

# 特集 グローバル化に対応したディーゼルエンジン マネジメントシステムの提案\* —燃料多様化への備え—

## New Solutions for a Globalization-Oriented Diesel FIE -Strategy for Diversified Fuels

小島 昭和  
Akikazu KOJIMA

菊谷 享史  
Takashi KIKUTANI

矢羽田 茂人  
Shigeto YAHATA

Diesel-powered vehicles need to cope with diversified fuel quality and environment of use to achieve sales expansion in the world. Therefore, the total engine management system which integrates three technologies— the injection system components provided with fuel-robust structure, the control system which underpins them to assure optimum combustion and the aftertreatment system which is capable of offering high conversion ratio under diversified cruise conditions and environments as well as controlling lowered fuel efficiency— has been developed by authors.

Key words : heat engine, compression ignition engine, engine management system, Electric Fields (A1)

### 1. まえがき

世界的規模で厳しくなる自動車のエミッション規制に加え、地球環境保護の観点からCO<sub>2</sub>削減の風潮が高まって久しい。CO<sub>2</sub>排出の大きな源の一つである自動車に対する風当たりは厳しく、これまで以上に緊急なエミッション、CO<sub>2</sub>削減が求められている。

燃費向上技術としてハイブリッド（HV）に代表される電気的なアシスト手段を持ったガソリン車の他に、熱効率が高く燃費面で優れるディーゼル車が、これまで普及が殆どなかった日本を始め、クリーンディーゼルとして世界各国で改めて見直される流れにある<sup>1)</sup>。また、物流や興国・産業発展の為に欠く事が出来ない大型商用車や農建機の分野においては、實際上ディーゼルエンジン以外には実用する事が難しい。

従ってディーゼル車両は経済発展の著しい新興国を中心に今後も販売台数を伸ばすと予想される。

販売地域の拡大による噴射系への影響という観点から、先進国においてはポストEURO6に代表される規制強化に備え噴射圧力のさらなる高压化要求と2030年以降に減少が予想される化石燃料の代替としてバイオ燃料や合成燃料等のへの対応が必要となる<sup>2)</sup>。

一方、新興国では先進国に倣って排気、燃費の規制強化が進みこの対応の為にコモンレール（CR：Common Rail）システムの普及拡大が予想されるが、地域特有の燃料使用による燃焼のバラツキや噴射系コンポーネントのダメージ等の問題が予想される。

このように先進国、新興国のディーゼル車の将来技術として「高压化」と「多様な燃料への対応」がキーワードとして浮かび上がる。

### 2. 開発コンセプト

このような背景の下、筆者らは地域フリー、燃料フリーを目指す事によってディーゼル車の世界各地への普及をサポートするエンジンマネジメントシステム（EMS：Engine Management System）の実現を目指した。

様々な地域、燃料に対してロバスト性を持っており優れたパフォーマンスを有するEMSを実現するために、噴射系のコンポーネントとシステム制御および後処理システムのあるべき姿からのアプローチを試みる事とした。

先ずFig. 1にてそれぞれのコンセプトおよび狙いを

\*自動車技術会の了解を得て、「自動車技術会論文集」Vol.45 No4 20144605より一部加筆して転載

説明する。

＜噴射系コンポーネント＞

様々な性状の燃料に対して効率、燃費に優れ、さらに搭載面からコンパクトでロバスト性を持った新規な構造のインジェクタと、効率、燃費に優れた高圧ポンプを主な構成要素とする噴射系である事。

＜噴射系システム制御＞

コンポーネントを下支えする為に燃料の性状を検出しそれに応じて噴射特性を事前に修正する事で常に良好な燃焼を確保して優れた燃費を維持できるような制御システムである事。

これによってエミッションの向上はもとより加速性能等ドライバビリティの確保を図るものである。

またコンポーネントに実害をもたらす燃料性状を検出しドライバーに交換を促すことで寿命の長い車両を保証する事も可能となる。

＜後処理システム＞

様々な走行条件や環境の下でも高い浄化効率を維持し、燃費悪化を抑制することが可能で、なおかつインフラに依存しない後処理システムである事。

これにより様々な地域においても大気中に有害物質を排出する事が無い後処理システムを提供できる。



Fig. 1 Engine Management System Concept<sup>3)</sup>

これらの技術を統合したEMSによって世界各地へのクリーンディーゼル車普及に貢献することを使命とした。

以下これら3つの構成要素について詳細を説明する。

3. 噴射系コンポーネント

クリーンで快適な運転を実現する為に、噴射系のコンポーネント (FIE: Fuel Injection Equipment) には、高効率、高性能、高精度及び環境に対するロバス

ト性が求められる。このうち世界の各地域での使用を想定すると、環境、その中でも特に燃料に起因する様々な課題に直面せざるを得ない。従って、前述のコンセプトを実現するには、燃料や使用環境の多様性への対応がキーポイントになる。

3.1 インジェクタ

Fig. 2は従来のインジェクタの構造を示すもので、制御室の圧力とノズル室の圧力の大小によって噴射が制御される。制御室圧力によって生じる下向きの力はコマンドピストンを介してノズルに伝えられる。

様々な地域、燃料に対してロバスト性を有する為には、バイオ燃料や合成燃料等の多様な燃料や、管理が十分でない新興国などバラツキの大きな燃料性状や異物の混入に対する備えがなければならない。

このため車両の生涯に亘って安定した作動を確保する為には、デポジットや異物の噛み込み等による作動不良を防ぐべく数 $\mu$ mの隙間からなる摺動部を極力減らすことが有効であると考えた。従来のインジェクタでは図からも明らかなようにコマンドピストンとノズルニードルの2部材が摺動部を持つ。

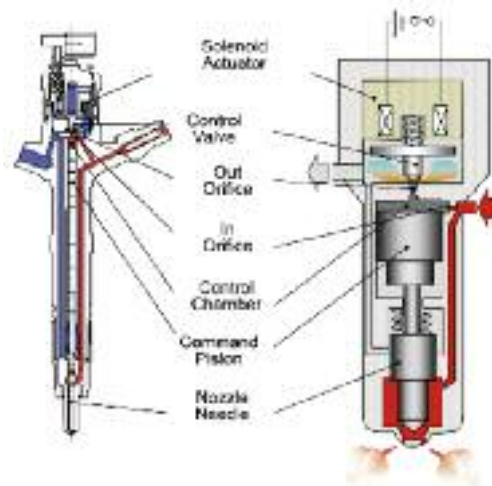


Fig. 2 Structure of Conventional Injector

また高圧化を進めるために燃料のリークを極限まで減らすことをもう一つの大きな方針とした。

摺動部や絞りを介して高圧から低圧に漏れる燃料のリークは圧力の上昇に伴って急激に増加する。

高圧の燃料が低圧になると所有していた圧力エネルギーが熱エネルギーに変換されるために、ポンプやインジェクタの構成部品が受熱して高温になる。それにより燃料温度が上昇するために燃料の動粘度が低下してさらにリーク量が増える、という悪循環が生じてしまう。

燃  
料

この結果、摺動部の潤滑不良やコネクタ等の樹脂部品の熱害、また特に酸化安定性の低い高濃度バイオ燃料等でのデポジットの発生、さらには無駄に捨てられる燃料分を圧送するためにポンプが必要とする仕事増加による燃費の悪化が発生する。

以上述べたように、様々な燃料に対してロバスト性を有するための摺動部削減とさらなる高圧化を進めるためのリーク低減を目的として開発した新規インジェクタ（G4S）の構造をFig. 3に示す。

従来の構造ではインジェクタの上部に設置していたソレノイドアクチュエータをインジェクタ内部に搭載し、ノズルの直上に制御室を設けることで摺動部材の一つであるコマンドピストンを廃止した。これにより摺動部で常時発生する燃料リーク（静的リーク）を無くすることができる。

さらに従来の構造ではノズルの上部に低圧室が設けられていた為ノズルニードル部でも常時リークが発生していたが、新規構造とする事でノズルの上部は高圧室となる為にこの部材の摺動部での静的リークも無くす事ができる。

このように今回開発したG4Sインジェクタでは噴射、非噴射を問わず常に静的リークをゼロにする事が可能となった。

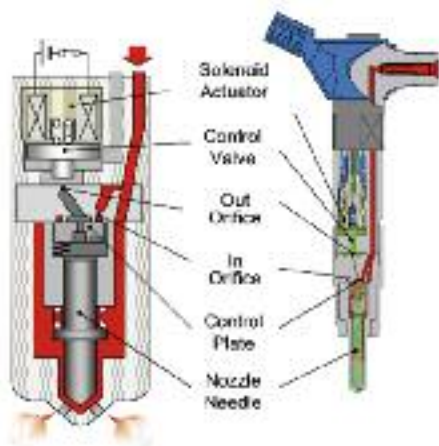


Fig. 3 Structure of G4S

また噴射時のバルブ作動中に生じる動的リークを必要最小限とする為にノズルの作動により押し出される容積のみのリークを許容する全く新規なコンセプトのバルブを開発した（Fig. 4）。以下にその詳細を述べる。

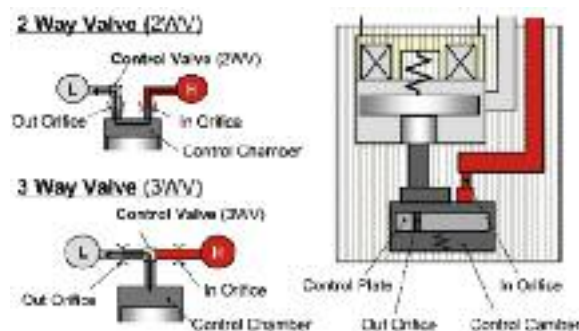


Fig. 4 New Concept Valve<sup>4) 5)</sup>

従来のインジェクタでは制御弁に2方弁を用いており（同図左上）、制御室から繋がる低圧経路の開閉のみを行うために制御バルブが開いている噴射時には制御室に高圧燃料が流入しその燃料が低圧経路にリークする動的リークが発生してしまう。

このリークを極力減らす為には、制御室と連通する経路を切替えることで、噴射中に高圧経路を閉ざして高圧燃料の流入を防ぐ3方弁機能（同図左下）が必要である。

筆者らは、ピエゾインジェクタで3方弁を採用しているが、ピエゾの大駆動力があってこそ実現できるものであり、ソレノイドでは構成が困難であった。

今回、如何にしてソレノイドで3方弁機能を持たせるかが開発のポイントであった。

この目的を達成する為に、制御室にアウトオリフィスを有する制御プレートを新たに設けた（同図右）。噴射時には制御プレートが図の上面に密着し制御室内の燃料はアウトオリフィスを介して排出されて制御室圧力が低下し噴射を開始する。この時、制御プレートが高圧経路を塞ぐ構造としているために高圧燃料の流入を防ぎ、2方弁では噴射時に発生する動的リークをノズルの上昇に必要な量に限定することが可能となる。噴射終了時には制御プレート上下の差圧力を利用してインオリフィスから高圧燃料が制御室を満たすことで制御室圧力が高圧となり、ノズルが下降して噴射が終了する。

Fig. 5は実際のバルブ部構成を示すものである。

コマンドピストンを持たずソレノイドバルブを本体内部に設置したことにより従来のインジェクタに対してコンパクトな形状を実現することができる。

これまで述べてきたように、コマンドピストンを廃止することで摺動部を削減したため異物やデポジットなどに対してもロバスト性を有する構造となっている。またノズルの直上に高圧燃料を導入しているため



に高圧と低圧の燃料が摺動部を挟んで存在しないため、常時発生する静リークの無い構造である。

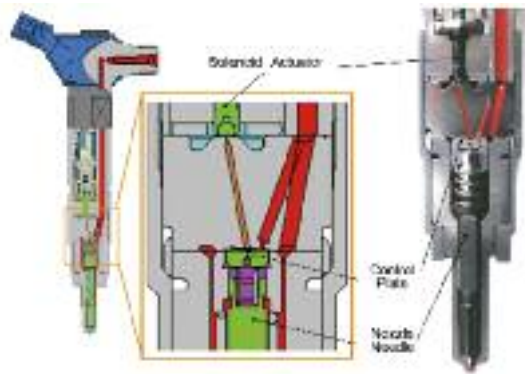


Fig. 5 G4S Injector Structure <sup>4) 5)</sup>

Fig. 6は実際のリーク量を測定したもので、狙い通り静的リークをゼロに、また動的リークを必要かつ最小限な値に抑える事が出来た。その結果、従来のインジェクタの1/6~1/8程度と大幅な低減が可能である事が確認できた。

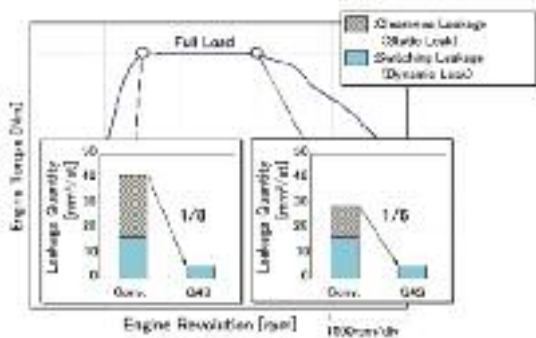


Fig. 6 Fuel Leakage Comparison <sup>4) 5)</sup>

### 3.2 ポンプ

次に高圧サプライポンプの開発について述べる。

様々な地域、燃料に対してロバスト性を有する為には摺動部を持つプランジャの動きを阻害する異物の発生を防ぐ事、およびインジェクタと同様、如何にしてリークを低減するかが高圧ポンプ開発のポイントであった。

吸入経路を絞ることによりコモンレール、インジェクタに圧送するのに必要な分だけの燃料を吸い込む「吸入調量方式」ではプランジャが下がった時に、経路に設置した絞りの影響によってプランジャ室は負圧となりキャビテーションが発生する。その状態でプランジャが上昇してプランジャ室の燃料が急速に圧縮され（急速であると熱の逃げが少ないため）高温となると、その熱で燃料中の炭素がデポジット化する。

そこで今回筆者らは原理的にデポジットを発生しないように、燃料を全量吸入して必要な量だけ圧送する「PCV (Pre-stroke Control Valve) 方式」を採用した (Fig. 7)。

これにより燃料吸入時に絞られることが無いため経路が負圧とならず、キャビテーションの発生を抑制しデポジットの発生を防ぐことが可能となる。

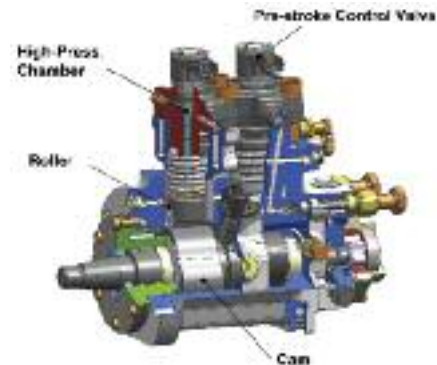


Fig. 7 New High Pressure Supply Pump <sup>6)</sup>

次にリーク低減についてであるが、プランジャの上昇に伴いプランジャ室の燃料圧力が高まると数μmの隙間を持つ摺動部から高圧燃料がリークする。先述したように燃料圧力が高いほどリーク量が増えるが圧力エネルギーが熱エネルギーに変換されるためにリーク量が多いほどポンプ本体の温度が上昇する。

このため今回、ポンプ本体の温度を抑える目的で比較的低温、低圧の吸入燃料（フィード燃料）を摺動部近傍のハウジングに供給する冷却溝を新たに設ける構造とした (Fig. 8左図)。

これによってハウジングが冷却される為にリークする燃料の温度を下がり動粘度の低下を抑制して摺動部からのリークを減らす事を狙いとした。

Fig. 8右図は新規構造を有する高圧ポンプ (HP7) の性能を従来品と比較したものである。300MPaという超高压の条件において、上述した冷却溝の設置によって従来に比べてリーク温度を70℃程度低下させられる事が確認できている。

このように、リーク温度を抑えリーク量を低減する事ができる為に、吸入・圧縮した高圧燃料をコモンレールおよびインジェクタまで有効に圧送できる事から、従来品で200MPaの条件と比べて、HP7では300MPaと高压でありながら同等以上の容積効率が得られることがわかった (同図右下)。

燃  
料

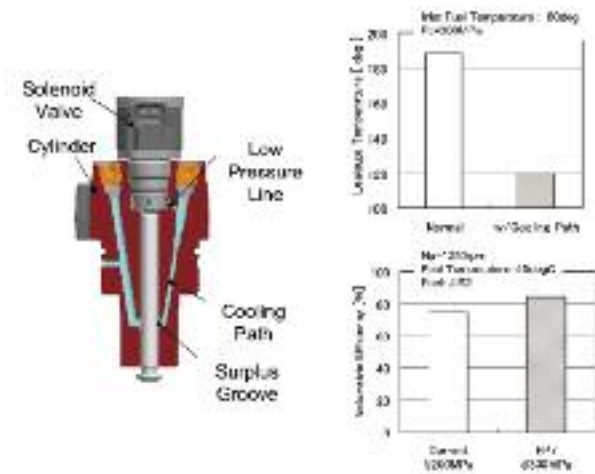


Fig. 8 Comparison of Pump Performance<sup>6)</sup>

#### 4. FIEシステム制御

次にこれまで説明してきたFIEコンポーネントの性能を最大限に発揮させる為にこれをサポートするFIEシステム制御について説明する。

##### 4.1 i-ARTシステム

これまで筆者らはインジェクタ内部に圧力センサを設置して噴射に起因して発生する圧力変動を検出する事で噴射特性を推定するi-ART (intelligent Accuracy Refinement Technology) システムの開発を進めてきた (Fig. 9)。

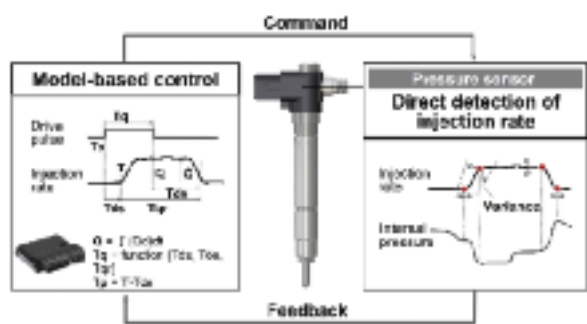


Fig. 9 i-ART System<sup>7)</sup>

運転条件ごとに目標とする噴射特性をECU内部にモデル値として持ち、実際の噴射特性をこの値に合わせるようフィードバック制御する事で、インジェクタ個体間の噴射特性のバラツキや経時変化を生涯に亘って保証するものである。

今回、FIE制御システムとしてこのi-ARTシステムを活用する事とした。

燃料の性状は燃焼特性や潤滑性に大きく影響する為、燃料性状を検出する事は車両としての性能や信頼性を語る上で非常に重要な技術となる。

つまり出力、エミッションやドライバビリティを確保する為には、燃料性状に応じて燃焼が最適となるよう噴射時期等の噴射特性をフィードバックできる事が理想である。

例えば低セタン価燃料の場合、着火性の悪化によりNO<sub>x</sub>-CO<sub>2</sub>のトレードオフが悪化するが<sup>8) 9)</sup>、i-ARTによってセタン価 (CN) を検出できれば、これを改善できる可能性がある。

Fig. 10はi-ARTシステムにより燃料セタン価を検出しその値に応じて噴射時期をフィードバックした例である。

試験は排気量2.2l、車重1.5tの車両を用いてNEDCモード走行にて評価した。

CN=40の燃料では噴射時期が同じでも着火時期が遅れるために燃焼が悪化する。このためCN=57の場合と比べNO<sub>x</sub>-CO<sub>2</sub>のトレードオフが悪くなる。燃料がCN=40であることがわかれば着火遅れ時間が推定できるためにCN=57と同じ着火時期となるように噴射時期を進角させてやればよい。このような操作によりCN=40の燃料でのトレードオフを改善してCN=57の特性に近づけることが可能となる。

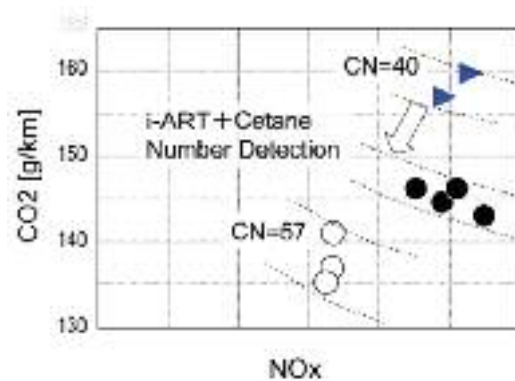


Fig. 10 Effect of Detecting Fuel Properties<sup>3)</sup>

ここでセタン価をどのように検出したか、その方法について述べる。今回、噴射量と発生トルクの関係がセタン価、即ち着火時期によって変化する事を利用した。車両運転時の減速で燃料を噴射していない時に微小な噴射を行うとセタン価の違いによって着火時期が変化するためそれに応じて発生するトルク、即ちエンジン回転数が変動する。

従ってエンジン回転数の変化を検出する事によって

その時の燃料のセタン価を推定する事が可能となる。

しかしながら通常の噴射系システムでは燃料がどれだけ噴射されたかを正確に知る手段が無い為にこの手法を使おうとしてもその精度は悪く実用に供されないでいた。

これに対してi-ARTシステムでは先述したように噴射特性を推定することが可能なため正確な噴射量を検出する事ができる。従ってエンジンの回転数変化から噴射量に見合ったトルク変動を検出する事で燃料のセタン価を正確に推定する事が可能となる。

#### 4.2 燃焼性能に対する考え方

これまで様々な地域、燃料に対してロバスト性を持つ為のあるべき姿に則った噴射系コンポーネントとシステム制御の開発状況について述べてきた。

ここで出力、エミッション、ドライバビリティに直接影響する燃焼性能についての本システムの位置付けを説明する。

先述のロバスト性を持った噴射系コンポーネントによって噴射系、ひいてはエンジンの信頼性確保という観点では十分であるが、燃焼性能面では十分でない。

また燃焼性能に対してはCPS（筒内圧力センサ）等によって燃焼状態を直接検出して最適値にフィードバックする事が最も理想である<sup>9) 10)</sup>が、コストや搭載性などの面で必ずしもCPSを搭載する事ができない車両がある。

これに対し燃料に対してロバスト性を有するコンポーネントとi-ARTを用いて燃料性状の検出が可能な噴射系システム制御を併用する事で、世界各国の様々な燃料性状に合わせた最適な噴射制御が可能となる。

またi-ARTシステムでは最適な噴射が生涯に亘って保証できる事から、コンポーネントのみでは達成できない燃焼の安定性確保の為の一助を担う事ができるものである。

### 5. 後処理システム

これまで筆者らは、EMSの複雑化、高コスト化を抑えつつ燃費メリットを活かす事でディーゼル車の市場ステータス向上に貢献する、いわゆる“ディーゼルレボリューション”の実現を目指して開発を進めてきた。「知恵 (smart)」即ち、時々刻々の噴射特性をフィードバックするi-ARTシステムと「力 (power)」即ち、最高噴射圧力が250乃至300MPaという超高圧噴射が可

能な第4世代コモンレールシステムを融合する事でこれまでにない新規な価値を創造する事を狙いとしたものである。

この方針の下、今回は先述のようにロバスト性を持った噴射系コンポーネントとi-ARTシステムの有する機能を最大限に活かした噴射系システムの制御開発を行ってきた。

しかしながら噴射系の改善のみでは、たとえば燃料性状等のバラツキに対して最適解を示すことはできてもエミッション、燃費バラツキそのものを低減するには限界がある。したがって想定を超える性状の燃料や環境条件の下でもエミッションを外部に決して漏らさない為には、安定でコスト、搭載性に優れる後処理システムを開発する必要がある。

このためのアプローチとして、現状のSCR、LNTの性能を向上させ最終的にはインフラに頼らない後処理システムを提供する事を目指す。

今回はその前段階として現状のLNT、SCRに電気的なアシスト手段を加えたシステムの可能性を調査した。

規制値の強化に加え、燃費向上技術の進展や様々な走行パターンの導入によって、NOx触媒では特に低温浄化性能向上が求められている<sup>11)</sup>。

この為、筆者らは将来予想されるバッテリー電圧の上昇やHV等の電動化との併用を見据えて電気エネルギーの有効利用が可能なプラズマを後処理のアシスト手段として使用した場合のポテンシャルを調査する事とした<sup>12)</sup>。

Fig. 11はNEDCと、将来予想されるWLTCの各モードを走行した時の触媒入口温度を示している。車両は排気量2.2L、車重は約1.5tでAT車両を用いた。いずれのモードにおいても触媒の活性する温度（200℃程度）に到達するまでに10分以上かかり、その間はNOxが浄化されずにそのまま排出されてしまう。今後はNOxの更なる規制強化が予想されるため、この間の排出を防ぐためのなんらかの触媒昇温手段等が必要であると考えられる。

今回筆者らは、プラズマによる電気アシストによりどの程度のNOx低減効果が期待できるかを見積もることとした。



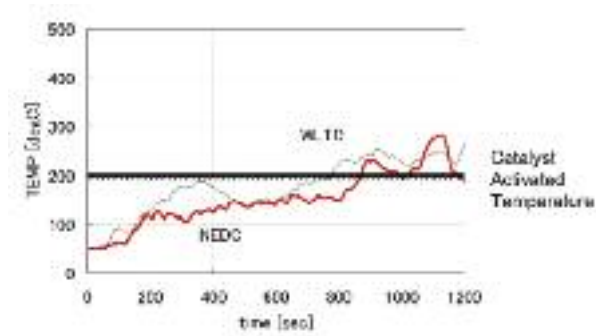


Fig. 11 Catalyst Temperature in Emission Mode

Fig. 12に今回試験に供したシステムを示す。排気を模擬したガスをプラズマリアクタに導入し、下流のLNT触媒で吸着性能を確認した。LNT温度を電気炉で調整することで各種条件での浄化特性を調査した。

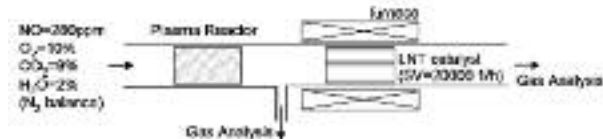


Fig. 12 Test Configuration

Fig. 13にその結果を示す。今回我々は電極形状や電源供給法に工夫を加えることでプラズマリアクタのエネルギー効率を高めることができたため、低排気温でのNO酸化に伴う燃費悪化率を0.5%程度と小さな値に抑えることができた。同図左はプラズマの供給エネルギーに対するNO→NO<sub>2</sub>への変換効率をプロットしており、ある程度以上のエネルギーを加えることで、常温でも高い変換効率が得られる事から触媒での十分な吸蔵量確保が期待できる。

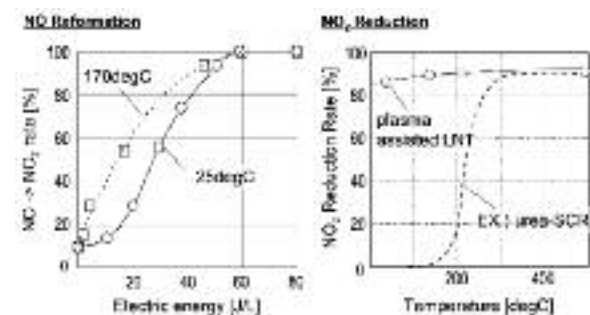


Fig. 13 Comparison of NOx Conversion Efficiency <sup>12)</sup>

同図右は、NO<sub>2</sub>の浄化率を尿素SCRと比較したもので、尿素SCRに比べてもプラズマの効果により常温から高い浄化効率が得られる事が確認できた。

## 6. まとめ

以上述べてきたように、ディーゼル車の世界各地域への普及に貢献する為に、地域、燃料フリーを実現する全く新しいエンジンマネジメントシステム開発の目処を得た。

このシステムは、様々な燃料に対して効率、燃費に優れ、コンパクトでタフネスな噴射系コンポーネントと、そのコンポーネントを下支えするために燃料の性状を検出し最適な燃焼を実現するための噴射系システム制御、さらに様々な走行条件や環境の下でも高い浄化率と燃費優位を実現する後処理システムの3つの技術を統合したものである。

筆者らはディーゼルレボリューションの実現を目指し今後も鋭意開発を続けていく。

## <参考文献>

- 1) 経産省 クリーンディーゼル乗用車の普及・将来見通しに関する検討会 報告書 平成17年4月
- 2) ExxonMobil's 2013 Outlook for Energy
- 3) Shinohara et al.: 3000bar common rail system, MTZ worldwide Edition, 2011-01, Vol72, 4-8
- 4) Suzuki et al.: 4th Generation Common Rail System, 2013 JSAE Annual Congress (spring) 330-20135271
- 5) Matsumoto et al.: Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System, SAE Technical Paper 2012-01-1753
- 6) Miyaki et al. : Fulfilling Euro6 Emission Regulations for Heavy Duty Engines without SCR-System-A Challenge to the FIE System, Wien 2011
- 7) Miyaki et al. : The Breakthrough of Common Rail System: Closed-loop Control Strategy Using Injector with Built-in Pressure Sensor, Wien 2009
- 8) 三輪 恵 : 燃料性状とエミッション, 自動車技術, 20054240
- 9) 首藤登志夫ほか : ディーゼル機関における低セタン価燃料利用のためのパイロット噴射による燃焼制御, 日本機械学会論文集 (B編) 73巻733号 (2007-9)
- 10) Yamamoto et al. : Development of Cylinder Pressure Measurement System Using Adaptive Calculation, SAE2008-01-1009

- 11) A. G. Panov et al. : Selective Reduction of NOx in Oxygen Rich Environment with Plasma-assisted Catalyst, SAE2001-01-3513
- 12) Itoh et al. : NOx Reduction Behavior on Catalysts With Non-Thermal Plasma in Simulated Oxidizing Exhaust Gas, SAE2004-01-1833

---

<著 者>



小島 昭和  
(こじま あきかず)  
ディーゼル噴射事業部  
ディーゼル事業の技術企画  
に従事



菊谷 享史  
(きくたに たかし)  
ディーゼルシステム技術部  
ディーゼルエンジンマネー  
ジメントシステムの開発に  
従事



矢羽田 茂人  
(やはた しげと)  
ディーゼル噴射事業部  
ディーゼル排気浄化システ  
ムの開発に従事