

Modeling Analysis for Life Cycle Assessment of Waste Energy Recycling Society

Takuya SAKAI*, Yuma YAMADA*, Takuma IWAMI*, Jiro SENDA*

(Received March 14, 2013)

Waste biomass has a feature of carbon-neutral and contributes to reduction of CO₂ emissions greatly. Therefore, a sustainable energy system can be realized by utilizing the waste biomass such as wood, kitchen waste, sewage, and so on effectively. However, it is difficult to handle the waste biomass as fuel because of a difference in their form. For this reason, it is necessary to carry out energy transduction of the biomass to a suitable form for power generation. In this study, the energy conversion system was built up by pyrolysis gasification through superheated steam gasification system. However, biomass has a low energy density, due to low volume spread over wide areas, with large energy consumption by the transport of waste to the gasification process. Hence, using the technique of Life Cycle Assessment, evaluation should be conducted prior to implementation of this system.

This study proposes modeling analysis for Life Cycle Assessment of the waste energy through superheated steam gasification system. Life cycle analysis is used to assess the energy balance and CO₂ emissions on material's transportation, chipping, drying, gasification and generation process totally. In this paper, the impact of differences in the amount and type of resources in urban and rural area were considered to evaluate to energy balance and CO₂ emissions for each process. It was obtained that energy independence ratio is over 10% in rural area with this methodology and both the energy profit ratio and the rate of CO₂ reduction are improving with the increase in processing speed.

Key words : Biomass, Gasification, Life Cycle Assessment (LCA), CO₂ emission, Co-generation

キーワード : バイオマス, ガス化, ライフサイクルアセスメント, 二酸化炭素排出量, コージェネレーション

廃棄物エネルギーを用いた循環型社会に向けた LCA 解析モデルの構築

阪井 拓哉, 山田 悠馬, 岩見 拓馬, 千田 二郎

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故を機に、太陽光、風力およびバイオマスなど、再生可能エネルギーへの期待が高まりつつある¹⁾。中でも分散型エネルギー資源として都市静脈系由来の廃棄物系バイオマスが脚光を浴びている^{2,3)}。バイオマス資源はカーボン・ニュートラルが適用されるため、CO₂ 排出量の削減に大きく寄与できる特徴を有する⁴⁾。しかしながら、廃棄物系バイオマスは厨芥、廃木材、紙および汚泥な

ど物質形状や特性が多岐に渡り、燃料としての取り扱いが困難であることが問題とされている。そのため、発電のための燃焼過程に適した燃料形態へエネルギー変換することが有効である。

最適なエネルギー変換手法として熱分解反応によるガス化が挙げられる⁵⁾。本報では、多種多様のバイオバイオマスに対応し、安定的に高カロリーのエネルギーが得られる過熱水蒸気による熱分解ガス化の炭化装置を採用した⁶⁾。また、生成された合成ガスをガ

* Dept. of Mech. Eng, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6405, FAX: +81-774-65-6405, E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

スエンジン・コージェネレーション（以下、CGS）に適用させることで、小規模発電においても高い総合効率が期待できる。しかしながら、バイオマス資源は低エネルギー密度であり、広域分散性を有するため、輸送からガス化までの過程で膨大なエネルギー消費を伴う^{7,8)}。そのため、Life Cycle Assessment（以下、LCA）手法を用いて、本システムを予め評価する必要がある。そこで本研究では、廃棄物系バイオマスを燃料として用いたガス化発電システムの導入に対する LCA 解析モデルの構築を目的とする。本報では、貧弱な電力網を有するイタリアを対象地域として、各工程のエネルギー消費量および二酸化炭素排出量を算出した。この際、都市部・農村部に分類することで、地域差による影響を考慮している。都市部では計算条件としてガスエンジンの排熱および合成ガスの利用方法を変化させ、最適なプラントシステムの検証を行なった。また、農村部ではプラント規模およびバイオマスの種類・量の変化が発電量、エネルギー収支比および CO2 排出量に与える影響を把握した。

2. システム概要

都市部における廃棄物エネルギーを基軸とした循環型エネルギーシステム概念図を Fig. 1 に示す。エネルギー融通系は都市動脈系と都市静脈系に大別できる⁹⁾。都市動脈系資源は化石燃料などのエネルギー源、食料、水であり、都市静脈系資源はゴミ、下水汚泥、糞尿などである。従来のエネルギーシステムでは、火力・原子力発電などの動脈系由来のエネルギーを利用してきた。また、人々の生活においても、食料、水を多量に消費し、動脈系エネルギーの依存度は極めて高い。しかしながら、その一方で、化石燃料の枯渇や廃棄物処理問題が深刻化しており、早急な解決策が求められている。そこで、これらの都市社会で廃棄される厨芥・廃材・糞尿などの都市静脈系由来ゴミをバイオマスエネルギーとして再利用する手法が注目を集めている。つまり、本システムの導入が実現した場合、都市動脈系由来のハード・エネルギー・パスに対する依存度を低減し、エネルギー自立度の向上が可能となる。また、未利用資源である廃棄物系エ

ネルギーを地産地消することにより、廃棄物ゼロの社会を実現できる可能性も有する。さらに、エネルギー変換方式として本報で推奨するガス化装置によって完全無害化できれば、都市部のビル街および住宅街付近に設置が可能となり、都市部においても廃棄物エネルギー循環型社会が構築できる。

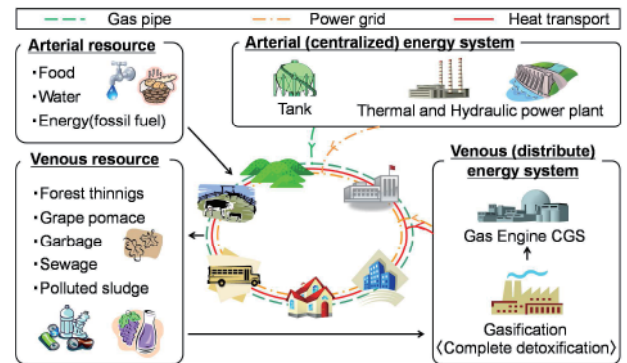


Fig. 1. Research image of waste energy recycling society.

3. LCA 解析

3.1 解析対象とした地域

本システムは、廃棄物系バイオマス資源が豊富に存在し、かつ系統電力網の未成熟な地域に適用されることが望ましい。これらを共に満たす地域としてイタリアが挙げられる。イタリアは世界一のワイン生産国であるため、豊富なバイオマス資源を有する。また、スマートグリッド発祥の地域とされているほど、電力網が比較的貧弱な構造であるため、自立型電力システムの早急な導入が必要とされている。以上のことから、対象地域をイタリア・フィレンツェとして LCA 解析を行なった。さらに、地域によってバイオマスの量や種類が大きく異なるため、フィレンツェ県内を都市部と農村部に分類した。Table 1 に対象地域として想定した都市部と農村部の人口、面積および人口密度を示す。都市部はフィレンツェ市内を対象とし、農村部はフィレンツェ県内に存在する人口密度が 500 人/km² 以下の町¹⁰⁾の平均値を一つの町として定義した。

Table 1. Basic data of urban and rural area.

Data	Population [-]	Area [m ²]	Population density [1/m ²]
Urban Area	371,282	102.4	3,626
Rural Area	10,889	85.7	160

3.2 解析対象の廃棄物系バイオマス資源

イタリアで発生する廃棄物系バイオマス資源として、厨芥、古紙、廃プラスチック、木質、ブドウの絞り粕・剪定枝および糞尿を考慮した。都市部および農村部における廃棄物系バイオマスの賦存量を Table 2 に示す。ここで、廃棄物量はイタリア国立統計研究所 (ISTAT : Istituto Nazionale di Statistica) のデータをもとに算出した¹¹⁾。また、ぶどうの搾りかすおよび剪定枝の量は、それぞれ農村部の面積 1km²あたり 0.1t、4.6t 排出されるものとして算出した¹²⁾。これら各バイオマスの低位発熱量および二酸化炭素排出係数を Table 3 に示す。

Table 2. Stock materials of urban and rural area.

Stock [t/year]	Garbage	Paper	Plastic	Wood	Livestock Excreta	Lees of Grapes	Leaf and Branch
Urban Area	91,223	41,829	4,217	9,484	0	0	0
Urban division	27,226	12,484	1,259	2,831	0	0	0
Rural Area	2,675	1,227	124	1,854	604	9	398

Table 3. Lower heating value and CO2 emission coefficient of feed stocks.

Stock	Garbage	Paper	Plastic	Wood	Livestock Excreta	Lees of Grapes	Leaf and Branch
LHV*1 [MJ/kg]	8.8	13.2	36.0	6.6	10.0	19.8	11.5
CEC*2 [kg-CO ₂ /MJ]	0.0	0.0	0.0427	0.0	0.0	0.0	0.0

※1 LHV: Lower heating value ※2 CEC: CO₂ emission coefficient

3.3 LCA 手法

初めに本研究のインベントリ工程を Fig. 2 に示す。廃棄物系バイオマスは、低カロリーかつ高含水率であるため、各工程を経て発電過程の燃焼に適した燃料形態にエネルギー変換する必要がある。主な工程として、輸送、粉碎、乾燥、エネルギー変換および発電が挙げられる。低カロリーであるバイオマス燃料は、各工程におけるエネルギー消費が大きな損失となるため、予め廃棄物系バイオマス資源の有効性を評価する必要がある。そこで、LCA によるシミュレーションを用いて、各工程の消費エネルギー量および CO₂ 排出量の数値化を行なった。これら算出に必要な各工程のインベントリデータを下記項目に記す。

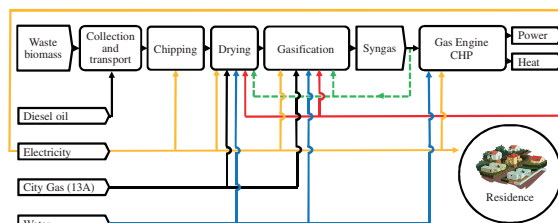


Fig. 2. Inventory process of the study.

3.3.1 輸送工程

輸送距離は Grid City Model¹³⁾を用いて算出した。概念図を Fig. 3 に示す。本モデルは対象とする地域を正方形形状に均等に分割し、グリッド状の道路に沿って収集車が走行すると仮定している。また、領域内は人口分布の偏りが無い理想的な状態を想定している。本報では、燃費を収集時 3km/l、運搬時 4.3km/l として消費エネルギーを求めた¹⁴⁾。以下に算出式、Table 4 に条件を示す。

$$\overline{dG} = \overline{dG}_1 + \overline{dG}_2 \tag{1}$$

$$\overline{dG}_1 = m \sqrt{\frac{A}{N}} = \frac{q}{\left(\frac{W}{f \cdot N}\right)} \sqrt{\frac{A}{N}} = \frac{f \cdot q \cdot \sqrt{N}}{W} \sqrt{A} \tag{2}$$

$$\overline{dG}_2 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left(i - \frac{1}{2} + j - \frac{1}{2} \right) \right\} L1}{M} \cdot 2 = 2L = 2\sqrt{A} \tag{3}$$

$$\therefore \overline{G} = \overline{dG} \cdot M = \left(\frac{f \cdot q \cdot \sqrt{N}}{W} + 2 \right) \sqrt{A} \cdot M \tag{4}$$

dG : 総走行距離[km], dG_1 : 収集領域内での走行距離[km], dG_2 : 搬入施設から収集領域間の往復距離[km], A :面積[m²], W : 地域の年間収集量[kg/yr], f : 年間収集回数[1/yr], q : 収集車の平均積載量[t], m : 収集領域内の収集箇所数[-], M : トリップ数[1/yr], N : 地域の収集箇所数[-]

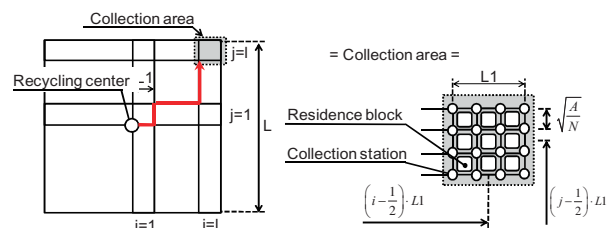


Fig. 3. Grid city model of transportation process.

Table 4. Condition of transportation process.

Symbol	W[t/yr]	A[m ²]	M[1/yr]	f[1/yr]	q[t]	N[-]
Urban area	43800	102	12000	200	4000	5000
Rural area	6891	86	1888			

3.3.2 粉碎工程

粉碎機は、バイオマスの種類による材料強度および形状の差異に対応させるため、それぞれのバイオマスに適した装置を選定した。本報では食品リサイ

クル粉碎機, プラスチック粉碎機, 木質用二軸破砕機の3種類を粉碎機¹⁵⁾として考慮した。これら粉碎機の消費電力量を Table 5 に示す。

Table 5. Energy for chipping process.

Model of grinder mill	Energy Consumption [kW/t]
Food recycle	7.1
Plastic	44.0
2 shafts for wood	2.2

3.3.3 乾燥工程

各バイオマスの乾燥エネルギーを Table 6 に示す。低含水率であるプラスチックと紙を除く, 厨芥, 木質, ブドウの絞り粕および糞尿を考慮し, 含水率 20%まで乾燥させることを想定した。この際, ボイラーの燃料に LPG を用いるものとし, ボイラーのエネルギー変換効率を 80%として計算した。乾燥に必要なエネルギーの算出方法¹⁶⁾を下記に示す。

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (5)$$

$$Q_S = m_w(h_e - h_0) + m_d(T_e - T_0)c_d \quad (6)$$

$$Q_L = m_e \Delta h_e \quad (7)$$

Q_T : 乾燥の全熱量[kJ], Q_S : 予熱の顕熱量[kJ], Q_L : 水の蒸発潜熱量[kJ], m_w : 含有水の質量[kg], h_e : 蒸発温度における水の比エンタルピー[kJ/kg], h_0 : 環境温度における水の比エンタルピー[kJ/kg], m_d : 原料の質量[kg], T_e : 蒸発温度[K], T_0 : 環境温度[K], c_d : 原料の比熱[kJ/kg・K], m_e : 蒸発水量[kg], Δh_e : 水の蒸発潜熱量[kg]

Table 6. Energy for drying process.

Stock		Garbage	Wood	Excreta	Lees of Grapes	Leaf and Branch
Moisture Content	Before [%]	60	50	80	50	50
	After [%]	20				
Boiler Efficiency [%]		80				
Heat Energy [MJ/t]		1644	1252	1252	2426	1252

3.3.4 エネルギー変換工程

本研究ではエネルギー変換装置として, K2-PEC (Kyoto Keihanna Perfect Energy Converter) の実証試験の際に用いた過熱水蒸気式ガス化・炭化装置^{6,17)}を想定した。概略図を Fig. 4 に示す。本装置は約 1073K の過熱水蒸気を吹き付け, 熱分解によって有機物を可燃性ガスと炭化物に分解するものである。

この際, 非燃焼加熱であるため, ダイオキシン等の有害物質を完全無害化できる特徴を有する。また, 炉内温度が安定しているため, 加熱時に用いる LPG を生成された合成ガスで代替することが可能となる。本報では, 機器燃料の LPG を合成ガスで代替させる場合とガス化時に発生した合成ガスを全て発電に使用する場合の2つの条件を比較検証した。ここで, この際の表現を簡略化するため, それぞれ LPG 使用の場合および LPG 代替の場合と表記する。次に, ガス化装置の仕様を Table 7 に示す。ガス化装置の規模は廃棄物系バイオマス資源の処理速度が約 30kg/h から 5t/h まで対応が可能であり, 小・中規模のプラントに適している。Fig. 5 に処理速度に対するガス化装置のエネルギー消費量を示す。エネルギー消費量は処理速度の約 1/2 乗に比例している。つまり, 装置の規模の大型化に伴い, エネルギーの使用量は減少する。これはエネルギー使用量の約 4 割が機器表面からの熱放散によって失われるためである。また, ガス化炉のエネルギー損失を考慮するため, 冷ガス効率を以下のように定義した。本報では冷ガス効率を実証試験で得られた 85%としている⁶⁾。

$$\eta_{cold} = \frac{E_{syn}}{E_{stock}} \quad (8)$$

η_{cold} : 冷ガス効率[-], E_{syn} : ガス化炉から生成する合成ガスのエネルギー量[MJ/t], E_{stock} : 原料の発熱量[MJ/t]

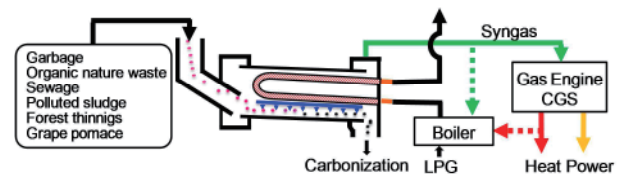


Fig. 4. Superheated steam gasification system.

Table 7. Specifications of superheated steam gasification system.

Handling		Pyrolysis
Moisture	[%]	0-90
Heating Temperature	[K]	About 1073
Processing Speed	[kg/h]	30-5000
Heat Energy	[MJ/h]	1568-20239
Cold gas Efficiency	[%]	85

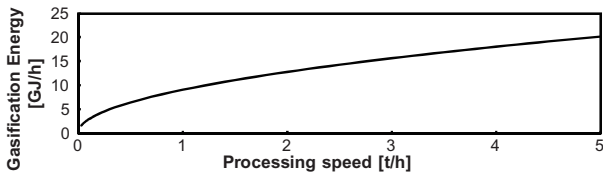


Fig. 5. Gasification energy with the variation of processing speed.

3.3.5 発電工程

発電ユニットは35kW級ガスエンジンCGS（ヤンマー、CP35VCZ）を想定した。ガスエンジン緒元をTable 8に示す。本システムは小型ガスエンジンを複数台使用することで運転制御性およびメンテナンス性の向上を図っている。また、排熱を過熱水蒸気の加熱用として一部利用することにより、加熱時に必要なガス化装置の使用燃料を減らすことが可能となる。

Table 8. Specifications of gas engine co-generation System.

Gas Engine Capacity*	[kW]	35
Generation Efficiency	[LHV-%]	34
Heat Recovery Efficiency	[LHV-%]	50
Total Efficiency	[LHV-%]	85

※ parallel running

4. 評価手法

4.1 エネルギー変換の評価指標

本報ではエネルギー変換の評価指標として、3種の計算式を用いた。それぞれの概念図をFig. 6に示す。まず、エネルギー収支比は一般的に式(9)のように、機器への投入エネルギー量に対する生産エネルギー量の比として定義される。このエネルギー収支比は輸送からガス化までの単純なガスエネルギー量の収支を把握できることが利点である。しかし、実際の生成ガスは発電によってエネルギー損失が生じるため、正確なエネルギー収支比ではない。また、本研究のようなLPG代替の場合において、式(9)のエネルギー収支比は同値を示すため、優位性の比較評価が不可能となる。これは投入エネルギーを機器へのエネルギー量として計算しているため、LPG代替した場合においてもエネルギー量が等しくなることが原因である。そこで、LPG代替における優位性を数値的に表わすため、式(11)

に示した正味エネルギー収支比を用いた。この正味エネルギー収支比は、全プロセスにおいてバイオマス由来の燃料以外で新たに使用した投入エネルギー量に対する供給可能な発電エネルギー量の比として定義している。そのため、エネルギー自立度の高さを示したものに等しく、LPG代替の有無による評価が可能となる。また、エネルギー収支比とは別に総合的な評価が必要であるため、元々のバイオマス燃料から実際に使用可能な電力への変換効率を表す総合エネルギー変換効率も合わせて算出した。総合エネルギー変換率の算出方法を式(12)に示す。

$$EPR = \frac{E_{prod}}{E_{cons}} \quad (9)$$

$$E_{cons} = E_{trans} + E_{chip} + E_{dry} + E_{gas} \quad (10)$$

$$EPR' = \frac{E_{prod'}}{E_{cons'}} \quad (11)$$

$$\eta_e = \frac{E_{prod'}}{E_{stock} + E_{cons'}} \quad (12)$$

EPR ：エネルギー収支比[-]、 E_{prod} ：生産されたエネルギー量[MJ/t]、 E_{cons} ：エネルギー消費量[MJ/t]、 E_{trans} ：輸送エネルギー消費量[MJ/t]、 E_{chip} ：粉砕エネルギー消費量[MJ/t]、 E_{dry} ：乾燥エネルギー消費量[MJ/t]、 E_{gas} ：ガス化エネルギー消費量[MJ/t]、 EPR' ：正味エネルギー収支比[-]、 $E_{prod'}$ ：発電エネルギー量[MJ/t]、 $E_{cons'}$ ：正味エネルギー消費量[MJ/t]、 η_e ：総合エネルギー変換率[-]、 E_{stock} ：原料の発熱量[MJ/t]

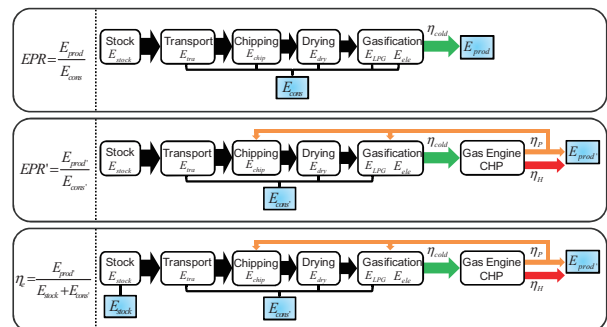


Fig. 6. Evaluation methods for energy conversion.

4.2 CO2削減率

本システムと従来のごみ処理施設を比較した場合のCO2削減割合を式(13)に示す。本報では、従来のごみ処理施設を普及率の高いストーカ炉と設定し、

CO2 排出係数を 0.0137kg-CO2/t として比較を行なった¹⁸⁾。総 CO2 排出量は輸送から発電までの CO2 排出量から、発電によって回収された CO2 量を減算することで算出した。なお、各燃料の低位発熱量および CO2 排出係数を Table 9 に示す。

$$\eta_{CO2} = \frac{CO2_{total} - CO2_{tra}}{CO2_{tra}} \quad (13)$$

$$CO2_{total} = CO2_{trans} + CO2_{chip} + CO2_{dry} + CO2_{stock} + CO2_{gas} - CO2_{gene} \quad (14)$$

η_{CO2} : CO2 削減率[-], $CO2_{total}$: 総 CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{tra}$: 従来のゴミ処理における CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{trans}$: 輸送における CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{chip}$: 粉碎における CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{dry}$: 乾燥における CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{stock}$: 原料由来の CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{gas}$: ガス化における CO2 排出量[t-CO2/t], $CO2_{gene}$: 発電における CO2 回収量[t-CO2/t]

Table 9. Lower heating value and CO2 emission coefficient for each energy resources.

Fuel	LHV	CO ₂ emission coefficient
Diesel Oil	38.2 [MJ/L]	0.0687 [kg-CO ₂ /MJ]
LPG	50.2 [MJ/Nm ³]	0.0598 [kg-CO ₂ /MJ]
Electricity	3.6 [MJ/Nm ³]	0.3780 [kg-CO ₂ /MJ]

5. 計算条件、結果および考察

5.1 都市部における解析結果

都市部の LCA 条件を Table 10 に示す。都市部では廃棄物の量が膨大であるため、プラント規模を最大の 5t/h、年間稼働日数を 365day、稼働時間を 24h/day とした。計算パラメータとして LPG 代替の有無および排熱利用の有無とし、最適なプラント運転システムの把握を試みた。それぞれの組み合わせを表に示す通り Case 1-4 と設定する。ここで、LPG 代替とは、乾燥プロセスおよびガス化プロセスに使用する LPG 燃料を合成ガスで全て代替する場合を意味する。また、排熱利用の有無は発電時の排熱回収エネルギーをガス化プロセスの予熱に一部使用する場合と利用しない場合を試みた。

Table 10. LCA conditions for urban area.

Case	1	2	3	4	
Stock [%]	Food waste	62.1			
	Paper	28.5			
	Plastic	2.9			
	Wood	6.5			
Conditions	Utilization of syngas to gasifier	×	○	×	○
	Utilization of exhaust heat from CHP	×	×	○	○
Calorific value	[MJ/kg]	10.7			
CO ₂ emission coefficient	[kg-CO ₂ /MJ]	0.0041			
Processing speed	[kg/h]	5000			
Collection period	[mth/yr]	12			
Operating time	[h/day]	24			

5.1.1 LPG 代替および排熱利用の有無がエネルギー収支に与える影響 (Case 1-4)

輸送から合成ガス生成プロセスまでを考慮した廃棄物処理量 1t あたりのエネルギー収支およびエネルギー収支比 EPR を Fig. 7 に示す。図より、全消費エネルギーに対してガス化および乾燥プロセスが多大なエネルギー消費を有することがわかる。特にガス化エネルギーは全消費エネルギーの約 80% を占めていることが分かった。また、エネルギー収支比は 1.8 となり、消費に対して生成ガスのエネルギー量が大きく上回った。これはプラント規模を最大の 5t/h で計算しているため、熱損失の影響が小さく、ガス化エネルギーの消費量を比較的抑えることができたためである。

次に、全プロセスを考慮した廃棄物処理量 1t あたりのエネルギー収支および正味エネルギー収支比 EPR' を Fig. 8 に示す。LPG 使用と比較して、LPG 代替の場合では、発電量の低下が見られる。これは、生成された合成ガスを乾燥およびガス化装置に使用することで、発電に用いるエネルギー量が低下したためである。しかしながら、乾燥および、ガス化プロセスの LPG 投入量を削減できるため、消費エネルギー量が減少し、正味エネルギー収支比は著しく向上した。すなわち、LPG を代替することによって、プラントの自立度が高まったことが言える。また、ガス化装置への排熱利用の有無に関しては、排熱を利用した Case 3,4 共にエネルギー収支比は上昇した。これは一部の排熱をガス化プロセスの予熱に利用することで、ガス化プロセスのエネルギー消費量を低減できるためである。

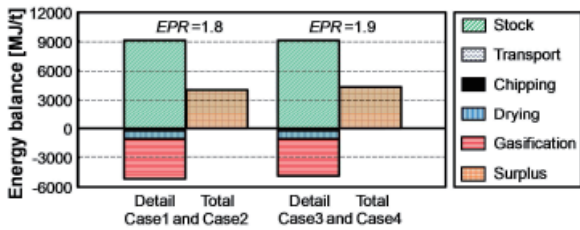


Fig. 7. Effect of method for utilization of exhaust heat and syngas on energy balance from transport to gasification in urban area.

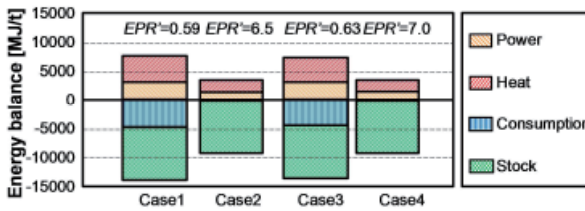


Fig. 8. Effect of method for utilization of exhaust heat and syngas on energy balance from transport to generation in urban area.

5.1.2 LPG 代替および排熱利用の有無が CO2 排出量に与える影響 (Case 1-4)

廃棄物処理量 1t あたりの CO2 排出量を Fig. 9 に示す。LPG 使用の場合と比較して、LPG 代替の場合では CO2 削減量が向上している。これは多大なエネルギー消費を伴う乾燥およびガス化プロセスにおいて、カーボン・ニュートラルが適用される合成ガスを使用することにより、CO2 排出係数の高い LPG の使用量を削減できるためである。また、排熱を利用することにより、ガス化プロセスのエネルギー使用量を低減できるため、さらなる CO2 削減効果が得られた。

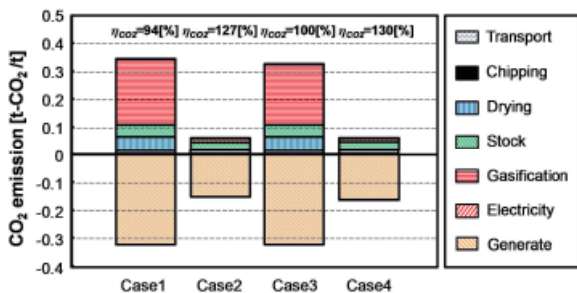


Fig. 9. Effect of method for utilization of exhaust heat and syngas on CO2 emission in urban area.

5.1.3 システムの総合評価 (Case 1-4)

総合エネルギー変換効率および CO2 削減率を Fig.10 に示す。それぞれの関係性を比較することで、Case 1-

4 におけるプラントシステムの評価を行なう。まず、排熱利用の有無では、排熱を利用することにより、総合エネルギー変換効率および CO2 削減率は共に向上している。したがって、LPG 代替の有無にかかわらず、排熱の利用が有効であると考えられる。また、LPG 代替の有無は、CO2 削減率と総合エネルギー変換効率においてトレードオフの関係性を示した。LPG 代替の場合に総合エネルギー変換効率が低下する原因として、合成ガスはガス化プロセスの燃料損失を冷ガス効率によって考慮されているため、エネルギー投入量が増加したことが考えられる。しかしながら、CO2 削減率は LPG を合成ガスで代替することにより低下する。以上から、プラントシステムの運転においてはエネルギー量と CO2 排出量の優先度によって LPG 代替の有無を決定する必要がある。つまり、総合エネルギー変換効率を優先すれば LPG 使用、CO2 削減率を重視する場合は LPG 代替を行なうことが有効である。

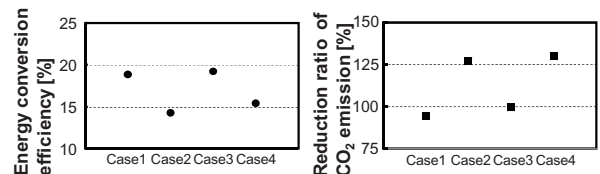


Fig. 10. Effect of method for utilization of exhaust heat and syngas on energy conversion efficiency and reduction ratio CO2 emission in urban area.

5.2 農村部における解析結果

農村部の LCA 条件を Table 11 に示す。年間稼働日数は 365 日と固定し、一日の稼働時間は処理速度の変化に応じて決定する。計算パラメータとして、LPG 代替の有無、プラント規模およびバイオマス種類・量を考慮した。農村部における廃棄物は都市部と比較して少量のため、最適なプラント規模の選定が必要となる。そこで、プラント規模を変化させ (Case A)、エネルギー収支および CO2 削減率に及ぼす影響の把握を試みた。なお、表に示す処理速度はプラント規模を意味している。また、廃棄物の種類・量による影響を把握するため、廃プラスチック割合の変化 (Case B) およびブドウの絞り粕・剪定枝 (Case C) が発生した場合を検証した。なお、ブドウの絞り粕・

剪定枝の年間収集期間は 2 ヶ月とした。

Table 11. LCA conditions for rural area.

Case		A	B		C	
Pattern		Basic	Application		Grape	
Stock [%]	Food waste	41.3	40.0	38.9	37.9	30.0
	Paper	18.9	18.3	17.8	17.4	13.7
	Plastic	1.9	5.0	7.5	10.0	1.4
	Wood	28.6	27.7	27.0	26.2	20.8
	Excreta	9.3	9.0	8.8	8.6	6.8
	Lees, Leaf and Branch	0.0	0.0	0.0	0.0	27.3
Conditions	Utilization of syngas to gasifier	×	○	×/○	○	
	Utilization of exhaust heat from CHP		○			
Calorific value	[MJ/kg]	10.1	11.0	11.6	12.3	10.6
CO ₂ emission coefficient	[kg-CO ₂ /MJ]	0.0029	0.0070	0.0099	0.0125	0.0020
Processing speed	[kg/h]	30 - 5000		3000		
Collection period	[mth/yr]	12				2
Operating time	[h/day]	3.6 - 24	6.1	6.3	6.5	6.3

5.2.1 処理速度がエネルギー収支比および CO2 排出量に与える影響 (Case A)

Fig.11 にプラント規模に対するエネルギー収支比および CO2 削減率を示す。プラント規模の大型化に伴い、エネルギー収支比および CO2 削減率は共に向上した。これはプラント規模に対するエネルギー消費量の内訳を表す Fig. 12 から分かるように、エネルギー消費量はプラント規模の増加に伴い減少し、生成エネルギー量は一定であるため、この差が Fig. 11 と同様の傾向を示したと言える。また、LPG 代替を行なうことにより、LPG の使用量を低減できるため、約 30%の CO2 削減率が向上した。

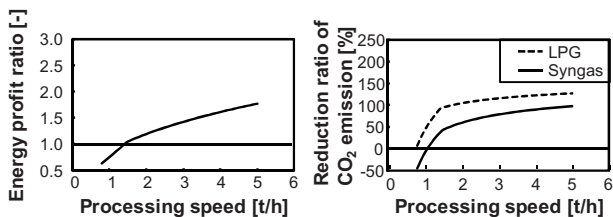


Fig. 11. Effect of processing speed of gasifier on energy profit ratio and reduction ratio of CO2 emission in rural area.

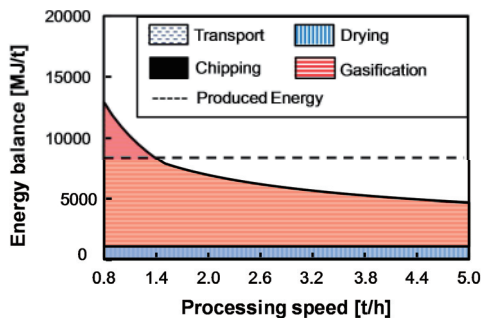


Fig. 12. Effect of processing speed of gasifier on energy balance in rural area.

5.2.2 プラスチック割合がエネルギー収支比および CO2 排出量に与える影響 (Case B)

Fig. 13 にプラスチックの量を変化させた際のエネルギー収支比および CO2 削減率を示す。エネルギー収支比は廃棄物に占めるプラスチック割合の増加に伴い、向上している。プラスチックは高発熱量かつ低含水率である特徴を有する。したがって、生成エネルギー量が大きく、乾燥プロセスのエネルギー消費が低減するため、エネルギー収支比は増加した。一方、CO2 削減率はプラスチック割合の増加に伴い、低下する傾向を示した。これは、プラスチックの CO2 排出係数が比較的高いため、プラスチック割合の増加に伴い CO2 排出係数が増加したことが原因である。しかしながら、プラスチック割合の増加により生成エネルギー量が増加し、発電による CO2 回収分が増大するため、緩やかな低下となった。そのため、プラスチック割合を 10%とした場合においても、CO2 削減率は 63%を超えており、高い値を示している。

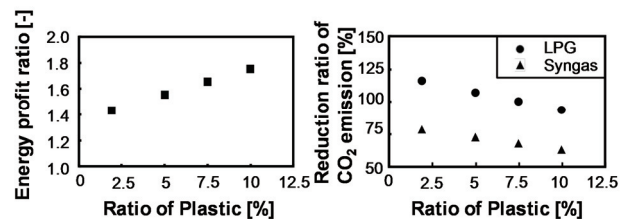


Fig. 13. Effect of ratio of plastic on energy profit ratio and reduction ratio of CO2 emission in rural area.

5.2.3 処理速度がエネルギー収支比および CO2 排出量に与える影響 (Case A)

Fig. 14 に月間あたりの総発電量および想定した地域の電力需要量から算出したエネルギー自立割合を示す。本システムを導入することにより、町の廃棄物から約 10%の電力需要をまかなうことができる。さらに、プラスチックの割合を増加させることによってエネルギー自立割合は顕著に増加し、プラスチックの割合が 10%において 20%となった。また、ぶどうの搾りかすおよび剪定枝を原料に用いることが可能な 2 ヶ月間においてエネルギー自立割合は 25%に達する。

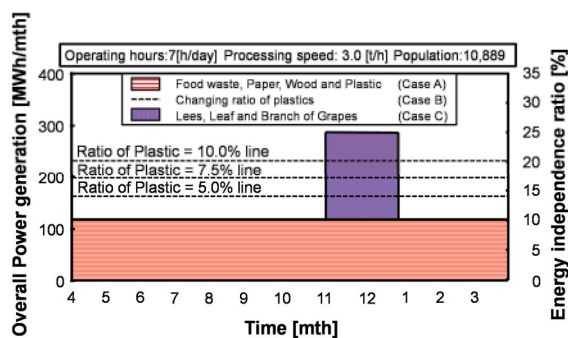


Fig. 14. Effect of range and quantity of stock on overall power generation and energy independence ratio.

6. 結 言

本報では、廃棄物系バイオマスによるガス化発電システムを評価するため、都市部と農村部に分けてエネルギー収支比および CO₂ 排出量に与える影響を把握した。本報で得られた知見を以下に示す。

- (1) 輸送からガス化工程までの全消費エネルギーに対して、ガス化消費エネルギーは約 80% を占める。
- (2) エンジンの排熱を利用することにより、正味エネルギー収支比および CO₂ 削減率は向上する。
- (3) LPG 代替の有無は、CO₂ 削減率および総合エネルギー変換効率においてトレードオフの関係性を示す。
- (4) プラント規模の大型化に伴い、エネルギー収支比および CO₂ 削減率は共に向上する。
- (5) プラスチック割合を増加させた場合、CO₂ 削減率は低下するが、エネルギー収支比は向上する。
- (6) イタリアの農村部で発生するぶどうの搾りかすおよび剪定枝を原料に用いた場合、採取可能な 2 ヶ月間においてエネルギー自立割合は 25% に上る。

本研究は、文部科学省私立大学戦力的研究基盤形成支援事業「ゼロエミッション技術を基盤とした環境調和型エネルギーグリッドの最適化研究」の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 公益社団法人化学工学会 SCE・Net, 図解新エネルギーのすべて改定 3 版, (丸善出版, 東京, 2011), p.8.
- 2) 農林水産省ホームページ, “バイオマス活用推進

基本計画”, www.maff.go.jp/j/biomass/b_kihonho/pdf/keikaku.pdf (accessed 2011.10).

- 3) 農林水産省ホームページ, “バイオマス・ニッポン総合戦略”, http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf (accessed 2011.10).
- 4) 環境省, “バイオ燃料の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン Ver.1.0”, p.34, (2010).
- 5) 菅野雅信, 赤石誉幸, 山崎由大, 金子成彦, “マイクログリッドにおけるガスエンジンの動特性”, 日本機会学会論文集(B 編), **76**, (763), 41-43(2010).
- 6) 財団法人関西文化学術研究都市推進機構, “有機性廃棄物エネルギー完全転換装置による低炭素・ゼロエミ社会の構築 事業報告書”, p.88, (2010).
- 7) 大久保塁, 堂脇清志, “えのき廃菌床を用いたバイオマスエネルギープラントに関する LCA・事業性評価”, 日本経営工学会論文誌, **59**, (3), 244(2008).
- 8) 大久保塁, 堂脇清志, “分散型バイオマスガス化システムによる燃料製造に係る LCA”, 電気学会論文誌 C, **128**, (2), 168-175(2008).
- 9) 千田二郎, 伊藤拓仙, 齊藤篤史, “都市廃棄物エネルギー転換によるエネルギー自立都市のイメージプラン”, 開発工学, **31**, (1), 29-34(2011).
- 10) DB-city.com, <http://en.db-city.com/Italy/Tuscany/Firenze/Florence>, (accessed 2011.10).
- 11) イタリア国立統計研究所ホームページ, <http://www.istat.it/en/> (accessed 2011.07).
- 12) 青木健, 橋本康司, 花積三千人, 米持千里, 社団法人日本科学飼料協会, “豪州産ブドウ酒粕(乾)の豚における消化率及び栄養価の測定”, 飼料協試報, **21**, (347), 29-37(2009).
- 13) M. Ishikawa, “A logistics Model for Post-Consumer Waste Recycling”, *Journal of Packaging Science & Technology, Japan*, **5**, (2), 119-130(1996).
- 14) 山成 素子, 島田 莊平, “LCA による RDF 発電事業の有効性に関する評価: 石川県北部地域でのケーススタディ”, 廃棄物学会論文誌, **18**, (1), 41(2007).
- 15) 株式会社フジテックスホームページ, 粉碎機.com, <http://www.fjtex.co.jp/kankyo/>, (accessed 2011.09).
- 16) 日野俊之, “Wet バイオマスのエネルギー化における VRC 乾燥の可能性”, 日本エネルギー学会誌, **84**, (4), 354(2008).
- 17) 伊藤拓仙, 有門巖, 矢作清, 三宅諭, “過熱水蒸気式ごみ処理システムの開発”, *OHM*, **97**, (8), 4-5(2010).