

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05732

研究課題名(和文) 重相構造プラズマにおけるエネルギー輸送過程と機能制御

研究課題名(英文) Energy transfer process and function control of a plasma with multi-phase matters

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：固相・液相・気相・プラズマの複数の相が同時に狭い領域にて現れる、重相構造プラズマの基礎過程を調査した。タングステン(W)試料にアルミニウム薄膜を蒸着した試料に高熱流パルスプラズマが照射されたときの蒸気遮蔽効果を、PICシミュレーションコード(PIXY)により再現することに成功した。また、準大気圧ヘリウム(He)アーク放電装置において、放電用電極から発生したW蒸発粒子がHeアークおよびガスと相互作用しながら冷却されていくことで、Wナノ粒子が形成されることを示した。さらに、Wナノ粒子がクラスターを形成して試料に堆積することで、新しい黒色化表面ナノ構造が形成されることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重相構造プラズマのエネルギー輸送過程の1つである蒸気遮蔽効果は熱負荷低減効果として工学的な利用が期待されるが、非常に複雑な過程を内包するため、実験結果を説明し予測するシミュレーションコードの開発が重要である。本研究成果は将来の核融合炉における壁損耗量の予測などに貢献すると考えられる。また、本研究で見出された黒色化表面ナノ構造形成は重相構造プラズマの機能制御の成果と言える。準大気圧下にてナノ粒子の堆積を制御する試みはプラズマ応用分野でも注目を集める分野である。また、新しい黒色化表面ナノ構造形成技術として、放熱部材や触媒等への産業応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Fundamental processes of a plasma with multi-phase matters, in which solid, liquid, gas, and plasma appear simultaneously in a narrow region were investigated. The vapor shielding effect of high heat flux pulsed plasma on tungsten (W) samples deposited with thin aluminum films was successfully reproduced by the PIC simulation code (PIXY). In a sub-atmospheric helium (He) arc discharge device, it was shown that W nanoparticles were formed by the cooling of W evaporation particles generated from the discharge electrodes due to interaction with the cold He gas. In addition, it was found that W nanoparticles formed clusters and deposited on the W sample, resulting in blackened surface nanostructures.

研究分野：プラズマ放電理工学

キーワード：重相構造プラズマ 蒸気遮蔽 ナノ構造タングステン 準大気圧プラズマ ELM ダイバータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、固相・液相・気相・プラズマの複数の相が同時に狭い領域にて現れる、重相構造プラズマが大きな注目を集めている。重相構造プラズマは、磁場・レーザ核融合炉壁、溶接技術、熱プラズマプロセス、宇宙船外壁、大電流遮断器などにて、分野横断・学際的に発現する新しいプラズマ科学である。重相構造プラズマに内在する物理過程として、「プラズマ蒸気混相におけるエネルギー輸送過程」、「液相からの粒子放出・クラスター形成」、「熔融相における流体不安定性」が挙げられる(図1)。例えば、磁場閉じ込め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構造プラズマが壁材料前面に形成される。その時、プラズマ熱負荷の一部が遮蔽される蒸気遮蔽効果が発現すると考えられる。この効果を明らかにするには、予測精度の高い数値シミュレーションコード開発が重要と考えられるが、実験結果との比較を含めて国内外でほとんど実施されていない状況である。

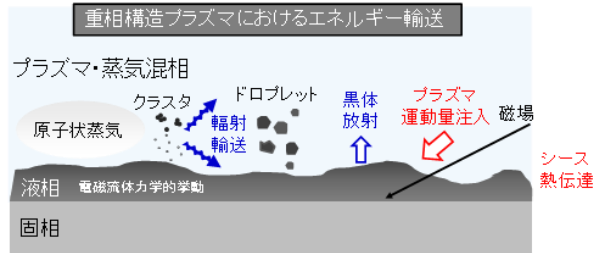


図1 重相構造プラズマ

2. 研究の目的

兵庫県立大学の磁化プラズマガン装置で得られた高熱流パルスプラズマ照射時のエネルギー伝達測定結果と大阪大学で開発された理論シミュレーションコードを比較し、モデルの妥当性を明らかにする。それをもとに将来の核融合炉におけるダイバータ板の寿命予測につなげる。また、高熱流プラズマが得られる準大気圧アーク放電プラズマ装置を構築し、熔融層からの蒸発粒子・クラスター形成について新しい観点から評価する。

3. 研究の方法

蒸気層の形成を容易にするためにアルミニウム薄膜をタングステン板の上に蒸着した試料に対して、プラズマガンのパルスプラズマを照射し、試料温度上昇を測定する。その結果を PIC シミュレーションコード PIXY (研究分担者・伊庭野博士が開発) と比較し、エネルギー伝達特性を明らかにする。準大気圧ヘリウムアークプラズマ装置を用いて定常高熱流プラズマをタングステンに照射し、タングステン表面形状にヘリウム照射が与える影響および蒸発粒子が冷却される過程で発現するナノ粒子の影響を評価する。

4. 研究成果

(1) 蒸気遮蔽効果の実験・シミュレーション比較

図2にプラズマガン装置における実験結果を示す。厚さ $3\ \mu\text{m}$ のアルミニウム層を有する Al-W 試料と無垢の W 試料にパルスプラズマを照射したときの試料背面温度を計測している(図2(A))。アルミニウム層があることで試料表面温度が低下していることが分かる。なお、アルミニウム層の蒸発潜熱だけではこの温度低下は説明できない。プラズマとアルミニウムの相互作用によりアルミニウム発光が観測される(図2(B))。

次にプラズマガン実験と同様のパルスプラズマが照射されたときを PIXY コードにて再現した結果を図3に示す。パルス幅 $200\ \mu\text{s}$ のプラズマ熱負荷が Al-W 試料および無垢の W 試料に流入した状況を考えている。その結果、W 試料では $5\ \text{GW}/\text{m}^2$ 程度の熱負荷が流入しているのに対して、Al-W 試料では蒸気層の形成後、 $3\ \text{GW}/\text{m}^2$ 程度まで低下した(図3左)。熱負荷の内訳を見ると、Al-W 試料ではイオン熱負荷は変化せず、電子熱負荷が低減していることが分かる。その結果、試料背面温度(図3右)も低下する結果が得られた。この時、アルミニウム発光は試料から約 $1\ \text{cm}$ 離れた位置まで広がっており、実験(図2(B))と同様の結果が得られている。

開発されたシミュレーションコードは ITER の ELM を模擬した環境にも適用されており、Be および W について評価している。ITER の W ダイバータの寿命予測に対して蒸気遮蔽効果を考慮して計算し、Be 堆積層がパルス熱負荷から W 板を防護する役割を発現することを示した。

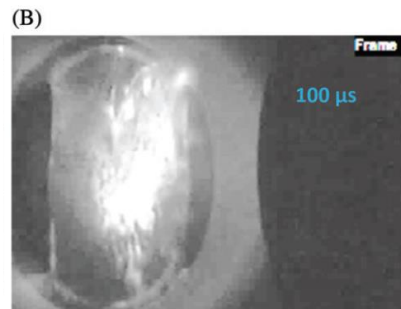
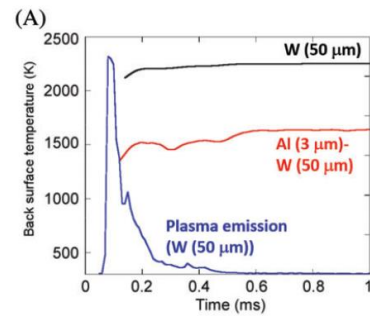


図2 (A)プラズマガン装置における高熱流パルスプラズマ照射時の W 試料温度、(B) アルミニウム発光層の計測結果

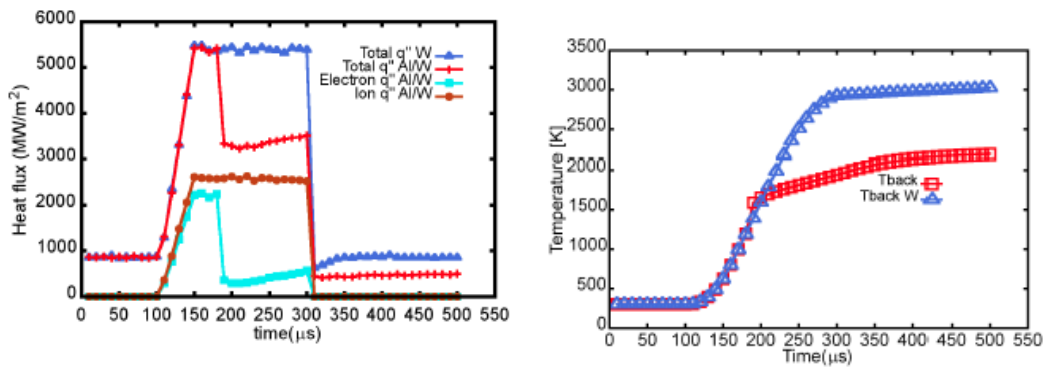


図3 PIXYコードによる蒸気遮蔽効果のシミュレーション結果（左：W 試料，Al-W 試料への入射熱負荷およびその内訳（電子熱負荷，イオン熱負荷），右：W 試料，Al-W 試料の背面温度の時間変化）

これらの成果は Contributions to Plasma Physics 誌，Nuclear Fusion 誌に論文が掲載されるとともに，プラズマ・核融合学会誌にて重相構造プラズマおよび蒸気遮蔽効果に関する小特集記事を発行した。

(2) W 蒸発粒子のクラスター形成とナノ構造堆積

図4に準大気圧ヘリウム (He) アーク放電装置を示す。円筒形状の真空容器 (SUS304 製，直径 165 mm，高さ 402 mm) を有し，ドライ真空ポンプ (250 L/min) により真空排気される。また放電電極として，2本のトリア (ThO₂) を微量に混入させた W 製ロッド (直径 2.5 mm) を水平対向に配置している。本実験では，プラズマ点灯の容易さと試料照射実験を考慮して電極間距離を 20 mm に設定し，放電電源は交流電源 (定格電流：12 A，定格電力：9 kW，周波数：60 Hz) を用いた。He ガスは水平対向電極下側から流量 1 L/min で導入した。

アークコア領域における電子密度を測定するために，He に水素を 1% 混合し，水素原子発光線 H β のシュタルク広がりを測定した。また，電子温度は H β と H γ の発光強度比から求めた。その結果，電子温度，密度は 0.55 eV， $6.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ と得られた。また，静電プローブによりイオンフラックスを測定したところ， $2 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と得られ，従来の低ガス圧下の直線型プラズマ装置より 2 桁程度高いフラックスである。

W 試料をアークコア領域に挿入し，He アークプラズマを 2 時間照射した。この時，試料バイアス電圧を -100 V とした。試料ホルダーには冷却機構はなく，プラズマ照射中の試料温度は 1700°C となった。照射後の試料表面および断面写真 (FE-SEM) を図5に示す。断面写真から He バブルが確認され，表面にはホールが形成されていると考えられる。これまでに，He が W 内部に侵入していくのに必要なエネルギーは ~6 eV と評価されている。本実験における W への入射 He イオンエネルギーを衝突性シースマデルから算出すると ~4.5 eV となり，閾値エネルギーと同程度となった。よって，準大気圧下でも He が W に侵入し，バブルを形成していると考えられる。

次に W 試料をアークコアから 25 mm 外側に離して照射実験を行った。この時の試料表面温度は 700°C であった。照射後の試料表面写真と FE-SEM 観察写真を図6に示す。W 試料の先端部 (プラズマ側) が黒色化していることが分かる (図6(a))。この部分の FE-SEM 表面写真 (図6(b)) から，従来，He プラズマ照射で報告されているような繊維状ナノ

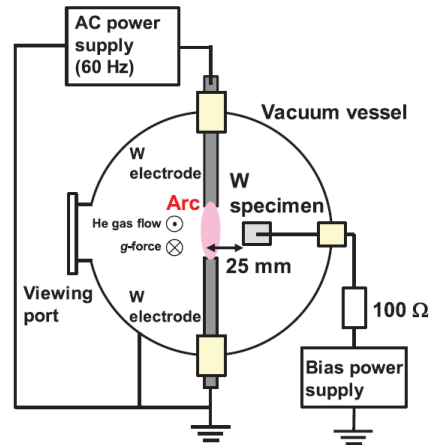


図4 準大気圧ヘリウムアーク装置

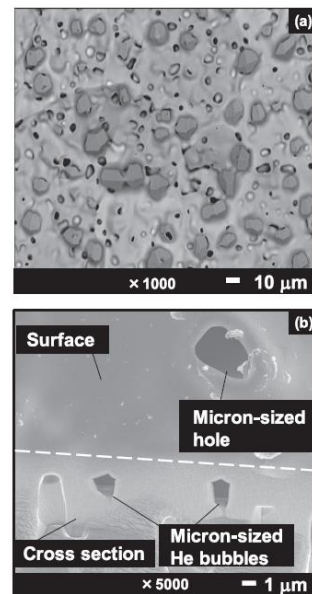


図5 He アーク照射 W 試料の FE-SEM 観察結果 ((a)表面，(b)断面)

構造に類似する黒色化構造に一見見受けられる。しかし、断面写真(図6(c),(d))を見ると、元々のW試料部分にHeバブルが見られず、直径20-30nm程度のナノ粒子がクラスターを形成して堆積していることが分かった。この黒色化ナノ構造形成メカニズムとして図7のようなモデルが考えられる。アーク放電用W電極からの蒸発W粒子がHeアーク内に入り、その後Heガスにより冷却されナノ粒子が形成されていく。W試料表面に堆積する際にクラスター状になる理由はまだ明らかではないが、試料バイアス電圧印加の効果は今後明確にしていく必要がある。これらの成果をJournal of Physics D: Applied Physics誌に論文を掲載した。

このような蒸発W粒子がHeプラズマと相互作用し、冷却過程にてナノ粒子を形成していく様子は、重相構造プラズマと考えることができる。Wの黒色化はプラズマからの熱伝達特性を大きく変えるため、核融合炉Wダイバータにおいても熔融・蒸発したW粒子が再堆積する過程で発生する可能性がある。一方、黒色化ナノ構造を簡易な装置で製造する技術でもあり、産業応用的に重要と考えられる。本研究では交流アーク放電を用いていたが、直流アーク装置への改造をすで実施しており、試料バイアス電圧の影響をより明確化できると期待される。

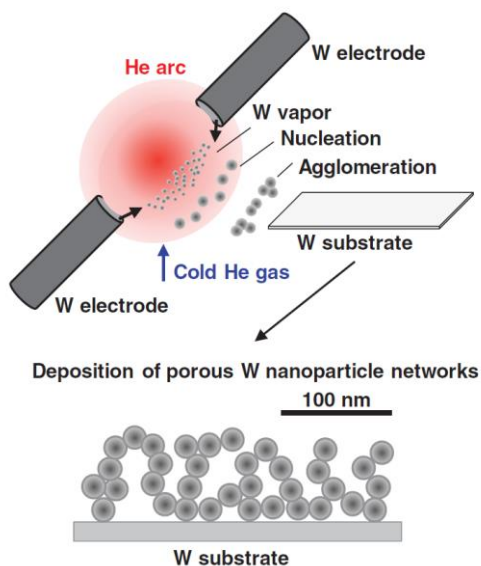


図7 黒色化ナノ構造形成モデル

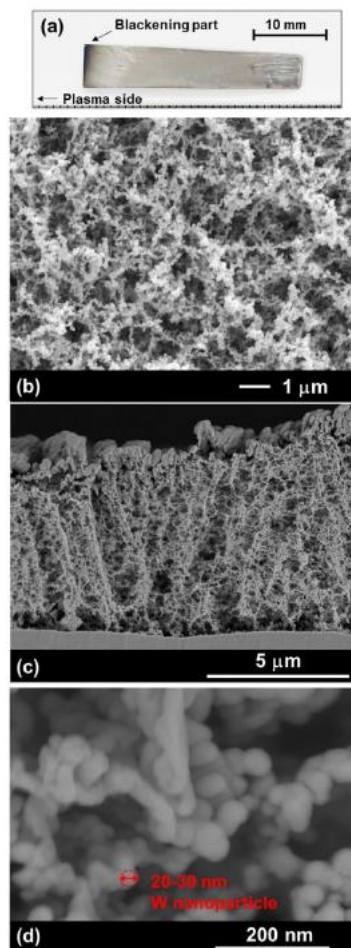


図6 Heアーク照射W試料((a)表面写真, FE-SEM観察結果:(b)表面,(c)断面,(d)(c)の拡大写真)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Nakamori, N. Ohno, H. Tanaka, S. Kajita, Y. Kikuchi, T. Akiyama	4. 巻 14
2. 論文標題 Increased Energy Absorption into W due to the Metal Deposited Layer froman ELM-like Pulsed Plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401051 (5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1401051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ibano, Y. Kikuchi, S. Togo, Y. Ueda, T. Takizuka	4. 巻 59
2. 論文標題 Estimation of suppressed erosion by vapor shielding at Be and W walls under transient loads	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076001 (13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab0977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 菊池祐介	4. 巻 93
2. 論文標題 重相構造プラズマの形成がもたらすペーパーシールド効果「1. はじめに」	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 菊池祐介、高村秀一	4. 巻 93
2. 論文標題 重相構造プラズマの形成がもたらすペーパーシールド効果「2. 核融合PWI分野における重相構造プラズマ実験研究」	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 354-359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊庭野 健造、滝塚 知典	4. 巻 93
2. 論文標題 重相構造プラズマの形成がもたらすペーパーシールド効果「5. ペーパーシールドにおける重相構造プラズマのPICシミュレーション」	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 371-374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ibano, Y. Kikuchi, A. Tanaka, S. Togo, H.T. Lee, Y. Ueda, T. Takizuka	4. 巻 58
2. 論文標題 Simulation study on the vapor shielding at solid walls under transient heat loads using weighted particle model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 594-601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201700160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kikuchi, T. Okumura, K. Kadowaki, T. Aota, S. Maenaka, K. Fujita, S. Takamura	4. 巻 52
2. 論文標題 Porous tungsten nanostructure formation using a helium arc discharge plasma under sub-atmospheric pressure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 375201 (6pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab2ac1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 K. Ibano, Y. Kikuchi, A. Tanaka, S. Togo, Y. Ueda, T. Takizuka
2. 発表標題 Suppression of wall erosion by vapor shielding at low-Z and high-Z walls
3. 学会等名 23rd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ibane, Y. Kikuchi, A. Tanaka, S. Togo, H.T. Lee, Y. Ueda, T. Takizuka
2. 発表標題 Sheath dynamics during the vapor shielding at a plasma-facing wall
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥村 卓也, 菊池 祐介, 青田 達也, 前中 志郎, 藤田 和宣, 高村 秀一
2. 発表標題 準大気圧定常ヘリウムアーク放電プラズマ照射によるタングステンの表面ナノ構造形成
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥村 卓也, 菊池 祐介, 青田 達也, 前中 志郎, 藤田 和宣, 高村 秀一
2. 発表標題 準大気圧ヘリウムアーク放電プラズマ照射による繊維状ナノ構造タングステンの形成
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中森 貴也, 稲垣 翔平, 大野 哲靖, 梶田 信, 田中 宏彦, 菊池 祐介, 秋山 毅志
2. 発表標題 アルミニウム堆積層がタングステン材へのパルスプラズマ熱流入に与える影響
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池 祐介
2. 発表標題 準大気圧アーク放電プラズマ照射による繊維状ナノ構造タングステンの形成
3. 学会等名 平成30年度第1回「境界プラズマ挙動の理解と異分野融合による新展開」研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥村 卓也, 菊池 祐介, 青田 達也, 前中 志郎, 藤田 和宣, 高村 秀一
2. 発表標題 準大気圧定常ヘリウムアーク放電プラズマの特性評価(II)
3. 学会等名 平成30年電気学会A部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥村 卓也, 菊池 祐介, 青田 達也, 前中 志郎, 藤田 和宣, 高村 秀一
2. 発表標題 準大気圧定常ヘリウムアークプラズマ照射によるタングステン表面ナノ構造の試料温度特性
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中森貴也, 細川直希, 大野哲靖, 田中宏彦, 梶田信, 菊池祐介, 秋山毅志
2. 発表標題 融点近傍におけるアルミニウムへのパルスプラズマ照射効果
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池 祐介
2. 発表標題 高熱流パルスプラズマと材料相互作用における蒸気遮蔽効果
3. 学会等名 「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池 祐介
2. 発表標題 準大気圧アーク放電プラズマ照射による繊維状ナノ構造タングステンの形成：試料温度特性と今後の計画
3. 学会等名 平成30年度第2回「境界プラズマ挙動の理解と異分野融合による新展開」研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊池祐介，奥村卓也，門脇和正，青田達也，前中志郎，藤田和宣，高村秀一
2. 発表標題 準大気圧ヘリウムプラズマ照射による繊維状ナノ構造形成
3. 学会等名 平成30年度核融合炉開発に向けたPWIマルチスケールモデリングに関する研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ibane, T. Takizuka, Y. Kikuchi, H.T. Lee, Y. Ueda
2. 発表標題 PIC simulations of vapor shielding at Plasma Gun device and ELM
3. 学会等名 24th ITPA SOL/Divertor Physics Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ibane, A. Tanaka, S. Togo, H.T. Lee, Y. Ueda and T. Takizuka
2. 発表標題 Simulation study on the vapor shielding at solid walls under transient heat loads using weighted particle model
3. 学会等名 16th Plasma Edge Theory workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Ibane, Y. Kikuchi, Y. Ueda, T. Takizuka
2. 発表標題 Weighted PIC simulation for vapor shielding at wall under transient heat loads
3. 学会等名 4th International Workshop on Models and Data for Plasma-Material Interaction in Fusion Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kikuchi, T. Okumura, K. Kadowaki, T. Aota, S. Maenaka, K. Fujita, S. Takamura
2. 発表標題 Formation of nanostructured tungsten using a helium arc discharge plasma under sub-atmospheric pressure
3. 学会等名 34th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG2019)/10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門脇和正, 菊池祐介, 青田達也, 前中志郎, 藤田和宜, 高村秀一
2. 発表標題 準大気圧直流ヘリウムアーク放電プラズマ生成と特性評価
3. 学会等名 令和元年電気学会A部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池祐介, 門脇和正, 青田達也, 前中志郎, 藤田和宣, 高村秀一
2. 発表標題 準大気圧ヘリウムアークプラズマ照射によるタングステン表面ナノ構造形成
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門脇和正, 菊池祐介, 青田達也, 前中志郎, 藤田和宣, 高村秀一
2. 発表標題 準大気圧直流ヘリウムアーク放電プラズマ生成と特性評価(II)
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊庭野 健造 (Ibano Kenzo) (80647470)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	永田 正義 (Nagata Masayoshi) (00192237)	兵庫県立大学・工学研究科・教授 (24506)	
研究分担者	福本 直之 (Fukumoto Naoyuki) (90275305)	兵庫県立大学・工学研究科・准教授 (24506)	

