

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

JSAE エンジンレビュー

特集 : ガスコージェネレーション

コラム : 「はかる」仕事



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム : 「はかる」仕事 1
Measurement work
西川 雅浩
Masahiro Nishikawa
株式会社堀場製作所
Horiba, Ltd.
- コージェネレーションとは 2
Cogeneration system / Combined Heat and Power (CHP)
片山 晋
Susumu Katayama
(一財) コージェネレーション・エネルギー高度利用センター
Advanced Cogeneration and Energy Utilization Center Japan
- ガスエンジンコージェネレーションシステム 7
Gas Engine Cogeneration System
遠藤 浩之
Hiroyuki ENDO
三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社
Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger, Ltd.
- 天然ガスデュアルフュエル機関 14
Natural Gas Dual Fuel Engines
佐古 孝弘
Takahiro SAKO
大阪ガス株式会社
OSAKA GAS CO., LTD.
- SOFC 燃料電池コージェネレーションについて 20
SOFC Cogeneration System
岸沢 浩
Hiroschi KISHIZAWA
三菱日立パワーシステムズ株式会社
Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正(慶應義塾大学)

副委員長: 村中 重夫(元・日産自動車)

幹事: 飯島 晃良(日本大学)

委員: 遠藤 浩之(三菱重工エンジン&ターボチャージャ)

大西 浩二(日立オートモティブシステムズ)

奥井 伸宜(自動車技術総合機構)

菊池 勉(日産自動車)

小池 誠(豊田中央研究所)

小酒 英範(東京工業大学)

清水 健一(元・産業技術総合研究所)

下田 正敏(元・日野自動車)

西川 雅浩(堀場製作所)

野口 勝三(本田技術研究所)

平井 洋(日本自動車研究所)

細谷 満(日野自動車)

山崎 敏司(編集)

渡邊 学(JXTG エネルギー)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会

発行日: 2019年3月25日

発行人: 大下守人(アイシン精機)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 9 No. 1 2019

「はかる」仕事

Measurement work



西川 雅浩
Masahiro Nishikawa

株式会社堀場製作所
Horiba, Ltd.

私は、大学時代に「ヨウ化カリウム (KI) 単結晶の極低温化での励起子挙動」の研究をしていた。「励起子」というのは、特定波長の真空紫外吸収により価電子帯の電子が伝導帯に遷移することで、価電子帯に正孔、伝導帯には電子が存在するようになり、その電子と正孔がクーロン引力で対になっている状態をいう。当時は、この励起子の挙動を、反射・発光スペクトルで測定することに明け暮れていた。それには、まず、高純度 (99.99%以上) のKI粉末試料を石英管に入れ、酸素水素バーナーを使って試料を熔融させ、その石英管を真空下で封じ切り、ゆっくり冷却させてKI単結晶を製作する。次に、石英管から取り出した単結晶を厚さ数mmに劈開し、重水素ランプ (200~350nm) と収差の少ない凹面鏡で収束させた真空紫外線を分光器に通して劈開した結晶片に照射してスペクトルを測定する。その際、結晶片を液体窒素とクライオスタットで極低温 (液化ヘリウム温度4.2K) かつ油拡散ポンプとロータリーポンプを組合せ高真空 (1Torr) に保つ。この一連の作業を繰り返し行い、全てのプロセスや条件が整ったときに本当に美しい光学スペクトルが得られた。私が計測機メーカーに就職したのも、この大学時代の研究に不可欠であった計測の影響が大きい。

就職後は、エンジン排出ガス中の有害物質、すなわち一酸化炭素 (CO) や炭化水素 (HC)、窒素酸化物 (NOx) の濃度測定に用いる分析計およびサンプリング装置などを長年開発してきた。単に排出されてくるガスを測定するだけでなく、自然に、その排出源であるエンジンそのものや排出ガスを浄化する後処理システムに興味を持つようになっていった。そして、排出ガスを測ることとエンジン燃焼・制御とは、重要な関係があることを知るようになった。例えば、ご存知のように、三元触媒ではエンジンから排出されるCO, HC, NOxを、酸化還元反応により同時に除去できる。ただし、この触媒が有効に機能するには、エンジンにおけるガソリンと空気の量が理論空燃比 (ストイキオメトリ) である1:14.7付近であることが条件となる。また、EGR (排気再循環) でエンジンのノッキングやNOx生成が抑制できること、エンジンの排出ガスからカーボンバランス法 (ガソリン中の炭素質量は、排出ガス中の炭素質量と等しい) により燃費が計れたりすることを知った。優れたエンジンや排出ガス後処理システムを開発するために、計測システムによる排出ガスの濃度計測や空燃比、燃費計測が重要なツールになりうることを改めて認識したのである。

自動車産業は、「CASE」と呼ばれる「Connected (つながる)」、「Autonomous (自動運転)」、「Shared (カーシェア)」、「Electrification (電動化)」、そして「AI (人工知能) 化」の5つで大きな変革期を迎えようとしている。数年前から、内燃機関の自動車がすべて電気自動車にとって代わられる、というような論調をよくみかけた。当時、「自動車のEV化が進むと、排出ガス計測の需要がなくなり、ビジネス上、困るのではないですか」と聞かれることがよくあった。そのたびに、「必ずしも電動化=EV化ではない。ハイブリッド・プラグインハイブリッド・燃料電池も含め、内燃機関と電気をさまざまな形態で組み合わせることで、パワートレインはこれまで以上に多様化していく。」と答えていた。当面は、高効率エンジンを使ったハイブリッド車やプラグインハイブリッド車のシェアが高まっていくのであろう。そのハイブリッドシステムも各種多様だ。自動車の「はかる」ニーズやビジネスチャンスは、逆に広がっている。

技術開発上の課題がある限り、「はかる」仕事はなくなることはない。すべては「はかる」仕事からはじまると思う。今後も自動車業界において「はかる」技術を追求することでイノベーションを創発していきたい。

コージェネレーションとは

Cogeneration system / Combined Heat and Power (CHP)

片山 晋

Susumu Katayama

(一財) コージェネレーション・エネルギー高度利用センター

Advanced Cogeneration and Energy Utilization Center Japan

1. はじめに

「コージェネレーションシステム」とは、熱源より電力と熱を生産し供給するシステムの総称であり、国内では「コージェネ」あるいは「熱電併給」、海外では、「Combined Heat and Power」(CHP) あるいは「Cogeneration」などと呼ばれる。発電と同時に熱を回収するため、極めて高い総合効率が得られる省エネルギーなシステムである。本文では、以下コージェネと表記する。

コージェネは、内燃機関や外燃機関を用いた発電装置や燃料電池で発電を行い、そこから排出される熱エネルギーを順次加熱源などとして利用するシステムである。熱エネルギーの利用においては、図1に示す高温から順次低温へと有効利用するカスケード利用(多段階利用)が効率上優れているが、その概念を具体化したシステムがコージェネである。

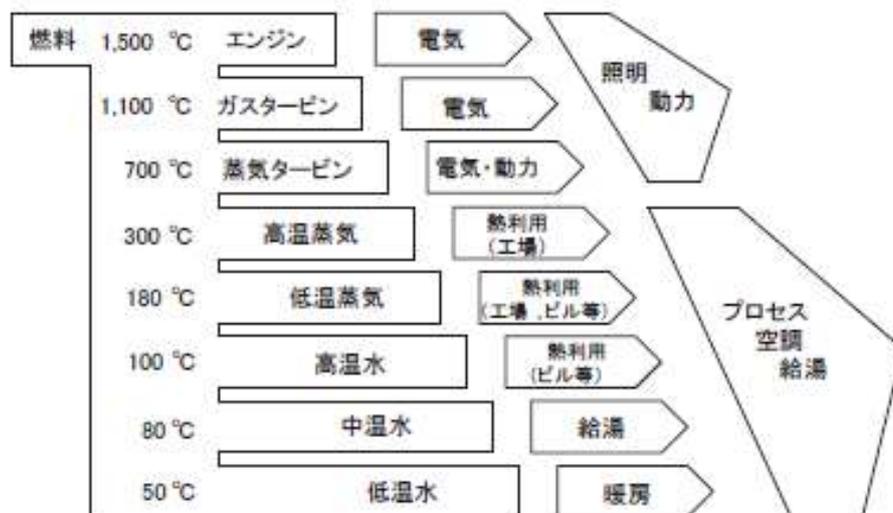


図1 熱のカスケード利用

内燃機関の天然ガスを燃料とする火花点火(SI)エンジン(以下ガスエンジン)を用いたコージェネの基本構成例を図2に示す。電力は商用系統と連系し供給され、廃熱はプロセスでの利用(蒸気)や廃熱利用吸収冷凍機の熱源(空調用などの冷水製造)、また、熱交換器を介して暖房や給湯に用いられる。発電と同時に熱を回収し、最大限利用すれば90%(LHV(低位発熱量)基準)と極めて高い総合効率が得られる。

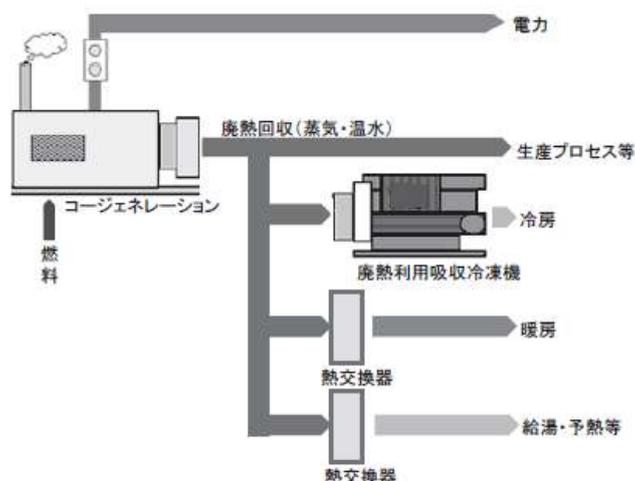


図2 コージェネの基本構成例

2. コージェネレーションシステムの導入推移

日本で最初に実用化されたコージェネは、1909年に赤坂離宮に採用され小型ガスエンジン発電機の排気を暖房に用いる方法だったとされている。しかし、本格導入は1970年代以降となる。図3に年度別のコージェネ新設導入容量の推移を示す。当初はディーゼルエンジンが多かったが、環境意識の高まりなどによりガスタービン、ガスエンジンに取って代わられた。2004年以降エネルギー価格高騰や景気後退で導入量が減少したが、2011年の東日本大震災を機にBCP（事業継続計画）対応として電源確保のため導入量も回復した。そして現在、省エネルギー、BCPの観点からコージェネ導入が進み、2018年3月末現在の導入実績は累計1,060万kWに達する。

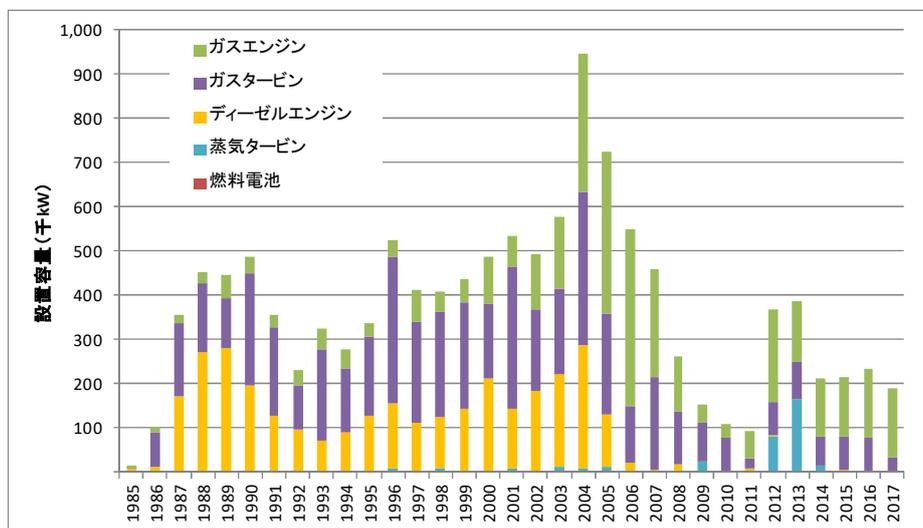


図3 年度別コージェネ新設導入容量推移

3. エネルギー政策におけるコージェネの位置づけ

エネルギー基本計画は、2002年6月に制定されたエネルギー政策基本法に基づき、政府が策定するもので、「安全性」、「安定供給」、「経済効率性の向上」、「環境への適合」というエネルギー政策の基本方針に則り、エネルギー政策の基本的な方向性を示すものである。「第5次エネルギー基本計画」が2018年7月に閣議決定され、2030年のエネルギーミックス（長期エネルギー需給見通し：2015年7月経済産業省決定）の確実な実現に向けた取組の更なる強化と、新たなエネルギー選択として2050年のエネルギー転換・脱炭素化に向けた挑戦が掲げられた（図4）。

第5次エネルギー基本計画

長期的に安定した持続的・自立的なエネルギー供給により、我が国経済社会の更なる発展と国民生活の向上、世界の持続的な発展への貢献を目指す
3E+Sの原則の下、安定的で負担が少なく、環境に適合したエネルギー需給構造を実現

「3E+S」	⇒	「より高度な3E+S」
○ 安全最優先 (Safety)	+	技術・ガバナンス改革による安全の革新
○ 資源自給率 (Energy security)	+	技術自給率向上/選択肢の多様化確保
○ 環境適合 (Environment)	+	脱炭素化への挑戦
○ 国民負担抑制 (Economic efficiency)	+	自国産業競争力の強化

情勢変化 ①脱炭素化に向けた技術間競争の始まり ②技術の変化が増幅する地政学リスク ③国家間・企業間の競争の本格化

2030年に向けた対応	2050年に向けた対応
<p>～温室効果ガス26%削減に向けて～ ～エネルギーミックスの確実な実現～</p> <ul style="list-style-type: none"> - 現状は道半ば - 計画的な推進 - 実現重視の取組 - 施策の深掘り・強化 <p><主な施策></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 再生可能エネルギー [震災前10%→30年22~24%] ・主力電源化への布石 ・低コスト化, 系統制約の克服, 火力調整力の確保 ○ 原子力 [震災前25%→30年22~20%] ・依存度を可能な限り低減 ・不断の安全性向上と再稼働 ○ 化石燃料 [震災前65%→30年56%] ・化石燃料等の自主開発の促進 ・高効率な火力発電の有効活用 ・災害リスク等への対応強化 ○ 省エネ [実質エネルギー効率35%減] ・徹底的な省エネの継続 ・省エネ法と支援策の一体実施 ○ 水素/蓄電/分散型エネルギーの推進 	<p>～温室効果ガス80%削減を目指して～ ～エネルギー転換・脱炭素化への挑戦～</p> <ul style="list-style-type: none"> - 可能性と不確実性 - 野心的な複線シナリオ - あらゆる選択肢の追求 - 科学的レビューによる重点決定 <p><主な方向></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 再生可能エネルギー ・経済的に自立し脱炭素化した主力電源化を目指す ・水素/蓄電/デジタル技術開発に着手 ○ 原子力 ・脱炭素化の選択肢 ・安全炉追求/バックエンド技術開発に着手 ○ 化石燃料 ・過渡期は主力、資源外交を強化 ・ガス利用へのシフト、非効率石炭フェードアウト ・脱炭素化に向けて水素開発に着手 ○ 熱・輸送、分散型エネルギー ・水素・蓄電等による脱炭素化への挑戦 ・分散型エネルギーシステムと地域開発 (次世代再エネ・蓄電、EV、マイクログリッド等の組合せ)

基本計画の策定 ⇒ 総力戦 (プロジェクト・国際連携・金融対話・政策)

図4 第5次エネルギー基本計画 (概要)

(出典: 資源エネルギー庁HP, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703_01.pdf)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

従来の大規模な発電所から広域に電気を供給する大規模集中型電源では、利用されない廃熱と送電による損失で、燃料の持つ熱エネルギーの40%ほどしか利用できていない。それに対し、エネルギー基本計画で推進すべきとされている分散型エネルギーシステムでは、エネルギーの需要地で発電するため送電の損失が少なく、熱も利用するコージェネでは燃料の持つ熱エネルギーの90%程度が利用できる。また、分散型エネルギーシステムはこの様な省エネルギー以外の意義もあり、表1に分散型エネルギーシステムの一つであるコージェネに関して基本計画に記載されている意義と主な内容をまとめた。

表1 第5次エネルギー基本計画におけるコージェネに関する記載

コージェネの意義	記載抜粋
①省エネルギーの推進	(P62)業務・産業用年燃料電池の普及に向けては…技術開発を進めるとともに、分散電源として大規模集中型電源を超える発電効率(60%)を備える機器の開発、実装を進める。 (P24)我が国の最終エネルギー消費の現状においては、熱利用を中心とした非電力での用途が過半数を占めている。 (P69)効率的な熱供給の推進…主に高温域を占める産業用に関しては…コージェネレーションの利用や廃熱のカスケード利用促進を行うことが重要
②再生可能エネルギーの導入促進	(P62)“水素社会”の実現に向けた取組の抜本強化…水素から高効率に電気・熱を取り出す燃料電池技術と組み合わせることで、電力、運輸のみならず、産業利用や熱利用、様々な領域で究極的な低炭素化が可能 (P45)コージェネレーション…などの需要家側に設置される分散型エネルギーリソースを活用するVPP…といった次世代の調整力を活用し、調整力の脱炭素化を進めていくことが重要
③需要サイドが主導する柔軟な需給構造の実現	(P73)需要家側において熱と電気を一体として活用することで、高効率なエネルギー利用を実現するコージェネレーションは、ハイブリッド型の二次エネルギーである。省エネルギー性に加え、送電ロスが少なく、再生可能エネルギーとの親和性もあり、電力需給ピークの緩和、電源構成の多様化・分散化、災害に対する強靱性を持つ。
④国土強靱化への貢献	(P72)再生可能エネルギーやコージェネレーション、蓄電池システムなどによる分散型エネルギーシステムは、危機時における需要サイドの対応力を高めるものであり、分散型エネルギーシステムの構築を進めていく。
⑤地域経済の活性化	(P77)地域のエネルギーを地域で有効活用する地産地消型エネルギーシステムは、省エネルギーの推進や再生可能エネルギーの普及拡大、エネルギーシステムの強靱化に貢献する取組として重要であり、また、コンパクトシティや交通システムの構築等、まちづくりと一体的にその導入が進められることで、地域の活性化にも貢献…する。
⑥エネルギーを通じた国際協力の展開	(P80)アジアの国々が、LNGの導入を進めるための制度やインフラの整備を進めていく際…上流も含めたLNGサプライチェーン整備へのファイナンス・技術協力をを行うこと…で、アジアのLNG導入国が効率的に新たなエネルギー供給構造を構築していくことを支援することが可能

※赤字が特に該当する箇所、下線は他の意義の該当箇所。

また、「第5次エネルギー基本計画」では、2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化への挑戦が掲げられているが、需要に対応するエネルギー技術の不確実性のため、“全方位に向けた野心的な複線シナリオを採用する”とある。このような不確実な中でも、コージェネを含む分散型エネルギーシステムへの期待は上述の様に大きく、課題解決方針として“燃料電池システムの技術革新”、“電力・熱・輸送のシステムをコンパクトに統合した効率的で安定、かつ脱炭素化につながる需要サイド主導の地域における分散型エネルギーシステムの成立の可能性を高めていく”とある。そして、“技術に裏打ちされ経済的で安定した分散型エネルギーシステムの開発を主導し、世界に提案するとの姿勢で臨む”と結ばれている。

4. コージェネの種類と技術動向

コージェネは原動機型発電・電気化学的発電に大別され、発電方式は、ガスエンジン・ガスタービン・ディーゼルエンジン・燃料電池に分類される。それぞれのコージェネの発電出力と発電効率を図5に、コージェネの主な仕様を表2に示す。

最近の動向としては、ガスエンジンコージェネでは、2MW級で発電効率48.0% (LHV基準)、4~8MW級で発電効率49.9% (LHV基準)と高効率化が進んでいる。また、5~35kW級を複数台下水処理場に設置するなど、バイオガス燃料の利用も増えている。

ガスタービンコージェネでは6MW級で発電効率39.3% (LHV基準)、50MW級の大型ガスタービンコージェネでは発電効率41.7% (LHV基準)が開発され、大規模工場向けに導入されている。

燃料電池では、普及している家庭用に加え業務用の導入も進み、発電効率55% (LHV基準)を達成している。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

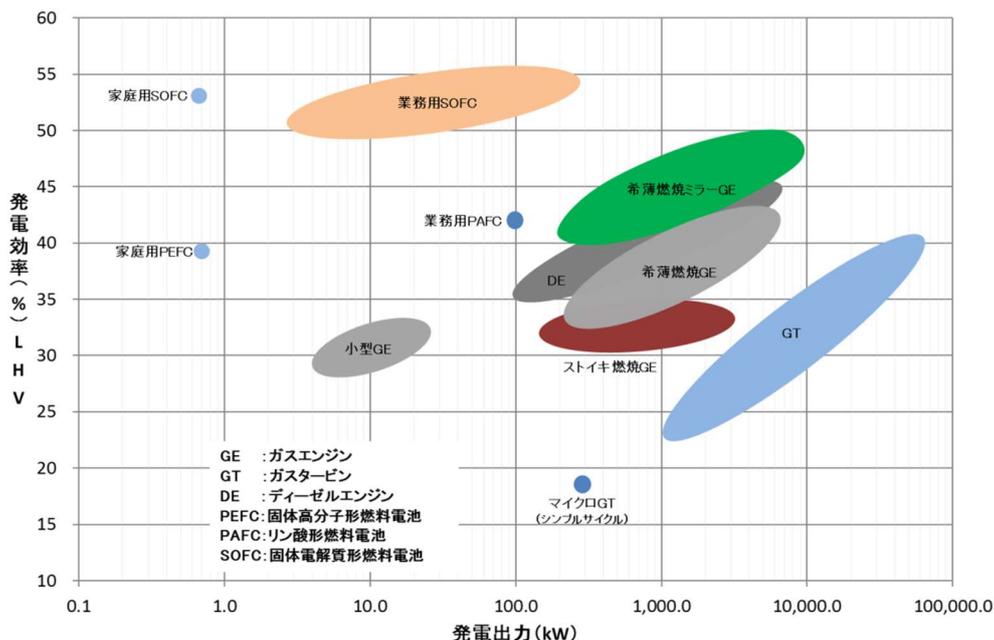


図5 コージェネの発電出力と発電効率

表2 コージェネの全般仕様及び特徴

種類	原動機型発電				電気化学的発電	
	ガスエンジン		ガスタービン		燃料電池	
特徴	* 発電効率が高い * 高出力・高効率化が進んでいる		* 軽量コンパクト (同クラスの発電出力のガスエンジンと比較して) * 廃熱を全量蒸気回収可能 * 連続運転に最適		* 導入実績が豊富 * 発電効率が高い * 非常用のニーズ	
主な燃料	都市ガス, LPG, バイオガス		都市ガス, LPG, 重油, 灯油, 軽油		都市ガス, LPG, バイオガス, 水素	
容量 (kW)	1.5~35	135~9,780	295~13,910	15,925~55,387	108~5,880	0.7~250
発電効率 (%LHV)	26.0~33.5	30.1~49.9	17.4~39.3	33.2~41.7	34.3~45.2	39~55
総合効率 (%LHV)	85~92	68~91	70~87	80~88	55~80	73~95
主な対象分野	民生用, 産業用		産業用, 地域冷暖房		民生用, 産業用	民生用, 産業用

5. おわりに

コージェネに関わる詳細情報は、(一財)コージェネレーション・エネルギー高度利用センターHP (<https://www.ace.or.jp>) を参照されたい。

ガスエンジンコージェネレーションシステム

Gas Engine Cogeneration System

遠藤 浩之

Hiroyuki ENDO

三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社

Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger, Ltd.

1. コージェネレーション用ガスエンジンの概要

まずガスエンジンの運転領域について図1を用いて説明する。横軸を空気過剰率、縦軸を正味平均有効圧力（軸トルクに比例）として運転領域を表すと、予混合燃焼の場合は図に示すようなノッキング（異常燃焼）領域と失火領域が存在する。主に小型のガスエンジンで用いられる空気過剰率1のストイキ（理論空燃比）運転の場合は、NOxは三元触媒で除去できるが、ノッキングの制限により出力をあまり大きくできない問題がある。空気過剰率を大きく（希薄化）するとNOxが低減し、熱効率も向上するうえ、ノッキングも発生しにくくなるため、出力を上げることが出来るが、失火領域の存在のためリーン化には限度がある。次にコージェネレーション用ガスエンジンの主なシステムについて表1に整理を行った。現在主流となっているシステムはリーンバーンであり②～④である。

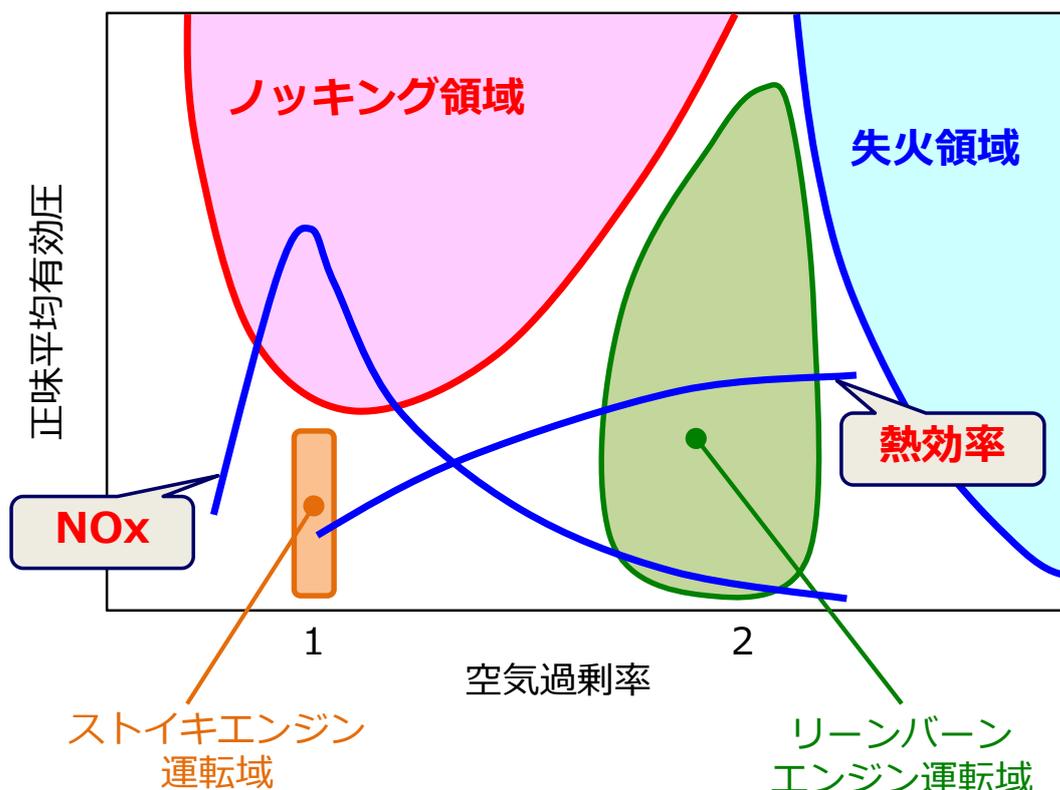


図1 ガスエンジンの運転領域

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

表1 コージェネレーション用ガスエンジンの主なシステム

システム	①	②	③	④	⑤	
燃焼方式	予混合燃焼					
運転される空気過剰率	ストイキ	リーンバーン				
燃焼室	オープンチャンバー		プリチャンバー			
着火方式	火花点火	プリチャンバープラグによる火花点火	火花点火		軽油パイロット着火	
NOx低減技術	三元触媒	希薄燃焼（排ガス規制レベルに応じてSCR脱硝を使う）				
ガス供給位置	シングルポイント	過給機前でのシングルポイント		ポートインジェクション		
特徴	システムが簡単であり低コスト。	プリチャンバーと比較すると構造および制御が簡単にできる。	オープンチャンバーよりもリーンで運転できるため効率とNOxのトレードオフが良い。プリチャンバーに供給するガスは加圧が必要。	ポートインジェクションとすることでオーバーラップ期間中のガスのすり抜けを防止できるため効率を向上できる。バックファイアによる給気管爆発なども防止でき安全性が高い。ガスの加圧が必要。	火花点火よりも着火エネルギーが大きいため低カロリーガスなどへも対応しやすい。火花点火栓の寿命問題がない。ただし火花点火栓の信頼性が向上してきたため、パイロット着火のエンジンは減っている。	

2. ガスエンジンの高効率化技術

次にガスエンジンで用いられている主な高効率化技術について説明する。

2.1 副室式リーンバーンシステム

リーンバーンの採用によって、スロットルロス低減によるポンプロス低減と比熱比向上によるサイクル効率向上が実現できるが、リーン化することで燃焼速度が低下し等容度が低下する。このためリーンバーンにおいては着火源の強化が必要となる。着火源強化手法の1つとしてプリチャンバーを用いた手法があるので説明する。プリチャンバー内の混合気をストイキに、主室をリーンに設定し、プリチャンバー内で点火することで、プリチャンバーから火炎をジェットとして主室に噴出させることで、主室内の希薄混合気に対し、広く着火源を配置することが出来、結果としてリーンバーンにおいても高速で燃焼させることができる。プリチャンバー方式のシステムの構成例を図2に示す。

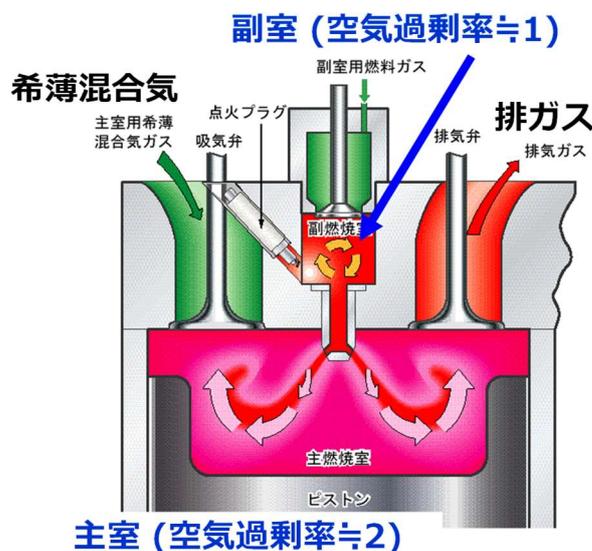


図2 副室式リーンバーン燃焼システム

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

2.2 正味平均有効圧力 (BMEP) 増大

BMEP を増大することで、一般的には機械効率が向上するため熱効率の向上が図れる。

2.3 ミラーサイクル

予混合燃焼の場合、圧縮比を上げていくと筒内の温度および圧力が上昇しノッキングしやすくなる。そこで、圧縮比<膨張比とするミラーサイクル (図3に通常サイクルとミラーサイクルのp-V線図の比較を示す) によって、圧縮比は上げずに、膨張比だけを上げることで、筒内温度上昇を抑制し、ノッキングの発生を抑制できる。サイクル効率は膨張比で決まるため、サイクル効率の向上が実現できる。なおミラーサイクルを実現する手法としては吸気弁の早閉じ化もしくは遅閉じ化が用いられている。

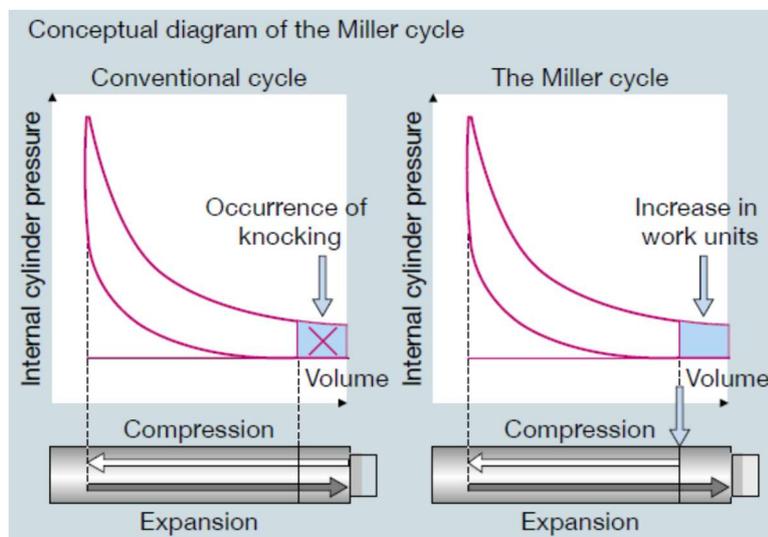


図3 通常サイクル (左) とミラーサイクル (右) のp-V線図の比較

2.4 点火時期制御

点火時期を進角することで等容度を高め、熱効率を上げることが出来るが、ノッキングによって制限される。そこで実運転状態でノッキングを検知して、点火時期を調整することで、熱効率の高い運転が継続できる。このためにノッキングを振動センサーで計測し、FFT解析にてノッキング強度を演算し、これをもとに点火時期を制御する点火時期制御が適用されている。大型のガスエンジンでは、筒内圧力を直接計測し、筒内圧力からノッキング強度を演算している事例もある。筒内圧力によるノッキング強度検知は、振動センサーよりも精度が高いため、さらに効率の高い運転が実現できるもの、筒内圧力センサーのコストや設置場所の問題があり小型のガスエンジンでの採用事例は見当たらない。

2.5 二段過給

二段過給システムを適用しているガスエンジンも存在する。低圧段ターボで過給した空気を中間冷却器で高圧段ターボのコンプレッサに送ることで、過給機総合効率を高めることができる。これによってポンプロス率が低減し、熱効率を向上できる。熱効率向上の効果が大きいのが、過給システムが複雑化し、コストも上がるため一部のガスエンジンで採用されているのみである。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

2.6 排気タービンウェストゲートによる出力制御

一般的なガスエンジンは吸気スロットルバルブによる出力制御であるが、排気タービン前のバイパスバルブの開度をコントロールすることでターボ回転を変えて出力制御する場合がある。排気バイパス制御の方が、スロットルロスを低減できるため熱効率を高めることができる。

以上の様な高効率化技術を組み合わせることで、ガスエンジンの高効率化が進んできており、1MWクラスで発電効率42~43%（エンジン単体の正味熱効率で43~44%）以上、8MWクラスでは49~50%（エンジン単体の正味熱効率で50~51%）を実現している。

3. 廃熱利用について

廃熱として利用できるのは、主に排ガスとエンジンジャケット冷却水の熱である。1000kW ガスエンジンコージェネレーションシステムのヒートバランス例を図4に示す。図4で用いられている、発電効率と総合効率について説明する。発電効率は、消費した燃料の発熱量に対して取り出せる電力量の比である。エンジン単体の正味熱効率に発電機の効率をかけたものになる。総合効率は、消費した燃料の発熱量に対して、利用した廃熱の熱量と発電電力量を足したものの比である。次に廃熱の活用について説明する。温度レベルの高い排ガスからはボイラーで蒸気を生成して工場で利用するが多い。また吸収式冷凍機の熱源として利用し冷房のエネルギーとして活用することもできる。温度レベルの低いエンジン冷却水も吸収式冷凍機の熱源として活用することはできるが、温度が低いと効率が高くなる問題がある。

次にコージェネレーションのシステム構成例について図5を用いて説明する。蒸気・温水生成システムの場合は、排ガスボイラーで排ガスの熱を使って蒸気を生成し、熱交換器でエンジンジャケット冷却水から温水を生成する。冷水生成システムの場合は、排ガスチラーに排ガスを投入して冷水を生成する。また排ガスから生成した蒸気を冷凍機に投入して冷水を生成する場合もある。エンジン冷却水の熱は熱交換器を介して吸収式冷凍機の熱源として活用し冷水を生成する。

この様にエンジンの排ガスと冷却水の熱を活用することで総合効率としては75~80%と高い効率を実現できるが、実際の利用においては以下の問題がある。発電量と熱利用のバランスがコージェネに適したユーザーでない高い総合効率での運用ができない。特に冷房も暖房も不要な春や秋に廃熱が余る場合が多い。また排ガスから生成する蒸気に比較すると、温水は工場での活用が難しく利用率が低い場合がある。また吸収式冷凍機で利用する場合にも、温水の場合は冷凍機の効率を高くできないためメリットを出すのが難しい問題がある。このような問題はあるものの、年間を通じて廃熱をきちっと利用できるユーザーの場合は非常に高い効率が実現でき、経済メリットも大きいと、そのようなユーザーを中心に導入が進んでいる。

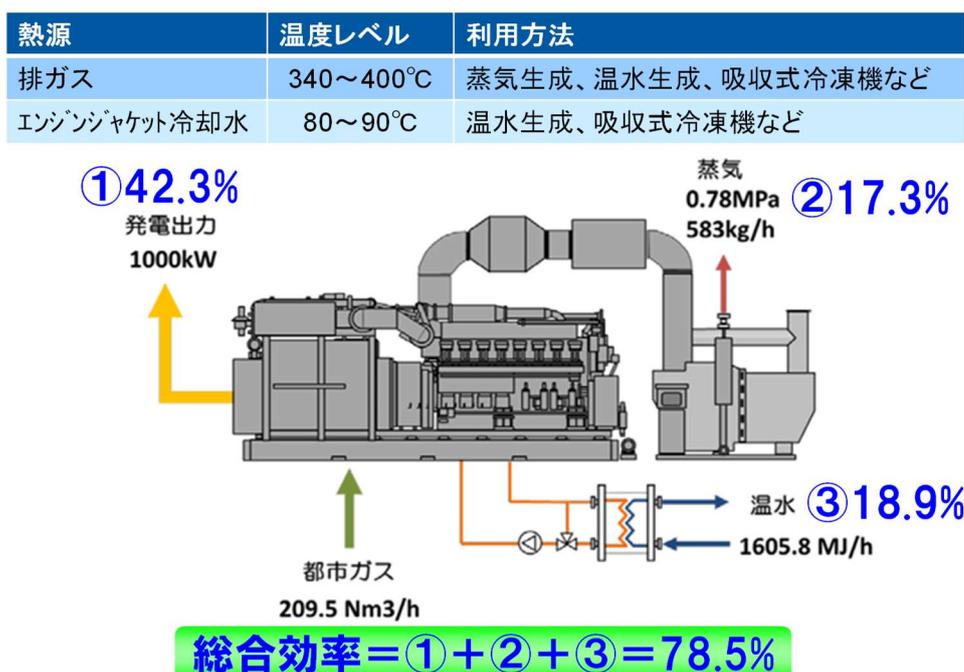


図4 1000kW ガスエンジンコージェネのヒートバランス例^①

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

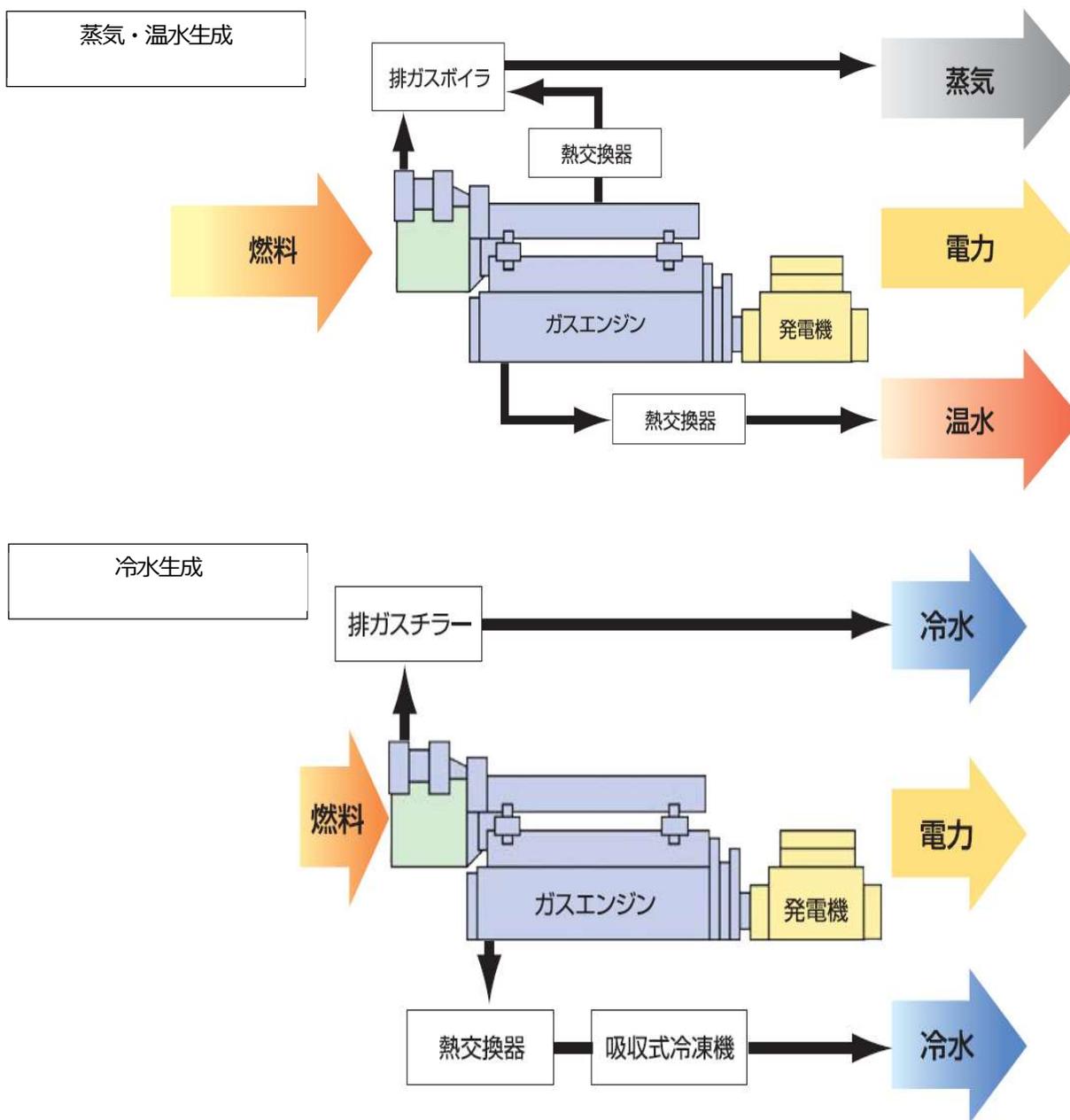


図5 ガスエンジンコージェネのシステム構成例

4. 活用事例

ガスエンジンコージェネレーションの活用事例として、ここでは三菱重工相模原製作所の事例を簡単に紹介する²⁾。相模原製作所では2011年3月の東日本大震災において実際に4回の計画停電及び、操業停止を経験したことを踏まえて、同年12月にBCP (Business Continuity Planning) 強化のために、出力1500kW ガスエンジン発電設備6台による自家発電設備増設を行った。2012年～2014年には廃熱利用のための排ガスボイラーや吸収冷凍機を設置することでコージェネレーション化を完了させた(図6, 7)。本設備導入により工場内で消費する一次エネルギー(電力費・燃料費)について大幅な削減を達成している(図8)。また電力需要逼迫時間帯に電力会社の要請に基づいて、購入電力の量を下げるデマンドレスポンスについても対応している(図9)。

以上を整理すると相模原製作所では、ガスエンジンコージェネレーションの導入によって、①BCP強化、②エネルギーコスト低減、③電力需給調整への参画、の3点がメリットとして得られている。



図6 三菱重工相模原製作所のガスエンジンコージェネレーション設備外観

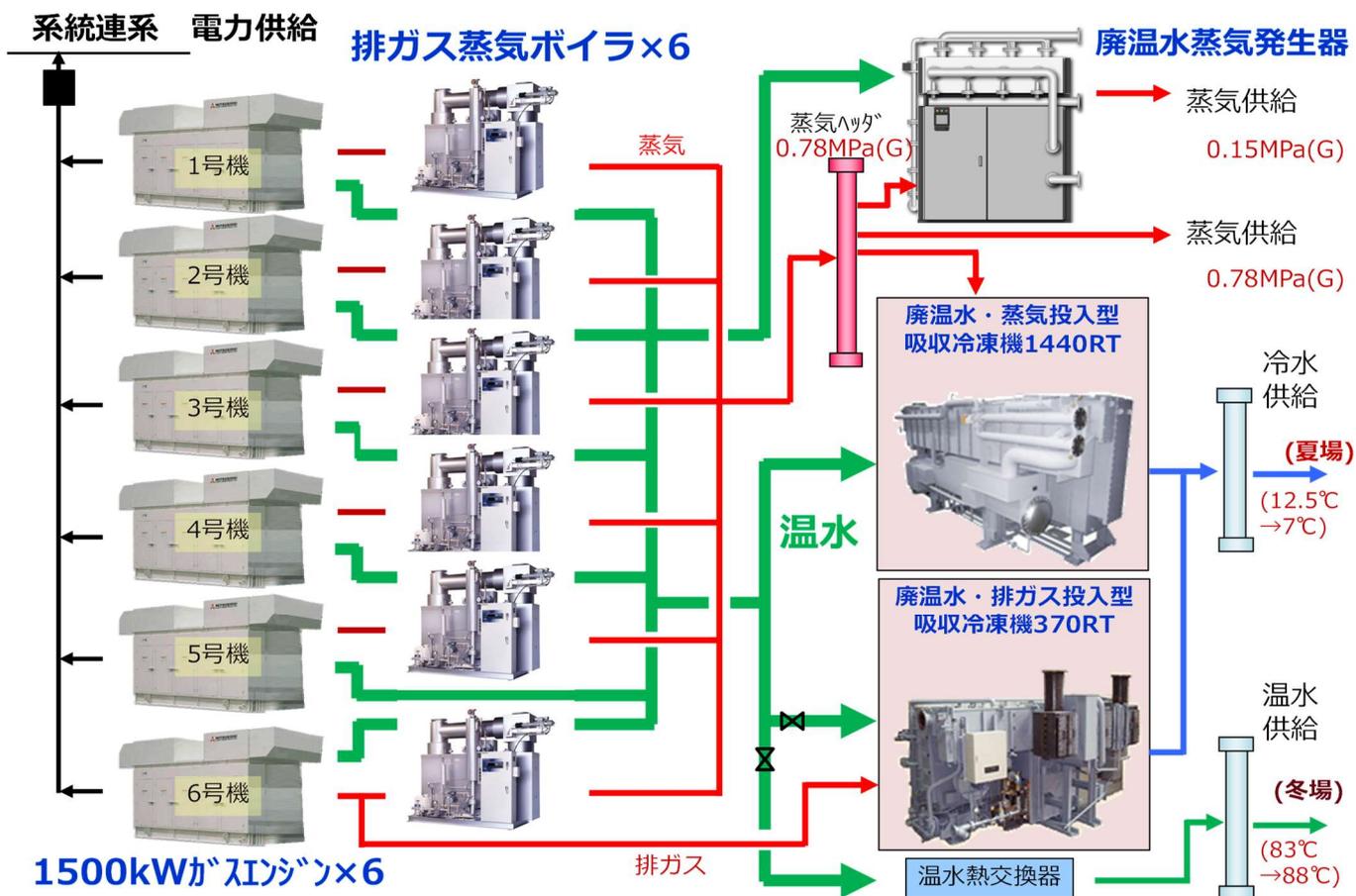


図7 三菱重工相模原製作所のガスエンジンコージェネレーション設備系統

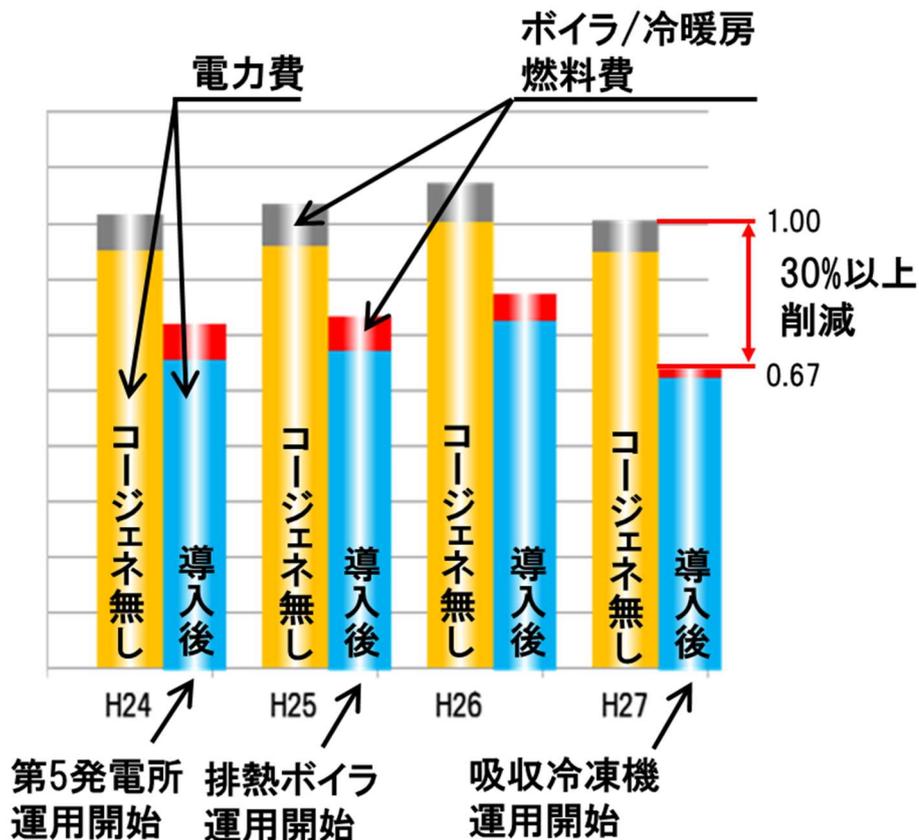


図8 コージェネレーションシステムのエネルギー費導入メリット

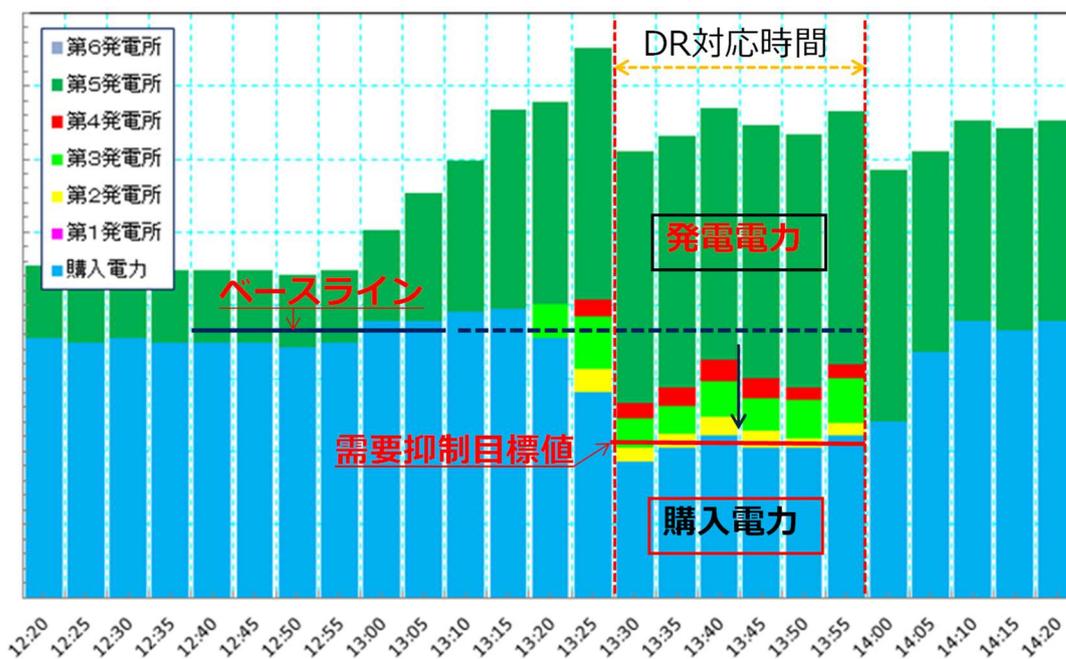


図9 デマンドレスポンス対応の事例

5. 引用文献

(1) http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/292033_53003036_misc.pdf のP.12

(2) <http://w3.mhi.co.jp/w-techportal/TechnicalReview/external/pdf/541/541055.pdf>

天然ガスデュアルフュエル機関

Natural Gas Dual Fuel Engines

佐古 孝弘

Takahiro SAKO

大阪ガス株式会社

OSAKA GAS CO., LTD.

1. はじめに

天然ガスを主燃料としてシリンダ内に混合気を作り、軽油などセタン価の高いパイロット燃料を供給し着火・燃焼させる天然ガスデュアルフュエル機関は、ディーゼル機関に比べ、黒煙や窒素酸化物 (NOx) 排出量を抑えることが可能であるため、古くから機械駆動・発電用定置式機関や船舶用推進・発電機関として研究開発が進められている。この方式の機関は高い圧縮比のもと混合気を速やかに燃焼させることが可能なことからディーゼル機関に匹敵する熱効率が得られる¹⁻⁶⁾。

本項では天然ガスデュアルフュエル機関のポテンシャルや課題、最近の研究事例について、筆者らの研究結果を交えながら概説する。

2. エンジンシステム

デュアルフュエル機関を天然ガスの供給方法で分類すると、天然ガスと空気の予混合気を吸気する方式と天然ガスをシリンダ内に直接噴射する方式に分けられる。いずれも、パイロット燃料で着火させるが、予混合吸気方式であればディーゼル機関の燃料噴射システムをそのまま利用できる利点がある¹⁻³⁾。一方で、直接噴射方式ではシリンダ内に天然ガスを直接噴射するための噴射弁が必要になるが、高出力化や未燃炭化水素の低減が可能であるとされている^{7,8)}。

予混合吸気方式デュアルフュエル機関のシステム構成例を図1に示す。吸気管内に天然ガスを供給して作成した予混合気を吸気し、ピストンにより圧縮して高温・高圧にしたのち、噴射弁から軽油を噴射して混合気を着火・燃焼させる。最近の研究結果^{6,9)}によると実験室レベルであればEuro6をクリアできる可能性が示されている。

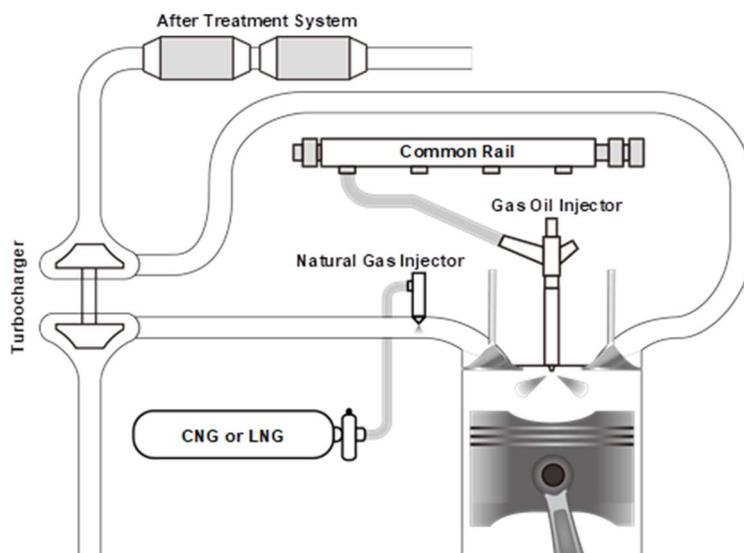


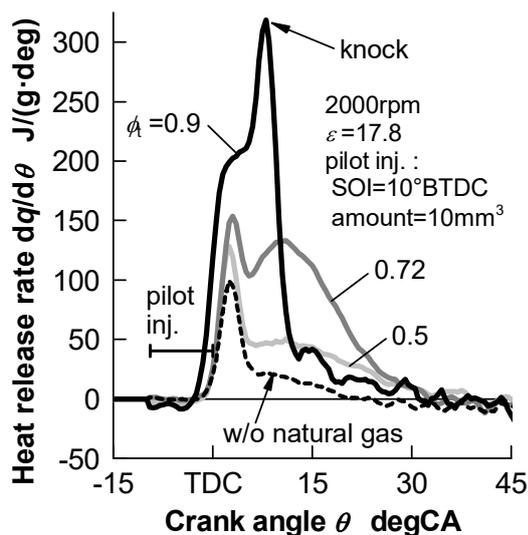
図1 天然ガスデュアルフュエル機関のシステム構成例

3. デュアルフュエル燃焼の利点と問題点

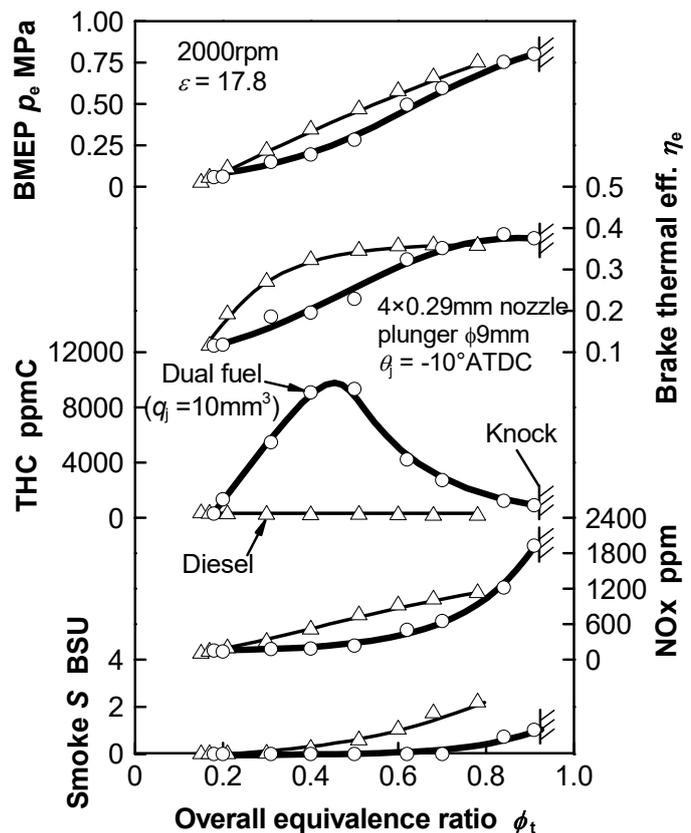
デュアルフュエル燃焼では、天然ガス予混合気中に液体燃料を噴射し、着火・燃焼させるので、基本的には燃料噴霧の自着火燃焼と混合気の火炎伝播燃焼の二つの形態を併せ持つ燃焼方式であると考えられる。このことは、熱発生率経過に強く現れる。

図2(a)に熱発生率履歴の例を示す。この結果は、無過給機関において、機関圧縮比17.8、機関回転速度2000rpm、パイロット軽油の噴射時期を上死点前 10° 、噴射量を 10mm^3 に固定して、天然ガスの供給量を増減し総括当量比を変化させて得られた^{10,11}。軽油のみの運転では比較的短い着火遅れの後、初期燃焼が生じる。天然ガスの供給量を増して総括当量比を大きくすると、初期燃焼の発生時期はほとんど変化せず、ピーク値が高くなり、初期燃焼に続く主燃焼が活発化していく。燃焼状態を可視化観察した研究例^{12,13}とあわせて考えると、噴射した軽油噴霧に導入された天然ガスと軽油蒸気との混合気が着火した後、ごく希薄な混合気を用いる場合を除いて、多点で点火した天然ガス混合気中を火炎が伝播するものと考えられる。

デュアルフュエル機関の性能および排気特性をディーゼル機関と比較した図2(b)によると^{10,11}、高負荷ではノックにより運転が制限されるが高い熱効率が得られる。しかしながら、中・低負荷域では熱効率が低下する。これは全炭化水素濃度(THC)の増加に見られるように、天然ガス混合気が希薄に過ぎるため燃焼効率が低下することによる。一方で、黒煙および NO_x が大幅に低減される負荷領域が存在する。このようにデュアルフュエル機関は限定された負荷においては高効率・低 NO_x のポテンシャルを有するが、比較的広い負荷範囲で運転される自動車へ適用するなら、高負荷域でのノック、 NO_x 排出の抑制および中・低負荷域の未燃炭化水素の低減が必要となる^{1-4,14-16}。



(a) 熱発生率履歴



(b) 機関性能・排気

図2 デュアルフュエル機関の熱発生率履歴と性能・排気^{10,11}

4. デュアルフュエル機関の研究例

中・低負荷の燃焼を改善するためには希薄混合気を効率良く燃焼させる工夫が必要となる。そのような観点で燃料の特性やEGRの利用、運転方法、天然ガスの直接噴射などについてこれまでに多くの研究が試みられている¹⁷⁻²⁰。

たとえば軽油のセタン価や天然ガスの組成など燃料について検討した例によると^{17, 18}パイロット燃料のセタン価が燃焼におよぼす影響が強く、高いセタン価の燃料をパイロット噴射すると低負荷時の燃焼改善により性能が向上することや、天然ガスに C_2H_6 、 C_3H_8 、 H_2 などを添加することによって未燃炭化水素は低減する一方、いずれの成分を添加した場合でも NO_x 排出濃度はやや増加することが示されている。

未燃炭化水素の低減に関して最も簡便な方法は、吸気温度を高くすることやパイロット燃料を増すことであるが、この場合 NO_x 排出量について検討の余地が残る¹⁵。そこで、EGRによって NO_x と未燃炭化水素のトレードオフを改善しようとする試みがなされている^{16, 19}。ホットEGRを適用すると予混合気温度の上昇により燃焼速度が増し未燃炭化水素が低減されることに加え、EGRガス中に含まれる CO_2 などの成分によって燃焼温度が低下するため、単純な吸気加熱よりも NO_x 排出量は減少する。また、高負荷域にクールドEGRを適用することでノックの抑制と NO_x 低減が可能になる。したがって、負荷に応じてホットまたはクールドEGRを適切に選択することで、未燃炭化水素および NO_x 低減が可能となる。

天然ガスをシリンダ内で均一化せず成層化し、過度に希薄な領域を低減しつつ壁面近傍への燃料配置を減らすことで燃焼改善を試みた研究例もいくつかある^{7, 21, 22}。たとえば、ポート噴射（噴射圧力0.8MPa、噴射時期上死点前 290° ）や低圧直接噴射（0.9MPa、上死点前 360° ）などによって得られる比較的弱い成層条件や、直接噴射式で天然ガスの噴射圧力を高くして（ ~ 16 MPa）、より強く天然ガスの濃度分布を付与した条件が試されている。弱い成層条件においては燃焼改善の効果が得られないが、噴射圧力を高くするとTHCは低減されることが示されている。ただしこの場合、天然ガスの噴射時期を適切に選択しないと NO_x 排出量が増加する。

5. 噴射条件の選択による性能改善

パイロット燃料を予燃焼室に噴射し、主室内の混合気を予燃焼室から噴出する火炎ジェットで燃焼させる副室式のデュアルフュエル機関であっても低負荷の燃焼が悪化することや²³、燃焼過程を考察した結果²⁴などから、希薄な天然ガス混合気の燃焼を補助するためには、パイロット燃料をいかに天然ガス混合気中に拡散させるかが重要であると思われる。したがって、パイロット燃料の噴射時期や噴射圧力、噴射量および噴孔径などの適切な噴射条件を見出すことがデュアルフュエル燃焼の成否を左右する。

単段噴射においてパイロット噴射時期について詳細に検討した研究例では、上死点前 50° 程度の早期に燃料噴射を行い、EGRにより着火時期を遅らせることで NO_x ・未燃炭化水素のトレードオフ改善が可能であることが示されている²⁵。また、ノックが生じる噴射時期よりも少し遅い時期にパイロット燃料を噴射することで、エンドガスの自着火は生じるが圧力振動のない燃焼が観察され、熱効率向上と未燃炭化水素の低減が出来ることも報告されている²⁶。

近年、電子制御コモンレール方式の噴射システムが開発され、柔軟な噴射制御が可能になったことから、パイロット燃料の空間的な分布を高度に制御することによって、課題となる中・低負荷における燃焼悪化を改善する試みがなされている²⁷⁻²⁹。たとえば、コモンレール式電子制御噴射装置を利用し、圧縮比を高く取り（ ~ 20 ）、レール圧力250barにてパイロット燃料を二回に分けて噴射することで低負荷の性能改善の可能性を調査した研究がある。一段目の噴射を早期に行い、その量を多く（パイロット燃料噴射量の70%以上）することで、燃焼変動の抑制や NO_x 、未燃炭化水素の排出を改善できるポテンシャルがあることや、二段目の噴射を上死点近くとすることで着火時期を遅らせ過度の圧力上昇を緩和できることが示されている²⁸。筆者らもこれらの研究例を参照しながら二段噴射における噴射制御の指針を確立するための検討を進めている²⁹。図3は単段の噴射と二段噴射時の NO_x 、THCのトレードオフおよび熱効率について比較したものである。この図は、単段噴射では噴射量と噴射時期、二段噴射では総噴射量を $5mm^3$ 、一段目噴射時期を上死点前 40° に固定して、一段目と二段目の噴射量割合ならびに噴射時期を変化させた場合の NO_x および未燃炭化水素濃度、正味熱効率の動きを示している。これによると、一段目噴射量を多く、二段目噴射時期を上死点前 $20\sim 40^\circ$ にすることで、 NO_x ・THCのトレードオフは改善され、熱効率も向上することがわかる。この実験条件ではパイロット燃料の噴射圧力は80MPaに固定し二回の噴射としているが、噴射圧力の選択や噴射回数を増すなど噴射システムのポテンシャルを十分に活用すればさらなる性能向上が期待できると考える。

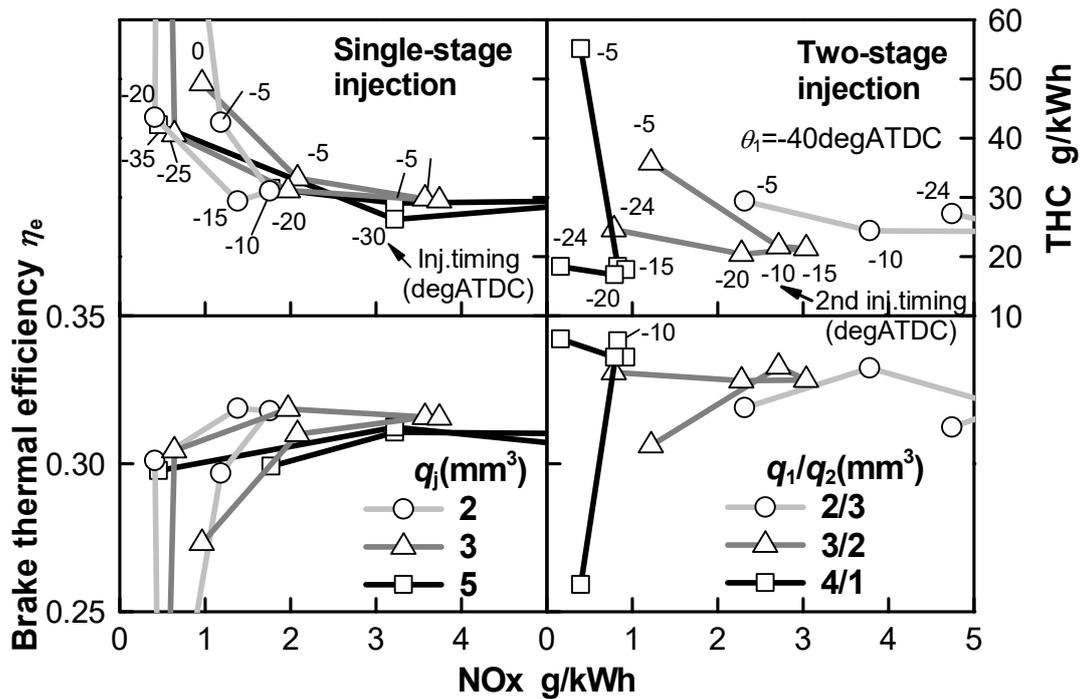


図3 単段噴射と二段噴射のNOx排出量に対するTHCおよび熱効率の比較²⁹⁾

6. おわりに

天然ガス自動車の高効率化技術として、ディーゼル機関に匹敵する熱効率が得られ、低NOxのポテンシャルを有することから、近年研究開発が活発に行われている。天然ガスデュアル燃料機関についてまとめた。この機関は古くから研究開発が行われており、高負荷で運転される大型のコージェネレーション³⁰⁻³²⁾や電気推進船など³³⁾については既にデュアル燃料機関が実用化されている。大型の発電システムではデュアル燃料機関のポテンシャルが発揮され、ごく高い発電効率が得られている。さらなる性能向上のためには、パイロット燃料を噴射した条件における混合気形成過程や希薄混合気の燃焼過程について理解を深め、燃焼室のデザインやパイロット燃料噴射条件を適切に選択し、ますます高度化するエンジンテクノロジーとうまく融和することが肝要であると考えられる。

謝辞

京都大学大学院エネルギー科学研究科、石山拓二教授には貴重な研究データの掲載を承諾して頂くことに加え、本稿をまとめるにあたり多大なサポートをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) G. A. Karim, A Review of Combustion Processes in the Dual Fuel Engine—the Gas Diesel Engine, Progress in Energy and Combustion Science, 6, pp. 277–285, (1980)
- 2) G. A. Karim, The Dual Fuel Engine of the Compression Ignition Type - Prospects, Problems and Solutions - A Review, SAE Paper No. 831073, (1983)
- 3) Ghazi A. Karim, The Dual Fuel Engine, Automotive Engine Alternatives (ed. Robert L. Evans Evans) Plenum Press, New York/London, pp. 83–104, (1987)
- 4) 佐藤利春, 斎藤 孟, 大聖泰弘, デュアル燃料ガスディーゼル機関の燃焼, 自動車技術会論文集, Vol. 26, No. 3, pp. 21–26, (1995)
- 5) 斎藤 孟, 天然ガス自動車の技術開発動向, クリーンエネルギー, 第4巻8号, pp. 47–51, (1995)
- 6) 高田 寛, 国際エネルギー機関におけるディーゼルデュアル燃料エンジンの研究, クリーンエネルギー, 第21巻1号, pp. 31–36, (2012)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 9 No. 1 2019*

- 7) K. Bruce Hodgins, Hardi Gunawan, and Philip G. Hill, Intensifier-Injector for Natural Gas Fueling of Diesel Engine, SAE Paper No. 921553, (1992)
- 8) K. Bruce Hodgins, Philip G. Hill and Patric Ouellette, Peter Hung, Directly Injected Natural Gas Fueling on Diesel Engines, SAE Paper No. 961671, (1996)
- 9) http://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_39-1.pdf
- 10) Takuji Ishiyama, Masahiro Shioji, Shin-ichi Mitani and Hiroaki Shibata, Makoto Ikegami, Improvement of Performance and Exhaust Emissions in a Converted Dual-Fuel Natural Gas Engine, SAE Paper No. 200-01-1866, (2000)
- 11) 塩路昌宏, 石山拓二, 池上 詢, 三谷信一, 芝田裕晃, 天然ガスデュアルフュエル機関の性能および排気特性, 日本機械学会論文集 B 編, 66 巻 647 号, pp. 284-290, (2000)
- 12) 斎藤 準, 桜井輝浩, 軽油着火希薄燃焼ガスエンジンの研究 (第 3 報), 東京ガスエネルギー環境技術研究所技報, 第 9 号, pp. 79-83, (1999)
- 13) Fukatani, Nobuhiko, Tomita, Eiji, Kawahara, Nobuyuki, Maruyama, Keiji, Komoda, Tetsuo, Combustion Characteristics and Performance of Supercharged Micro-pilot Natural Gas Engine, FISITA Paper No. F2006P230, (2006)
- 14) D. J. Waldman, Heavy Duty Liquid and Gaseous Fuel Database Test Results form Four Alternative Fuel Configurations of the Caterpillar 3406 Engine, Proceedings of the Automotive Technology Development Contractors' Coordination Meeting, 27th, pp. 29-41, (1990)
- 15) G. A. Karim, Z. Liu and W. Jones, Exhaust Emissions from Dual Fuel Engines at Light Load, SAE Paper No. 932822, (1993)
- 16) 大聖泰弘, 八重尾亨, 木原良治, 斎藤 孟, 小関孝尚, デュアルフューエルエンジンの燃焼特性と低公害化-第 1 報 軽油着火による天然ガスの利用-, 自動車技術会論文集, Vol. 27, No. 3, pp. 23-28, (1996)
- 17) C. Gunea, M. R. M. Razavi and G. A. Karim, The Effects of Pilot Fuel Quality on Dual Fuel Engine Ignition Delay, SAE Paper No. 982453, (1998)
- 18) G. P. McTaggart-Gowan, S. N. Rogak, S. R. Munshi, PG Hill, W. K. Bushe, The influence of fuel composition on a heavy-duty, natural-gas direct-injection engine, FUEL, Vol. 39, No. 3, pp. 752-759, (2010)
- 19) Tepimonrat, T., Kamsinla, K., Wirojsakunchai, E., Aroonsrisopon, T., Use of Exhaust Valve Timing Advance for High Natural Gas Utilization in Low-Load Diesel Dual Fuel Operation, SAE Paper No. 2011-01-1767, (2011)
- 20) Noipheng, A., Waitayapat, N., Aroonsrisopon, T., Wirojsakunchai, E., Experimental Investigation of Applying Raw Fuel Injection Technique for Reducing Methane in Aftertreatment of Diesel Dual Fuel Engines Operating under Medium Load Conditions, SAE Paper No. 2011-01-2093, (2011)
- 21) 小関孝尚, 大聖泰弘, 池田明弘, 木原良治, 斎藤 孟, 天然ガスの低圧筒内直接噴射方式によるデュアルフューエルディーゼルエンジンの性能・排出ガス特性, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 966, pp. 249-252, (1996)
- 22) James Harrington, Sandeep Munshi, Costi Nedelcu, Patric Ouellette, Jeff Thompson and Stewart Whitfield, Direct Injection of Natural Gas in a Heavy-Duty Diesel Engine, SAE Paper No. 2002-01-1630, (2002)
- 23) Xianhua Ding, Philip G. Hill, Emissions and Fuel Economy of a Prechamber Diesel Engine with Natural Gas Dual Fuelling, SAE Paper No. 860069, (1986)
- 24) Satoshi Taniguchi, Masahiko Masubuchi, Koji Kitano and Kazuhisa Mogi, Feasibility Study of Exhaust Emission in a Natural Gas Diesel Dual Fuel (DDF) Engine, SAE Paper No. 2012-01-1649, (2012)
- 25) Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, Zhenyu Piao and Ryoichi Yamaguchi, Effects of EGR and Early Injection of Diesel Fuel on Combustion Characteristics and Exhaust Emission in a Methane Dual Fuel Engine, SAE Paper No. 2002-01-2723, (2002)
- 26) U Azimov, E Tomita, N Kawahara and Y Harada, Premixed mixture ignition in the end-gas region (PREMIER) combustion in a natural gas dual-fuel engine: operating range and exhaust emissions, International Journal of ENGINE RESEARCH, Res. Vol. 12, pp. 484-497, (2011)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 9 No. 1 2019*

- 27) B. Scott Brown and Steaven N. Rogak, Sandeep Munshi, Multiple Injection Strategy in a Direct-Injection Natural Gas Engine with Entrained Diesel, SAE Paper No. 2009-01-1954, (2009)
- 28) Tanet Aroonsrisopon, Mongkol Salad and Ekathai Wirojsakunchai, Kisada Wannatong, Somchai Siangsanorh and Nirod Akarapanjavit, Injection Strategies for Operational Improvement of Diesel Dual Fuel Engines under Low Load Conditions, SAE Paper No. 2009-01-1885, (2009)
- 29) Takuji Ishiyama, Jeongho Kang, Yutaka Ozawa, Takahiro Sako, Improvement of Performance and Exhaust Emissions by Pilot-Fuel-Injection Control in a Lean-Burning Natural-Gas Dual-Fuel Engine, SAE Paper No. 2011-01-1963, (2011)
- 30) 中野良治, 新井 武, 高石龍男, 次世代MACH-30G ガスエンジンの開発, 三菱重工技報, Vol. 41, No. 1, pp. 22-23, (2004)
- 31) 杉本智彦, 酒井能成, 服部 崇, 堀江 尚, 野中洋輔, 世界最高効率ガスエンジン-グリーンガスエンジン-, 川崎重工技報, Vol. 173, pp. 18-21, (2013)
- 32) 近藤守男, 坂根 篤, 平田修三, 服部澄人, 高効率ガスエンジンを開発, 三井造船技報, Vol. 191, pp. 19-25, (2007)
- 33) 真壁 稔, 新時代のLNG船 デュアルフュエル機関電気推進, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第40巻 第3号, pp. 16-24, (2005)

SOFC 燃料電池コージェネレーションについて

SOFC Cogeneration System

岸沢 浩

Hiroshi KISHIZAWA

三菱日立パワーシステムズ株式会社

Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.

1. はじめに

地球温暖化問題、エネルギー問題を解決するためには、エネルギー源の低炭素化とエネルギー利用の高効率化が必須である。温室効果ガスの1つであるCO₂排出量の削減には、火力発電等の集中電源により構築された現状の電力基盤インフラをベースとして、分散電源を地点・容量共にベストミックスで組み合わせ、その上で再生可能エネルギー等の新エネルギーを経済的・合理的に最大限導入していく必要がある。また、地球規模でのエネルギー資源の保全のためにも、高効率発電システムを開発し、早期普及させることにより、化石燃料を徹底して有効活用することが急務の課題となっている。本稿では、三菱日立パワーシステムズ (MHPS) のこれまでの固体酸化物形燃料電池 (SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)) の開発状況、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 事業にて取り組み、市場投入した固体酸化物形燃料電池とマイクロガスタービン (MGT) を組み合わせた複合発電システム SOFC-MGT ハイブリッドシステムについて、さらに、今後の展開について紹介する。

2. SOFC-MGTハイブリッドシステムの構成

円筒形 SOFC の発電要素であるセルスタックの構造を図1に示す。セラミックス製の構造部材である基体管の外表面に、発電反応を行う素子 (燃料極/電解質/空気極の積層体) を形成し、電子導電性セラミックスのインターコネクタで素子間を直列に接続している。熱膨張係数の近い構成部材を選定するとともに製造技術の改良により一体焼結を採用することで、製造コストを削減し、さらには構成材料間の接着強度を向上させ、性能・耐久性の向上を図っている。このセルスタックを数百本束ねカートリッジを構成し、カートリッジを圧力容器の中に格納したものを SOFC モジュールと呼んでいる (図2)。カートリッジについては、セルスタックを細径化することなどで、1800 本/m² 程度まで充填密度を高めてきている。

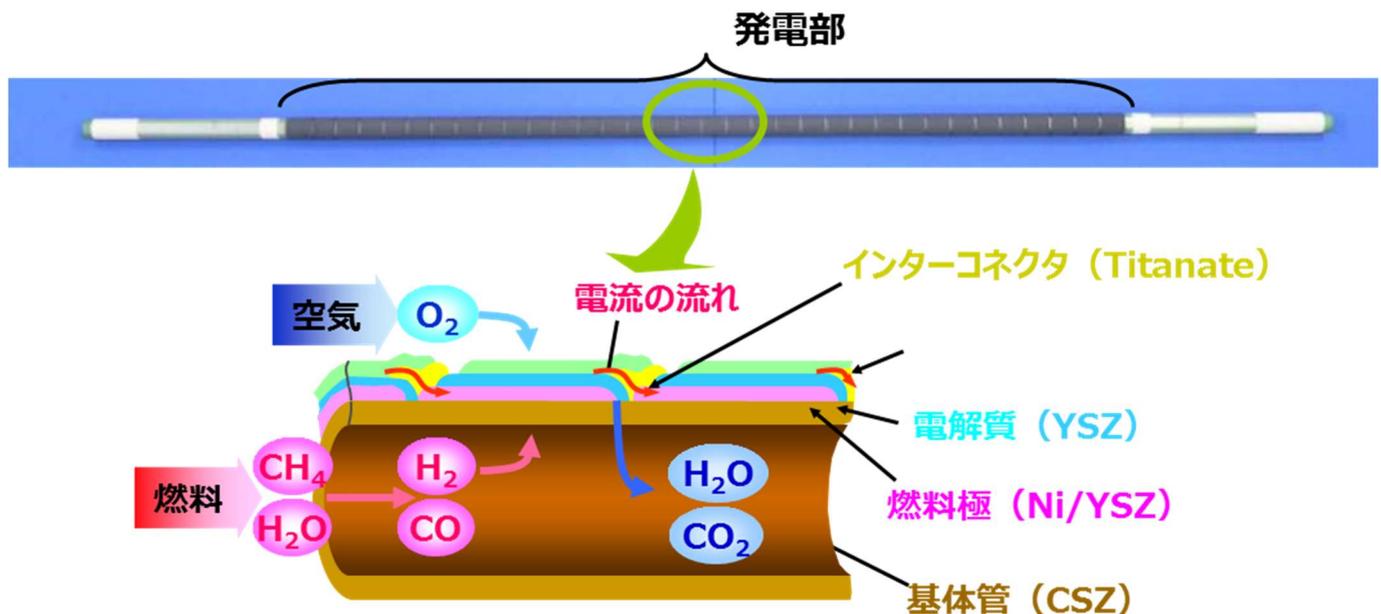


図1 セルスタックの構造

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

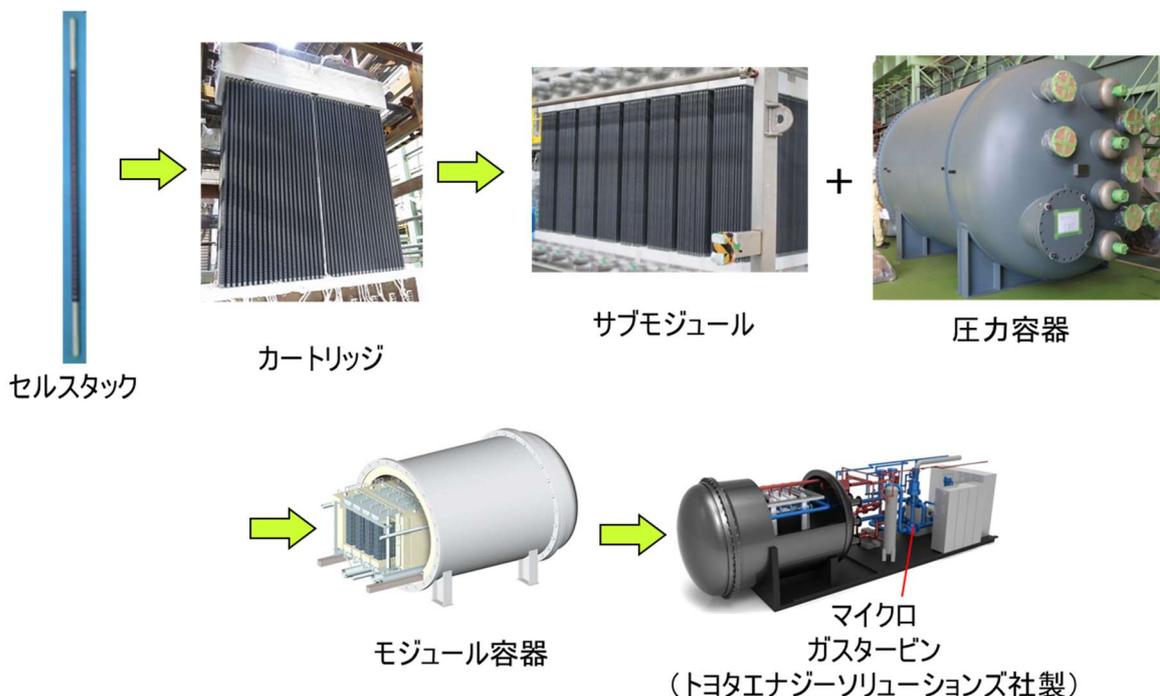


図2 ハイブリッドシステムの構成

現在インフラが整っている都市ガスなどの燃料から直接発電が可能であることが特長の一つである。燃料の主成分となるメタンの水蒸気改質反応（吸熱反応）から H_2 , CO を生成するが、低温作動の燃料電池は改質に必要な熱源を得るために、外部に設置した改質器で燃料を燃焼すると共に水蒸気を供給してメタンの改質を行う。一方、SOFCは高温で作動するため、SOFCの燃料極に使用するNiで燃料の改質が可能であり、また、排燃料を再循環することで改質に必要な水蒸気も自給可能となる。即ち改質に必要な“熱”と“水蒸気”を自前で供給できるため、都市ガスを直接供給して電気を発生するシステムを構築できることとなる。

本システムは、このSOFCモジュールと、マイクロガスタービン（MGT）や再循環ブロウ等から構成される。MGT圧縮機からの空気を供給することで、電圧が増大する加圧型SOFCの特性により発電効率向上となっており、さらに、SOFC燃料側出口の残燃料と空気側出口の残空気をMGT燃焼器で燃焼させ、MGTタービンで発電（全体出力の10%程度）をすることで、2段階発電するため高効率発電となる。更に排熱回収装置を設置し、排熱を蒸気または温水として回収することで、総合効率がそれぞれ65%、73%となるコージェネレーションシステムを構築することができる（図3）。

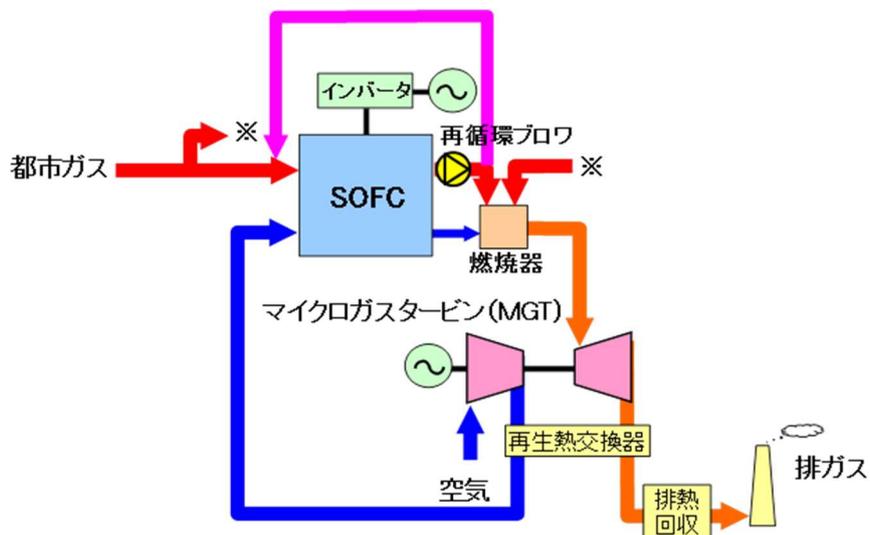


図3 ハイブリッドシステムの系統

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

3. 250kW級での取り組み

2015年度よりNEDOの助成事業“固体酸化物形燃料電池を用いた業務用システムの技術実証”にて、市場投入に向けた実負荷環境での250kW級実証試験を実施した。実証サイトは、トヨタ自動車(株)・元町工場、日本特殊陶業(株)・小牧工場、東京ガス(株)・千住テクノステーション、大成建設(株)・技術センターの4地点となる(図4)。

その結果を受け、2017年より市場投入を開始している。市場投入するモデルは4サイトでの実証結果を反映したモデルとなる。商用機第1号を三菱地所(株)丸の内ビルディングに納めており、今年度中に運転を開始する予定である。

また、電源開発(株)が実施しているNEDO研究開発“燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究”用に、2017年度に電源開発(株)若松研究所に納めている。



図4 ハイブリッドシステムの運転・計画状況

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 9 No. 1 2019

4. 1MW級 SOFC-MGT ハイブリッドシステム実証状況

SOFC とガスタービンとを組み合わせた GTFC については、平成 27 年 7 月に官民協議会により策定された“次世代火力発電に係る技術ロードマップ”において、小型 GTFC (1MW 級) の商用化、量産化を進め、SOFC のコスト低減を図り、中小型 GTFC (10 万 kW 級) の実証事業を経て、2025 年頃に技術確立をすることが示されている。

2016 年度より、NEDO 委託事業の“ガスタービン燃料電池複合発電技術開発”にて、従来 (出力 250kW 級、運転圧力 0.2MPa 級) に比べ、中小型 GTFC (出力 10 万 kW 級、運転圧力 1.0~1.5MPa 級) により近い容量・圧力条件の小型 GTFC (出力 1MW 級、運転圧力 0.6MPa 級) の市場投入に向けた検証を MHPS 長崎工場にて開始している。1MW 級実機は SOFC モジュール容器を 2 基設置する計画であるが、本研究開発では 1MW 級に必要な半分の SOFC モジュール容器 1 基のみで試験を計画しており、これをハーフモジュールと称している (図 6)。今後、ハーフモジュールとしての実証運転を行い、1MW 級実機とした場合の商品性を見据えたシステム仕様を検討していく。



図 5 MW 級ハーフモジュール実証機状況

5. まとめ

MHPS では、CO₂ 排出量削減と電力の安定供給を両立させていくための実効性のある技術として、SOFC 複合発電システムを切り札と位置付けている。

250kW 級機においては、2015 年度より、国内 4 か所に実証機を設置しており、市場投入に向けた実証を実施し、安定して稼働できることを確認している。その結果を受け、2017 年度より、市場投入を開始している。現在、商用機第 1 号を三菱地所(株)丸の内ビルディングに納めており、今年度中に運転を開始する予定である。

更に、2016 年度より 250kW 級機から大容量化した 1MW 級機の検証を開始しており、現在 MHPS 長崎工場にて実証試験に取り組んでいる。この実証試験で着実に技術を確立するとともに早期実用化を進め、“安全で持続可能なエネルギー環境社会”の構築に大きく貢献していきたいと考えている。

謝辞

本論文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 (NEDO) の共同研究等の成果を含んでおり、御指導、御助言を賜っております大学、研究機関、並びに開発・検証に御指導頂いております電力、ガス事業者、メーカー等、全ての関係各位に関係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げます。