

# 食品廃棄物からの バイオエタノール化技術の開発

Development of technology of making bio-ethanol from food waste

日高 亮太\* Ryota HIDAKA  
技術開発研究所  
プラント商品開発室 シニアマネジャー

加藤也寸彦 Yasuhiko KATO  
環境ソリューション事業部  
計画技術部 シニアマネジャー

木内 崇文 Takafumi KIUCHI  
技術開発研究所  
プラント商品開発室

石橋 洋一 Yohichi ISHIBASHI  
事業開発センター  
バイオマス事業推進室 シニアマネジャー

スタシニー プラニートラッタナノン  
Suthasinee PRANEETRATTANANON  
技術開発研究所プラント商品開発室 マネジャー

羽島 康文 Yasufumi HAJIMA  
日鉄環境プラントソリューションズ(株)  
中部支社長

## 抄 録

当社は、地域で収集された食品廃棄物からエタノールを製造し、その地域の中でエネルギー利用していく地産地消・地域循環型事業の持続可能性を実証するため、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託を受け、2005年度から5年間の事業化実験に取り組んだ。ここでは本実験事業の概要、成果を紹介する。

## Abstract

In order to prove the sustainability of the proposed business model of ethanol production from regionally collected food wastes for local consumption as well as regional circulation of energy, we worked on a commercialization experiment from FY 2005 to FY 2009 under the commission of New Energy and Industrial Technology Development Organization(NEDO). In this paper the main experimental results are described.

## 1 緒言

食品廃棄物は、家庭から排出される家庭系一般廃棄物、商店などの事業者から排出される事業系一般廃棄物、食品工場などから排出される産業廃棄物などその種類は多様であり、分別が進んでいないため、リサイクル率は20%程度に留まっているのが現状である。しかしながら、これをバイオマス系原料としてとらえた場合、現状でも収集運搬のシステムができあがっており、その仕組みに少し工夫を加えるだけで、逆有償での原料調達が可能だと考えることができる点に大きなメリットがある。

食品廃棄物は廃棄物焼却施設に集まるが、エタノール製造プラントを隣接させて建設することで、エタノール製造に必要な熱や電気エネルギーの供給、エタノール製造時に発生する残渣の処理のう

で、非常に有効な組み合わせとすることができる。すなわち、廃棄物焼却施設には可燃ごみを焼却した際に発生する大量の熱があり、これを回収して発電を行うようなケースにおいて、低温の蒸気や安価な電



写真1 食品廃棄物エタノール化パイロットプラント  
Photo. 1 The ethanol pilot Plant from food waste

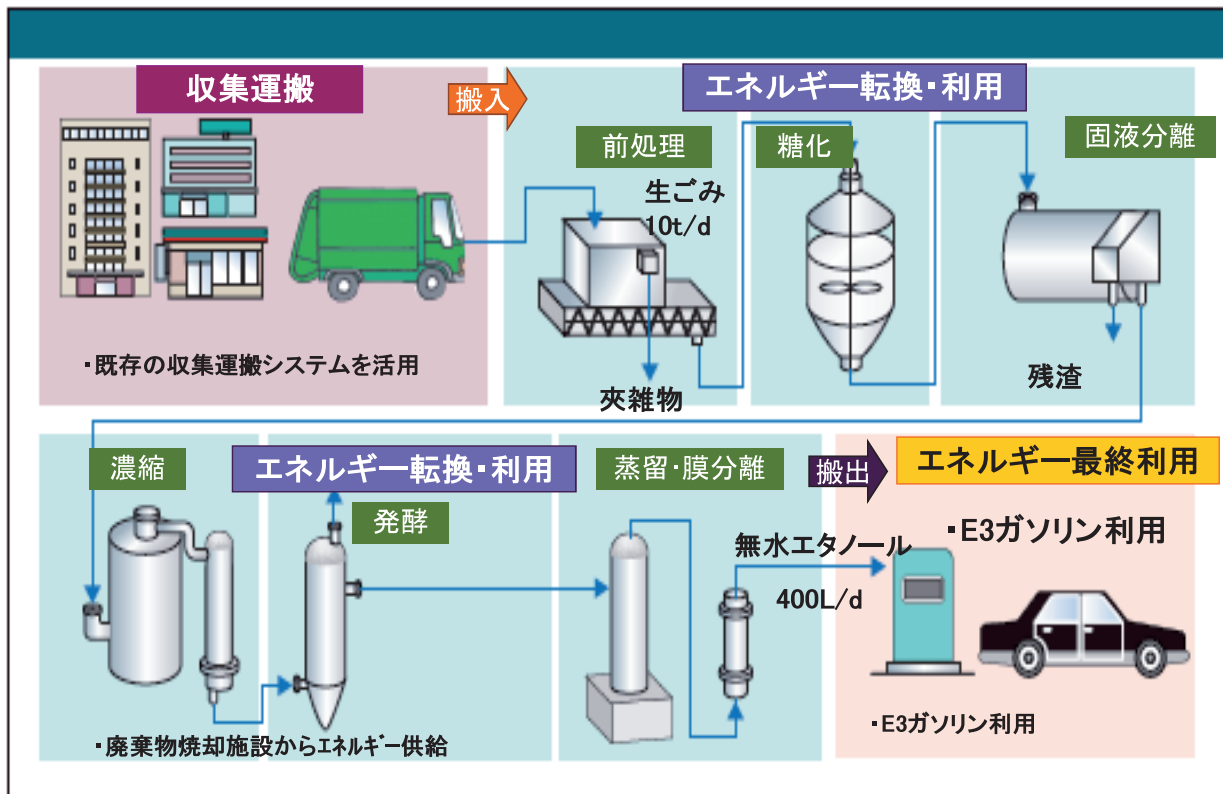


図1 実験システムの概要  
Fig.1 Outline of the experimental system

力などが十分エタノールプラントで利用可能である。さらに、エタノール化設備から排出される残渣類も焼却施設を使って処理でき、そこからの熱回収もまた可能である。

食品廃棄物のエタノール化実験事業は、まさにこのような大きな利点を生かした、バイオマスエネルギー利用の新しい取り組みであると言える。

## 2 実験概要

本実験事業は、NEDOが2005年度に公募した「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」の採択を受けた全国7箇所の実験のうちのひとつで、当社が北九州市、西原商事(北九州市内の事業系一般廃棄物収集運搬事業者)とともに一貫の実験推進にあたったものである。2006年度に実験設備の製作、建設を行い、2007年度から3年間の実証実験を実行した。

本実験事業では、食品廃棄物中に多く含まれるご飯やパンなどの炭水化物に注目し、この炭水化物を選択的に糖化、エタノール発酵を行い、食品廃棄物

から液体燃料としてのエタノールを産み出す新規のリサイクルシステムの確立を目指した。Fig. 1に実験の全体フローを示すが、収集運搬からエネルギー最終利用までの一連のシステムの技術、経済性、持続可能性等を実証、評価するのが実験の目的である。エネルギー化設備の規模としては、食品廃棄物10トン/日(夾雑物を含んで12トン/日)から、約400L/日の無水エタノール製造を目標とした。

実証すべき主たる課題を収集運搬、エネルギー転換・利用、エネルギー最終利用の別に以下のように設定した。

### (1) 収集運搬システム

食品廃棄物のリサイクルが進まない大きな理由のひとつは収集運搬にある。すなわち、①処理プロセスに悪影響を与えない完全な分別排出がなされにくいこと、②分別状態での収集運搬に手間とコストがかかることである。これらの課題を解決するため、本実験事業では以下のような工夫を導入してその効果を確認している。

#### 1) 食品廃棄物中の炭水化物のみ選択的に糖化し

たのち固液分離するプロセスを活用し、多少の夾雑物が混入していても処理可能なシステムとすることにより、排出者の生ごみ分別のための負担を軽減した。

- 2) 食品廃棄物とその他可燃物を1台の車両で同時運搬可能とするため2室分別収集車を開発し、分別収集運搬費用の上昇を防止した。

さらに今回収集する食品廃棄物は、デパートやスーパー、ホテル、コンビニといった大規模事業者から排出される事業系一般廃棄物を主体として計画したが、将来は小規模排出者からの生ごみ、特に量的に最も多い家庭系一般廃棄物の取り込みを目指すため、住民に分別排出へのインセンティブを与える取り組みを行政、地元環境団体の協力を得て実験的に行った。

すなわち、北九州市の環境パスポート事業(環境保全に役立つ市民活動を、地域通貨等のポイントバックにより支援するもの)との連携によるモデル商店街・近隣家庭からの分別排出奨励や、モデル小学校・病院の給食残渣の分別収集などを行った。

## (2) エネルギー転換・利用システム

食品廃棄物に限らずバイオマスのエネルギー化について従来から指摘されている課題は、一般に①エネルギー転換効率が低いこと、②エネルギー化プロセスにおいて外部エネルギーを必要とすること、また③エネルギーを取り出したあとの残渣の処理に費用を要することなどである。これらの課題を克服するため今回の実験事業では、以下のような特長を持ったシステムを採用し、その効果を確認した。

- 1) 食品廃棄物を原料とした糖化液が窒素分やビタミンなどの栄養を豊富に含むことを利用し、エタノール製造工程のコスト高の要因となる栄養補助剤の添加を不要とする。
- 2) エタノール発酵に凝集性酵母を使用することにより、高速エタノール生成、高収率発酵を実現し、効率のよいエタノール連続発酵の実現を目指した。さらに蒸気滅菌を行う必要をなくしてエネルギーコストの大幅低減を目指した。

また、今回エネルギー転換工程での最大の特長として、隣接する廃棄物焼却施設の活用をあげることができる。本施設は廃棄物をガス化溶解処理し、排熱を蒸気として回収して発電を行っている施設であ

るが、これにエタノール化設備を併設することで、以下のようなメリットの享受を狙った。

- 3) 廃棄物焼却施設の低圧蒸気を糖化、発酵、蒸留等のエタノール製造工程に利用、また焼却炉発電電力の供給を受けることでエタノール製造コストを低減する。
- 4) 食品廃棄物から糖分を除いた後の残渣を既存ごみ焼却炉で焼却処理し、電力や蒸気としてエネルギー回収することでバイオマス熱量のカスケード利用を行うとともに、残渣処理コストを低減する。

## (3) エネルギー最終利用システム

バイオマスエネルギーの活用においては、その用途の安定性、利用のしやすさもまた重要な要素である。エタノールの自動車用燃料としての利用には、単にガソリンに混合して利用する方法と、ガソリンのオクタン価向上材である ETBE の製造原料として使用する方法とがあるが、本実験事業では直接混合方式をとった。

- 1) ガソリンにエタノールを3%混合してE3ガソリンを製造し、北九州市の公用車、市内企業の業務用車に使用した。またエタノールは化石燃料代替として、北九州市内企業の産廃焼却炉の助燃材としても利用した。

## 3 実験結果と環境負荷評価

これまでに得られた実験結果について、エネルギー転換を中心に、以下項目別に述べる。

### (1) 食品廃棄物の組成

本実験事業で使用している食品廃棄物は、スーパーマーケット、デパート、コンビニ等の食品販売店舗や、ホテルやレストラン等の飲食店などから排出される事業系一般廃棄物を中心に、家庭からの生ごみ、病院・小学校の給食残渣を一部含んだものから構成されている。

これらの食品廃棄物の排出量加重平均組成を見ると、Fig. 2に示すように水分が約70%、糖分および糖に変わりうる炭水化物分が合計して約10%であった。コンビニからの排出物では売れ残り弁当などが多いためか糖分が20%以上と高く、逆に家庭ごみは

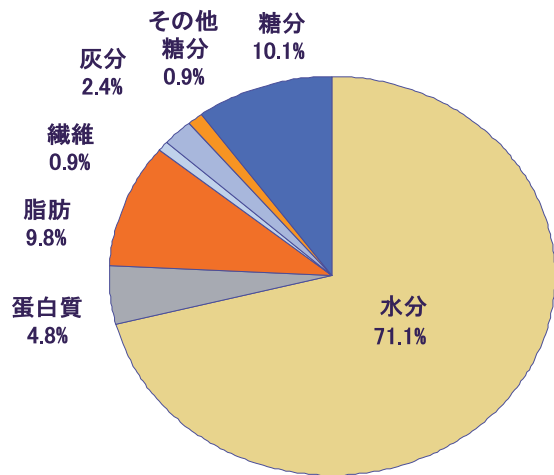


図2 食品廃棄物の成分  
Fig. 2 Component elements of the food waste

野菜くずなどが中心で平均よりやや低い結果であった。糖分とともに注目されるのが油分の比率の高さで、調理用植物油が中心と思われる油分が10%程度あり、このために食品廃棄物全体の保有熱量も想定より高い数字となった。

この結果を見ると、エネルギー原料たるバイオマスとしては価値が低く考えられがちな食品廃棄物が、含有水分を除いた乾物ベースで判断すれば非常に価値の高い資源だということが言える。

### (2) 凝集性酵母による連続発酵

本実験で使用しているエタノール発酵酵母は、熊本大学が保有している *Saccharomyces cerevisiae* KF-7 という耐酸性、耐塩性に優れ、かつ凝集性のある酵母である。このため、発酵は連続発酵で操作されている。従来のバッチ処理と比較し連続発酵処理は生産性向上と機器点数削減、操作性改善による運転人員の削減が期待される。一方、発酵液は連続的に発酵槽内に存在するため雑菌汚染対策、原料の

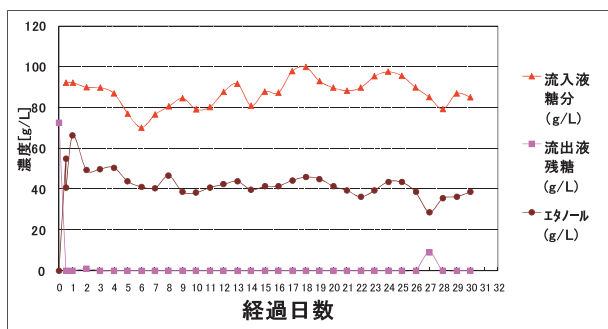


図3 30日連続運転結果  
Fig. 3 Result of the 30days continuous run

組成変動対策が必要となる。雑菌対策としては雑菌の滞留時間を細胞分裂時間以下にすること、温度、pHにより雑菌の繁殖を抑えること等により対策可能なめどを得た。原料の組成変動に対してはCO<sub>2</sub>発生が嫌気発酵が支配的であることから、発生CO<sub>2</sub>濃度による発酵槽内状況検知等で十分対応可能であることが分かった。これまでに条件をさまざまに変えた2週間程度の短期試験を34回行ったほか、約30日間の連続試験を2回行った。その連続試験結果の一部を Fig. 3 に示すが、全期間を通じて安定した発酵が保たれており、残糖もほとんどなく、非常に効率のよいエタノール生産が行われていることを示している。発酵リアクタへの入口糖濃度から見た理論エタノール生成量に対する発酵収率は、97~98%に達した。

### (3) 製品エタノールの品質

食品廃棄物中には様々な物質が入っており、蒸留の方法によっては有機不純物(硫酸ヒドロキシメチルアミン等)の発生や焦げ付き等が当初見られた。その後、蒸留運転条件を整えフーゼル油抜き出しにより、微量成分を抑制した。発酵によって製造されたエタノールを、蒸留、脱水工程を経て無水エタノールにまで純度を上げた品質データ例は Table 1 のとおりである。自動車用燃料に使用するエタノールに対して自動車技術会が提唱している JASO 規格に対しても、同表に示すようにすべての項目で基準をクリアした。

基準をクリアしたことを踏まえ、2009年2月より12月まで北九州市公用車等約20台で計約7000LのE3ガソリンの走行試験を実施し特に問題のないことを確認した。

表1 食品廃棄物由来のエタノール分析データ  
Table 1 Analyze data of the ethanol from food waste

項目	単位	JASO 規格	製品エタノール
外観		無色透明で懸濁物・浮遊物のないこと	無色透明
アルコール分	vol%	99.5以上	99.6
メタノール	g/L	4.0以下	2
水分	vol%	0.70以下	0.09
有機不純分	g/L	10以下	6.7
電気伝導度	μS/m	500以下	42
蒸発残分	mg/100mL	5.0以下	0.1
銅	mg/kg	0.10以下	0.05
酸度(酢酸として)	wt%	0.007以下	0.0002
pHe	—	7.0±1.0	6.3
硫黄分	mg/kg	10以下	3未満

(4) 糖化による油回収

本実験で初めて確認されたのが、糖化工程における油分の回収である。これは弁当や給食などの調理に用いられた植物油を主体とする油分が、糖化による炭水化物分の分解とともに分離し、回収されたものと考えられる。すなわち、食品廃棄物中の油分は、炭水化物などに付着して固形物として存在しており、容易には分離できないが、糖化工程において炭水化物は糖に分解され、油分は液中に遊離するため回収が可能となった。

本実証実験の結果から、食品廃棄物の保有するエネルギーの転換効率は Fig. 4 のように計算される。生ゴミ10トン中に含まれている980kgの脂肪分から660kgの油を回収可能となり、その結果、非常に高い効率でエネルギー回収が可能であることが分かる。

回収油の性状を見ると、Table 2 に示すように A 重油との比較において、動粘度と発熱量でやや劣るものの、硫黄分などは低く、燃料としての利用が十分可能なものと判断される。エタノール以外にエネルギー価値のある油分が得られることは、本プロセ

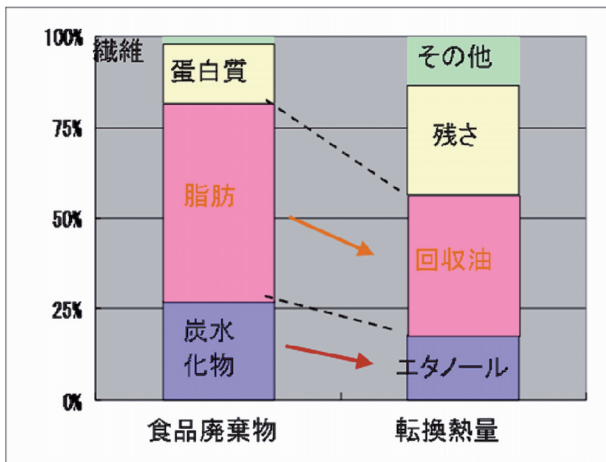


図4 エネルギー転換効率  
Fig. 4 Energy conversion efficiency

表2 回収油の分析結果  
Table 2 Analyze data of the recycled oil

	反応	引火点 ℃	動粘度 (50℃) Cst	流動点 ℃	残留 炭素分 Wt%	水分 Vol%	灰分 Wt%	硫黄分 Wt%	発熱量 kJ/kg
A 重油 1号	中性	60 以上	20 以下	5 以下	4 以下	0.3 以下	0.05 以下	0.5 以下	39,100
C 重油 1号	中性	70 以上	250 以下	—	—	0.5 以下	0.1 以下	3.5 以下	41,700
回収油	—	72.5	26.5	2.5	0.5	0.2 未満	0.01	0.01	36,469

スの効率性をさらに高める可能性のあるものと言える。

(5) エネルギー転換効率

個別プロセス確認実験、プラント全体の長期連続実験の結果に基づき、実用化規模での設備計画を行い、この計画におけるエネルギー転換効率、事業性等の評価を行った。ここでの想定条件は、対象人口45万人、廃棄物発生量410t/日、うちエタノール化対象の食品廃棄物63t/日(事業系一般廃棄物を対象)、廃棄物焼却施設540t/日に隣接してエタノール化設備を建設することとした。

この前提におけるエネルギー収支は Fig. 5 のように計算され、プロセスで必要とする蒸気を、隣接焼却施設で回収したバイオマス保有のエネルギーでまかなう計算をすると、エネルギー転換効率は約23%となる。また加えて回収油分を合計するとエネルギー転換効率は約75%と、さらに高くなる。

(6) 開発目標と実験結果総括

以上、2009年度までに行った実証実験において、当初の開発目標と実験結果を比較したものが Table 3 である。当初は生ごみ10tから400Lの無水エタノール製造を目標としていたが、約500Lまでの無

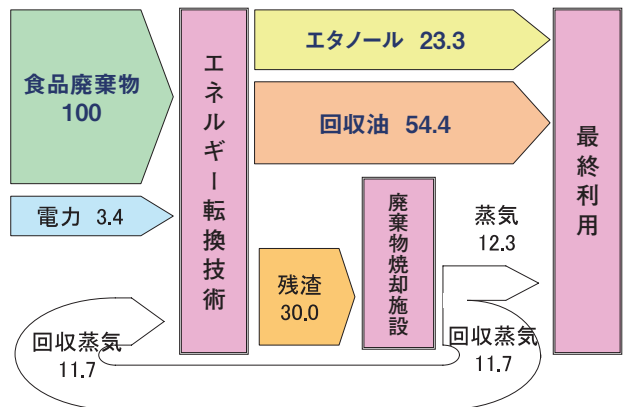


図5 エネルギーバランス  
Fig. 5 Energy balance

表3 開発目標と結果の比較  
Table 3 Comparison the results with the targets

項目	開発目標	試験結果
生ゴミ処理	10t/日	10t/日
発生エネルギー	無水エタノール 312kg/日 (400L/日)	379kg/日 (486L/日)
	回収油 (A 重油相当)	— 660kg
エネルギー 転換率	エタノールのみ	15%以上 23%
	回収油込み	— 75%

水エタノール製造が可能となった。糖分が生ごみ中に約10%含まれること、糖からエタノールへの変換は重量ベースで約半分であること、エタノールの比重が約0.8であることを考慮すると理論的には625Lの無水エタノールが製造できることになるが、歩留まり約80%で生ごみからエタノールを製造する技術を構築したことになる。ロス分としては残渣とともに外部に出ていく糖、雑菌に消費されてしまう糖等があるが、設備及び運転の改善により Table 3 の開発目標はすべてクリアできた。

また、回収油については当初は回収できると想定していなかったが660kgものA重油相当の油が回収できるため、その用途によっては有効なエネルギー源となりうる。

(7) 環境負荷評価

廃棄物焼却施設併設型エタノール化プラントの環境負荷評価を行った<sup>1)</sup>。評価は人口約45万人、可住地面積56km<sup>2</sup>の都市をモデルとした。エタノール化の対象によるケース分け、およびその他の条件を Table 4 に示す。CO<sub>2</sub>排出量によって評価を行っ

表4 環境負荷の評価ケース  
Table 4 Cases evaluated the environmental impact

ケース	区分	ごみ区分	収集頻度	排出量
CASE0 (従来)	家庭系	可燃ごみ	週3回	125,000t/Y
	事業系	可燃ごみ	週3回	43,000t/Y
CASE1 事業系生ごみのみ分別収集しエタノール化	家庭系	可燃ごみ	週3回	125,000t/Y
	事業系	可燃ごみ 生ごみ	週3回 週2回	23,000t/Y 20,000t/Y
CASE2 事業系、家庭系ともに生ごみを分別収集しエタノール化	家庭系	可燃ごみ 生ごみ	週3回 週2回	86,000t/Y 39,000t/Y
	事業系	可燃ごみ 生ごみ	週3回 週2回	23,000t/Y 20,000t/Y

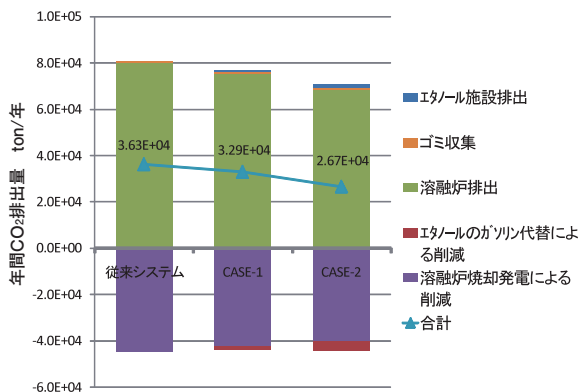


図6 環境負荷の結果  
Fig. 6 Results of the environmental impact

た。その結果を Fig. 6 に示す。

CASE 0 から CASE 2 にかけて収集回収による走行距離が伸びているが、環境負荷全体としての影響は非常に小さいことがわかる。エタノール化施設はガソリン代替による環境負荷削減効果は小さいものの、溶融炉での処理量を減少させることができ、その点において大きな削減効果があるといえる。CO<sub>2</sub>排出量においては CASE 0 に対して CASE 1 は9.2%の削減、CASE 2 では26.5%の削減となった。これは、それぞれ、年間にガソリン150KL、420KL 分の CO<sub>2</sub>排出量を削減することになる。

4 結言

以上、廃棄物焼却施設と併設した場合の食品廃棄物からエタノールを製造するプロセスの実験結果と環境負荷評価について述べてきた。これまでに技術面の課題はすべてクリアし、エンジニアリング面でも実用規模での確認ができ、地域で収集された食品廃棄物からエタノールを製造する地産地消、地域循環型事業の持続可能性を実証できたと考える。

食品廃棄物からエタノールを製造する技術開発と関連して、当社では従来酵母と比べより広範囲な温度領域でエタノール発酵効率のよい独自酵母 E-NSE 3 を発見し所有している。Fig. 7 は温度変化に対するエタノール発酵効率をプロットしている。従来酵母と比べ広範囲で活性のある酵母であり、運転制御が容易になると期待できる。また、エタノール発酵での第二世代といわれるセルロースの発酵には糖化同時発酵 (SSF) が必要であり、比較的高温領域でも活性を維持できる独自酵母は有望な酵母であ

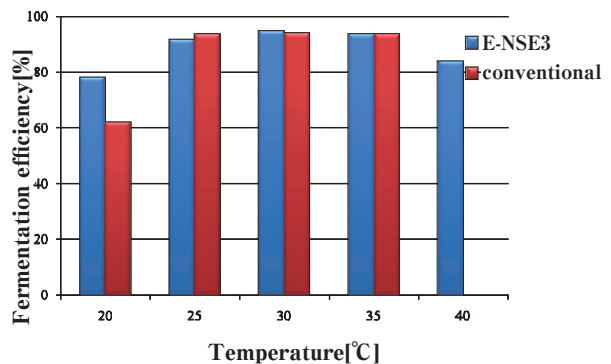


図7 エタノール発酵効率への温度の影響  
Fig. 7 Effects temperature on ethanol fermentation efficiency

る。

さて、食品廃棄物からエタノールを製造するシステムの普及のために今後の最大の課題は、食品廃棄物の収集(入口)と製造したエタノールの利用(出口)の問題である。言うまでもなく食品廃棄物の分別収集には自治体等、行政の仕組みの変革が必要である。即ち、分別収集のためには自治体の負担増となるが、食品廃棄物という資源の有効活用に向け、行政の取り組み強化を求めたい。また食品廃棄物を排出する住民や企業の積極的な協力が必要である。またエタノールの利用に関しても、行政主導の優遇政策や石油業界等の積極的な支援が不可欠である。

2002年に策定された「バイオマスニッポン総合戦略」(その後2006年に見直し)<sup>2)</sup>によると、わが国における食品廃棄物は全国で約2,000万トン/年発生、そのうち80%が未利用であるとされている。一方同報告の中で、中長期的な観点から国産バイオ燃料として、2030年頃にはエタノール600万 kL/年、バイオディーゼル10~20万 kL/年が生産可能と試算されているが、この中には食品廃棄物由来のエタノールは想定されていない。全国で発生する食品廃棄物をすべてエタノール化することができたと仮定するならば、600万 kL/年の1割以上を作り出すことができることから、本システムの普及が大いに期待される。

#### 参考文献

- 1) 永田勝也ほか LCAにおけるインパクトアセスメント手法の開発(その2) (社)日本機械学会第5回環境工学総合シンポジウム'95講演論文集 (1995) 155-158
- 2) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議, 平成19年2月 [http://www.maff.go.jp/j/biomass/b\\_energy/pdf/kakudai01.pdf](http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_energy/pdf/kakudai01.pdf)