

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 —低カロリーバイオガスでの特性について—

池田悟至*・山田誠治*²

Development of Rotary Engine Cogeneration System —Property for using Low-calorie Biogas— Satoshi Ikeda and Seiji Yamada

県内産資源であるバイオガスを有効に活用するため、水素ロータリーエンジンを用いて、従来の内燃機関では燃焼できない低カロリーバイオガスを燃料として発電するとともに廃熱を回収するコジェネレーションシステムを開発し、燃料ガスの濃度や供給圧力を変化させたときの、燃焼条件およびエンジン特性、廃熱回収可能性を実験的に調査した。

1. 緒言

再生可能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。

こうした中、山口県産業技術センター（以下、産技センター）では、液化水素に代表される純水素をはじめ、上記に示す低純度水素及びバイオガスを有効に活用するため、水素ロータリーエンジン^{*}（以下、水素RE）を用いて、従来の内燃機関では燃焼が困難な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するとともに廃熱を回収するロータリーエンジンコジェネレーションシステム（以下、REコジェネ）の開発に取り組んできた²⁾。

本研究では、発酵系バイオガス（CH₄, CO₂）を対象に、模擬バイオガスとして圧縮天然ガス（以下、CNG）と二酸化炭素（以下、CO₂ガス）の混合ガスを燃料ガスに用いて、燃料ガス供給圧力がREコジェネの特性に及ぼす影響を実験的に調査することを目的とする。

具体的には、種々のCNG濃度条件に対して、燃料ガス供給圧力を変化させたときの、RE燃焼条件およびエンジン特性、廃熱回収可能性を実験的に調査した。

※ 水素ロータリーエンジン:マツダ(株)から貸与と技術支

* 企業支援部設計制御グループ

*2 企業支援部産学公連携室

援を受けている。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置

実験装置は図1に概略図を示すとおり、水素RE、発電システム、ガス供給システムおよび廃熱回収システムで構成されている。

発電システムにおいては、負荷変動に追従するために、負荷に応じて吸入空気量をスロットルバルブ開度で制御する方式を採用した。また、成分の異なるバイオガスに対するREの最適燃焼条件を探索するために点火・噴射コントローラを設置した。このコントローラは点火タイミング、噴射タイミングおよび噴射量が任意に設定できる。発電機の出力が消費される負荷装置には、電気抵抗が可変できる可搬型乾式負荷装置（株式会社辰巳菱機製L-5）を用いた。

ガス供給システムには水素供給装置および混合ガス供給装置が設置されているが、本実験では混合ガス供給装置を使用した。混合ガス供給装置では、主となる可燃性ガス流量に対して、もう一方の不燃性ガス流量を制御することにより、目的とする可燃性ガス濃度の混合ガスを作ることができるため、主となる可燃性ガス流量が変動しても、その

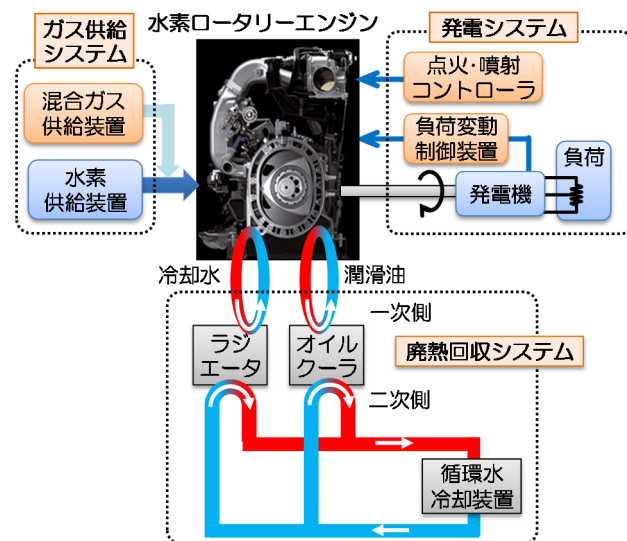


図1 実験装置の概略図

濃度を維持することが可能である。実際には、所定の回転速度、負荷に対して RE が必要とする可燃性ガス流量が供給され、これに対して、所定の可燃性ガス濃度となるようにもう一方の不燃性ガス流量が制御される。本研究では、可燃性ガスに CH₄ の代用として CNG、不燃性ガスに CO₂ ガスを用いた。

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（一次側）およびそれらを冷却水が循環する循環水冷却装置（二次側）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を循環する冷却水により廃熱を回収する。

2・2 実験方法

各種濃度の CNG について、燃料ガス供給圧力を変化させて RE の燃焼条件を探索するとともに、燃料ガス供給圧力が RE コージェネの特性に及ぼす影響を実験的に調査した。RE コージェネの特性を評価するため、消費した CNG の熱量に対する RE 出力や発電量、廃熱回収量の割合を求め、それぞれ RE 効率、発電効率、廃熱回収効率とした。なお、廃熱回収量は、ラジエータおよびオイルクーラの二次側冷却水の入口と出口の温度差、流量、比熱から求めた。

RE 運転条件として、1 ローター当たり 2 本ある点火プラグ（ローターハウジング短軸よりも上側に位置するものを「T プラグ」、下側に位置するものを「L プラグ」）の点火タイミングは、BTDC(L)=20°、BTDC(T)=15°（BTDC: Before Top Dead Center, ()内の T/L は「T プラグ」/「L プラグ」を示す）とした。また、燃料ガス噴射は吸気管に設置されている予混合用の噴射弁（以下、PI (Port Injection)）を用い、噴射タイミングは BTDC=540° とし、燃料噴射量は、燃料噴射時間によって調整した。燃料ガス供給圧力は、0.6MPa から、空気過剰率 $\lambda=1.00$ の条件下で、所定の回転速度 2000rpm と RE 出力 20kW が一定に維持できる圧力まで低下させた。このとき RE 燃焼条件は燃料ガス噴射量によって調整した。なお、RE 回転速度 N=2000rpm 時の最大噴射時間 ΔT_{i_max} は、 $\Delta T_{i_max}=60/N$ より、30msec である（図 2）。CNG 濃度は、100%、60%、50%、45% の 4 種類とした。表 1 に各 CNG 濃度に対する燃料ガス供給圧力の範囲を示す。

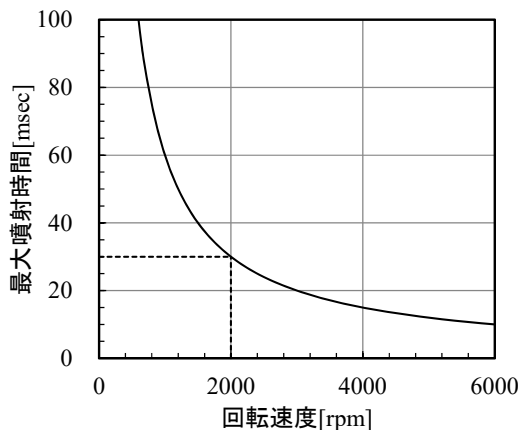


図 2 回転速度に対する最大噴射時間

表 1 各 CNG 濃度に対する燃料ガス供給圧力の範囲

CNG 濃度	燃料ガス供給圧力
100%	0.080~0.600MPa
60%	0.200~0.600MPa
50%	0.280~0.600MPa
45%	0.325~0.600MPa

3. 実験結果

3・1 燃料条件調査

3・1・1 燃料噴射時間に及ぼす燃料ガス供給圧力の影響

4 種類の CNG 濃度（100%、60%、50%、45%）について、燃料ガス供給圧力を変化させて、2・2 実験方法に示す RE 運転条件（ $\lambda=1.00$, N=2000rpm, RE 出力 20kW）を満足する燃料噴射時間を調査した。実際の RE 運転条件は、回転速度 N=2029~2061rpm, RE 出力 $P_{RE}=20.3\sim 20.7$ kW であった。図 3 に各 CNG 濃度について、燃料ガス供給圧力に対する燃料噴射時間を示す。図に示す全ての CNG 濃度において、燃料ガス供給圧力が低下するにつれて急激に燃料噴射時間が長くなる。RE 回転速度 N=2000rpm 時の最大噴射時間 $\Delta T_{i_max}=30$ msec で RE 出力 20kW を維持できる燃料ガス供給圧力の下限值は、CNG 濃度 60%、50%、45% において、それぞれ $P_5=0.200$ MPa, 0.280MPa, 0.325MPa であった。

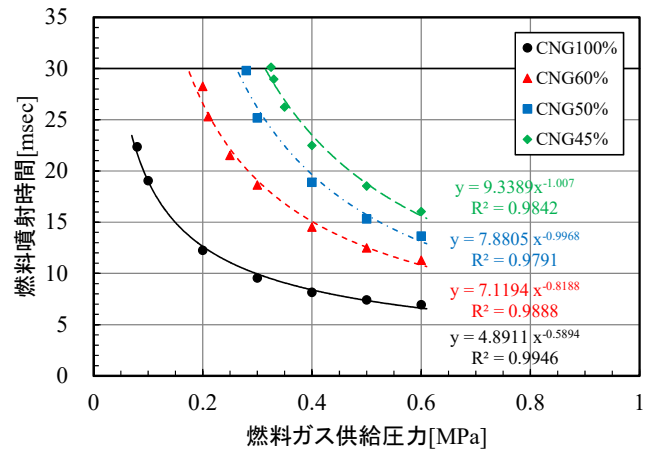


図 3 燃料ガス供給圧力に対する燃料噴射時間

3・1・2 燃料噴射時間の予測

図 3 より、各 CNG 濃度について、燃料ガス供給圧力 P_5 に対する燃料噴射時間 ΔT_i は次式で近似できる。

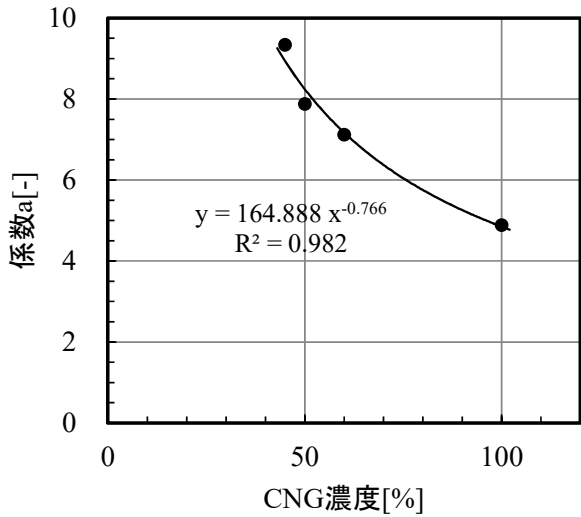
$$\Delta T_i = a \cdot P_5^b \quad (1)$$

図中の近似式において、 $x=P_5$, $y=\Delta T_i$ である。係数 a および指数 b は CNG 濃度毎に異なる値をとる。各 CNG 濃度に対する a および b の変化を図 4 に示す。 a および b の近似式は次式で表すことができる。

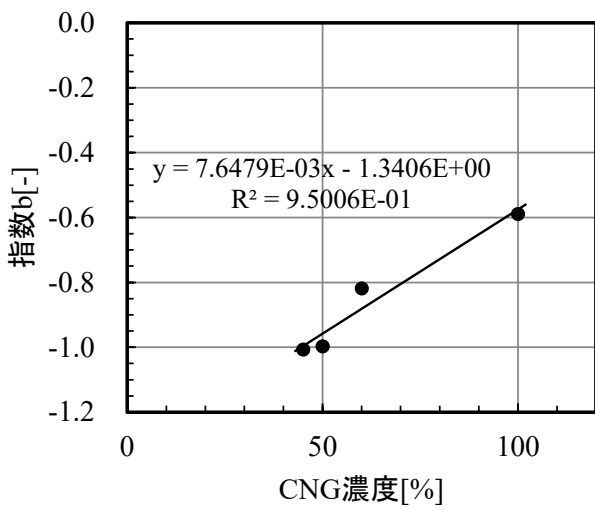
$$a = a_1 \cdot c^{a_2} \quad (2)$$

$$b = b_1 \cdot c + b_2 \quad (3)$$

図中の近似式において、(a)では $x=c$ (CNG 濃度), $y=a$, (b)では $x=c$, $y=b$ である。ここで、 $a_1=164.888$, $a_2=-0.766$,



(a) 係数 a



(b) 指数 b

図 4 各 CNG 濃度に対する係数 a および指数 b の変化

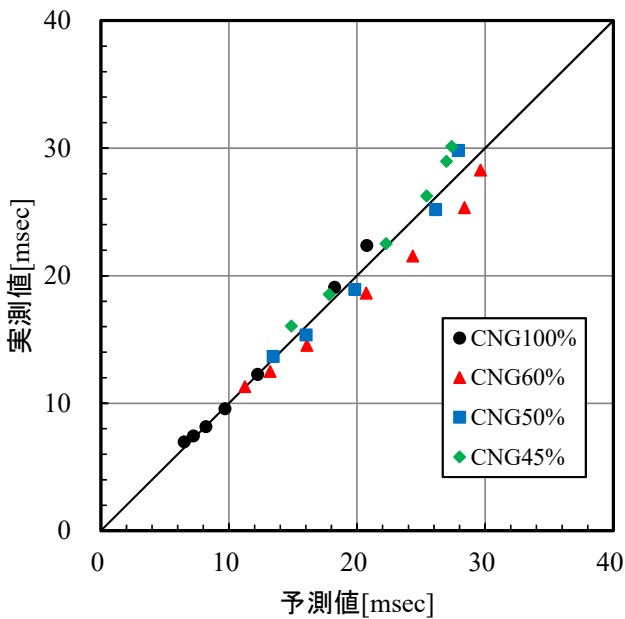


図 5 燃料噴射時間の予測値と実測値の関係

$b_1=7.6479 \times 10^{-3}$ および $b_2=-1.3406$ である。CNG 濃度低下に伴い a は急激に大きく、また負の値をとる b の絶対値も大きくなっており、ともに CNG 濃度低下に伴う燃料噴射時間の増加が著しくなる傾向を示している。式(1)~(3)により予測された燃料噴射時間と実測値の関係を図 5 に示す。図より、予測値は実測値と比較的よく一致しており、他の CNG 濃度に対しても、式(1)~(3)を用いることにより、燃料ガス供給圧力に対する燃料噴射時間を大まかに予測することができる。

3・2 燃料ガス供給圧力の RE 特性に及ぼす影響

燃料ガス供給圧力が RE 特性に及ぼす影響について調査する。図 6 に各 CNG 濃度における燃料ガス供給圧力に対する RE 効率を示す。CNG 濃度によらず、燃料ガス供給圧力して RE 効率は 22.5% のほぼ一定の値を示している。これより、RE 効率は CNG 濃度および燃料ガス供給圧力によってほとんど影響を受けないことが分かる。

図 7 に各 CNG 濃度における燃料ガス供給圧力に対する RE の排ガス温度を示す。各 CNG 濃度において、燃料ガス供給

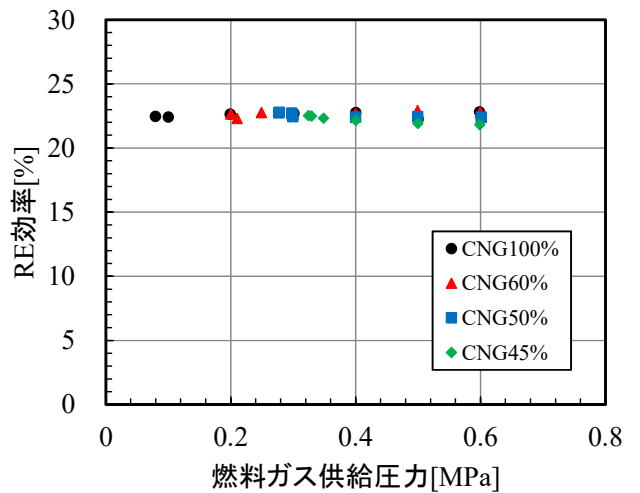


図 6 各 CNG 濃度における燃料ガス供給圧力に対する RE 効率

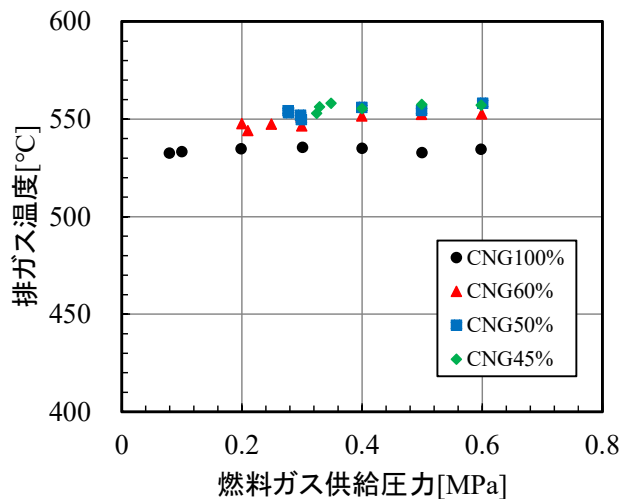


図 7 各 CNG 濃度における燃料ガス供給圧力に対する RE の排ガス温度

圧力に対して排ガス温度はほぼ一定である。一方、CNG濃度が低くなるに従って、排ガス温度が高くなる傾向を示している。参考までに図8に本実験における全ての燃料ガス供給圧力に対して、CNG濃度が排ガス温度に及ぼす影響を示す。これより、各CNG濃度での平均排ガス温度は、CNG濃度100%で534℃、60%で549℃、50%で554℃、45%で556℃と100%から45%まで22℃上昇している。

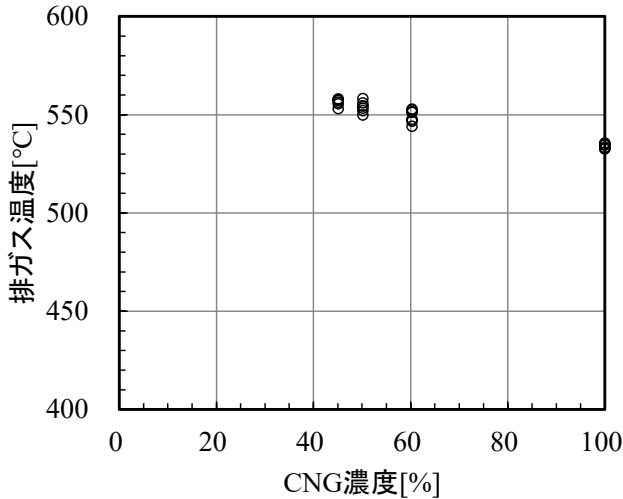


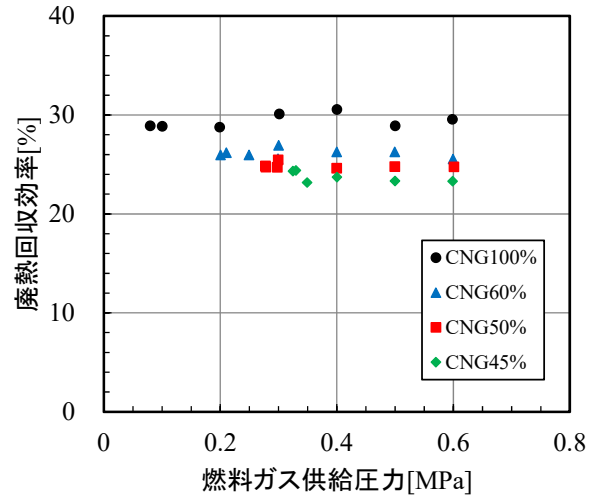
図8 CNG濃度が排ガス温度に及ぼす影響

3・3 燃料ガス供給圧力の廃熱回収特性に及ぼす影響

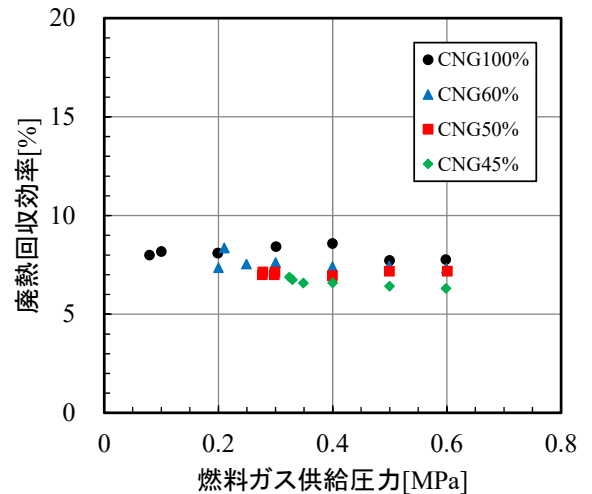
図9に各CNG濃度における燃料ガス供給圧力に対する廃熱回収効率を示す。(a)はラジエータ(二次側)、(b)はオイルクーラ(二次側)および(c)はそれらの合計の廃熱回収効率を示す。図9(a)より、各CNG濃度において、ラジエータ(二次側)の廃熱回収効率は、燃料ガス供給圧力に依存せず、CNG濃度100%で29.4%、CNG濃度60%で26.1%、50%で24.8%、45%で23.7%のほぼ一定の値をとっている。また、図9(b)より、オイルクーラ(二次側)においても、ラジエータ(二次側)と同様に、廃熱回収効率は、燃料ガス供給圧力に依存せず、CNG濃度100%で8.1%、CNG濃度60%で7.6%、50%で7.1%、45%で6.6%のほぼ一定の値をとっている。図9(c)はラジエータとオイルクーラの合計の廃熱回収効率であり、(a)および(b)と同様の傾向を示している。ところで、CNG濃度が低いほど廃熱回収効率は低下する傾向を示し、その傾向はラジエータ(二次側)で顕著である。参考までに、図10にCNG濃度が廃熱回収効率に及ぼす影響を示す。これより、前述のCNG濃度による廃熱回収効率への影響が明確に分かる。表2に各CNG濃度のREコジェネの平均特性をまとめて示す。

ここで、廃熱回収効率についてまとめる。ラジエータおよびオイルクーラからの廃熱回収効率は、図9および図10が示すとおり、燃料ガス供給圧力に依存せずほぼ一定の値をとるが、CNG濃度に依存し、CNG濃度が低いほど廃熱回収効率は低下する。一方、RE排ガス温度は、図7および図8が示すとおり、燃料ガス供給圧力に依存せずほぼ一定の値をとるが、CNG濃度に依存し、CNG濃度が低いほど排ガス温度は高くなっている。これらのことについて考察する。本

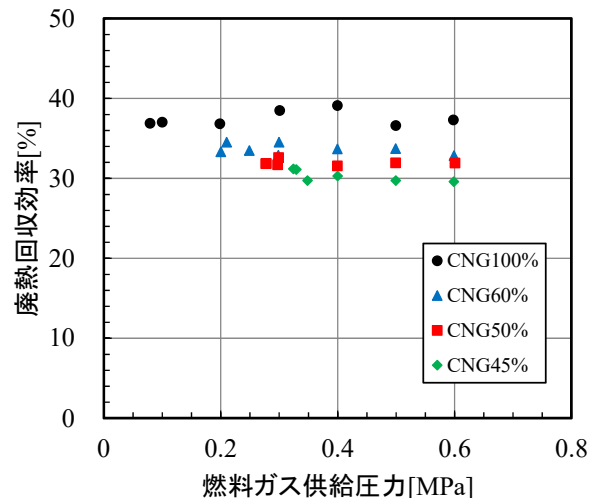
実験ではRE出力一定となるように調整されているが、図6より、RE効率はCNG濃度および燃料ガス供給圧力に関わらずほぼ一定であることから、廃熱量はCNG濃度および燃料ガス供給圧力に関わらずほぼ一定と推測される。CNG濃度が低いほど、ラジエータおよびオイルクーラからの廃熱回



(a) ラジエータ (二次側)



(b) オイルクーラ (二次側)



(c) 合計

図9 各CNG濃度における燃料ガス供給圧力に対する廃熱回収効率

表 2 各 CNG 濃度における RE コジェネの平均特性

項目	CNG100%	CNG60%	CNG50%	CNG45%	
回転速度 [rpm]	2071	2062	2059	2037	
RE 効率 [%]	22.6	22.7	22.6	22.2	
発電効率 [%]	21.3	21.5	21.4	21.1	
廃熱回収効率	ラジエータ (二次側) [%]	29.4	26.1	24.8	23.7
	オイルクーラ (二次側) [%]	8.1	7.6	7.1	6.6
	合計 [%]	37.5	33.6	31.9	30.3

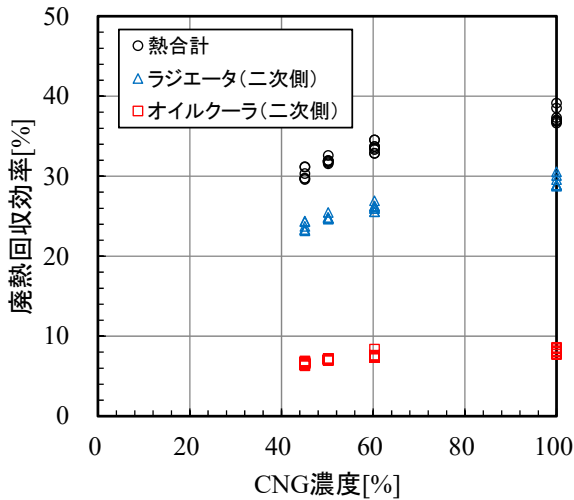


図 10 CNG 濃度が廃熱回収効率に及ぼす影響

収効率が低くなることは、RE 内での燃焼による熱量が、CNG 濃度が低い場合、燃料ガスに予め混合された CO₂ に与えられ、排ガスとして排出されるためと考えられる。このことは、図 8 における CNG 濃度が低いほど、排ガス温度が高くなることとも対応する。このことから、低 CNG 濃度のガスを燃料とする場合に、コジェネレーションの廃熱回収効率を高めるためには、排ガスからの廃熱回収がより重要となると考えられる。

4. 結 言

本実験の範囲において以下のことが分かった。

- (1) 種々の CNG 濃度に対して、燃料ガス供給圧力が低下すると、急激に燃料噴射時間は長くなる。
- (2) 燃料ガス供給圧力と燃料噴射時間の関係は累乗関数で近似でき、その係数と指数は CNG 濃度に依存する。

この係数および指数の CNG 濃度依存性を考慮して近似式を求めることにより、種々の CNG 濃度に対して、燃料ガス供給圧力に対する燃料噴射時間が概ね予測できる。

- (3) RE 効率は、CNG 濃度および燃料ガス供給圧力によってほとんど影響を受けない。一方、排ガス温度は、燃料ガス供給圧力によってほとんど影響を受けないが、CNG 濃度の低下とともに高くなる傾向を示す。
- (4) ラジエータおよびオイルクーラからの廃熱回収効率は、燃料ガス供給圧力によってほとんど影響を受けない。一方、CNG 濃度が低下するにつれてそれらからの廃熱回収効率は低下する。
- (5) (3) および (4) の結果から、低 CNG 濃度のガスを燃料とする場合に、コジェネレーションの廃熱回収効率を高めるためには、排ガスからの廃熱回収がより重要となる。

本システムの開発の取組に際しては、マツダ(株)様に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、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) 池田悟至, 山田誠治：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, 山口県産業技術センター研究報告, **29**, p. 15-18 (2017).