

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420855

研究課題名(和文) プラズマ熱パルスによるタングステン表面への熱流入過程と溶融・蒸発の効果

研究課題名(英文) Pulsed plasma heat flow to tungsten material surface and its effect on melting and evaporation

研究代表者

高村 秀一 (Takamura, Shuichi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40023254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：重水素プラズマ熱パルス発生によりタングステンの溶融・蒸発並びにタングステン原子のプラズマ中への浸透過程が調べられた。関連して、ヘリウム・重水素プラズマにおいて、材料表面へのパワー伝達係数の評価を実験・解析両面から行った。この際、非熱高速電子の存在と熱電子放出効果並びに材料表面形態によるイオンのエネルギー反射係数の変化の効果を明らかにした。一方、対向壁面へのプラズマ運動量流入を実験的に明らかにし、新たに運動量反射係数の導入により、その理論定式化を行った。また、金属表面の繊維状ナノ構造形成機構として、ヘリウムを内包する金属の剛性率の観点から多様な金属におけるナノ構造形成を統一的に論じた。

研究成果の概要(英文)：Melting, evaporation and tungsten atomic invasion into deuterium plasmas have been investigated by reaching 3000 degree C at tungsten surface with plasma heat pulse. Concerning the plasma heat flow to the surface, power transmission factor was studied in the experiment as well as numerical analysis, clarifying the importance of thermo-electron emission from the tungsten surfaces and a change in ion energy reflection coefficient due to its surface morphology. On the other hand, plasma momentum input to plasma-facing material surface was observed experimentally, and the analytical formulation was given. In addition, physical mechanism for fiber-form nanostructure formation on refractory metal surfaces are discussed in terms of shear modulus of metals containing helium atoms as a function of surface temperature and a mobility of helium atoms in metals.

研究分野：磁場閉じ込め核融合におけるプラズマ 壁相互作用

キーワード：プラズマ・核融合 プラズマ対向壁 タングステン材料 プラズマ熱負荷 プラズマ運動量流入 繊維状ナノ構造 溶融・蒸発 高融点金属表面の皺構造出現

1. 研究開始当初の背景

核融合実験装置(ASDEX-U, JET 等)におけるタングステン(W)に対する熱耐性実験は始まったばかりであり、溶融等の現象が見出され始めている。一方、それ以外の試験装置としては、電子・イオンビームでプラズマ熱負荷を模擬する試みが行われているが、境界領域プラズマとは大きく異なる。直線型プラズマ発生装置では、NAGDIS-IにおいてM.Y. Ye 等が行った以外には、ごく最近MAGNUM-PSIにおいて熱パルスの発生によりITERで遭遇するプラズマ熱負荷が実現できるようになったという報告やプラズマ銃による溶融実験が開始されたばかりである。しかし熱流入素過程に深く立ち入ることは出来ていない。JETではWの積極的溶融実験が開始されようとしている。一方、最近AIT-PIDにおいては、熱流入過程について特にWのヘリウム損傷の一つである繊維状ナノ構造形成時のプラズマ熱流に伴うパワーバランスが議論されてきている。

以上のように非プラズマ熱負荷によってクラックや溶融がどのように始まるかという、側面に関心が向けられ、プラズマ熱流入がどのように行われ、fuzz層を持つなど壁表面条件によってどのように影響されるかという多様な素過程を十分認識し、またPWIにおけるシナジー効果など非線形的あるいは履歴的視点をおろそかにしてはいないか。その結果、研究が現象論的、経験的になっているくらいがぬぐえない。しかし、プラズマ熱流入とW表面の応答さらには蒸発蒸気の反作用(例えばVapor Shielding)などの解明には、内包される多様な素過程を学術的に分析・解析し、さらにはその素過程どうしの影響の及ぼし合いなどをしっかりと関連付けなければならない。その観点からこれまでの本課題に関する世界の研究は極めて不十分と言わざるを得ない。

2. 研究の目的

ELMに代表される過渡熱負荷に対するプラズマ対向壁の耐熱特性は、磁場閉じ込め核融合における愁眉の課題である。これまでは電子ビームやレーザー等を用いて非プラズマ熱負荷を与え、クラック・溶融という形状的観点で材料側から試験が行われてきている。しかしプラズマ側から見ると、熱流入過程は多様な要因・素過程で規定されている。本研究ではプラズマ熱負荷に力点を置き、W材料表面からの電子放出に注目し、ヘリウム損傷やW製造法の相違の影響を勘案しつつ、静的には熱伝達係数のシース電圧依存性の理論構築と実験遂行を、また動的には重水素プラズマのパルス熱負荷応答をシース電圧の時間変化に注意を払いつつ溶融に近い3000以上の昇温に至る素過程を、更には高速カメラで得られた蒸発の時空パターンからPWIに及ぼす反作用を学術的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 研究基盤となるプラズマ発生装置においては定常重水素プラズマの高熱流化を、真空容器壁の除熱能力を3倍に向上し、放電陰極(LaB₆)の電流導入部の熱発生の抑制により、放電投入電力を現在の3倍以上の8kWを目指す。並行して重水素プラズマ中におけるタングステン(W)材料へのパワー伝達係数のシース電圧依存性を実験と理論で明らかにする。

(2) 一方、100kW、最長50msのパルス電源を最大限に活かすべくパルス印加回路を工夫する。

(3) 多様な表面形態(PM-WやTFGRのvirgin、繊維状ナノ構造、再結晶表面)を有するWへプラズマ熱パルスを加え、新規導入する高速応答放射温度計で得られる表面温度、ターゲット浮遊電位の時間変化そしてプラズマパラメータ計測から、パワー伝達係数のシース電圧依存性を勘案して、高温タングステン表面への熱流入過程を解明する。高速カメラを用いたW原子発光の高速動画像より蒸気発生ダイナミクスと表面温度の相関から、蒸発のPWIへの反作用を探る。

4. 研究成果

(1) 高温電子を含むプラズマにおけるパワー伝達係数(PTF)評価

高温電子を含むプラズマのPTFに関して、系統的に調べ、その成果を国際会議とジャーナルに発表した。PTFにおいては、シース電圧が極めて重要であり、壁からの電子放出特性が決定的である。シース電圧が低くなるとプラズマ電子にとって電位障壁が低くなるので大量の電子熱流入をもたらす。ここで磁力線が壁表面へ斜め入射することによる電子放出抑制効果[1]はあまり期待できない。ヘリウムプラズマの場合のPTFに関しては、第14回周辺プラズマ理論国際ワークショップ(2013年9月)において、既に得られている実験を説明する理論構築を行い、Contribution to Plasma Physics論文として公表された。また、重水素プラズマに対するPTFに関しては第21回PSI国際会議(2014年5月)で発表され、Journal of Nuclear Materials論文として公表された。材料表面形態によるイオンのエネルギー反射係数の変化の効果と電子放出に伴う冷却効果[発表論文8]が重水素プラズマでも追認された。

(2) プラズマ熱流入過程

典型的なプラズマ熱パルスに伴うWターゲットの応答を図1[発表論文6]に示す。これは小型高熱流プラズマ発生装置AIT-PID[2]において重水素プラズマ環境下で行われた。2nd Scheme(負パルスを加える陰極は放電陰極の場合[発表論文6])でプラズマ熱

パルスが作られた。W ターゲットの厚みは 15 μm であり、比較的小電力で高温ターゲット実験を可能にしている。最も重要なパラメータはターゲットの浮遊電位である。定常重水素プラズマ中ではプラズマ電位+5 ~ +6 V に対して、それは-20 V 程度である。従ってシース電圧は 20 V 前後である。しかし、熱パルスによる温度上昇により、熱電子放出が増し、シース電圧が著しく下がり、PTF は正帰還的に大きくなりターゲットは高温化し、この際用いた放射温度計の上限 3000 K に到達している。この温度での W 原子の蒸発粒子束は $\sim 10^{21} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。この場合には時間的に PTF が著しく増大していく例である。

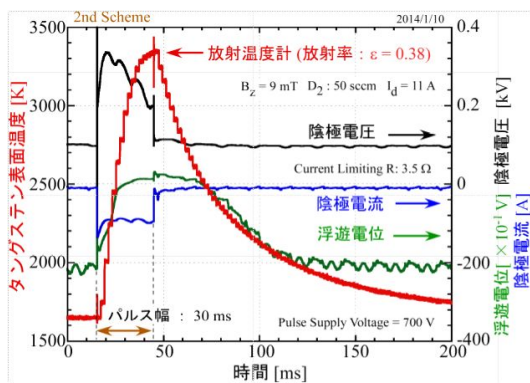


図 1 放電陰極に負パルス電圧を印加して熱パルス生成した (2nd Scheme) 場合の W ターゲットの代表的な時間応答。放射温度計の測定上限 (3000 K) に到達している。W の浮遊電位は接地電位を超えて正に及んでいる。

PTF にも影響を与える、壁材料表面の微視的形態とダイナミックな熱流入との関わり合いについても研究された。壁材料が W の場合には、核融合反応生成物であるヘリウムの照射により、表面に繊維状ナノ構造 (fuzz と呼ばれる) が形成されることは良く知られている[3]。W バルクと fuzz 層の二重構造に対して過渡的なプラズマ熱パルスが襲来すると、熱流入のレベルと時間スケールに依って、この二重構造は異なる挙動を示す。そもそも熱パルスに対する固体表面の応答は熱拡散方程式で記述される[4]。熱拡散係数を D_t 、経過時間を t 、温度の空間変化の特性長を L_{th} とすると $L_{th} = 2\sqrt{D_t t}$ で記述される。正味の熱パルス継続時間 t が短ければ、ごく表面層のみ昇温することになる。

図 2 は First Scheme (パルス印加陰極が放電陰極と反対側にある[発表論文 6])において、fuzz が生成して黒色化した W に、異なるパワー密度の熱パルスを加えた場合の、(a) 時間応答と、(b) 1 2 ショットの比較的大きなパワー密度の熱パルスを重ねた W 表面の SEM 画像を示す。(a) の上の時間トレースの場合は表面温度上昇が小さく、熱パルスに伴うパルス印加陰極からの電子ビームによって、発生した 2 次電子が fuzz 組織に

よって捕捉され、プラズマ側に出て行けない[5]ことによる、-100 V に及ぶ浮遊電位の低下が観測され、一方その下のパワーの大きい場合は、十分に表面温度が上昇して、浮遊電位はパルス立下り時に接地電位に到達し、短い時間にのみ大きな熱流入が行われ、W 二重構造の内、fuzz 層のみが高温となり、溶融したと考えられる。SEM 像(b)(2)と(3)では W 繊維が平たく広がってへばりついた形になっているが、これが溶融の特徴的な形態であり、次に示す図 3(b)とは異なる。Fuzz 層に短パルスの強力なレーザー光照射においても同様の現象が観測される[6]。

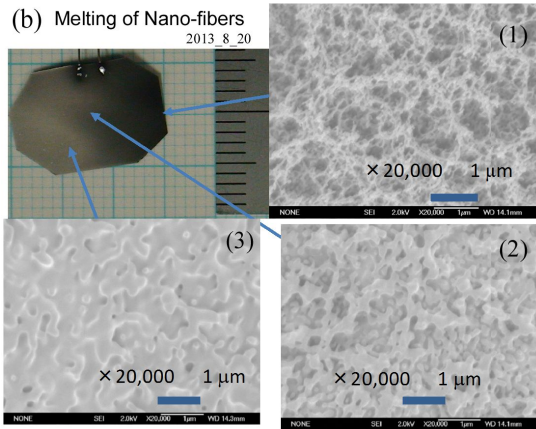
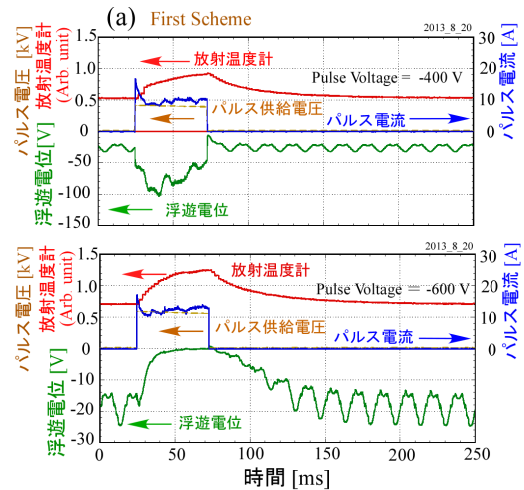


図 2 パルス印加陰極が放電陰極に対して軸方向反対側にある場合 (1st Scheme) 繊維状ナノ構造を有する W 表面の電氣的・熱的時間応答。(a) 浮遊電位が-100 V に達する場合と接地電位に近づく場合。前者はパルス電圧が小さく、熱流が相対的に弱い。後者は大きな熱流が流入する場合。(b) 12 ショットのプラズマ熱パルス照射後の表面状態の変化を元の黒色化した面と SEM 上で比較。

図 3 の場合、浮遊電位は-2 V 程度を 20 ms 程度維持しており、「アニーリング」と名付けられる熱の流入の仕方に近い。図 3(b)(1)と(2)は異なる表面位置の SEM 写真であるが、いずれも W 繊維が平たくなっているのではなく、繊維が短く太く、言わば縮減しているのに気付くであろう。これは溶融まで至らないが、高温で保持された時の W 繊維の

典型的な形態であり、アニーリングに相当すると考えられる[7]。

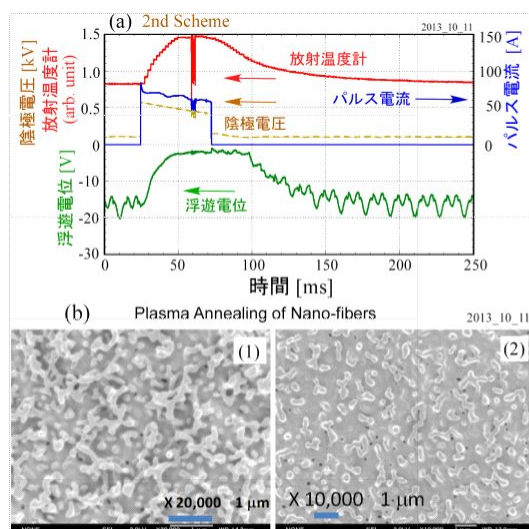


図3 2nd Scheme において、繊維状ナノ構造を有する W 表面の電的・熱的時間応答。(a) 浮遊電位、パルス電流、陰極電圧そして放射温度計のアナログ出力の時間変化。浮遊電位が接地電位に到達していないことに注意。(b) 17ショット照射後 FE-SEM で観測された W 表面。異なる表面位置の 2 例。(1) と(2) はナノファイバーの長さが縮まり、太くなっていることがわかり、図3の溶融の場合と異なる。高温によるアニーリングに特徴的。

W 材の二重構造についてはこれまでも触れてきたが、「溶融」の場合は L_{th} の表式の絡みで、熱拡散係数の小さい fuzz 層[8]と W バルクの熱的二重層が形成された場合であり、「アニーリング」の場合は、両者が熱平衡状態に近い場合に相当すると考えられる。

(3) 壁へのプラズマ運動量流入の効果

比較的低温のプラズマ運動量は、プラズマ推進(イオンロケット)において認識されてきた。核融合炉芯プラズマは大気圧あるいはそれ以上のプラズマ圧力を持つが、境界領域プラズマにおいては、固体壁を対象とする限り、プラズマのもたらす力は無視して構わないであろう。しかし壁が溶融・蒸発する状況では壁表面は液状化し、状況は一変する。

さて、AIT-PID におけるプラズマ熱パルス実験では壁として、極めて軽量の $15 \mu\text{m}$ 厚 W 箔を用いた。この選択はプラズマからの運動量流入に極めて敏感な配置となった。太いプラズマ流を生み出す 2nd Scheme 配置での実験例では、右側からパルス・プラズマ流が W 箔に流入すると、中心部に 2 本の細い W 線でぶら下げられた箔は熱パルス・プラズマにより左に押され、パルス立下り後は固有振動で揺れる。この配置は片持ち梁(cantilever)[9]に類似であるので、プラズマ熱パルスによりターゲット箔が押されている時の傾きから、材料工学の知見を用いて、加わる力を評価することができる[発表論文

1, 6]。この際、梁の幾何学的配置と材料のヤング率が必要である。また、同じ配置でダイヤル・テンションゲージを用いて、同じひずみをもたらす応力を実測することができる。振動周期もターゲットの物性値や寸法を用いて、梁に関する機械振動工学の知見から求めることができる。

一方、理論的にはイオンが流入し反射するときの運動量と蒸発原子束の反作用が運動量流入の主要因であるとして、評価できる[発表論文 1]。PTF を議論する時に、粒子反射係数とエネルギー反射係数が用いられたが、ベクトル量である運動量に対しては運動量反射係数が新たに定義されなければならない。

AIT-PID で観測される運動量流入密度は数十 Pa 程度であるが、Giant ELM 等では数十 kPa 以上に達する可能性がある。液体面ではドロプレットの飛散や流体力学的挙動への影響など、未知の分野である。

(4) プラズマ中への蒸発原子の浸透

Hassanein に依ると熱パルスの襲来により壁表面から飛び出したドロプレット、微粒子、クラスター、蒸発原子などが後に続く壁表面へのプラズマ熱流入を減らすと提案している[10]。しかし、プラズマ熱流入が「本来の」値から減ずるのみで、VS (Vapor Shielding) の効果があると考えるのは早計であり、そこでどのような素過程が生じているかを見極めることが VS を議論するうえで重要である。

First Scheme において熱パルスを受けた時に、W ターゲット箔を含む空間からの W 原子線発光 (498.26 nm) を干渉フィルターを通して、高速カメラ (1000 fps , shuttering: 1 ms) を用いてパルス立下り時点で発光パターンを撮像した。入力パワー $P_{in} = 3.3 \text{ kW}$ では、熱入力が比較的小さい場合で、ターゲット表面に隣接した W 原子発光層が見られる。一方、 $P_{in} = 11 \text{ kW}$ と大きな熱入力の場合には、パルス最終時点で浮遊電位が接地電位に到達し、W 温度も 3500 K 程度に達していると考えられる。この温度に対応する蒸発 W 原子束密度は $10^{21} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度となる。この場合の W 原子発光領域はプラズマ上流側に広がっているのが認められる。写真像を数値化したものが図4に相当する。ターゲット面に垂直方向における原子発光線強度を距離の関数として示している。で示した地点は層状発光の位置に相当し、強度変化に肩が現れる。 $P_{in} = 11 \text{ kW}$ の場合は強度が空間的にゆっくり減少し、広がっているのがわかる。

熱パルス印加時のプラズマ密度を $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、飛び出す W 原子のエネルギーを 0.3 eV とすると、電離の平均自由行程は $T_e = 3 \sim 5 \text{ eV}$ にて数 mm となる。実験よりこれが 20 mm に及ぶとすると、プラズマ電子の温度は $1 \sim 2 \text{ eV}$ 程度と著しく低下していると考えざるを得ない。多量の W 原子束により、襲来したプラズマは W 原子の励起や電離にその工

エネルギーを費やして、冷却したと考えるのが妥当であろう。直接電子温度は測定されていないが、これに伴いターゲットに流入する熱流も減少し、VS の一形態になっている可能性がある。

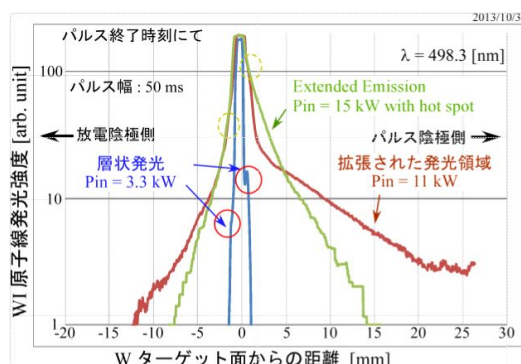


図 4 三種類のパルス入力に対する WI 発光の空間分布。図 7 に対応。15 kW の場合については W 表面に輝点が発生して、分布が著しく不均一になっていると思われる。は層状発光位置に相当する。

(5) タングステンのヘリウム照射効果の一つである、繊維状ナノ構造形成の物理機構の解明

繊維状ナノ構造形成過程の先駆体としてループ構造があることを提唱、さらにヘリウム原子を内蔵する金属の剛性率と金属内のヘリウムの移動性の二つの観点から種々の高融点金属におけるナノ構造形成を統一的に論じた。国際誌 Applied Surface Science の論文として公表された[発表論文 4]。

(6) 高融点金属への希ガスプラズマの効果

ダイバータ表面には熱負荷のみではなく、新たな損傷前駆過程があることを明らかにした。それは希ガスプラズマによる高融点金属表面における皺構造の出現である。発生原因として現在座屈モデルと比較している。議論を深めるべく、10月中旬に開催の IAEA-FEC2016 の post-deadline 論文として国内推薦を受け提出された。

(7) 高融点金属以外へのヘリウムプラズマ照射効果

タングステン等の高融点金属以外への照射材料として、単結晶シリコンを選び、黒色化シリコンを得た。太陽電池への応用を鑑みて、応用物理学会欧文誌として公表された。

参考文献

[1] S. Mizoshita, K. Shiraishi, N. Ohno and S. Takamura, J. Nucl. Mater. **220-222**, 488 (1995).
 [2] S. Takamura, IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng. **7**, S19 (2012).
 [3] 高村秀一、梶田信、大野哲靖、日本物理学会誌 **68**, 602 (2013).
 [4] 高村秀一、「境界領域プラズマ理工学の基

礎」10.4 節、森北出版(株) (2010).

[5] S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno, Nucl. Fusion **52**, 123001 (2012).

[6] S. Kajita, S. Takamura et al., Nucl. Fusion **47**, 1358 (2007).

[7] T. Miyamoto, S. Takamura and H. Kurishita, Plasma Sci. Technol. **15**, 161 (2013).

[8] S. Kajita, T. Yagi, K. Kobayashi, M. Tokitani and N. Ohno, Results in Phys. **6**, 877 (2016).

[9] 宇津木諭、「絵ときでわかる材料力学」第 4 章、オーム社 (2015).

[10] A. Hassanein, Fusion Eng. Des. **60**, 527 (2002)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 16 件)

(1) S. Takamura, Y. Uesugi and T. Kuwabara, "Effect of PSI on Momentum Input to Plasma-Facing Material Surfaces", Contributions to Plasma Physics, Vol. 56, 2016, pp.681-688. DOI: 10.1002/ctpp.201610061

(2) 高村 秀一、上杉 喜彦、矢嶋 美幸、小林 孝裕、前中 志郎、藤田 和宜、「ネオンプラズマ照射を受けたタングステン表面に形成された微細皺構造の観察」、愛知工業大学研究報告、Vol.51, pp.38-44, 2016, <http://repository.aitech.ac.jp/dspace/handle/11133/3089>

(3) S. Takamura, "Radiative cooling properties of He-defected tungsten with fiber-form nanostructure", Journal of Nuclear Materials, Vol.466, pp.239-242, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.08.008>

(4) S. Takamura and Y. Uesugi, "Experimental identification for physical mechanism of fiber-form nanostructure growth on metal surfaces with helium plasma irradiation", Applied Surface Science, Vol.356, pp.888-897, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.spsusc.2015.08.112>

(5) S. Takamura, "Power transmission factor through the sheath in deuterium plasmas for virgin as well as nanostructured tungsten", Journal of Nuclear Materials Vol.463, pp.325-328, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.09.060>

(6) S. Takamura and Y. Uesugi, “Coupled interactions between tungsten surfaces and transient high-heat-flux deuterium plasmas”, Nuclear Fusion, Vol.55, pp.033003(11 pages), 2015, DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/033003

(7) S. Takamura, “Temperature Range for Fiber-Form Nanostructure Growth on Molybdenum Surfaces due to Helium Plasma Irradiation”, Plasma and Fusion Research, Vol.9, pp.1405131(4pages), 2014, DOI: 10.1585/pfr9.1405131

(8) S. Takamura, S. Ono and N. Ohno, “Modified Power Transmission Factor of Tungsten in Plasmas with Hot Electron Component”, Contributions to Plasma Physics, Vol.54, pp.474-478, 2014, DOI: 10.1002/ctpp.201410016

〔学会発表〕(計 26 件)

(1) S. Takamura, Y. Uesugi, M. Yajima, A.M. Ito, T. Kobayashi, S. Maenaka, K. Yamada, K. Fujita, “Microwrinkle Structure on Refractory Metal Surfaces irradiated by Noble Gas Plasmas”, IAEA-FEC 2016, PDP-7, 2016 年 10 月 17 日 ~ 10 月 22 日、Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan

(2) 高村 秀一、菊池 祐介、永田 正義、上杉 喜彦、山田 耕平、小林 孝裕、前中 志郎、藤田 和宜、栗下 裕明、
「ナノ構造表面を持つタングステンの高温での熱放射特性の向上」、平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、5-F-p1-1、2016 年 9 月 05 日 ~ 9 月 06 日、九州工業大学戸畑キャンパス、北九州市、福岡県

(3) 高村 秀一、上杉 喜彦、伊藤 篤史、矢嶋 美幸、山田 耕平、小林 孝裕、前中 志郎、藤田 和宜、
「希ガスプラズマによって照射された高融点金属表面に形成された微細皺構造」、第 11 回核融合エネルギー連合講演会 15p060、2016 年 7 月 14 日 ~ 7 月 15 日、九州大学伊都キャンパス、福岡市

(4) G. Kawamura, N. Ohno, S. Takamura and Y. Tomita, “A particle-in-cell approach to particle flux shaping with a surface mask”, The 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, P.3.3, 2016 年 5 月 30 日 ~ 6 月 3 日、Pontifical Universita Urbanians, Roma, Italy

(5) 高村 秀一、上杉 喜彦、
「ネオンプラズ

マ照射されたタングステン表面に形成された微細皺構造」、日本物理学会第 71 回年次大会、19aAR6、2016 年 3 月 19 日 ~ 3 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス、仙台市

(6) 高村 秀一、上杉 喜彦、
「ネオンプラズマ照射されたタングステン表面に形成された微細皺構造」、プラズマ・核融合学会」第 52 回年会 25pB03、2015 年 11 月 24 日 ~ 11 月 27 日、名古屋大学東山キャンパストヨタ講堂、名古屋市

(7) S. Takamura, Y. Uesugi and T. Kuwabara, “Effect of PSI on momentum input to plasma-facing material surfaces”, 15th International Workshop on Plasma Edge theory in Fusion Devices 2015, 2015 年 9 月 9 日 ~ 9 月 11 日、Nara Kasugano International Forum IRAKA, Nara, Japan

(8) 高村 秀一、
チュートリアル招待講演「境界領域プラズマ理工学の基礎」、核融合科学研究所共同研究「プラズマ科学のフロンティア」研究会、2015 年 7 月 29 日 ~ 7 月 30 日、核融合科学研究所、土岐市

(9) 高村 秀一、上杉 喜彦、
「高融点金属表面に成長する繊維状ナノ構造形成初期段階に関する実験的考察」、2014 年 11 月 18 日 ~ 10 月 18 日、朱鷺メッセ、新潟市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高村 秀一 (TAKAMURA, Shuichi)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号：40023254

(2) 研究分担者

上杉 喜彦 (UESUGI, Yoshihiko)
金沢大学・電子情報学系・教授
研究者番号：90213339

(3) 連携研究者

大野 哲靖 (OHNO, Noriyasu)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：60203890

梶田 信 (KAJITA, Shin)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・
准教授
研究者番号：00455297