

水素及び低カロリーバイオガス対応 ロータリーエンジンコジェネレーションシステムの開発

池田悟至*・山田誠治*2

Development of Rotary Engine Cogeneration System for Hydrogen or Low-calorie Biogas
Satoshi Ikeda and Seiji Yamada

1. 緒 言

新エネルギーをはじめ地域に存在する未利用エネルギーの利用と分散型エネルギーの導入が求められている。本県においては、コンビナート企業群から全国有数の純度の高い水素が生産¹⁾され、この水素に着目して液化水素を製造する企業が2013年6月に周南地区コンビナートに設立された。山口県には高純度の水素以外にも、電子部品工場、金属熱処理工場等の生産工程で使用された後に廃棄されている水素や、鍍金工場で生成され排気されている水素など純度の低い水素ガスが存在する。また、豊かな森林資源、多数の食品加工業からの残渣及び畜産業等のバイオマス資源が存在する。更に、県内にはバイオマス資源の利用に関しては、特徴的な発酵系・木質系バイオガスプラントメーカーが存在している。これらの水素及びバイオガスを有効に活用する方法の一つとして、これらのガスを燃料とするコジェネレーションシステムがあり、分散型エネルギー源として注目されている。

山口県産業技術センター（以下、産技センター）では、エネルギー関連技術を最重点技術の一つに位置づける²⁾とともに、この分野において県内ものづくり企業と一体となって取り組むために、「新エネルギー研究会」の中に分科会を設置し、技術シーズ獲得に向けてオープンイノベーション^{※1}による開発を推進している³⁾。産技センターでは、これまでに上記分科会の一つである液化水素エネルギー分科会において、平成25年度～平成26年度に液化水素をエネルギーとして利用するため、液化水素を気化し、水素ロータリーエンジン^{※2}（以後、水素RE）で発電するシステムの開発に取り組んできた⁴⁾。

本研究では、液化水素に代表される純水素から、更に上記に示す県内産資源である低純度水素及びバイオガスを有効に活用するため、水素REを用いて、従来の内燃機関では燃焼できない低純度水素及び低カロリーバイオガスを燃料として発電し、内燃機関からの廃熱を回収するREコジェネレーションシステム（以下、REコジェネ）を開発することを目的とする。

※1 オープンイノベーション：ここでのオープンイノベーションとは、設置する分科会に、技術革新による新エネルギー関連の新事業創出を目指す様々な機関が、それぞれの保有技術・知識・情報等を持って参画し、可能な限り情報・

技術を共有することにより、様々な観点から技術革新による事業化を推進することである。

※2 水素ロータリーエンジン：マツダ(株)から水素REの貸与と、その技術支援を受けている。

2. システム構成

2・1 システム全体の概要

図1にシステム全体の概略図を示す。試作開発するREコジェネは、これまでの液化水素発電システム⁴⁾をベースに、新たに混合ガス供給システム、発電制御システム、廃熱回収システムを追加する。

混合ガス供給システムは、密度の異なる2種類のガスを予め設定した混合比で、効率良く均一に混合し、水素REに供給するシステムである。これにより、低純度水素や模擬バイオガスなどの可燃ガスと不燃ガスの混合ガスによる水素REでの燃焼実験が可能となる。

発電制御システムは、水素REの最適運転条件を探索するための点火タイミング、燃料噴射タイミング及び燃料噴射量が任意に設定できる点火・噴射制御部と、電力需要（負荷）の変動に対して水素REを所定の回転速度に一定に保持したままエンジン出力を制御するための負荷変動制御部から構成される。

廃熱回収システムは、ラジエータ、オイルクーラ及び循環水冷却装置から構成されており、エンジン保護のために必要な冷却能力を有し、かつ、廃熱を高効率で回収できるシステムである。

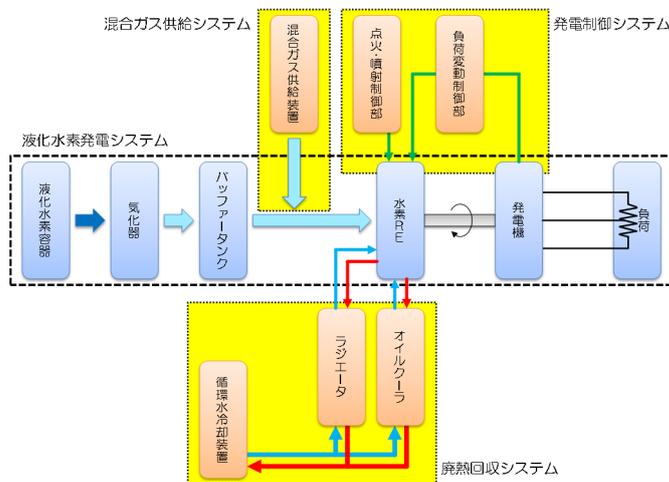


図1 システム全体の概略図

* 企業支援部設計制御グループ

*2 経営管理部経営企画室

2・2 混合ガス供給システム

図2に混合ガス供給システムの概略図を示す。本システムは、密度の異なる可燃ガスと不燃ガスの2種類のガスを予め設定した混合比で、効率良く均一に混合し、水素REに供給するシステムである。負荷の変動等によって必要な燃料ガス量(混合ガス流量)が変動する。変動する燃料ガス量において、まず、マスフローメータ(検出器:東京計装(株)製TF-5340,変換器:東京計装(株)製TM-2221)で可燃ガスの流量を測定し、その流量に対してコンバータユニット(東京計装(株)製TM-1421-22)で予め設定した混合比になるようにマスフローコントローラ(東京計装(株)製TC-1400)により不燃ガスの流量が制御される。これにより、一定の混合比の混合ガスを水素REへ安定供給することができる。なお、混合ガス供給システムから水素REまでの配管長は10m程度あり、かつ曲管部分が複数あることから、二種類のガスは均一に混合されて供給できると考えて、配管途中にミキサーやバッファタンク等を設けていない。混合ガスの組み合わせは、模擬バイオガスの実験では、可燃ガスにメタンガス、不燃ガスに二酸化炭素を、低純度水素の実験では、可燃ガスに水素、不燃ガスに二酸化炭素を想定している。混合ガス供給システムの仕様を表1に示す。可燃ガスの最大流量については、メタンガスの場合において、水素RE最大出力40kW、効率20%と仮定して15 Nm³/hとした。これに対して、不燃ガスの二酸化炭素については、10 Nm³/hとした。この時、メタンガスの体積濃度は60%となる。なお、メタンガスの体積濃度40%時には、メタンガス6.67Nm³/h、二酸化炭素10Nm³/hである。

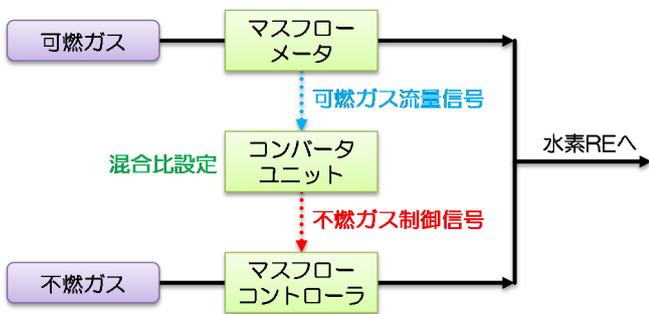


図2 混合ガス供給システムの概略図

表1 混合ガス供給システムの仕様

| | |
|----------|-------------------------|
| 可燃ガス流量範囲 | 0~15 Nm ³ /h |
| 不燃ガス流量範囲 | 0~10 Nm ³ /h |
| 可燃ガス濃度範囲 | 60~100 % ^{※3} |

※3 可燃ガス流量15Nm³/h時

2・3 発電制御システム

図3に発電制御システムの概略図を示す。発電制御システムは点火・噴射制御部と負荷変動制御部から構成される。

2・3・1 点火・噴射制御部

図4に水素REの断面概略図を示す。水素REのガス燃料

噴射弁には、トロコイド曲線をした断面形状のローターハウジングの上部に取り付けられている直噴用噴射弁(以後、DI)と、吸気ポートに取り付けられている予混合用噴射弁(以後、PI)の2種類がある。また、点火プラグには、ローターハウジングの短軸よりも上側に取り付けられているT側プラグと下側に取り付けられているL側プラグの2種類がある。点火・噴射制御部では、これらの燃料ガス噴射弁と点火プラグを水素REの燃焼条件に合わせて制御する。これらの制御においては、ローターハウジング内の三角おむすび型ローターの位置に対して、点火及び噴射タイミングを制御し、噴射量については、噴射タイミングを基準に噴射時間により制御する。ローター位置の検出は、クランク角の検出によって行うため、クランク軸にエンコーダが取り付けられている。エンコーダの取り付けに際しては、後述する圧縮→爆発工程の中で燃焼室の容積が最小となる位置TDC(Top Dead Center)でZ相が出力されるように設定されており、Z相は360°毎に出力される。図5に水素REの燃焼工程と点火及び噴射タイミングの関係を示す。水素REの燃焼工程は、クランク角270°毎に排気→吸気→圧縮→爆発の工程を繰り返す⁵⁾。T側プラグとL側プラグの点火タイミングは、このZ相を基準にBTDC50°~ATDC20°の範囲で設定できる。ここでBTDC(Before Top Dead Center)は、燃焼室の容積が最小となるクランク角を基準にそれよりも前の角度、ATDC(After Top Dead Center)は後の角度を示す。また、燃料噴射タイミングについては、PIによる燃料噴射は主に吸気工程で行い、DIによる燃料噴射は主に圧縮工程で行うことから、PIではクランク軸1回転前(360°前の位相)、DIではクランク軸2回転前(720°前の位相)のZ相が基準となり、ともに0~719°の範囲で設定できる。PIとDIの燃料噴射時間は、それぞれの噴射タイミング後から0~32msecの範囲で設定できる。点火・燃料噴射タイミング及び噴射量の設定範囲をまとめて表2に示す。

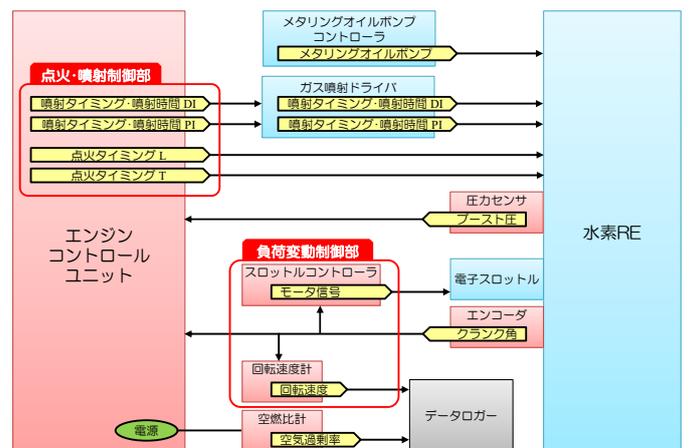


図3 発電制御システムの概略図

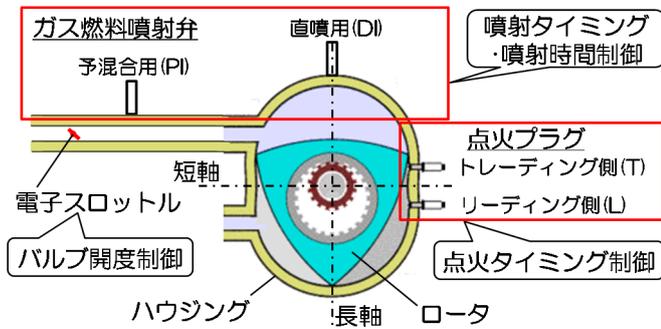


図4 水素 RE の断面概略図

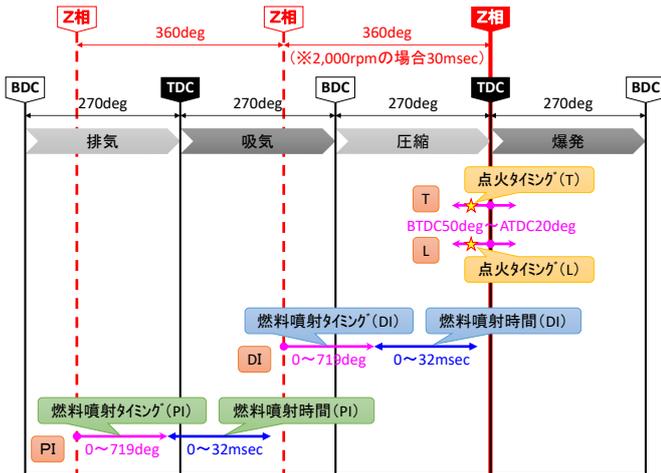


図5 水素 RE 燃焼工程と点火及び噴射タイミングの関係

表2 点火・燃料噴射タイミング及び噴射量の設定範囲

| | |
|-------------------|-------------------|
| 点火タイミング(T, L) | BTDC50° ~ ATDC20° |
| 燃料噴射タイミング(DI, PI) | 0° ~ 719° |
| 燃料噴射時間(DI, PI) | 0 ~ 32 msec |

2・3・2 負荷変動制御部

負荷変動制御部は、負荷の変動に対して、水素 RE の回転速度を一定に保つため、吸入空気量を調整する電子スロットルのバルブ開度を制御する。具体的にはエンコーダからの信号により、実際の回転速度を算出し、これが所定の回転速度となるように電子スロットルのバルブ開度を制御する。

ここで、水素 RE の燃焼制御は、予め設定された条件表（以下、マップ）に基づいて行われる。このマップは、各回転速度について、吸入空気圧（以下、ブースト圧）に対する燃料噴射時間の関係を表している。したがって、水素 RE をある負荷に対して所定の回転速度に制御するために、電子スロットルのバルブ開度を調整し、その時のブースト圧を圧力計により検出し、マップに基づいて、そのブースト圧に対する燃料ガスの噴射量が決定される。

更に、水素 RE の燃焼制御を考える場合、供給燃料に対する吸入空気過剰率 λ が重要なパラメータの一つとなる。 $\lambda = 1$ のとき供給燃料を完全燃焼するために必要な空気が供給されることになる。水素 RE の燃焼制御においては、効率

を高めるためには $\lambda > 1$ （リーン燃焼）となる条件で運転することや、高トルクが必要な場合などは $\lambda < 1$ （リッチ燃焼）の条件で運転することがある。そのため、空気過剰率を測定するために空燃比計（Innovate Motorsports 製 LM-2）が排気管に取り付けられている。

2・4 廃熱回収システム

図6に廃熱回収システムの概略図を示す。本開発の廃熱回収システムは、冷却水が循環するラジエータと潤滑油が循環するオイルクーラ及びそれらを冷却水が循環する循環水冷却装置とから構成される。これらはエンジン保護のために冷却機能を担うと共に、ラジエータ及びオイルクーラの循環水冷却装置側（以下、二次側）を循環する冷却水により廃熱を回収する。本開発では、熱利用せずに、大気中に放出するため循環水冷却装置として空冷式ラジエータが取り付けられている。ラジエータ及びオイルクーラには、将来的なコジェネレーションシステムのパッケージ化を考慮し、小型化が可能なプレート式熱交換器（ラジエータ：(株)日阪製作所製 BXC-214-PO-60, オイルクーラ：(株)日阪製作所製 BXC-314-PI-20）を採用している。ラジエータ及びオイルクーラは、自動車用のラジエータ及びオイルクーラの仕様を参考に選定した。具体的には、ラジエータについては、エンジン側（以下、一次側）の流量 2.52m³/h, 入口温度 90℃, 出口温度 60℃, 放熱量 68kW を、オイルクーラについては一次側の流量 1.19m³/h, 入口温度 100℃, 出口温度 72℃, 放熱量 8.5kW を参考に、それぞれ余裕を見込んで、87kW 及び 15kW となるものを選定した。また、循環水冷却装置については、89kW > 76.5kW (68kW + 8.5kW) となる空冷式ラジエータ（江洋ラヂエーター(株)製）を選定した。表3, 4 及び5にそれぞれラジエータ、オイルクーラ及び循環水冷却装置の概略仕様を示す。

また、エンジン冷却能力及び廃熱回収能力を評価するため、ラジエータ及びオイルクーラにおいて、一次側と二次側のそれぞれ入口と出口に、循環水冷却装置の冷却水入口と出口に温度計が、ラジエータ及びオイルクーラの二次側に循環水流量を計測するための流量計が設置されている。また、これらの流量計は流量調整ができる。

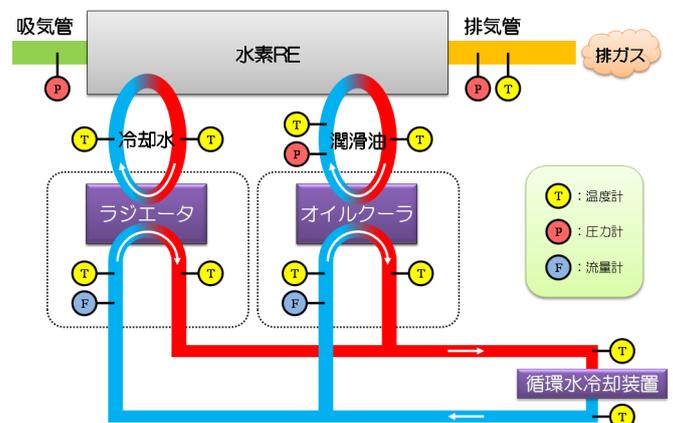


図6 廃熱回収システムの概略図

表3 ラジエータの概略仕様

| | | |
|------|------|------------------------|
| 伝熱面積 | | 1.45 m ² |
| 一次側 | 流体名 | 冷却水 |
| | 流量 | 2.52 m ³ /h |
| | 使用温度 | (入口)90℃ → (出口)60℃ |
| 二次側 | 流体名 | 水 |
| | 流量 | 2.70 m ³ /h |
| | 使用温度 | (入口)35℃ → (出口)60.62℃ |
| 交換熱量 | | 87 kW |

表4 オイルクーラの概略仕様

| | | |
|------|------|------------------------|
| 伝熱面積 | | 1.13 m ² |
| 一次側 | 流体名 | 潤滑油 |
| | 流量 | 1.19 m ³ /h |
| | 使用温度 | (入口)100℃ → (出口)72℃ |
| 二次側 | 流体名 | 水 |
| | 流量 | 0.50 m ³ /h |
| | 使用温度 | (入口)35℃ → (出口)60.58℃ |
| 交換熱量 | | 15 kW |

表5 循環水冷却装置の概略仕様

| | | |
|------|------|------------------------|
| 冷却水側 | 流量 | 3.20 m ³ /h |
| | 通過面積 | 5564 mm ² |
| | 使用温度 | (入口)59.2℃ → (出口)35℃ |
| 空気側 | 風量 | 250 m ³ /h |
| | 放熱面積 | 173 m ² |
| | 使用温度 | (入口)20℃ → (出口)37.5℃ |
| 放熱量 | | 89 kW |

3. 結 言

水素 RE を用いて、従来の内燃機関では燃焼できない低純度水素及び低カロリーバイオガスを燃料として発電し、内燃機関からの廃熱を回収する RE コージェネレーションシステムを開発した。今後は本開発システムを使って、可燃性ガスと不燃性ガスの混合ガスを用いて、種々のガス組成によるエンジン特性調査や廃熱回収可能性調査を行っていく予定である。

本システムの開発の取組に際しては、プロポーザル公募に参加し、試作開発から産技センターへの設置及び動作確認において、多大なる協力を頂いた帝人エンジニアリング(株)様、ユーディーエンジニアリング(株)様及び(株)特殊ガス商会様に深く感謝します。試作開発委託先以外の FC デザイン(株)及び(有)三木鉄工様におかれましても試作開発、設置、調整に多くの協力を頂きました。また、マツダ(株)様におかれましては、水素ロータリーエンジンを無償で貸与して頂くと共に、水素ロータリーエンジンの設置及び運転等に関して大変丁寧な技術指導を頂きました。ここに併せて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省中国経済産業局、中国地域におけるコンビナートのポテンシャルを活用した水素インフラ整備と機能性素材活用方策調査 報告書 (2008.3).
- 2) 山口県産業技術センター：技術戦略<第2期>[ロードマップ] (2015).
- 3) 磯部佳成, 藤本正克, 山田誠治, “山口県産業技術センターの新エネルギー利活用プロジェクト”, 日本風力エネルギー学会誌, Vol. **37**, No. 3, 通巻. 107, p. 413-416 (2013).
- 4) 磯部佳成, 村川収, 山田誠治: 液化水素発電システムの開発, 山口県産業技術センター研究報告, **27**, p. 30-35 (2015).
- 5) マツダ株式会社, Rotary Engine, The 33rd Tokyo Motor Show 1999, Press Information, p. 30 (1999).