

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340160

研究課題名（和文） インテリジェント高周波誘導プラズマ源の開発

研究課題名（英文） Development of Intelligent RF Induction Plasma Source

研究代表者

上杉 喜彦 (UESUGI YOSHIHIKO)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：90213339

研究成果の概要（和文）： DSP 帰還制御のための制御信号として、プラズマ粒子（アルゴン等）の励起温度を選択し、2 波長分光器による実時間温度計測法と DSP 帰還制御ループによりプラズマ温度に関する任意波形制御システムおよび 2 台の任意波形出力機能付き MOSFET インバータを用いた時空間変調誘導プラズマシステムを構築し、その初期性能を確認した。本研究で構築したインテリジェント高周波誘導プラズマ装置を用いて、金属及び高分子蒸気によるプラズマ熱流低減効果に関する実験に適用した。

研究成果の概要（英文）： We have developed a temperature controlled RF induction plasma source using a digital signal processor for feedback control and real time calculation of plasma radiation temperature. Experiments on the plasma-wall interactions in plasma applications and fusion plasmas have been done using this newly developed RF induction plasma source.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：プラズマ-壁相互作用

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：高周波誘導プラズマ，熱プラズマ，帰還制御，プラズマ-材料相互作用

1. 研究開始当初の背景

大気圧領域で生成される大電力高周波誘導プラズマは、同様に大気圧領域で運転される発光分析用 ICP プラズマや低気圧プロセスプラズマと比較してプラズマ密度や温度等の基礎物性に不明な点が多い。これは、誘電体放電管と外部コイルで構成される誘導プラズマトーチの構造や大きなプラズマ熱流によるプラズマ計測の難しさに起因する一方で、「材料化学的」な観点から大気

圧誘導プラズマを捉えていたために、誘導プラズマ自体の基礎特性やその制御手法の開発に大きな研究努力が払われてこなかったことも大きな要因である。本研究は、低気圧プロセスプラズマや核融合プラズマ研究で培われたプラズマ制御・計測技術および高周波技術を駆使して、「プラズマ物理」の観点から大電力大気圧誘導プラズマの基礎物性の解明を行い、プラズマ特性の実時間帰還制御が可能なインテリジェントな大気圧誘導プラズマ源を製作するものである。これによ

り、プラズマ物性解明という学術的な点に加えて、新しい産業応用も期待されるものである。

2. 研究目的

本研究は、これまで主としてプラズマ・材料化学の視点から取り扱われてきた大気圧領域の誘導プラズマに対して、低気圧プラズマや核融合プラズマにおける高周波技術、プラズマ制御・計測で得られた知見をもとに高効率で制御性のよい高機能誘導プラズマ源の開発を行い、新たな産業応用への展開を図ることを目的としている。

具体的な研究課題として、以下に示す課題に取り組んだ。

(1) これまでの高効率高周波半導体インバータ(SIT, MOSFET)を用いた誘導熱プラズマ研究を基礎として、プラズマ密度・温度場の帰還瞬時値制御が可能なインテリジェント誘導プラズマ源を製作し、生成される高気圧誘導プラズマの基礎物性およびその制御性を明らかにする。

(2) 製作したインテリジェント誘導プラズマ源を用いて、機能性ナノ微粒子生成やTiN・SiN膜形成などの表面改質実験に適用し、生成された材料の特性解明を通して新たな産業分野への応用分野の開拓を行う。

(3) 核融合分野における高熱流プラズマ・材料相互作用研究として、高融点材料(Mo, W, 炭素等)の損耗・ダスト生成実験へ適用し、本研究で開発するインテリジェント誘導プラズマ源の有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

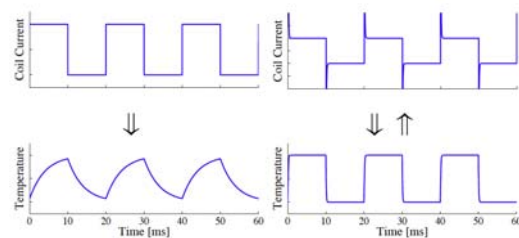
DSP(Digital Signal Processor)を用いて熱プラズマ温度の計算と擬似的直接制御を行う「フィードバック制御変調誘導熱プラズマ(FBCMITP; Feedback Control type of Modulated Induction Thermal Plasmas)システム」の開発を行った。本システムでは、これまでに開発してきたAMITPシステムをベースとして、分光観測部と熱プラズマ温度算定制御部を新たに追加し、熱プラズマが与えられた波形に追随するように制御している。本システムが実現できれば、例えば次のようなことが期待できる：「(1) 熱プラズマの温度、あるいは励起原子数など熱プラズマのパラメータを一定に保つ材料プロセスの実現(2) 様々な擾乱(ガス投入、材料投入時)に対しロバストなインテリジェントICTPシステムの構築」などが期待できる。本研究では、熱プラズマ温度を直接制御できるFBC-MITPを実現するために、AMITPシステムのコイル電流-熱プラズマ温度特性および熱プラズマ温度の過渡応答特性などの基礎特性を測定した。その結果を用いて、AMITPシステムの伝達関数を推算した。さらに、実

際にDSPを用いたPID制御システムを構築し、熱プラズマ温度が波形追従するシステムを開発した。また、開発したシステムにおける熱プラズマ温度の応答特性を検討するため、振幅、参照温度との位相差の周波数特性の測定および外乱応答特性について検討を行った。

4. 研究成果

4.1 フィードバック制御型変調誘導熱プラズマシステムの概念(FBC-MITP)

Fig.1(a)にこれまでに開発したパルス変調型郵送プラズマ源(PMITP)と任意波形変調型誘導プラズマ源(AMITP)のコイル電流とプラズマ温度波形の概略図を示し、Fig.1(b)に今回開発したFBC-MITPのコイル電流とプラズマ温度波形の時間波形の概念図を示す。従来型の変調プラズマでは、コイル電流の振幅を外部から与えられた矩形波あるいは任意波形に追従させる。その結果、コイル電流に追従して熱プラズマ温度は変化する。すなわち、PMITPおよびAMITPにおいてはコイル電流を波形追従制御させて熱プラズマの温度を変化させているため、温度に対して間接的な制御となっている。一方、FBCMITPでは熱プラズマ温度を与えた波形に追従させる。そのために、Fig.1(b)のようにプラズマの温度波形を電流にフィードバックさせコイル電流を制御する。このようにすることで実質的に熱プラズマ温度の直接制御が可能になる。この新たなシステムにより、プラズマはインテリジェント化され温度の詳細な制御が可能となる。これにより、エンタルピーや重粒子温度の制御が容易になる。さらには、同システムで励起活性化化学種からの光をフィードバックすれば、その数密度を擬似的に直接制御する形となる。また、材料に熱的ダメージを軽減でき、さらに活性化化学種等の増幅効果が得られる可能性もある。



(a) 従来型変調プラズマ (b) FBC-MITP

Fig. 1. フィードバック制御型変調の基本概念

4.2 フィードバック制御型変調誘導熱プラズマ(FBC-MITP)システムの構成

FBC-MITPシステムは、AMITPをベースとしてDSP(Digital Signal Processor)と放射スペクトル観測系をシステム内に組み込んで

いる。このシステムの概略図を Fig. 2 に示す。放射スペクトル観測系は光ファイバ、分光器、および PMT (Photo Multiplier Tube) により構成している。この観測系は三つの光ファイバ束を並べており異なる 3 つの波長の光を同時に観測でき、本研究では 703 および 714 nm の Ar 原子線と 709 nm の連続スペクトルの放射光を観測した。さらに測定したスペクトルは PMT (Photo Multiplier Tube) により電気信号に変換され、DSP を用いて 2 線強度比法より Ar 励起温度の算出を行う。なお、本研究では TI 社製 DSK6713 (255 MHz) の DSP を使用しており、DSP の高速処理により温度算出を実時間で出来るようになった。DSP ではさらに、算出したプラズマ温度波形と波形発生器から出力される参照信号波形を取り込みそれらを比較しており、プラズマ温度波形を参照信号に追従させるように PID 制御を施してその結果をインバータ電源の IGBT 制御信号端子へ出力している。これにより、目標とする参照信号に対応した温度へ Ar 励起温度を直接制御することが可能となっている。

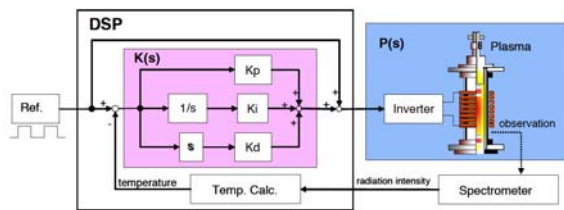


Fig. 2. フィードバック制御の概略図

4. 3 AMITP の基礎応答特性

(1) 実験条件

本実験では AMITP、および FBC-MITP のシースガスとして Ar ガスを使用している。流量は Axial ガスとして 40 slpm, Swirl ガスとして 40 slpm を流しており、圧力は 55 torr で実験を行った。また、このときのインバータ入力電力は 10kW とした。このような条件における熱プラズマでは、粒子間の衝突頻度が大きく、概略一温度モデルで近似できる。即ち、測定する Ar 励起温度は熱プラズマ温度として解釈しうる。

(2) 無変調状態における IGBT 制御信号-コイル電流-Ar 励起温度特性

AMITP システムでは、コイル電流を制御することでプラズマ温度を制御している。コイル電流制御はインバータ電源における IGBT dc-dc コンバータを制御することで行っている。IGBT 制御信号は 0-10 V の範囲でコイル電流と比例関係になるよう制御されている。この AMITP をベースとして FBCMITP システムを構築するには、IGBT 制御信号とコイル電流との関係、さらにコイル電流と Ar 励起温度との関係を把握しておく必要がある。

熱プラズマ温度を制御するにあたり、まずは AMITP の無変調状態における熱プラズマ温度-コイル電流-IGBT 制御信号特性の測定実験を行った。実験方法として、入力信号を 5.6-8.0 V まで変化させ、その際のコイル電流の実効値と熱プラズマ温度の測定を行った。ここで、熱プラズマ温度 (Ar 励起温度) は Ar 原子線スペクトル 703 nm と 714 nm, 連続スペクトル 709 nm より 2 線強度比法を使い DSP で計算を行った。その結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 のように制御信号 5.6-8.0 V に対してコイル電流実効値は 103-145 A で比例的に変化した。さらに熱プラズマ温度はコイル電流にほぼ比例し 6330-8560 K で変化した。

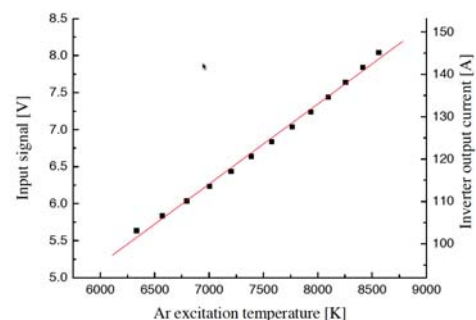


Fig. 3. インバータ制御信号-コイル電流-プラズマ温度特性

(3) AMITP におけるプラズマ温度の過渡応答特性

熱プラズマの応答特性は一般に ms オーダーと遅い。これは、熱プラズマの熱容量 ρC_p が大きいためであり、数値解析の結果からも明らかである。この熱プラズマ温度の制御を行うため AMITP におけるコイル電流と熱プラズマ温度の過渡応答特性試験を行った。実験方法は、IGBT 制御信号にステップ波形を入力し、その際のコイル電流とプラズマ温度を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) はインバータ電源に入力した IGBT 制御信号、(b) がコイル電流の実効値、(c) がインバータ出力有効電力、(d) が Ar 励起温度の応答である。Fig. 4(b) を見ると、コイル電流の応答は時定数 ~ 1 ms 程度である。一方、Fig. 4(c) のプラズマ温度の応答から時定数 2.5 ms と算出できる。Fig. 4(c) から AMITP のプラズマ温度の応答はほぼ 1 次遅れ系で仮定しうる。これと Fig. 4(c) より得られたプラズマ温度の応答の時定数 $D = 2.5$ ms から、IGBT 制御信号-コイル電流-プラズマ温度のシステムの伝達関数は以下の式 (1) のように表せることが分かった。

$$P(s) = \frac{1}{1 + Ds} = \frac{1}{1 + 2.5 \times 10^{-3}s} \quad (1)$$

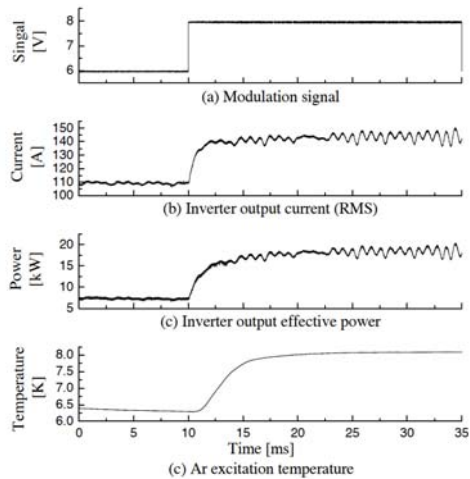


Fig. 4. AMITP システムにおける (a) 制御信号, (b) コイル電流実効値, (c) インバータ出力有効電力, (d) Ar 励起温度の時間波形

(4) プラズマ温度のステップ波形追従特性

PID フィードバック制御を行った FBC-MITP の温度の過渡応答結果を行った。本実験では、参照温度を 6000-8000 K へステップ的に変化させ検討を行った。その結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 は (a) 制御目標の参照温度, (b) インバータの IGBT 制御信号, (c) がコイル電流の実効値, (d) インバータ出力有効電力, (e) 制御結果の Ar 励起温度の時間波形である。なお、制御信号は制御信号-インバータ出力電力特性の関係で最大出力電力に対応する 10 V で制限されている。Fig. 5(b) において IGBT 制御信号の波形は、目標温度が 6000 K から 8000 K に上昇するタイミングで最大入力電圧 10 V を示している。これは、参照温度の急激な温度上昇に追従しようとしたためで PID 制御の効果が現れている。また、Fig. 5(d) のインバータ出力有効電力についてみると、参照温度の立ち上がりから 2 ms までに約 15kW の急激な電力上昇が起こっており、ms オーダーで出力電力が応答できていることが分かる。一方、Fig. 5(e) のプラズマ温度応答については、参照温度の立ち上がりに伴いプラズマ温度も追従して変化している。この時のプラズマ温度の時定数は約 1.8 ms であった。また、プラズマ温度は最終的に参照温度に収束している。

(5) プラズマ温度の周波数特性

AMITP, および FBC-MITP について、プラズマ温度の周波数特性の測定を行った。実験条件の目標温度設定は、平均温度 7000 K, 振幅温度 1000 K の Sin 波とし、周波数を 1-300 Hz で変化させた場合の振幅と参照温度との位相差を測定した。また、制御器のパラメータは 4.1 節で求めた最適値である比例ゲイン $K_P = 2.0$, 積分ゲイン $K_I = 500$,

微分ゲイン $K_D = 0.0005$ と設定した。

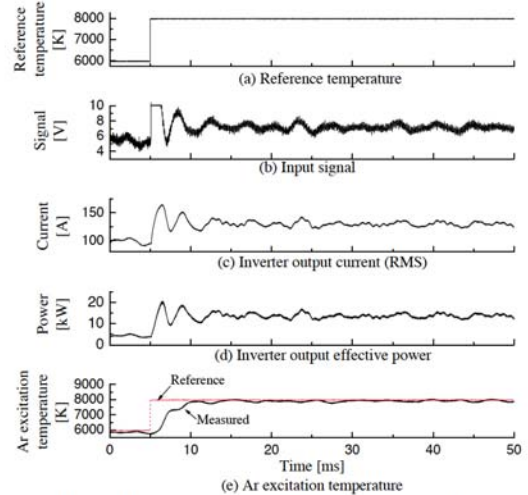


Fig. 5. FBC-MITP システムにおける (a) 参照温度, (b) 制御信号, (c) コイル電流実効値, (d) インバータ出力有効電力, (e) Ar 励起温度の時間波形

振幅特性について Fig. 6 に示す。なお、Fig. 6 は制御温度の振幅値 T_{mctrl} と参照温度の振幅値 T_{mref} の比を式(2) のように dB 表示させている。結果は、AMITP は 20 Hz 以上で振幅比が低下し始めるが、FBC-MITP では 100 Hz 程度まで振幅比の低下が抑えられている。なお、AMITP の結果について 10Hz 以下で振幅比が 0 dB を超えているのは、参照温度が高い領域でプラズマ温度が上昇しすぎることが原因である。位相特性について Fig. 7 に示す。AMITP では 40-50 Hz 程度で位相差が 90° を超えて大きくなるのに対して、FBC-MITP では同程度の位相差になるのは 100 Hz となっており AMITP と比べて高い周波数でも位相差が抑えられていることがわかった。しかし、FBC-MITP でも 200 Hz 以上になると位相差は大きくなり 300 Hz では 180° を超えていた。

$$\text{温度振幅比} = 10 \log_{10} \frac{T_{mctrl}}{T_{mref}} \quad (2)$$

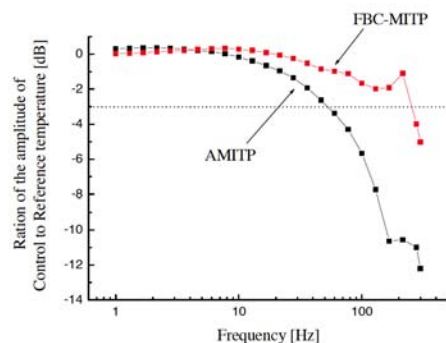


Fig. 6. AMITP および FBC-MITP のプラズマ温度の振幅特性

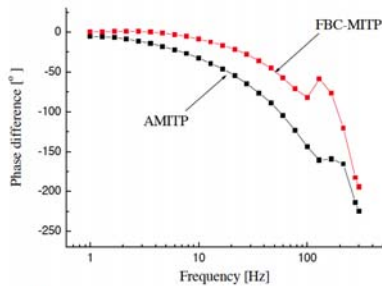


Fig. 7. AMITP および FBC-MITP のプラズマ温度の位相特性

4. 4 FBC-MITP の外乱応答

本研究で開発した FBC-MITP の外乱に対する応答特性について検討を行う。今回用いた外乱は、水冷プローブよりプラズマの高温部へ直接 N₂ ガスをパルス供給するものである。なお、N₂ ガスをパルス供給する方法は電磁バルブを用いてガス流量の制御を行った。投入した N₂ ガスの条件は、電磁バルブを開いた状態で流量が 2 slpm になるよう設定し、投入位置コイル 5-6 ターン間に投入した。また、投入時間は 200 ms (休止時間 800 ms) である。そして、この際の FBC-MITP のフィードバック制御による目標温度への復帰の様子を測定した。また、フィードバックが行われない場合との比較を行うため同様の実験を AMITP でも行った。結果を Fig. 8 に示す。図は (a) N₂ ガスをパルス供給するための電磁バルブの開閉信号、(b) コイル電流の実効値、(c) インバータ出力有効電力、(d) AMITP および FBC-MITP のプラズマ温度である。図を見ると、AMITP では N₂ ガスが投入された時点からプラズマ温度が低下しており、その後徐々にプラズマ温度が上昇していることがわかる。一方、FBC-MITP でも N₂ ガスが投入されることでプラズマ温度は低下し始める。しかし、フィードバック制御が働きインバータ電力をさらに投入することでプラズマ温度を目標値に維持している。つまり、FBC-MITP は外乱に対して優れた復帰特性を有していることが確認できた。今後、この特性を利用することで FBC-MITP は付加ガスを混入する材料プロセスなどへの応用が期待できる。

4. 5 まとめ

本研究では、熱プラズマ温度を直接制御できる FBC-MITP を実現するために、AMITP システムのコイル電流-熱プラズマ温度特性および熱プラズマ温度の過渡応答特性などの基礎特性を測定した。その結果を用いて、AMITP システムの伝達関数を推算した。さらに、実際に DSP を用いた PID 制御システムを構築し、熱プラズマ温度が波形追従するシ

ステムを開発した。さらに、開発したシステムにおける熱プラズマ温度の応答特性を検討するため、振幅、参照温度との位相差の周波数特性の測定および外乱応答特性について検討を行った。その結果、FBC-MITP は振幅特性について 100 Hz 程度まで振幅比の低下を抑えられており、位相特性については 90° 程度の位相差になるのは 100 Hz となっており AMITP と比べて高い周波数でも位相差が抑えられていることがわかった。また、FBC-MITP の外乱応答については N₂ ガスがパルス投入された場合でも、フィードバック制御が働きインバータ電力をさらに投入することでプラズマ温度を目標値に維持していた。今後、この特性を利用することで FBC-MITP は付加ガスを混入する材料プロセスなどへの応用が期待できる。

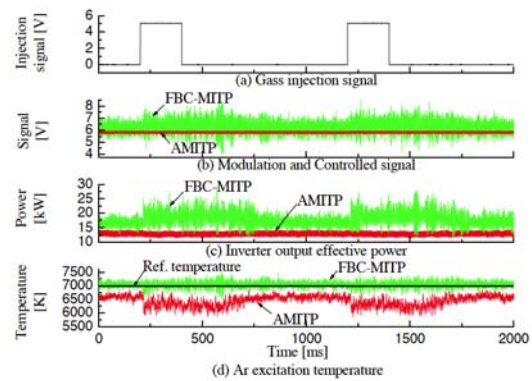


Fig. 8. FBC-MITP システムにおける外乱応答 (N₂ ガスのパルス供給)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 22 件)

- ① Y. Takeguchi, M. Kyo, Y. Uesugi, Y. Tanaka, "Carbon erosion and dust formation under heavy atomic hydrogen irradiation", Journal of Plasma Fusion Research (Rapid Communications), vol. 3, pp. 025.1-025.3, 2008. 査読有
- ② Y. Tanaka, T. Sakuyama, Y. Takeuchi, Y. Uesugi, "Spatial distribution of C2 spectra from induction thermal plasmas with polymer powder injection", IEEE Trans. Plasma Science, vol. 36, pp. 1058-1059, 2008. 査読有
- ③ S. A. Al-Mamun, Y. Tanaka, Y. Uesugi, "CO₂ and H₂ gas mixture inclusion effect on shrinkage of Ar induction thermal plasmas", Trans. IEE of Japan, vol. 128-PE, pp. 476-485, 2008. 査読有
- ④ Y. Tanaka, Y. Takeuchi, T. Sakuyama, Y. Uesugi, S. Kaneko, S. Okabe, "Numerical and experimental investigations on thermal interaction between thermal

plasma and solid polymer powders using induction thermal plasma technique”, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 41, pp. 41, pp. 025203.1-025203.15, 2008. 査読有

⑤ Y. Tanaka, K. Hayashi, T. Nakamura, Y. Uesugi, “Influence of ontime on increased number density of excited nitrogen atom in pulse modulated induction thermal plasmas”, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 41, pp. 185203.1-185203.10, 2008. 査読有

⑥ Y. Takeguchi, M. Kyo, Y. Uesugi, Y. Tanaka, S. Masuzaki, “Study of Carbon Dust Formation and their Structure using Inductively Coupled Plasmas under High Atomic Hydrogen Irradiation”, Journal of Nuclear Materials, vol. 390-391, pp. 188-191, 2009. 査読有

⑦ Y. Tsubokawa, Y. Tanaka, Y. Uesugi, “Control of induction thermal plasmas by coil current modulation in arbitrary-waveform”, J. Plasma Fusion Res. SERIES, vol. 8, pp. 1353-1357, 2009. 査読有

⑧ Y. Tanaka, T. Nagumo, H. Sakai, Y. Uesugi, Y. Sakai, K. Nakamura, “Nanoparticle synthesis using high-powered pulse-modulated induction thermal plasma”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 43, 265201, 2010. 査読有

⑨ Y. Tanaka, H. Sakai, T. Tsuke, Y. Uesugi, Y. Sakai, K. Nakamura, “Influence of coil current modulation on TiO₂ nanoparticle synthesis using pulse-modulated induction thermal plasmas”, Thin Solid Films, vol. 519, pp. 7100-7105, 2011. 査読有

[学会発表] (計 37 件)

① Y. Tsubokawa, Y. Tanaka, Y. Uesugi, “Control of induction thermal plasmas by coil current modulation in arbitrary-waveform”, Int. Congress on Plasma Phys. ICPP2008, EAP-P3-158, Fukuoka, Japan, Sep. 2008.

② T. Ito, Y. Tanaka, K. Hayashi, Y. Uesugi, “Dynamic behavior of hydrogen and nitrogen radicals in pulse modulated induction thermal plasmas”, Int. Congress on Plasma Phys. ICPP2008, FI-P2-246, Fukuoka, Japan, Sep. 2008.

③ T. Sakuyama, Y. Tanaka, Y. Uesugi, S. Kaneko, S. Okabe, “Investigation on temperature decay of thermal plasma with ablation of polymer materials”, Int. Congress on Plasma Phys. ICPP2008, FI-P2-247, Fukuoka, Japan, Sep. 2008.

④ Y. Tanaka, K. Hayashi, T. Ito, Y. Uesugi,

“Behaviors of excited N, N₂⁺ and NH in modulated induction thermal plasmas”, 35th IEEE Int. Conf. on Plasma Sci. ICOPS2008, Karlsruhe, Germany, June, 2008.

⑤ Y. Takeguchi, M. Kyo, Y. Uesugi, Y. Tanaka, S. Masuzaki, “Erosion Properties of Polycrystalline Diamond Film under Low Energy and High Flux Atomic Hydrogen Irradiation”, Plasma Surface Interaction PSI-2010, P2-53, , San Diego, USA, 2010.

⑥ Y. Uesugi, M. Kyo, Y. Takeguchi, Y. Tanaka, S. Masuzaki, “Suppression of Carbon Agglomeration and Volatile Molecular Formation in C-H-N Reactive Molecular System”, Plasma Surface Interaction PSI-2010, P2-87, San Diego, USA, 2010.

⑦ Y. Tanaka, Y. Tsubokawa, Y. Uesaka, Y. Uesugi, “New development of the feedback control type of modulated induction thermal plasma (FBC-MITP)”, Asia Pacific Conf. Plasma Sci. Technol. APCPST-10, OCC-08, 2010-039, Jeju, Korea, 2010.

⑧ Y. Tanaka, Y. Tsubokawa, Y. Uesaka*, Y. Uesugi, “Frequency dependence for temperature modulation control of the feedback control type of modulated induction thermal plasma (FBC-MITP)”, Asia Pacific Conf. Plasma Sci. Technol. APCPST-10, Jeju, Korea, 2010.

⑨ Y. Takeguchi, M. Kyo, Y. Uesugi, Y. Tanaka, S. Masuzaki, “Erosion Properties of Polycrystalline Diamond Film under Low Energy and High Flux Atomic Hydrogen Irradiation”, Plasma Surface Interaction PSI-2010, P2-53, , San Diego, USA, 2010.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ee.t.kanazawa-u.ac.jp/staffs/tanaka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上杉 喜彦 (UESUGI YOSHIHIKO)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：90213339

(2) 研究分担者

田中 康規 (TANAKA YASUNORI)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：90303263