

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760809

研究課題名(和文)ダブルプラズマガンを用いたプラズマ対向壁の蒸気遮蔽効果の解明

研究課題名(英文) Experimental investigation of vapor shielding effects on plasma-facing materials using the double plasma gun device

研究代表者

菊池 祐介 (KIKUCHI, Yusuke)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00433326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉のプラズマ対向材におけるパルス熱負荷模擬のために磁化プラズマガン装置の高性能化を行い、先進核融合壁材料のパルス熱負荷に対する健全性の評価を実施した。定常プラズマ照射タンゲステン(W)へのedge localized mode (ELM)様パルスプラズマ照射実験を国内外で初めて実施し、特にヘリウム照射によりW表面に綿毛状のナノ構造(W-Fuzz)が形成されている場合にはパルスプラズマ照射による表面亀裂発生に対して耐性を有することを明らかにした。一方、本研究により新たに2台のプラズマガン装置を結合したダブルプラズマガン装置を開発し、蒸気遮蔽効果を定量的に明らかにする実験を開始した。

研究成果の概要(英文)：We have studied simulation experiments of ELM-like pulsed plasma loads using a magnetized coaxial plasma gun (MCPG) at Univ. of Hyogo. The performance of the MCPG device has been improved to simulate transient heat and particle loads such as edge localized modes (ELMs). Surface modifications of tungsten (W) materials for plasma-facing components in fusion reactors due to repetitive pulsed plasma irradiation have been investigated. In particular, effects of pre-plasma exposure on W cracking due to ELM-like pulsed plasma bombardment have been evaluated for the first time. It has been found that He-induced W Fuzz exhibited a better resistance to surface cracking. On the other hand, a unique experiment using two MCPG devices of so-called double plasma gun to understand vapor shielding effects on the material erosion has been constructed. The first experiment to clarify vapor shielding effects quantitatively has been started.

研究分野：プラズマ理工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：磁化プラズマガン ELM プラズマ対向壁 蒸気遮蔽効果 パルス熱負荷

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現のためには高性能炉心プラズマの維持と同時にダイバータ板における熱・粒子流の制御ならびにプラズマ対向壁材料の損耗・損傷の低減が重要な課題とされている。特に間欠的なプラズマ流出を伴う Edge Localized Mode (ELM) 不安定性やディスラプション (プラズマ消滅) によるパルス的な熱・粒子負荷によるプラズマ対向材の熔融・損傷が懸念されている。

これまでに電子ビーム、レーザを用いたパルス熱負荷模擬実験が国内外で実施されているが、熱負荷のみを模擬するものであり、プラズマ粒子としての負荷を与えることができない。また、欧州研究グループではロシアのプラズマガンを用いたパルス熱・粒子照射実験を行っており、これらのデータを基に国際熱核融合炉 (ITER) の ELM 許容レベルが議論されている。一方、国内ではプラズマガン照射装置がこれまで存在しなかったため、当該分野の研究進展に対して大きな障害になっていた。

パルス熱・粒子負荷下での材料熔融・損傷過程において“蒸気遮蔽効果 (Vapor Shielding Effect)” が重要な役割を果たすと考えられている。ロシアのプラズマガンにおける材料熔融・損傷特性と電子ビームによる結果を比較することで、蒸気遮蔽効果が議論されているが、ロシアのプラズマガンによる照射は 10 分程度の間隔を空けた単発運転 (シングルプラズマガン) のため、繰り返し襲来する ELM によるパルス熱・粒子負荷時の蒸気遮蔽効果を検証することは困難であり、連続照射が可能なパルスプラズマ照射実験が必要と考えられている。

2. 研究の目的

(1) 磁化プラズマガン装置の高性能化

兵庫県立大学が有する磁化プラズマガン技術を用いて、ELM 様パルスプラズマを生成・照射する装置を開発する。

(2) 材料照射実験

先進核融合炉壁材料として考えられている W 合金、VPS-W 被覆低放射化ステンレス鋼、微結晶粒 W の ELM 様パルスプラズマ照射時の表面損傷特性を調査する。また、ITER ダイバータで使用予定のモノブロック W 試料ならびに定常予照射 W 試料に対しても照射実験を実施する。

(3) ダブルプラズマガン装置の開発

2 台の磁化プラズマガンを材料照射ターゲットチャンバーに接続したダブルプラズマガン装置を新たに開発する。この装置により、2 つの ELM 様パルスプラズマを連続生成する。

(4) 蒸気遮蔽効果の解明

ダブルプラズマガンを用いて材料熔融、蒸気を発生させ、その熱緩和特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 磁化プラズマガン装置の高性能化

磁化プラズマガンの放電用電源に高密度コンデンサを適用し、生成されるプラズマエネルギーを増大させる。また、テーパー付きドリフト管を採用することで、プラズマ密度の増加を行う。材料照射実験に適用可能な計測ポート付きのターゲットチャンバーを製作する。生成されたパルスプラズマの特性評価として、イオンドップラー分光器 (IDS) によるイオン温度、イオンフロー速度、He-Ne レーザ干渉計による線平均電子密度を計測し、プラズマエネルギーを評価する。

(2) 材料照射実験

W 合金、VPS-W 被覆低放射化ステンレス鋼、微結晶粒 W に ELM 様パルスプラズマを繰り返し照射し、表面損傷特性を電子顕微鏡 (SEM) 観察により調査する。ELM 様パルスプラズマを照射し表面損傷させたモノブロック W 試料を日本原子力研究開発機構の電子ビーム JEBIS 装置に持ち込み、熱除去性能を評価する実験を実施する (大阪大学との共同研究)。米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) の直線型プラズマ装置 PISCES-A にて定常プラズマを予照射した W 試料に ELM 様パルスプラズマを照射する。

(3) ダブルプラズマガン装置の開発

(1) で開発したプラズマガンをもう 1 台製作し、材料照射ターゲットチャンバーに接続する。充放電制御システムにより各電源系統を制御し、時間差で 2 つのパルスプラズマを連続生成する。

(4) 蒸気遮蔽効果の解明

ダブルプラズマガンの 1 台目のプラズマガンにてアルミニウム箔試料にパルスプラズマを照射し、蒸気層を形成する。そこに 2 台目のプラズマガンにてパルスプラズマを入射し、熱緩和効果をカロリメータによる熱流計測から評価する。

4. 研究成果

(1) 磁化プラズマガン装置の高性能化

高密度コンデンサ (2.9 mF, 10 kV, 144 kJ) を放電用電源に適用し、従来に比べて最大コンデンサエネルギーを 25 kJ から 144 kJ まで増大させた。また、テーパー付きドリフト管を採用し、ターゲットチャンバーに接続した。

材料照射の際にターゲット材直前のプラズマパラメータが重要となるため、試料が設置されるチャンバー中央にて各種計測を行った。図 1 に線平均電子密度のバイアス磁束依存性を示す。ここで、放電ガス種は He で、ガン電圧は 6 kV とした。また、バイアス磁束を印加することでプラズマを磁化させているが、バイアス磁束が過大であると、プラズマが下流部に噴出しなため、バイアス磁束によるプラズマの制御が重要となる。図 1 より、バイアス磁束に対して線平均電子密度はピークをとった。次に、He II (468.6 nm) 発光線のドップラー拡がり とドップラーシ

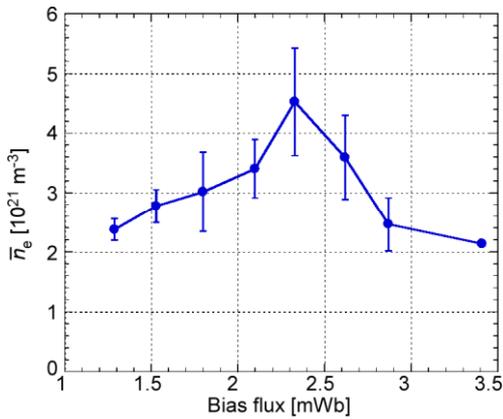


図1 線平均電子密度のバイアス磁束特性

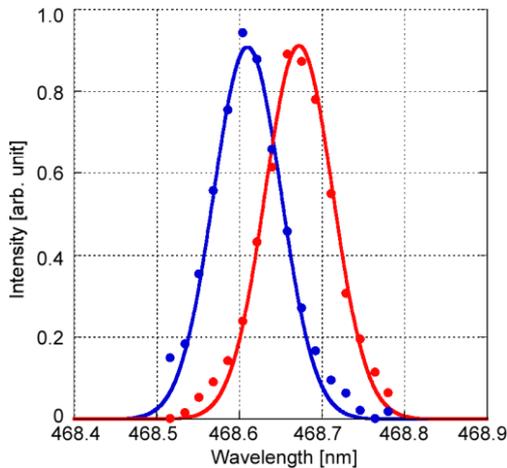


図2 HeII 発光線 (青:ゼロ速度, 赤: Doppler シフトした場合)

フトからイオン温度とイオンフローを測定した。IDSは光ファイバを使用した集光系、回折格子分光器(焦点距離:1 m)及び16チャンネルマルチアノード光電子増倍管(MAPMT)を使用した検出系によって構成される。まず、プラズマの進行方向に対して90°の方向から発光スペクトルを測定することでプラズマの進行方向への速度がゼロの時の波長を評価した。次に、プラズマの進行方向に対して135°の方向から測定を行い、ドップラーシフト及びドップラー拡がり进行评估した。図2に放電電圧6 kVの時のHe IIの典型的な発光スペクトルを示す。測定された16chのPMT出力に対して、ガウス分布にてフィッティングを行い、得られたガウス分布の中心波長のシフト及びドップラー拡がりからイオンフロー速度及び温度を評価した。一方、電子密度が $\sim 4.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ と高密度であることから、シュタルク効果によるスペクトルの拡がりの影響を評価したところ、本実験条件ではシュタルク拡がりにはイオン温度計測に大きな影響を与えないことが明らかとなった。図3にイオン温度とイオンフロー速度のバイアス磁束依存性を示す。イオンフロー速度はバイアス磁束の増加とともに低下していることから、プラズマが噴出しにくくなったためと考えら

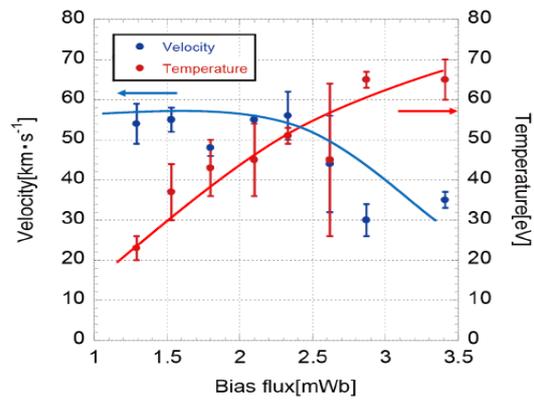


図3 イオン温度(赤)とイオンフロー速度(青)のバイアス磁束特性

れる。一方、バイアス磁束の増加とともにイオン温度は増加しており、バイアス磁束の増加による磁場揺動増大に起因するイオン加熱やイオンフロー速度低下に伴うプラズマ熱エネルギーの増大等がメカニズムとして考えられる。

測定されたプラズマパラメータから運動エネルギーおよび熱エネルギーを計算し、プラズマエネルギーを評価した。プラズマエネルギーの最大値は3 kJ程度であり、電源エネルギーの6%程度となった。次にカロリメータを用いて、材料に吸収されるエネルギー密度を評価した。ここで、カロリメータのチップ材料にはグラファイトとWを用いた。この結果から、グラファイトの場合で $\sim 0.5 \text{ MJ/m}^2$ 、Wの場合で $\sim 0.3 \text{ MJ/m}^2$ のエネルギー密度が得られた。

(2) 材料照射実験

UCSDのPISCES-A装置にて定常Heプラズマ予照射することで、W試料表面にナノ構造(W-Fuzz)を形成し、その試料にパルスプラズマを照射することでW-Fuzzの応答を明らかにした。比較対象として、定常プラズマ未照射のW試料にもパルスプラズマ照射した。定常プラズマ未照射Wでは、パルスプラズマを繰り返し照射すると、表面亀裂が粒界に沿って発生・成長するが、W-Fuzz試料では表面亀裂の発生は確認されなかった。これは、W-Fuzzのナノファイバー構造により応力発生が抑制されたと考えられる。また、W-Fuzz層の熱伝導率が低いため、熱はWバルク層までは伝わらないと考えられる。一方、パルスプラズマのエネルギーを増大させていくと、W-Fuzzが熔融していき、表面は黒色から灰色に変化した(図4)。

次にパルスプラズマをモノブロックW試料に照射した結果を図5に示す。W表面の熔融と亀裂発生が確認された。この時のエネルギー密度は $\sim 1 \text{ MJ/m}^2$ である。材料表面損傷を有するモノブロックWに電子ビームを用いて定常熱負荷照射した。その結果、表面亀裂が伝搬し、モノブロックを横断する結果が得られた。

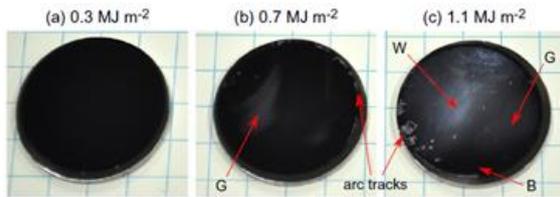


図4 パルスプラズマ照射後の W-Fuzz 試料

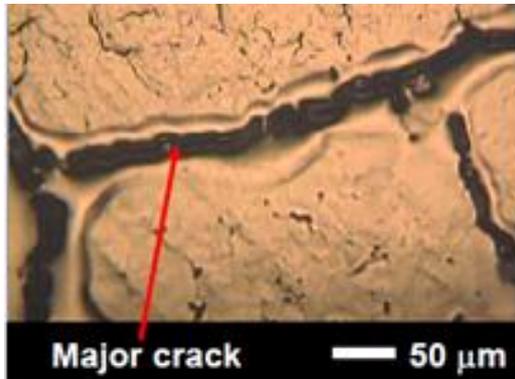


図5 パルスプラズマ照射後のモノブロック W 試料

VPS-W 層が溶融した (図6)。これは、VPS-W 層の熱伝導率がバルク W の 30%程度しかないため、表面温度が融点以上に達していると考えられる。次に、W の脆性を改善するために結晶粒界に TiC および TaC 粒子を分散させた W-1.1% TiC および W-3.3% TaC 試料にパルスプラズマを照射した。まず、純 W に同等のパルスプラズマを照射したときにクラックが観察されたのに対して、W-1.1% TiC 試料では周辺部にわずかにクラックが確認されるものの、クラック進展が抑制されることが確認された。一方、試料表面に 1 μm 程度の小さな窪みが確認された。また、W-3.3% TaC においても同様の結果が得られた。パルスプラズマ照射により TiC の結合が切れ、融点の低い Ti が溶融・放出されることで、小さな窪みが形成され、結果的に表面亀裂が進展したと考えられる。

(3) ダブルプラズマガン装置の開発

図7に典型的なダブルプラズマガン装置の放電波形 (He II 発光強度) を示す。充放電制御システムを活用し、6 系統 (ガン放電、ガス供給、バイアス磁束をそれぞれ 1 つずつ) を制御し、2 つのパルスプラズマの時間差 Δt を調整した。また、2 つのパルスプラズマを同時に生成することで、ターゲットチャンバー内にて高速プラズマ合体させる実験も実施した。その結果、He II 発光が急激に上昇し、イオン温度も 20 eV から 100 eV 程度まで上昇した。今後、プラズマ合体前後のプラズマパラメータ計測を行い、エネルギー分配を明らかにする必要があるが、高エネルギー密度プラズマ生成技術としても興味深い結果が得られた。

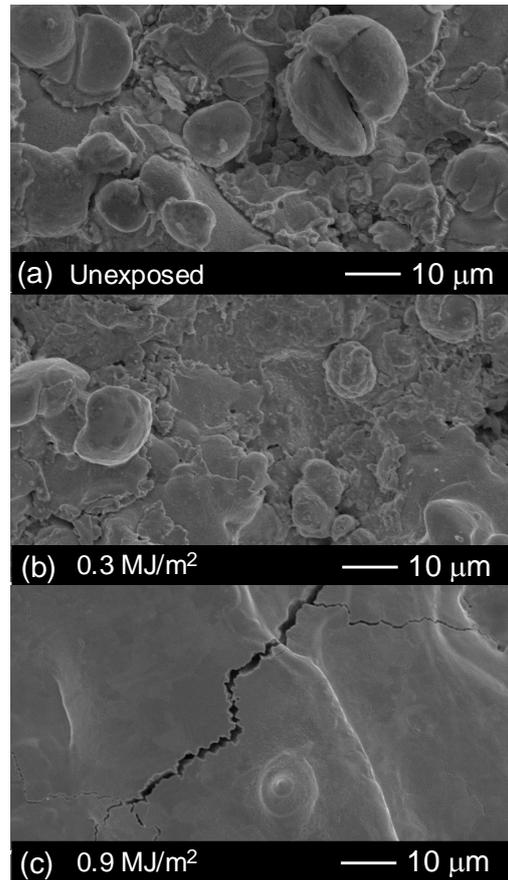


図6 VPS-W 被覆 F82H の表面写真 ((a)未照射, (b)0.3 MJ/m², (c)0.9 MJ/m²)

(4) 蒸気遮蔽効果の解明

パルスプラズマから W に吸収されるエネルギー密度が 0.3 MJ/m² 程度であるため、W 材料を溶融・蒸気化させることは困難であり、初期実験ではアルミニウム (Al) 箔試料 (厚さ: 11 μm) を用いた。Al 試料にパルスプラズマを照射すると、Al II (559.3 nm) 発光線が観測され、Al がプラズマ化していることが確認された (図8)。この状況下にて 2 つ目のパルスプラズマをターゲットチャンバーに入射すると、Al 蒸気、プラズマに遮蔽されると考えられる。2 つ目のパルスプラズマの熱流をカロリメータで計測した結果を図9に示す。ここで、1 つ目のパルスプラズマからの熱流の一部がカロリメータチップに入るため、図9の縦軸は Al 試料がある場合をプロットした。この結果から、この実験条件では、2 つ目のパルスプラズマの 66% がカロリメータによって計測され、残りは Al 蒸気・プラズマによって遮蔽されたと考えられる。このように、開発したダブルプラズマガン装置により、蒸気遮蔽効果の解明に向けた実験が可能となった。

(5) まとめ

本研究により高性能化した磁化プラズマガン装置を用いて、ELM 様パルスプラズマの材料照射実験に係る多くの国際・国内共同研究を実施することができた。これにより、日

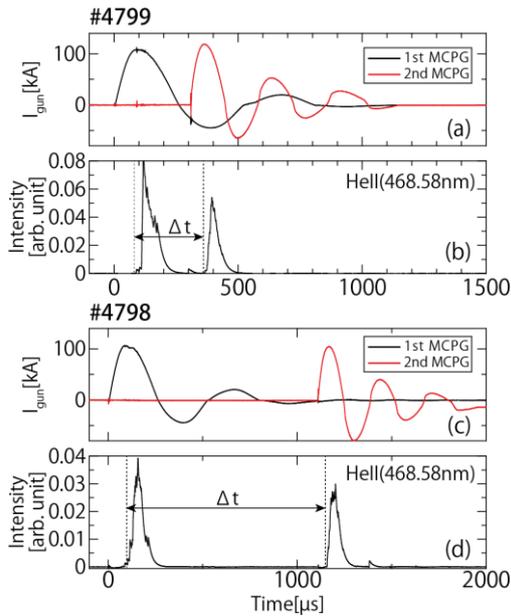


図7 ダブルプラズマガンの放電波形

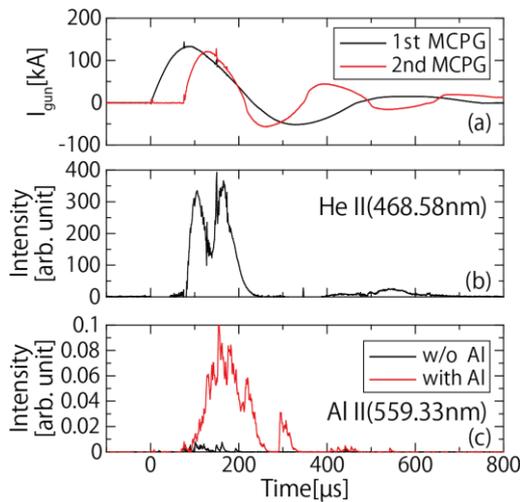


図8 蒸気遮蔽効果検証実験時の放電電流と He II, Al II 発光波形

本が開発した先進核融合壁材料のパルス熱負荷に対する健全性評価を実施することが可能となった。また、定常プラズマ予照射 W への照射実験は国内外にて初めて実施されたものであり、特に W-Fuzz が表面亀裂発生に対して耐性を有する効果の解明は注目を集めた。一方、本研究により新たに開発したダブルプラズマガン装置を用いて蒸気遮蔽効果を検証する実験を開始することができた。また、高エネルギー密度プラズマ生成技術としての可能性も見出すことができたことから、今後の新たな展望として期待される。最後に、上記の成果が高く評価され、平成 25 年度吉川允二核融合エネルギー奨励賞（優秀賞）を受賞した。

5. 主な発表論文等

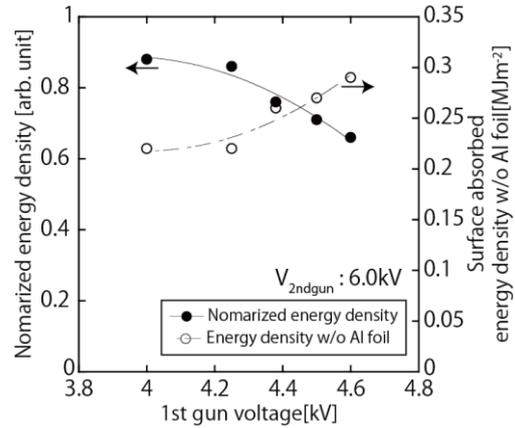


図9 Al 蒸気層・プラズマ層を通過する 2 つ目のパルスプラズマのエネルギー密度

(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 7 件)

- ① S. Kajita, T. Akiyama, T. Nishashi, M. Osaka, N. Ohno, Y. Kikuchi, I. Sakuma, M. Nagata, "Characterization of Gun Plasma Penetrated into a Steady State Plasma Device", IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, Vol. 41, 2013, pp. 3122-3128.
- ② Y. Kikuchi, I. Sakuma, D. Iwamoto, Y. Kitagawa, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Ueda, "Surface cracking and melting of different tungsten grades under transient heat and particle loads in a magnetized coaxial plasma gun", Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 438, 2013, pp. S715-718.
- ③ S. Kajita, N. Ohno, T. Akiyama, T. Nishashi, T. Uchiyama, M. Osaka, Y. Kikuchi and M. Nagata, "Development of Steady/Transient Dual Plasma Irradiation Device Using a Plasma Gun", Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 438, 2013, pp. S707-710.
- ④ D. Nishijima, R. P. Doerner, D. Iwamoto, Y. Kikuchi, M. Miyamoto, M. Nagata, I. Sakuma, K. Shoda and Y. Ueda, "Response of fuzzy tungsten surfaces to pulsed plasma bombardment", Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 434, 2013, pp. 230-234.
- ⑤ D. Nishijima, Y. Kikuchi, M. Nakatsuka, M.J. Baldwin, R.P. Doerner, M. Nagata, Y. Ueda, "Influences of ELM-like Pulsed Plasma Bombardment on Deuterium Retention in Tungsten", Physica Scripta, 査読有, Vol. T145, 2011, 014053 (4pp).
- ⑥ Y. Kikuchi, D. Nishijima, M. Nakatsuka, K. Ando, T. Higashi, Y. Ueno, M. Ishihara, K. Shoda, M. Nagata, T. Kawai, Y. Ueda, N. Fukumoto, R.P. Doerner, "Surface damage characteristics of CFC and tungsten with repetitive ELM-like pulsed plasma irradiation", Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 415, 2011, pp. S55-S58.

- ⑦ D. Nishijima, Y. Kikuchi, M. Nakatsuka, R.P. Doerner, M. Nagata, Y. Ueda, "Effects of Pre-Plasma Exposure on Tungsten Surface Cracking Due to ELM-like Pulsed Plasma Bombardment", Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 1447-1450.

[学会発表] (計40件)

- ① I. Sakuma, Y. Kikuchi, Y. Kitagawa, Y. Asai, K. Onishi, N. Fukumoto, M. Nagata, "Experimental investigation of vapor shielding effects induced by ELM-like pulsed plasma loads using the double plasma gun device", 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Kanazawa, Japan, May 26-30, P2-091 (2014).
- ② Y. Kikuchi, I. Sakuma, Y. Kitagawa, Y. Asai, K. Onishi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Ueda, H. Kurishita, "Surface modifications on toughened, fine-grained, recrystallized tungsten with repetitive ELM-like pulsed plasma irradiation", 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Kanazawa, Japan, May 26-30, P2-085 (2014).
- ③ D. Sato, N. Ohno, M. Osaka, S. Kajitaa, Y. Kikuchi, "Measurement of Transient Heat and Particle loads in NAGDIS-PG", 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Kanazawa, Japan, May 26-30, P2-023 (2014).
- ④ Y. Kikuchi, I. Sakuma, Y. Kitagawa, Y. Asai, K. Onishi, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Ueda, "Recent results of ELM simulation experiments on a magnetized coaxial plasma gun", Japan-US Workshop on "Heat Removal and Plasma Material Interactions for Fusion", Livermore, USA, Jan. 7-8 (2014).
- ⑤ I. Sakuma, Y. Kitagawa, Y. Asai, K. Onishi, Y. Kikuchi, N. Fukumoto and T. Kanki, "Characterization of CT injector developed for simulation of ELM-like pulse heat loads on divertor materials", US-Japan Workshop on "Advanced Control and Confinement Improvement of Innovative Compact Toroidal Configurations", Kobe, Japan, Sep. 24-26, (2013).
- ⑥ Y. Kikuchi, I. Sakuma, D. Iwamoto, Y. Kitagawa, K. Shoda, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Ueda, S. Suzuki, "Simulation Experiments of ELM-like Transient Heat and Particle Loads using a Magnetized Coaxial Plasma Gun", Abs. of 24th IAEA Fusion Energy Conference (FEC), San Diego, USA, Oct. 8-13, FTP/P1-10, p. 449 (2012).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

URL:

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/eecs/ykikuchi/kikuchi.html>

6. 研究組織

- (1) 菊池 祐介 (KIKUCHI YUSUKE)
兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00433326