

低炭素地域社会を実現する バイオエタノールの革新的利用技術

島田 敦史
Shimada Atsushi

白川 雄三
Shirakawa Yuzo

石川 敬郎
Ishikawa Takao

CO₂を低減できる低コストな地産地消のエネルギーシステムの構築をめざし、地域の未利用資源を活用した低濃度のバイオエタノールを利用する高効率利用技術の開発を進めている。

低濃度エタノールは大量の水を含んでおり、低コストで安全であるが、燃えにくく使いづらい燃料である。この燃え

にくい燃料を使いこなすためのエンジンシステムとして、水とエタノールから水素を作り、水素を活用したシステムの高効率化と実用化のための技術検証を行っている。高効率化の検討では、水素を混合したエンジンで希薄燃焼によって熱効率45%を実現し、実用化の検証では宮古島で作った燃料を利用した運転検証を進めている。

1. はじめに

CO₂排出量削減に向けた再生可能エネルギー導入の動きが世界中で加速しており、バイオエタノールはその有力なエネルギー源の一つである。ブラジル、東南アジアなどでは、サトウキビなどから発酵によってエタノールを作り、ここから蒸留・脱水工程を経て90%以上の濃度まで濃縮してガソリンに混合して利用している。しかし、蒸留・脱水による濃縮にエネルギーやコストがかかっているため¹⁾、バイオエタノールの利用拡大には高効率でエタノールを製造利用するシステムの提供が課題である。そこで、蒸留・脱水工程を削減することで低価格な燃料供給が期待できる低濃度の含水エタノールに着目し、地産地消のエネルギーシステムの構築をめざしている。低濃度のエタノールは、水を多く含むため危険物ではない燃料という特長があり、安全でインフラ投資も低減できる。その反面、燃えにくく使いづらい。そこで、エンジンの排熱を利用して水とエタノールから水素を作る改質技術とエンジンの燃焼制御技術を組み合わせた革新的エンジンシステムの開発を進めている。

2. 含水エタノールを活用した排熱回収システム

一般的にエンジンは、燃料のエネルギーを100とすると、動力に30~40%利用されるが、50~60%は熱として排出されている。この排出されている熱を回収することが

できれば大幅なエンジン効率の向上につながる。一方、低濃度のエタノールは水が60%以上、エタノールが40%以下の燃料であり、このままでは水が多く、燃料として直接利用することが難しい。しかし、水が含まれることで燃焼には不利であるが、化学的には有利になる。なぜなら、エタノールは水と反応することで、非常に燃えやすい水素を生成することができるからである。また、この水素生成反応は吸熱反応であるため、エンジン排熱を化学的なエネルギーとして回収することができる。さらに、この水素への変換には300~600°C程度の熱と触媒が必要であるが、この温度域は、まさにエンジンの排気熱領域に当たり、エンジンと水素生成システムを組み合わせることにより、エンジン排熱を回収して燃焼性の高い水素を作り出すという、理想的なエンジンシステムを作ることができる。

2.1 排熱回収システムの特徴

低濃度含水エタノールを燃料とした排熱回収システムの構成を図1に示す。低濃度含水エタノールは燃料中に水を多く含むが、改質と呼ばれる化学反応によって水素を生成することができる。この反応は吸熱反応であることから、改質後の燃料エネルギーは改質前のそれに比べて高くなる。この反応にエンジンの排熱を利用することで、排熱を燃料のエネルギーとして回収することができる。

例えば、含水エタノールから水素とCO₂へ改質する反

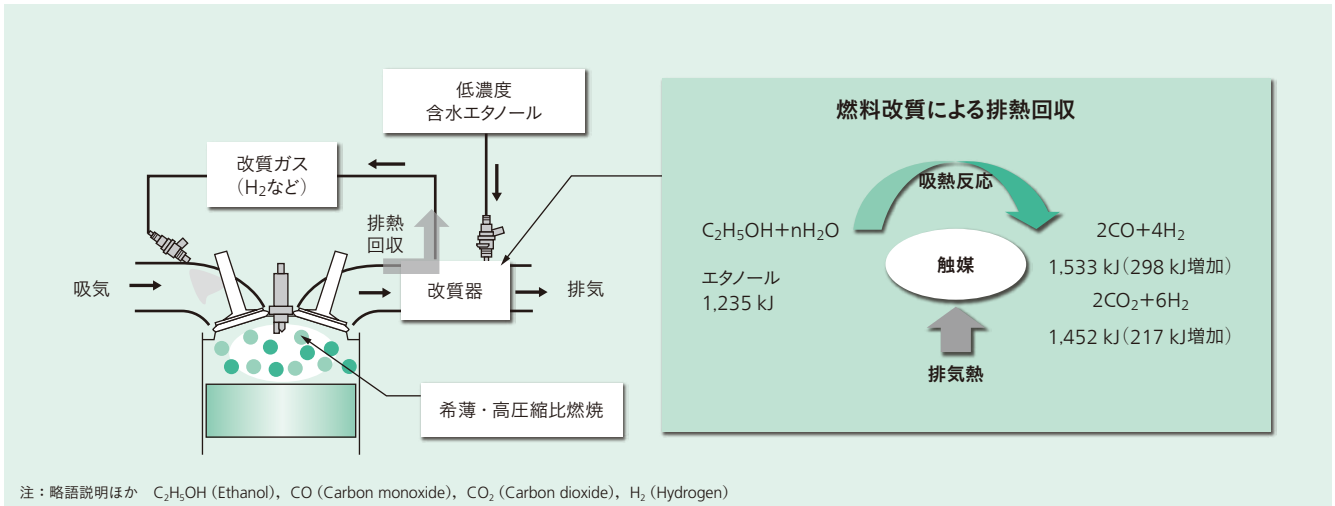


図1 | 低濃度含水エタノールを利用した排熱回収システム

低濃度含水エタノールをエンジンに適用した際のシステム構成を示す。改質反応器ではエンジンの排気熱を活用し、触媒反応によって低濃度エタノールから水素を含む反応ガスを生成する。この反応が吸熱反応のため、捨てていた排気の熱を燃料のエネルギーとして化学的に回収できる。

応の場合、改質ガスの燃焼熱は1,452 kJと、改質前の含水エタノール1,235 kJより217 kJほど増加しており、改質前の約1.2倍に燃料のエネルギーを増加することができる。さらに、改質ガス中に含まれる水素は非常に燃えやすい成分であることから、これをエンジンに供給することで、空気過剰な状態での燃焼（希薄燃焼）が可能となる。さらに、エタノールはオクタン価が111で、ガソリンのオクタン価90～100よりも大きく耐ノッキング性に優れ、高圧縮比燃焼が可能となる。つまり、低濃度含水エタノールを燃料とすることで、排熱回収、水素による希薄燃焼、高圧縮比燃焼を相乗的に組み合わせることができ、発電システムの熱効率を革新的に高めることができる^{2), 3)}。

次に、この排熱回収システムの効率向上効果について理論解析を行った内容を紹介する。

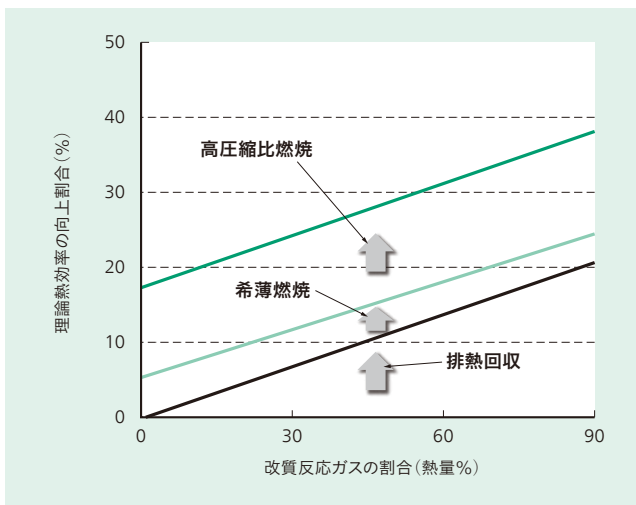


図2 | 理論熱効率の向上効果

排熱回収、希薄燃焼、高圧縮比燃焼を行った際の理論熱効率の向上効果について試算している。従来燃焼に比べ、38%の熱効率向上が見込める。

2.2 理論的な熱効率向上効果

低濃度含水エタノールを燃料としたエンジンシステムは、上述のように大幅な熱効率向上効果を期待できるものである。その効果を明確化するために、理論的解析により、燃料改質による排熱回収、水素による希薄燃焼、高圧縮比燃焼のそれぞれの熱効率向上効果を段階的に試算した（図2参照）。

含水エタノールをどの程度反応させるかを示した改質反応ガスの割合が大きくなるほど排熱回収量が高くなり、改質を行わない従来の熱効率に対して最大20%向上する。加えて、改質反応ガスに含まれる水素による希薄燃焼の効果、高圧縮比化の効果は相乗的に組み合わせることで、従来に対し、最大38%の理論熱効率の向上効果が期待できる。

以上のことから、低濃度含水エタノールは燃料として利用することで大幅な熱効率向上が見込めるため、低濃度含水エタノールを燃料とした高効率エンジンシステムの早期社会実装をめざし、高効率化のためのテストエンジン試験と、実用性検討のための検証試験を実施している。本稿ではその内容の一部を紹介する。

3. 高効率化のためのテストエンジン試験

低濃度含水エタノールを利用した高効率化を実現するために、テストエンジンによる試験を実施した。テストエンジンは排気量2.5 Lで出力規模40 kWのタイプを使用した。試験は、次の3つの条件について行い、エタノールのみによるエンジンのベース効率の確認、水素の混合効果、そして排熱回収の効果について検証を行った。

- (1) 高純度エタノールを燃料とした条件
- (2) 市販のガスボンベを利用した水素とCO₂の混合ガスを燃料とした条件

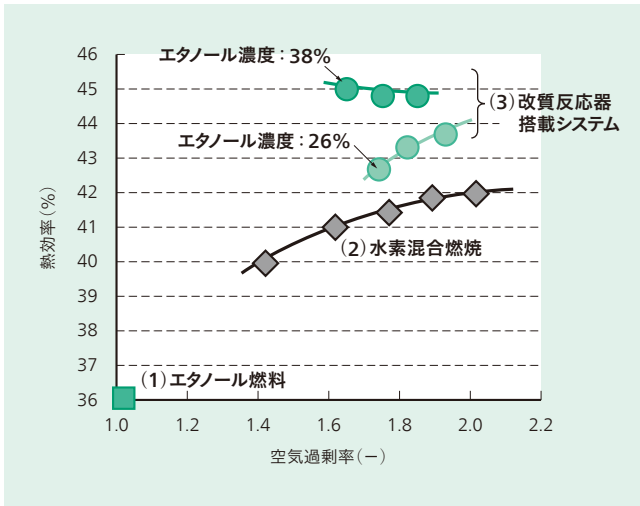


図3 | 高効率化検討の試験結果

40 kWのテストエンジンを用いた際の熱効率結果である。エタノール濃度40%以下の含水エタノールを利用し、熱効率45%を達成した。

(3) 改質反応器搭載システムへ含水エタノールを供給した条件

なお、低濃度含水エタノールの条件は、エタノール濃度が26%、38%の2条件で行い、エンジン内の燃焼圧力を基にした燃焼タイミング制御に加え、エンジンと改質反応器の熱バランスを考慮した協調制御を行い、高効率化を検討した。

高純度エタノールを燃料とした場合、量論の混合気条件で熱効率は36%にとどまるのに対し、水素混合燃焼をさせることで空気を過剰にした燃焼（希薄燃焼）が可能となり、熱効率は大幅に向上した。さらに、改質反応器を搭載することによる化学的な排熱回収効果が加わり、エタノール濃度38%においては、熱効率は最大45%に到達した（図3参照）。

一方、エタノール濃度26%においてもその効率は43～44%であり、いずれの濃度でも大きな効率向上が認められた。また、エンジンの排気規制成分であるNO_x排出量は、エタノール燃焼では1,600 ppmであったが、改質反応器搭載システムでは800～200 ppmと大幅に低減された。特に空気過剰率が1.8以上では400～200 ppmで規制値をクリアできており、本システムは高効率と低NO_xの両立を実現できることが示された。

今後、高圧縮比化や排熱回収の向上などにより、さらなる高効率化、低NO_x化の検討を進めていく予定である。

4. 実用化検討のための宮古島での運転試験

低濃度含水エタノールは、大量の水を含む新しい燃料であり、実用に際しては燃料やエンジンの部品などの規格化が必要になる。そこで、宮古島（沖縄県）で共同実施先である一般社団法人宮古島新産業推進機構からエタノール製

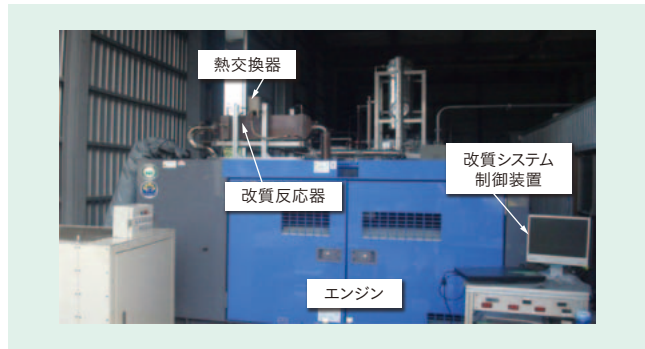


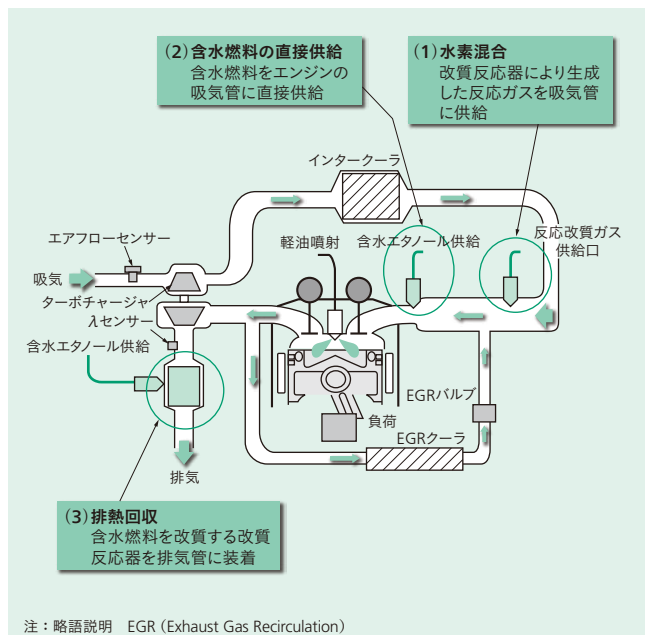
図4 | 宮古島に設置した実用化検証エンジンシステム

60 kWのディーゼルエンジンの一部を改良した試作システムを示す。宮古島の廃糖蜜から製造したエタノール濃度40%以下の低濃度含水エタノールを利用して実用性を検証している。

造プロセス技術実証で得られた廃糖蜜原料の40%低濃度含水エタノール燃料を用いて試作したエンジン発電機で性能試験などを実施するとともに、ピストンやピストンリングなどのエンジン部品、およびエンジンオイルの性状変化を観察し、エンジン部品やオイルなどの規格化に関する技術検証を行っている（図4参照）。

本システムは実用化を重視し、3か所での改良としている（図5参照）。1つ目は、改質反応器から発生した反応ガスを吸気管に供給するための供給口を設置したことである。2つ目は、燃料である低濃度含水エタノールを直接エンジンに供給するために、インジェクターを各気筒の吸気バルブ付近に設置したことである。最後は改質反応器を接続するために改質反応器の接続口を排気管に取り付けたことである。

なお、エンジンの制御システムは既存のまま、エンジ



注：略語説明 EGR (Exhaust Gas Recirculation)

図5 | 実用化試験設備のエンジンシステムの構成

市販のエンジンシステムに含水エタノールを供給するための改良ポイントを示す。

ン発電機ユニットの側面パネルのスイッチで操作を行うことができる。一方、含水エタノールの直接供給量および改質反応ガス量は、改質システムの制御装置内で操作をすることとして、それぞれ自由に調整できるようPC (Personal Computer) を活用した制御システムを構築している (図4参照)。

使用したエンジンはディーゼルエンジンであるため、エタノール燃料を直接利用することができない。そのため、既存の軽油供給ラインはそのままとして、軽油を着火剤にしたデュアルフェューエルシステムで運用している。また、改質反応システムの熱効率を向上させるために、高温の改質反応出口ガスと低温の含水エタノール燃料を熱交換させることで、改質反応ガスを冷却するとともに燃料の予熱を行っている。これにより、含水エタノール燃料の気化熱や顕熱を高温の改質反応ガスから回収することができ、システムの熱効率を大幅に改善している。低濃度含水エタノールは水を多く含むため、水の気化熱が非常に大きくなる。このため、高温の排熱を改質反応に利用するにも、燃料の気化で熱が失われてしまうという大きな課題があったが、熱交換器を設けることで燃料気化の問題を解決し、システムの小型化、高効率化を実現している。

設備は2015年12月より本格的な運転を開始し、現時点で200時間程度の運転であるが、初期の状態において、エンジン部品やエンジンオイルへの影響は見られていない。今後さらに運転を継続し、実用性を検証するデータを入手していく。

5. おわりに

エタノールの製造には数千年の歴史がある。燃料としての活用については、国内でこれまでサトウキビのほか、米、麦、木質、さらには残飯や紙などの廃棄物からエタノールを製造する取り組みが行われてきた。従来バイオエタノールの濃度が90%以上であったものを、40%濃度以下での利用を可能として、安全性とコストの両立ができ、石油火力に比べCO₂排出量の削減効果が大きな地域分散型発電となりうる。

今後、島嶼地域をきっかけに、風力・太陽光発電システムとの連携を含め、低濃度の含水バイオエタノール燃料利用により、多くの未利用資源から安全で低コストなエタノール燃料を活用した、地域で自立したエネルギーシステムを構築し、新規用途拡大による産業再生、地方創生を推進していく。

謝辞

ここで紹介した内容の多くは、2014年に採択された環境省の「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業 (低濃度エタノール燃料使用高効率改質エンジン等革新的バイオエタノール利用技術の開発)」による成果であり、ご支援・ご指導いただいた関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) JOMA News Letter, Vol. 4, No. 11 (2011)
- 2) A. Shimada, et al.: Improved Thermal Efficiency Using Hydrous Ethanol Reforming in SI Engines, SAE Technical paper (2013)
- 3) 島田, 外: 燃料改質による排熱回収システムと改質燃料によるエンジンサイクル効率の向上, 自動車排熱再生技術, サイエンス&テクノロジー株式会社, p. 171~180 (2014.12)

執筆者紹介



島田 敦史

日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 所属
現在、含水燃料システムの研究開発に従事
博士 (工学)
自動車技術会会員



白川 雄三

日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 所属
現在、含水燃料システムの研究開発に従事



石川 敬郎

日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 所属
現在、含水燃料システムの研究開発に従事