

Analysis of a Waste Energy Recycling Society Using Life Cycle Assessment (A Model Analysis of a Rural City in a Mountainous Region)

Yuma YAMADA*, Takuya SAKAI**, Eriko MATSUMURA*, Jiro SENDA*

(Received January 29, 2015)

Power generation systems using waste biomass have attracted attention. Such a system can convert waste biomass, which is discharged from residential areas, into power based on the local energy demand. By applying this biomass energy conversion system, we expect to improve the energy independence of a local society. However, since waste biomass, such as paper, scrap wood, and other garbage, has different thermal properties, it is desirable to process them for gasification. In addition, biomass has a low energy density, due to low volume spread over wide areas, the process requires waste transportation and accumulation, and therefore a large amount of energy. Hence, the implementation of these systems into local societies needs a prior and careful evaluation using Life Cycle Assessment (LCA). This study shows the usefulness of the evaluation using LCA by demonstrating a model city employing a waste energy recycling system. We evaluated the effects of processing speed of gasification, fuels of boilers and heaters on the energy balance, CO₂ emission, and the total cost in the modeled rural city in a mountainous region. The analysis showed that the energy independence and CO₂ emission can be improved by the use of a carbonization gas.

Key words : biomass energy, gasification, energy independence, life cycle assessment, rural mountainous region

キーワード : バイオマスエネルギー, ガス化, エネルギー自立, ライフサイクルアセスメント, 地方山間部

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 (日本における過疎地(地方山間部)での解析例)

山田 悠馬, 阪井 拓哉, 松村 恵理子, 千田 二郎

1. はじめに

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^{1,2)}。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。そのため, 廃棄物系バイオマスを有効利用する方法として効率および利便性の観点からガス化が有効である³⁾。中でも, 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^{4,5)}。

過熱水蒸気式ガス化は廃棄物系バイオマスに過

* Department of Mechanical and System Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone/Fax: +81-774-65-6405, E-mail: dun0573@mail4.doshisha.ac.jp, jsenda@mail.doshisha.ac.jp
** DENSO CORPORATION, Aichi

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。廃棄物発電を含む各種のバイオマスエネルギー利用は近年 Feed in Tariff の施行以降、国内においても実施例が散見される。再生可能エネルギーの一つであるバイオマスエネルギー利用には電力などのエネルギー需要に同期した供給の可能性があり、On demand 作動という非常に大きな利点を有する。さらに、著者らの開発した過熱水蒸気を利用した過熱水蒸気式ガス化装置は小型化が可能である。基本的に著者らは、廃棄物系バイオマスエネルギー利用は都市系の産業廃棄物を主体とした大規模なシステムではなく、都市周辺の居住区や地方過疎地における家庭などから廃棄される各種廃棄物をベースにした比較的小規模のシステムがその周辺での電力および熱エネルギー利用の面において有効であり、エネルギー自立度の向上に寄与するものであると考えている。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 LCA 解析モデルの構築を目的とする。既報ではイタリアを対象地域とし、農村部および都市部についてエネルギー収支および二酸化炭素排出量について評価を行った⁶⁾。また地域規模および廃棄物系バイオマスの種類による影響の把握を行った⁷⁾。本報では乾留ガスの利用方法、ガスエンジンの排熱の利用方法が与える影響について把握するため、日本の過疎地として豊富な森林資源を有する京都府笠置町を対象地域とし、エネルギー収支、二酸化炭素排出量およびコストについて評価を行った。

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。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。一方、化石燃料の枯渇や廃棄物処理問題が深刻化し、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。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。

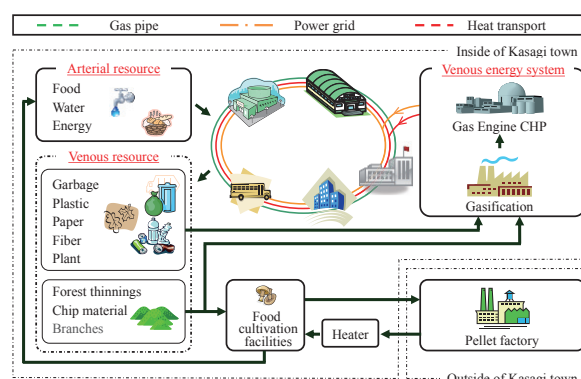


Fig. 1. Research image of waste energy recycling society.

3. 対象地域の概要

3.1 笠置町

本報で対象とした笠置町の位置を Fig. 2 に示す。京都府の東南端に位置し、京都府内では最も小さい町である。また、笠置町は町内の約 80%が山林であるため、豊富な木質バイオマス資源を有する。笠置町の人口、面積および世帯数^{8,9)}を Table 1 に示す。



Fig. 2. Map of Kasagi town.

Table 1. Regional data for the LCA.

Regional data	Population [-]	Area [km ²]	Households [-]
Kasagi town	1,876	23.57	652

3.2 解析対象地域の廃棄物系バイオマス資源

笠置町で発生する廃棄物系バイオマス資源として、厨芥、紙、プラスチック、繊維、草木および間伐材を考慮した。笠置町の廃棄物系バイオマスの賦存量、低位発熱量、二酸化炭素排出係数を Table 2 に示す。ここで、厨芥、紙、プラスチック、繊維、草木などの廃棄物量は総務省統計局¹⁰⁾のデータをもとに算出し、ごみの割合は平成 22 年に行った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¹¹⁾において採取した京都府精華町のデータを参考にした。

Table 2. Feed stock of Kasagi town.

Feed stock	Garbage	Paper	Plastic	Fiber	Plant	Thinnings
Quantity [Mg/yr]	379.2	158.0	126.4	63.20	18.96	580.0
LHV ^{※1} [MJ/kg]	17.3	16.0	36.0	18.1	17.9	17.9
CEC ^{※2} [kg-CO ₂ /MJ]	0	0	0.0427	0	0	0

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

4. 解析手法

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 Fig. 3 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。また、間伐材の一部をペレット化し、食物栽培施設のヒーターの燃料として用いることが可能である。加えて、食物栽培施設の熱源としてガスエンジンの排熱を利用できる。

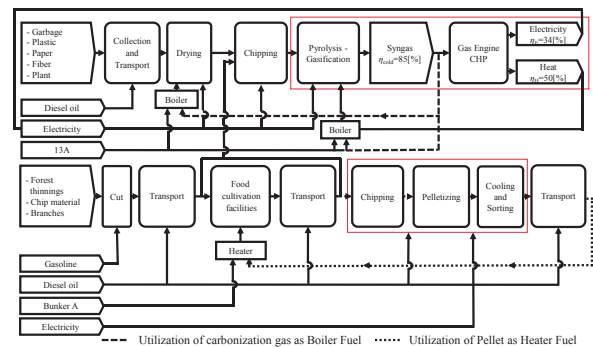


Fig. 3. Inventory process of the study.

4.1 前処理工程

4.1.1 廃棄物系バイオマス

4.1.1.1 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¹²⁾。GCM の概念を Fig. 4 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 Table 3 に示す。なお、本報では収集運搬車の燃料消費率を収集時 3.0km/L、収集運搬車の価格は 2011 年現在の値を使用した。

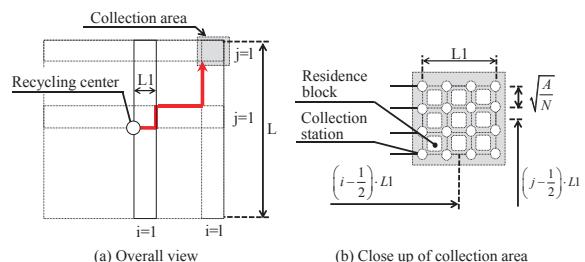


Fig. 4. Geometry of Grid City Model.

運搬時 4.3 km/L とした¹³⁾。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。

$$\overline{dG} = \overline{dG}_1 + \overline{dG}_2 \quad (1)$$

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

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

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

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

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

Table 3. 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

4.1.1.2 乾燥工程

高含水率である厨芥, 紙, 繊維, 草木および間伐材を含水率 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 Table 4 に示す。乾燥機は研機株式会社の何でも乾くん¹⁴⁾, ボイラーは三浦工業株式会社¹⁵⁾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 Table 5 に示す。ボイラーの価格および耐用年数を Table 6 に示す。

Table 4. Conditions for drying process.

Feed stock		Garbage	Paper	Plastic	Fiber	Plant	Thinnings
Moisture content	Before [%]	75	43	20	43	43	43
	After [%]	20					

Table 5. 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 6. Specification of boiler for drying.

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

4.1.1.3 粉砕工程

本報では, 厨芥, 紙, プラスチック, 繊維, 草木および間伐材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^{16, 17)}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 Table 7 に示す。

Table 7. 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
Thinnings	11.0	0.21	2

4.1.2 間伐材

本報では, 笠置町内の山林における間伐材を食物栽培施設の暖房機器および発電用の燃料として用いた場合について評価を行った。間伐材を食物栽培施設のヒーター用燃料として用いる際, ペレット化を行う必要がある。そのため, 間伐材をペレット化の際に必要な各種工程について下記に述べる。

4.1.2.1 間伐工程

平成 22 年度低炭素地域づくり面的対策推進事業報告書¹⁸⁾を参照した。下刈りには, 下刈り機を用い, 間伐には, チェーンソーを用いることを想定した。機器の諸元を Table 8 に示し, 間伐エネルギーの算出

式を以下に示す. 間伐材の量は Table 9 に示した間伐面積 1m^2 あたりの間伐材の量に間伐面積を乗算し, 算出した.

$$E_{cut} = EC_{cut} \cdot A_{forest} \cdot E_{gasoline} \quad (6)$$

E_{cut} : 間伐エネルギー MJ, EC_{cut} : 単位面積あたりに必要な燃料の量 l/m^2 , A_{forest} : 間伐する面積 m^2 , $LHV_{gasoline}$: ガソリンの低位発熱量 MJ/l

Table 8. Thinning energy.

Work	Weeding	Thinning
Equipment	Brushcutter	Chain saw
Fuel	Gasoline	
Energy Consumption	EC_{cut} [l/m ²]	
	0.027	0.036

Table 9. Quantity of thinning.

Feed stock	Forest thinnings	Chip material	Branches
Quantity	[kg/m ²]	7.35	4.64
		6.00	

4.1.2.2 輸送工程

京都市右京区に位置する森の力京都株式会社に委託し, ペレット化を行うことを想定した. そのため, 笠置町から森の力京都株式会社までの距離を Google map を用いて算出した結果, 45.2km であった. 経路図を Fig. 5 に示す. 算出式を以下に示す.

$$E_{trans_wood} = 2 \frac{E_{diesel}}{FC_{trans}} (L_1 M_1 + L_2 M_2) \quad (7)$$

E_{trans_wood} : 間伐材の輸送エネルギー MJ, E_{diesel} : 軽油の低位発熱量 MJ/l, FC_{trans} : 輸送トラックの燃料消費率 km/l , L_1 : 食物栽培施設および発電プラントからペレット工場までの距離 km , L_2 : 笠置山から食物栽培施設および発電プラントまでの距離 km , M_1 : 食物栽培施設および発電プラントからペレット工場への搬入回数, M_2 : 笠置山から食物栽培施設および発電プラントへの搬入回数

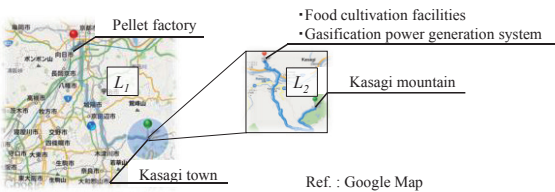


Fig. 5. Pathway.

4.1.2.3 食物栽培施設

冬季においても食物を栽培するためには, 室内の

温度を外気温+20度 に保つ必要がある¹⁹⁾. 本報では, 平成 23 年度低炭素地域づくり面的対策推進事業報告書¹⁹⁾を参照し, 笠置町に存在する空きハウスを全て用いた場合においてヒーターに要するエネルギー量を算出した. 各条件を Table 10 に示す. 算出式を以下に示す. また, 食物栽培施設においては使用した間伐材の重量が 20%軽減することを考慮した.

$$E_{food} = FC_{food} \cdot OT_{food} \quad (8)$$

E_{food} : 食物栽培施設の暖房に要するエネルギー MJ, FC_{food} : ヒーター1 時間稼働させる際に消費するエネルギー量 MJ/h, OT_{food} : ヒーターの稼働時間 MJ/l

Table 10. Energy of heater.

Capacity	55.8kJ/h × 1	209MJ/h × 2
Scale	[m ³]	
	105	576
Fuel consumption	FC_{food} [MJ/h]	
	65.919	359.10
Operating time	OT_{food} [h/yr]	
	3571.4	3596.5
Thermal efficiency	[%]	75
Temperature difference	[K]	20

4.1.2.4 ペレット化工程

間伐材をペレット化するためには, 粉碎, 乾燥, ペレット化, 冷却および選別の行程を経る必要がある. 使用エネルギーについては, 平成 23 年度低炭素地域づくり面的対策推進事業報告書¹⁹⁾を参考にした. 使用エネルギーを Table 11 に示す. ペレット化行程においては, 原料の重量が 50%軽減することを考慮した.

Table 11. Energy of pellet factory.

Rated production volume capacity	PV	[kg/h]	300
Energy consumption (Electricity)	$EC_{pellet\ ete}$	[MJ/h]	453.6
Energy consumption (Diesel oil)	$EC_{pellet\ diesel}$	[l/h]	0.5

※ Load:60%

4.2 過熱水蒸気式ガス化および発電工程

4.2.1 過熱水蒸気式ガス化工程

本研究ではガス化装置に過熱水蒸気式ガス化・炭化装置²⁰⁾を用いることを想定した. Fig. 6 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

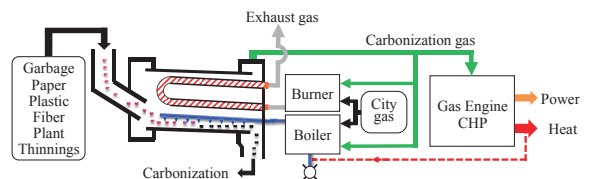


Fig. 6. Superheated steam gasification system

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 Table 12 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 - 5000 kg/h まで変更可能である。ガス化の処理速

Table 12. 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

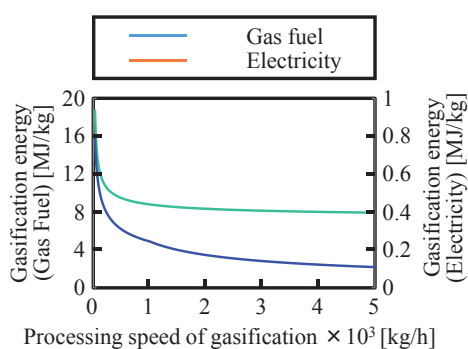


Fig. 7. Superheated steam gasification energy.

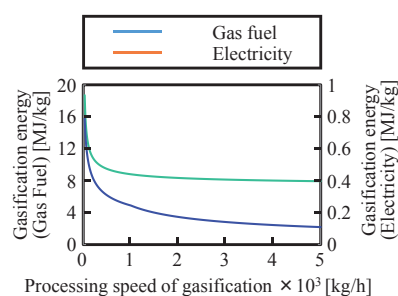


Fig. 8. Equipment cost of superheated steam gasification system.

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 Fig. 7, 8 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²⁰⁾。冷ガス効率の定義式を下記に示す。

$$\eta_{cold} = \frac{E_{car}}{E_{feed}} \quad (9)$$

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

4.2.2 発電工程

発電機器には複数台の 35kW 級ガスエンジン CGS(ヤンマー, CP35VCZ)を用いることを想定した。ガスエンジン諸元を Table 13 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。廃棄物系バイオマス資源は季節により発生量変動し、さらに一日における電量需要も変動する。そのため、小型 CGS を並列設置することにより、需要に適した柔軟な運転が可能となる。また、故障時やメンテナンス時においても一台ずつ点検可能であるため、年中無休で運転を継続できるなどの利点を有する。

本システムを用いて発電された電力は各工程において利用し、余剰電力は各家庭に供給される。ガスエンジンの排熱は熱損失を減らすため、近隣施設に供給されることが理想的である。一方、遠方の住宅・施設には熱供給が困難であるため、排熱を有効利用することが望ましい。その手法の一つとして、排熱を過熱水蒸気の加熱用に一部有効利用する方法が挙げられる。これにより、ガス化装置の燃料使用量を減らすことが可能となる。加えて、食物栽培施設のヒーター用熱源として使用することにより排熱の有効利用を行うことができる。

Table 13. Specification of gas engine CHP.

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

5. 評価手法

5.1 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。

$$\eta_e = \frac{E_{gene_surplus}}{(E_{feed} + E_{diesel} + E_{gasoline} + E_{citygas} + E_{ele} + E_{bunker})} \quad (10)$$

$$E_{gene_surplus} = E_{gene} - (E_{CHP_car} + E_{gas_ele_car} + E_{dry_ele_car} + E_{chip_car}) \quad (11)$$

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, $E_{gasoline}$: 本システムに用いたガソリンのエネルギー量 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_{bunker} : 本システムに用いた A 重油のエネルギー量 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

5.2 過熱水蒸気式ガス化発電システムにおけるエネルギー自立度

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。

$$EIR = 1 - \frac{(E_{diesel} + E_{gasoline} + E_{citygas} + E_{ele} + E_{bunker})}{(E_{trans_waste} + E_{thin} + E_{trans_thin} + E_{food} + E_{pellet} + E_{dry} + E_{chip} + E_{gas} + E_{CHP})} \quad (12)$$

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, $E_{gasoline}$: 本システムに用いたガソリンのエネルギー量 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_{bunker} : 本システムに用いた A 重油のエネルギー量 MJ/year, E_{trans_waste} : 収集運搬工程に要する全エネルギー量 MJ/year, E_{thin} : 間伐工程に要する全エネルギー量 MJ/year, E_{trans_thin} : 輸送工程に要する全エネルギー量 MJ/year, E_{food} : 食物栽培施設における全エネルギー消費量 MJ/year, E_{pellet} : ペレット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_{chip} : 粉碎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

5.3 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することにより算出した。算出式を下記に示す。

$$CO_2 = CO_{2trans_waste} + CO_{2thin} + CO_{2trans_thin} + CO_{2food} + CO_{2pellet} + CO_{2dry} + CO_{2chip} + CO_{2gas} + CO_{2CHP} \quad (13)$$

CO_2 : 年間二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2trans_waste} : 収集運搬工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2thin} : 間伐工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2trans_thin} : 輸送工程における二酸化炭素排出量, CO_{2food} : 食物栽培施設における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, $CO_{2pellet}$: ペレット化工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2chip} : 粉碎工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2dry} : 乾燥工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2gas} : ガス化工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year, CO_{2CHP} : 発電工程における二酸化炭素排出量 kg-CO₂/year

5.4 コスト

年間コストは各工程におけるコストを加算し、売電および食物栽培施設による収益を減算し、耐用年数で除することで算出した。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²¹⁾。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²¹⁾。なお、時給は年間所得中央値²²⁾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。

$$\begin{aligned} Cost = & C_{trans_waste} + C_{thin} + C_{trans_thin} + C_{food} \\ & + C_{pellet} + C_{dry} + C_{chip} + C_{gas} + C_{CHP} + C_{labor} \\ & - C_{sell_ele} - C_{sell_food} \end{aligned} \quad (14)$$

$$C_{labor} = 1.2 \cdot C_{sal} \cdot P \cdot h = 1.2 \cdot (2282 \cdot 4) \cdot h \quad (15)$$

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

$$C = C_{equip} + C_{main} + C_{fuel} \quad (17)$$

$$C_{equip} = \frac{C_{mac}}{C_{year}} \quad (18)$$

$$C_{main} = 0.03 \cdot C_{equip} \quad (19)$$

$Cost$: 年間コスト yen/year, C_{trans_waste} : 収集運搬工程に要するコスト yen/year, C_{thin} : 間伐工程に要するコスト yen/year, C_{trans_thin} : 輸送工程に要するコスト yen/year, C_{food} : 食物栽培施設に要するコスト yen/year, C_{pellet} : ペレット化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_ele} : 売電による収益 yen/year, C_{sell_food} : 食物栽培施設による収益 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, 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

6. 解析条件

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。面積は笠置町のホームページを参考にした⁹⁾。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²³⁻²⁵⁾をTable 14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²⁶⁾および売電価格²⁷⁾をTable 15に示す。都市ガスおよび電気料金をそれぞれTable 16およびTable 17に示す。都市ガスの料金プランは大阪ガス株式会社のホームページ²⁸⁾を参照した。また、電力プランは関西電力の高圧²⁹⁾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

Table 14. Energy value and CO₂ emission coefficient.

Energy	Energy value	CO ₂ 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 15. Lower heating value, CO₂ emission coefficient and price of power selling.

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

Table 16. 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 17. Charge of city 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	

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。また、食物栽培施設のヒーターの熱源として A 重油を用いる場合、ペレットを用いる場合それぞれについて解析を行った。加えて、食物栽培施設におけるヒーターの熱源としてガスエンジン CHP の排熱を利用する場合、利用しない場合それぞれについて解析を行い、最適なプラント運転システムの把握を試みた。なお、食物栽培施設においてガスエンジンの排熱を利用する際の優先順位は食物工場施設、ガス化、乾燥工程の順とした。Table 18 に解析条件を示す。

Table 18. Condition of the LCA.

Case		1	2	3	4
Feed stock [t/year]	Garbage	259.2			
	Paper	108			
	Plastic	8.64			
	Fiber	43.2			
	Plant	12.96			
	Thinnings	464.16	436.96	464.16	436.96
Thinning area [m ²]	30,000				
Volume of Food factory [m ³]	288				
Heater fuel	Bunker A	Pellet	Bunker A	Pellet	
Utilization of exhaust heat	×		○		
Boiler fuel	LPG / Carbonization gas				
Processing speed [kg/h]	30 - 5000				

7. 結果および考察

7.1 乾留ガスの利用方法、食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法が最適な処理速度に与える影響

本報では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装置の処理速度とした。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、ガス化装置の処理速度を 30~1000 kg/h まで変化させた際の総コストを Fig. 9 に示す。乾留ガスの利用方法、食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法に関わらず、各条件において同一の傾向を示した。そこで、詳しく把握するため、Case1 のガス化装置の処理速度を 100~500 kg/h まで 100 kg/h 毎に変化させた際の総コストおよび内訳を Fig. 10 に示す。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する一方、ガス化コストが増大している。ガス化装置の処理速度を増加させることによりプラントの稼働時間が短くなる。そのため、人件コストが低減したと考えられる。Fig. 5 より、ガス化装置のコストは処理速度の増加に伴い、増加する。そのため、ガス化装置の処理速度の増加に伴い、ガス化コストが増加した。都市ガス利用ではガス化装置の処理速度の増加に伴い、発電コストが増加している。本報では乾留ガスのタンクなどを想定していない。そのため、ガス化装置により生成した乾留ガスは即座にガスエンジン CHP により発電を行う。そのため、ガス化装置の処理速度の増加に伴い、単位時間当たりの乾留ガス量が増加したためであると考えられる。一方、乾留ガス利用ではガス化および乾燥工程において使用する都市ガスの代替燃料として乾留ガスを使用する。そのため、発電に使用できる乾留ガスが発生しなかったため、発電コストが発生しなかったと考えられる。

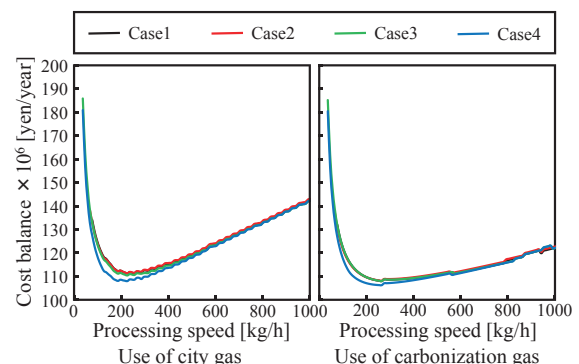


Fig. 9. Effect of processing speed on cost.

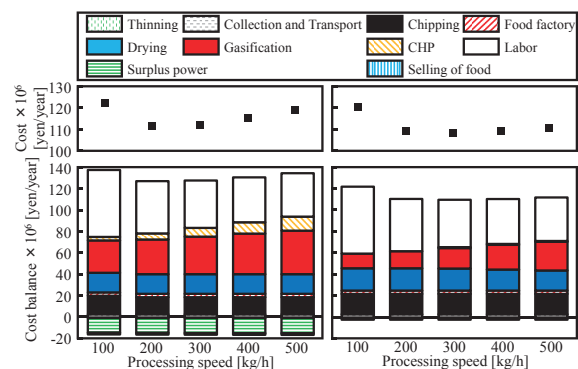


Fig. 10. Effect of processing speed on cost of Case1.

Fig. 11 に各 Case の最適な処理速度を示す。食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法に関わらず、最適な処理速度は一定の値を示した。Fig. 10 より、食物栽培施設に要するコストの値は微小である。そのため、食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法に関わらず一定の値を示したと考えられる。乾留ガス利用を行うことにより最適なガス化装置の処理速度は高い値を示した。Fig. 10 より、乾留ガス利用では都市ガス利用と比較し、ガス化コストおよび発電コストが低減している。ここで、プラントの稼働時間は廃棄物の処理量に依存するため、乾留ガスの利用方法に影響されない。そのため、乾留ガスの利用方法に関わらず人件コストは一定の値を示している。都市ガス利用と比較し、ガス化コストおよび発電コストの増加が少なく、人件コストによる影響が大きい。乾留ガス利用では人件コストを低減させるために都市ガス利用と比較し、最適な処理速度が大きくなったと考えられる。

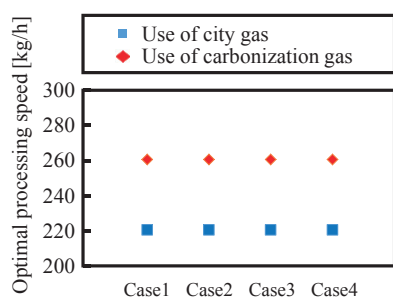


Fig. 11. Optimal processing speed.

7.2 乾留ガスの利用方法，食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法がエネルギー収支，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に与える影響

各 Case におけるエネルギー収支，総合エネルギー変換効率およびエネルギー自立度を Fig. 12 に示す。乾留ガス利用では都市ガス利用と比較し、ガス化工程のエネルギー消費量が大きく低減している。乾留ガス利用ではガス化工程において使用する都市ガスの代替燃料として乾留ガスを利用する。そのため、乾留ガス利用を行うことによりガス化工程のエネルギー消費量が低減したと考えられる。しかしながら、乾留ガス利用の乾燥工程におけるエネルギー消費量は都市ガス利用と比較し、増加している。乾留ガス利用ではガス化工程を優先し、乾留ガスを利用することを想定しているため、乾燥工程において乾留ガスの利用が行われなかったと考えられる。加えて、乾留ガス利用ではガス化工程において乾留ガスを全て使用するため発電を行っていない。ガスエンジンの排熱を乾燥工程に使用することができなかつたため、都市ガス利用と比較し、高い値を示したと考えられる。また、Case3, 4 における乾留ガス利用では都市ガス利用と比較し、食物栽培施設におけるエネルギー消費量が増加している。ガスエンジンの排熱を利用することができなかつたためであると考えられる。都市ガス利用において Case1, 2 と 3, 4 を比較し、ガスエンジンの排熱を食物栽培施設に利用することにより食物栽培施設のエネルギー消費量が低減している。しかしながら、低減量は半分程度である。これはプラント稼働時間と比較し、食物栽培施設における暖房機の稼働時間が長く、ガスエンジンの排熱のみで賄うことができなかったためであると考えられる。

Fig. 12 に各 Case の最適な処理速度を示す。食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法に関わらず、最適な処理速度は一定の値を示した。Fig. 10 より、食物栽培施設に要するコストの値は微小である。そのため、食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法に関わらず一定の値を示したと考えられる。乾留ガス利用を行うことにより最適なガス化装置の処理速度は高い値を示した。Fig. 10 より、乾留ガス利用では都市ガス利用と比較し、ガス化コストおよび発電コストが低減している。ここで、プラントの稼働時間は廃棄物の処理量に依存するため、乾留ガスの利用方法に影響されない。そのため、乾留ガスの利用方法に関わらず人件コストは一定の値を示している。都市ガス利用と比較し、ガス化コストおよび発電コストの増加が少なく、人件コストによる影響が大きい。乾留ガス利用では人件コストを低減させるために都市ガス利用と比較し、最適な処理速度が大きくなったと考えられる。

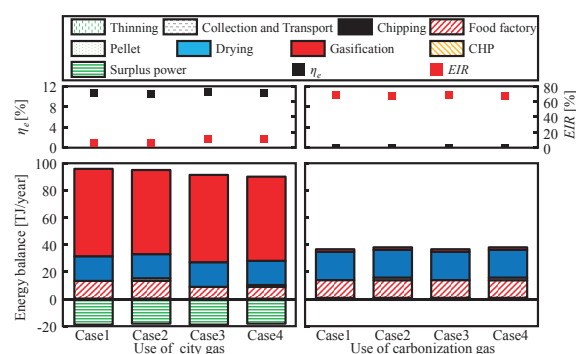


Fig. 12. Effect of various Case on energy balance, general energy conversion efficiency and energy independence ratio.

食物栽培施設の燃料として A 重油を用いることによりペレットを用いる場合と比較し、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(以下、EIR)が向上している。ペレットを用いることにより、発電用燃料として用いることができる間伐材の量が減少する。そのため、

発電量の低下に伴い、総合エネルギー変換効率および EIR が低い値を示したと考えられる。乾留ガス利用では EIR が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のエネルギー消費量を大きく低減することができたためであると考えられる。しかしながら、乾留ガスをガス化工程において全て使用し、余剰発電量が 0 であるため、総合エネルギー変換率は 0 となった。

7.3 乾留ガスの利用方法、食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法が二酸化炭素排出量に与える影響

各 Case における二酸化炭素排出量の内訳および年間二酸化炭素排出量を Fig. 13 に示す。乾留ガス利用では都市ガス利用と比較し、ガス化工程の二酸化炭素排出量が大きく低減している。乾留ガス利用ではガス化工程において使用する都市ガスの代替燃料として乾留ガスを用いるためである。一方、乾留ガス利用では乾燥工程の二酸化炭素排出量が都市ガス利用と比較し、増大している。乾留ガス利用では都市ガスの代替燃料としてガス化工程、乾燥工程の優先順位の下、乾留ガスを用いる。そのため、乾燥工程に使用できる乾留ガスがなかったと考えられる。加えてガス化工程において全ての乾留ガスを用いるため、発電を行うことができず、電力、排熱を利用することができなかつたためであると考えられる。しかしながら、年間二酸化炭素排出量は乾留ガス利用を行うことにより大きく低減することが可能である。

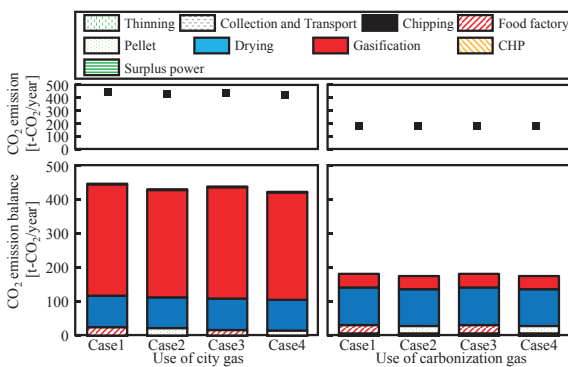


Fig. 13. Effect of various Case on CO₂ emission.

食物栽培施設にペレットを用いることにより年間二酸化炭素排出量が低減している。ペレットはカーボンニュートラルが適用されるため食物栽培施設の二酸化炭素を低減することができる一方、ペレットの生成に二酸化炭素を排出する。そのため、食物栽培施設およびペレット工場における二酸化炭素排出量の合計値には大きく差異はない。しかしながら、食物栽培施設の燃料としてペレットを用いることにより発電に利用できる間伐材の量が減少するため、ガス化工程の二酸化炭素排出量が低減した。また、ガスエンジンの排熱を用いることによりペレット工場における二酸化炭素排出量を低減できるため、年間二酸化炭素排出量の削減が可能である。

7.4 乾留ガスの利用方法、食物栽培施設の燃料およびガスエンジンの排熱の利用方法がコストに与える影響

各 Case におけるコストの内訳および年間コストを Fig. 14 に示す。乾留ガス利用を行うことによりガス化および、発電コストが低減する一方、売電による収益が 0 である。乾留ガスをガス化工程において使用する都市ガスの代替燃料として用いることにより燃料コストが削減したためであると考えられる。また、乾留ガスを都市ガスの代替燃料として用いるため、発電に使用できる乾留ガスがなくなり、発電コストおよび売電による収益が 0 となった。しかしながら、売電による収益が 0 となることと比較し、ガス化および発電コストにおける削減量が大きく、年間コストは低い値を示した。

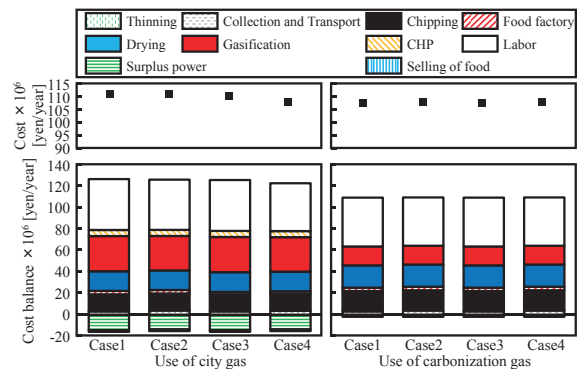


Fig. 14. Effect of various Case on cost.

都市ガス利用において Case4 の年間コストが低い値を示している。ガスエンジンの排熱を食物栽培施設に用いることによりペレットの消費量が低減し、間伐に要する人件コストが低減したためであると考えられる。

8. 結言

本報では過熱水蒸気式ガス化発電システムを日本における過疎地として豊富な森林資源を有する京都府笠置町に適用した際におけるエネルギー収支、二酸化炭素排出量およびコストについて評価を行った。本報において得られた知見を以下に示す。

- (1) 食物栽培施設の燃料として A 重油を用いることにより総合エネルギー変換効率および EIR が向上する一方、二酸化炭素排出量およびコストが増大する。
- (2) ガスエンジンの排熱を食物栽培施設に用いることにより総合エネルギー変換効率および EIR が向上し、二酸化炭素排出量およびコストの削減が可能である。
- (3) 乾留ガス利用を行うことにより EIR が向上し、二酸化炭素排出量およびコストの削減が可能である一方、余剰発電量が発生せず総合エネルギー変換効率は低下する。

参考文献

- 1) 川本克也, “廃棄物から考えるサステイナブル都市”, 環境工学総合シンポジウム講演論文集, **2008** (18), 13-19 (2008).
- 2) 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, **6**, 186-195 (2007).
- 3) 戸松豪, 藤川雅章, 山崎由大, 金子成彦, “小型ガスエンジンにおける低カロリーガスの燃焼特性”, 日本機械学会 第 11 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, **8** (6), 109-114 (2006).
- 4) 千田二郎, 伊藤拓仙, 斎藤篤史, 三宅論, 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, **31** (1), 29-34 (2011).
- 5) 伊藤拓仙, 有門巖, 矢作清, 三宅論, “過熱水蒸気式ごみ処理システムの開発”, OHM, **8**, 4-5 (2010).
- 6) 阪井拓哉, 山田悠馬, 岩見拓馬, 千田二郎, “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”, 同志社大学理工学研究報告, **54** (2), 10-18 (2013).
- 7) 山田悠馬, 阪井拓哉, 松村恵理子, 千田二郎, “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 (一地域規模, 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)”, 日本機械学会論文集, **80** (820), 1-15 (2014).
- 8) 統計局ホームページ 平成 17 年国勢調査, http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&classID=000001007609&cycleCode=0&requestSender=search, (accessed 2012.05).
- 9) 笠置町ホームページ, <http://www.town.kasagi.lg.jp/machi/gaiyo/kasagi.html>, (accessed 2012.05).
- 10) 総務省統計局ホームページ, <http://www.stat.go.jp/training/toshokan/faq01/faq01a03.htm>, (accessed 2012.05).
- 11) 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”, 21 (2010).
- 12) M. Ishikawa, “A logistic Model for Post-Consumer Waste Recycling”, Journal of Packaging Science & Technology, **5** (2), 119-130 (1996).
- 13) 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”, 廃棄物学会論文集, **18** (1), 37-48 (2007).
- 14) 研機株式会社ホームページ, <http://www.kenmori.biz/anything%20dryer%20index.htm>, (accessed 2012.11).
- 15) 大阪ガス株式会社ホームページ, デジタルカタログ, <http://ene.osakagas.co.jp/catalog/steam/steam-10a/>, (accessed 2012.11).
- 16) 株式会社フジテックスホームページ, 粉砕機.com, <http://www.fjtex.co.jp/kankyo/>, (accessed 2012.11).
- 17) 西邦機工株式会社ホームページ, <http://www.seiho-kiko.co.jp/products02.html>, (accessed 2012.11).
- 18) 株式会社地域計画建築研究所, “平成 22 年度低炭素地域づくり面的対策推進事業報告書”, 87-105 (2011).
- 19) 株式会社地域計画建築研究所, “平成 23 年度低炭素地域づくり面的対策推進事業報告書”, 6-24 (2012).
- 20) 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”, 7-40 (2010).
- 21) 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, **86** (12), 957-963 (2007).

- 22) 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, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/>, (accessed 2012.11).
- 23) 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, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/sant-eiho/kento/index.html>, (accessed 2012.11).
- 24) 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, http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf, (2012.11).
- 25) 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, <http://www.osakagas.co.jp/company/>, (accessed 2012.11).
- 26) 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, http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf, (accessed 2012.11).
- 27) 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, http://www.kantei.go.jp/jp/headline/renewable_energy.html, (accessed 2012.11).
- 28) 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, <http://ene.osakagas.co.jp/price/average-cost2011.html>, (accessed 2012.11).
- 29) 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, http://www1.kepco.co.jp/yakkan/high_3.html, (accessed 2012.11).