無声放電によるエンジン発電機の排ガス中のNO_x除去システムの設計

正員 吉岡 芳夫* (金沢工業大学)

学生員 新川 智祥 (金沢工業大学)

Design of the removal system of NO_x in exhaust gas of diesel engine generators by silent discharge

Yoshio Yoshioka, Tomoaki Shinkawa (Kanazawa Institute of Technology)

NO_x removal technology by non-thermal plasma has been investigated so far, and many investigations have revealed the NO_x removal performance of various type of discharge, energy efficiency, effect of additives, co-operative effect of selective catalyzer and so on. Now it is important to establish the design method of these NO_x removal systems. This paper describes a design method of these systems for NO_x removal in exhaust gas from diesel engine. The knowledges on exhaust gas of diesel engine, thermal conductivity of high speed gas flow and the efficiency of NO removal at various NO removal rate are necessary in the design procedure. A system was designed according to this design method and the system was constructed and tested.

キーワード NO_x、非熱平衡プラズマ、ディーゼルエンジン、排気ガス、NO_x除去、設計法

1. はじめに

無声放電や直流コロナ放電が作る非熱平衡プラズマによって、排気ガス中のNO_xなどを除去しようとする研究が活発になっている。この技術は、浄化に要するエネルギーが大きすぎることが分かってきたが¹⁾、エネルギー効率を上げるために、触媒の併用^{2)~3)}、炭化水素などの添加剤の注入^{4)~5)}、放電装置の工夫^{6)~8)}などいろいろな試みがなされた結果、次第に効率は向上し、排気ガス中のNO濃度が比較的低いケースについては実用化できるレベルになってきた。次は、システム設計法の確立が課題になる。すなわち、浄化の対象とするエンジンからの排気ガスの量や性状を把握し、ガス冷却、放電リアクター、後処理のスクラバーを含めたシステムをどのように設計するかといった問題であるが、設計法の研究はこれまでほとんど行なわれていない。この論文は、ディーゼルエンジンを対象にして、非熱平衡プラズマで排気ガス中のNO_xを低減するシステムの設計方法を論じるものである。

2. NO_x除去システム

2.1 システムの構成とシステム設計法の概要

NO_x除去システムは、エンジンを起点にして設計される。まず対象とするエンジンの排気ガスの量と性状を知った上で、排気ガスの浄化方式及びNO_xの低減目標を決めなければならない。非熱平衡プラズマによるNO_x処理の方法には、酸化法、アンモニア添加法、触媒による還元法などがある。これらの中でもっとも高効率なのは酸化法であることが知られているので⁹⁾、本論文では酸化法を取り上げて、排気ガス浄化システムの設計法を論じることとする。

図1 NO_x浄化システムFig. 1 NO_x Removal System

酸化法では、システムは図1のように設定される。まず、エンジンからの排気ガスをガスクーラー(冷却装置)によって冷却し、適当な温度になったガスをフローラインにより放電リアクターに導く。排気ガスに含まれるNO_xの90%はNOであり、非熱平衡プラズマに接触した排気ガス中のNOは、NO₂に酸化される。放電リアクターを出た排気ガスは、フローラインを経てスクラバーに導かれ、そこでNO₂が水に吸収されHNO₃水溶液となる。その結果排気ガス中のNO_xが除去され、スクラバーで吸収されなかったNO_xガスは排気塔から大気へ放出される。

このシステムの設計で最初にしなければならないのがクーラーの設計である。まず排気ガスの温度と量及びそれがエンジンの負荷でどのように変わるかを知り、次にフローライン及び放電リアクターの耐熱性及びNO低減性能の温度特性を知って、ガス温度を何℃まで下げるかを決めなければならない。筆者は、ディーゼルエンジンの基礎理論¹⁰⁾からエンジン排ガスの温度と量を求めることにした。次にフローラインは、放電リアクターへのガスの通路であるから、ガスを放電リアクターに一樣に導け

るものであれば良い。しかし、ガス温度を100℃以下に冷却する場合は、フローラインの内壁に燃焼によって発生した水蒸気が結露し、溜まってくるので結露対策をしなければならない。

フローラインを通して放電リアクターに入ったガスは、無声放電やコロナ放電によるエネルギーの高い電子の作用を受ける。電子は、さまざまなラジカル(活性種)を生成し、それらがNOと作用する。放電装置の設計では、対象となるNOを目標の濃度まで低減するためにどれだけの電力を必要とするかを知らなければならない。

これまでの研究で、NOの低減量と放電電力量の関係がある程度分かっているが、必要な放電電力量はNOの低減のレベル、添加剤を使うかどうか、放電リアクター内の滞留時間などいろいろな要素で変わる外、技術の進歩によっても変わる。したがって、設計する時点での最良データを考慮して設計するのがよい。

酸化法では、NO_xの90%を占めるNOをNO₂に酸化させ、それをスクラバー装置内の水に通し吸収させることで排気ガスを浄化する方式である。排気ガスを如何にうまく水と接触させるかがスクラバーの設計課題である。スクラバーは、一般に水シャワーの中に排気ガスを通す方式が採用されるが、排気ガスの圧力でガスを水中から噴出させるバブリング方式も採用できる方式である。

2.2 システム要素の仕様の決定法

2.2.1 ディーゼルエンジンの排ガスの特性

システム設計は、すべてエンジンが起点になる。本論文では対象とするディーゼルエンジンの大凡の特性を基礎理論¹⁰⁾から推定することにした。本論文で計算例として示すのは、排気量230[cm³]、出力2.4[kV A]の4サイクル空冷ディーゼルエンジンを対象にしたものである。

さて、設計に必要なのは、ガスの量、排出されるガスの温度、及びNO_xの濃度である。

(1) 排気ガスの流量

これは、エンジンの容積と回転数から求められる。4サイクルエンジンでは、エンジン排気量V[cm³]と回転数n[rpm]が分かれば、ガスの流量Q[Nm³/h]は、

$$Q = a \cdot (1/2) n \cdot V \cdot 60 \times 10^{-6} \quad (1)$$

で求められる。

ここにaは、エンジンへの吸気係数で水冷エンジンでは0.9、空冷エンジンでは0.85程度とみなされる。

また大出力のディーゼルエンジンでは、出力1kVA当たり6.4[Nm³/h]のガス流量があるとされているのでこの値を使うことも出来るが、類似エンジンのデータがないときは前者の方法の方が正確である。

(2) エンジンの出力

ディーゼルエンジンの基礎理論によると、エンジンの出力P[W]は、

$$P = b \times 2.94 \cdot n \cdot P_0 V_0 \times \frac{(\kappa \varepsilon^{\kappa-1} (1-\zeta) + (\zeta^{\kappa} - 1))}{(1-\kappa)} \quad (2)$$

ここにP₀[kg/cm²]、V₀[cm³]はそれぞれピストン初期圧力と下死点の容積、κは比熱比、εはエンジンの圧縮比、ζは噴射締切り比で燃料噴射を止める時点の容積とピストンの上死点の容積の比、係数bは各種ロス(機械損失、熱損失)による出力低減を考慮した係数である。

エンジンの出力の変更は、ζの制御(すなわち燃料の噴射時間の制御)で行なうが、出力増はζを大きくして行なわれる。

図2は(2)式でζとエンジン出力の関係を示すもので、係数bを0.6で計算した結果である。このエンジンを発電機につないで発電する場合、発電機出力はさらに90%程度には下がるので、対象としたエンジン発電機出力2.4kVAは、エンジン出力では2.7kW、噴射締切り比が2程度になっているものと思われる。

図2 エンジン出力と噴射締切り比の関係

Fig. 2 Engine output vs. injection cut-off ratio

図3 エンジン出力と排気ガスの温度

Fig. 3 Exhaust Gas Temperature vs. Engine Power

(2) 排気ガスの温度

基礎理論によると、エンジンに吸気された空気の色をT₀[K]とすると排ガスの温度T_{ex}[K]は

$$T_{ex} = \zeta \cdot T_0 \quad (3)$$

で与えられる。

排気ガスの温度T_{ex}はζを大きくして高出力にする

るほど高くなる。さて、図4は吸気温度を30℃としたときの排気ガス温度 T_{ex} の計算例である。エンジン出力2.7kW(発電機出力2.4kW)で、排ガス温度は300℃になっている。一般には、全負荷のとき排気管出口のガス温度は、400℃近辺とされているので、少し低めの計算結果になった。

(3) NOxの濃度とNOxの量

NOxは、エンジン内部で燃料が爆発燃焼する際の高温で解離した空気中の酸素と窒素原子が再結合して出来るものであるから、内部の温度がその生成に深く関わっている。通常、ガスの温度が1000℃を超えると、NOxの生成が多くなるとされている。基礎理論では、燃焼温度は $T_{cmb}[K]$ は

$$T_{cmb} = \zeta \cdot \varepsilon^{K-1} \cdot T_0 \quad (4)$$

で与えられる。

図4 エンジン出力と燃焼温度

Fig. 4 Combustion Temperature vs. Engine Power

図4は、計算対象エンジンの燃焼温度を計算した例である。エンジン出力2.7kW付近では、ガス温度は1,500℃を超えている。現在の知識では、ガス温度から直接NOx濃度を求めることができないので、この図はエンジンの出力でNOxの濃度が変わることを理解するための参考にとどめる。実験データによれば、全負荷でディーゼルエンジンを運転したときのNOx濃度Cは、400~1,000[ppm]である。

次に、NOxの量 $M[g/h]$ は、排気ガスの流量QとNOxの濃度Cを掛け算して求められる。すなわち、

$$M = 1.34 \times Q \cdot C \times 10^{-3} \quad (5)$$

である。

(4) ススの量

ススの量は、NOxの濃度とトレードオフの関係にある。NOx濃度を下げようとするときススが増える。エンジンの設計指針によっても変わるものであるが、大出力のディーゼルエンジンで測定されているススの量はガス1m³当たり19~50mgである。

2. 2. 2 ガスクーラ

エンジンの排ガスの性状が把握されると、次はガスクー

ラの設計になる。クーラー仕様は、放電装置、フローラインの耐熱性及び放電リアクターによるNOのNO₂への低減性能の温度特性を考慮して決められなければならない。NO低減性能の温度特性についての報告例は少ないが、パルスコロナ放電の場合、100℃よりも70℃の方が効率は高いという研究例¹¹⁾と300℃より150℃の方が所要エネルギーは1/8も少ないという報告がある⁸⁾。無声放電も非熱平衡プラズマであるから、温度は低い方が良いと考えられる。またフローラインの材料の耐熱温度も考慮しなければならない。フローラインに塩化ビニール管やアクリル樹脂を使う場合、耐熱温度は60℃になる。この場合は、全負荷時の排気管出口ガス温度400[℃]を60[℃]まで冷却しなければならない。図4で示したように、エンジン出力が下がると排気ガス温度 T_{ex} も下がるので、クーラーは全負荷時を考慮して設計しておけば十分である。

さて、冷却装置の設計ではガスと冷却管の間の熱伝達率 α を知らなければならない。熱伝達の基礎理論¹⁰⁾によればパイプ内の高速ガス流(流速 v)を外側から冷却する場合の熱伝達率 $\alpha[W/m^2K]$ はNuをヌセルト数とすると

$$\alpha = \lambda \cdot Nu / d \quad (6)$$

で与えられる。

また、ヌセルト数Nuは、レイノルズ数 $Re(= \rho v d / \eta)$ とプラントル数 $Pr(= Cp \cdot \eta s / \lambda)$ より、

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

で求められる。

ここに λ は熱伝導率、 d は円管の内径、 ρ はガス密度、 ηs は粘性、 Cp は定圧比熱である。

図5 流速と熱伝達率

Fig. 5 Heat transfer Coefficient vs. Flow Speed

図5は、この式で求めた熱伝達率 α と空気流の速度 $v[m/s]$ との関係で、高流速で熱伝達率 α が大きくなることがわかる。 α が分かれば、所定の温度までガスを冷却するのに必要なクーラ管の長さ x を次式で計算できる。すなわち

$$T = T_0 + (T_{in} - T_0) \exp(-2\pi \alpha R x / (Cp \cdot \rho v \cdot Sc)) \quad (8)$$

で計算できる。

ここに T_{in} はクーラ入り口のガス温度、 T_o はクーラ用の冷却水の温度、 R は冷却管の半径、 Sc は円管断面積である。

図6 ガスの冷却特性

Fig. 6 Gas Temperature vs. Cooler Length

図6は、対象エンジンのガス冷却特性の計算例である。冷却管の内径9[mm]、ガス温度400[°C]、冷却水温度30[°C]の条件で計算した結果である。

2. 2. 3 放電装置

放電装置の設計は、まず必要な放電電力を算出し、それを満たす放電装置の諸元及び電源の仕様を決める手順で行なう。必要な放電電力は、放電電力1KW h当たりどれだけのNOを酸化出来るかというNO酸化効率 η [g/kWh] から計算される。 η は採用する放電リアクター特有のものであり、そのNO酸化性能の実験データから求めることになる。また η の値は、NOの低減

図7 NO低減率とNO酸化効率

Fig. 7 NO removal efficiency vs. NO Removal Rate
率 R_t によっても変わる。図7は無声放電によるNO酸化効率 η とNOの低減率 R_t との関係を示した著者の実験データである。無声放電単独であれば、目標のNO低減率 R_t が50%で、 η は14.5[g/kWh]をとるのが良い。HCを1800[ppm]添加すれば、 η はNO

低減率 R_t が75%でも60[g/kWh]となる。

また、すでに述べたように酸化効率 η は、放電装置の工夫、添加剤の使用、放電装置内の滞留時間、ガスの温度など多くの因子で変わるので、目標とするNOの低減量からもっとも適切な形式と効率を選ばなければならない。

さて、目標のNO低減率(酸化率)と放電装置のデータから設計に使える η が決まると、次は放電装置の発生電力 P [W] を次の式で求める。すなわち

$$P = M / \eta \times 10^3 \quad (9)$$

である。このようにして P を決めれば、次は放電装置の寸法諸元を決める段階になる。

無声放電では、放電電力 P [W] は近似的に

$$P = 4 \cdot f V_g \cdot (\epsilon_g S_a / d) \cdot (V_o - V_g) \times 10^6 \quad (10)$$

で求められる。

ここに、 f は電源周波数、 V_g は放電開始電圧 [kV]、 V_o は電圧波高値 [kV]、 ϵ_g は誘電体の誘電率 [F/m]、 S_a は放電装置の放電面積 [m²]、 d は誘電体層の厚さ [m] である。

この式によれば、放電電力 P を決めるパラメータは、電圧、放電開始電圧、放電面積、誘電体層の厚さ、それに周波数と数多くある。これをどのように選ぶかは設計者の考え方次第であるが、もう一つ考えなくてはならないことは、放電装置内のガスの滞留時間 tr [s] である。滞留時間 tr は、短い方がNO酸化効率 η が高いことが報告されている⁴⁾¹²⁾。 tr は、放電ギャップの大きさを lg とするとき、

$$tr = 3.6 \times 10^{-3} \times S_a \cdot lg / Q \quad (11)$$

で与えられるから滞留時間 tr を短くするには、 $S_a \times lg$ の値を小さく選ぶ方が良い。すなわち放電装置を小さく作る方が良く、余裕を見て放電装置を大きく作りすぎると逆効果になる。

以上で、放電装置の設計が出来たが、放電電力 P の式(10)は近似式であり、電源回路の抵抗成分が多いときなど P は約400Hz以上で飽和特性を示すので注意しなければならない。そのような場合は、放電電力はシミュレーションによる正確な計算が必要になる¹³⁾。

2. 2. 4 電源回路の設計

電源回路は、少なくとも先に決めた放電装置の放電開始電圧 V_g より高い波高値 V_o を出せるものでなければならない。さて、ギャップの放電開始電圧 V_g [kV] はギャップ長 lg [m] と絶縁破壊電界強度 E_{fo} [kV/mm] で次式で決まる。すなわち、

$$V_g = E_{fo} \cdot lg \times 10^3 \quad (12)$$

E_{fo} は約2[kV/mm]である。決められた放電電力 P を達成するには、 V_o と f がパラメータになる。インバータ電源で高周波を使うなら電圧をあまり高くしないですみ、放電電力は電圧と周波数の両方で制御できる利点がある反面、電源回路の電力損失を最大20%程度考え

る必要がある。商用周波数を選ぶならば、電力の制御は電圧だけとなり、放電電極の面積 S_a が大きくなる。

2.2.5 フローラインの設計

これは、エンジンからでた高温のガスをガスクーラーに導く第1部分と、冷却されたガスを放電リアクターに導く第2の部分、放電リアクターから出たガスをスクラバーに導く第3の部分からなる。第1の部分は、高温であり、安全性への配慮が要る。第2の部分では、ガスの冷却によって発生する熱水をため適度にこれを取り除くドレン抜きがなければならない。また、ガス温度を100℃以下に冷却する場合、フローライン内壁の温度がガス温度より下がらないように、断熱材で保温することが必要になる。こうしないと内壁で露を結び、その水滴がガス流で放電装置に吹き流されて無声放電が正常に起こらなくなり、NOをほとんど低減できなくなってしまう。第3の部分については、特に問題はなく、スクラバーにガスを導けば良い。

2.2.6 スクラバーの設計

スクラバーは、NOが酸化したNO₂を水に吸収する部分である。エンジンの排気ガスの圧力を利用してガスを水中にもうけたガス室から小孔を通して噴出する自噴型を採用する場合、最適な水深、噴出口の大きさなどを選定する必要がある。本設計については、基礎実験により水深2cm、孔の径3mmを設定した。

2.2.7 制御装置

制御装置は、排気ガスの濃度に応じて放電電力を制御するものであるが、いろいろな制御方法が考えられる。最適制御法については今後の課題とする。

3. システムの設計例

3.1 システム要素の設計

以上、無声放電を使ったディーゼルエンジン排気ガスの浄化システムの設計法を述べたが、この考えにしたがって具体的に実験システムを設計し、実際に構築したのでその概要を述べる。NO濃度の低減目標は、エンジン発電機全負荷時で50%とする。

(1) 対象ディーゼルエンジンと排気ガスの性状

2.4kVA、空冷4サイクル、 $n=3600$ [rpm]、排気量 $V=230$ [cm³]

$$\text{ガス流量 } Q = 0.85 \times (1/2) \cdot n \cdot V \cdot 60 \times 10^{-6} \\ = 21.1 [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

排気ガスの温度は、エンジンに吸入された空気温度 T_0 を300[K]として、

$T_{\text{ex}} = \zeta \cdot T_0 = 2.0 \times 300 = 600$ (K)より 323℃
NO_x濃度 C は400 (ppm)、したがってNO濃度 C はその90%として360 (ppm)

1時間当たりのNOの排出量 M は

$$M = 1.34 \times Q \cdot C \times 10^{-3} = 10.2 [\text{g/h}]$$

ススの量 M_s は、

$$M_s = (19 \sim 50 \text{ mg/m}^3) \times 21.1 [\text{m}^3/\text{h}] \\ = 0.4 \sim 1.06 [\text{g/h}] \quad \text{となる。}$$

(2) ガスクーラ

ガスクーラは、図8示すような構造で、内径 $D=9$ mmの銅製のパイプ6本を使い、中に排気ガスを通して外側から水冷する構造とした。

図8 ガスクーラの構造

Fig. 8 Gas Cooler

排気ガス量 $Q=21.1$ [Nm³/h] が6本の上記パイプに流れるとき、流速 v は 17.3 [m/s] になる。しかしこれは標準状態のガスの流速であるから、高温ガスでは絶対温度の比で流速が大きくなる。クーラ全体では、323℃を60℃まで冷やすので、平均温度は192℃、標準状態との絶対温度の比 r を取ると $r = (273+192)/273 = 1.7$ すなわちクーラの中の流速 v は平均して 17.3 [m/s] の1.7倍の29.4 [m/s] になる。図5に示したように、この流速では熱伝達率 α は143 [W/m²K] になるので、30℃の水で冷却した場合、出口ガスの温度を計算するとクーラの長さ92 [cm] でガス温度は60 [℃] に下がる。

(3) 放電装置の設計

著者の円筒型放電装置による実験データは先に示した図7の通りで、NO酸化効率 η は低減の割合が大きくなるにつれて減少する。炭化水素 (HC) を添加しない場合、50% NOを減少させる目標に対して、 η は 14.5 [g/kWh] である。炭化水素を400ppm添加すれば、50%低減に対して η は45 [g/kWh] になり性能は3.1倍になる。

今回のシステム設計では、50%のNO低減を目指すことにしたので、無声放電単独では $\eta = 14.5$ [g/kWh] を用いることになる。2.4kVAのディーゼルエンジンの排ガスには、10.2 [g/h] のNOが含まれているので、それを50%まで低減することは、5.01 [g/h] のNOを酸化させる目標になる。したがって、放電装置に必要な電力 P は、 $P = 5.01 / 14.5 \times 10^3 = 346$ [W] である。いま、放電装置のギャップを5 [mm]、厚さ3 [mm] のガラス板を誘電体として用いるとすれば、放電開始電圧 V_g は(12)式より 10 [kV] になるので (10)式で設計すると、60Hzでは、 $V_0 = 25.5$ [kV] (実効値で18kV) で、放電面積 $S_a = 0.528$ [m²] を必要とする。周波数を3倍の180Hzとすれば、放電面積は 0.176 [m

2]と小型に出来る。今回のシステムでは、60Hz で運転することを考えて、0.528[m²]の放電装置を設計した。図9に製作した放電装置の概観を示す。

図9 放電装置

Fig. 9 Discharge device

(4) 電源

電源装置は、実効値で少なくとも20[kV]以上を出せるものを用意する必要がある。また周波数を変化させて実験するために、可変電圧可変周波数のシステム電源として、1次200V、2次100V、周波数5Hz～1kHz、出力2kVAを、また変圧器は1次100V、2次30kV、1.5kVAを利用することにした。

(5) スクラバーの設計

これは実験に基づいてバブリングする方式とし、小孔の径 3[mm]、水深2[cm]、間隔1[cm]、孔の数456個を決めた。

3.2 システムの構築

図10は、本手法で設計した NO_x除去システムの完成図である。システムは、すでに製作され、順調にNO低減実験を行なうことができた。実システムの実験結果は、別論文¹⁴⁾で詳しく報告される。

図10 NO_x除去システム

Fig. 10 NO_x removal system

4. まとめ

以上、ディーゼルエンジンを対象にした無声放電による排ガス浄化システムの設計方法と設計例を述べた。主な結論は次の通りである。

- (1) ディーゼルエンジンの基礎理論を基にして、ディーゼル排ガスの性状を推定する手法を明らかにし、排ガス浄化システムの設計に必要な排気ガスの量、排気ガスの温度をエンジン仕様から求めることが出来た。
- (2) 高温の排気ガスを冷却するクーラーの設計法をまとめた。高速流による熱伝達率 α の求め方とクーラー

の設計手法を明らかにし、設計例を示した。またガス温度を100℃以下に冷却する場合、放電装置までのガスのフローラインの結露対策が必要なることを述べた。

(3) 放電リアクターの仕様と設計手法を明らかにした。目標のNO低減を図るためのエネルギー効率の考慮の仕方を明らかにした。排ガス中のNO量とNO酸化効率から、放電装置に必要な電力量を求める放電装置の設計方法を明らかにし、設計例を示した。

(4) バブリング方式のスクラバーを、実験データを基に設計した例を示した。

(平成11年7月12日 受付)

文献

- (1) 吉岡:「プラズマによる大気汚染物質処理技術の現状と課題」、電学論B、113巻5号、pp.463-467、(1993)
- (2) 清水、小田:「非熱平衡プラズマによる排ガス処理における触媒作用」、H9電気学会プラズマ研究会、EP-97-58、pp.7-12、(1997)
- (3) 清水、小田:「非熱平衡プラズマと触媒作用による窒素酸化物除去」、H10電気学会全国大会、A-214、p.251、(1998)
- (4) Y.Yoshioka et al: "Design and Testing of a Prototype De-NO_x System for 100kVA Diesel Engine Generator using a Silent Discharge Reactor." Combustion Science and Technology, pp.22-23, (1998)
- (5) J.W.Rogers et al: "Barrier Discharge Optimization for Nitric Oxide Destruction", J. of Adv. Oxid. Tech, Vol2, NO.2, p353 (1997)
- (6) 手平、猪原 他:「沿面放電を用いた排ガス処理」、H10電気学会放電研究会、ED-98-109、pp.17-21、(1998)
- (7) M.Higashi, et al, "Simultaneous Reduction of Soot and NO_x in Diesel Engine Exhaust by a Combination of Discharge Volume and Oil Dynamics." IEEE Trans. Plasma Science (1991)
- (8) 占部 他:「パルスコロナ放電を利用した NO_x、SO_xの除去に関する基礎実験」、静電気学会誌、12、4、p354、(1988)
- (9) 吉岡:「静電気と NO_x対策」、静電気学会会誌、21、1、p p.14-17、(1997)
- (10) 棚澤ほか:「電気学会大学講座「エネルギー基礎論」、電気学会(1989)
- (11) G.Dinelli et al: "Industrial Experiments on Pulse Corona Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ from Flue Gas", IEEE Trans. Industry Applications, Vol.26, NO.3, p535, (1990)
- (12) J.Park et al: "Removal of NO_x from Dry Air by a Pulsed Corona Discharge with Magnetic Field", J. Adv. Oxid. Technol. Vol2, NO.2, pp.294-298, (1998)
- (13) 手嶋他:「非対称電極構造の無声放電のシミュレーション」、学生による研究発表会、電気学会北陸支部、D-9、(1999)
- (14) 新川他:「2.4kVA ディーゼルエンジン発電機の排ガス中のNO除去実験」、H11電気学会A部門大会、NO43、(1999)

吉岡 芳夫（正員）昭和12年3月16日生。昭和34

年3月 大阪大学理学部物理学
科卒業、同年4月(株)日立製作
所入社、日立研究所にて各種
遮断器の研究開発、レーザ、燃
料電池、高電圧機器等エネル
ギー関連分野の研究を担当(副
所長)、昭和63年2月から同社

国分工場で無声放電によるNO_x除去の研究と新製品
開発を担当(主管技師長)、平成5年6月から同社日立
茨城工業専門学院(学院長)で学院運営と教育を担当。
同社定年退職後平成10年4月から、金沢工業大学電
気系教授、現在に至る。主として非熱平衡プラズマによ
るNO_x除去の研究、オゾン応用、遮断器の設計法の研
究を実施中。工学博士。技術士(電気電子部門)、応用
物理学会、日本工学教育協会の会員。

新川 智祥（学生員）昭和51年10月12日生。平成1

0年3月金沢工業大学電気工学
科卒業、同年4月金沢工業大
学大学院工学研究科修士課程
電気電子工学専攻に入学、現
在に至る。無声放電によるディ
ーゼルエンジン排ガス浄化の研
究に従事。