



バイオエタノール化技術

新日鉄住金エンジニアリング株式会社
ソリューション共創センター バイオマス事業推進部
古賀 吏、木内 崇文、石橋 洋一

1. はじめに

バイオエタノールは、トウモロコシやサトウキビ等のバイオマスから製造されるエタノールであり、原料のバイオマスが再生可能であること、また大気中の二酸化炭素を吸収して成長することから、燃焼利用しても大気中の二酸化炭素を増やさないカーボンニュートラルなエネルギー源として注目されている。バイオエタノールは、そのままの状態ではガソリンと混合して自動車用燃料として利用することができるため、地球温暖化防止や持続可能エネルギーへの転換等を目的に、世界では 10%エタノール混合ガソリン (E10) あるいは 20%エタノール混合ガソリン (E20) 等が普及し、日本でも 3%エタノール混合ガソリン (E3) が認められている。世界のバイオエタノール導入量は、2018 年現在 1 億 kL/年超りで、その 85%は米国とブラジルで生産されている。米国でのバイオエタノール生産量は約 6,000 万 kL/年であり、日本のガソリン消費量約 5,100 万 kL/年²⁾とほぼ同等で、世界においてバイオエタノールは一大産業として確立している。

現在稼動しているバイオエタノール製造設備のほとんどは、トウモロコシやサトウキビなどの可食バイオマスを原料とした第一世代技術によるものであるが、可食バイオマスのバイオ燃料への使用が食糧価格の高騰の原因となるとの議論もあり、廃棄物系バイオマスを活用したバイオエタノール製造技術や農業残渣、資源作物などの非可食系バイオマスを原料とした第二世代技術のセルロース系バイオエタノール製造技術の導入が期待されている。

当社はこれまでに、様々な非可食原料のエタノール化技術開発に取り組んでいる。本報では、「当社のバイオエタノール製造技術への取り組み」の全体概要、及び当社のエタノール化技術の中から「食品廃棄物（生ごみ）を原料としたバイオエタノール製造技術」と、現在当社がもっとも注力している草本系バイオマス（サトウキビバガス等）を原料とした「セルロース系エタノール製造技術」を紹介する。

2. 当社のバイオエタノール製造技術への取り組み

当社はこれまでに、廃棄物系及びセルロース系バイオマスを原料としたバイオエタノール製造技術開発に取り組んできている。表 2-1 に当社のバイオエタノール技術開発への取り組みの経緯について示す。

最初に取り組んだのは食品廃棄物（生ごみ）のエタノール化技術開発である。当社の環境ソリューション事業（廃棄物設備事業）の一環として、廃棄物焼却設備に食品廃棄物エ



タノール化設備を隣接させて建設することで、エタノールだけでなく蒸気・電気も含めたエネルギーの有効利用・高効率製造が可能なるシステムの開発を実施した。その後、同じく廃棄物であるみかんジュース工場の搾汁残渣を原料としたエタノール化設備開発に取り組み、国内のみかんジュース工場にエタノール製造設備を建設している。この食品廃棄物・みかん搾汁残渣のエタノール化は、原料中の糖分・でんぷん分をエタノール化するものであり、技術としては各原料独自の課題はあるが、トウモロコシやサトウキビを原料とする従来の第一世代技術に類似するものである。

2009 年度から NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業」への参画を皮切りに、セルロース系バイオマスからのエタノール製造技術開発に取り組んでいる。木質や草本などのセルロース系バイオマスからのエタノール製造プロセスでは、原料中のセルロース分、ヘミセルロース分がエタノールに変換されるが、複雑な組成構造をしているため薬剤加熱処理が必要であるのと、またセルロースが結晶を形成しているためセルロースの分解（糖化）に多量の酵素が必要である等の技術課題があり、実用化へ向けた世界的な開発競争が展開されている。当初は、原料に木質系バイオマスを用いたプロセス開発を実施していたが、当社ビジネスエリアにおける市場調査により、事業対象地域をエタノール普及政策があるフィリピン、また原料対象をフィリピンで賦存量が多いサトウキビバガス等の草本系バイオマスに絞り、現在、技術開発・事業化検討を実施している。

以下、当社エタノール化技術の中から「食品廃棄物エタノール化技術」と草本系バイオマスを原料とした「セルロース系バイオマスエタノール化技術」について紹介する。

表 2-1 エタノール技術開発への取り組み経緯

原料		実証機、商業機規模	2005	~	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
第一世代	食品廃棄物	 400 L/日	技術開発 実証試験										
	みかん残渣	 5,000 L/日	技術開発 運転試験										
第二世代	木質系バイオマス	 250 L/日	研究開発										
	草本系バイオマス	 300 L/日	実証試験										
												商業化	

3. 食品廃棄物エタノール化技術

食品廃棄物エタノール化技術は、NEDO 「バイオマスエネルギー地域システム化実験事

業」で確立したもので、2005年に事業を開始し、2006年度に実証設備の製作・建設、2007年度から2009年度の3年間で実証実験を実行した。本技術は、食品廃棄物中に多く含まれる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し、最初から存在する糖分と合わせて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製造するものである。図3-1にNEDO事業で実行した全体フローを示す。廃棄物の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、社会定着性等を実証、評価するのが実験事業の目的である。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。以下、実験事業の結果を紹介する。

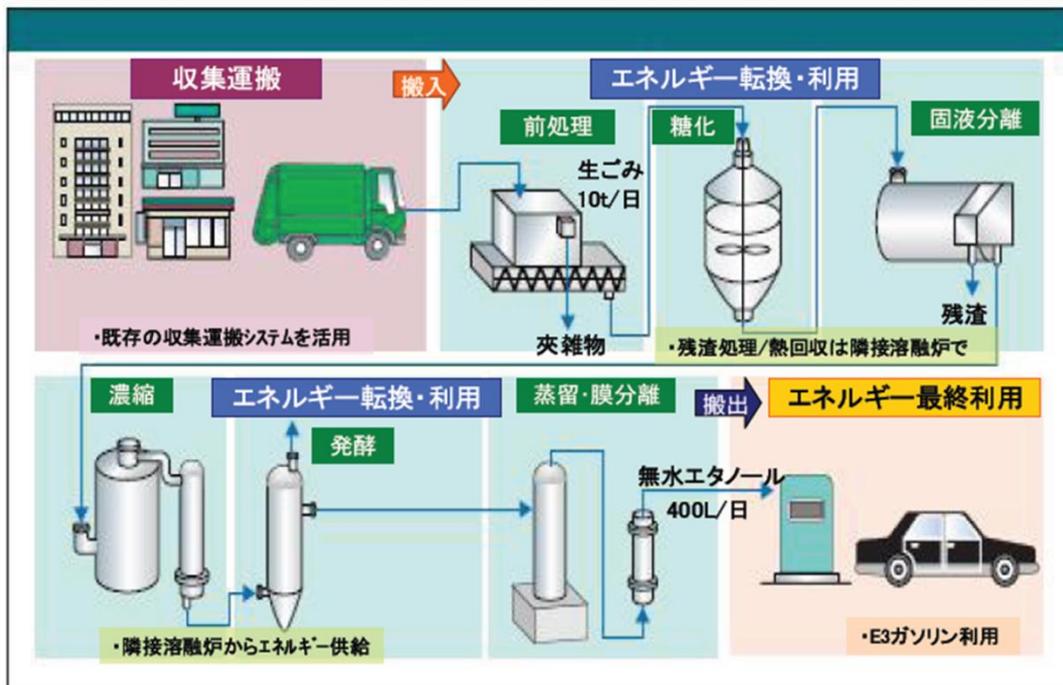


図 3-1 食品廃棄物エタノール化実証試験全体フロー

3-1. 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、図3-2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。

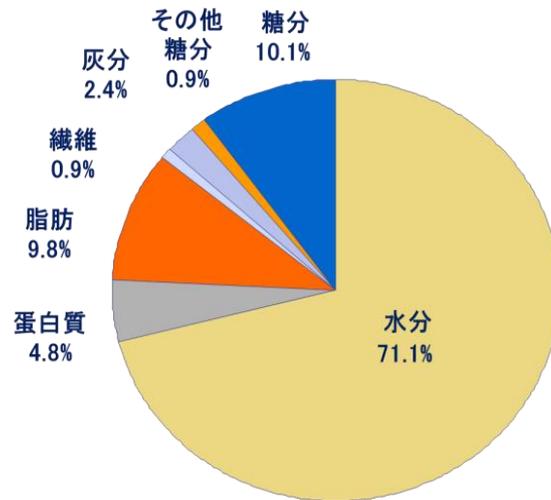


図 3-2 食品廃棄物の組成

3-2. 発酵技術（連続発酵、独自酵母）

本実験では、発酵に連続発酵プロセスを採用した。連続発酵は従来のバッチ処理と比較し、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等により対策可能である。原料の組成変動に対しては発生 CO₂ 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。実証試験において、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。その結果、残糖が無く高効率で安定的なエタノール生産ができることを確認している。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。

また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-NSE3 を発見し所有している。E-NSE3 は、広い温度範囲（30~40℃）で活性のある酵母であり、従来酵母と比較して運転制御が容易になると期待できる。

3-3. 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結果、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 規格をクリアし、2009 年 2 月より 12 月まで北九州市公用車等約 20 台で計約 7,000L 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。

3-4. 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図 3-3 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。回収油の性状は、A 重油と比較すると、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、本プロセスの効率性をさらに高める可能性のあるものと言える。

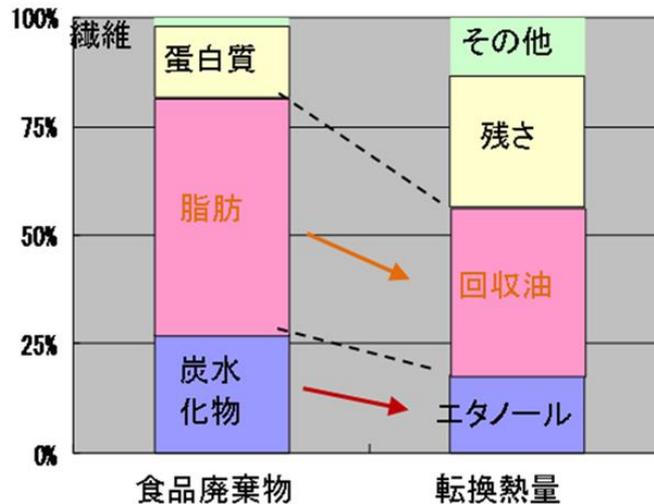


図 3-3 食品廃棄物エネルギー転換

3-5. 実証実験結果

開発目標と実験結果の比較を表 3-1 に示す。実証試験では、開発項目全てに対して目標をクリアした。エタノール収率について、目標は生ごみ 10 トン から 400L であったが、実験では約 500L の無水エタノールを製造した。これは原料から計算される理論収率の約 80%であり、雑菌や固液分離でのロスがある中で良い結果と評価している。

表 3-1 食品廃棄物エタノール化開発目標と実験結果

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%

3-6. 商業機を想定したエネルギー転換効率

実証試験結果を用いて、食品廃棄物エタノール化設備を廃棄物焼却施設に併設した場合のエネルギー有効利用の可能性について検討を行った。食品廃棄物は水分が多く燃えにくいため分別してエタノール化する一方で、焼却施設は水分が多い食品廃棄物が除去されるため高効率な焼却処理が可能となる。またエタノールから発生する残渣を焼却施設で処分し、残渣焼却により発生する蒸気をエタノールプロセスの所内蒸気として使用するシステムとして計算を行った。図 3-4 にエネルギーフロー・転換効率の検討結果を示す。バイオマスからエタノールへのエネルギー転換効率は約 23%であり、回収油分のエネルギーも合計するとエネルギー転換効率は約 75%となった。また、エタノール設備に必要な蒸気は、エタノール残渣のエネルギーでまかなえることが分かる。

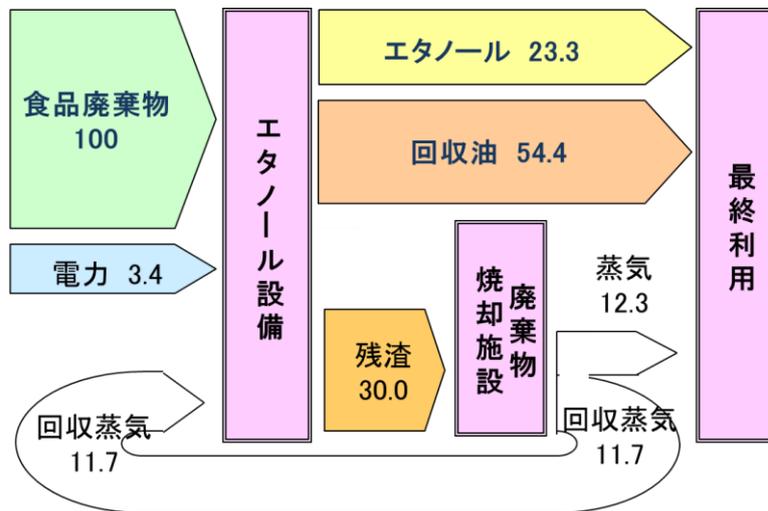


図 3-4 食品廃棄物エタノール化システムのエネルギーフロー試算

4. セルロース系エタノール化技術

4-1. セルロース系エタノール原料

当社はセルロース系エタノールの事業化対象地域として、エタノール導入政策があり、

バイオマス賦存量が多いフィリピンを第一候補と考えている。フィリピンにおけるセルロース系エタノールの原料としては、フィリピンの主要産業である製糖工場で発生するサトウキビバガスやサトウキビ収穫時に除去され農地に放置されている茎や葉（サトウキビ農地残渣）が挙げられる。また、近年バイオマス発電等の燃料や飼料向けに、フィリピンで試験栽培がスタートしている資源作物も活用できる原料として考えられる。当社では、フィリピンにおいて、現地で入手可能な草本系バイオマス（サトウキビバガス等）を用いた実証試験を実施している。

4-2. セルロース系エタノール製造プロセス

セルロース系エタノール製造プロセスは、主にバイオマスの破碎・洗浄を行う①原料処理工程、セルロース系バイオマスを糖化しやすいように薬品・加熱処理する②前処理工程、前処理したバイオマスを酵素により糖化する③糖化工程、糖を酵母を用いてエタノールに転換する④発酵工程、低エタノール濃度の発酵液からエタノールを濃縮・脱水する⑤蒸留・脱水工程の5つの工程から構成される。図4-1にエタノールプロセスフローを示す。

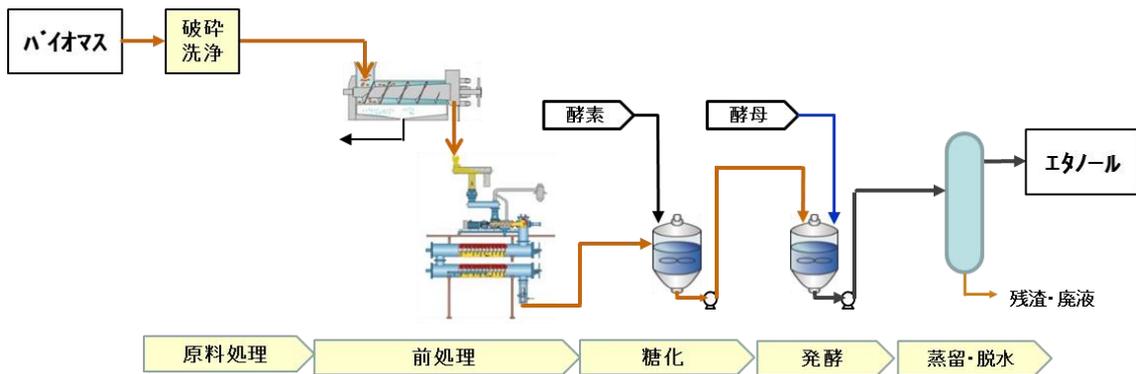


図 4-1 セルロース系エタノールプロセスフロー

①原料処理工程について、サトウキビバガスは製糖工場から排出される際にすでに細かい繊維状になっており、エタノール原料として破碎は不要である。一方、その他の農地から収集・収穫するバイオマスは葉や茎が残った状態で運ばれてくるため、エタノール設備にて細かく破碎する必要がある。また、バイオマスは屋外での保管や、農地からの収集により、砂や石等の夾雑物が混入している場合がある。そのため、バガスも含め細かく破碎されたバイオマスは一旦洗浄機を通り夾雑物を除去する。

②前処理工程について、当社プロセスでは原料として前記4-1に示すサトウキビバガス等の草本系バイオマスを利用しているため、前処理工程では草本系バイオマスに向く希硫酸を用いた蒸煮処理を採用している。本工程で処理強度（薬品濃度、温度）を高めると後工程の糖化が容易になるが、バイオマスそのものが分解、揮発し少なくなる課題がある。当社では、原料残存率が高く、糖化率も確保できる対象原料特有の条件を見出している。



③糖化工程について、本工程は前処理されたバイオマスに酵素（セルラーゼ）を添加して、バイオマス中のセルロース、ヘミセルロースを糖（グルコース、キシロース）に転換するものである。セルロース系エタノール製造コストの中で酵素費用が多くを占めており、添加する酵素量をいかに削減しつつ糖収量及びエタノール収量を確保するか大きな課題であり、当社は前処理条件の最適化により酵素量の削減に成功している。

④発酵工程は、前工程で生成された糖をエタノール発酵酵母でエタノールに転換する工程である。セルロース系バイオマス由来の糖にはキシロースが含まれ、一般的な酵母ではキシロースが発酵できないが、当社ではグルコースとともにキシロースも同時に発酵できる高性能な改良酵母を外部の酵母開発機関から導入して使用している。

⑤蒸留・脱水工程は、発酵工程で生成したエタノール発酵液のエタノール濃度は低く、そのままではエタノールを燃料としては利用が出来ないため、本工程において燃料用エタノールの基準となるエタノール濃度 99.5%以上まで濃縮・脱水を行う。

4-3. フィリピンにおけるセルロース系エタノール製造技術実証試験

当社は、2015 年度から公益財団法人地球環境センターが実施する環境省補助事業「二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（途上国向け低炭素技術イノベーション創出事業）」に、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター（JIRCAS）と共同で参加し、フィリピンにおけるセルロース系エタノール製造技術実証試験を実施した。以下に事業概要を示す。

<環境省補助事業概要>

- ・ 事業名：未利用バイオマスを活用したエタノール製造システムの構築
- ・ 実施期間：2015 年度～2017 年度（3 年間）
- ・ 目的： 低利用に留まる東南アジア地区におけるセルロース系バイオマスを原料としてバイオエタノールを製造し、ガソリン代替とすることで CO2 削減する技術の確立を目指す。具体的には、フィリピンに多く賦存するサトウキビのバガス等を対象原料とし、東南アジア地域で収集可能なバイオマス量において商業的に成立するセルロース系エタノール製造システムの構築を目指す。
- ・ 事業内容：
 - ① 現地原料に適したエタノール製造技術のリノベーション
 - ② セルロース系エタノール製造技術実証試験
目標：バイオマス 1 トン（乾燥重量）からエタノール 250 L 以上製造
（エタノール収率 250 L/dry-ton-biomass）
 - ③ 農地残渣の土壌肥沃度への影響及びエタノール残渣・廃液の肥料効果の実証試験

本事業において、フィリピンにセルロース系エタノール製造実証設備を建設した。表 4-1 に実証設備の仕様、図 4-2 に実証設備の写真を示す。実証設備は、原料処理（原料破碎、洗



浄)、前処理、糖化、発酵までの工程で構成されており、蒸留は既存技術で対応が可能であるため、本設備では省略している。エタノールは、発酵液のエタノール濃度で確認した後、発酵液は廃棄物として処理している。

表 4-1 実証設備仕様

項目	仕様
原料	草本系バイオマス (サトウキビバガス等)
設備処理能力	1 トン/日 (乾燥換算) (エタノール製造 250~300 L/日相当)
構成	原料処理工程 (破碎・洗浄)、 前処理工程 (蒸煮)、糖化工程、発酵工程
敷地面積	約 45m×35m



図 4-2 実証設備写真 (フィリピン)

2016年10月に実証設備が完成し、それ以降、約1年半の期間において100回を超える試験を実行し、運転データを収集している。試験回数の履歴を図4-3に示す。

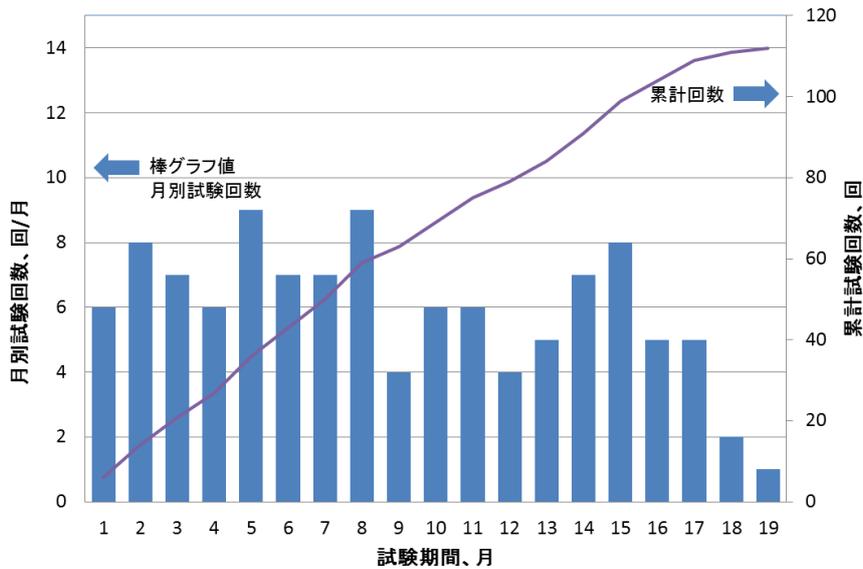


図 4-3 実証試験回数の履歴

本実証試験結果において、草本系バイオマス 1 トン（乾燥重量）から平均で約 270L のエタノールが得られ目標収率をクリアするとともに、長期間の実証試験実行により、安定して整備性能が確保できることが確認されている。また、図 4-4 にセルロース系エタノールのエネルギー転換効率を示す。セルロース系エタノールは、バイオマス中のセルロース・ヘミセルロース（糖源）成分からエタノールに転換するものであり、糖源からのエタノール転換効率は約 60%となり、バイオマスが保有する全エネルギーに対しエタノール転換効率は約 35%であった。またエタノールに転換できない原料中の組成（リグニン等）や糖化・発酵工程で発生する残渣は、エタノール残渣として回収され、エタノールプロセスに必要な蒸気・電気エネルギーを製造するボイラー用の燃料として利用される。

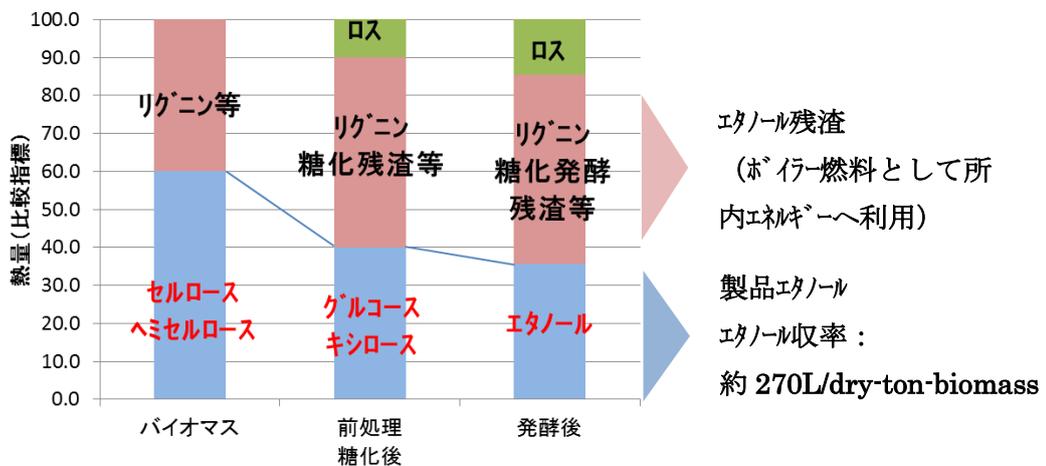


図 4-4 セルロースエタノールのエネルギー転換



環境省補助事業は、2018年2月で目標を達成して完了している。現在（2018年10月）も実証試験設備は保有しており、事業化に向けたエンジニアリングデータを蓄積するため、必要に応じて運転試験を行っている状況である。

4-4. セルロース系エタノール製造プロセス残渣（リグニン）の有効利用検討

当社が使用する草本系バイオマスの原料組成は、主にセルロース約 35%、ヘミセルロース約 25%、リグニン約 25%、その他約 15%で構成されている。草本系バイオマス原料は、当社のセルロース系エタノール製造工程を経ることにより、原料中のセルロースとヘミセルロースが糖・エタノールへと転換され、リグニン・その他の成分はエタノール残渣（図 4-5）として回収される。そのためエタノール残渣にはリグニンが多く含まれる。また当社プロセスは、エタノール製造工程においてリグニンがほとんど変性しないため、原料中のリグニン構造をそのまま回収ができる特徴がある。リグニンは、発熱量が高く灰融点も高いため燃料としての価値が高いとともに、芳香族骨格を含み耐火・耐熱、硬度等に優れ、樹脂や化学品原料として活用の可能性がある原料である。当社ではエタノール残渣からのリグニンの抽出技術開発（図 4-6）やリグニンの用途探索も実施しており、現計画では単にエタノールプロセスの燃料としているリグニンを、化学製品原料等の高付加価値物に転換することにより、セルロース系エタノールの経済性をさらに高められると考えている。



図 4-5 エタノール残渣



図 4-6 エタノール残渣からの抽出リグニン

5. おわりに

当社のバイオエタノール技術開発について紹介してきた。本稿内でも紹介したように、現在フィリピンでのセルロース系エタノールの事業化を目指して活動中であり、フィリピンでの事業化を足掛かりに、その後はエタノール政策を推進している東南アジア・アジア地域の国々へ事業を展開していくとともに、国内においてもエネルギー政策を注視しつつ、特に廃棄物系バイオマスによるエタノール利用の可能性について検討を継続していく計画である。また、バイオエタノール技術を軸として、エタノール製造の副産物であるリグニンの利用やバイオエタノールの他物質への転換、糖を起点としたバイオリファイナリー技術等、地球温暖化防止・持続可能な社会に貢献する新技術・新事業の開発に今後とも取り組んで行く考えである。



本稿で紹介した技術開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、環境省、公益財団法人地球環境センターの支援を受けて実施されたものであり、関係各位・各機関に感謝する。

(参考文献)

- 1) 米国 Renewable Fuel Association ウェブサイト
<https://ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/>
- 2) 2017 年度 自動車燃料消費量統計年報 最新の統計資料
- 3) 2010 年 新日鉄エンジニアリング技報 Vol.2