

# 新中央副室式低 NO<sub>x</sub> ディーゼル機関の研究開発

## Development of New Concept Prechamber Diesel Engine for Low-NO<sub>x</sub> Emissions

技術本部 井元 浩二\*<sup>1</sup> 大村 忠雄\*<sup>2</sup>  
片岡 洋一\*<sup>2</sup>  
相模原製作所 原田 常雄\*<sup>3</sup> 高石 龍夫\*<sup>4</sup>

300 kW クラスの定置式（コージェネ、発電機用）ディーゼルエンジンの低 NO<sub>x</sub> 化のために、当社相模原製作所 S6R ディーゼル（6 シリンダ、ボア×ストローク=φ170×180 mm）の単筒エンジン及び基礎試験装置を用いて、当社独自の新中央副室式燃焼システム、新水噴射方式を追求し、その技術的可能性を検討した。その結果、新中央副室式燃焼システムにより、熱効率 37%（実機換算）、NO<sub>x</sub>（残存 O<sub>2</sub> 13% 換算）=184 ppm を実現するとともに、新水噴射方式との組合せにより、熱効率 39%、NO<sub>x</sub>=88 ppm を実現し、超低 NO<sub>x</sub> 化を達成できた。また、本燃焼システム各要素の基礎、燃焼特性及びその有効性を明確化できた。

In order to reduce NO<sub>x</sub> emissions of a 300 kW stationary diesel engine, a new concept prechamber combustion system and a stratified fuel-water injection system were installed in a Mitsubishi SR diesel engine (single cylinder with 170 mm bore and 180 mm stroke), a fundamental test apparatus was constructed, and it was tested to investigate its possibilities. As a result, a NO<sub>x</sub> concentration of 184 ppm (excess O<sub>2</sub> 13%) at the brake thermal efficiency of 37% was obtained by the new prechamber combustion system, a NO<sub>x</sub> concentration of 88 ppm (excess O<sub>2</sub> 13%) at the brake thermal efficiency of 39% was obtained with this system in combustion with the stratified fuel-water injection system. The fundamental combustion characteristics of each element of the new prechamber combustion system and its availability were clarified.

### 1. ま え が き

石油コージェネ、発電機の普及に伴い、定置式ディーゼルエンジンに対して、大都市圏では、NO<sub>x</sub> 114 ppm 以下（残存 O<sub>2</sub> 13% 換算）という非常に厳しい排出規制を平成 4 年 4 月から施行している。これに対処するために、多方面で各種の NO<sub>x</sub> 対策が精力的に進められている。低 NO<sub>x</sub> 化に有利な副室式ディーゼルエンジンでも、NO<sub>x</sub> 114 ppm 以下は非常に厳しく、熱効率の低下を最小限に抑えた超低 NO<sub>x</sub> 燃焼システムの開発が必要である。そこで、本研究では、定置式ディーゼルエンジンの超低 NO<sub>x</sub> 化のために、新中央副室式燃焼システム及び新水噴射方式を追求し、その技術的可能性を検討したので報告する。

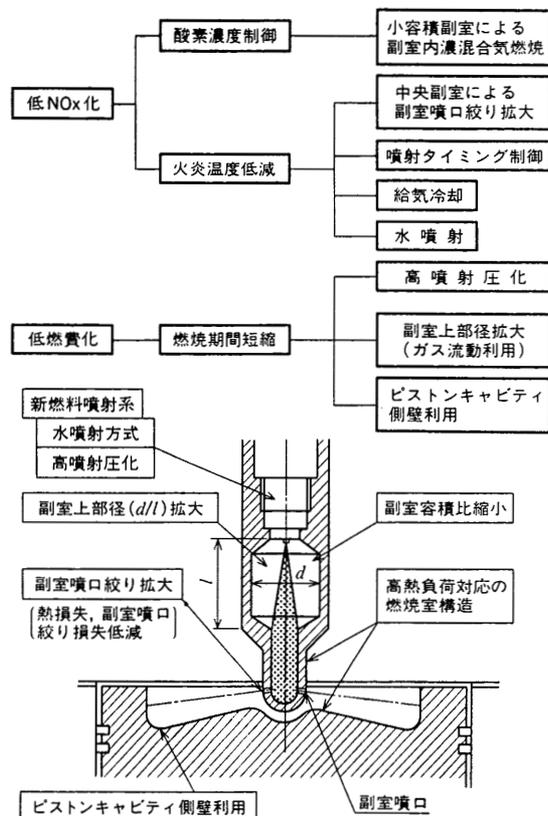
### 2. 本研究の技術的ねらい

前記背景に基づき、本研究では 300 kW クラスの定置式ディーゼルエンジンを対象に、目標値 NO<sub>x</sub> ≤ 110 ppm（残存 O<sub>2</sub> 13% 換算）、熱効率 ≥ 37%、ばいじん ≤ 0.1 g/Nm<sup>3</sup> を達成するための新中央副室式ディーゼルエンジン（新中央副室式燃焼システムと新水噴射方式の組合せ）を開発する。

低 NO<sub>x</sub> 化のためには、エンジンモディフィケーションによる燃焼制御、すなわち酸素濃度制御、火炎温度低減が重要である。NO<sub>x</sub> 低減方法のうち、副室式燃焼は酸素濃度制御、すなわち副室内濃混合気燃焼、主室内希薄混合気燃焼を、噴射タイミングリタード、給気冷却は火炎温度低減をねらったものである。また、水噴射、排ガス再循環、エマルジョン燃料は、熱容量増大による火炎温度低減をねらったものである。

以上により、本研究では、表 1 に示す新中央副室式燃焼システムを追求する。すなわち、低 NO<sub>x</sub> 化のために小容積副室による副室内濃混合気燃焼、主室内希薄混合気燃焼を促進するとともに、

表 1 新中央副室式燃焼システム  
New concept prechamber combustion system



副室の中央化による副室噴口絞り拡大、噴射タイミング制御、給気冷却により火炎温度（燃焼温度）低減を図る。また、更に低 NO<sub>x</sub> 化を図るために、上記燃焼システムに新水噴射方式（単一

\*1 長崎研究所内燃機・油機研究推進室主務 工博  
\*2 長崎研究所内燃機・油機研究推進室

\*3 エンジン技術部長  
\*4 エンジン技術部主務

ノズルで燃料/水を交互に噴射するシステム)を適用するとともに、熱効率向上のために、高噴射圧化、副室・主室形状改善を図る。

このために、本研究では新中央副室式燃焼システム及び新水噴射方式を単筒エンジンに装備して燃焼試験を行った。

3. 新中央副室式燃焼システムによる NOx 低減

供試エンジンとして、三菱 SR 単筒ディーゼル (中央副室式、ボア×ストローク=φ170×180 mm、行程容積 4.09 l) を用いた。燃料噴射系として、ボッシュ式列形ポンプ、T 形スロット

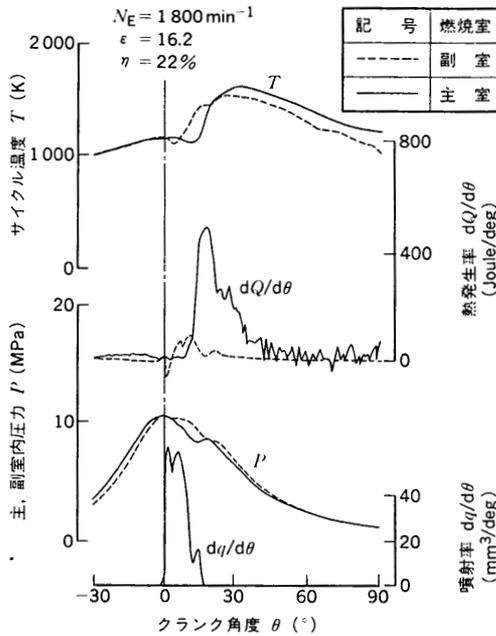


図1 主、副室内燃焼特性一例 副室容積比 η=22% における副室内熱発生割合は、約 12% である。 Example of combustion characteristics in pre-chamber and main chamber

ル弁を、燃料として、JIS 2 号軽油を用いた。以下に、新中央副室式燃焼システム (水噴射なし) における主要な基礎、燃焼試験結果を述べる。

主、副室内燃焼特性の一例を図 1 に示すが、副室容積比 η=22% における副室内熱発生割合は、約 12% である。

3.1 副室容積比、副室噴口絞りの影響

副室容積比及び副室噴口絞りが燃焼性能に及ぼす影響を図 2 に示す。副室容積比を小さくすると、副室内空気過剰率は小さくなり、NOx、吐煙は低減するが、燃料消費率は悪化する。燃焼は緩やかになり、燃焼温度 (サイクル最高温度) は低減する。また、副室容積比 η=15~22% は、28% の場合に比べて、NOx と熱効率のトレードオフ上好となり、小容積副室の優位性を確認できた。また、副室噴口絞りを拡大すると、NOx、燃焼温度は低減するが、燃料消費率、吐煙は悪化する。

3.2 噴射タイミングの影響

噴射タイミングが燃焼性能に及ぼす影響を図 3 に示す。燃料消費率が最良の噴射タイミングからリタード (遅延) すると、NOx、吐煙は低減するが、燃料消費率は悪化する。逆に、噴射タイミングをアドバンス (進角) すると、NOx、燃焼温度は低減するが、燃料消費率、吐煙は悪化する。噴射タイミングをアドバンスした方が、燃焼温度、したがって、NOx 低減率は大きく、燃費悪化率は小さいが、吐煙は悪化する。

本燃焼システムにおける上記結果及び他の主要実施結果をとりまとめると、低 NOx 化に対しては、副室容積比縮小、副室噴口絞り拡大、噴射タイミング制御、給気冷却、低圧縮比化が有効であり、熱効率向上に対しては、給気冷却、副室上部径拡大、ピストンキャビティ側壁利用 (トロイダル形、キャビティ口径縮小)、高噴射圧化、副室噴口角度縮小が有効であることが分かった。

4. 新水噴射方式との組合せによる NOx 低減

新水噴射方式の系統図及び水噴射弁 (スロットル弁) の一例を図 4 に示す。本水噴射方式は、1 本のスロットル弁から、燃料と

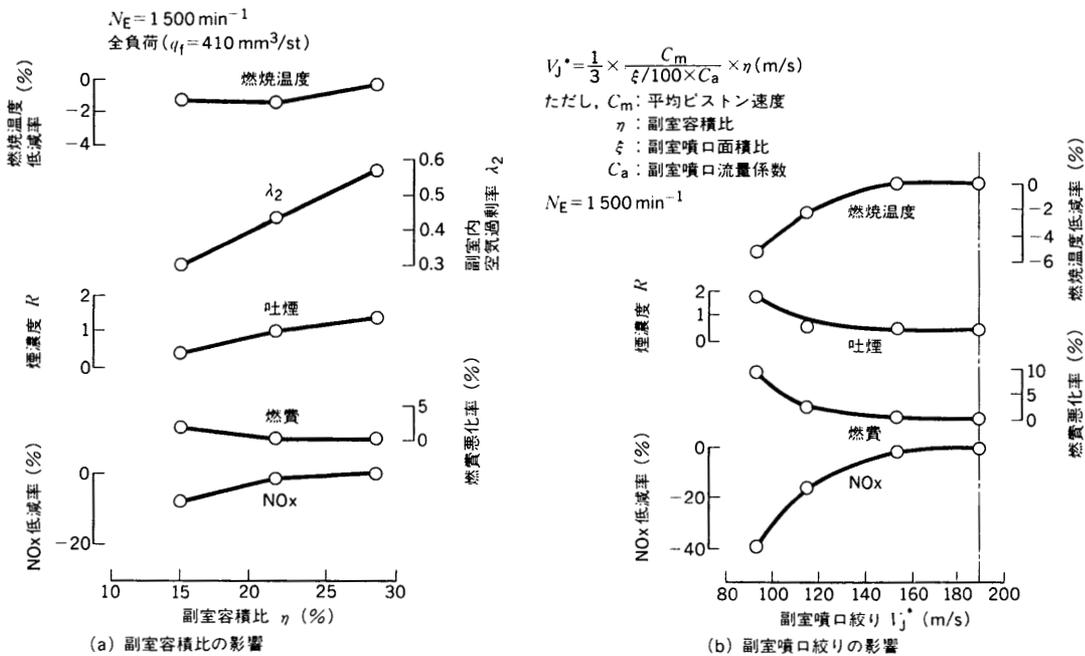


図2 副室容積及び副室噴口絞り比の影響 (a)副室容積比縮小により、NOx、燃焼温度は低減し、燃料消費率は悪化する。(b)副室噴口絞り拡大により、NOx、燃焼温度は低減し、燃料消費率、吐煙は悪化する。 Effect of prechamber volume ratio and jet passage area

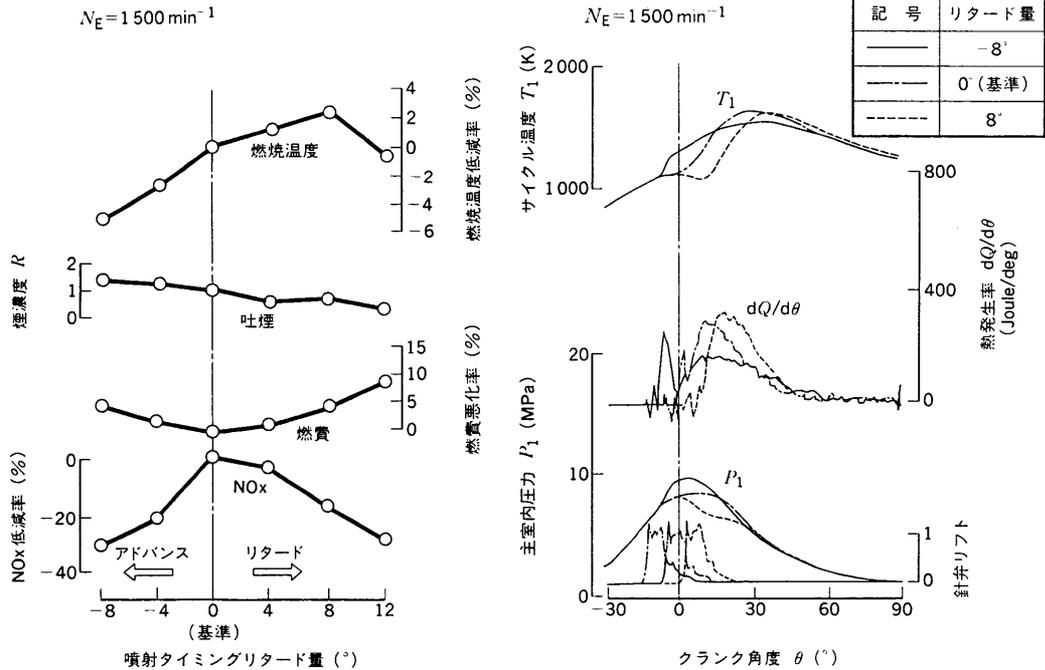


図3 噴射タイミングの影響 噴射タイミングをアドバンスした方が、燃焼温度、NOx 低減率は大きく、燃費悪化率は小さい。アドバンスするにつれて、二段燃焼化が促進される。  
Effect of fuel injection timing

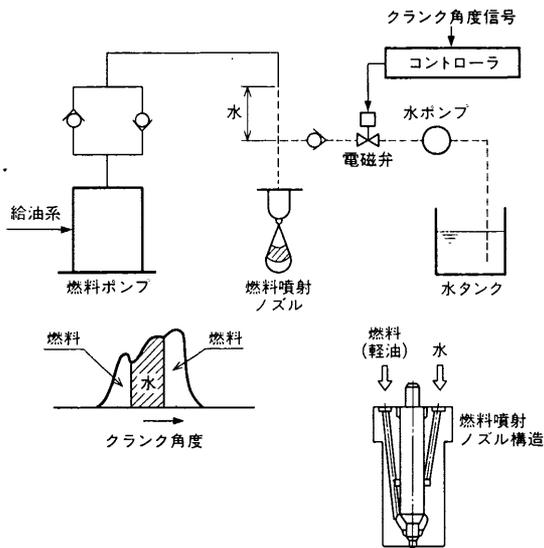


図4 新水噴射方式系統図 本水噴射方式は、1本のスロットル弁から、燃料と水を交互に噴射するものである。  
Stratified fuel-water injection system

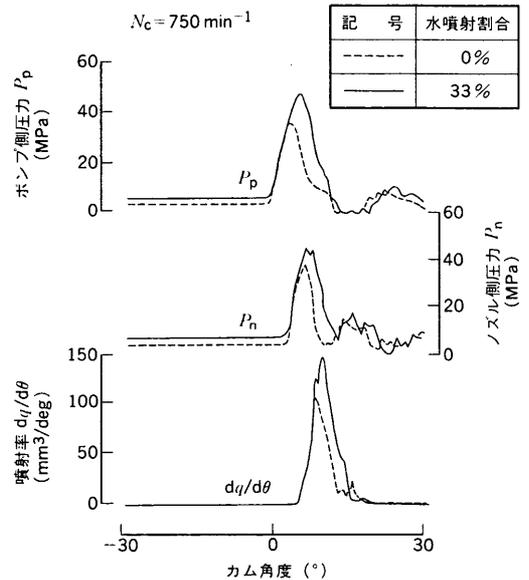


図5 水噴射方式の噴射特性 水噴射量割合を増すと、噴射圧力は増大し、最大噴射率は高くなるが、噴射期間はほぼ一定である。  
Effect of stratified fuel-water injection system on injection characteristics

水を交互に噴射するものであり、燃料は列形ポンプを用いて、水は水ポンプ、電磁弁を用いて供給する。また、水噴射弁への水注入は、排気行程の中期から開始し、給気行程の後期に完了する。

本水噴射方式の単独噴射試験により得られた噴射特性の一例を図5に示す。水噴射量割合を増すにつれて、燃料ポンプ、ノズル側とも、噴射圧力は増大し、最大噴射率は高くなるが、噴射期間はほぼ一定であることが分かった。

新中央副室式燃焼システムに新水噴射方式を適用したときの燃焼性能に及ぼす影響を図6に示す。水噴射量割合を増すとNOxは大幅に低減し、吐煙も改善され、燃費悪化は比較的小さい。水噴射量割合〔水/(燃料+水)の体積割合〕41.5%で、NOxは85%、吐煙は75%低減する。この際、燃料消費率は、2.5%悪化

する。また、新中央副室式は、直噴式に比べて、水噴射によるNOx低減率が大きいことが分かった。また、水噴射を行うと、初期熱発生率が抑制され、サイクル最高温度に至るまでのサイクルガス温度が低減する傾向にある。

以上の結果のうち、NOx低減は水噴射による熱容量増大、したがって火炎温度低減(局所的)に基づくものであり、吐煙低減は水噴射による燃料噴射エネルギー増大(燃料と水の噴射方向同一)、したがって噴霧内への空気導入率促進に基づくものと思われる。

本研究で得られた新中央副室式燃焼システム及び新水噴射方式

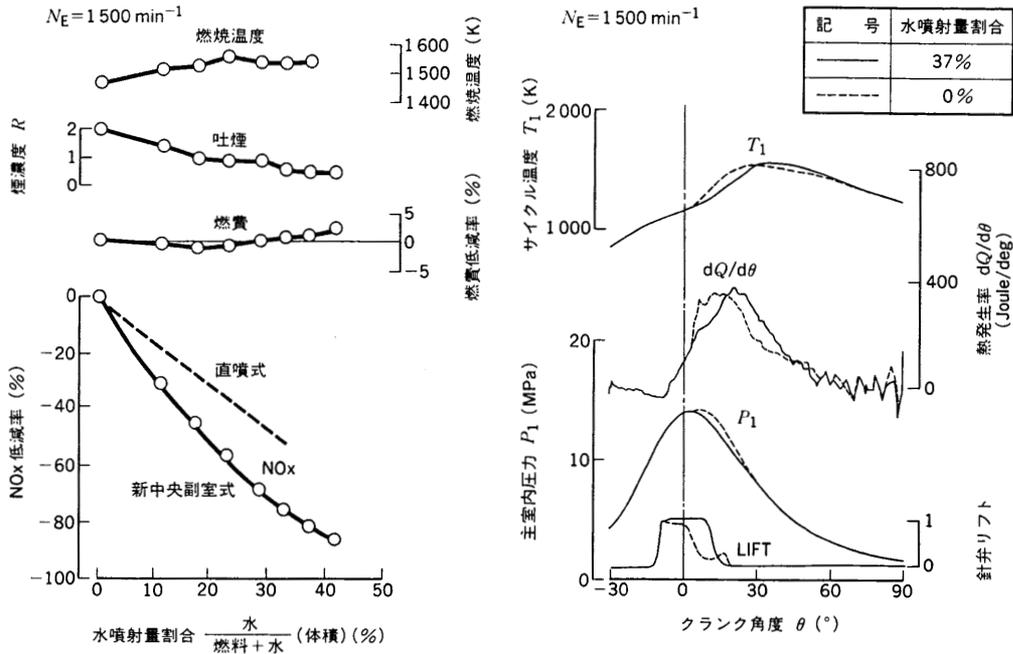


図6 水噴射の影響 水噴射量割合を増すとNOx, 吐煙は大幅に低減する。本副室式は直噴式に比べて、水噴射によるNOx低減率が大きい、水噴射を行うと、初期熱発生率が抑制される。  
Effect of stratified fuel-water injection system

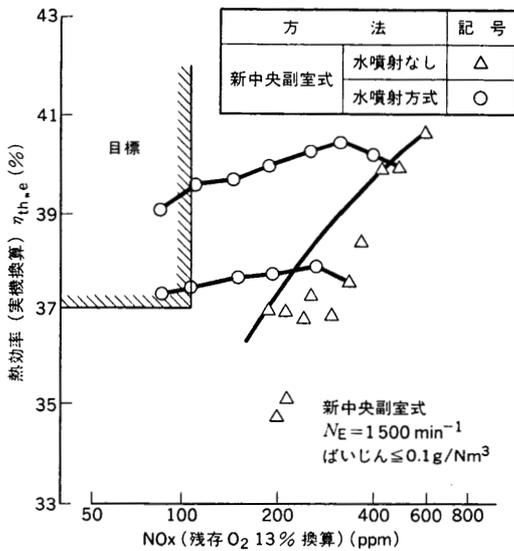


図7 NOxと熱効率のトレード・オフ 新中央副室式燃焼システムと新水噴射方式の組合せにより、NOx=88 ppm, 熱効率39%を実現し、開発目標値を達成できた。  
NOx-thermal efficiency trade-offs with new concept prechamber diesel engine

を適用したときの全負荷時のNOxと熱効率のトレードオフを図7に示す。小容積中央副室式のもとで、副室噴口絞り拡大、噴射タイミング制御、給気冷却、高噴射圧化、副室・主室形状改善を組合せた新中央副室式燃焼システムにより、熱効率(実機換算)37%、ばいじん<0.1g/Nm<sup>3</sup>のもとで、NOx(残存O<sub>2</sub>13%換算)=184 ppmを実現できた。

また、本燃焼システムと新水噴射方式を組合せた場合、水噴射

量割合を増すにつれて、NOxは大幅に低減し、水噴射量割合〔水/(燃料+水)の体積割合〕41.5%で、NOx=88 ppm, 熱効率39%を実現し、開発目標値 NOx ≤ 110 ppm, 熱効率 η<sub>th,e</sub> ≥ 37%を達成できた。

以上より、新中央副室式燃焼システム及び新水噴射方式がNOx低減に極めて有効な手段であることを確認するとともに、これら両システムの組合せにより、超低NOx化を実現できた。

### 5. 結論

定置式ディーゼルエンジンの低NOx化のために、新中央副室式燃焼システム及び新水噴射方式を追求し、以下の結論を得た。

- (1) 小容積中央副室、副室噴口絞り拡大、噴射タイミング制御、給気冷却、高噴射圧化、副室・主室形状改善を組合せた新中央副室式燃焼システムにより、熱効率37% (実機換算)、NOx (残存O<sub>2</sub>13%換算)=184 ppmを実現できた。
- (2) 本燃焼システムと新水噴射方式の組合せにより、熱効率39% (実機換算)、NOx (残存O<sub>2</sub>13%換算)=88 ppmを実現し、開発目標値達成の目的を得るとともに、燃焼システム各要素の基礎、燃焼特性及びその有効性を確認できた。

本システムを実機S6Rに適用するために、引き続き、実機にて性能、排ガス、信頼性等の確認試験を実施してきており、ほぼ実用化の目的が得られた。

### 参考文献

- (1) 井元ほか、定置式ディーゼルエンジンの排気浄化、自動車技術会シンポジウム、9431102 (1994-1)
- (2) 土佐ほか、燃料・水層状噴射によるディーゼル機関のNOx低減、三菱重工技報 Vol. 30 No.5 (1993-9) p.439