過熱水蒸気式ガス化システムを用いた各種バイオマスガス発電系の エネルギー使用量および CO₂ 排出量のライフサイクル評価 (—地域規模, ガス化プラント規模, 各種バイオマスガスによる影響度解析—)

山田 悠馬^{*1}, 阪井 拓哉^{*2}, 松村 恵理子^{*3}, 千田 二郎^{*4}

Life cycle assessment of energy consumption and CO₂ emission by various biogas power generation systems used superheated steam gasification system (Analysis of influences by regional scale, plant scale and various biogases)

Yuma YAMADA ^{*1}, Takuya SAKAI ^{*2}, Eriko MATSUMURA ^{*3} and Jiro SENDA ^{*4}

^{*1} Doshisha University, Graduate School of Mechanical and Engineering
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0394, Japan

^{*2} DENSO CORPORATION

1-1 Shouwa-cho, Kariya-shi, Aichi 448-8661, Japan

^{*3,*4} Doshisha University, Faculty of Science and Engineering
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0394, Japan

Received 1 June 2014

Abstract

The power generation system by waste biomass has lately attracted attention. The system can convert waste biomass such as garbage, paper and wood into energy. As a result, regional energy independence ratio of area increases. However, conditions of waste biomass are different from their properties, so it is difficult to use as a fuel. Superheated steam gasification system is one of the effective energy conversion systems in order to available wide range of waste biomass. Waste biomass consumes a lot of energy so as to make superheated steam. Then, it is necessary to take account from the collection and transport to power generation process in order to evaluate CO₂ emission totally by means of Life Cycle Assessment (LCA). Therefore, this study proposes modeling analysis for LCA by the waste energy by means of superheated steam gasification system. In this paper, it was evaluated that the effect of processing speed of gasification, population, waste biomass ratio, and boiler fuel on energy balance, CO₂ emission and cost in residential area. It was obtained that the optimal processing speed of gasification effects on utilization method of carbonization gas and waste biomass ratio. As a result of LCA, energy independence ratio is improved and CO₂ emission is reduced by use of carbonization gas. However, total energy conversion efficiency and surplus power are reduced.

Key words : Waste biomass energy, Superheated steam gasification, Life Cycle Assessment, Carbonization gas, Waste biomass ratio

1. 緒 言

循環型社会の実現を目指して未利用資源である廃棄物系バイオマスを用いた廃棄物発電が注目を集めている(川本, 2008)(西村, 時政, 2007). 廃棄物発電は日々の生活で排出される厨芥, 紙などを燃料として用いる発電方法であり, 持続的に電力を供給可能である. しかしながら, 廃棄物系バイオマスは種類により様々な性状を有するため, 燃料としての利用が困難である. そのため, 種々の廃棄物系バイオマスに対応可能な過熱水蒸気式ガス

化装置を用いた過熱水蒸気式ガス化発電システムが脚光を浴びている(千田他, 2011)(伊藤他, 2010).

過熱水蒸気式ガス化は廃棄物系バイオマスに過熱水蒸気を吹き付け、無酸素状態にて熱分解反応により乾留ガスの生成を行う。そのため、ダイオキシン類の発生を抑制でき、ガス化装置を市街地に設置することが可能となる。また、ガス化装置により生成された乾留ガスをガスエンジンコージェネレーションシステム（以下、ガスエンジン CHP）に適用させることにより高い総合効率を期待できる。しかしながら、過熱水蒸気式ガス化は過熱水蒸気の生成に多大なエネルギーを消費する。また、発電に用いる廃棄物系バイオマスは低エネルギー密度であり、広範囲に分散している。そのため、Life Cycle Assessment（以下、LCA）手法を用いて過熱水蒸気式ガス化発電システムを包括的に解析する必要がある。

そこで、本研究では過熱水蒸気式ガス化発電システムに対するライフサイクルアセスメント評価モデルの構築を目的とする。本報では、人口を1万人から20万人まで変化させ、地域規模による影響の把握を行った。また、ガス化の処理速度および乾留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った。さらに、廃棄物系バイオマスの種類による影響を把握するため、廃棄物系バイオマスの割合を変化させ、エネルギー収支、二酸化炭素排出量およびコストを評価した。

2. 過熱水蒸気式ガス化発電システム

本報にて対象とする過熱水蒸気式ガス化発電システムの概略を図1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、発電に適した燃料形態へ変換する必要がある。そのため、本報では収集運搬、粉碎、乾燥、ガス化および発電工程を考慮した。居住地から排出された廃棄物系バイオマスは収集運搬、粉碎および乾燥工程を経てガス化炉に投入され、熱分解反応により乾留ガスへ変換される。生成された乾留ガスは高カロリーであるため、システムの運転に応じて発電用およびボイラー用燃料として用いることが可能である。生成された電力はシステムの運転に必要な電力として用いられ、利用後の余剰電力は需要家に供給される。排熱は乾燥用およびガス化用ボイラーの熱源として利用可能である。

3. 解析手法

3・1 収集運搬工程

収集運搬距離の算出は Grid City Model（以下、GCM）を用いた(Ishikawa, 1996)。GCM の概念を図2に示す。GCM は対象地域を均一な人口分布を有する正方形とし、格子状の道路に沿って収集運搬車が走行すると仮定し

Fig. 1 Process diagram of the study

Fig. 2 Geometry of Grid City Model

ている。収集運搬車 1 台当たりの容量，価格，耐用年数および人員数を表 1 に示す。なお，収集運搬車の価格は 2011 年現在の値を使用した。本報では，収集運搬車の燃料消費率を収集時 3.0 km/L，運搬時 4.3 km/L とした(山成，島田，2007)。また，収集回数は週 3 回とした。収集運搬距離の算出式を下記に示す。

$$\overline{dG} = \overline{dG_1} + \overline{dG_2} \quad (1)$$

$$\overline{dG_1} = m \sqrt{\frac{A}{N}} = \frac{q}{\left(\frac{W}{f \cdot N}\right)} \sqrt{\frac{A}{N}} = \frac{f \cdot q \cdot \sqrt{N}}{W} \sqrt{A} \quad (2)$$

$$\overline{dG_2} = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left(i - \frac{1}{2} + j - \frac{1}{2} \right) \right\} L1}{M} 2 = 2L = 2\sqrt{A} \quad (3)$$

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

$$\therefore \overline{G} = \left(\frac{f \cdot q \cdot \sqrt{N}}{W} + 2 \right) \sqrt{A} \cdot M \quad (5)$$

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走行距離 km, m : 収集領域内の収集箇所数, A : 面積 km², N : 地域の収集箇所数, q : 収集車の平均積載量 kg, W : 地域の年間収集量 kg/year, f : 年間収集回数 1/year, M : 搬入回数 1/year

3・2 粉砕工程

本報では，厨芥，紙，プラスチック，繊維および草木を粉砕することを想定し，各種廃棄物系バイオマスに対応した粉砕機（株式会社フジテックスホームページ，2012）（西邦機工株式会社ホームページ，2012）を選定した。粉砕機は食品リサイクル粉砕機（株式会社フジテックス，E020），機密文書用プライバシーシュレッド（株式会社フジテックス，E007），プラスチック粉砕機（株式会社フジテックス，E013），万能 1 軸破碎機（西邦機工株式会社，SC-30）および木質用二軸破碎機（株式会社フジテックス，E027）を参照し，各種廃棄物系バイオマス 1 kg あたりのエネルギー消費量，粉砕機コストを算出した。各種廃棄物系バイオマスに用いた粉砕機の電力消費量，価格および耐用年数を表 2 に示す。

Table 1 Specification of collection and transport process

Average of load capacity of truck	[kg/unit]	2000
Truck cost	[yen/unit]	8000000
Septic tank truck cost	[yen/unit]	8000000
Durable years	[year]	4
Personnel number	[-/unit]	2

Table 2 Specification of chipping machine

Intended waste biomass	Energy consumption [Wh/kg]	Initial cost [yen/kg]	Durable years [year]
Garbage	8.73	0.66	2
Paper	58.8	14	2
Plastic	44.0	4.8	2
Fiber	400	25	2
Wood	11.0	0.21	2

3・3 乾燥行程

高含水率である厨芥、紙、繊維、草木および糞尿を含水率 20 % まで乾燥させることを想定した。各廃棄物系バイオマスの含水率および乾燥条件を表 3 に示す。乾燥機は研機株式会社の何でも乾くん（研機株式会社ホームページ, 2012）、ボイラーは三浦工業株式会社（大阪ガス株式会社ホームページ, 2012a）のデータを参照した。廃棄物系バイオマスの水分蒸発量 1 kg あたりに対する乾燥機の低圧蒸気使用量、電力消費量、低圧蒸気圧力、低圧蒸気温度、価格および耐用年数を表 4 に示す。また、ボイラーの価格および耐用年数を表 5 に示す。

3・4 ガス化工程

本研究ではガス化装置に過熱水蒸気式ガス化・炭化装置(財団法人関西文化学術研究都市推進機構, 2010)を用いることを想定した。図 3 に本装置の概略を示す。ガス化装置は約 1073 K の過熱水蒸気を廃棄物系バイオマスに吹き付け、熱分解反応により乾留ガスおよび炭化物に変換する。生成された乾留ガスはシステムの運転に応じ、発電用燃料に加えて乾燥およびガス化工程において使用するボイラー用燃料として使用可能である。なお、各機器における必要なエネルギー量に対し乾留ガスが不足した際、都市ガスを用い、補うこととした。本報では乾留ガスの利用方法が与える影響を把握するため、都市ガス利用および乾留ガス利用それぞれについて評価を行った。なお、乾留ガス利用の際に都市ガスの代替燃料として利用する優先順位はガス化工程、乾燥工程とし、余剰乾留ガスを発電に用いた。ガス化装置の諸元を表 6 に示す。本装置は 1 時間あたりにおける廃棄物系バイオマスの処理量を 30 kg/h - 5000 kg/h まで変更可能である。ガス化の処理速度に対するガス化装置のエネルギー消費量および装置価格をそれぞれ図 4, 5 に示す。廃棄物 1 kg をガス化する際に要するガス化装置におけるガス燃料のエネルギー消費量は機器表面における熱放散の影響により処理速度の約 2/3 乗に比例する。廃棄物 1 kg をガス化する際に要するガス化装置の電力消費量は処理速度に対し、指数関数的に減少する。また、装置価格においてもプラント規模の大型化に伴い、約 2/3 乗に比例する。なお、冷ガス効率は 85 % とした(財団法人関西文化学術研究都市推進機

Table 3 Conditions for drying process

Feed stock		Garbage	Paper	Plastic	Fiber	Vegetation	Excrement
Moisture content	Before [%]	75	43	20	43	43	80
	After [%]	20					

Table 4 Specification of drying machine

Low pressure steam per amount of evaporation	[kg/kg]	1.4
Power consumption per amount of evaporation	[kWh/kg]	0.045
Pressure of low pressure steam	[MPa]	0.5
Temperature of low pressure steam	[K]	424.84
Initial cost per amount of evaporation	[yen/kg]	100000
Durable years	[year]	8

Table 5 Specification of boiler for drying

Heat efficiency	[%]	80
Initial cost per amount of evaporation	[yen/kg]	8328
Durable years	[year]	15

Fig. 3 Superheated steam gasification system

Table 6 Specification of superheated steam gasification

Format of gasification furnace		Pyrolysis
Temperature of superheated steam	[K]	1073
Processing speed	[kg/h]	30 - 5000
Cold gas efficiency	[%]	85
Efficiency of boiler for gasification	[%]	64 - 91
Durable years	[year]	15

構, 2010). 冷ガス効率の定義式を下記に示す.

$$\eta_{cold} = \frac{E_{car}}{E_{feed}} \quad (6)$$

η_{cold} : 冷ガス効率, E_{car} : 乾留ガスの低位発熱量 MJ/kg, E_{feed} : 乾燥後における原料の低位発熱量 MJ/kg

3・5 発電工程

本報では発電機として高い総合効率を有するガスエンジン CHP を想定した. ガスエンジン CHP の機器特性は発電容量に対し, 異なる. そのため, 発電効率, 温水回収効率, 蒸気回収量, 電力消費量および価格は近似式を用い, 算出した(社団法人日本エネルギー学会, 2008)(坂東他, 2008)(坂東他, 2010). 下記に算出式を示す. 式 (7) に用いる係数を表 7, 式 (8) に用いる係数を表 8 に示す. なお, 蒸気は 333.15 K であり, 給水および蒸気圧力は 0.78 MPa である. ガスエンジンの温水回収は最高取り出し温度を 361.15 K である.

$$y_1 = ax^c + b \quad (7)$$

$$C_{CHP_equip} = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

y_1 : 発電効率, 温水回収量 kW, 蒸気回収量 kW, 電力消費量 kW, x : 発電容量 kW, C_{CHP_equip} : ガスエンジン CHP 価格 yen/unit

4. 評価手法

4・1 総合エネルギー変換効率

余剰発電量および本システムに用いたエネルギー量から総合エネルギー変換効率を算出した. 本報では発電した電

Fig. 4 Gasification energy

Fig. 5 Gasification cost

Table 7 Coefficient of gas engine CHP of power generation efficiency, hot water recovery, steam recovery and power for operation

Power generation capacity [kW]	Power generation efficiency [-]			Hot water recovery[kW]			Steam recovery[kW]			Power for operation [kW]		
	a	b	z	a	b	z	a	b	z	a	b	z
$x < 350$	0.24	0	0.0463	0.930	5.348	1	0	0	1	0.023	0.386	1
$350 < x < 1000$	1.28×10^{-5}	0.0303	1	0.415	23.723	1	0.44	-4.62	1	0.020	0	1
$1000 < x < 3500$	9.085×10^{-7}	0.406	1	0.181	258.3	1	0.40	42.00	1	0.020	0	1
$3500 < x < 5500$	0	0.435	1	0.181	258.3	1	0.49	-296.33	1	0.031	-39.189	1

Table 8 Coefficient of gas engine CHP cost

Power generation capacity [kW]	Initial cost [yen]			Durable year [year]
	a	b	c	
$x < 90$	0	2811.46	1000000	15
$90 < x < 2000$	0	130000	0	
$2000 < x < 5500$	-5.419	131930	3488087	

力を本システムで想定した各機器の運転に用いることとした。そのため、余剰発電量は発電量から乾燥、粉碎、ガス化および発電工程で用いる本ガス化発電の電力量を減算した値となる。なお、本報では居住区および都市部における民生部門の活動を対象とし、解析を行っているため、系統からの電力は二次エネルギーを用いている。算出式を下記に示す。

$$\eta_e = \frac{E_{gene_surplus}}{E_{feed} + E_{diesel} + E_{citygas} + E_{ele}} \quad (9)$$

$$E_{gene_surplus} = E_{gene} - (E_{CHP_car} + E_{gas_ele_car} + E_{dry_ele_car} + E_{chip_car}) \quad (10)$$

η_e ：総合エネルギー変換効率， $E_{gene_surplus}$ ：余剰発電量 MJ/year， E_{feed} ：廃棄物系バイオマスの低位発熱量 MJ/year， E_{diesel} ：本システムに用いた軽油のエネルギー量 MJ/year， $E_{citygas}$ ：本システムに用いた都市ガスのエネルギー量 MJ/year， E_{ele} ：本システムに用いた買電のエネルギー量 MJ/year， E_{gene} ：発電量 MJ/year， E_{CHP_car} ：発電工程における本ガス化発電の消費電力量 MJ/year， $E_{gas_ele_car}$ ：ガス化工程における本ガス化発電の消費電力量 MJ/year， $E_{dry_ele_car}$ ：乾燥工程における本ガス化発電の消費電力量 MJ/year， E_{chip_car} ：粉碎工程における本ガス化発電の消費電力量 MJ/year

4・2 過熱水蒸気式ガス化発電システムのエネルギー自立度

本システムのエネルギー自立度を下記のように定義した。

$$EIR = 1 - \frac{E_{diesel} + E_{citygas} + E_{ele}}{E_{trans} + E_{chip} + E_{dry} + E_{gas} + E_{CHP}} \quad (11)$$

EIR ：本システムのエネルギー自立度， E_{diesel} ：本システムに用いた軽油のエネルギー量 MJ/year， $E_{citygas}$ ：本システムに用いた都市ガスのエネルギー量 MJ/year， E_{ele} ：本システムに用いた買電のエネルギー量 MJ/year， E_{trans} ：収集運搬工程に要する全エネルギー量 MJ/year， E_{chip} ：粉碎工程に要する全エネルギー量 MJ/year， E_{dry} ：乾燥工程に要する全エネルギー量 MJ/year， E_{gas} ：ガス化工程に要する全エネルギー量 MJ/year， E_{CHP} ：発電工程に要するエネルギー量 MJ/year

4・3 二酸化炭素排出量

年間二酸化炭素排出量は各工程における二酸化炭素排出量を加算し、余剰発電量は二酸化炭素削減量とし、減算することにより算出した。算出式を下記に示す。

$$CO2 = CO2_{trans} + CO2_{chip} + CO2_{dry} + CO2_{gas} + CO2_{CHP} - CEC_{ele} \cdot E_{gene_surplus} \quad (12)$$

$CO2$ ：年間二酸化炭素排出量 kg-CO2/year， $CO2_{trans}$ ：収集運搬工程における二酸化炭素排出量 kg-CO2/year， $CO2_{chip}$ ：粉碎工程における二酸化炭素排出量 kg-CO2/year， $CO2_{dry}$ ：乾燥工程における二酸化炭素排出量 kg-CO2/year， $CO2_{gas}$ ：ガス化工程における二酸化炭素排出量 kg-CO2/year， $CO2_{CHP}$ ：発電工程における二酸化炭素排出量 kg-CO2/year， CEC_{ele} ：全電源平均の二酸化炭素排出係数 kg-CO2/MJ， $E_{gene_surplus}$ ：余剰発電量 MJ/year

4・4 コスト

年間コストは各工程におけるコストを加算し、売電および廃棄物処理手数料による収益を減算し、耐用年数で除することで算出した。廃棄物処理手数料は本システムにより廃棄物を処理することにより得られる収益である。各工程におけるコストの内訳は設備コスト、保守コストおよび燃料コストである。なお、保守コストは設備コス

トの3%とした(朝野, 美濃和, 2007). 人件費は時給, 労働時間および人員数の積に諸経費として1.2倍した値を用いた(朝野, 美濃和, 2007). なお, 時給は年間所得中央値(厚生労働省ホームページ, 2012)を用いて算出し, プラント運転時の人員数は4人とした. 算出式を下記に示す.

$$Cost = C_{trans} + C_{chip} + C_{dry} + C_{gas} + C_{CHP} + C_{labor} + C_{interest} - C_{sell} - C_{dis} - C_{aid} \quad (13)$$

$$C_{labor} = 1.2 \cdot C_{sal} \cdot P \cdot h = 1.2 \cdot (2282 \cdot 4) \cdot h \quad (14)$$

$$C_{interest} = C_{equip} + C_{fuel} - (C_{aid} + C_{sell} + C_{dis}) \quad (15)$$

$$C_{sell} = E_{gene_surplus} \cdot C_{ele_sell} \quad (16)$$

$$C_{dis} = Q_{waste} \cdot c_{dis} \quad (17)$$

$$C = C_{equip} + (C_{main} + C_{fuel}) \quad (18)$$

$$C_{equip} = \frac{C_{mac}}{C_{year}} \quad (19)$$

$$C_{main} = 0.03 \cdot C_{equip} \quad (20)$$

$Cost$: 年間コスト yen/year, C_{trans} : 収集運搬工程に要するコスト yen/year, C_{chip} : 粉碎工程に要するコスト yen/year, C_{dry} : 乾燥工程に要するコスト yen/year, C_{gas} : ガス化工程に要するコスト yen/year, C_{CHP} : 発電工程に要するコスト yen/year, C_{labor} : 人件コスト yen/year, $C_{interest}$: 利子 yen/year, C_{sell} : 売電による収益 yen/year, C_{dis} : 廃棄物処理による収益 yen/year, C_{aid} : 補助金 yen/year, C_{sal} : 時給 yen/h, P : 人員数, h : 労働時間 h/year, C_{equip} : 設備コスト yen/year, C_{fuel} : 燃料コスト yen/year, $E_{gene_surplus}$: 余剰発電量 kWh/year, C_{ele_sell} : 売電価格 yen/kWh, C : 各工程のコスト yen/year, Q_{waste} : 廃棄物の量 kg/year, c_{dis} : 廃棄物処理手数料 yen/kg, C : 各工程に要するコスト yen/year, C_{main} : 保守コスト yen/year, C_{mac} : 装置価格 yen, C_{year} : 耐用年数 year

5. 解析条件, 結果および考察

各工程の計算手法をもとに, エネルギー収支, 二酸化炭素排出量およびコストの評価を行った. 面積は日本の人口密度の平均値および想定する人口から算出した(総務省統計局 ホームページ, 2012). 年間の稼働日数は365日とした. 各工程で用いる燃料のエネルギー量および二酸化炭素排出係数(環境省ホームページ, 2012a)(環境省ホームページ, 2012b)(大阪ガス株式会社ホームページ, 2012b)を表9に示す. 各種廃棄物系バイオマスの低位発熱量, 二酸化炭素排出係数(環境省ホームページ, 2012c)および売電価格(首相官邸ホームページ, 2012)を

Table 9 Energy value and CO2 emission coefficient

Energy	Energy value	CO2 emission coefficient
Diesel oil	38.2 [GJ/m ³]	0.0687 [kg-CO ₂ /MJ]
City gas (13A)	45.0 [MJ/Nm ³]	0.0509 [kg-CO ₂ /MJ]
Electricity	3.6 [MJ/kWh]	0.413 [kg-CO ₂ /kWh]

Table 10 Lower heating value, CO2 emission coefficient and price of power selling

Feed stock	Garbage	Paper	Plastic	Fiber	Vegetation	Excrement
Lower heating value at 0 - moisture content [MJ/kg]	17.3	16.0	36.0	18.1	17.9	13.4
CO2 emission coefficient [kg-CO ₂ /kg]	0	0	2.77	0	0	0
Price of power selling [yen/kWh]	17.85	0	17.85	33.6	17.85	

表 10 に示す。廃棄物処理手数料（株式会社大東建設ホームページ，2012）を表 11 に示す。都市ガスおよび電気料金をそれぞれ表 12 および表 13 に示す。都市ガスの料金プランは大阪ガス株式会社の大口供給（10 万 m³ 以上）

（大阪ガス株式会社ホームページ，2012c）を参照した。また，電力プランは関西電力の高圧（契約電力 500 kW 未満）（関西電力株式会社ホームページ，2012）を用いた。軽油のコストは 130 yen/L とした。本報では乾留ガスの利用方法による影響を把握するため，乾燥およびガス化工程におけるボイラー用燃料として都市ガスを用いた場合（以下，都市ガス利用）および乾留ガスを用いた場合（以下，乾留ガス利用）について解析を行った。乾留ガス利用では都市ガスの代替燃料として乾留ガスを利用することを優先し，余剰乾留ガスを発電に用いた。なお，乾留ガス利用の際に都市ガスの代替燃料として利用する優先順位はガス化工程，乾燥工程とした。また，発電した電力は発電，ガス化，乾燥，粉碎の順で優先的に使用し，余剰分を売電した。発電時に発生するガスエンジン CHP の排熱は乾燥およびガス化工程におけるボイラーの熱源として利用することを想定した。

5・1 地域規模および乾留ガスの利用方法が最適なガス化の処理速度，エネルギー収支，二酸化炭素排出量およびコストに与える影響

人口を 1－20 万人と変化させた際の解析条件を表 14 に示す。対象とした廃棄物は一般廃棄物および産業廃棄物から再生利用量を減算し，日本の人口で除し，1 人あたりの排出量を算出した（環境省ホームページ，2012d）（環境省ホームページ，2012e）。ガス化装置の処理速度を 30 kg/h－5000 kg/h まで 10 kg/h 毎に変化させることで処理速度による影響の把握を行った。なお，表 1，2，4，5，8 および図 5 に示した各工程における機器コストの 50% を補助金により補うこととした。コストの最小値を示すガス化の処理速度を最適なガス化の処理速度とした。

5・1・1 最適な処理速度に与える影響

ガス化装置の処理速度がコストに与える影響について把握するため，1 万人規模の地域におけるガス化装置の処理速度を変化させた際のコストを図 6 に示す。図 6 より，乾留ガスの利用方法に関わらず，ガス化装置の処理速度の増加に伴い，人件コストが低減し，補助金が増加する一方，ガス化コスト，発電コストおよび利子が増加している。乾留ガス利用において都市ガス利用と比較し，発電コストが大きく低減している。これは，乾留ガス利用を行うことにより発電に用いる乾留ガスが減少したためである。そのため，ガス化装置の処理速度の増加に伴い増加する発電コストが低減し，乾留ガス利用において都市ガス利用と比較し，最適なガス化装置の処理速度

Table 11 Charge for disposal waste biomass

Category of waste biomass	Garbage	Paper	Plastic	Fiber	Vegetation	Excrement
General waste [yen/kg]	18					14
Industrial waste [yen/kg]	18	45	54	40	12	18

Table 12 Charge of city gas

Plan	Usage [Nm ³ /year]	Basic charge [yen/month]	Unit charge [yen/m ³]
General	< 240	724.5	175.47
	< 600	1260	148.7
	< 1200	1440	145.1
	< 2400	1700	142.5
	< 6000	3190	135.5
	< 100000	6470	128.49
Large supply	100000 <	0	78.1

Table 13 Charge of electricity

Basic charge		[yen/kW]	1323.00
Unit charge	Summer season (7/1 - 9/30)	[yen/kWh]	12.59
	Other season	[yen/kWh]	11.53
Fuel adjustments		[yen/kWh]	0.21
Photovoltaic generation prompt charge		[yen/kWh]	0.5
Renewable energy generation prompt charge		[yen/kWh]	0.22

Table 14 Condition of the LCA

Population		[-]	10000 - 200000
Area		[km ²]	33.3 - 666.0
Population density		[-/km ²]	333.3
Percentage of feed stock [%]	Garbage		34
	Paper		28
	Plastic		14
	Fiber		4
	Vegetation		12
	Excrement		8
Total quantity of feed stock × 10 ³ [kg/year]			3459
Processing speed		[kg/h]	30 - 5000
Utilization of carbonization gas			Use of city gas / Use of carbonization gas
Aid ratio		[%]	50
Interest		[%]	3

は高い値を示す。各人口における最適なガス化装置の処理速度を図7に示す。図7より、3万人以下の小規模な地域規模では乾留ガス利用が高い処理速度を示し、3万人以上の地域では最適な処理速度は乾留ガスの利用方法に依存していない。また、地域規模の大型化に伴い、発電コストによる差異が減少するためである。地域規模の大型化に伴い、最適なガス化装置の処理速度が増加している。これは、地域規模の大型化に伴い、1時間あたりに処理をする廃棄物の量が増加し、コストの内訳において大きな割合を占めるガス化コストをガス化装置のスケールメリットにより削減するためである。

5・1・2 エネルギー収支、総合エネルギー変換効率および過熱水蒸気式ガス化発電システムのエネルギー自立度を与える影響

各人口におけるエネルギー収支を図8に示す。図8より、都市ガス利用において地域規模の大型化に伴い、ガス化工程のエネルギー消費量が低減している。図6より地域規模の大型化に伴い、ガス化装置の最適な処理速度が増加している。加えて、図4よりガス化装置における処理速度の増加に伴い、スケールメリットが得られるためである。全ての条件において約2.4 MJ/kgの電力を得られることがわかった。図8より、乾留ガス利用において人口の増加に伴い、余剰発電量が増加している。これは、スケールメリットにより、発電工程に用いる乾留ガスの量が増加したためである。総合エネルギー変換効率において都市ガス利用は乾留ガス利用と比較し、高い値を示している。これは、都市ガス利用を行うことにより、乾留ガス利用と比較し、発電に用いる乾留ガスの量が増加し、余剰発電量が増加したためである。一方、過熱水蒸気式ガス化発電システムのエネルギー自立度において乾留ガス利用は都市ガス利用と比較し、高い値を示している。乾留ガス利用を行うことにより、乾燥およびガス化工程に用いる都市ガスの使用量が減少するためである。また、乾留ガス利用において過熱水蒸気式ガス化発電システムのエネルギー自立度は100%に近い値となっている。そのため、乾留ガス利用を行うことにより、エネルギーの地産地消が可能になると考えられる。

Fig. 6 Effect of processing speed on cost of 10000 people. With processing speed increasing, labor costs decrease and subsidiary increases. On the other hand, gasification costs, CHP costs and interest are increased. CHP costs of carbonization gas utilization are much lower than city gas utilization. Because carbonization gas for used CHP is decreased by use of carbonization gas.

Fig. 7 Optimal processing speed. With processing speed increasing, regional scale is increasing.

5・1・3 二酸化炭素排出量に与える影響

各人口における二酸化炭素排出量を図9に示す。図9より、乾留ガスの利用方法に関わらず、人口の増加に伴い、二酸化炭素排出量は低減している。図8より、人口の増加に伴い、スケールメリットの影響によりガス化工程のエネルギー消費量が低減していることに起因する。また、乾留ガス利用を行うことにより、各工程における二酸化炭素排出量を低減することが可能である。一方、都市ガス利用は乾留ガス利用と比較し、各工程における二酸化炭素排出量の合計値において低い値を示した。これは、乾留ガス利用を行うことにより発電に利用できる乾留ガスの量が削減され、余剰発電量が減少したためである。

5・1・4 コストに与える影響

各人口におけるコストを図10に示す。乾留ガスの利用方法に関わらず、地域規模の大型化に伴い、コストが低減している。図6より最適なガス化装置の処理速度が増加していることおよび図4, 5よりガス化装置のスケールメリットが得られ、燃料コストおよび設備コストが低減したためである。乾留ガス利用において都市ガス利用と比較し、コストが低減している。これは、乾燥およびガス化用ボイラーの燃料として乾留ガスを用いることにより、燃料コストを削減できるためである。また、7万人以上の乾留ガス利用においてコストが負の値を示しているため、投資コストの回収が可能であることを示唆している。

5・2 廃棄物の割合、地域規模および乾留ガスの利用方法が電力自給率、二酸化炭素排出量および投資回収年数に与える影響

廃棄物の割合および地域規模を変化させた際の解析条件を表15に示す。各種廃棄物系バイオマスの割合をCase

Fig. 8 Effect of population on energy balance. Energy independence ratio of use of carbonization gas is nearly 100 %. So local production and local consumption of energy are possible with use of carbonization gas.

Fig. 9 Effect of population on CO₂ emissions. CO₂ emission of use of city gas is lower than use of carbonization gas. Because carbonization gas for used CHP is decreased by use of carbonization gas and surplus generation power is decreased.

毎に0-50%まで5%ずつ変化させた。変化させる廃棄物系バイオマス以外の割合は表14に示した平均値を用い、算出した。算出式を式(21)に示す。なお、コストが最小値を示すガス化の処理速度を最適なガス化の処理速度とした。都市ガス利用、乾留ガス利用に関わらず、厨芥割合0-20%、人口18-20万人、プラスチック割合30-50%、人口17-20万人の条件では廃棄物の量がガス化装置の許容値を超えたため、空白とした。

$$R = \frac{R_{original} \cdot (100 - R_{change})}{100 - R_{original}} \quad (21)$$

R : 変化させる廃棄物系バイオマス以外の割合 %, $R_{original}$: 変化させる廃棄物系バイオマス以外の表14に示した割合 %, R_{change} : 変化させる廃棄物系バイオマスの割合 %

5・2・1 電力自給率に与える影響

想定した各地域における電力使用量に対する本システムの電力自給率を図11に示す。なお、電力使用量は平均的な1世帯4人家族の住宅床面積を120m²とし、年間使用電力量を3108kWh/yearと算出した(社団法人日本エネルギー学会, 2008)。図より、乾留ガス利用を行った場合において電力供給率は低下した。これは、乾留ガス利用を行うことにより、発電に用いる乾留ガスの量が減少したためである。また、高含水率である厨芥および糞尿の割合が高い条件において電力供給量は0となった。高含水率である廃棄物系バイオマスが増加することにより、乾燥工程におけるエネルギー消費量が増加し、発電に用いる乾留ガスの量が減少したためである。高発熱量であるプラスチックの割合が低い条件プラスチック割合の低下に伴い、乾留ガスの発熱量が減少し、余剰発電量が0となった。一方、低含水率かつ高発熱量であるプラスチックの割合を増加させた際、電力供給量は顕著に増加した。

Fig. 10 Effect of population on cost. Cost indicates a negative value in case of more than 70000 people used of carbonization gas.

Table 15 Condition of the LCA

Population [-]		10000 - 200000					
Area [km ²]		33.3 - 666.6					
Population density [-/km ²]		333.3					
Case		Garbage	Paper	Plastic	Fiber	Vegetation	Excrement
Percentage of feed stock [%]	Garbage	0 - 50	47.6 - 23.8	39.8 - 19.9	35.9 - 17.9	38.9 - 19.4	37.4 - 18.7
	Paper	42.4 - 21.2	0 - 50	32.2 - 16.1	29.1 - 14.5	31.5 - 15.8	30.3 - 15.1
	Plastic	20.9 - 10.5	19.0 - 9.5	0 - 50	14.4 - 7.2	15.6 - 7.8	15.0 - 7.5
	Fiber	6.5 - 3.2	5.9 - 2.9	4.9 - 2.5	0 - 50	4.8 - 2.4	4.6 - 2.3
	Vegetation	17.8 - 8.9	16.2 - 8.1	13.6 - 6.8	12.2 - 6.1	0 - 50	12.8 - 6.4
Excrement		12.4 - 6.2	11.3 - 5.6	9.4 - 4.7	8.5 - 4.2	9.2 - 4.6	0 - 50
Total quantity of feed stock × 10 ³ [kg/year]		3459 - 69178					
Utilization of carbonization gas		Use of city gas/ Use of carbonization gas					
Processing speed [kg/h]		30 - 5000					
Operating day [day/year]		365					
Aid ratio [%]		50					
Interest [%]		3					

5・2・2 二酸化炭素排出量に与える影響

各条件における廃棄物 1 kg あたりの二酸化炭素排出量を図 12 に示す。図より、乾留ガス利用を行った場合において二酸化炭素排出量は増加する。これは、乾燥およびガス化工程のボイラー用燃料として乾留ガスを用いることにより、売電による二酸化炭素回収分が低下するためである。また、プラスチックの割合を増加させることにより、二酸化炭素排出量が増加する。これは、プラスチックがカーボンニュートラルの適用外であり、高い二酸化炭素排出係数を有するためである。

5・2・3 投資回収年数に与える影響

各条件における投資回収年数を図 13 に示す。図より都市ガス利用の場合、プラスチックおよび草木の割合が高い条件において投資の回収が可能である。これは、草木の売電価格が他の廃棄物と比較し、高いためである。また、乾留ガス利用において紙、プラスチックおよび繊維の割合を変化させた際、他の廃棄物系バイオマスと比較し、投資回収年数は大きく依存している。これは、表 2 より紙および繊維における粉砕コストが他の廃棄物系バイオマスと比較し、高いことが起因していると考えられる。また、プラスチックは処理手数料による収益が高いため、投資回収年数は低減すると考えられる。乾留ガス利用を行った際、都市ガス利用と比較し、投資回収年数が低減している。これは、乾留ガス利用を行うことにより乾燥およびガス化工程に用いる都市ガスの利用料を削

Fig. 11 Effect of waste biomass ratio and population on self-sufficiency ratio of electricity. When plastic of low water content and gross heating value increase, electric surplus significantly increase.

Fig. 12 Effect of waste biomass ratio and population on CO₂ emissions. When plastic increases, CO₂ emission increases. Because plastic is not carbon neutral.

Fig. 13 Effect of waste biomass ratio and population on payout time. When plastic increases, payout time shorts. Because waste disposal cost of plastic is high. Furthermore, payout time is shorted by use of carbonization gas. Therefore, payout time is shorted by selected waste biomass and use of carbonization gas.

減できたためであると考えられる。そのため、乾留ガス利用および発電に用いる廃棄物系バイオマスの選定を行うことにより投資回収年数の低減を行うことができると考えられる。

6. 結 言

- (1) 乾留ガス利用を行うことにより、プラント自立度は向上し、二酸化炭素排出量は低減する一方、総合エネルギー変換効率および余剰発電量が減少する。
- (2) 乾留ガス利用を行うことにより、年間コストが低減し、投資コストの回収が可能である。
- (3) 乾留ガスの利用方法に関わらず、最適なガス化装置の処理速度が一定となる 7 万人以上の条件において、地域規模が余剰発電量、二酸化炭素排出量およびコストに与える影響は見られなくなる。
- (4) プラスチック割合を増加させることにより、電力自給率は向上し、投資回収年数は減少するが、二酸化炭素排出量が増加する。一方、プラスチック割合を減少させることにより、乾留ガス利用では余剰発電量が 0 となり、投資コストの回収が不可能になる。

文 献

- 朝野賢司, 美濃和智朗, 日本におけるバイオエタノールの生産コストと CO₂ 削減コスト分析, 日本エネルギー学会誌, Vol.86, No.12 (2007), pp.957-963.
- 坂東茂, 渡辺裕己, 朝野浩志, 辻田伸介, 電力・熱負荷特性がマイクログリッドにおける電源システム機器容量設計に与える影響について, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol.128, No.1 (2008), pp.67-73.
- 坂東茂, 幸田栄一, 笹嶋賢一, 柳井崇, 木下守弘, 沼田茂生, 緒方隆雄, 徳本勉, 浅野浩志, エネルギー価格と環境税がマイクログリッドのエネルギー設備設計に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.76, No.763 (2010), pp.409-411.
- 株式会社大東建設ホームページ, 全国産業廃棄物処理費用・相場, 参照<<http://www.dai-tou.com/marketprice2.html>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 株式会社フジテックスホームページ, 粉砕機.com, 参照<<http://www.fjtex.co.jp/kankyo/>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- Ishikawa, M., A logistic model for post-consumer waste recycling, Journal of Packaging Science & Technology, Vol.5, No.2 (1996), pp.119-130.
- 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, Vol.8 (2010), pp.4-5.
- 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 (2010), pp.7-40.

- 川本克也, 廃棄物から考えるサステナブル都市, 環境工学総合シンポジウム講演論文集, Vol.2008, No.18 (2008), pp.13-19.
- 研機株式会社ホームページ, 参照<<http://www.kenmori.biz/anything%20dryer%20index.htm>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 厚生労働省ホームページ, 平成 22 年国民生活基礎調査の概況, 参照<<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 環境省ホームページ, 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果, 参照<<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/index.html>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 a).
- 環境省ホームページ, グリーンエネルギーCO2 削減相当量認証制度, 参照<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 b).
- 環境省ホームページ, 温室効果ガス排出量計算のための算定式及び排出係数一覧, 参照<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 c).
- 環境省ホームページ, 平成 23 年度廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態報告書, 参照<<http://www.env.go.jp/recycle/report/h24-01/index.html>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 d).
- 環境省ホームページ, 平成 22 年度一般廃棄物処理実態調査, 参照<http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 e).
- 西村文武, 時政博昭, 愛媛県における有機性廃棄物発生量の推計と地域特性に関する調査研究, 工学ジャーナル, Vol.6 (2007), pp.186-195.
- 大阪ガス株式会社ホームページ, デジタルカタログ, 参照<<http://ene.osakagas.co.jp/catalog/steam/steam-10a/>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 a).
- 大阪ガス株式会社ホームページ, 安定・安全な都市ガス供給, 参照<<http://www.osakagas.co.jp/company/>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 b).
- 大阪ガス株式会社ホームページ, 大口供給 (10 万 m³ 以上) 料金プラン, 参照<<http://ene.osakagas.co.jp/price/average-cost2011.html>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日 c).
- 首相官邸ホームページ, 再生可能エネルギーの固定価格買取制度, 参照<http://www.kantei.go.jp/jp/headline/renewable_energy.html>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 西邦機工株式会社ホームページ, 参照<<http://www.seiho-kiko.co.jp/products02.html>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 千田二郎, 伊藤拓仙, 斎藤篤史, 三宅諭, 有門巖, 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, Vol.31, No.1 (2011), pp.29-34.
- 総務省統計局ホームページ, 平成 22 年度国勢調査, 参照<<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm>>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 社団法人日本エネルギー学会編, 天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008 (2008), p.69, pp.260-280.
- 関西電力株式会社ホームページ, 高圧 (契約電力 500kW 未満) のお客様, 参照<http://www1.kepco.co.jp/yakkan/high_3.html>, (参照日 2012 年 11 月 1 日).
- 山成素子, 島田荘平, 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, Vol.18, No.1 (2007), pp.37-48.

References

- Asano, K. and Minowa, T., An analysis of bioethanol production costs and CO₂ reduction costs in Japan, Journal of the Japanese Institute of Energy, Vol.86, No.12 (2007), pp.957-963 (in Japanese).
- Bando, S., Watanabe, H., Asano, H. and TSUJITA, S., Impacts of various characteristics of electricity and heat demand on the optimal configuration of a microgrid, The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, Vol.128, No.1 (2008), pp.67-73 (in Japanese).
- Bando, S., Koda, E., Sasajima, K., Yanai, T., Kinoshita, M., Numata, S., Ogata, T., Tokumoto, T. and Asano, H., Impacts of fuel cost and carbon tax on capacity design of a microgrid, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.76, No.763 (2010), pp.409-411 (in Japanese).
- Daito Kensetsu Co., National industrial waste processing costs and market, available from

- <<http://www.dai-tou.com/marketprice2.html>>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- Fujitex CO, Ltd. Homepage, Grinder.com, available from <<http://www.fjtex.co.jp/kankyo/>>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- Ishikawa, M., A logistic model for post-consumer waste recycling, *Journal of Packaging Science & Technology*, Vol.5, No.2 (1996), pp.119-130.
- Ito, T., Arikado, I., Yahagi, K. and Miyake, S., Development of superheated steam garbage disposal system, *OHM*, Vol.8 (2010), pp.4-5 (in Japanese).
- Kansai Society City, Building a low carbon and zero emission society by organic waste energy complete conversion equipment annual report (2010), pp.7-40 (in Japanese).
- Kawamoto, K., Sustainable city to think from waste, *Symposium on Environmental Engineering*, Vol.2008, No.18 (2008), pp.13-19 (in Japanese).
- KENKI CO., LTD. Homepage, available from <<http://www.kenmori.biz/anything%20dryer%20index.htm>>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- Ministry of Health, Labour and Welfare, Overview of comprehensive survey of living conditions in 2010, available from <<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa>>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- Ministry of the Environment Japan, Results of calculating the emission amounts of greenhouse gases, available from <<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/index.html>>, (accessed on 1 November, 2012a) (in Japanese).
- Ministry of the Environment Japan, Green energy CO₂ reduction substantial amount certification system, available from <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf>, (accessed on 1 November, 2012b) (in Japanese).
- Ministry of the Environment Japan, Calculation formula for greenhouse gas emissions calculation and emission factor list, available from <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf>, (accessed on 1 November, 2012c) (in Japanese).
- Ministry of the Environment Japan, Wide area movement study measures investigation of waste and waste recycling amount actual report in 2011, available from <<http://www.env.go.jp/recycle/report/h24-01/index.html>>, (accessed on 1 November, 2012d) (in Japanese).
- Ministry of the Environment Japan, General waste disposal survey, available from <http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html>, (accessed on 1 November, 2012e) (in Japanese).
- Nishimura, F. and Tokimasa, H., Estimation of organic wastes generation and its geographical characteristics in Ehime prefecture, *Annual Journal of Engineering*, Vol.6 (2007), pp.186-195 (in Japanese).
- OSAKA GAS CO., LTD. Homepage, Digital catalog, available from <<http://ene.osakagas.co.jp/catalog/steam/steam-10a/>>, (accessed on 1 November, 2012a) (in Japanese).
- OSAKA GAS CO., Sustainable and secure city gas supply, available from <<http://www.osakagas.co.jp/company/>>, (accessed on 1 November, 2012b) (in Japanese).
- OSAKA GAS CO., Large supply (one hundred thousand m³ or more) price plan, available from <<http://ene.osakagas.co.jp/price/average-cost2011.html>>, (accessed on 1 November, 2012c) (in Japanese).
- Prime Minister of Japan and His Cabinet, Feed-in tariff of renewable energy, available from <http://www.kantei.go.jp/jp/headline/renewable_energy.html>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- SEIHO KIKO co, ltd. Homepage, available from <<http://www.seiho-kiko.co.jp/products02.html>>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- Senda, J., Ito, T., Saito, A., Miyake, S. and Arikado, I., Imaging proposal of energy independent city based on perfect energy conversion of city residential wastes, *Development engineering*, Vol.31, No.1 (2011), pp.29-34 (in Japanese).
- Statistics Japan, Japan census data in 2010, available from <<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm>>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- The Japan Institute of Energy, Cogeneration plan and design manual 2008 (2008), p.69, pp.260-280 (in Japanese).
- THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC., High tension (contract demand under 500kW) of customer, available from <http://www1.kepc.co.jp/yakkan/high_3.html>, (accessed on 1 November, 2012) (in Japanese).
- Yamanari, M. and Shimada, S., Life cycle assessment of RDF power generation in northern Ishikawa prefecture, *Journal of the Japan Society Waste Management Experts*, Vol.18, No.1 (2007), pp.37-48 (in Japanese).