パルスパワー方式排ガス処理に関する基礎研究

— NO 初期濃度による影響 —

非会員 王 斗艶* 正員 浪平 隆男*
正員 勝木 淳* 正員 秋山 秀典*

Effect of NO Initial Concentration on NO_x Removal Using Pulsed Power

Douyan Wang*, Non-member, Takao Namihira*, Member,
Sunao Katsuki*, Member, Hidenori Akiyama*, Member

Non-thermal plasma produced by pulsed power discharge in atmospheric pressure gases has been studied for high-efficiency treatment of exhaust gases. In this paper, a short duration of 40 ns pulsed power has been applied to a mixture of nitrogen, oxygen, and water vapor, simulating flue gases to remove nitric oxide (NO). The effects of NO initial concentration and the pulsed repetition rate on the percentage of NO removal are reported. The results showed that all NO could be removed completely at different pulse repetition rates for different NO initial concentrations. The NO_x removal ratio has a peak for a certain input energy. The removal of NO increased with increasing input energy density to NO (J/NO) at different NO initial concentrations.

キーワード：パルスパワー，排ガス処理，ブルームライン線路，窒素酸化物，NO 初期濃度

Keywords：pulsed power, treatment of exhaust gas, Blumlein line, nitrogen oxide, NO initial concentration

1. まえがき

環境問題はこの四半世紀のうちに地球規模での広がりを見せ、その重要性に対する認識も世界的に高まってきている。中でも酸性雨は、原因物質の発生源から 500 ~ 1,000 キロも離れた地域にも沈着する性質があり、国境を越えた広域的な大気汚染である。

酸性雨は従来、主として化石燃料に起因する硫黄酸化物 (SO_x) や窒素酸化物 (NO_x) などの原因物質から生成された硫酸や硝酸が溶解した酸性の強い雨のこととされていた。しかし、最近では、酸性の強い霧や雪 (雨を含めて「湿性沈着」という) や、晴れた日でも風に乗って沈着する粒子状 (エアロゾル) あるいはガス状の酸 (あわせて「乾性沈着」という) をあわせたものとされており、その被害の深刻さは計り知れない⁽¹⁾⁽²⁾。このような状況においても、途上国では経済成長の持続と環境対策コスト捻出とのジレンマに直面しており、脱硝・脱硫装置の設置が欠乏している。

一方、先進国においても、今後普及が期待されるコジェネレーション・システムの小型分散電源に対して、現行処

理装置は巨大なため適応が困難であり、かつ電源が都市部に立地するため排ガス規制の強化は避けられない。以上より、安価かつ小型・高性能の排煙脱硝・脱硫装置の実現が急務となってきた。

現在最もその実現可能性を秘めている非熱平衡プラズマを用いた排ガス浄化法は世界中で研究されており⁽³⁾⁽⁴⁾、無声放電^{(5)~(8)}、重畳放電⁽⁹⁾、グロー放電⁽¹⁰⁾、直流コロナ放電⁽¹¹⁾⁽¹²⁾等様々な方法が提案されている。本研究では、大気圧プラズマ中で 10 eV を越える高速電子の多量生成が可能であり⁽¹³⁾、かつ排ガス浄化に寄与するラジカル (化学的活性種) の大量生成が容易であるパルスストリーマ放電^{(14)~(18)}を用いている。パルスパワー方式排ガス処理における NO 除去メカニズムは、パルスストリーマ放電により生成された高速電子が引き起こすプラズマ化学反応によるものである。代表的な反応例は、N ラジカルによる NO の N₂ への還元、O と O₃ ラジカルによる NO の NO₂ への酸化、さらに OH ラジカルによる NO₂ の NO への還元および HNO₃ への酸化等である⁽¹⁹⁾。

処理対象である排ガス発生源は、火力発電所や工場等の固定発生源と自動車や船舶等の移動発生源に大きく分けられ、最近ではタバコ工場⁽²⁰⁾からの例も報告されている。発生源が異なると、含有する一酸化窒素 (NO) の濃度も変化

* 熊本大学
〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1
Akiyama Labs., Kumamoto University
2-39-1, Kurokami, Kumamoto 860-8555

するため、パルスパワー方式排ガス処理の処理ガス中 NO 初期濃度に対する特性把握は、実用可能性の議論のためにも必要である。なお、これまでに非熱平衡プラズマを用いた排ガス処理に関する NO 初期濃度特性は、無声放電⁽²¹⁾やアーク放電⁽²²⁾、 μs オーダーのパルスコロナ放電⁽²³⁾による結果が報告されている。本研究では、パルス幅が数十 ns の短パルス放電による排ガス処理の基礎特性として、その NO 初期濃度依存性を調べた。

また、我々がこれまでに報告したパルスパワー方式排ガス処理に関する処理ガスの組成⁽¹⁹⁾、パルス幅の効果⁽²⁴⁾、処理ガス流量⁽²⁵⁾、フライアッシュの影響⁽²⁶⁾、アンモニア添加の効果⁽²⁷⁾等によると、 NO_x 除去率は放電への注入エネルギー増加に伴い増加すると考えられていた。しかし、今回我々は注入エネルギーと除去率の間に最適値が存在することを発見し、さらにその最適値が NO 初期濃度に依存することを見出した。

2. 実験装置および実験方法

〈2・1〉 パルスパワー電源－3 段ブルームライン線路－

本研究では、排ガス処理用パルスパワー発生電源として、短パルス幅・高波高値を有するブルームライン線路⁽²⁸⁾を用いた。図 1 に、3 段ブルームライン線路の概略図および外観写真を示す。これは、パルス成形線路である同軸ケーブル (RG/213U, $50\ \Omega$, 三菱電線) を 2 本組合せてブルームライン線路を構成し、昇圧のために 3 段直列に積重ねたものである。3 段積重ねることにより、整合負荷は $300\ \Omega$ となる。パルス幅は同軸ケーブルの長さにより可変であり、今回はケーブル長 4 m, 出力パルス幅 40 ns とした。ケーブル充電後に短絡スイッチとして用いたスパークギャップスイッチ (SGS) をトリガさせることで、正極性のパルス電圧が出力される。また、本電源のサイズは $500 \times 500 \times 200\ \text{mm}$ と非常にコンパクトである。

〈2・2〉 模擬排ガス処理実験 図 2 に、模擬排ガス処理実験の装置構成を示す。模擬排ガスとして、ガスボンベに封入された窒素 (N_2) 希釈の一酸化窒素 ($\text{NO} : 1000\ \text{ppm}$) および窒素 (N_2)、酸素 (O_2) を、マスフローコントローラ (SEC-E440J, STEC, 日本) を用いて総流量を $2.0\ \text{l/min}$ と制御した。また、模擬排ガスは蒸留水 (約 300K) へバブリングさせることで約 2 % の水蒸気 (H_2O) を添加し、排ガス処理容器へ導いた。実験は、酸素濃度を 5 % 一定とし、NO 初期濃度を 100, 150, 200, 250, 300 ppm の 5 通りに変化させて行った。

排ガス処理容器には、大容量の放電プラズマ生成が可能である同軸円筒型を採用した。そのパラメータは、ステンレス製内部電極 $\phi 1\ \text{mm}$, 銅製外部電極 $\phi 76\ \text{mm}$, 長さ $1,000\ \text{mm}$ である。

実験では、3 段ブルームライン線路を充電電圧 25 kV で動作させ、排ガス処理容器の内部電極に正極性パルス電圧を印加して、外部電極を接地した。この時、パルス繰返し周波数は 1 ~ 40 pps (pulses per second) と変化させた。

各周波数において、放電処理したガスの濃度は飽和状態となった後にガス分析器 (Testo350, Testo Term Co., German) へ導かれ、NO, NO_2 濃度を計測後、排気した。なお、NO, NO_2 濃度は各パルス繰返し周波数に関して 3 回計測しその平均値とした。

印加電圧および放電電流は、それぞれ抵抗分圧器 ($1:10\ \text{k}$) およびロゴスキーコイル (Model 2878, Pearson Electronics Inc., USA) を用いて、シールドルーム内に設置されたオシロスコープ (HP54542A, Hewlett Packard, USA) により計測した。

(a) Schematic diagram

(b) Photograph

図 1 3 段ブルームライン線路

Fig. 1. Schematic diagram (a) and photograph (b) of 3-stages Blumlein Line.

図 2 模擬排ガス処理実験装置の構成

Fig. 2. Experimental set-up.

3. 実験結果および考察

(3・1) 印加電圧および放電電流 図3に、各NO初期濃度における典型的な印加電圧および放電電流波形を示す。図3より、電圧・電流に対するNO濃度変化による影響は見られず、パルス幅40 nsを有する良好なパルス電圧が得られた。電圧と電流の最大値はそれぞれ53 kV, 141 Aであり、電圧と電流の積分より算出された1パルス分の注入エネルギーは全てのNO初期濃度及びパルス繰返し周波数において 0.28 ± 0.01 Jであった。このエネルギー値は3段ブルームライン線路への充電エネルギーの約34%にあたる。なお、このエネルギー転送効率、電源と処理容器間の不整合に起因している。

(3・2) 排ガス処理におけるNO初期濃度の影響 図4に、各NO初期濃度に対するNO, NO₂濃度のパルス繰返し周波数依存性を示す。また、図5にはNO_x除去率のパルス繰返し周波数依存性を示す。図4(a)より、各NO初期濃度において、パルス繰返し周波数が増加するとともにNO濃度は減少した。これは、放電によって生成されたN, O, O₃ラジカルがNOの酸化・還元反応を促進したためである⁽¹⁹⁾。また、各NO初期濃度100, 150, 200, 250, 300 ppmに対して、それぞれパルス繰返し周波数10, 16, 20, 26, 32 ppsにおいてNO除去率100%に達した。図4(b)より、NO₂濃度は全てのNO初期濃度においてパルス繰返し周波数の増加にともない、増加して次に減少し、その後再び増加する傾向を示した。これは、O, O₃, OH等の各種ラジカルによる

NO除去過程において、その初期段階では各種ラジカルはNOを酸化しNO₂を生成するが、NOの減少とともに、各種ラジカルはNO₂と反応するようになり、NO₂濃度は減少に転じる。さらにNO除去が進みその除去率が100%へ到達すると、余剰に生成される各種ラジカルがNO₂を生成し始めるためである。これらNO, NO₂の除去特性より、図5に示されるように、NO_x除去率には最大値が存在するようになる。また、図4において、NO初期濃度300 ppmの処理特性は、250 ppmのものと同様の傾向を示した。

ここで、NOの100%除去後に生成されたNO₂が放電に

(a) Voltage

(b) Current

図3 典型的な印加電圧および放電電流波形
Fig. 3. Typical waveforms of voltage across (a) and current through (b) the reactor.

(a) NO

(b) NO₂

● 100 ppm, ■ 150 ppm, ▲ 200 ppm, ▼ 250 ppm, ◆ 300 ppm

図4 NO, NO₂濃度のパルス繰返し周波数依存性
Fig. 4. Dependences of the final concentrations of NO (a) and NO₂ (b) on the pulse repetition rate.

● 100 ppm, ■ 150 ppm, ▲ 200 ppm, ▼ 250 ppm, ◆ 300 ppm

図5 NO_x除去率のパルス繰返し周波数依存性
Fig. 5. Dependence of the NO_x removal ratio on the pulse repetition rate.

起因することを確認するために、NO 初期濃度 0 ppm に関する実験を行った。図 6 に、NO 添加なし (NO 初期濃度 0 ppm) の場合の NO, NO₂ 濃度のパルス繰り返し周波数依存性を示す。なお、本実験は長さ 50 cm の排ガス処理容器により実施された。図 6 より、NO が存在しない条件においては、放電処理による NO 生成は全く見られず、NO₂ のみが生成されていることが確認できた。したがって、NO の 100 % 除去後の放電による NO₂ 生成が裏付けられた。

図 7 に、NO 初期濃度と NO_x 除去率の関係を示す。グラフの縦軸は最高 NO_x 除去率、横軸は NO 初期濃度を示す。ここで、最高 NO_x 除去率とは、図 5 における NO_x 除去率の最高値である。図 7 より、NO 初期濃度が増加するにつれ最高 NO_x 除去率は高くなり、NO 初期濃度 250 ppm 以上において NO_x 除去率 97 % で飽和した。この結果の検討として、図 4(b) における NO₂ 濃度が減少し始めた後の最低値 (NO₂ 最低生成濃度) に着目してみると、NO₂ 最低生成濃度はいずれも NO 除去率 100 % 到達後に存在し、その値は NO 初期濃度の増加とともに減少し、250 ppm 以上においてはその減少率が飽和した。したがって、NO 初期濃度 250 ppm 以上において NO_x 除去率が飽和したのは、NO₂ の減少に下限があるためと考えられる。

図 6 NO 添加なしにおける NO, NO₂ 濃度のパルス繰り返し周波数依存性

Fig. 6. Dependences of the final concentrations of NO and NO₂ on the pulse repetition rate in the case without initial NO.

図 7 NO 初期濃度と NO_x 除去率の関係

Fig. 7. Effect of NO initial concentration on NO_x removal.

〈3・1〉節で述べたように、本研究では NO 初期濃度が異なっても排ガス処理容器へ注入されるエネルギーは同等である。したがって、NO 一分子あたりへ注入されるエネルギー (NO エネルギー密度) に着目して、以下検討を行った。図 8 に、各 NO 初期濃度における NO, NO_x 除去率の NO エネルギー密度依存性を示す。なお、NO エネルギー密度は式 1 より算出した。図 8(a) より、NO 除去率は全ての NO 初期濃度において同様の傾向を示し、NO エネルギー密度の増加とともに上昇した。このとき、全ての NO 初期濃度において、NO 除去率は NO エネルギー密度 $(3.2 \pm 0.1) \times 10^{-17}$ J/NO にて 100% へ達した。図 8(b) より、NO_x 除去率もまた NO 除去率と同じく全ての NO 初期濃度において同様の傾向を示し、NO エネルギー密度 $(3.7 \pm 0.1) \times 10^{-17}$ J/NO にて最大値となった。また、NO 初期濃度が高いほど、一定の NO_x 除去率へ達する NO エネルギー密度はわずかではあるが低かった。(すなわち除去効率が低い)。以上図 8 より、NO, NO_x 除去率の推移は NO エネルギー密度に依存することが明らかとなった。

$$E_d = \frac{E \times f}{G \times \frac{1}{60} [\text{min/s}] \times NO_i \times 10^{-6} \times \frac{1}{22.4} [\text{mol/l}] \times N_A} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(a) NO

(b) NO_x

● 100 ppm, ■ 150 ppm, ▲ 200 ppm, ▼ 250 ppm, ◆ 300 ppm

図 8 NO, NO_x 除去率の NO エネルギー密度依存性
Fig. 8. Dependences of the NO (a) and NO_x (b) removal ratio on the input energy density to NO.

表 1 本研究における NO エネルギー密度と他の報告例の比較

Table 1. Comparison of the input energy density to NO of present results with other results.

Reference	Type of discharge	Pulse width [ns]	Initial NO [ppm]	Gas composition	Gas flow rate [l/min]	NO _x removal ratio [%]	NO energy density [$\times 10^{-17}$ J/NO]
Present work	Pulsed Streamer	40	300 (100)	NO / N ₂ / O ₂ / H ₂ O	2.0	60	1.250 (1.875)
Ehara <i>et al.</i> [9]	Superimposing Multiple	-	1850	NO / N ₂	0.2	60 (NO)	2.156
Penetrante <i>et al.</i> [15]	Pulsed Corona	100	100	NO / N ₂	65.0	60	1.860
	Dielectric-Barrier	100	100	NO / N ₂	65.0	60	2.046
	Dielectric-Pellet Bed	100	100	NO / N ₂	65.0	60	2.976
Morimune <i>et al.</i> [22]	N ₂ Arc Plasma Injection	-	2150	NO / N ₂ / O ₂	20.0	50	3.114

E_d [J/NO]: Input energy density to NO, input energy per one NO molecule

NO_i [ppm]: NO initial concentration

E [J/pulse]: Energy per pulse

f [pulses/s]: Pulse repetition rate

G [l/min]: Gas flow rate, 2.0 at present work

N_A [NO/mol]: Avogadro's number, 6.022×10^{23}

最後に実用化に対する検討として、NO_x 排出基準値と NO_x 除去効率について考察する。まず、NO_x 排出基準についてであるが、環境省が定める「大気汚染防止法」によると、ガスタービン、ボイラーおよび各種炉から排出される NO_x の排出基準値は、60 ~ 450 ppm となっている。したがって、排出 NO_x 濃度を 60 ppm 以下に抑えることは新設施設における実用化の最高基準となる。なお、この 60 ppm という値は、今回実験をおこなった NO 初期濃度 100, 150, 200, 250, 300 ppm に対する NO_x 除去率 40.0, 60.0, 70.0, 76.0, 80.0 %に対応している。これを図 7 に追加 (図 7 中の ◇印) して本研究における処理結果と比較すると明らかのように、パルスパワー方式排ガス処理は 100 から 300 ppm の NO_x 排出施設に対する適用が可能であることが確認される。また、NO 初期濃度 300 ppm から NO_x 濃度 60 ppm までの低減に要する NO エネルギー密度は 2.08×10^{-17} J/NO (=0.25 mol/kWh or 30 g(NO)/kWh) であった。

また、参考として、本研究結果を他の報告例⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾⁽²²⁾と比較した結果を表 1 に示す。なお、表 1 に示される NO エネルギー密度は、ガス組成や温度など実験条件の相違のため直接比較することはできないが、本研究結果は還元剤の添加や触媒との併用がない条件においては比較的高い効率となっている。

4. 結論

パルスパワー方式排ガス処理に関する基礎研究として、NO 初期濃度による影響を考察するために実験・検討を行った結果、下記のことが明らかとなった。

(1) 排ガス中の NO 初期濃度の変化は、排ガス処理容器への印加電圧および放電電流に影響を及ぼさない。

(2) NO 除去中に生成される NO₂ は、増加→減少→増加の変化傾向を示す。したがって、NO_x 除去率には最大値が存在する。

(3) 最高 NO_x 除去率は NO 初期濃度の増加に伴い高くなり、250 ppm 以上において最高 97 %となる。

(4) NO, NO_x 除去率は NO 一分子あたりに注入されるエネルギー (NO エネルギー密度) に依存し、NO エネルギー密度 ($3.2 \pm 0.1 \times 10^{-17}$ J/NO の時に NO の 100 %除去、および ($3.7 \pm 0.1 \times 10^{-17}$ J/NO の時に最高 NO_x 除去率を示す。また、NO 初期濃度が高いほど NO_x 除去率は高くなる。

(5) パルスパワー方式排ガス処理は 100 から 300 ppm の NO_x 排出施設において、環境庁所定の NO_x 排出環境基準値をクリア可能である。なお、NO_x 排出濃度 300 ppm における最も厳しい排出基準値 (排出 NO_x 濃度 60 ppm) を充たす NO エネルギー密度は 2.08×10^{-17} J/NO (=0.25 mol/kWh or 30 g(NO)/kWh) であった。

なお、今後はさらなる高効率化が望まれる。

(平成 15 年 8 月 6 日受付, 平成 16 年 1 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 環境省:「大気汚染の現状」, 環境白書, 平成 11 年版, 第 4 章, 第 1 節, 財務省印刷 (平成 11 年)
- (2) The World Health Organization (WHO): Nitrogen Oxides, 丸善 (1999)
- (3) R. Hackam and H. Akiyama: "Air pollution control by electrical discharges", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, Vol.7, No.5, pp.654-683 (2000)
- (4) Y. Yoshioka: "Application and Mutual Comparison Methods of Exhaust Gas Treatment Technology By Various Non-thermal Plasmas", *T. IEE Japan*, Vol.122-A, No.7, pp.676-682 (2002-7) (in Japanese)
吉岡芳夫:「各種非熱平衡プラズマによる排ガス浄化技術の適用法と相互比較法」, 電学論 A, 122, 7, pp.676-682 (2002-7)
- (5) K. Urashima, J.S. Chang, and T. Ito: "Reduction of NO_x from combustion flue gases by superimposed barrirer discharge plasma reactor", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, Vol.33, No.4, pp.879-886 (1997)
- (6) T. Oda, T. Kato, T. Takahashi, and K. Shimizu: "Nitric oxide decomposition in air by using nonthermal plasma processing with additives and catalyst", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, Vol.34, No.2, pp.268-272 (1998)
- (7) K. Takaki and T. Kujiwara: "Multipoint barrier discharge process for removal of NO_x from diesel engine exhaust", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.29, No.3, pp.518-523 (2001)
- (8) T. Shinkawa, J. Shimazaki, K. Sano, and Y. Yoshioka: "Factors Affecting the NO Removal Efficiency in the NO Removal Method by Silent Discharge", *T. IEE Japan*, Vol.122-A, No.9, pp.832-839 (2002-9) (in Japanese)

- 新川智祥・島崎純平・佐野和慶・吉岡芳夫：「無声放電による NO 除去法において NO 除去効率に影響する諸因子」，電学論 A, 122, 9, pp.832-839 (2002-9)
- (9) Y. Ehara, T. Nomura, M. Baba, Y. Murata, and T. Itoh : "Improved Efficiency of NO_x Decomposition System by Superimposing Multiple Discharge", *T. IEE Japan*, Vol.123-A, No.6, pp.537-542 (2003-6) (in Japanese)
江原由泰・野村季和・馬場幸政・村田義元・伊藤泰郎：「複数放電重畳による窒素酸化物処理システムの効率向上」，電学論 A, 123, 6, pp.537-542 (2003-6)
- (10) Y. Sakai and H. Tagashira : "Decomposition of NO₂ by glow discharge plasma", NATO ASI Series, Vol.34, Part A, Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, B.M. Penetrante and E. Schultheis, Ed. pp.139-149, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1993)
- (11) B. Held : "Corona and their applications", 11th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Vol.2, pp.514-526 (1995)
- (12) T. Ohkubo, S. Kanazawa, Y. Nomoto, J.S. Chang, and T. Adachi : "Time dependence of NO_x removal rate by a corona radical shower system", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, Vol.32, No.5, pp.1058-1062 (1996)
- (13) F. Tochikubo and T.H. Teich : "Optical emission from a pulsed corona discharge and its associated reactions", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.39, No.3A, pp.1343-1350 (2000)
- (14) H. Akiyama : "Pollution control by pulsed power", International Power Electronics Conference, pp.1937-1400 (1995)
- (15) B.M. Penetrante, M.C. Hsiao, B.T. Merritt, G.E. Vogtlin, and P.H. Wallman : "Comparison of electrical discharge techniques for nonthermal plasma processing of NO in N₂", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.23, No.4, pp.679-687 (1995)
- (16) K. Kawamura, S. Tsukamoto, T. Takeshita, S. Katsuki, and H. Akiyama : "NO_x Removal using Inductive Pulsed Power Generator", *T. IEE Japan*, Vol.117-A, No.9, pp.956-961 (1997-9) (in Japanese)
川村啓介・塚本俊介・竹下智洋・勝木 淳・秋山秀典：「誘導型パルスパワー電源を用いた NO_x 除去」，電学論 A, 117, 9, pp.956-961 (1997-9)
- (17) V. Puchkarrev and M. Gundersen : "Energy efficient plasma processing of gaseous emission using a short pulse discharge", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, No.23, pp.3364-3366 (1997)
- (18) S. Tsukamoto, T. Namihira, D. Wang, S. Katsuki, H. Akiyama, E. Nakashima, A. Sato, Y. Uchida, and M. Koike : "Pollution Control of Actual Flue Gas using Pulsed Power at a Thermal Power Plant", *T. IEE Japan*, Vol.119-A, No.7, pp.984-989 (1999-7) (in Japanese)
塚本俊介・浪平隆男・王 斗艶・勝木 淳・秋山秀典・中島英作・佐藤昭広・小池正実・内田佳孝：「火力発電所におけるパルスパワーを用いた実ガス処理」，電学論 A, 119, 7, pp.984-989 (1999-7)
- (19) T. Namihira, D. Wang, S. Tsukamoto, S. Katsuki, and H. Akiyama : "Effect of gas composition for NO_x removal using pulsed power", *T. IEE Japan*, Vol.119-A, No.10, pp.1190-1195 (1999-10) (in Japanese)
浪平隆男・王 斗艶・塚本俊介・勝木 淳・秋山秀典：「パルスパワーを用いた NO_x 処理におけるガス組成の影響」，電学論 A, 119, 10, pp.1190-1195 (1999-10)
- (20) 日本たばこ産業株式会社 : JT 環境報告書 2002 (2002)
- (21) K. Kimura, K. Hayashi, and Y. Yoshida : "Research of an Automatic Control Method of NO Removal System by Silent Discharge", *T. IEE Japan*, Vol.123-A, No.10, pp.1037-1044 (2003-10) (in Japanese)
木村康平・林 健司・吉岡芳夫：「無声放電によるディーゼルエンジン排ガスの NO 除去制御法の研究」，電学論 A, 123, 10, pp.1037-1044 (2003-10)
- (22) T. Morimune, Y. Ejiri, and T. Tsukakoshi : "Removal of NO_x from Exhaust Gas by N₂ Arc Plasma Injection", *Int. J. Experimental Heat Transfer, Thermodynamics and Fluid Mechanics (Experimental Thermal and Fluid Sci.)*, Vol.8, pp.175-180 (1994)
- (23) G. Dinelli, L. Civitano, and M. Rea : "Industrial Experiments on Pulse Corona Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ from Flue Gas", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, Vol.26, No.3, pp.535-541 (1990-3)
- (24) T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, Y. Uchida, and M. Koike : "Improvement of NO_x removal efficiency using short width pulsed power", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.28, pp.434-442 (2000)
- (25) T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, H. Hori, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, M. Shimizu, and K. Yokoyama : "Influence of gas flow rate and reactor length on NO removal using pulsed power", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.29, No.4, pp.592-598 (2001-4)
- (26) S. Tsukamoto, T. Namihira, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, A. Sato, Y. Uchida, and M. Koike : "Effects of fly ash on NO_x removal by pulsed streamers", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.29, No.1, pp.29-36 (2001)
- (27) T. Namihira, H. Hori, D. Wang, S. Tsukamoto, S. Katsuki, H. Akiyama, M. Shimizu, and K. Yokoyama : "Effect of NH₃ on NO_x Removal Using Pulsed Power", *T. IEE Japan*, Vol.121-A, No.9, pp.834-840 (2001-9) (in Japanese)
浪平隆男・堀 秀男・王 斗艶・塚本俊介・勝木 淳・秋山秀典・清水 勝・横山健一：「パルスパワー方式排ガス処理におけるアンモニアの効果」，電学論 A, 121, No.9, pp.834-840 (2001-9)
- (28) 原 雅則・秋山秀典：高電圧パルスパワー工学, pp.170-173, 森北出 (1991)

王 斗艶

(非会員) 1975 年 5 月 18 日生。2000 年 3 月熊本大学自然科学研究科博士前期課程修了。同年 4 月株式会社 日立製作所入社。2003 年 4 月熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程入学，現在に至る。2003 年 11 月から 2004 年 3 月，米国 Texas Tech University 客員研究員として滞在。日本学術振興会特別研究員。

浪 平 隆 男

(正員) 1975 年 1 月 23 日生。1999 年 3 月熊本大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手，現在に至る。2003 年 4 月から 2004 年 3 月，米国 Texas Tech University 客員教授として滞在。工学博士。静電気学会会員，IEEE 会員。

勝 木 淳

(正員) 1966 年 1 月 5 日生。1991 年 3 月熊本大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手，1998 年 6 月同大学工学部助教授，現在に至る。工学博士。日本物理学会会員，IEEE 会員。

秋 山 秀 典

(正員) 1951 年 4 月 2 日生。1979 年 3 月名古屋大学大学院博士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手，1985 年 4 月熊本大学工学部助教授，1994 年 8 月同大学教授，現在に至る。工学博士。日本物理学会，日本レーザー学会，プラズマ・核融合学会，IEEE Fellow 会員。