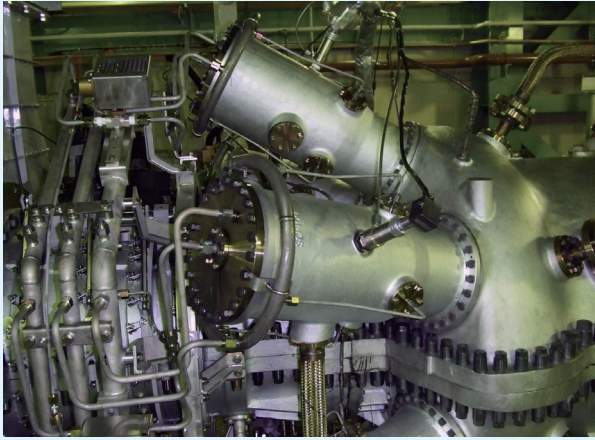


# ガスタービンの環境性能をさらに高めるDLE燃焼技術

## DLE Combustion Technology for Enhancing the Environmental Performance



小田 剛生① Takeo Oda  
 緒方 正裕② Masahiro Ogata  
 松本 匡史③ Kiyoshi Matsumoto  
 青木 茂樹④ Shigeki Aoki  
 堀川 敦史⑤ Atsushi Horikawa  
 平野 昂志⑥ Kohshi Hirano

当社では、0.7～30MWクラスの常用ガスタービンを各種取りそろえており、全機種に対して世界最高レベルのエミッション性能を保証すべく、燃焼器の開発・量産化を行っている。本稿では、当社のDLE (Dry Low Emissions) 燃焼技術の開発および実証について述べる。

With a product lineup of 0.7 to 30-MW class gas turbines, we are engaged in the development of combustors and working to bring them into mass-production with the aim of assuring the world's top class emission performance in all models. This paper describes the development and demonstration of our DLE (Dry Low Emissions) combustion technologies.

### まえがき

環境保全意識の向上から、ガスタービン発電システムに対する環境規制は年々厳しくなっており、今後もこの傾向は続くと考えられる。ガスタービンメーカー各社はこれに対応するために、低エミッション燃焼器の開発を推進している。当社では、0.7～30MWクラスの常用ガスタービンを各種取りそろえており、全機種に対して低エミッション燃焼器の開発・量産化を行っている。

本稿では当社での低エミッション燃焼器の開発と、世界最高レベルのエミッション性能保証値を実現している実例を紹介する。

### 1 ガスタービンのエミッションと低減メカニズム

ガスタービン燃焼器から排出されるエミッションは、主に二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)と一酸化炭素(CO)である。CO削減はガスタービン本体の性能向上により達成されるものであり、ここでは燃焼改善で削減可能なNO<sub>x</sub>とCOについて記述する。NO<sub>x</sub>の排出要因は、生成メカニズムにより、高温域で生成される「サーマルNO<sub>x</sub>」、燃料過濃火炎面で生成される「プロンプトNO<sub>x</sub>」、燃料分子中に含まれる窒素分が酸化して生成される「フューエルNO<sub>x</sub>」の3つに分類される。ガスタービン発電装置の場合、NO<sub>x</sub>排出量を支配するのは「サーマルNO<sub>x</sub>」であり、これをいかに低減するかがキーとなる。(以下、本稿ではNO<sub>x</sub>とはサーマルNO<sub>x</sub>のことを指す。)一方、COは、炭化水素燃料が燃焼しCO<sub>2</sub>となる手前の中間生成物であり、火炎温

度を高めることや高温場での滞留時間を延ばすことで低減できる。

NO<sub>x</sub>は火炎温度が高くなると、急激に生成量が増加する。一方で、COは火炎温度が低くなると急増する。このため、図1のように部分的にでも高温領域があれば、その領域で大量にNO<sub>x</sub>が生成され、低温領域があればその領域で大量にCOが生成される。

NO<sub>x</sub>低減のためには、平均火炎温度を下げ、火炎温度を平滑化するために、燃料濃度分布の均一化を行いつつ、一方で、CO排出とのバランスを取ることが重要である。

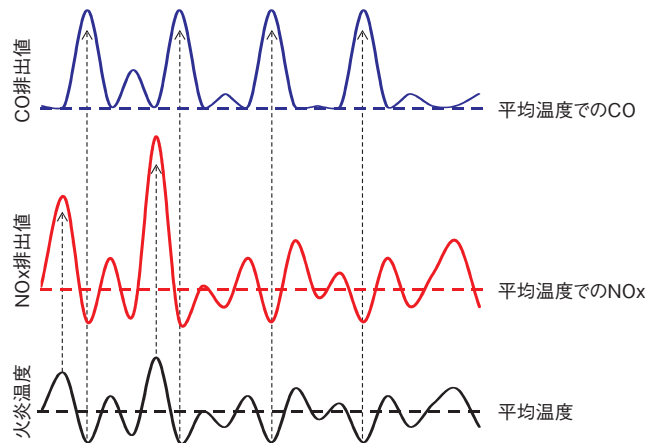


図1 NO<sub>x</sub>およびCO生成量と火炎温度分布の関係  
 Fig.1 Relationship between NO<sub>x</sub> and CO formations and flame temperature distribution

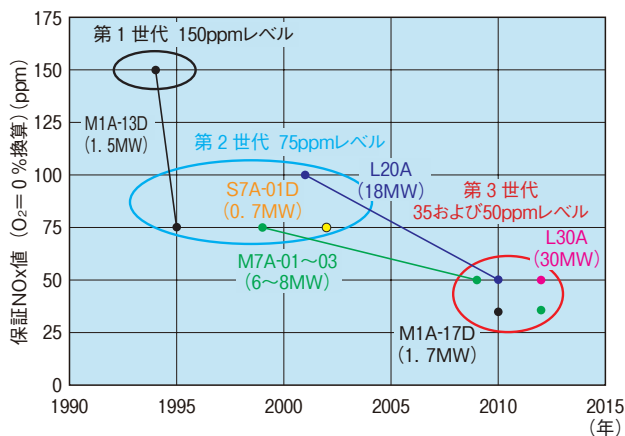


図2 当社でのDLE燃焼技術の系譜  
Fig. 2 History of Kawasaki DLE combustion technologies

## 2 当社での低エミッション燃焼器開発

### (1) 当社DLE燃焼技術の系譜

ガスタービン燃焼器では、当初は拡散燃焼器に水または蒸気を噴射することでNO<sub>x</sub>を低減する手法を採用していたが、1990年代に水または蒸気を噴射することなくNO<sub>x</sub>を低減できるDLE (Dry Low Emissions) 燃焼技術が開発された。当社でも1990年代中頃よりDLE燃焼技術を開発、量産化している<sup>1)</sup>。その後、常用ガスタービン全機種への展開、NO<sub>x</sub>保証レベルの低減に向けた取り組みを継続的に実施している。当社でのDLE燃焼技術の系譜を図2に示す。第1世代のDLE燃焼技術はNO<sub>x</sub>保証が150ppm (O<sub>2</sub>=0%換算) レベルであり、第2世代で75ppmレベルまで低減した。現在は第3世代であり、世界でトップレベルである50ppmまたは35ppmを保証している。

### (2) 当社のDLE燃焼器の特徴

ガスタービン各社が採用している希薄予混合燃焼方式のDLE燃焼器は、空気と燃料をあらかじめ混合させてから

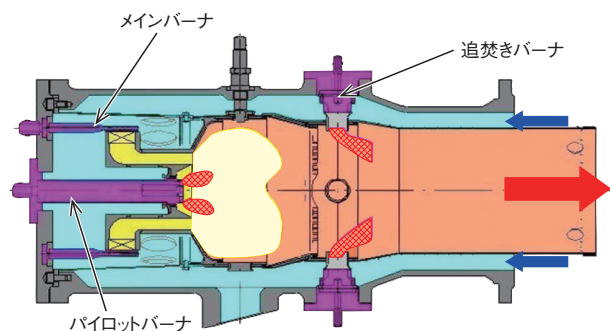


図3 M7A-03用第3世代DLE燃焼器概略図  
Fig. 3 Schematic diagram of third-generation DLE combustor for M7A-03

燃焼させることにより、火炎温度を一様かつ、低く制御してNO<sub>x</sub>排出を抑制できる。一方で、本方式は安定して燃焼できる範囲が狭く、CO排出との両立を考慮すると運転範囲が狭い。当社のDLE燃焼器では、予混合希薄燃焼を行うメインバーナの燃焼状態を低NO<sub>x</sub>かつ安定した条件に維持し、エンジン出力に応じた燃料の増減を追焚きバーナの燃焼量で吸収することで、低NO<sub>x</sub>と燃焼安定性が両立する運転範囲を広げることができる。

当社DLE燃焼器 (M7A-03 第3世代DLE燃焼器) の概略図を図3に示す。当社のDLE燃焼器は上記に加えて、始動/低負荷時に用いるパイロットバーナを含めた3系統のバーナで構成されている。バーナ制御 (燃料配分制御) とNO<sub>x</sub>排出のイメージを図4に示す。

### (3) DLE 燃焼器の開発

DLE燃焼器開発時では数値流体力学 (CFD) 解析、流れ計測、リグ燃焼試験などにより形状の調整を行い、エンジン試験にて確認を行う。問題があれば、同様のことを繰り返して最終的な量産形状が得られるまで最適化を行う。

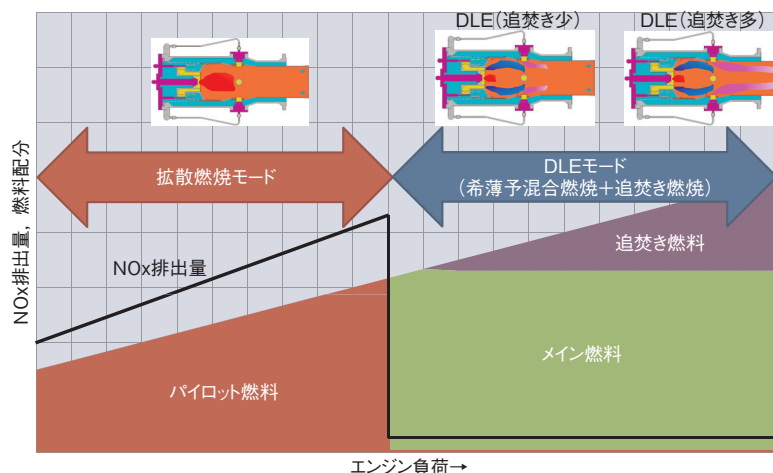
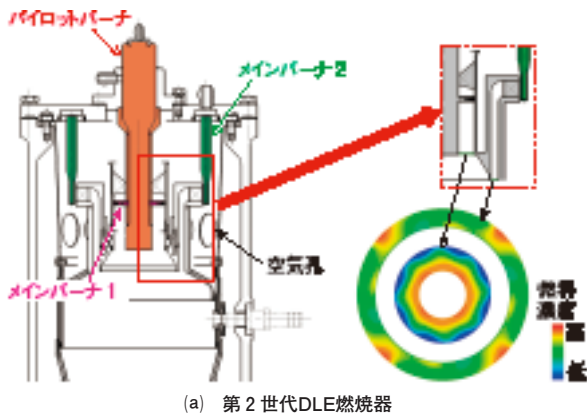
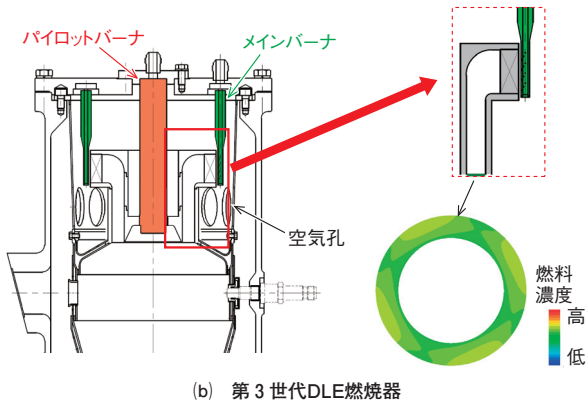


図4 当社DLE燃焼技術でのバーナ制御とNO<sub>x</sub>排出イメージ  
Fig. 4 Conceptual diagram of burner control and NO<sub>x</sub> emission using Kawasaki DLE combustion technology



(a) 第2世代DLE燃焼器



(b) 第3世代DLE燃焼器

図5 メインバーナ出口燃料濃度分布

Fig. 5 Fuel concentration distribution at outlet of main burner



(a) 全体図

(b) 燃焼器出口

図6 PIV計測用アクリル製燃焼器

Fig. 6 Acryl combustor for PIV measurement

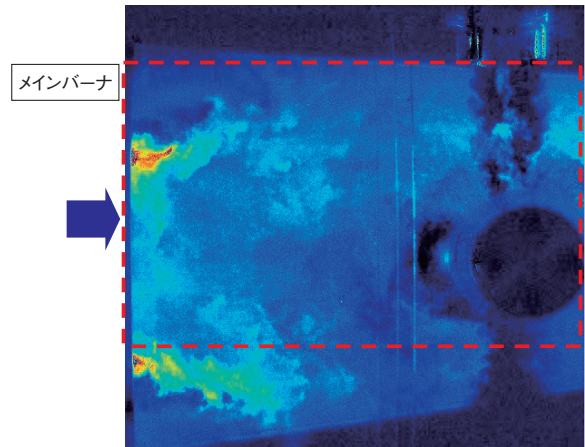


図7 オイルミストを用いた燃焼器内流れの可視化画像

Fig. 7 Image of internal flow of combustor visualized with oil mist

(i) CFD解析

NO<sub>x</sub>を低減するためには燃料濃度分布の均一化が必要である。濃度分布を改善するために実施したCFDによる混合解析例を図5に示す<sup>2)</sup>。図5(a)は第2世代DLE燃焼器、図5(b)は第3世代DLE燃焼器について示している。各図の左側はメインバーナおよびパイロットバーナ全体の断面図であり、右側はメインバーナ出口の濃度分布のCFD解析結果と、濃度分布の評価位置である。メインバーナ流入空気に対する燃料噴射位置を最適化することで、第3世代DLE燃焼器では、より均一な濃度分布が得られていることが分かる。

(ii) 流れ計測

燃焼器内部流れ計測方法の一例としてPIV (Particle Image Velocimetry) 計測を紹介する。PIVとは流体に微小な粒子を添加し、その粒子の速度をレーザ光で計測することにより、流体の速度場を調査する手法である。PIV計測に用いたアクリル製燃焼器を図6に示す。本ケースでは、燃焼器出口側からレーザ光を照射し、側面から計測を行っている。燃焼器内に微小粒子としてオイルミストを流して、そのミー散乱光により流れを可視化した画像を図7に、図7の赤点線枠内をPIV計測して得られた速度ベクトル図を図8に示す。

(iii) リグ燃焼試験

当社は、ガスタービン燃焼器の燃焼試験設備を5つ保有し、それぞれの試験目的に応じて使い分けている。代表的

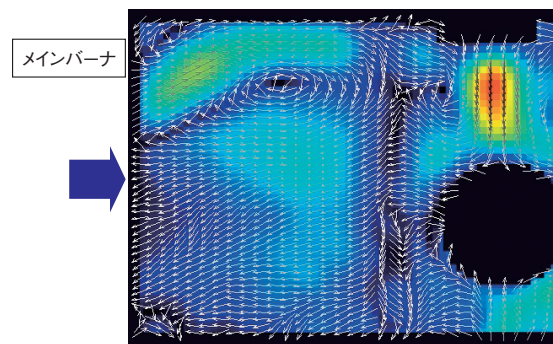


図8 PIV計測結果 (速度ベクトル)

Fig. 8 Result of PIV measurement (Velocity vector)

な燃焼試験設備の系統図を図9に示す。空気はエンジンでの燃焼器入口状態を模擬するために、所定の条件まで圧縮・昇温し、燃焼器に供給される。燃料は、別系統で流量制御して燃焼器内に供給する。燃焼器内で発生した高温の燃焼ガスは、冷却してから大気に放出している。

リグ燃焼試験では、着火性能やエミッションなどの燃焼性能や、燃焼器の耐久性に関わるライナ壁温などを計測し、これを基にエンジン試験前に改良設計を行う。また、試験中は燃焼器下流に設けられた観察窓から火炎の様子を常時観察している。燃焼器下流から撮影した火炎画像を図10に示す。火炎観察は、燃焼状態を理解する上で非常に重要な

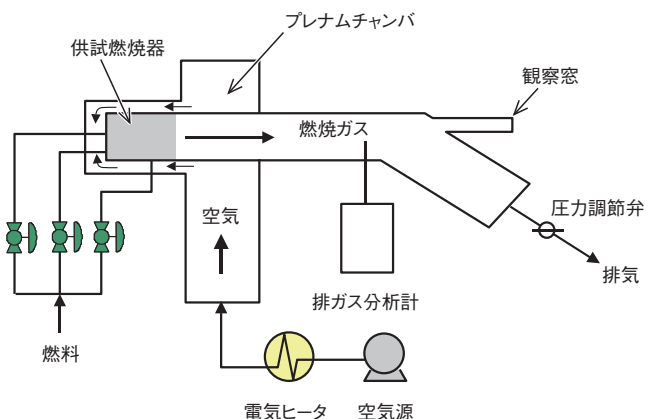


図9 燃焼試験設備系統図  
Fig.9 System diagram of combustion test facility



図12 M7A-03搭載発電装置 (PUC80D)  
Fig.12 Power generation plant (PUC80D) with M7A-03

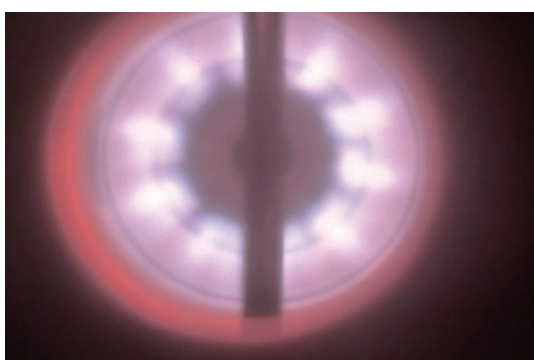


図10 燃焼器下流から観察した火炎画像  
Fig.10 Image of flame as observed from downstream of combustor

手段である。また、リグ燃焼試験では燃料条件や空気条件をそれぞれ独立して変化させることができるため、広範囲な条件でのデータを取得することができる。例えば、エンジン試験では、吸気温度が $-20^{\circ}\text{C}$ や、 $+50^{\circ}\text{C}$ という条件で試験をすることは困難だが、リグ燃焼試験では、このような条件時の燃焼器入口条件を模擬することも可能である。

(iv) エンジン試験

M7A-03第3世代DLE燃焼器を搭載したエンジン試験の結果を図11に示す。負荷率50~100%まで $\text{NO}_x$ とCOの低減が両立していることが分かる。

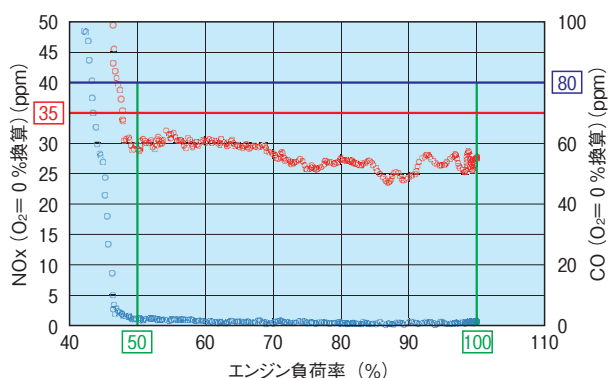


図11 エンジンでの $\text{NO}_x$ およびCO排出  
Fig.11  $\text{NO}_x$  and CO emissions from engine

3 最新第3世代DLE燃焼システムの実証

開発の最終段階として、当社工場内に実証設備を設置し、運用を行っている。第3世代DLE燃焼システムが搭載された実例として、当社明石工場内で運用されているM7A-03の発電装置 (PUC80D) を図12に示す。ここでは $\text{NO}_x=35\text{ppm}$  ( $\text{O}_2=0\%$ 換算) 以下で運用されている。

あとがき

環境規制の強化や環境保護意識の高まりから、低エミッション化への要求には終わりが無い。今後も世界最高レベルの環境性能を実現できる燃焼技術を開発し、市場に提供していく所存である。

参考文献

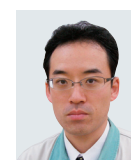
- 1) Kajita, S., et al. :“An Advanced Development of a Second-Generation Dry Low- $\text{NO}_x$  Combustor for 1.5MW Gas Turbine”, ASME 96-GT-49. (1996)
- 2) 松本ほか：“M7A-03ガスタービンDLE燃焼器の開発”，日本ガスタービン学会，第37回ガスタービン定期講演会 (2009)



小田 剛生



緒方 正裕



松本 匡史



青木 茂樹



堀川 敦史



平野 昂志