27.2
C ₂ H ₄	5.1×10 ⁻⁹	1.1
C ₂ H ₆	5.9×10 ⁻⁶	0.17

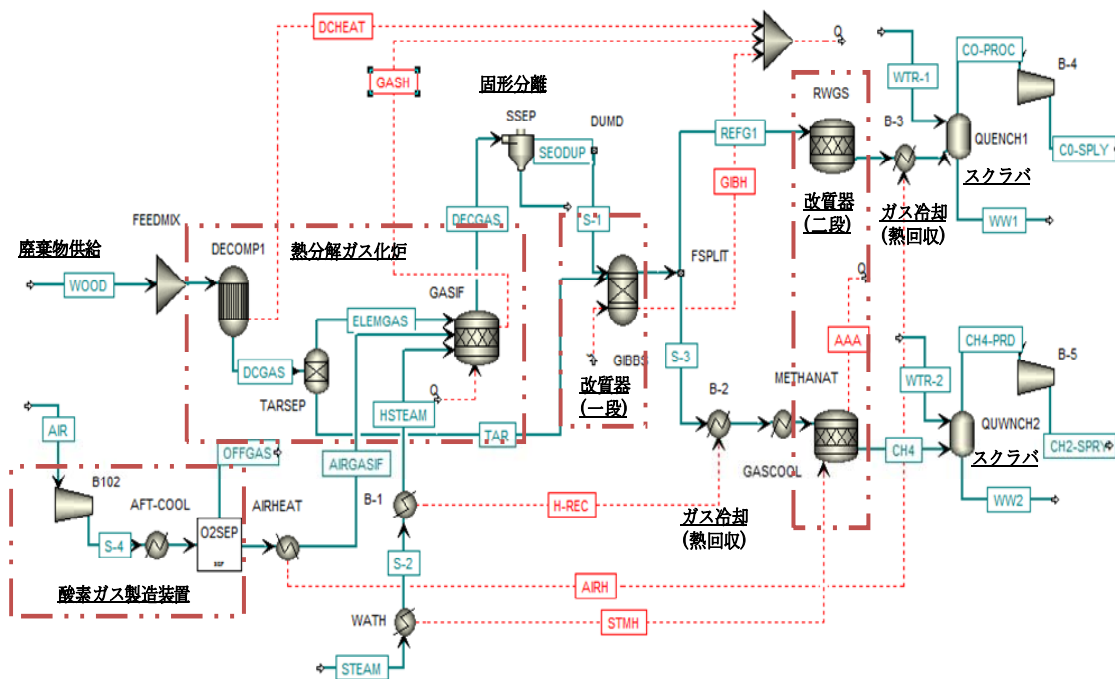


図10 ガス化改質触媒変換プロセスシミュレーションフローシート

4. 都市ガス製造のLCA

4.1 対象事業及びLCAの目的の明確化

ガス化改質プロセスから生成したCH₄リッチガスを都市ガス同等の水準に精製し、都市ガス導管に注入して、廃棄物のエネルギーを有効活用する事業の温室効果ガス(GHG) 排出削減効果を定量化した。

4.2 機能単位の設定及びプロセスフロー

機能単位は、1MJ相当の都市ガスの製造とした。システム評価対象地域として、神奈川県と埼玉県を設定した。評価対象とするシナリオは、表5に示すシナリオ6種類とした。原料となる廃棄物の種類の効果を評価するために、K-1シナリオでは、神奈川県内から発生する木くず類と廃プラスチックを収集するシナリオを設定し、K-2シナリオでは、木くず類のみを収集した。収集した廃棄物は、川崎エコタウン(図6)に設置されたガス化改質炉及びガス精製装置で都市ガス原料へ変換されるものとした。また、中継輸送施設の効果を評価するために、K-3シナリオでは、2.2.1で示した中継輸送施設を最適配置したシナリオを設定した。さらに、広域化の影響を検討するために、S-1、S-2及びS-3シナリオでは、2.2.2で示した埼玉県内を4区域、2区域、1区域に分けたシナリオを設定した。これらシナリオの対象プロセスフローを図11に示す。本研究の対象機能は、都市ガス代替品の供給であるため、比較対象として都市ガス製造プロセスフロー(オリジナルフロー)を設定した。これらのシステムフローにおいて、システム境界は「原料調達段階」、「製造段階」、

「使用段階」、「廃棄段階」の全てを含むものとした。

表5 評価対象シナリオ

シナリオ	県	廃棄物	中継施設	処理施設		
				種類	施設数	設置
K-1	神奈川県	木くず+廃プラ	なし	ガス化	100t*1	川崎エコタウン
K-2	神奈川県	木くず	なし	ガス化	100t*1	川崎エコタウン
K-3	神奈川県	木くず	あり	ガス化	100t*1	川崎エコタウン
S-1	埼玉県	木くず	なし	ガス化	50t*4	最適配置
S-2	埼玉県	木くず	なし	ガス化	100t*2	最適配置
S-3	埼玉県	木くず	なし	ガス化	200t*1	最適配置

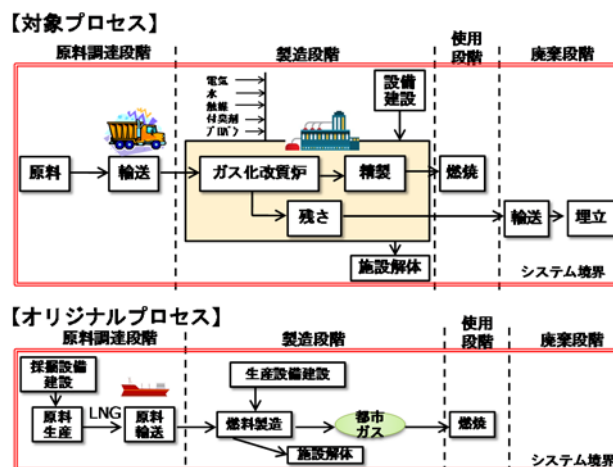


図11 都市ガス製造シナリオのプロセスフロー

4.3 活動量・原単位のデータ収集及び評価方法

4.3.1 対象プロセスの活動量及び原単位

(a) 原料調達段階

収集輸送工程の活動量データである収集輸送距離は、2章で示したようにArcGISのNetwork Analyst を用いて算出した。また、4tトラック及び10tトラックの収集輸送の原単位は、LCAソフトウェアに搭載されているLCIデータベースIDEAを利用した²⁰⁾。

(b) 製造段階

ガス化改質施設建設工程の活動量データである建設費は、3章で示したプロセスシミュレーションの結果に基づいて、機器構成及び機器仕様の概略設計を行い、機器費を積算した。さらに、土木費は、この算出した機器費の比率（機器費6割、土木費4割）で算出した。ただし、ガス化改質工程後の精製工程の建設費は、別途次の式から算出した²¹⁾。

【高度精製】

$$\text{建設コスト(百万円)} = 53.4 \times \text{ガス処理量} (\text{m}^3\text{N}/\text{日})^{0.34}$$

【脱硫+シロキサン除去】

$$\text{建設コスト(百万円)} = 12.7 \times \text{ガス処理量} (\text{m}^3\text{N}/\text{日})^{0.463}$$

この施設の使用年数は、耐用年数と同等と仮定して17年と設定した。また、プラント建設工程の原単位データは、産業連関表に基づく環境負荷原単位である3EID²²⁾を用いた。

続いて、ガス化改質施設運転工程における用役消費量である、触媒量、用水量、電力量は、プロセスシミュレーションの結果またはそれに基づく機器仕様の概略設計から算出した。都市ガス精製工程において、プロセスシミュレーションで計算したガス化改質工程からの生成ガスが、都市ガス導管に注入が可能なガス性状になるように（総発熱量45MJ/m³N、付臭濃度15mg/m³N¹⁷⁾、プロパン量（熱量調整用）及び付臭剤量を計算した。運転工程における用役消費に関わる原単位は、電力量においては、温対法算定省令に基づく事業者別排出係数²³⁾を用いて、それ以外の用役量においては、IDEAを用いた。

(c) 使用段階

活動量データである精製した都市ガス量は、上記に示したように計算し、原単位データは、IDEAの燃料都市ガス13Aを用いた。

(d) 廃棄段階

ガス化改質施設から排出される残さは、10tトラックで、県営の埋立処分場に運ばれると想定して輸送距離を算出した。

4.3.2 オリジナルプロセスの活動量及び原単位

オリジナルプロセスにおける活動量及び原単位は環境省から報告されている文献値^{24, 25)}を用いた。

4.3.3 評価方法

前で示したように収集した活動量データ及び原単位データを用いて、次式によりGHG排出量を算出した。

$$\text{GHG排出量} = \Sigma \{ \text{地球温暖化係数} \times (\text{活動量} \times \text{原単位}) \}$$

ここで、計算対象とした温室効果ガスは、CO₂、CH₄、N₂O、及びSF₆とした。地球温暖化係数（GWP）には、IPCC第5次報告書に記載された100年係数を使用し、CO₂排出量に換算した。また、評価対象は化石燃料消費由来のGHG排出とした。

さらに、本対象プロセスのGHG排出削減効果は、次式により算出した。

$$\text{排出削減率} (\%) = \frac{\text{オリジナルプロセス排出量} - \text{対象プロセス排出量}}{\text{オリジナルプロセス排出量}} \times 100$$

4.4 LCA結果

神奈川県を対象とした廃棄物のガス化改質による都市ガス製造事業シナリオK-1、K-2及びK-3のLCA算定結果を図12に示す。また、比較対象として、天然ガスから都市ガスを製造・利用するオリジナルプロセスの結果もあわせて示した。ガス化改質を核とした対象プロセスのGHG排出量は、K-1で6.90×10⁻²kg-CO₂eq.、K-2で3.06×10⁻²kg-CO₂eq.、K-3は2.84×10⁻²kg-CO₂eq.と最も低い結果となった。これらのGHG排出量は、オリジナルプロセスと比較して低く、GHG排出削減効果が大きかった。削減率を計算すると、K-1、K-2、K-3で25.3%、66.9%、69.2%と原料に木くず類を用いたK-2とK-3の削減効果が極めて大きかった。これは、原料として天然ガスやプラスチック類がカーボンニュートラルな木くず類に置き換わることに

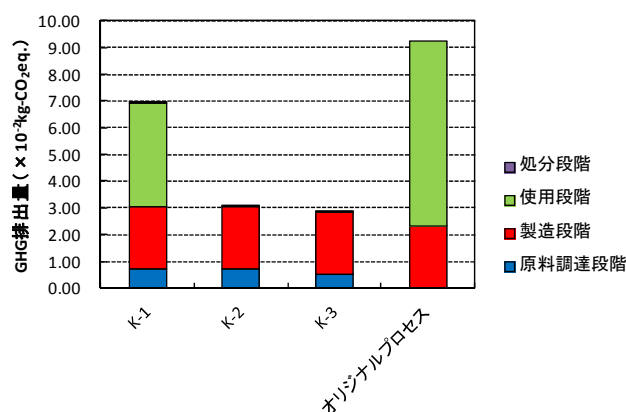


図12 神奈川県を対象としたGHG排出量算定結果

より、使用段階でのGHG排出量が大幅に削減されたためである。また、対象プロセスの製造段階のGHG排出量は、オリジナルプロセスの製造段階の排出量と同程度であった。製造段階の詳細な内訳を見てみると、電力由来のGHG排出量が最も多く、56.8%であり、それに次いで、ガス化改質施設の建設工程27.5%、触媒・薬剤等が5.4%であった。本ガス化改質システムは、運転において電力量の消費が多い酸素製造装置等で構成されている。そのため、今後さらなるGHG排出削減を目指していくには、より効率的な酸素供給システムの開発が課題となってくる。続いて、収集運搬の効率化によるGHG排出削減効果を見てみると、神奈川県を対象として中継輸送施設を設置したK-3では、K-2と比較してGHG排出量を $2.2 \times 10^{-3} \text{ kg-CO}_2\text{eq.}$ 削減することができた。

また、広域化の影響を評価するために、埼玉県を対象に県を4つの区域に分けて50t/d施設をそれぞれの区域に設置したシナリオS-1、県を2つの区域に分けて、それぞれ100t/d施設をそれぞれの区域に設置したシナリオS-2、さらに県に一つだけ200t/d施設を設置したシナリオS-3のGHG排出量を算出した。原料調達段階でのGHG排出量は、S-1、S-2、S-3がそれぞれ 1.2×10^{-3} 、 1.6×10^{-3} 、 $2.0 \times 10^{-3} \text{ kg-CO}_2\text{eq.}$ であり、2.2.2で示したように施設数が減少すると総輸送距離が増加し、GHG排出量も増加した。しかし、全GHG排出量は、S1、S2、S3それぞれ 3.2×10^{-2} 、 3.1×10^{-2} 、 $3.0 \times 10^{-2} \text{ kg-CO}_2\text{eq.}$ であり、広域化の影響は、それほど顕著に認められなかった。これは、施設数の増加により原料調達段階のGHG排出量は増加するものの、スケールメリットによって建設工程から算定されるGHG排出量が減少したためと考えられる。

5. まとめ

本研究では、低炭素社会の実現に向けて、温室効果ガス排出量を最小化することができる開発中のガス化改質技術の地域への実装方法について検討を行った。具体的な地域の設定を行い、GISを用いて、廃棄物発生分布を考慮した廃棄物輸送距離を最小化する施設の最適位置の探索を行った。さらに、ガス化改質技術の生成ガスである CH_4 リッチガスをより有効に利用するために、都市ガス原料としての利用を提案し、ガス化改質技術を核とした都市ガス製造システムについてLCAを実施して、従来型の都市ガス製造・利用オリジナルプロセスと比較・評価した。本研究で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 地域性を考慮することができるように、地域の廃棄物情報や統計情報を用いて、神奈川県の木くず類及び廃プラスチック類発生分布と埼玉県の木くず類発生分布を作成した。特に、埼玉県の木くず類発生分布の作成には、これまで十分に活用されてこなか

ったマニフェスト情報を用いており、マニフェスト情報の活用方法の一つを示すことができた。

- 2) ArcGISのNetwork Analystを使用し、廃棄物発生場所から施設までの正確な輸送距離の計算と、ガス化改質施設又は中継輸送施設の輸送距離が最短となる位置を探索する方法を提案した。提案した方法を用いて施設位置を決定した結果では、既存の施設位置と比較して、廃棄物の輸送距離を大幅に短縮することができた。
- 3) LCAにより、ガス化改質技術を導入した都市ガス製造事業とオリジナルプロセスのGHG排出削減効果を比較したところ、都市ガス製造事業のGHG排出削減効果が大きく、ガス化改質プロセスの生成ガスを都市ガス原料として用いるという新しい利用方法の可能性を示すことができた。

今回の研究では、開発中のガス化改質プロセスを地域へ導入するにあたり、1), 2)のGISを用いた施設の最適配置方法と3)のガス化改質プロセスの生成ガスをさらに精製して都市ガス利用する方法を組み合わせることにより、より効率的な廃棄物処理・エネルギー回収システムを設計、提案することができた。

本研究でシミュレーションを行った結果、100t規模のガス化改質施設から、年間 $4.70 \times 10^6 \text{ m}^3$ の都市ガスが製造できると試算された。これは、一般家庭が年間に消費する都市ガスの約13,000世帯分に相当するものである。今後、ガス化改質技術単独ではなく、下水処理施設等の社会資本との連携を検討する等、さらなるエネルギー回収の効率化及びGHG排出削減を可能とする新たな社会システムの創出を目指したい。最後に、本研究成果が、ガス化改質技術のさらなる発展に寄与できれば幸いである。

謝辞

本研究の実施にあたり、GISの技術サポートで多大なるご支援を頂いた株式会社東京地図研究社の谷口亮様、竹下健一様、原島克則様に心より感謝を申し上げます。本研究は、平成24～26年度環境省環境研究総合推進費補助金(3K123004)「地域エネルギー供給のための廃棄物系バイオマスのガス化/多段触媒変換プロセスの開発」(代表研究者：川本克也)の支援を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 環境省：廃棄物処理施設整備計画(平成25年5月閣議決定)
- 2) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：日本の廃棄物処理 平成25年度版,平成27年3月,2015.
- 3) 吉川克彦,浦邊真郎,西川光善,澤地實：産業廃棄物焼

- 却施設における発電・熱利用の実態, 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, Vol.21, C5-3, 2010.
- 4) Simell, P. A., Hepola, J. O. and Krause, A. O. : Effects of gasification gas components on tar and ammonia decomposition over hot gas cleanup catalysts. *Fuel*, Vol.76, No.12, 1117-1127, 1997.
 - 5) Caglar, A. and Cemirbas, A. :Hydrogen rich gas mixture from olive husk via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, Vol.43, 109-117, 2002.
 - 6) Asadullah, M., Miyazawa, T., Ito, S., Kunimori, K., and Tomishige, K.: 64 Catalyst development for low temperature gasification of biomass: Function of char removal in fluidized bed reactor. *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol.145, 307-310, 2003.
 - 7) Li, J., Xiao, B., Yan R. and Xu X.: Development of a supported tri-metallic catalyst and evaluation of the catalytic activity in biomass steam gasification. *Bioresource Technology*, Vol.100, 5295-5300, 2009.
 - 8) Chan, F. L. and Tanksale, A. : Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.38, 428-438, 2014.
 - 9) Tagawa, T., Rama, S. R., Kawai, S. and Yamada, H.: Partial oxidation catalysts derived from Ni-containing alloys for biomass gasification process. *Chemical Engineering Transactions*, Vol.32, 583-588, 2013.
 - 10) Rama, S. R., Yamada, H. and Tagawa, T.: Effect of oxidation pretreatment temperature of Kovar used as CO₂ reforming catalyst. *J. Fuel Chem. Technol.*, Vol.42, 573-581, 2014.
 - 11) Rama, S. R., Kawai, S., Yamada, H. and Tagawa, T.: Preliminary assessment of oxidation pretreated Hastelloy as hydrocarbon steam reforming catalyst. *Journal of Catalysts*, ID210371, 1-7, 2014.
 - 12) 魯保旺, 川本克也: NiO/SBA-15 触媒を用いた熱分解ガスの変換, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.79, 767-771, 2013.
 - 13) Lu, B. W. and Kawamoto, K.: Preparation of monodispersed NiO particles in SBA-15, and its enhanced selectivity for reverse water gas shift reaction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol.1, 300-309, 2013.
 - 14) Lu, B. W. and Kawamoto, K.: Preparation of the highly loaded and well-dispersed NiO/SBA-15 for methanation of producer gas. *Fuel*, Vol.103, 699-704, 2013.
 - 15) 藤原健史, 日下部友祐: GIS を用いた収集輸送の距離計算と中継輸送施設の最適配置に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.36, 299-308, 2008.
 - 16) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴: 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.30, 315-322, 2002.
 - 17) 川嶋淳, 宮本博司: 下水処理場におけるバイオガス都市ガス導管注入と再生可能エネルギー生産・革新技術, 用水と廃水, Vol.56, No.7, 61-67, 2014.
 - 18) 神奈川県農政局環境部資源循環課: 神奈川県産業廃棄物総合実態調査報告書 (平成 21 年度実績), <http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/160638.pdf>, 2011.
 - 19) 川本克也: 「地域エネルギー供給のための廃棄物系バイオマスのガス化/多段触媒変換プロセスの開発」に関する研究 (K123004), 平成 24 年度環境研究総合推進費補助金研究事業補助金研究報告書, 36-43, 2013.
 - 20) 産業技術総合研究所, 産業環境管理協会: LCI データベース IDEA ver1.1, MiLCA ガイドブック
 - 21) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: B-DASH プロジェクト No.2 バイオガスを活用した効果的な再生可能エネルギー生産システム導入ガイドライン (案), 国土技術政策総合研究所資料 No.737, 2013.
 - 22) 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ベース (3EID) (URL; http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm)
 - 23) 環境省: 電気事業者別排出係数の公表について (URL; <http://www.env.go.jp/press/19006.html>)
 - 24) 環境省: バイオガス関連事業の LCA に関する補足ガイドライン Ver1.0, 2012.
 - 25) 環境省: 平成 25 年度廃棄物処理システムにおける創エネルギーポテンシャル調査委託業務報告書 (URL; <https://www.env.go.jp/recycle/report/h26-05>)

Study on Waste Treatment/Energy Recovery Systems Featuring Gas Production by Waste Gasification and Reforming

Kazuyuki SUZUKI^{**}, Takeshi FUJIWARA^{***} and Katsuya KAWAMOTO^{***}

Abstract

In this study, the possibility of the developing gasification and reforming technology of waste was examined. Firstly, waste emission map is created using data of manifest of industrial waste so on. Secondly, we estimated transport distance between the gasification and performing facility and the waste emission sources by using geographic information system (GIS). Also, a location of facility (include transfer station) was determined by minimizing transportation cost (p-median problem). Thirdly, we designed the system for utilizing produced gas as city gas and evaluated the system from the viewpoint of life cycle assessment (LCA). Finally, the estimated green house gas (GHG) emission was compared to that of conventional city gas production.

Key Words: gasification and reforming, GIS, location optimization, city gas, LCA