大型DMEディーゼルエンジン発電システムの研究開発*

- DME燃料による低環境負荷発電システムの実用化

清 水 明** 吉 田 雅 裕*** 増 田 和 彦****

Development of Large Scale DME Diesel Power Generation System
- Practical DME Power Generation with Low Environmental Impact

By Akira Shimizu, Masahiro Yoshida, Kazuhiko Masuda

DME is widely gaining acceptance as an alternative fuel for diesel engines. DME is a clean fuel that does not emit soot, PM, and SOx. It has a high cetane number, and is suitable for diesel engines. According to its exhaust characteristics, NOx reduction is easily attained by engine tuning and by applying a large amount of EGR. Focusing on these advantages, JFE Engineering and Daihatsu Diesel have jointly developed a DME diesel power generation system and constructed a 1250kW DME demonstration plant. Technical tests for various elements and continuous endurance tests were completed, and its potential for practical use was confirmed. This paper describes the outline of the world's first large-scale power generation DME plant, presents distinctive test results, and also describes the future of DME fuel.

1. はじめに

今世紀におけるアジア地域でのエネルギー消費量は、昨年来の米国に端を発した世界金融危機により一時減速したものの、中長期的にみれば経済成長に伴い大幅に増加すると予想される。今後この地域の持続的な発展を実現するためには、エネルギーの安定供給およびエネルギー大量消費による地球温暖化、環境汚染が大きな課題となる。一方、先進国では原油価格の高騰により運輸、産業への影響が出ており、エネルギーのセキュリティ上、代替燃料の模索が急務となっている。

代替燃料のなかでジメチルエーテル（Dimethyl Ether：以下DME）は天然ガス、石炭、石油残渣などの多様な炭化水素源から合成が可能で、LPGと同等のハンドリング特性を有し、かつ環境負荷の低いクリーンな新燃料として期待されている。

DMEを大量に、安価に製造、流通させればエネルギー需要問題、環境問題の解決に大きく寄与できると考える。また、DMEの物流の足となる大型船の主機への適用も検討の遡上に乗ってくると考えられる。

JFEでは1990年代初頭よりDMEの大量、安価な製造を実現すべくDME直接合成法の開発研究に取り組んできた。また、DME利用技術の研究にもいち早く取り組み、50kWクラスDMEディーゼル

の基礎試験の実施、DMEディーゼルトラックの走行試験などを実施してきている。さらに2004年からは世界最大級である1250kW大型DMEディーゼル発電設備の開発をダイハツディーゼル（株）ならびに岩谷産業（株）と共同で行い各種要素試験、耐久性確認試験を含め実証試験を実施した。（図1参照）

本稿では1250kWクラス大型DMEディーゼル発電装置のシステム、実証試験および結果を示しDMEのディーゼル燃料としての有用性を述べる。

図1 DMEディーゼル発電システム（1250kW）

2. DMEのディーゼル燃料としての特徴

DMEは化学式が $\text{CH}_3 \cdot \text{O} \cdot \text{CH}_3$ で示される最も単純なエーテル化合物である。常温、常圧において無

*原稿受付 平成21年08月03日
**正会員 JFEエンジニアリング（株）
*** JFEエンジニアリング（株）
****正会員 ダイハツディーゼル（株）

色透明の気体で、沸点は常圧で -25.1°C 、また常温 25°C における飽和蒸気圧は 6.1 気圧で、容易に液化可能な特性を持ち、LPGと同等に取り扱いが容易である。もともとはフロンガスの代替物としてスプレーの噴射剤として使用されており、世界で 15 万トン／年、日本で 1 万トン／年の生産量である。

人体に対する毒性はメタノールより低くLPG同等であり、金属に対する腐食性はないが、ゴム類には膨潤するものもある。DMEは含酸素化合物であり、化学構造の中に炭素同士の結合がないため燃焼過程で粒子物質 (Particulate Matter : PM) やすすが発生せず、且つ硫黄分を含まないためSO_xの発生もない。また、セタン価が55～60と高いことからディーゼルエンジンの代替燃料として利用可能である。液体状態での重量あたりの発熱量 (低位) は28.9MJ/kgとプロパン、メタンおよび軽油より低い、気体状態では59.5MJ/Nm³とメタンより高い。液化が容易でありハンドリング性に優れるため広汎な用途が期待できる。特性として煤が出ないことよりエンジン利用においては大量のEGRを行うことができ、重油または軽油焚きのディーゼルエンジンに比較し大幅なNO_x低減が可能である。原単位においても、同一機関効率の場合CO₂排出量は石油燃料に比較し約15%低減できるなど、地球温暖化抑制にも寄与する。

一方、粘度が低いことより燃料噴射系でのリークが生じやすい、潤滑性が乏しいことより、ポンププランジャの焼き付き、摩耗や噴射ノズルニードルの摩耗が生じやすいなどの欠点があり、この対策も開発事項のひとつとなる。表1に燃料物性の比較を示す。

表1 DME燃料の物性

項目		DME	軽油
化学構造		$\text{CH}_3 \cdot \text{O} \cdot \text{CH}_3$	—
分子量		46.07	—
酸素含有量	質量%	34.8	0
密度 (@20℃)	kg/m ³	670	840
低位発熱量	MJ/kg	28.9	41.9
理論空燃比	kg/kg	9.0	14.6
セタン価		>55	>50
沸点 (@1atm)	℃	-25	180-370
動粘度 (液体)	cSt	<1	2-4

3. 大型ディーゼル発電実証設備

3.1 開発概要

DME燃料の実用化にとって、安価な大量製造法の開発、製造設備の建設とその利用技術の開発は、車の両輪の関係にある。DMEの用途のなかでも発電用燃料は大量の需要の創出が期待でき重要な位置づけであり、ディーゼルエンジンやガスタービンの燃料として実用化が進められてきている。発電装置としてのディーゼルエンジンは、ガスタービンやガスエンジンなどの発電機関と比較し効率は優れているものの、重油や軽油等の従来の燃料では排ガス中のPMやNO_x濃度が高いという欠点がある。特に東京、大阪などの都市部では独自の条例で排ガスNO_x濃度が厳しく規制されており、自家発電用としてディーゼルエンジンの導入は事実上不可能なのが現状である。しかしながらDMEを燃料とすることによって、高い発電効率という利点を維持したまま排ガス性状を大幅に改善できる可能性があり開発が進められてきた。但し、従来の利用技術開発は小型機に限定されており、そのものの開発では大量需要の創出にまでは至ってい

図2 DMEディーゼル発電システムフロー

ない。JFEエンジニアリングはダイハツディーゼルと共同でDME燃料としては世界最大級となる1250kWディーゼル発電設備の開発を進めた。

3.2 実証発電プラント 1250kW発電設備のシステムを図2に示す。設備はJFEエンジニアリング鶴見製作所（神奈川県横浜市）に設置され、2004年から2006年にかけて実証試験を本発電プラントにて実施した。燃料貯蔵は20トンタンクにて行う。タンクからエンジンまでは昇圧ポンプを2段設置し、最終的に1.5MPaまで昇圧する。燃料はディーゼルエンジンに消費量の約4倍供給し、未消費分はポンプ本体の冷却用に使用され、クーラを設けた循環ラインを循環する。排ガス系統にはDMEを還元剤とした脱硝装置を設け、また排ガスクーラ、EGR量制御弁等EGR設備が設置してある。主エンジンは図3に示すボア260mm、ストローク380mm、シリンダ数6、定格回転数750r/minの中速ディーゼルをDME仕様へ改造したものである。

3.3 開発課題 開発の課題として下記に示す項目を挙げ、実証試験により各機能、性能、安全性、耐久性の確認を実施した。

(1) エンジン本体

低発熱量、低潤滑性に対応した燃料噴射系の開発試験
低沸点性に対応した燃焼室、燃料噴射条件
含酸素燃料に対する過給機マッチング

図3 実証試験エンジン

(2) プラント設備

液状維持のための圧力制御、温度制御機構の開発試験
エンジン・燃料ラインからの燃料パージ・回収技術
燃料チャージ、貯蔵技術の確立

(3) DME燃料輸送

北海道釧路から横浜までの陸送、海上輸送の確立

(4) 低NO_x化

EGRによるNO_x低減技術

DMEを還元剤としたNO_x低減技術

3.4 試験結果 開発課題に則し実証試験を実施した。発電プラントとしての機能、設計の妥当性が確認され、また計画通りのエンジン性能が得られた。特にEGRを適用することにより従来ディーゼルエンジンでは実現が困難であった低NO_x化が図れ、大都市圏での設置も可能であることが実証された。またDMEの長距離輸送についても安全性、輸送方法の妥当性が確認できた。

(1) エンジン性能

エンジンはDME燃料の物理的特性を考慮し設計・開発を行った。燃料噴射ポンプはDMEの物性に適合するように設計されたジャーク式燃料噴射ポンプを採用した。またDMEの低発熱量を考慮した上で、燃料噴射ポンプや燃料噴射弁などは従来のディーゼルエンジンと比較し約2倍の噴射量を得られるよう設計されている。

起動・停止性能について従来の軽油運転と同様DME燃料での安定した特性が確認された。負荷性能では低負荷から100%負荷まで安定した運転特性を確認した。軽油や重油使用のディーゼルエンジンでは、一般的に起動時や低負荷運転時に煙突からの排ガスに黒煙が発生する状況が多くみられるが、DME燃料では黒煙の発生はまったくみられず、煤塵は全負荷にわたり発生しないことが確認された。（図4参照）

図4 DME運転時の煙の状態（低負荷運転時）

図5に一酸化炭素（CO）、炭化水素（THC）の排出特性を示す。CO濃度は軽油運転とほぼ同等であるが、THC濃度は軽油運転の約半分まで減少している。またNO_x濃度はEGRを用いない場合では軽油運転とほぼ同等であることが確認された。燃焼解析の結果より軽油と同等の良好な燃焼が得られ、熱効率も軽油運転とほぼ同等であることを確認した。図6にDME燃料（EGRなし）と軽油運転時の燃焼波形と熱発生率波形の比較を示す。熱発生率波形をみると燃焼開始時期はDMEと軽油はほぼ同等である。しかし燃焼のピークはDMEが早い。また燃焼後半はDMEの方が立ち下がり早くDMEの燃焼は軽油に比較し良好であることがわかる。燃料噴射系も正常に機能し噴射不良、燃焼不良の発生もみられずDMEでの安定運転を確認した。

図5 排ガスエミッション特性 (COとTHC)

図6 燃焼圧力と熱発生率波形 (100%負荷)

(2) プラント設備

DMEタンクよりエンジンまでの燃料供給系統につき、温度および圧力の最適制御を行うことにより液状を維持したままDMEをエンジン燃料噴射装置まで安定して供給できることを確認した。圧力については緩衝器の最適配置、設定にて変動を抑えエンジンの運転に影響を与えない供給が得られた。圧力脈動については過渡的な圧力低下にてDMEが気化する可能性が生じるため特に考慮すべき項目である。また、エンジン停止後のエンジン燃料系統に残留する液状DMEが気化し、シリンダ、給気、排気ラインに滞留する問題解決のため、DMEタンク内の気体燃料を昇圧し燃料系統をパージしDMEタンクに戻すシステムを設置し試験を実施した。その結果短時間に確実に系内の燃料を排出することができ、設備の妥当性・安全性の確認ができた。

(3) DME燃料輸送

DME燃料は北海道釧路に設置された100t/日DME製造プラントで生産されたものを使用した。(図7参照) 燃料輸送にはDME専用14トンタンクローリを使用し、北海道釧路のDME製造プラントから横浜の試験設備まで輸送の実証を行った。(図8参照) 釧路から東京の有明埠頭まではRORO船にローリ単体を積載し海上輸送を行い、またその後は規制に従いながら陸路輸送を行った。これより約1000kmのDME長距離輸送の安全性、輸送経路の妥当性の検証ができた。

図7 100 t/日DME製造プラント
(写真提供: ディーエムイー開発) 図8 DME製造プラント貯蔵タンクと輸送用ローリ
(写真提供: 釧路新聞社)

(4) 低NO_x化

①EGRによるNO_x低減

DME燃料を使用した場合、排ガス中に煤塵が発生しないため大量EGR(排気ガス再循環)が可能となる。またエンジン本体においてもDME燃料の場合スモークリミットが存在しないことより軽油や重油燃料と比較し幅広い調整が可能となる。図9にEGRシステムの概要を示す。過給機出口の排ガスは分岐されEGR

クーラに導入され冷却後、吸込空気と混合され過給機コンプレッサで昇圧、エンジンに導入される。EGR率はEGRクーラ後の流量調整弁にて調整される。実証機ではEGR率変更とともにエンジンマッチング条件も同時変更しNO_x低減試験を実施した。

図9 EGRシステムの概要

図10 EGRによる低NO_x化と熱効率への影響

図10に試験結果を示す。標準性能NO_x = 950 ppm (O₂ = 13%)、軸端効率43%の本機にてEGR率およびエンジン噴射時期の変更を行い、実用範囲においてNO_x = 30 ppm (O₂ = 13%)、軸端効率40.5%を達成した。効率低下を2.5ポイントに抑えNO_x値は1/30以下と劇的な低減効果が得られた。

②DMEを還元剤とした脱硝装置

ユーティリティの統一化を目的にDME燃料を還元剤としたSCR（選択還元脱硝装置）の試験を実施した。図11、図12に低減原理と装置を示す。DMEは気体状にて脱硝触媒（ペレット式）にスプレーされる。

また流量はNO_x値、燃料流量を入力・演算することにより制御される。パラメータとして排ガス温度およびモル比 (DME/NO_x) を変更しNO_x低減率を調査した。結果として図13に示すように360-380℃、モル比3にて75%の脱硝率を達成した。

図11 DME脱硝原理

図12 DME脱硝装置（ペレット式）

図13 SCR脱硝率試験結果

(5) 1000時間耐久試験

発電プラントおよびエンジンの耐久性、信頼性を確認する目的で1000時間の耐久試験を実施した。運転モードはDSS（毎日発停）、商用電力との系統連係にて実施した。耐久試験中EGR率等パラメータを一定期間ピッチで変更しながら状態監視を行い、安定した性能が維持されることを確認した。図14にEGR率、熱効率、NO_x値の600時間トレンドを示す。また、エンジンの開放調査を実施し、特にDME燃焼に直接関係する燃焼室、燃料噴射系に異常はなく問題のないことを確認した。

図14 耐久試験性能トレンド (600時間)
(EGR率変更, 熱効率, NO_x値)

4. 将来展望

ディーゼルエンジンの燃料をDMEに転換することにより, 熱効率は従来と同等を維持しつつNO_xを大幅に低減できる見込みがあり, 画期的な分散型発電システムの実用化が期待できる。

昨今の電気事業における自由化, 規制緩和の流れを受け発電設備の分散化が進展する一方, 環境に対する規制, 要望はますます厳しくなる傾向にあり, より高い経済性と環境性を併せ持つ分散型発電設備のニーズが高まっている。本開発は, 今後拡大が予想される自家用・事業用分散型発電設備の中でもその中心規模である1000~5000kW級のDMEディーゼル発電システムを実用化するものであり, 従来環境規制の制約で導入に踏み切れなかった場所での発電設備需要を掘り起こすことが可能となる。

これにより, ディーゼルの特徴である高効率な分散型発電システムの普及を促し, CO₂排出量の地球規模での削減に寄与できると考えている。

また, このような大量消費機器の実用化によって豪州, カタール, インドネシアや中国などの中小ガス田, 鉾山ガス発生地におけるDME製造プラントの建設が加

速し, 大量輸送の需要が増大するに伴い, 海上輸送における船用ディーゼル燃料としてのニーズが創出されるものと考えられる。これより, 発電用ディーゼルのみならず船用ディーゼルへのDME燃料転換も期待される。

5. おわりに

DMEはディーゼルエンジンの代替燃料として十分利用可能であることが実証試験において確認できた。DMEを燃料として普及させるためには, 利用先のインフラ整備が重要であるが, LPGに類似した特性より従来のLPG流通インフラの多少の改造で可能となる。本実証設備の技術を転用することによりDME受入・貯蔵設備の整備を行い, ディーゼル発電設備などの利用技術の実用化が進めれば, 製造への設備投資が加速され石油燃料の代替燃料として今後広く普及することが期待できる。

本開発研究は「DME大型ディーゼルエンジン発電システムの開発」として, 経済産業省によるDME燃料利用機器開発費補助事業のもとJFEエンジニアリング, ダイハツディーゼル, 岩谷産業の3社共同で実施したものである。経済産業省ならびに, ご協力をいただいた関係各位に対し謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水ほか4名, ISME 2005 Tokyo, Paper PD4-2
- 2) 清水ほか5名, CIMAC 2007 Vienna, Paper No. 62
- 3) 増田ほか4名, CIMAC 2007 Vienna, Paper No. 96
- 4) 増田ほか3名, 自動車技術, Vo. 61, No. 11, 2007, 87-92
- 5) 林ほか3名, 日本マリ学誌, Vo. 140, No. 6, 2005, 85-90

筆者紹介

清水 明

- ・ JFEエンジニアリング (株) エコパワー事業部
- ・ 早稲田大学大学院修了
- ・ 専門. 内燃機関, 熱工学

吉田 雅裕

- ・ JFEエンジニアリング (株) パイプライン事業部
- ・ 東京大学大学院修了
- ・ 専門. 流体解析, 情報工学

増田 和彦

- ・ ダイハツディーゼル (株) 守山事業所研究部
- ・ 長崎大学大学院修了
- ・ 専門. 内燃機関, 燃焼解析