廃食油 FAME を用いたトリジェネレーションシステムにおける 熱電比および CO₂ 排出特性*

近藤 千尋^{*1}, 山根 浩二^{*2}, 吉田 千廣^{*3}, 小坂田 潔^{*4}, 河崎 澄^{*1}

The Characteristics of Ratio of Heat and Electricity and Exhaust CO₂ in Tri-Generation System Fuelled by Fatty Acid Methyl Ester Derived from Waste Cooking Oil

Chihiro KONDO^{*1}, Koji YAMANE, Chihiro YOSHIDA, Kiyoshi OSAKADA
and Kiyoshi KAWASAKI

^{*1} The Univ. of Shiga Prefecture. Dept. of Mechanical Systems Engineering
2500 Hassaka-cho, Hikone, Shiga, 522-8533 Japan

The aim of this study is to propose a new energy system "trigeneration", which is developed from cogeneration system. In this system, comparing with ordinal cogeneration system, CO₂ in exhaust gas is also used as an energy resource for photosynthesis etc., for example, in order to grow plant or cultivate microalgae which include the component of liquid fuel. In this paper, the characteristics of ratio of heat-electricity, and CO₂ emissions were investigated in the case of using fatty acid methyl ester derived from waste cooking oil. And by using these experimental results the CO₂ emissions from trigeneration system was simulated. As the result, it is shown that CO₂ emissions are possible to decrease considerably compared with using petro-diesel fuel.

Key Words : Biomass Energy, Renewable Energy, Cogeneration, Diesel Engine, FAME, Trigeneration

1. 緒 言

近年の化石燃料の枯渇問題や地球温暖化を受け、エネルギー資源のさらなる高効率利用や再生可能な代替燃料の活用が求められている。エネルギーの高効率利用の方法として動力源からの排熱を回収し、熱も同時に供給するコージェネレーションシステムがあるが、さらなるエネルギー有効利用の観点から、本研究ではこのようなシステムから排出される CO₂ も植物などの光合成で回収される資源と考えるトリジェネレーションシステム（以下トリジェネと略す）を提案する。図 1 にトリジェネの概念図を示す。トリジェネでは、発生する CO₂ を有効利用するシステムで油糧作物の栽培や油分を有する微細藻類の培養に利用すればトリジェネに用いるバイオディーゼル燃料である脂肪酸メチルエステル (Fatty Acid Methyl Ester: FAME) の原料が得られる。

本研究では、トリジェネの可能性を探るため、FAME を燃料としたディーゼル機関コージェネレーションシステムを用いて熱電負荷特性および CO₂ 排気特性を調べた。また、本システムで CO₂ を活用して植物栽培・微細藻類培養をすることを想定して、その栽培・培養の規模の試算を行った。

2. 実験装置および方法

2・1 小型ディーゼル機関コージェネレーションシステム

実験は、発電能力が定格 9.9kW、給湯能力が 62MJ/h(カタログ値)の屋外設置型小型ガス機関コージェネレーションシステム(ヤンマー製, CP10VB)の機関をディーゼル機関(総排気量が 1.642L, 縦型水冷四サイクル三気筒直

* 原稿受付 2012 年 7 月 2 日

^{*1} 正員, 滋賀県立大学工学部 (〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町 2500)

^{*2} 正員, フェロー, 滋賀県立大学工学部

^{*3} 滋賀県立大学大学院工学研究科

^{*4} 滋賀県立大学工学部

E-mail: kondo.c@mech.usp.ac.jp

Fig.1 Concept of tri-generation system

Fig.2 Layout of experimental apparatus

噴式) に改造したシステムを使用した。なお、排気管出口付近にはカセット式ディーゼル微粒子フィルタ DPF コモテック, モコビーCT/RE)を設置し, 白煙や黒煙等の排気微粒子の排出を抑制した。

図 2 は, 本システムの排熱回収の概略図を示す。まず, 排気熱交換器にて排熱を回収したクーラント(冷却水約 50vol%, プロピレングリコール約 50vol%)は, 機関本体へと流入し, 燃焼室の冷却を通じて, 機関本体から排熱を回収する。排熱を回収し終えたクーラントは, その後, 温水熱交換器やラジエータにより外部への放熱を行い, 所定の温度まで冷却された後, 再び排気熱交換器へと戻る。なお, 放熱しない経路も設置している。また, 本システムの発電出力は, 滋賀県立大学の施設内の照明設備に系統連系されている。

2・2 各種測定機器および測定方法

実験では, システム搭載機関の排気性能, 燃費, 発電電力および回収排熱量の測定を行った。排気成分は, 排気熱交換器後の排気管からダイヤフラムポンプ(テクノ高槻, SPP-3EBS)で排気を捕集し, 検知管式気体測定器(ガステック, GV-100S)および検知管(ガステック, 気体検知管 No.2H, No.11HA)を用いて微細藻類培養の資源となる CO₂ と窒素酸化物(NO_x)の 2 成分についてのみ測定した。燃料消費量は玉型ビュレットを用いて一定量の消費時間を測定し, 正味燃料消費率を算出した。また, 発電電力, 機関回転数, 冷却水温度および潤滑油温度は, 本システムの表示パネルから値を読み取った。回収排熱量は, 温水熱交換器を通過する温水流量および熱交換器出入口における温水温度から求めた。さらに, 気温および湿度はデジタル温度・湿度計(佐藤計量器, ハイエスト II, No.7542), 気圧はチャンバー気圧計(佐藤計量器, BAROMEX, No.7612)を用いてそれぞれ測定した。

2・3 供試燃料

本実験では, 燃料に市販の廃食油 FAME (製造元: 油籐商事) を B100 で用いた。表 1 に供試燃料の主な性状を示す。なお, 燃料は著者らの開発した酸化防止剤⁽¹⁾のみ添加し, 低温流動性向上剤は添加せずに使用した。

Table1 Fuel properties of waste cooking oil methyl ester

Density	g/cm ³	0.883	LHV	MJ/kg	37.0
Kinematic Viscosity	mm ² /s@40℃	4.2	Acid Value	mgKOH/g	0.39
Pour Point	℃	-7	Carbon	wt%	78.4
Cloud Point	℃	-4	Hydrogen	wt%	12.2
Flash Point	℃	178	Water	wt%	0.042

2・4 実験条件

実験では機関回転数を 1700rpm とし, 発電電力を系統的に変化させた負荷試験と, 長期間運転での負荷追従特性を調べる毎日発停運転試験(DSS: Daily Start and Stop)を実施した。負荷試験を行う際の負荷の調整は建物内で点灯させる蛍光灯の本数を変えることで行った。温水には施設内にある水道水を用い, 負荷試験では流量は 40L/min とした。

2・5 熱電特性の評価方法

本実験では、コージェネレーションシステムの特性を下記の指標を用いて評価した。まず、システムの燃費を表す正味燃料消費率は、発電電力あたりの投入燃料消費量として求めた。また、温水からの回収熱量 Q および発電出力 P を用いて、コージェネレーションシステムから得られる熱電比 r を次のように計算する。

$$r = Q / P \quad (1)$$

さらに、 P および Q を用いてシステム全体の総合効率 η_{total} を下記で評価した⁽²⁾。ただし、 η_{total} には温水、ラジエータ駆動に要する動力は考慮していない。

$$\eta_{total} = (P + Q) / (LHV \times G) \times 100 [\%] \quad (2)$$

ここで LHV [MJ/kg] は投入燃料の低位発熱量、 G [kg/s] は燃料質量流量である。

3. 実験結果および考察

3・1 廃食油 FAME を用いた小型ディーゼル機関コージェネレーションシステムの熱電特性および排気特性

図 3 に負荷に対する燃料消費率 (BSFC)、CO₂ と NOx の排出特性、熱電比 r および総合効率 η_{total} を示す。なお、本試験中は、外気温が約 5℃、また冷却水温度は約 60℃、潤滑油温度は約 50℃と負荷によらずほぼ一定であった。図より、BSFC については、負荷に対して単調に減少する。これは、負荷が高くなるほど出力に対する摩擦損失の割合が低下するためである。

排気について、負荷が高くなるにつれ投入熱量が増加し燃焼温度が高くなるために CO₂、NOx 排出量が増加する傾向にある。CO₂ について最大負荷付近では BSFC がさほど変わらないために排出濃度の変化も小さくなる。

また、熱電比 r は、発電出力の増加とともに低下する。これは、投入熱量の増大とともに回収熱量は増加するものの、その増加は摩擦損失割合の低下による発電電力増加に比べて小さくなるためである。なお、 r は最小燃費となる最大負荷付近ではおよそ 1.2 となる。

Fig.3 Effect of load on system performance and emissions

3・2 冬季 DSS 運転時の熱電負荷特性および排気特性

つぎに、トリジェネレーションシステムとしての通常運転時の基本性能を把握するために、大学施設内での DSS 運転特性について示す。ここでは、温水の流量は 30L/min～48L/min となるように調節し、5 日間の運転における熱電負荷、排気および燃料消費率の時間変化を調査した。なお、この 5 日間は図 4(a)の気温、湿度および大気圧変化に示すような彦根市の典型的な冬季の日である。

図 4(b)に 5 日間の燃料消費率、熱電比、発電端出力および回収熱量の変化を、(c)に排気特性を、(d)に機関冷却水温度および油温を示す。なお、各日について暖機を約 30 分から 1 時間した後の 9 時から 17 時までを測定時間としている。(b)のように、発電端出力は 5 日間のあいだ、最大発電端出力 (9.9kW) よりやや低めの 6～9kW 程度で変化している。これは、負荷である建物内の照明など、建物内の部屋の使用状況に追従していると言える。なお、本システムは系統連系しているものの余剰電力の逆潮流はできないため、負荷が低下すれば自動的に発電量が調整され低下する。(b)および(c)より、CO₂、NOx および BSFC は実験中に大きな変化は見られなかった。これは、負荷が大きく変化しなかったことや、(d)に示すように外気温に対しても機関冷却水温度や油温が一定となる制御がはたらいだためと考えられる。

Fig.4 Changes of various properties in five usual winter days

一方で、(b)より回収熱量と熱電比に関しては、3日目にやや低下している。これは、試験3日目の天候が風雪となり、(a)に示すように気温が低下したことから、(d)に示すように機関入口冷却水温度を一定とする制御がはたらき放熱量が抑制されたためと考えられる。したがって、トリジェネレーションにおいて、CO₂および回収熱量を概ね一定比率となるように供給する場合には貯湯槽などのバッファがあることが望ましいと考えられる。なお、本システムの他の季節における性能については引き続き調査する予定である。

3・3 トリジェネレーションシステムによる CO₂利用率の試算

つぎに、上記までの実験結果をもとに、トリジェネを油糧植物栽培か燃料油成分を含む微細藻類培養に適用した場合の CO₂利用率と栽培・培養の規模を試算する。図5はトリジェネを温室栽培に適用した場合の模式図である。ここでは、トリジェネから回収した熱量 Q_r [W]すべてを温室の保温に用いると仮定し、その時に最大限得られる植物栽培面積から、植物の光合成による CO₂固定量を試算し次式でトリジェネ後の CO₂排出量を評価する。

$$Total_{CO_2} = Exh_{CO_2} - A/24 \cdot S(Q_r) \quad (3)$$

$Total_{CO_2}$: トリジェネ後の CO₂排出量[g-CO₂/h], Exh_{CO_2} : 機関出口の CO₂排出量[g-CO₂/h]

A : 作物の CO₂固定能[g-CO₂/m²/day](植物 5, 微細藻類 50)⁽⁴⁾, S : 温室の作物栽培面積[m²]

Fig.5 Model of tri-generation system for producing plant or cultivating microalgae

なお、本試算にはつぎの仮定を設けた。(1)温水回収熱量 Q_r と温室からの放熱量 Q_{loss} が等しい。(2)温室内温度 T_{in} は藻類培養等に適した 30°C程度とし、温室の周囲空気温度 T_{out} は実験を行った冬場を想定し 10°C程度とする。(3)自然対流熱伝達を仮定し、熱伝達率 $h = 5 \sim 10$ [W/(m²・K)]程度とする。ただし、輻射による損失は考慮しない。(4)温室の大きさは、放熱面積が最小となるように縦横の長さが等しいとし、また、微細藻類培養における光合成時の光量確保を想定して高さを 0.3m とする⁽⁵⁾。(5)植物や微細藻類の CO₂固定能 A は、CO₂濃度や温度など環境条件に依存せず一様とする。これらより各発電負荷 P における最大栽培面積 S は、

$$Q_{loss} = Q_r \quad (4)$$

$$Q_{loss} = h(T_{in} - T_{out})(S + 0.3\sqrt{S} \times 4) \quad (5)$$

(4), (5)を S について解けば、実測の Q_r , および T_{in} , T_{out} から S が以下のように定まる。

$$\therefore S = \left(\sqrt{Q_r / (h(T_{in} - T_{out})) + 0.36} - 0.6 \right)^2 \quad (6)$$

また、廃食油 FAME を使用することから、カーボンニュートラルの考えにより CO₂ 排出量がオフセットできる。ここでは、廃食油 FAME を地産地消すると考え、中島⁽⁴⁾の LCA 結果を利用し Well to Wheel (WtW) で評価した。

図 6 に発電負荷 P に対する CO₂ 排出量の計算結果を、廃食油 FAME (カーボンニュートラル考慮)、廃食油 FAME 使用に加えトリジェネによる植物栽培を考慮、および廃食油 FAME 使用に加えトリジェネによる微細藻類培養を考慮した 3 条件を、軽油と併せて示す。これより、廃食油 FAME 使用により排出 CO₂ がおよそ半減し、さらにトリジェネにて CO₂ 固定能が高い藻類バイオマス⁽³⁾⁽⁵⁾を培養することで、更に CO₂ 排出量を低減できる可能性があることがわかる。また、図 7 には、各負荷 P に対する回収熱量 Q_r より求まる最大温室面積 S を示す。これより、全負荷においては約 10m 四方の大きさとなる。

なお、今回試算に用いた CO₂ 固定能 A [g-CO₂/m²/day] は、微細藻類の種類や温度、圧力、湿度、光量および CO₂ といった環境条件に大きく左右され则认为られ、トリジェネの可能性を検討する上では今後実測を通じた検討が必要である。また、今回の規模の試算は回収熱全てを栽培・培養に用いた場合であり、冬期に施設の暖房や給湯に回収熱を用いた場合を想定すると栽培・培養の規模は今回の場合より小さくなる。

Fig.6 Emission of carbon dioxide from tri-generation system

 Fig.7 Effect of load on the size of growing area S

4. まとめ

本研究では、コージェネレーションシステムを発展させ、機関排出 CO₂ も資源として回収するトリジェネレーションシステムの可能性を検討するため、廃食油 FAME を用いた小型ディーゼル機関コージェネレーションシステムの熱電負荷特性および排気特性を調査し、排出 CO₂ と回収熱量から、微細藻類の培養規模などを試算した。

その結果、本システムの最適燃費における熱電比は約 1.2 である。また、寒冷期における長期負荷追従運転(DSS)の結果、燃料消費率、排気特性に及ぼす外気温等の影響は少なく、発電負荷に対して安定した CO₂ 排出量となる。一方、回収熱量は外気温等の影響を受け変化するため、安定した熱供給とするためには貯湯槽などのバッファがあることが望ましい。一方、トリジェネレーションシステムによる CO₂ 固定量を試算したところ、FAME 使用により軽油使用時の排出 CO₂ の約半分となる。また、回収熱をすべて利用した場合の微細藻類培養の規模は全負荷運転で、およそ 10m 四方の規模となることが推算された。

本研究は文部科学省「地域イノベーション戦略支援プログラム」の助成を受けたものである。なお、本研究の遂行に際し、滋賀県立大学学生 木村圭佑氏より多大の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) 山根浩二, 河崎澄, 森耕太郎, 山本純平, 田辺剛, 柴田絵美子, バイオディーゼル燃料に対する多種酸化防止剤の混合添加による相乗効果, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.2(2010), pp.449-454.
- (2) 日本機械学会編, 機械工学便覧応用システム編 g5 エネルギー供給システム(2005), p.75, 日本機械学会.
- (3) 蔵野憲秀, 福田裕章, 永久保雅夫, 渥美欣也, “微細藻類によるバイオマス燃料生産”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.14(2009), pp.59-64.
- (4) 中島寛則, “家庭系廃食油のバイオディーゼル燃料化モデル事業における LCA 手法を用いた CO₂ 排出量の推計”, 名古屋市環境科学研究所報, Vol.40(2011), pp.15-18.
- (5) 渡邊信, “藻類バイオマスエネルギー技術の課題と展望”, 日本機械学会誌, Vol.113, No.1098(2010), pp.32-35.