

都市域廃棄物からの バイオマス二段階原燃料化システム実証研究

Development of Two-Step Conversion System for Producing Fossil Fuel Alternatives from Biomass in Municipal Solid Waste



中 森 研 一	Kenichi Nakamori	①
富 山 茂 男	Shigeo Tomiyama	①
世 良 豊	Yutaka Sera	②
吉 良 典 子	Noriko Kira	③
林 俊 介	Syunsuke Hayashi	④
増 成 伸 介	Shinsuke Masunari	③
西 村 浩 人	Hiroto Nishimura	③

あ ら ま し

自治体による収集および運搬体制が確立された都市域廃棄物である一般廃棄物から、生ごみおよび紙ごみ等のバイオマスを分別して、同時糖化・発酵法でバイオエタノールを製造し、さらにその残渣からメタン発酵法でバイオガスを製造する二段階原燃料化システムを開発した。

5t規模の実証機および小型メタン発酵装置での試験結果にもとづき、以下の試算結果を得た。

- ・エネルギー回収率18.0%
- ・従来の一般廃棄物焼却処理に対する温室効果ガス削減率84%
- ・蒸気発電付帯の焼却処理に対する20年間の施設建設費および施設運営費削減費：約24億円

Abstract

We developed a two-step system for producing fossil fuel alternatives from municipal solid waste (MSW) for which a collection and transportation system is already established. Biomass such as paper waste and garbage is mechanically separated and first converted to ethanol using the simultaneous saccharification and fermentation (SSF) process. Biogas is then recovered from the ethanol residue by methane fermentation.

Based on the results of an experiment using a 5-ton-scale pilot plant and a small methane fermenter, the following values were achieved.

- ・Energy recovering efficiency: 18.0%
- ・Greenhouse gas reduction ratio: 84% compared to conventional incineration of MSW
- ・Construction and operation cost for 20 years in total: 2.4 billion yen in cost savings compared to incineration of MSW with a steam-electric generator

1. 緒 言

バイオエタノールは地球温暖化防止に寄与するガソリン代替燃料として国外で普及が進むが、食糧資源が主原料であるため、近年は、世界各国で非食糧であるセルロース系原料からバイオエタノールを製造する技術開発が進め

られている。国内では、稲わらや間伐材などを原料に、製造技術だけでなく収集・運搬インフラ技術も含めた、安定的で低コストのバイオエタノール製造技術の開発が進められてきた。

国内各地域の家庭などから排出される一般廃棄物は、確立されたインフラにより収集・運搬され、主に焼却処理されている。H25年度の環境省一般廃棄物処理実態調査によると、約3,480万tが焼却処理され、そのうちの63%にあたる約2,200万tが生ごみ(厨芥類)および紙・布類などのバイオマスである。一方、焼却施設のうち、発電によりエネルギー回収する施設数は27%、発電端効

① Hitz日立造船㈱ 環境事業本部 新事業・新製品推進室
 ② Hitz日立造船㈱ 環境事業本部 新事業・新製品推進室 博士(農学)
 ③ Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 環境エンジニアリング研究センター
 ④ Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 環境エンジニアリング研究センター 博士(工学)

率は約12%に過ぎず、熱回収も十分に行われていない状況にある。一般廃棄物中のバイオマスを原料としたバイオエタノール製造技術の開発は、国内における原料調達および収集・運搬の課題を解決するとともに、エネルギー回収を促進する一助となる。

当社は、国内外に多数の焼却施設を納入する中で、バイオマス原料としての一般廃棄物の優位性に着目し、廃棄物中の生ごみと紙ごみを原料とするバイオエタノール製造技術の開発に着手した。H23～24年度は、京都市、熊本大学および当社は産学公連携による実証試験を行い、一般廃棄物からのバイオマス回収技術ならびに回収したバイオマスを原料とするエタノール製造技術を確認し、エネルギー回収率およびCO₂排出削減において優位性を見出した。さらに、H25～26年度、環境省のCO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業に採択され、エタノール蒸留残渣のバイオガス製造技術も付加したエタノールとメタンの二段階発酵処理を提案し、低コスト型液体・気体燃料製造技術の実用化に向けた「都市域廃棄物からのバイオマス二段階原燃料化システムの実証研究」を行った。本稿は、H25～26年度の実証試験結果ならびにエネルギー回収率、CO₂排出量およびエタノール製造コストについての試算結果を報告する。

2. 実証機の概要

本実証機は、一回あたり5tの一般廃棄物を受入れ、**図1**に示す処理フローにより、一般廃棄物に含まれる生ごみと紙ごみからエタノールを製造し、さらにエタノール蒸留残渣からバイオガスを製造する。処理フローは五つの工程で構成され、各工程の設備概要とともに主要機器仕様様および写真をそれぞれ**表1～5**、**図2～6**に示す。

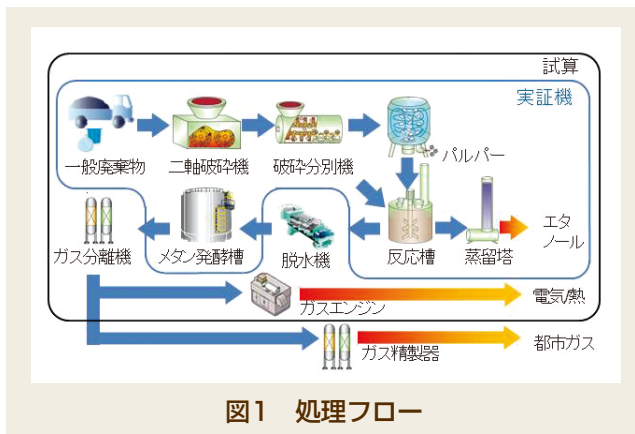


図1 処理フロー

2.1 受入・前処理工程 受入れた一般廃棄物を二軸破砕機で一定の大きさにせん断し、それを破砕分別機により、生ごみと湿った紙ごみが中心の重量物、乾いた紙ごみとプラスチックが中心の軽量物に機械分別する。分別後、それぞれのヤードに貯留する。

2.2 パルピング工程 受入・前処理工程で分別した軽量物を水と混合攪拌し、繊維状に離解した紙スラリーとプラスチックを分離した後、紙スラリーを脱水し

て紙ごみパルプとして回収する。分離したプラスチックなどの異物は脱水し、脱水液を回収したうえで排出する。

表1 受入・前処理設備 主要機器仕様

二軸破砕機	電動二軸破砕機 1 t/h
破砕ごみ供給コンベヤ	SS400 ベルトコンベヤ 1 t/h
破砕分別機	SUS304 スイングハンマー式 1 t/h
重量ごみ搬送コンベヤ	SS400 ベルトコンベヤ 0.63 t/h
軽量ごみ搬送コンベヤ	SS400 ベルトコンベヤ 0.56 t/h
重量ごみ投入コンベヤ	SS400 ベルトコンベヤ 1.6 t/h
重量ごみ振分コンベヤ	SS400 スクリューコンベヤ 1.9 t/h



図2 受入・前処理設備の写真

表2 パルピング設備 主要機器仕様

軽量ごみ投入コンベヤ	SS400 ベルトコンベヤ 2.1 t/h
パルパー	SUS304 5.5 m ³
パルプスラリータンク	SUS304 23 m ³ ジャケット式
パルピング用水タンク	SUS304 23 m ³ ジャケット式
パルプ脱水機	SUS304 シリンダープレス式
紙ごみパルプ振分コンベヤ	SS400 スクリューコンベヤ 4.5 t/h
異物排出機	SUS304 傾斜スクリューコンベヤ
異物脱水機	SUS304 スクリュー式脱水機



図3 パルピング設備の写真

2.3 糖化発酵工程 受入・前処理工程で分別した重量物とパルピング工程で回収した紙ごみパルプに酵素および酵母を加え、酵素による糖化と酵母による発酵を同一槽内で同時に反応させる同時糖化発酵法 (Simultaneous Saccharification and Fermentation、以下SSF法) により、発酵もろみに変換する。

表3 糖化発酵設備 主要機器仕様

反応槽	SUS304 鋼板製ジャケット式 10 m ³
蒸発塔	SUS304 鋼板製 充填物式
一次真空ポンプ	ドライポンプ 1.35 m ³ /h
エタノール一次蒸留タンク	SUS304 鋼板製



図4 糖化発酵設備の写真

2.4 蒸留工程 糖化発酵工程で得た発酵もろみを加熱してエタノールを気化させ、これを濃縮・精製する。

2.5 メタン発酵工程 一次蒸留で発生したエタノール蒸留残渣をメタン発酵菌群により発酵させ、バイオガスを得る。

表4 蒸留設備 主要機器仕様

蒸発缶	SUS304 鋼板製電気加熱式 100 L
連続蒸留塔	SUS304 鋼板製充填物式
エタノール製品タンク	SUS304 鋼板製 20 L/基
二次真空ポンプ	ドライポンプ 155 L/min

表5 メタン発酵装置 機器仕様

嫌気槽	PVC 間接加熱式 10 L
-----	----------------



図5 蒸留設備の写真



図6 メタン発酵装置の写真

3. 各原料の機械分別・回収

一般廃棄物中の生ごみと紙ごみを原料とするため、受入・前処理工程およびパルピング工程での分別・回収はエタノール製造において重要である。そこで、一般廃棄物の組成成分について各工程での移行割合を把握するため、表6に示す8種の組成成分の移行割合を調査した。

表6 組成成分 分類項目

生ごみ	生ごみ、たばこ吸殻、液体
紙ごみ	新聞、雑誌、紙製容器・包装、段ボール、紙屑
草木類	剪定枝、割箸、草花、落葉
布革類	衣類、サンダル、布革製品
プラスチック類	ごみ袋、プラスチック容器・包装、PET、ビニル
その他	金属、土砂、ビン、石、吸水シート、除湿剤
汚物	紙おむつ、衛生用品、ペット糞尿
対象外	内容不明、分類不能

3.1 受入・前処理工程 ヤードに受入れた一般廃棄物（以下、受入ごみ）を破碎した後、スイング式ブレードとスクリーンで構成される破碎分別機により重量物と軽量物に機械分別した。供した受入ごみは家庭由来で、表7に示す組成であった。計3回の調査の結果、機械分別による重量物、軽量物への分別割合は、湿重量でそれぞれ23.6～19.6%、71.4～76.4%であり、サンプルによるばらつきはなかった。

表7 受入ごみ 組成(湿重量%)

生ごみ	紙ごみ	草木類	布革類	プラ類	その他	汚物	対象外
19.9	41.7	1.0	5.2	17.5	1.4	10.9	2.4

受入ごみ同様に軽量物も組成を調査した。重量物は分類が困難なため、受入ごみと軽量物の差分にもとづき、生ごみ、紙ごみおよびその他の3種で算出した。また、水分は各工程で移行するため移行割合は乾重量で算出した。重量物、軽量物の組成割合はそれぞれ図7、8に、移行割合は図9に示す結果となり、生ごみの77%が重量物に、紙ごみの90%が軽量物に移行した。

重量物は糖化発酵工程の原料として使用し、軽量物はパルピング工程にて、さらに紙ごみを分離、回収する。

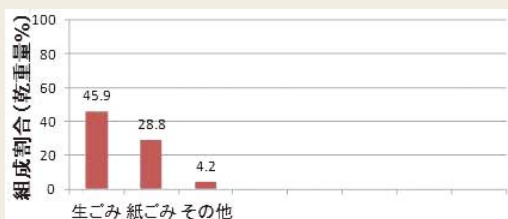


図7 重量物の組成割合

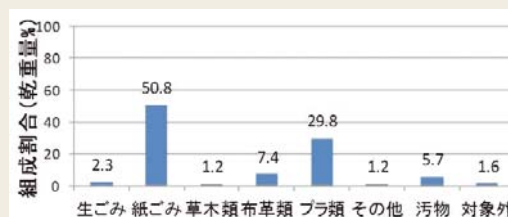


図8 軽量物の組成割合

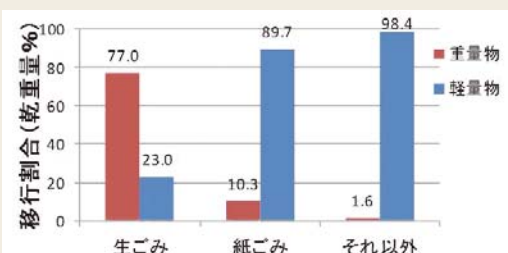


図9 受入・前処理工程での移行割合

3.2 パルピング工程 軽量物から紙ごみを分離し、紙ごみパルプとして回収した。離解に用いるパルピング用水は循環使用し、用水の使用量削減および紙ごみの回収率向上を図った。図10に示すフローでパルピ

ングを行った結果、表8に示す物質収支が得られ、受入ごみからの紙ごみ回収率は表9に示すとおり、約80%であった。また、受入・前処理工程で得られる重量物に含まれる紙ごみも合わせると乾燥重量で約90%の紙ごみを次の糖化発酵工程の原料として回収できた。

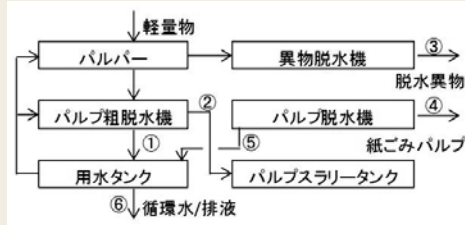


図10 パルピング工程のフロー

表8 パルピング工程 物質収支 注1,注2

	①	②	③	④	⑤	⑥
Run1	0.1	60.9	41.3	52.3	8.6	3.6
Run2	0.4	58.2	45.8	49.2	9.0	4.3

注1) 軽量物の乾物重量を100として収支を表す

注2) サンプル実測値を計上しているため収支に誤差が発生する

表9 受入ごみ中の紙ごみ回収率(乾重量%)

	紙ごみパルプ として回収	重量物 として回収	総回収率
Run1	80.0	10.2	90.2
Run2	83.5	6.1	89.6

4. 半回分式同時糖化発酵

4.1 半回分式同時糖化発酵 バイオマスからエタノールを製造するためには、①式に示すセルロースの糖化および②式に示す糖からのエタノール発酵の二つの反応が必要である。



①式の反応は、酸やアルカリを用いた化学処理や加圧熱水を用いた物理処理などが提案されている^{1), 4)}が、比較的性状が均一な原料に適用する技術であり、エタノール発酵阻害物質が生成⁵⁾する可能性も高い。それに対し、酵素糖化は、前述の処理法に比べて複合原料を処理でき、かつ発酵阻害物質を生成しない利点がある。しかし、現状では酵素が高価であることに加え、セルラーゼ活性が生成糖により阻害され、①式の反応が停滞してしまう競争阻害が課題として挙げられる。

SSF法は、この競争阻害を回避する方法であり、原料、酵素および酵母を同一槽内で同時に反応させ、①式で生成した糖が、酵母によって②式で直ちにエタノールへと変換されることで、競争阻害を抑制することができる⁶⁾。

一方、蒸留にかかるエネルギー量から、発酵もろみ中のエタノール濃度は4v/v%以上が必要^{6), 7)}で、そのための原料濃度はリグノセルロースでおよそ15%とされている

8)。この高濃度原料の攪拌に要する設備とエネルギーの増大⁹⁾、さらに反応時の温度調節での伝熱効率低下が懸念^{10), 11)}されており、解決策として、高濃度の糖化液を得る方法¹²⁾、原料の追い出し(fed-batch)^{8), 13)}、液化しやすい前処理¹⁴⁾などが検討されている。

また、酵素糖化後の反応液中には酵素が残存しており、基質に吸着された酵素活性の検討¹⁵⁾、酵素の再利用¹⁶⁾、酵素を表層提示した酵母の回収¹⁷⁾、による酵素の再利用も検討されている。

我々は原料の特性を踏まえた酵素糖化反応、高濃度原料の処理および酵素コスト削減を図るためSSF法を採用し、一般廃棄物から分離・回収したバイオマスからのエタノール製造に成功している¹⁸⁾。本実証試験では、このSSF法に半回分(半連続)の概念を取り入れた図11に示す半回分式同時糖化発酵法(以下、半回分式SSF法)を適用し、高濃度原料に対する攪拌動力の省力化に加え、酵素と酵母の再利用によるコスト削減を図った。なお、図11内に示す移送物中の残存酵素の活性は初期活性との比率で評価し、その比を酵素活性維持係数と定義した。

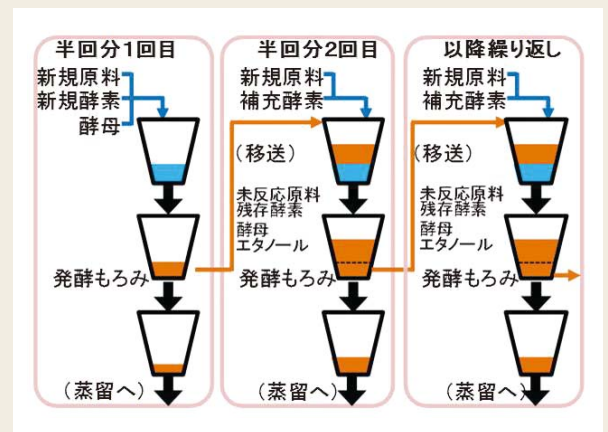


図11 半回分SSF法 概念図

4.2 半回分式SSF法の効果 各種ラボテストで決定した表10に示す条件で半回分式SSF反応を行い、本法の効果を確認した。

表10 半回分式SSF反応条件

反応量	5 t
半回分回数	3回
原料/原料濃度	紙ごみパルプ、重量物/約20%
セルラーゼ酵素/使用量	Novozymes 社製/50BHU ^{注3)} /g 原料
酵母	<i>Saccharomyces Cerevisiae</i> (KF7)
酵母使用量	0.2 g-FW/kg-反応量
酵素活性維持係数	0.5
pH	5 (4~6)
温度	38 °C
抗生剤/濃度	クロラムフェニコール (APOLLO Scientific Limited 製)/20 ppm
攪拌速度	10 rpm

注3) Biomass hydrolysis units

表11に示すとおり、各回分終了時のエタノール濃度は全ての回分において5v/v%以上を達成し、全回分における乾燥原料重量あたりの生成エタノール量は0.209L/kgであった。

本実証機では、原料の混合割合を最適化することで生成エタノールあたりの酵素使用量が削減され、図12に示すとおり、前身の1t規模の小型実証試験の結果と比較して、回分初回の酵素使用量を26.5%削減できた。さらに半回分式SSF法により、全回分での酵素使用量を39.1%削減することができた。

一方、酵母は回分初回の投入のみで回分三回目まで発酵反応が安定しており、バッチ式反応と比較すると酵母使用量を66.7%削減できた。

表11 各回分終了時のエタノール濃度(v/v%)

	1回目	2回目	3回目
エタノール濃度	5.58	5.24	5.00

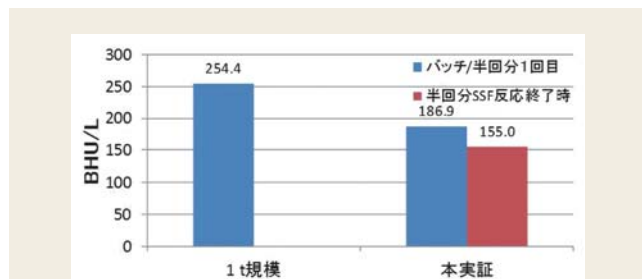


図12 SSF反応と半回分式SSF反応における生成エタノール量あたりの酵素使用量

5. エタノール蒸留残渣のメタン発酵

エタノールを回収した後のエタノール蒸留残渣には多くの脂質、タンパク質などの有機分が残存している。原燃料の製造およびエネルギー回収率の向上を図るため、表12に示す成分のエタノール蒸留残渣を資することで、安定的にメタン発酵を行う条件を検討し、バイオガス収率からメタン発酵原料としての適性を評価した。

表12 エタノール蒸留残渣 成分

水分	78.5 %
VTS	74.4 % _{dry}
COD _{cr}	180,000 mg/kg _{wet}
全硫黄	0.37 % _{dry}

本試験では図13に示すとおり、負荷上昇に伴い段階的にガス量が増加し、VTS(強熱減量物; Volatile Total Solids) 負荷7g-VTS/kg/dまでメタン発酵処理ができることを確認した。バイオガス中のメタン濃度は平均60%であった。pHは開始時より低下傾向にあったが約7.2で安定した。また、図14に示すとおり、有機酸と

NH₄⁺の蓄積はなく、TOC(全有機炭素; Total Organic Carbon) 濃度も3,000mg/L以下で推移し、安定した発酵が進行したことを確認した。乳酸は全期間において5mg/L以下であることを確認した。

一方、エタノール蒸留残渣に残存する抗生剤はメタン発酵により検出限界以下まで分解され、糖化発酵工程における抗生剤濃度ではメタン発酵に悪影響を及ぼさなかった。

全期間での負荷あたりのガス発生量は平均550mL/g-VTS、負荷3~5g-VTS/kg/dでは、エタノール蒸留残渣1tあたりのバイオガス収量が90m³_Nが得られ、エタノール蒸留残渣を原料としてメタンとしてエネルギーを回収することができた。

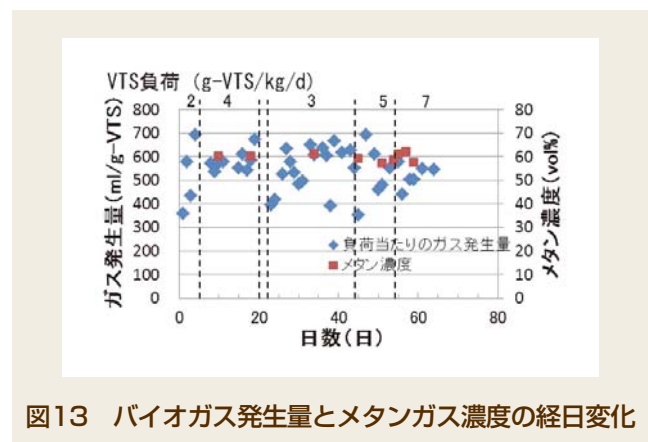


図13 バイオガス発生量とメタンガス濃度の経日変化

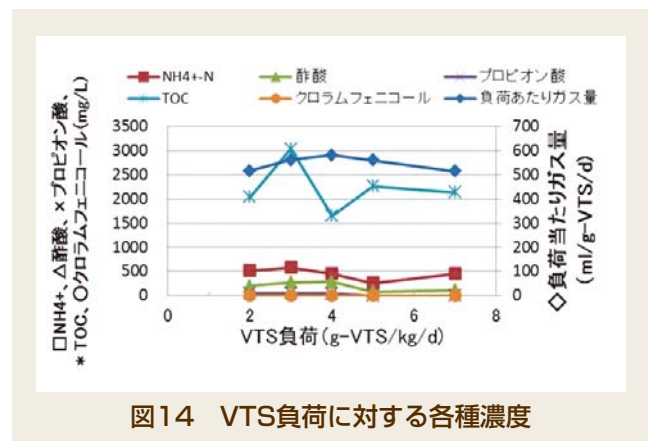


図14 VTS負荷に対する各種濃度

6. 全体システムの詳細検証

実証試験の各工程のフロー、物質収支、エタノール収率およびバイオガス収率などの結果にもとづき、本実証機全体の収支、実機を想定した物質収支、エネルギー収支、CO₂削減率について試算のうえ検証した。

6.1 実証機の全体フローおよび収支 各工程のフローおよび物質収支にもとづき、図15の全体フローで物質収支を算出した。試験ではメタン発酵の原料としてエタノール一次蒸留残渣のみを使用した。収支では、糖化発酵工程での原料比の最適化により発生する余剰重量物も含めて残渣と定義し、メタン発酵原料とした。

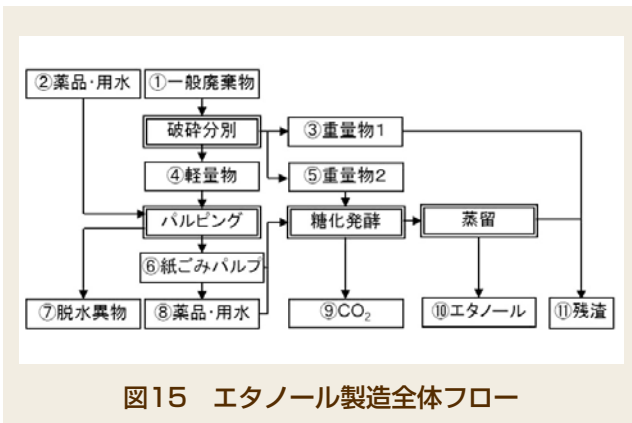


図15 エタノール製造全体フロー

収支の算出において、大半がプラスチック類である脱水異物の水分割合が時間経過に伴い低下するため測定結果に誤差が生じ、パルピング工程で約10%の収支誤差が発生した。また、ポンプやタンクのドレン、蒸留残渣は重量を計測できなかったため、蒸留残渣の重量を収支から算出し、表13に示す物質収支を得た。

表13 エタノール製造 物質収支(kg)

	①	②	③	④	⑤	⑥
湿基準	5,000	1,880	244	3,815	941	3,518
乾基準	2,938	0	122	2,456	361	1,207
	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	
湿基準	2,274	3,023	248	259	7,219	
乾基準	1,125	0	248	259	1,183	

本実証の収支では、一般廃棄物湿重量あたりのエタノール収率は60L/t-wet、糖化・発酵工程に投入する乾燥原料あたりのエタノール収率は209L/t-dryとなった。

6.2 実機想定 の物質収支およびエネルギー収支

実機に本技術を適用した場合の概略フローを図16に

示す。本フローでは一般廃棄物のエネルギーを最大限活用するフローを想定し、以下の条件とした。

- エタノール蒸留残渣および余剰重量物をメタン発酵処理してバイオガスを回収し、さらにメタン発酵残渣は、パルピング設備で発生する主にプラスチック類からなる残渣とともに焼却処理する。
- 焼却熱から蒸気を発生させ、プロセスに必要な熱として利用した後、余剰蒸気でタービン発電する。
- バイオガスはガスエンジン等による発電に使用し、余熱を回収してメタン発酵に活用する。
- 蒸気タービンの排熱で温水等を発生させ、エタノール製造およびメタン発酵に利活用する。

試算条件の根拠とした平成23年度の一般廃棄物処理実態調査では、国内の一般廃棄物焼却施設で処理された廃棄物量は約3,400万t、施設数は1,100、平均処理規模が150t/dで、処理規模50t/d以下の施設は全施設数の30%、50～100t/dが20%、100～150t/dが15%であった。今後、少子高齢化や人口減少に伴い一般廃棄物量が徐々に低下していくと予測され、また、現状の施設稼働率等を踏まえ、本試算では、一般廃棄物の処理量（規模）を100t/dとした。なお、一般廃棄物組成割合は京都市平均値を用いた（表14参照）

本フローにおける物質収支およびエネルギー収支の試算結果を表15に示す。表15において、⑭の余熱はメタン発酵に、⑰の余熱はエタノール製造用に消費する熱量である。また、⑳の消費電力は、エタノール製造、メタン発酵および焼却処理の全設備で必要な電力量を示す。

表14 試算に用いた一般廃棄物組成割合^{注4)}

厨芥類	紙ごみ	布・革類	草木類	プラ類	不燃物
30.4	36.6	6.7	5.5	16.2	4.6

注4) 平成24年度京都市環境政策局事業概要より本稿用に試算

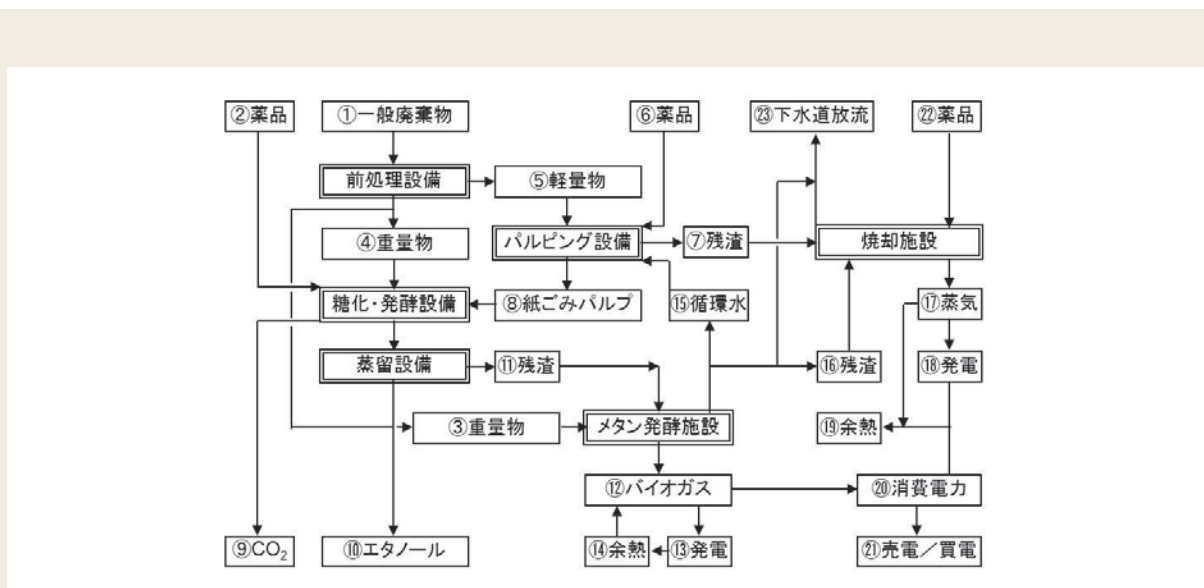


図16 実機に本技術を適用した場合の概略フロー

表15 実機物質収支
およびエネルギー収支の試算結果

項目	収支	低位発熱量	エネルギー
①一般廃棄物	100.0 t/d	9,915 kJ/kg	275.4 MWh
②薬品・用水	3.8 t/d	—	—
③重量物(メタン発酵)	11.0 t/d	2,192 kJ/kg	6.7 MWh
④重量物 (エタノール発酵)	22.2 t/d	2,192 kJ/kg	13.5 MWh
⑤軽量物	66.8 t/d	13,753 kJ/kg	255.2 MWh
⑥薬品・用水	14.9 t/d	—	—
⑦残渣 (パルピング設備)	24.6 t/d	23,052 kJ/kg	157.5 MWh
⑧紙ごみパルプ	109.2 t/d	3,220 kJ/kg	97.7 MWh
⑨CO ₂	5.6 t/d	—	—
⑩エタノール	4.5 t/d	26,709 kJ/kg	33.4 MWh
⑪残渣(蒸留設備)	124.7 t/d	2,246 kJ/kg	77.8 MWh
⑫バイオガス	11.0 km ³ _N /d	19,705 kJ/m ³ _N	60.2 MWh
⑬発電(メタン発酵)	—	—	24.0 MWh
⑭余熱(メタン発酵)	—	—	6.0 MWh
⑮循環水	54.2 t/d	—	—
⑯残渣(メタン発酵)	54.5 t/d	1,116 kJ/kg	16.9 MWh
⑰蒸気	224.2 t/d	2,991 kJ/kg	186.3 MWh
⑱発電(焼却)	—	—	18.7 MWh
⑲余熱(焼却)	—	—	33.3 MWh
⑳消費電力	—	—	24.7 MWh
㉑売電/買電	—	—	18.0 MWh
㉒薬品・用水(焼却)	225.6t/d	—	—
㉓下水道放流	85.2 t/d	—	—

6.3 エネルギー回収率 一般廃棄物の発電を伴う焼却処理(以下、Case1)、図16で示した一般廃棄物のエタノールメタン発酵+焼却処理(以下、Case2)について、年間32,000tの一般廃棄物を処理した場合の想定施設規模を表16に示し、本想定での入熱、出熱およびエネルギー回収率を表17に示す。なお、エネルギー回収率とは、入熱と出熱の比で、一般廃棄物のエネルギーのうち施設外部に供給できる割合である。

表16 試算で設定した一般廃棄物処理施設規模

項目	Case1	Case2
エタノール製造	—	100 t/d
メタン発酵	処理	—
	発電	1,000 kW
焼却	処理	50 t/d×2 炉
	発電	2,080 kW
		840 kW

エネルギー回収率はCase1の5.17%に対し、Case2は18.01%に向上したことから、本技術導入により一般廃棄物のエネルギーを効率的に回収し、電力とエタノールとしてエネルギーを外部供給できる試算となった。

6.4 CO₂削減率 一般廃棄物の発電を伴わない焼却処理をベースとして、前項各CaseのCO₂排出量を試算した結果、ベースに対し、Case1では一般廃棄物あたり175.2kg-CO₂/t、Case2ではさらに93.8kg-CO₂/tのCO₂を削減でき、CO₂排出量は140.3kg-CO₂/tであった。また、表18に示すとおり、Case2においてベースに対し80%以上のCO₂削減率を達成できる試算となった。

表17 エネルギー回収率の試算結果

項目	Case1	Case2	
入熱	一般廃棄物 t/年	32,000	
	kJ/kg	9,915	
	薬品 t/年	0	
	kJ/kg	17,942	
灯油	kL/年	72	
	kJ/L	43,500	
小計	MWh	89,003	
出熱	売電	MWh	4,603
	エタノール kL/年	0	
	kJ/L	0	
	小計	MWh	4,603
エネルギー回収率	5.17 %	18.01 %	

表18 各ケースのCO₂削減率

項目	単位	Case1	Case2
当該処理方式のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /t	419.928	460.509
回避されるCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /t	409.301	409.301
処理方式採用によるCO ₂ 増分量	kg-CO ₂ /t	10.627	51.208
エタノール生産量	L/t	0.000	57.650
エタノール原単位のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /L	0.000	0.244
比較対象としたCO ₂ 排出原単位	kg-CO ₂ /L	1.530	1.530
エタノールのCO ₂ 削減率	%	0.0	84.0
電力量	kWh/t	334.875	418.200
電力原単位のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /kWh	0.032	0.089
比較対象としたCO ₂ 排出原単位	kg-CO ₂ /kWh	0.555	0.555
電力のCO ₂ 削減率	%	94.2	84.0

7. 施設運営経費

表19に一般廃棄物処理量で年間32,000t、20年間における施設運営経費の試算結果を示す。

各Caseは、表16に示す施設規模で設備費を試算し、売電単価はFIT制度による単価設定とした。

エタノール販売単価は、A市における取引価格から140円/Lとした結果、Case1と比較してCase2で約24億円の

運営費が削減できる試算となった。

表19 施設運営経費

	単位	Case1	Case2
施設建設費	千円	6,750,000	9,527,500
補修費	千円	2,700,000	2,657,400
人件費	千円	2,520,000	2,700,000
場外処理費	千円	934,888	817,342
売電収入	千円	-923,810	-3,397,960
燃料購入費	千円	100,758	60,102
用水購入費	千円	193,679	548,771
焼却用薬品購入費	千円	478,232	1,014,065
前培養薬品購入費	千円	0	231,960
酵素購入費	千円	0	1,404,020
エタノール販売収入	千円	0	-5,165,860
合計	千円	12,753,747	10,397,340

8. 結 言

収集・運搬インフラが確立され、年間を通じて安定して発生する一般廃棄物に含まれるバイオマスは国内における有望なバイオマス原料である。

都市域で発生する一般廃棄物中の生ごみおよび紙ごみ等のバイオマスを分別して、同時糖化・発酵法でバイオエタノールを製造し、さらにその残渣からメタン発酵法でバイオガスを製造する二段階原燃料化システム実証試験を完遂した。従来の発電を伴う焼却処理と比較して、焼却処理にエタノール製造施設およびメタン発酵施設を組み合わせることにより、エネルギー回収率およびCO₂削減量において優位性を示した。

一般廃棄物からのエネルギー回収率向上と低炭素社会実現のための手段として本技術を提案し、早期実用化を目指す所存である。

謝 辞

本実証試験はH25～26年度、環境省CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の委託および補助を受け実施したものである。

試験を実施するにあたり、多大なる御協力をいただきました熊本大学、京都市ならびに京都環境事業協同組合に深謝いたします。

参考文献

- 1) Kim SB, Lee SJ. et al. :Pretreatment of rice straw with combined process using dilute sulfuric acid and aqueous ammonia, *Biotechnol Biofuels*, **2013**, 30;6 (1) :109.
- 2) Aita GA, Salvi DA. et al. :Enzyme hydrolysis and ethanol fermentation of dilute ammonia pretreated

energy cane, *Bioresour Technol*, **2011**, Mar;102 (6) :4444-8.

- 3) Chen C, Boldor D. et al. :Ethanol production from sorghum by a microwave-assisted dilute ammonia pretreatment, *Bioresour Technol*, **2012**, 110:190-7.
- 4) Lu J, Li X. et al. :Fed-batch semi-simultaneous saccharification and fermentation of reed pretreated with liquid hot water for bio-ethanol production using *Saccharomyces cerevisiae*, *Bioresour Technol*, **2013**, 144:539-47.
- 5) Parawira W, Tekere M. :Biotechnological strategies to overcome inhibitors in lignocellulose hydrolysates for ethanol production: review, *Crit Rev Biotechnol*, **2011**, 31 (1) :20-31.
- 6) Wingren A, Galbe M. et al. :Techno-economic evaluation of producing ethanol from softwood: comparison of SSF and SHF and identification of bottlenecks, *Biotechnol Prog*, **2003**, 19(4) :1109-17.
- 7) Fan Z, South C, Lyford K. et al. :Conversion of paper sludge to ethanol in a semicontinuous solids-fed reactor, *Bioprocess Biosyst Eng*, **2003**, 26 (2) :93-101.
- 8) Zhang M, Wang F. et al. :Ethanol production from high dry matter corncob using fed-batch simultaneous saccharification and fermentation after combined pretreatment, *Bioresour Technol*, **2010**, 101 (13) :4959-64.
- 9) Jørgensen H, Vibe-Pedersen J. et al. :liquefaction of lignocellulose at high-solids concentrations. Jørgensen H, Vibe-Pedersen J, Larsen J, Felby C, *Biotechnol Bioeng*, **2007**, ;96 (5) :862-70.
- 10) Varga E, Klinke HB. et al. :High solid simultaneous saccharification and fermentation of wet oxidized corn stover to ethanol., *Biotechnol Bioeng*, **2004**, ;88 (5) :567-74.
- 11) Georgieva TI, Hou X. et al. :Enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of high dry matter wet-exploded wheat straw at low enzyme loading, *Appl Biochem Biotechnol*, **2008**, 148 (1-3) :35-44.
- 12) Du J, Zhang F. et al. : Enzymatic liquefaction and saccharification of pretreated corn stover at high-solids concentrations in a horizontal rotating bioreactor, *Bioprocess Biosyst Eng*, **2014**, 37 (2) :173-81.
- 13) Maeda RN, Barcelos CA. et al. :Cellulase production by *Penicillium funiculosum* and its application in the hydrolysis of sugar cane bagasse for second generation ethanol production by fed batch operation, *J Biotechnol*, **2013**, 163 (1) :38-44.
- 14) Kim TH, Choi CH. et al. :Bioconversion of sawdust into ethanol using dilute sulfuric acid-assisted continuous twin screw-driven reactor pretreatment

- and fed-batch simultaneous saccharification and fermentation, *Bioresour Technol*, **2013**, 130:306-13.
- 15) Xue Y, Rusli J. et al. :Process evaluation of enzymatic hydrolysis with filtrate recycle for the production of high concentration sugars, *Appl Biochem Biotechnol*, **2012**, 166 (4) :839-55.
- 16) Eckard AD, Muthukumarappan K. et al. :Enzyme recycling in a simultaneous and separate saccharification and fermentation of corn stover: a comparison between the effect of polymeric micelles of surfactants and polypeptides., *Bioresour Technol*, **2013**, 132:202-9.
- 17) Matano Y, Hasunuma T. et al. :Cell recycle batch fermentation of high-solid lignocellulose using a recombinant cellulase-displaying yeast strain for high yield ethanol production in consolidated bioprocessing, *Bioresour Technol*, **2013**, 135:403-9.
- 18) 林俊介, 木田建次ほか:一般廃棄物からのエタノール製造技術の開発,都市清掃, **2012**, 65 (307) , 249-253

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 環境事業本部
新事業・新製品推進室
中森研一

Tel : 06-6569-0163 Fax : 06-6569-0197
e-mail : nakamori@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Environment Headquarters
Business & Product Promotion Department
Kenichi Nakamori
Tel : +81-6-6569-0163 Fax : +81-6-6569-0197
e-mail : nakamori@hitachizosen.co.jp



中 森 研 一



富 山 茂 男



世 良 豊



吉 良 典 子



林 俊 介



増 成 伸 介



西 村 浩 人