

## 高圧水素噴射エンジンのNO<sub>x</sub>低減に関する研究

武蔵工業大学 工学部  
二宮 至成 輿石 卓也 小柳 勝義 昼間 勝

NO<sub>x</sub> control in LH<sub>2</sub>-Pump high pressure hydrogen injection engines

Yoshinari NINOMIYA, Takuya KOSHIISHI, Katsuyoshi KOYANAGI, Masaru HIRUMA

Hydrogen fueled engines have a strong advantage over environmental pollution in its exhaust gases except for NO<sub>x</sub> because of no carbon and sulfur elements in the fuel. Experimental works to reduce the NO<sub>x</sub> have been carried out applying the methods of EGR, cold hydrogen injection, fuel injection timing retardation and the combination of the methods has also been studied. As the results, it has been found that NO<sub>x</sub> can be reduced to an enough low value in case of the operation of LH<sub>2</sub>-pump high pressure hydrogen injection engines.

### 1. 緒言

現在、武蔵工業大学で研究開発されている水素自動車<sup>(1)</sup>は液体水素タンクに取り付けた液体水素ポンプで水素を10MPaに加圧し、熱交換後に常温水素として圧縮上死点直前で噴射し、スパークプラグで火花点火する高圧水素噴射エンジンを搭載している。この方式によれば予混合の欠点である逆火及び低出力化が防止でき高出力が得られる特徴を有する。しかしながら噴射による混合気の不均一性は低負荷においてもNO<sub>x</sub>の発生を生む。排気中にCO、CO<sub>2</sub>、HC、パティキュレートなどを含まず将来的に無公害エンジンとして有望な水素エンジンの唯一の排気有害成分であるNO<sub>x</sub>の低減は水素エンジンの開発において最も重要な問題の一つである。

そこで本研究では、高圧水素噴射エンジンのNO<sub>x</sub>低減に関し、EGR、低温噴射、噴射時期遅延及びこれらの組み合わせの実験を行い、その効果について研究を行った。

### 2. 実験装置

図-1に実験系統図を示す。燃料水素圧力はブルドン管圧力計、流量はオリフィス式流量計によって測定した。供給圧力は10MPaとした。空気流量は層流型流量計にて測定し、燃焼圧力はピエゾ圧力計を使用した。NO<sub>x</sub>測定には、ケミカルルーミネッセンス型NO<sub>x</sub>計を用いた。

テストエンジンは、A、B2種類のものを使用した。Aタイプエンジンは汎用、単気筒直接噴射式ディーゼルエンジン、4サイクル、空冷、内径×行程=82×

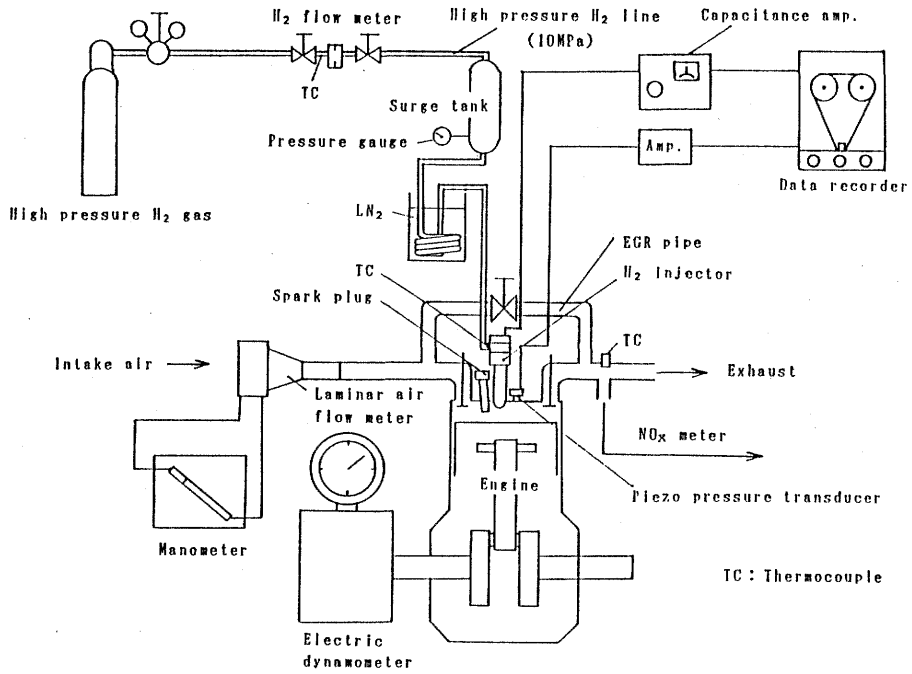


図-1 実験系統図

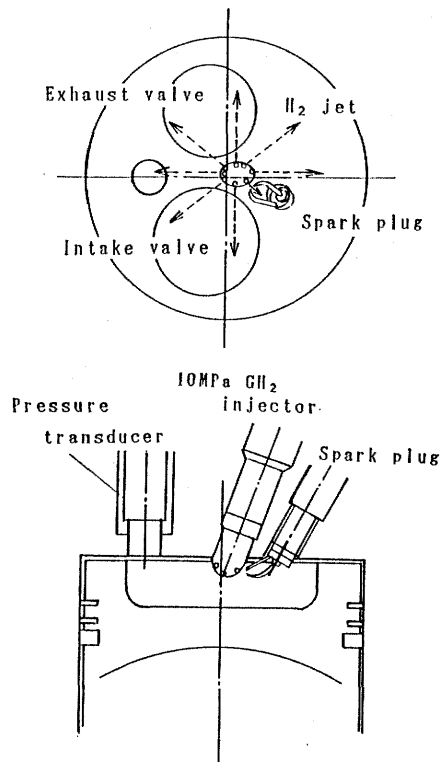


図-2 燃焼室断面図

78 mm、全行程容積0.412 l、圧縮比21を水素エンジン用に改造したものを使用した。図-2に燃焼室を示す。キャビティーは外径56 mm、深さ14.5 mmでピストン中央とし、熱効率やNO<sub>x</sub>などを考慮し圧縮比を21から12に変更した<sup>(2)</sup>。水素は油圧で駆動される噴射弁(図-3)により10 MPaの高圧で直接シリンダー内に噴射した。この際、混合を促進する目的で8個の噴口を有する噴射ノズルを噴射弁先端に取り付け、その噴流の一つにスパークプラグで点火した。噴射ノズルとスパークプラグとの間は5 mmとし、点火時期は噴流がスパークギャップに到達すると同時に行った<sup>(1)</sup>。噴射時期は静電容量式弁リフトセンサーによって測定した。Bタイプエンジンは単気筒、テスト用直接噴射ディーゼルエンジン、内径×行程=128×155 mm、全行程容積1.9945 l、圧縮比=16.25のものを水素エンジンに改造したものである。改造に当たってはスパークプラグと水素噴射弁を取り付けた。噴射ノズルとスパークプラグの位置関係及び噴射時期、点火時期の関係はAタイプエンジンと同じである。

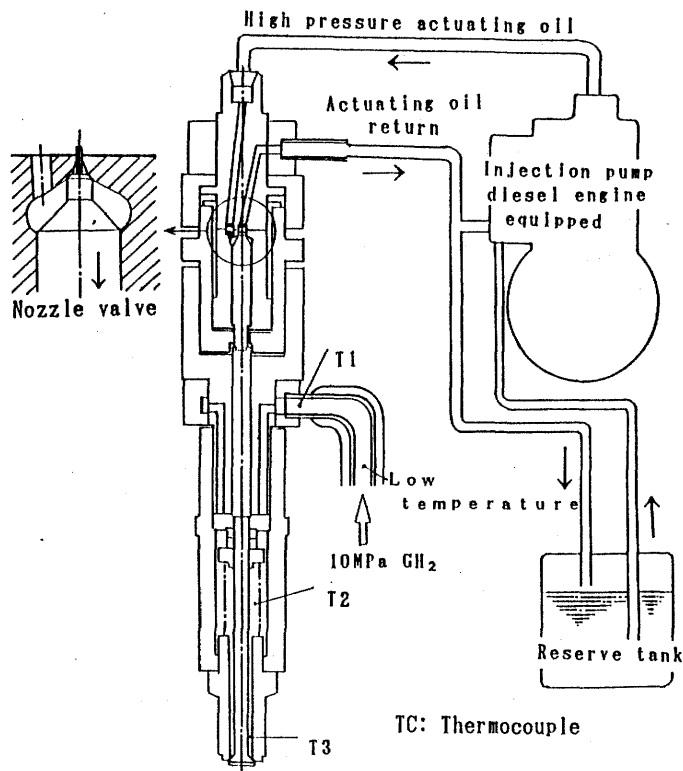


図-3 水素噴射弁及び低温噴射の温度測定点

### 3. 実験方法及び結果

#### 3-1 EGRによる影響

ガソリンエンジンのNO<sub>x</sub>低減法の中では最も一般的な方法であるEGRは、ディーゼルエンジンでは異常摩耗が発生するために実用化には至っていない<sup>(3)</sup>。これは燃料中の硫黄がその原因とされており水素エンジンでは燃料中に硫黄を含まないのでEGRを行うことが可能である。そこでEGRの効果について実験を行った。実験系統図を図-4に示す。EGR用排気は排気弁後方100mmに取り付けられた内径14mmのパイプによって吸気管に導入される。EGR率は式-1によって求め、EGR量は導入管途中に設けられた絞り弁によって調節した。

$$\text{EGR率} = \frac{V_a - V_e}{V_a} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

V<sub>a</sub> : EGRを行わない場合の吸入空気量

V<sub>e</sub> : EGRを行う場合の吸入空気量

図-5に結果を示す。負荷が高くなるほどその効果は顕著に現れることがわかる。水素エンジンにおけるEGRは燃焼中のH<sub>2</sub>Oを利用するために、排気中にH<sub>2</sub>Oの含有量の多い高負荷時ほどその影響が大きくてたものと考えられる。また、10%程度のEGRを行えば、出力を下げることなくNO<sub>x</sub>の大幅な低減が行えることが確認された。

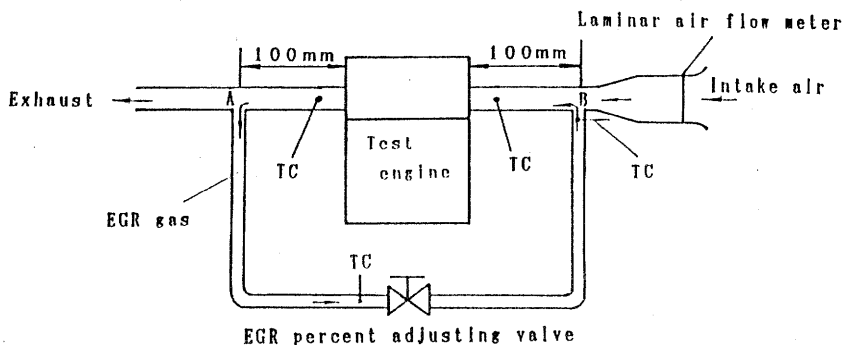
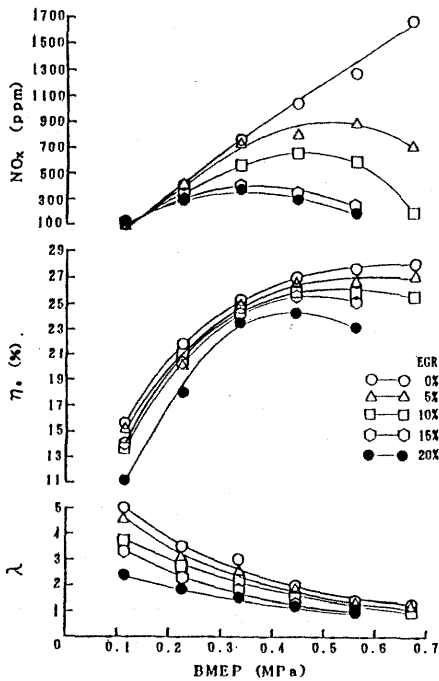
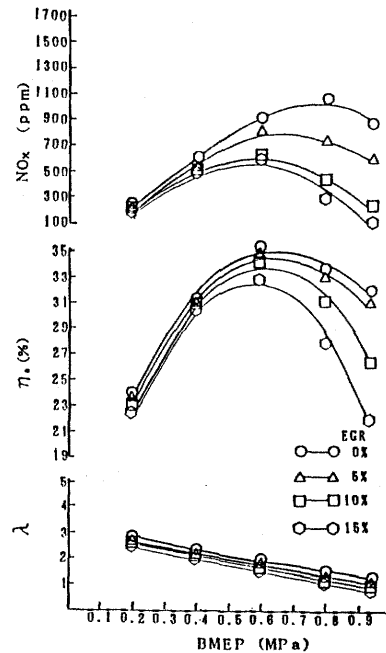


図-4 EGR実験系統図



(a) Type A engine ( 2000rpm )



(b) Type B engine ( 1200rpm )

図-5 EGRの効果

### 3-2 低温噴射の影響

水素エンジン独自の方法である低温噴射法の効果について実験を行った。図-1に低温噴射における実験系統図を示す。低温の水素を供給するために水素供給ラインの途中で水素を液体窒素で冷却し低温の水素を噴射する。図-3に水素温度測定点を示す。測定位置は噴射弁入り口温度T1、噴射弁内水素蓄圧部T2と弁先T3の3ヶ所とした。なお実験はAタイプエンジンで行った。図-6はこのときの実験結果である。水素温度が低下するに従いNO<sub>x</sub>は低下する。T1 = -120℃のときに最もNO<sub>x</sub>低減効果が大きいことが確認された。表-1に噴射弁内の3点の水素温度を示す。T1が-120℃のときに、T3は8℃であった。2サイクル水素エンジンにおける古浜らの研究<sup>(4)</sup>によれば、低温噴射はNO<sub>x</sub>低減に関して非常に大きな効果があるということが確認されており、噴射弁を断熱しT3の温度をさらに下げることができれば、さらに効果が大きくなると考えられる。

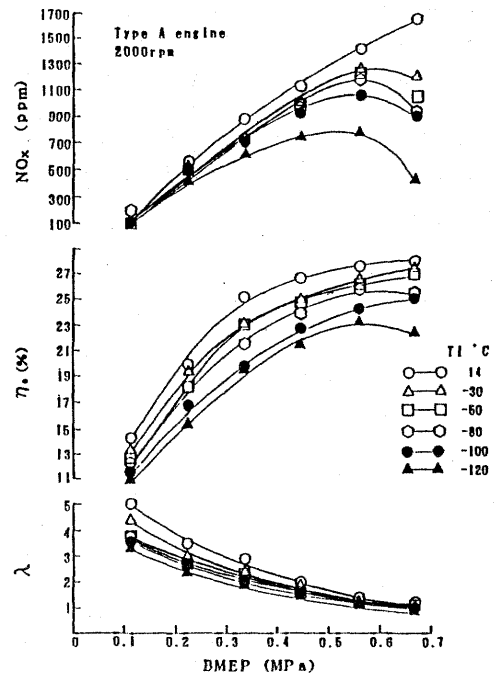


図-6 低温噴射の効果

表-1 噴射弁内の水素温度測定結果

Aタイプエンジン 2000rpm BMEP 0.45MPa

T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	NOx (ppm)
14	62	92	1130
-30	44	72	1067
-50	35	66	1056
-80	14	40	984
-100	-2	35	950
-120	-10	8	744

### 3-3 噴射時期遅延及び噴射時期遅延 + EGRの影響

現在、ディーゼルエンジンにおけるNOx低減法として最も一般的に行われているのが、噴射時期の遅延である。水素エンジンにおいても噴射時期の遅延によるNOx低減効果について実験を行った。図-7は、このときの実験結果を示す。実験条件は、1200rpm、負荷BMEP0.7MPa、一定で、Bタイプエンジンで行った。噴射時期の遅延は、NOx低減効果が大きいことが確認された。また、EGRとの組み合わせについても実験を行った。EGR率は10%、15%で行った。噴射時期遅延とEGRの組み合わせは噴射時期遅延のみおよびEGRのみに比べれば低減効果は大きいものの、相乗効果としての効果は大きいものではない。

### 3-4 低温噴射 + EGRの影響

運転条件は2000rpm、負荷BMEP0.45MPa、EGR率10%一定とし供給水素の温度のみを変化させて行った。Aタイプエンジンで実験を行った。実験結果を図-8に示す。低温噴射とEGRとの組み合わせは、噴射時期遅延とEGRとの組み合わせよりも効果は大きいことが確認された。

### 研究論文

Type B engine  
1200rpm  
BMEP 0.7MPa

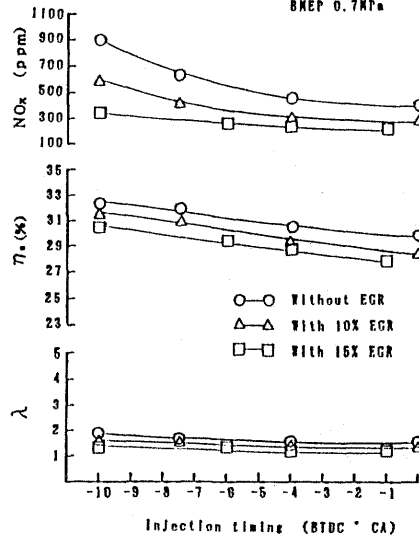


図-7 噴射時期遅延及び噴射時期遅延 + EGRの効果

Type A engine  
2000rpm  
BMEP 0.45MPa

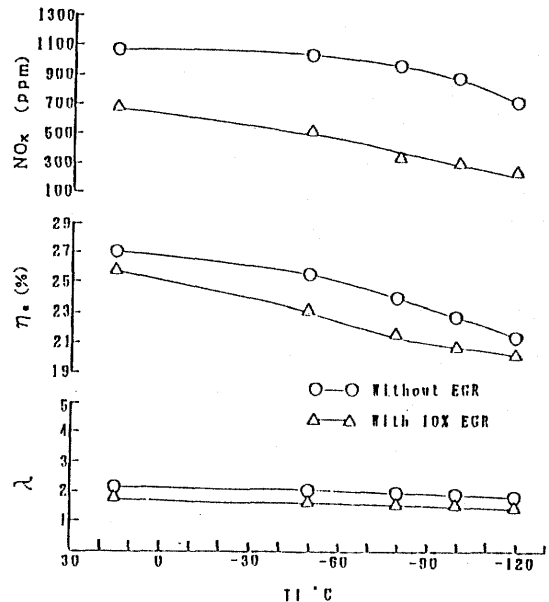


図-8 低温噴射 + EGRの効果

表-2 EGR+低温噴射+噴射時期遅延の効果  
Bタイプエンジン 1200rpm BMEP 0.7MPa

	Normal condition	Combination condition	EGR 15%
NO <sub>x</sub>	000ppm	210ppm	330ppm
Thermal efficiency	30.7%	29.4%	28.7%
Excess air ratio	1.7	1.18	1.37

Combination condition

- Injection timing retardation : -1°
- Injecting hydrogen : -30°C
- EGR : 15%

表-3 6モード試験による結果  
Bタイプエンジン

OPERATING CONDITION	LOAD	EGR 0% (ppm)	EGR 5% (ppm)	EGR 10% (ppm)	EGR 15% (ppm)	EGR 15% + Cold
IDLING	—	276	218	234	271	74
R.M.P. × 40%	100%	652	477	311	242	131
R.M.P. × 40%	25%	593	591	650	524	377
R.M.P. × 60%	100%	881	607	236	157	127
R.M.P. × 60%	25%	271	299	333	392	268
R.M.P. × 80%	75%	410	307	282	202	150
6 MODE CONVERSION		424	335	278	267	152

R.M.P. : The Revolution which gives Maximum Power

Regulation values in Japan  
DI engine 400 ppm  
IDI engine 260 ppm

### 3-5 EGR+低温噴射+噴射時期遅延の影響

EGR、低温噴射、噴射時期遅延の3つの組み合わせの効果について実験を行った。各方法を代表して次の条件で実験を行った。

- (I) EGR率：15%
- (II) 低温噴射：噴射弁入り口温度-30°C
- (III) 噴射時期：BTDC 1°

運転条件は1200rpm、BMEP0.7MPa、で行い、供試機関はBタイプエンジンで実験を行った。このときの実験結果を表-2に示す。これによると80%のNO<sub>x</sub>低減が得られた。しかし、EGR率15%のみと比較してNO<sub>x</sub>低減効果がわずかであることから、熱効率を考慮すると現実的ではないと考えられる。

### 3-6 日本のNO<sub>x</sub>規制値との比較

現在、日本では6モード試験によるNO<sub>x</sub>規制<sup>(5)</sup>をディーゼルエンジンに対して行っている。これは各モードによって測定されたNO<sub>x</sub>値に重み係数をかけその値の総和を平均値とするものである。規制値は直接噴射式ディーゼルエンジンの場合は平均値が400ppm、副室式ディーゼルエンジンの場合は260ppmである。水素エンジンにおける6モード試験の結果を表-3に示す。EGR率5%で直接噴射式ディーゼルエンジンの規制値をクリアし、EGR15%で、ほぼ副室式ディーゼルエンジンの規制値まで低減させることができる。また、低温噴射及びEGRの組み合わせを行えば、副室式ディーゼルエンジンの規制値より大幅に低減させることができる。

#### 4. まとめ

高圧水素噴射エンジンの $\text{NO}_x$ 低減に関するいくつかの実験を行い次のような、結果を得た。

(1) 10%程度のEGRを行えば出力に影響は少なく、 $\text{NO}_x$ 低減に大きな効果がある。

(2) 噴射弁入り口温度-120℃の水素を供給すれば $\text{NO}_x$ 低減に大きな効果がある。

(3) 噴射時期の遅延は、 $\text{NO}_x$ 低減に対して非常に有効である。

(4) 低温噴射及びEGRの組み合わせは、大きな相乗効果が得られる。

(5) 噴射時期の遅延及びEGRの組み合わせは、組み合わせとしての効果は少ない

(6) EGR及び低温噴射、噴射時期の遅延の3つの組み合わせは大きな $\text{NO}_x$ 低減効果はあるが、熱効率及びEGR率15%時の $\text{NO}_x$ 等を考慮すると現実的ではない。

(7) EGR率5%で、直接噴射式ディーゼルエンジンにおける $\text{NO}_x$ の規制値をクリアし低温噴射及びEGRの組み合わせを行えば、副室式ディーゼルエンジンの規制値をクリアすることができる。

#### 5. 参考文献

(1) S.Furuhama, M.Hiruma, K.Koyanagi, N.Tomisawa, K.Yamaura "Power system of a computer controlled hydrogen car, I MECK E C430-028(1991)

(2) T.Fukuma, T.Fujita, P.Pichainarong and S.Furuhama "Hydrogen Combustion Study in Direct Injection Hot Surface Ignition Engine, SAE Paper 861579, (1986)

(3) 古浜庄一ほか：ディーゼル機関のEGRによる異常摩耗の原因究明、第8回 内燃機関合同シンポジウム講演論文集 309

(4) S.Furuhama, et al., "Hydrogen Cars with  $\text{LH}_2$ -Tank,  $\text{LH}_2$ -Pump and Cold  $\text{GH}_2$ -Injection Two-Stroke Engine, SAE Paper 820349, (1982)

(5) 国内認証6モード排出ガス測定：TRIAS 24-2-1974