

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400535

研究課題名(和文) 高熱流パルスプラズマ-材料相互作用における重相状態と熱緩衝効果の解明

研究課題名(英文) Investigations of plasma with multi-phase matters produced by high heat flux pulsed plasmas and its heat mitigation effects

研究代表者

菊池 祐介 (KIKUCHI, YUSUKE)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00433326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：固相-液相-蒸気相-プラズマ相が狭い領域で発現する重相構造プラズマにおいて、プラズマから材料へのエネルギー伝達過程を磁化プラズマガン装置を用いて調査した。アルミニウム(Al)とタングステン(W)に同一条件で生成した高熱流ヘリウム(He)パルスプラズマを照射し、材料に吸収されるエネルギー密度、プラズマ蒸気混相の動的挙動、材料表面温度計測を行った。その結果、Heパルスプラズマの70%程度(0.44 MJ/m<sup>2</sup>)がWに吸収される一方、Alに吸収されるエネルギー密度は0.15 MJ/m<sup>2</sup>にとどまり、材料表面における蒸発潜熱、黒体放射による冷却過程以上のプラズマ熱負荷の低減を確認した。

研究成果の概要(英文)：Energy transfer processes on plasma with multi-phase matters, in which solid, liquid, vapor, and plasma phase simultaneously appear in a narrow space, have been studied using a magnetized coaxial plasma gun and a steady state/pulse combined plasma irradiation device. The absorbed energy density was measured with calorimeters having heat receiving materials of aluminum (Al) and tungsten (W). As a result, the absorbed energy on the W material was ~70% of that in the incident helium (He) pulsed plasma, whereas only ~20% of the plasma energy was absorbed on the Al material. Al layer formation was identified with a high-speed camera with a bandpass filter of 394 nm, and dynamic behaviors of Al neutral and He ion emissions were revealed using a time-resolved multichannel spectroscopy.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：重相構造プラズマ 磁化プラズマガン 高熱流パルスプラズマ プラズマ材料相互作用 ELM 蒸気遮蔽効果

### 1. 研究開始当初の背景

近年、核融合プラズマ・高エネルギー密度プラズマ・プロセスプラズマ研究等に介在する「非平衡極限プラズマ」という共通学理に大きな注目が集まっており、分野横断・学際的なネットワーク研究が期待されている。磁場・レーザ核融合炉壁、宇宙船外壁、大電流遮断器などの機器においては、プラズマをはじめとする高熱負荷に材料が曝されるため、その材料表面には重相状態（固相、液相、気相、プラズマ）が形成される。例えば、核融合炉壁においては炉心プラズマから流出する高熱流プラズマが壁に照射されることで重相状態が形成される。その時、プラズマ熱負荷の一部が遮蔽される蒸気遮蔽（Vapor shield）効果が発現し、壁材料の損耗量が1桁から2桁低減されると考えられている。すなわち、重相プラズマの熱緩衝効果の理解・利用により、固体材料単体で考えられていた機器の耐熱性能を飛躍的に向上させる可能性があり、工学的応用を視野に入れた重相プラズマ科学研究が期待されている。

重相プラズマ研究には高熱負荷と材料の相互作用を発生させる必要があり、模擬実験装置が重要である。例えば、宇宙船外壁における空力加熱の模擬実験はアーク加熱風洞、大型電流遮断器の基礎研究はアーク放電を用いた実験が行われている。一方、高熱流パルスプラズマ照射により重相状態が形成され、後続のプラズマ熱負荷が熱緩衝効果により遮蔽されるという観点での実験研究は国内外でほとんど実施されていない状況である。

### 2. 研究の目的

兵庫県立大学の磁化プラズマガン装置を用いて高熱流パルスプラズマを生成・照射することで、材料表面に蒸気相を形成する。プラズマ-蒸気混相の動的挙動と材料温度を新たに開発した多視線2波長同時分光計測システムと高速2色パイロメータを用いて測定する。得られた結果から、蒸気相形成時のプラズマ-材料相互作用におけるエネルギー伝達特性の変化について明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 磁化プラズマガン装置の特性評価：

本研究では磁化プラズマガン装置を用いて高熱流パルスプラズマを生成し、材料照射実験を実施する。まず、プラズマパラメータ計測、材料吸収エネルギー密度の測定を実施する。

#### (2) 高速2色パイロメータの開発：

材料照射実験において材料温度計測は重要であり、特にパルスプラズマ照射の場合には高速応答（～数 μs）の温度計測器が必要となる。そこで、2分岐光学系、バンドパスフィルタ、フォトダイオードアンプを用いた高速2色パイロメータを開発する。

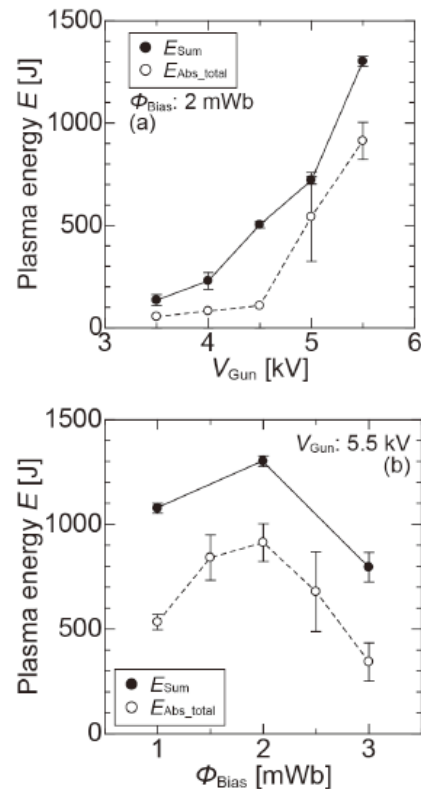


図1 プラズマエネルギーと材料吸収エネルギーの比較 ((a)ガン電圧依存性, (b) バイアス磁束依存性)

#### (3) 多視線2波長同時分光計測システムの開発：

8本の分岐光ファイバとマルチアノード光電子増倍管を検出器に用いた2台の可視分光器により、多視線2波長同時分光計測システムを開発する。

#### (4) 蒸気相形成とエネルギー伝達特性：

アルミニウム (Al) 製およびタングステン (W) 製の受熱チップを有するカロリメータによりパルスプラズマ照射時の材料吸収エネルギー密度を測定し、両者を比較する。また、開発した分光計測システムによりプラズマ-蒸気混合相の動的挙動を測定する。

#### (5) 薄膜堆積層を模擬したW薄板試料を用いた照射実験：

マグネトロンスパッタリング装置を用いて、核融合炉壁における堆積層を模擬した薄膜蒸着W薄板試料を製作し、パルスプラズマ照射時の蒸気相形成、W薄板試料の背面温度計測を実施することで、蒸気相形成時のエネルギー伝達特性を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 磁化プラズマガン装置の特性評価：

プラズマパラメータ計測として、電子密度、イオン温度、イオンフロー速度を測定し、プラズマが有するエネルギー（運動エネルギー+熱エネルギー）を評価した。また、W製受熱チップを有するカロリメータにより材

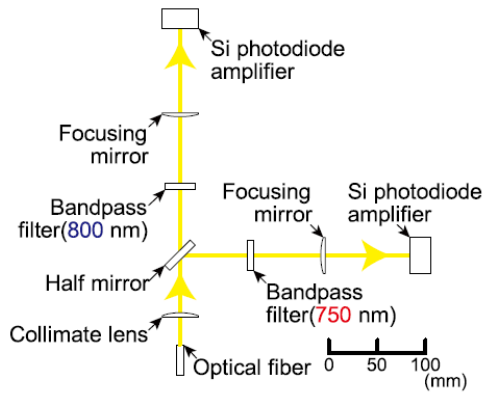


図2 高速2色パイロメータ

料吸収エネルギーを測定した。ここで、放電ガスはヘリウム (He) を用いた。それらを図1に示す。ガン放電電圧を大きくすることでプラズマエネルギーが上昇し (図1(a)), さらに最適なバイアス磁束が存在することが分かる (図1(b))。この結果から、プラズマが有するエネルギーの約70%がW材に伝達されることが分かった。

(2) 高速2色パイロメータの開発:

高速2色パイロメータの構成図を図2に示す。測定波長として、測定温度範囲、光学機器のコスト等から考えて750 nm, 800 nmを選択した。両波長間の材料放射率に差はないと仮定することで、2波長の信号強度比から材料温度を算出した。この仮定を置くことで生じる温度測定誤差は2%程度である (温度が2000 Kの時)。この計測器の時間応答は約5 μsであり、本実験のパルスプラズマ照射時の材料温度変化をとらえるのに十分な応答速度と言える。

実際に薄板W (厚さ50 μm) にHeパルスプラズマを照射したときのW試料背面温度計測結果を示す (図3)。なお、背面温度を計測しているのは、プラズマ発光の混入を避けるためである。図3よりW背面温度は3280 Kまで達していることが分かる。この計測結果と熱伝導解析からプラズマから吸収されたエネルギー密度は0.52 MJ/m<sup>2</sup>であることが示され、カロリメータの測定結果とも良く一致した。

(3) 多視線2波長同時分光計測システムの開発:

開発した分光計測システムでは、光ファイバアレイをターゲットチャンバー上部ポートに設置し、サンプル前面から複数の視線 (最大8視線) にて発光を得て、2分岐光学系を用いて2台の可視分光器に発光を導いた。分光器の検出器にマルチアノードを有する光電子増倍管を用いることで、多視線2波長同時計測を高時間分解能で実現した。本計測システムを用いて、プラズマ蒸気混合相の動的挙動を観測した。

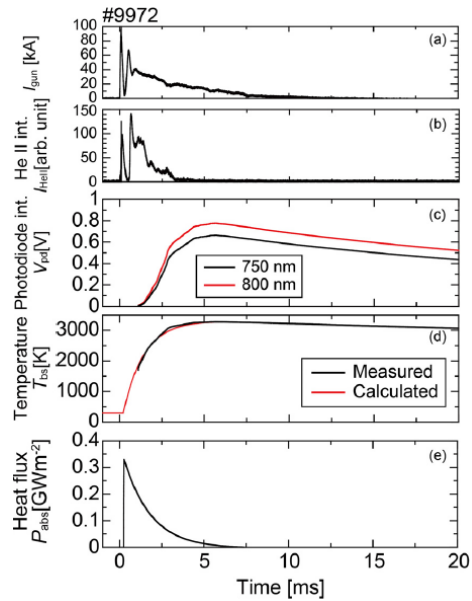


図3 高速2色パイロメータを用いた薄板W背面温度計測結果

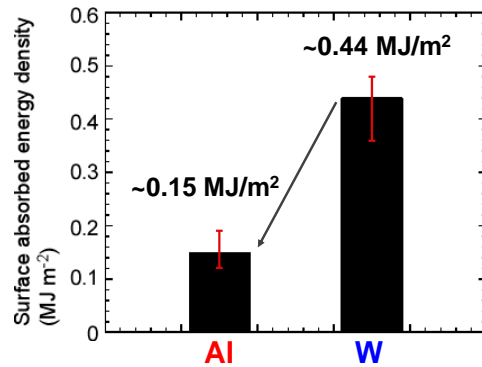


図4 AlとW材の吸収エネルギー密度

(4) 蒸気相形成とエネルギー伝達特性:

Al製およびW製の受熱チップを有するカロリメータにより計測した材料吸収エネルギー密度の結果を図4に示す。ここで、同一条件で生成されたHeパルスプラズマをAl, Wに照射した。この結果から、Alに吸収されるエネルギー密度はWの30%程度であることが分かる。材料表面でのエネルギー反射係数はAlのほうがWより小さいにも関わらず、Alのほうが吸収エネルギー密度は低い。この時、プラズマ照射中の発光を高速カメラにて撮影した結果を図5に示す。ここで、Al原子発光 (Al I, 394.40 nm) 近傍のバンドパスフィルタをカメラレンズに設置した。この結果から、Alチップ前面にAl蒸気相が現れていることが分かった。

(5) 薄膜堆積層を模擬したW薄板試料を用いた照射実験:

ITERの第一壁にはベリリウム (Be) が用

(c)  $t = 104 \mu\text{s}$

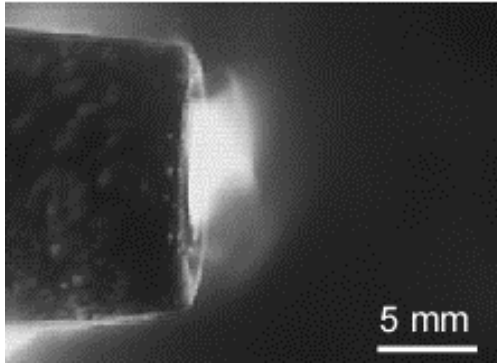


図 5 Al 受熱チップ前面に形成された Al 蒸気相 (Al I, 394 nm バンドパスフィルタ)

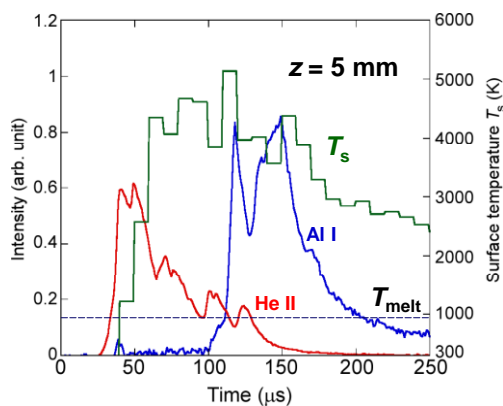


図 6 2 波長 (He II, Al I) 同時分光計測結果 (試料表面から 5 mm 離れた位置) と 2 分岐光学系と高速カメラで測定した表面温度

いられ、プラズマによりスパッタリングされた Be の一部が W ダイバータ上に堆積することが予想される。Be の模擬材の 1 つとして、Al が考えられる。そこで、マグネトロンスパッタリング装置を用いて Al 堆積層を W 薄板試料上に成膜した。Al 蒸着 W 試料に He パルスプラズマを照射したときの試料背面温度計測と蒸気相形成の動的挙動を調査した。

図 6 に Al I と He イオン発光線 (He II, 468.58 nm) の時間発展を示す。この結果から、He プラズマ照射直後は He II 発光強度が非常に強く、しばらくすると Al I 発光強度が上昇していくことが分かる。まず、プラズマ照射により Al 温度が融点まで上昇する。この時、プラズマ圧力によって蒸気噴出が抑えられ、プラズマ圧力低下とともに Al I 発光強度が増大していると考えられる。ここで、材料表面温度は 2 分光光学系 (850 nm, 950 nm) を高速カメラ (ナックイメーテックテクノロジー社製, HX-3) のレンズに取り付けることで高速 2 次元温度計測を実現している。

図 7 に Al 蒸着 W 試料の背面温度計測結果を示す。ここで、無垢の W 試料を比較として

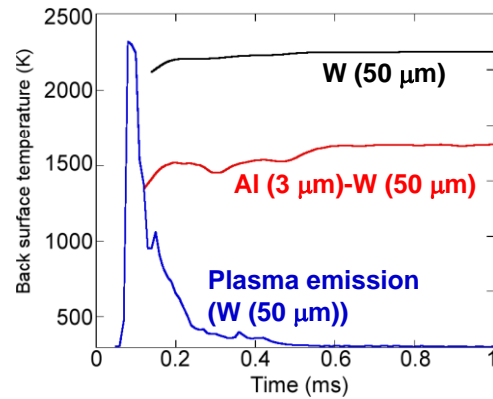


図 7 W, Al 蒸着 W 試料の背面温度とプラズマ全発光計測結果

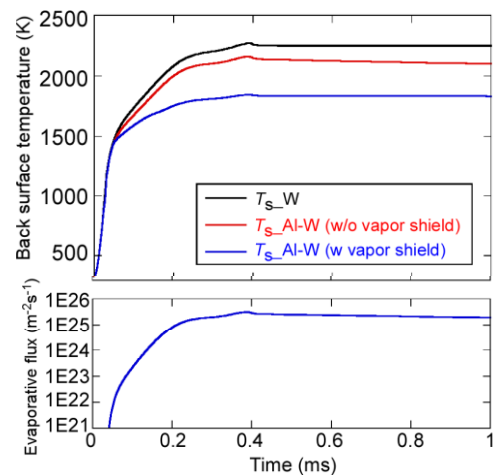


図 8 W, Al 蒸着 W 試料の背面温度解析結果 (上段), Al 蒸発粒子束 (下段)

表示した。この結果から、Al 蒸着層により背面温度が 2250 K から 1600 K に低下していることが分かる。次に、温度減少に与える影響として、蒸発による潜熱、黒体放射による放射冷却の効果を取り入れた熱伝導解析を行った。ここで、黒体放射に関してはプラズマ熱負荷が  $\text{GW}/\text{m}^2$  レベルであるのに対して、黒体放射は  $\text{MW}/\text{m}^2$  レベルであるため、ほとんど影響はない。実験で観測された背面温度と一致するように、プラズマ熱流入を与えたところ、蒸発潜熱だけでは実験で観測された背面温度低下を説明できず、プラズマ熱負荷を 30% 減ずる効果が新たに必要であることが示された (図 8)。この熱負荷の散逸効果を説明するためには電子温度計測が必要と考えられるが、蒸気相形成に伴うプラズマ熱負荷低減効果が実験的に示された。

PWI 協定に基づいてオランダ基礎エネルギー研究所の Pilot-PSI 直線型プラズマ装置グループと国際共同研究を実施し、同様の Al 蒸着 W 試料 (Al 層: 3  $\mu\text{m}$ , W 試料厚: 1 mm) に繰り返し ELM 様パルスプラズマ照射を行った。Pilot-PSI 装置では 10 Hz にて密度



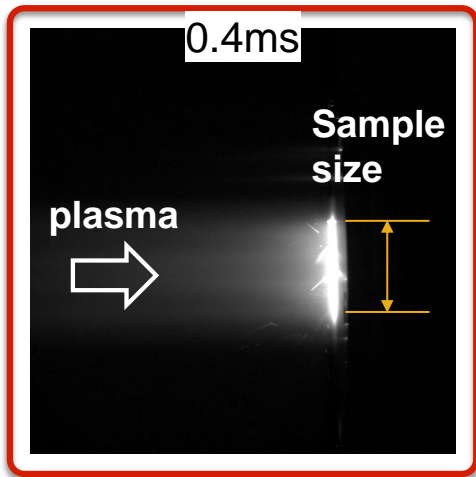


図9 W, Al 蒸着 W 試料の背面温度解析結果 (上段), Al 蒸発粒子束 (下段)

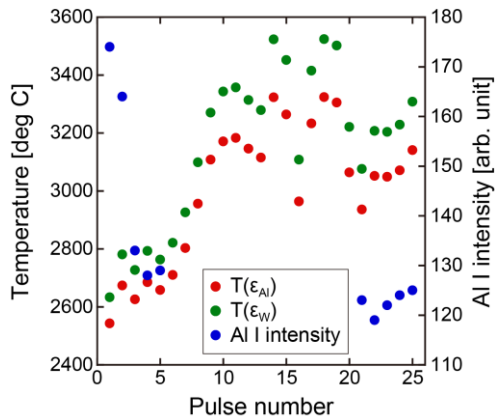


図10 プラズマ照射中の Al 蒸着 W 試料の表面温度と Al I 発光強度のパルス照射回数に対する推移

$\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 温度 5-10 eV のパルスプラズマ照射が可能であり, 高速カメラ, 高速 IR カメラ等の計測器を保有している。また, 背景プラズマとして, 電子温度 1 eV, 密度  $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  程度の定常プラズマも存在している点と磁場 1.6 T の存在がプラズマガン実験との違いである。なお, 本実験では水素プラズマを用いた。

Al 蒸着 W にプラズマを照射したときの高速カメラ画像 (Al I, 394 nm のバンドパスフィルタ有り) を図 9 に示す。この結果から, Al 蒸気形成およびドロプレットの噴出も一部観測された。この時の表面温度を IR カメラで測定した結果を図 10 に示す。ここで横軸はパルスプラズマ照射回数であり, 最初の 2 発程度で Al I 発光強度は大きく低下していることが分かる。つまり, Al 蒸着膜は損失し, その後は表面が W になっていると考えられる。この実験の温度計測は材料放射率を仮定する必要があるため, Al, W の放射率 (文献値) を設定し, 温度算出を行った。その結果,

3 ショット目以降の温度は放射率の違いから生じる温度差以上に 1 ショット目に比べて低下していることが分かった。また, 蒸発潜熱を照射前後の試料質量損失から見積もったところ,  $0.09 \text{ MJ/m}^2$  と算出された。一方, 1 ショット目と 3 ショット目以降の吸収エネルギー密度の差は  $0.21 \text{ MJ/m}^2$  であり, 蒸発潜熱以外の効果があることが分かる。このように, 磁化プラズマガンおよび Pilot-PSI 装置において同様の熱負荷低減効果が得られた。

#### (6) まとめと今後の展望:

本研究では磁化プラズマガン装置を中心として, 蒸気相形成時におけるパルスプラズマ熱負荷の材料への伝達特性を調査した。蒸気遮蔽効果を実験的に証明するには, 蒸気相形成によるプラズマ熱流入の低下, プラズマ温度計測が必要となる。また, 実験だけでなく, シミュレーションとの比較が重要であり, 現在, Particle-In-Cell (PIC)シミュレーションとの比較を行っているところである。さらに, 核融合プラズマだけでなく, アーク放電電極等における電極損傷過程にも同様の効果が発現していることが考えられ, 異分野横断的な研究を推進していくことを計画している。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① D. Sato, N. Ohno, F. Domon, S. Kajita, Y. Kikuchi, I. Sakuma, "Increase in the energy absorption of pulsed plasma by the formation of tungsten nanostructure", Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 57, 066028 (8pp) (2017). doi:10.1088/1741-4326/aa67ad
- ② 佐久間 一行, 菊池 祐介, 磯野 航, 中園 拓実, 中根 優人, 福本 直之, 永田 正義, 「磁化同軸プラズマガン装置における CT プラズマの特性評価とパルス高熱負荷模擬試験への適用」, 電気学会論文誌 A, 査読有, Vol. 136, No. 3, pp. 147-154 (2016). doi: 10.1541/ieejfms.136.147
- ③ Y. Kikuchi, I. Sakuma, Y. Asai, K. Onishi, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, N. Fukumoto, M. Nagata, "Vapor shielding effects on energy transfer from plasma-gun generated ELM-like transient loads to material surfaces", Physica Scripta, 査読有, Vol. T167, 014065 (7pp) (2016). doi: 10.1088/0031-8949/T167/1/014065
- ④ I. Sakuma, Y. Kikuchi, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, N. Fukumoto, M. Nagata, "Back-surface temperature measurements of thin tungsten materials during plasma-gun generated pulsed plasma irradiation using a fast two-color pyrometer", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 10, 1205089 (2015). doi: 10.1585/pfr.10.1205089
- ⑤ Y. Tanaka, H. T. Lee, Y. Ueda, M. Nagata, Y.

- Kikuchi, S. Suzuki, Y. Seki, “Effect of surface damage on thermal response of tungsten monoblocks”, Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 68, pp. 433-437 (2015). doi: 10.13182/FST15-109
- ⑥ 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”, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 463, pp. 233-236 (2015). doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.10.020
- ⑦ 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”, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 463, pp. 206-209 (2015). doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.107
- ⑧ 菊池祐介, 澤田圭二, 高村秀一, 上田良夫, 永田正義, 「ダイバータにおける熱流制御とプラズマ材料相互作用」, プラズマ・核融合学会誌, 査読無, Vol. 90, No. 8, pp. 480-488 (2014). doi: <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009843850>

[学会発表] (計 3 6 件)

- ① Y. Kikuchi, M. Nakane, K. Ibano, Y. Ueda, N. Fukumoto, M. Nagata, “Vapor shielding studies on Al coated W materials using a magnetized coaxial plasma gun (MCPG) device”, 23rd ITPA SOL/Divertor Physics Meeting, Naka, Japan, Oct. 24-27, (2016).
- ② Y. Kikuchi, I. Sakuma, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, N. Fukumoto, M. Nagata, T.W. Morgan, K. Bystrov, K. Ibano, Y. Ueda, “Plasma-vapor mixed layer formation and its effects on energy transfer processes from ELM-like pulsed plasma heat loads to tungsten materials”, Abs. of 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Rome, Italy, May 30-June 3, I-22 (2016). 国際招待講演.
- ③ Y. Kikuchi, I. Sakuma, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, N. Fukumoto, M. Nagata, “Vapour shielding experiments with pulsed plasma injection”, 22nd ITPA SOL/Divertor Physics Meeting, Frascati, Italy, Jan. 25-28 (2016).
- ④ Y. Kikuchi, I. Sakuma, Y. Asai, K. Onishi, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, D. Sato, F. Domon, N. Ohno, N. Fukumoto, M. Nagata, “Vapor shielding effects on tungsten surface damage exposed to plasma-gun generated ELM-like transient loads”, Abs. of 15th International Conference on Plasma Facing

- Materials & Components for Fusion Applications, Aix-en-Provence, France, May 18-22, I-14, p. 27 (2015). 国際招待講演
- ⑤ Y. Kikuchi, I. Sakuma, Y. Asai, K. Onishi, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, N. Fukumoto, M. Nagata, “High-Energy-Density Plasma Generation by a Plasma Merging Technique in the Double Plasma Gun Device”, Proc. of Plasma Conference 2014, Niigata, Japan, Nov. 18-21, 21PB-092 (2014).
- ⑥ Y. Tanaka, Y. Ueda, H. T. Lee, M. Nagata, Y. Kikuchi, S. Suzuki, Y. Seki, “Effect of Surface Damage on Thermal Reaction of Tungsten Monoblock”, Abs. of 21st Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (TOFE), Anaheim, CA, USA, Nov. 9-13, (2014).
- ⑦ Y. Kikuchi, I. Sakuma, Y. Asai, K. Onishi, W. Isono, T. Nakazono, M. Nakane, D. Sato, F. Domon, N. Ohno, S. Kajita, N. Fukumoto, M. Nagata, “Dual plasma gun experiments for the study of vapor shielding”, 20th ITPA SOL/Divertor Physics Meeting, Prague, Cheko, Oct. 20-23, (2014).

[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/faculty/ykikuchi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

永田 正義 (NAGATA MASAYOHI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00192237

(3) 研究分担者

福本 直之 (FUKUMOTO NAOYUKI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90275305

(4) 連携研究者

藪内 俊毅 (YABUUCHI TOSHIKI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：20397772