

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01367

研究課題名(和文) 強磁場下でのプラズマ・液体金属相互作用

研究課題名(英文) Plasma and liquid metal interactions under strong magnetic field

研究代表者

上田 良夫 (Ueda, Yoshio)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30193816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め核融合炉環境を想定した強磁場下(最大5 T)でのWの溶融・凝固・粒子放出挙動を、ディラクション熱負荷を模擬できるレーザー照射を用いて研究し、表面保護層の効果、溶融時の粒子放出や損耗特性、及び溶融層挙動への強磁場影響を明らかにした。また、プラズマ照射下での蒸気遮蔽効果の信頼性の高いシミュレーションコードをPIC法をベースに開発し、ITERや原型炉でのW壁材料等への熱負荷低減効果や損耗の評価を行い、核融合装置の壁材料の寿命評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込め核融合装置のタングステン(W)壁は、プラズマ崩壊による高熱負荷を受けると表面が溶融し、粒子放出に伴う異常損耗、及び脆弱な凝固層の形成が起こる。この現象の正しい理解と、それに基づく許容熱負荷や材料寿命の評価は、核融合炉実現のために不可欠である。このためには高熱負荷で溶融した液体金属とプラズマの相互作用と、金属蒸気がプラズマを冷却して熱負荷を低減する蒸気遮蔽現象の理解が必要である。本研究では、強磁場中での基礎過程の解明を実験・シミュレーションの密接な連携のもとで進め、核融合炉(ITER等)におけるプラズマ対向材料の高熱負荷影響の評価を行い、核融合炉の実現に資する成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this project, W melt layer behavior including melting, solidification, and particle ejection was studied under high magnetic field up to 5 T simulating magnetic confinement fusion reactor conditions (ex. ITER). W melting was performed by a ND/YAG laser developed for welding purpose with pulse length up to 5 ms and controllability of pulse shape (flat square, triangle, etc.). We clarified the effects of surface coating layers, particle ejection and erosion by melting, and the effects of high magnetic field on melt layer behavior. We also made vapor-shielding simulations with newly developed PIC based codes to estimate heat flux reduction and associated erosion reduction of W and Be walls for ITER and DEMO.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ・壁相互作用 液体金属 強磁場 蒸気遮蔽効果 タングステン

## 1. 研究開始当初の背景

トカマク型磁場閉じ込め核融合炉において、プラズマ対向材料の第一候補材であるタングステン (W) [1]は、ディスラプションによる高いパルス熱負荷を受けると表面が溶融し、蒸発や突沸現象による粒子の放出とそれに伴う異常損耗やダスト発生、脆弱な凝固層の形成とそれに伴う亀裂の発生や材料破壊が起こりうる。したがって、W 材料のパルス高熱負荷影響の正しい理解と、それに基づく許容熱負荷の評価は、核融合炉実現のために欠くべからざるものであり、この評価に基づき、プラズマ対向材料の十分な寿命を確保するための制御法を確立する必要がある。このためには高熱負荷で溶融した液体金属とプラズマの相互作用の理解が重要で、特に溶融後の凝固層の表面形状 (大きな凹凸があると、熱が局所集中する) と、金属蒸気がプラズマを冷却して熱負荷を低減する蒸気遮蔽現象の理解が必要である。

これまでに高密度プラズマ実験研究やモデリング・シミュレーション研究が行われているが、現象を記述するためのモデルが不正確 (流体モデルと粒子モデルの適切な使い分けがなされていない、解析モデルをベースとしている、等)、実験との対応性評価が不十分、基礎的な物理過程や物理量の理解が不十分、等の問題があり、強磁場下での液体金属とプラズマの相互作用の理解と、それに基づく信頼性の高い対向材料へのパルス熱負荷影響評価は今だなされていない。具体的な物理課題は、W 溶融層の物性、強磁場・プラズマ照射下での溶融層動的挙動、及び溶融層からの粒子放出と凝集による微粒子形成、等の解明であるが、現象の複雑性、及び実験と理論・シミュレーションの連携が不十分、という理由から十分な成果が得られていない。特に強磁場・プラズマ存在下では、液体金属が運動すると電流が生じ、その電流が磁場と相互作用して運動を抑制する方向の力が働く。さらにこれに加えて放出粒子がイオン化すると、ラーマ運動により液体金属表面に戻り (Prompt Redeposition と呼ばれる) 実質的に損耗を減じたり、金属原子・イオンが液面近傍に局在化し、微粒子への凝集を促進する等の影響が想定される。しかしながら、これらの基礎物理過程について、核融合炉のプラズマ対向材料へのパルス熱・粒子負荷影響の評価につながる系統的な実験研究結果や適切なモデリング・シミュレーション研究結果は少ない。

本研究ではこのような学術的背景を鑑み、強磁場中での液体金属・プラズマ相互作用に関わる基礎現象の解明を実験・シミュレーションの密接な連携のもとで進め、現象の総合的な理解を深めるとともに、新たに作成する蒸気遮蔽シミュレーションコードを用いて、核融合炉 (ITER 等) における、ディスラプションに伴うプラズマ対向材料のパルス熱・粒子負荷影響の評価を行う。 [1] Y. Ueda et al., "Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond", Fusion Eng. Des., 89, (2014) 901-906.

## 2. 研究の目的

### (1) 強磁場・プラズマ照射環境下でのタングステン (W) 溶融層挙動と粒子放出 (原子、微粒子)・凝集現象の解明

強磁場下で高密度プラズマにさらされた W 溶融層挙動を実験的に調べると共に、溶融層からの蒸発・粒子放出等による粒子放出特性を調べる。表面保護層の効果についても調べる。これらの実験結果とシミュレーション (溶融層挙動 (CIP 法)) の対応性を評価することで、核融合炉強磁場環境下での溶融 W の挙動を支配する物理特性量を明らかにすると共に、W 溶融層からの粒子放出のメカニズムを明らかにする。

### (2) 蒸気遮蔽効果の信頼性の高いモデリング・シミュレーションと、トカマク型核融合炉における W 壁材料へのディスラプション熱・粒子負荷の影響評価

2次元蒸気遮蔽統合シミュレーションコードを、(1) で行った研究の知見を取り入れて開発を行う。その後、ITER や原型炉における W 対向材料へのパルス熱負荷効果を評価し、材料の損傷回避のためのプラズマ制御指針を得る。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験装置

ミリ秒パルス高磁場下 (最大 5 T, ピーク持続時間 5 ms) において、ミリ秒パルス Nd:YAG レーザー照射 (波長 1.06  $\mu\text{m}$ 、最大 6.4  $\text{GW}/\text{m}^2$ 、0.6 mm のスポットサイズ) を用いて可変パルス熱負荷を W 試料に照射し、W 溶融層を形成した。なお、熱流束は吸収エネルギーで評価している (W のレーザーエネルギー吸収率は 0.3)。溶融層の安定性に対する高磁場の影響を観察するため、溶融 W 表面を高速カメラと長距離顕微鏡システムを用いて撮影するシステムを開発した。構築した実験の概略図を図 1 に示す。試料は xyz 駆動が可能な試料台に固定されている。コイルと試料台は真空チャンバー内に設置され、拡散ポンプを用いて高真空  $10^{-3}$  Pa まで排気されている。高磁場コイルへの放電で発生する磁場をチャンバー外に設置したホール素子で検知し、レーザーのトリガ信号を生成することで、同期を行っている。信号の同期の様子を図 2 に示す。図からわかるように、レーザー照射中は高磁場が保たれている。レーザー照射が終わり、表面が冷却される過程でも数千ガウスの磁場が残存している。

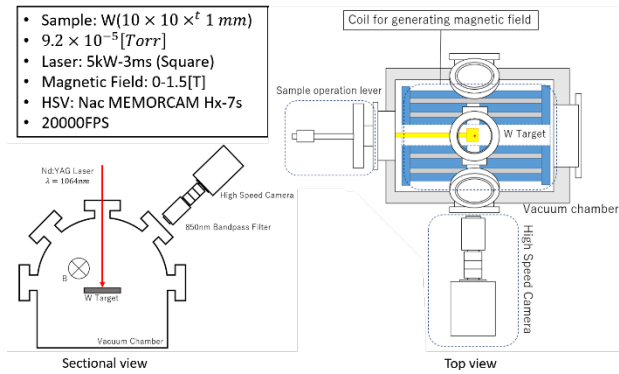


図1 高磁場中W 溶融実験装置

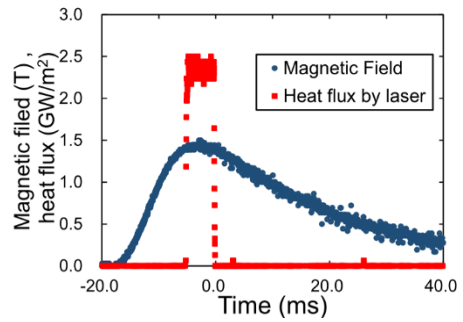


図2 磁場とレーザー照射の同期

## (2) 蒸気遮蔽シミュレーション

蒸気遮蔽現象におけるプラズマと蒸気の相互作用をシミュレーションするために、重み付きPIC法を用いたシミュレーションコードPIXYを開発した。シミュレーションコードの妥当性を検証するため、兵庫県立大学のプラズマガン装置による実験と比較した。実験ではW試料の照射による温度変化を測定し、W試料上のAl被覆の有無による到達温度の違いが観察された。実験結果と比較するためPIXYコードを用いて、プラズマシミュレーションと伝熱計算を組み合わせることで、蒸気遮蔽現象をシミュレーションした。プラズマ計算から得られる壁面への熱負荷を境界条件にし、伝熱計算を行うことで、試料表面温度を計算し、蒸気発生量を決定した。発生する蒸気はPICコードにおいて重み付き超粒子として取り扱うことで、壁面温度変化によって急激に変動する蒸気発生量を取り扱った。

## 4. 研究成果

### (1) パルス熱負荷印加に対する表面保護層の効果

熱負荷に対する表面保護層の効果を調べるため、1  $\mu\text{m}$  程度のSUS, Al, Crの薄膜をマグネトロンスパッタリングで堆積させたW試料を作成した。試料に対し、レーザー照射試験(0.8-5.2  $\text{GW}/\text{m}^2$ 、0.5 ms)を行い、照射痕についてレーザー顕微鏡解析、EDX組成解析を行った。照射痕のレーザー顕微鏡写真を図3に、表面形状変化を図4に示す。SUS被覆Wに3.7  $\text{GW}/\text{m}^2$  (0.5 ms)のレーザーを照射したところ、成分であるCrやNiが確認されないが、Feが残る部分の確認された。Al被覆Wに2.3  $\text{GW}/\text{m}^2$  (0.5 ms)のレーザーを照射したところ、高い表面保護効果が認められ、表面形状の変化が見られなかった。よってSUS被覆、Al被覆については、1  $\mu\text{m}$  程度の被覆で2  $\text{GW}/\text{m}^2$  (0.5 ms)の熱照射に複数回蒸気遮蔽効果をもたらすことが示唆された。また、Cr被覆Wに2.3-5.2  $\text{GW}/\text{m}^2$  (0.5 ms)のレーザーを照射したところ、純Wと溶融痕の違いはみられず、Crは照射面から失われていた。レーザーによる模擬試験では、プラズマ照射時における蒸気遮蔽効果まで解析することは難しいが、比較的低い熱負荷でもCr層は表面から離脱しやすい性質があることがわかった。これよりCr層は低熱負荷照射時でも高い蒸気遮蔽効果の可能性が示唆された。

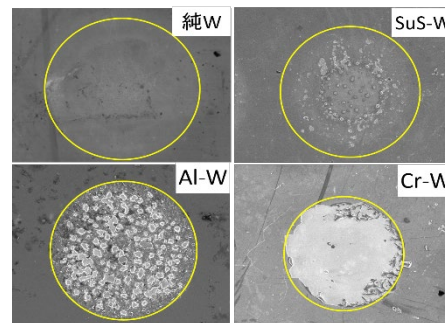


図3 0.8  $\text{GW}/\text{m}^2$ 、0.5 msのレーザー熱負荷後の照射痕

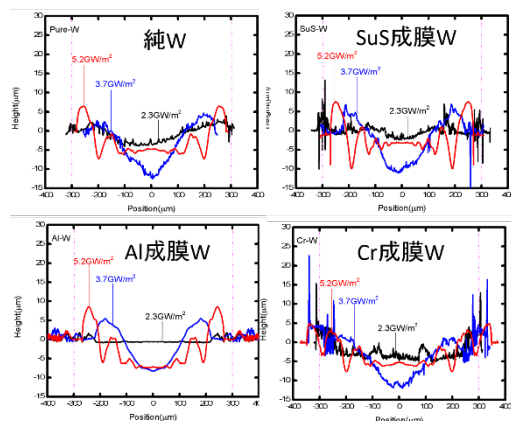


図4 レーザー照射後の表面形状変化

### (2) 照射パルス波形がW材溶融層の挙動と微粒子放出・損耗量に与える影響

可変パルス熱負荷をW試料に照射し、W溶融層を形成した。溶融層の安定性、微粒子放出特性、損耗量の照射パルス波形に対する依存性を調べるため、溶融W表面を高速カメラと長距離顕微鏡システムを用いて撮影した(図5)。総エネルギーが同じでも入射エネルギーのパルス波形が異なることで、溶融層の安定性が異なることが明らかになった。

また、照射前後の質量測定を行うことで、照射による損耗量を測定し、損耗の平均的な深さを算出した(図6)。総エネルギーを一定にし、入射パルス波形のみを変えながら実験すること

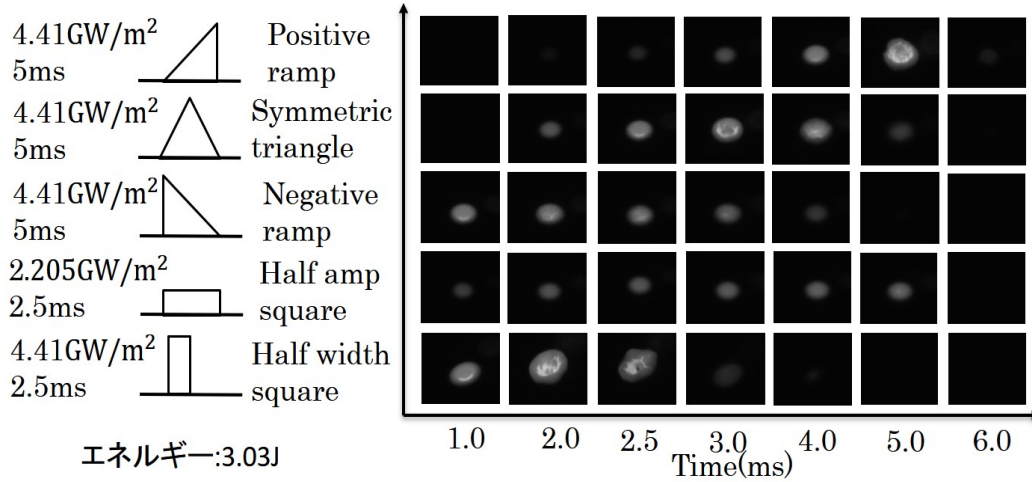


図5 W 溶融挙動のパルス波形依存性 (高速カメラによる画像 (右図))

で、入射パルス波形に対するW壁損耗の依存性を明らかにした。Half width square と Positive ramp は最大到達温度が大きい。ただ、損耗量では、Half width square が突出して大きい。これは Half width square が、高温状態である時間が長いためであると考えられる。また3つの三角形状を比べると、Negative ramp, Symmetric triangle, Positive ramp の順で損耗量が大きくなっている。これは最大ピーク熱負荷時の表面温度が高いと、最大到達温度が高くなることを示している。Negative ramp のように先に最大ピーク負荷が来ると、室温からの温度上昇となり、到達温度も低くなる。その後熱負荷が減少する過程では同時に熱の拡散・放出が起こるため、最大温度が低くなることが示唆される。

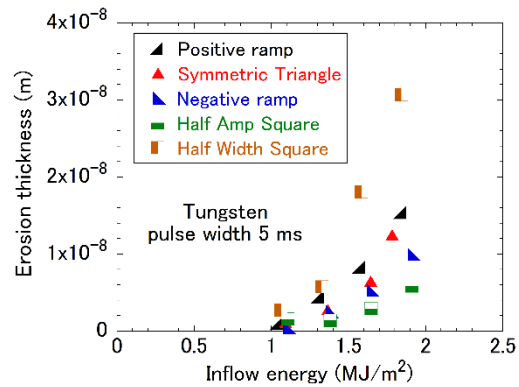


図6 W の損耗厚さの波形依存性

### (3) 高磁場下での溶融 W 層の挙動

実験において、磁場強度及び磁場分布が溶融層挙動に与える影響を評価するため、径方向中心位置 ( $r=0\text{mm}$ ) での照射と径方向に移動した位置 ( $r=5\text{mm}$ ) での照射を比較した。この実験では、溶融層が突沸せずに存在する時間を長くするため、2段パルス (初期に高い熱負荷で溶融させ、その後溶融層の表面温度をほぼ一定に保つように熱負荷を低減) を利用した。溶融後の凝固層の様子を図7にまとめて示す。表面形状を両者とも磁場に沿った方向への溶融層流れが観察された。また径方向に移動した位置での照射 (図8(B)) では、磁場垂直方向への移動も観察され、磁場勾配による電磁力の効果が示唆された。今後は、強磁場存在下で溶融層挙動の詳細なシミュレーションを進める必要がある。

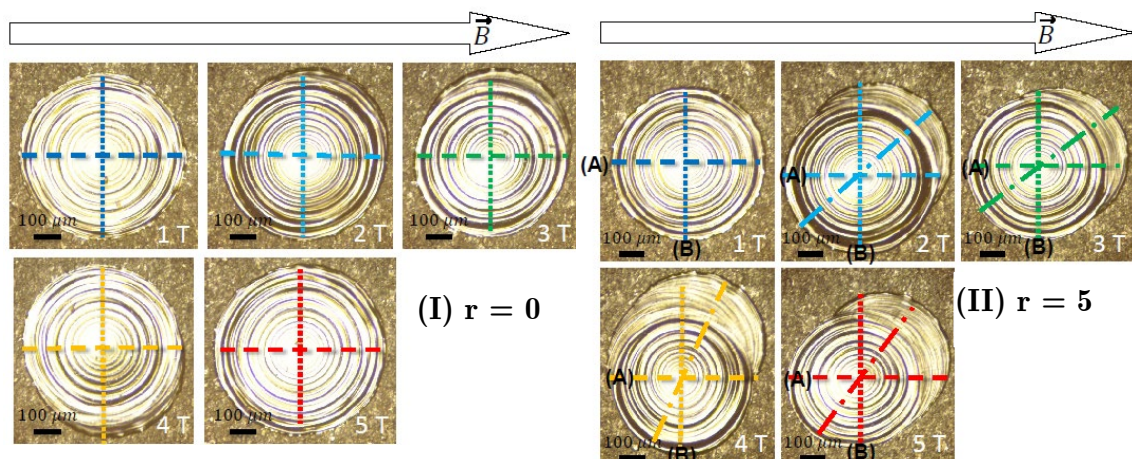


図7 W 凝固層の磁場強度依存性。中心軸上 (I) ( $r = 0\text{ mm}$ ) と中心軸から径方向に 5 mm 離れた位置 (II) ( $R = 5\text{ mm}$ )

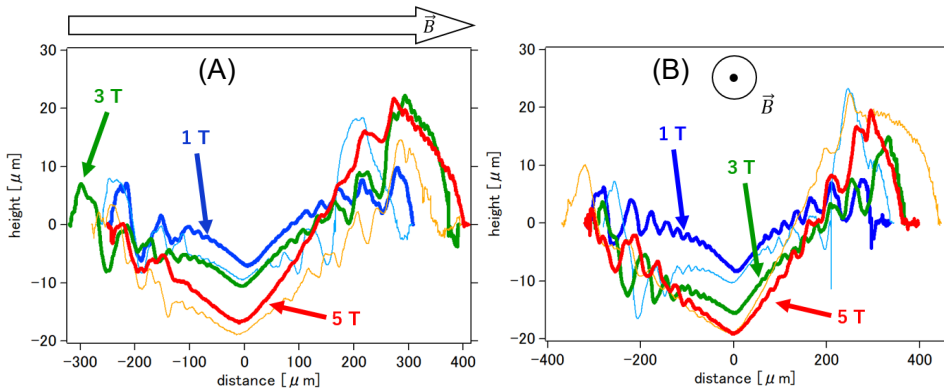


図8 W凝固層のプロファイル。(A) 磁場に沿った方向、(B) 磁場に垂直な方向

#### (4) 蒸気遮蔽シミュレーションによる、壁材料の損耗と寿命評価

独自に開発した蒸気遮蔽シミュレーションコード PIXY を用いて、ITER や原型炉における ELM やディスラプションなどの過渡熱負荷による壁面損耗量を試算した。特に蒸気遮蔽効果の有無による損耗低減を計算し、Be 壁と W 壁について比較した。PIXY コードは、重み付き PIC 法と伝熱・スパッタリングなどプラズマ-壁相互作用モデルを組み合わせ、プラズマ-壁相互作用、またプラズマ-蒸気相互作用について解析可能にした計算コードである。ELM やディスラプション負荷を模擬するため、矩形の時間波形を持つ 2 keV のプラズマ入射をシミュレーションした。蒸気遮蔽によって対向材表面に流入する熱負荷が減衰することで、対向材表面の損耗量の減少を期待できる。

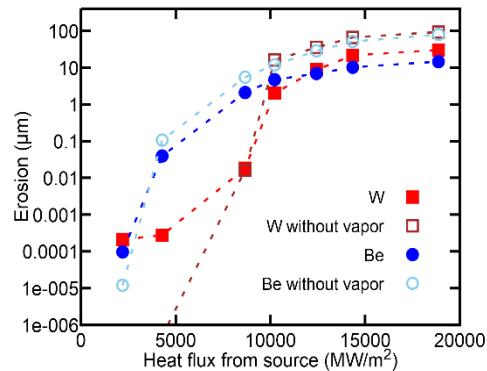


図9 パルスプラズマによる壁面の損耗量 (PIC シミュレーション)

Be 壁、W 壁について、蒸気遮蔽効果を考慮した場合と、考慮していない場合のパルスプラズマ入射による壁面損耗量を図9にまとめた。蒸気放出量の多い Be 壁の場合は蒸気遮蔽効果を考慮した場合のほうが損耗量は大きく減少していることがわかる。しかし、W 壁と比較すると、最大熱負荷 10 GW/m<sup>2</sup> 以下の範囲では損耗量が大きくなっている。最大熱負荷 10 GW/m<sup>2</sup> 以上となると、蒸気遮蔽を考慮した場合において、W 壁の損耗量が Be 壁の損耗量を上回ることが示された。また、1 μm の Be 堆積層が W 壁上に形成されていれば、10 GW/m<sup>2</sup> の熱負荷に対して十分な遮蔽効果を持ち、W 壁が保護されることがわかった。

ITER ではディスラプション時にプラズマ対向機器に発生する電磁力を懸念し、初期運転において意図的に VDE を引き起こすテストが予定されている。その際、ブラケットタイル #8 と #9 に対し、最大 200 MW/m<sup>2</sup>、200ms の過渡負荷が生じることが試算され、溶融・損耗の影響が懸念されている。そこで、蒸気遮蔽シミュレーションコードを使用し、損耗量の概算を行った。200 ms すべてにわたって計算を実行することは難しいため、試料表面温度を固定し、流入する熱負荷を 50-180 MW/m<sup>2</sup> に変化させた条件で 2 ms 計算し、得られた熱負荷減少率を蒸気遮蔽効率と定義することで、データベース化した。また、その結果を基に 1 次元伝熱モデルを用いて簡易的な損耗量予測を行った。#8 のタイルについて、蒸気遮蔽が無いときは 最大熱負荷が 190 MW/m<sup>2</sup> に達し、0.65 mm の溶融層、~5 μm の損耗が発生することが予測された。しかし、蒸気遮蔽によって、最大熱負荷は < 140 MW/m<sup>2</sup> まで低減し、0.38 mm の溶融層、0.4 μm の損耗と 90% 程度低減されることが分かった。熱負荷と損耗量についてそれぞれ、図 10 と図 11 に示した。

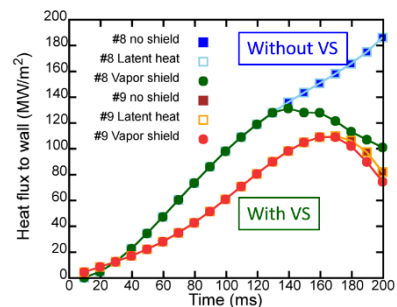


図10 VDE 時の ITER 上部タイルの過渡熱負荷

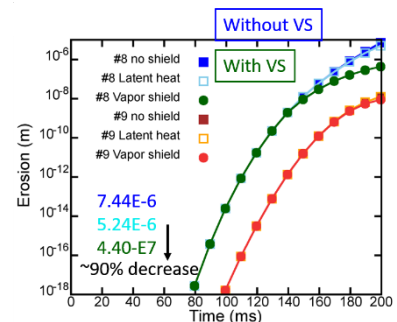


図11 VDE 時の ITER 上部タイルの過渡熱負荷

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Motoi Daichi, Ibane Kenzo, Kikuchi Yudai, Saito Sho, Okita Takafumi, Hoashi Eiji, Lee Heun Tae, Ueda Yoshio	4. 巻 165
2. 論文標題 Study on pulse shape dependence of tungsten mass erosion under disruption-like heat load	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112209 ~ 112209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.112209	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 Okita Takafumi, Matsuda Yuki, Saito Sho, Hoashi Eiji, Ibane Kenzo, Ueda Yoshio	4. 巻 171
2. 論文標題 Observation of surface deformation of tungsten exposed to single pulsed high heat flux and magnetic field for divertor design	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112547 ~ 112547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2021.112547	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 Matsuda Yuki, Yamashita Shohei, Miyamoto Yusei, Motoi Daichi, Okita Takafumi, Hoashi Eiji, Ibane Kenzo, Ueda Yoshio	4. 巻 161
2. 論文標題 In-situ measurement of surface modifications of tungsten exposed to pulsed high heat flux for divertor design in tokamak-type fusion nuclear reactors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112042 ~ 112042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2020.112042	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 Rieth, M., Doerner, R., Hasegawa, A., Ueda, Y., Wirtz, M.	4. 巻 519
2. 論文標題 Behavior of tungsten under irradiation and plasma interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 334-368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2019.03.035	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 該当する

1. 著者名 Hamaguchi Kohei, Hoashi Eiji, Okita Takafumi, Ibane Kenzo, Ueda Yoshio	4. 巻 140
2. 論文標題 Evaluation of Marangoni convection and free surface velocity of molten tungsten for tungsten divertor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 117 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.01.143	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 Ibane Kenzo, Nishijima Daisuke, Ueda Yoshio, Doerner Russell P.	4. 巻 522
2. 論文標題 LIBS measurement of trace tantalum and rhenium in tungsten for in-situ diagnostic of nuclear transmutation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 324 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2019.05.030	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 該当する

1. 著者名 Ibane Kenzo, Kikuchi Yusuke, Togo Satoshi, Ueda Yoshio, Takizuka Tomonori	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 ~ 076001
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 Hoashi Eiji, Kuroyanagi Shinpei, Okita Takafumi, Maeji Takeru, Ibane Kenzo, Ueda Yoshio	4. 巻 136
2. 論文標題 Study on melting and solidification behaviors of tungsten loaded by high heat flux for divertor in tokamak fusion reactor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 350 ~ 356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2018.02.028	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 Hamaguchi Kohei, Teramoto Yu, Hoashi Eiji, Okita Takafumi, Ibane Kenzo, Ueda Yoshio	4. 巻 136
2. 論文標題 Development of a simulation method for evaluating Marangoni convection with free surface for tungsten divertor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 270 ~ 275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2018.02.007	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 Tanaka A., Ibane K., Takizuka T., Ueda Y.	4. 巻 58
2. 論文標題 A Coulomb collision model for weighted particle simulations with energy and momentum conservation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 451 ~ 456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201700121	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 Nishijima D., Ueda Y., Doerner R.P., Baldwin M.J., Ibane K.	4. 巻 141
2. 論文標題 Laser-induced breakdown spectroscopy measurement of a small fraction of rhenium in bulk tungsten	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 94 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sab.2018.01.013	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 該当する

1. 著者名 Ibane K., Sabau A.S., Tokunaga K., Akiyoshi M., Kiggans J.O., Schaich C.R., Katoh Y., Ueda Y.	4. 巻 16
2. 論文標題 Surface morphology of Tungsten-F82H after high-heat flux testing using plasma-arc lamps	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 128 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2018.06.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する



1. 著者名 Ueda Y., Schmid K., Balden M., Coenen J.W., Loewenhoff Th., Ito A., Hasegawa A., Hardie C., Porton M., Gilbert M.	4. 巻 57
2. 論文標題 Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 092006 ~ 092006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa6b60	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 該当する

1. 著者名 Nogami Shuhei, Toyota Michitoshi, Guan Wenhai, Hasegawa Akira, Ueda Yoshio	4. 巻 120
2. 論文標題 Degradation of tungsten monoblock divertor under cyclic high heat flux loading	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 49 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.04.102	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 Lee H T, Ando S, Coenen J W, Mao Y, Riesch J, Gietl H, Kasada R, Hamaji Y, Ibane K, Ueda Y	4. 巻 T170
2. 論文標題 Longitudinal and shear wave velocities in pure tungsten and tungsten fiber-reinforced tungsten composites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 014024 ~ 014024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1402-4896/aa89c7	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 該当する

1. 著者名 伊庭野健造, 滝塚知典	4. 巻 93
2. 論文標題 ペーパーシールドリングにおける 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 J. Plasma Fusion Res.	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 Ibano K., Nishijima D., Yu J.H., Baldwin M.J., Doerner R.P., Takizuka T., Lee H.T., Ueda Y.	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation and particle simulation of vaporized W, Mo, and Be in PISCES-B plasma for vapor-shielding studies	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 278 ~ 282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2017.01.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maeji T., Ibano K., Yoshikawa S., Inoue D., Kuroyanagi S., Mori K., Hoashi E., Yamanoi K., Sarukura N., Ueda Y.	4. 巻 124
2. 論文標題 Laser energy absorption coefficient and in-situ temperature measurement of laser-melted tungsten	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 287 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.04.025	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 Inoue Daisuke, Ibano Kenzo, Yoshikawa Satoru, Maeji Takeru, Ueda Yoshio	4. 巻 124
2. 論文標題 Molten layer characteristics of W materials and film coated W by pulsed laser irradiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 316 ~ 320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.03.160	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40件(うち招待講演 3件/うち国際学会 18件)

1. 発表者名 K. Ibano, Y. Kikuchi, Y. Ueda, T. Takizuka
2. 発表標題 Contribution of vapor shielding at metal walls to the erosion suppression during transient events
3. 学会等名 24th international conference on plasma surface interaction in controlled fusion devices (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Motoi, K. Imano, Y. Kikuchi, S. Saito, T. Okita, E. Hoashi, Y. Ueda
2. 発表標題 Study on pulse shape dependence of tungsten mass erosion under disruption-like heat load in high magnetic field
3. 学会等名 31st Symposium on Fusion Technology (SOFT2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上畑憲矢、伊庭野健造、エリックワーフナー、リハンテ、上田良夫
2. 発表標題 PE-PLD法を用いたタングステン成膜に関する研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井一生、伊庭野健造、上畑憲矢、リハンテ、上田良夫
2. 発表標題 ヘリウム励起ナノ構造を有する酸化タングステンの酸化状態と水素ガスセンシング性能の関係
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池雄大、伊庭野健造、本井大智、斉藤晶、上田良夫、リハンテ
2. 発表標題 磁場形状が過渡的熱負荷下でのタングステン溶融挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木雅也、リハンテ、上田良夫、伊庭野健造、松田直也、瀧田朋広、中林誠治
2. 発表標題 タングステンスパッタリング率の結晶方位依存性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊庭野健造、上田良夫、滝塚知典
2. 発表標題 重み付きPIC法を用いた蒸気記遮蔽シミュレーションによる過渡負荷時の金属壁損耗予測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Matsuda, S. Yamashita, Y. Miyamoto, D. Motoi, T. Okita, E. Hoashi, K. Imano, Y. Ueda
2. 発表標題 In-situ measurement of surface modifications of tungsten exposed to pulsed high heat flux for divertor design in tokamak-type fusion nuclear reactors
3. 学会等名 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 22-27 Sep. 2019, Budapest, Hungary (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Obiki, M., Imano, K., Ueda, Y., Takizuka, T.
2. 発表標題 Introduction of kinetic effects to 1-D SOL/divertor plasma fluid simulation by collaborating with a particle model
3. 学会等名 46th EPS Conference on Plasma Physics, July 2019, Milan, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ibano, K., Ueda, Y., Takizuka, T.
2. 発表標題 Pulse shape dependence of vapor shielding efficiency during transient loads
3. 学会等名 46th EPS Conference on Plasma Physics, 12 July 2019, Milan, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊庭野 健造, 上田 良夫, 滝塚 知典
2. 発表標題 重み付きPIC法による過渡熱負荷における蒸気遮蔽効果のパルス波形依存性
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会 2019.11.29-12.2 中部大学春日井キャンパス (愛知県春日井市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大引麻友子, 伊庭野健造, 上田良夫, 滝塚知典
2. 発表標題 1次元SOL/divertor流体シミュレーションへ粒子モデルを用いた運動論効果の導入
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会 2019.11.29-12.2 中部大学春日井キャンパス (愛知県春日井市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井優介, 山ノ井航平, 重森啓介, 乗松孝好, 猿倉信彦, 伊庭野健造, 上田良夫
2. 発表標題 タングステンプラズマ対向壁への中性子照射量の診断精度向上と不純物輸送解析に向けた紫外スペクトル観測の可能性
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会 2019.11.29-12.2 中部大学春日井キャンパス (愛知県春日井市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河原竜也, H.T.Lee, 伊庭野健造, 上田良夫
2. 発表標題 重水素-ヘリウム同時照射下におけるタングステン-レニウムの重水素吸蔵量特性
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会 2019.11.29-12.2 中部大学春日井キャンパス (愛知県春日井市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田良夫
2. 発表標題 PHENIX計画の概要
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会09月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中愛士, 伊庭野健造, 大引麻友子, 滝塚知典, Lee Heun Tae, 上田良夫, 林伸彦, 星野一生
2. 発表標題 粒子モデルを用いた流体シミュレーションへの運動論効果の導入
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 伊庭野 健造、Lee Heun Tae、上田 良夫
2. 発表標題 重相構造プラズマにおけるシース挙動のPICシミュレーション
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 宮本 悠生, 伊庭野 健造, 本井 大智, 松田 勇希, 山下 祥平, リ ハン テ, 帆足 英二, 沖田 隆文, 上田 良夫
2. 発表標題 disruption様熱負荷下でのタングステン表面溶融挙動の熱負荷パルス形状依存性
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 安藤 颯介, リ ハンテ, 関 洋治, 鈴木 哲, 伊庭野 健造, 上田 良夫
2. 発表標題 レーザー超音波法によるタングステンモノブロックにおける表面破壊亀裂の非破壊検出及び評価
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 杉原輝, 伊庭野健造, 上田良夫, 仲野友英, 西島大輔, 押鐘寧, 山ノ井航平, 猿倉信彦, 福井優介
2. 発表標題 タングステン壁への中性子照射量評価のためのLIBSによる微量レニウム検出
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 宮本悠生, 伊庭野健造, 松田勇希, Lee Heun Tae, 上田良夫, 帆足英二
2. 発表標題 パルスレーザーによるdisruption様熱負荷下での溶融タングステン挙動の観察
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 田中愛士, 伊庭野健造, 滝塚知典, 上田良夫, 星野一生
2. 発表標題 粒子シミュレーションとの結合による流体シミュレーションへの運動論効果の導入
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 伊庭野健造, 滝塚 知典, Lee Heun Tae, 上田 良夫
2. 発表標題 重み付きPIC法によるW壁におけるペーパーシールド効果のシミュレーション
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 上田良夫
2. 発表標題 シンポジウム4: 炉心プラズマとダイバータの接点, 4. 材料の観点からの課題
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenzo Ibane, Y. Kikuchi, A. Tanaka, S. Togo, Yoshio Ueda, Tomonori 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(PSI2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1 . 発表者名 S. Ando, H.T. Lee, J.W. Coenen, Y. Mao, R. Kasada, J. Riesch, and Y. Ueda
2 . 発表標題 Micro- and macro- elastic properties of tungsten fiber-reinforced tungsten composites probed by nano-indentation and laser ultrasonics
3 . 学会等名 23rd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices(PSI2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Tanaka, K. Ibane, M. Obiki, T. Takizuka, H. T. Lee, Y. Ueda, N. Hayashi, K. Hoshino
2 . 発表標題 Introduction of kinetic effects to fluid simulation by a particle model
3 . 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Miyamoto, K. Ibane, D. Motoi, S. Yamashita, Y. Matsuda, Y. Ueda, E. Hoashi, T. Okita
2 . 発表標題 Observation of melting tungsten surface under disruption-like thermal load
3 . 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (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 APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Sugihara, K. Ibane, Y. Ueda, T. Nakano, D. Nishijima, Y. Oshikane, K. Yamanoi, N. Sarukura
2. 発表標題 Detection of trace rhenium in tungsten by laser-induced breakdown spectroscopy
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 樹、上田 良夫、リ ハンテ、伊庭野 健造
2. 発表標題 金属薄膜を有するタングステンのパルス熱負荷影響
3. 学会等名 PLASMA2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中 愛土、伊庭野 健造、滝塚 知典、リ ハンテ、上田 良夫
2. 発表標題 重み付き粒子法におけるエネルギー・運動量保存クーロン衝突モデル
3. 学会等名 PLASMA2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊庭野 健造、滝塚 知典、Lee Heun Tae、上田 良夫
2. 発表標題 高熱負荷照射時におけるペーパーシールドのPICシミュレーション
3. 学会等名 PLASMA2017
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Ueda, D. Clark, Y. Hatano, T. Yokomine, A. Sabau, M. Yoda, T. Hinoki, A. Hasegawa, Y. Katoh, L. Garrison, Y. Oya, M. Shimada, D. Buchenauer
2 . 発表標題 Overview of Japan-US project PHENIX: Technological Assessment of He-cooled Divertor with Tungsten armor for DEMO reactors
3 . 学会等名 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. IBANO, A.TANAKA, Y.KIKUCHI, 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 transients heat loads using weighted particle model
3 . 学会等名 16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices(PET16) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 A.Tanaka, K.Ibano, T.Takizuka, H.Lee, Y.Ueda
2 . 発表標題 A Coulomb Collision Model for Weighted Particle Simulations with Energy
3 . 学会等名 16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices(PET16) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Eiji Hoashi, Shinpei Kuroyanagi, Takafumi Okita, Takeru Maeji, Kenzo Ibano, Yoshio Ueda
2 . 発表標題 Study on Melting and Solidification Behaviors of Tungsten Loaded by High Heat Flux for Divertor in Tokamak Fusion Reactor
3 . 学会等名 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohei Hamaguchi, Yu Teramoto, Eiji Hoashi, Takafumi Okita, Kenzo Ibane, Yoshio Ueda
2. 発表標題 Development of Simulation Method for Evaluating Material Behavior Loaded by High Heat Flux for Tungsten Divertor
3. 学会等名 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. T.Lee,T.Nagase,E.Taguchi,H.Yasuda,Y.Ueda
2. 発表標題 Crystal Orientation Dependence of Displacement Damage in Tungsten (100) and (110) Probed using In-Situ High Voltage Electron Microscopy
3. 学会等名 18th International Conference on Fusion Reactor Materials(ICFRM-18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Ando,H.T.Lee,K.Ueda,Y.Seki,S.Suzuki,K.Ibane and Y.Ueda
2. 発表標題 Non-Destructive Detection and Characterization of Surface-Breaking Cracks in Tungsten Monoblock using Laser Ultrasonics
3. 学会等名 18th International Conference on Fusion Reactor Materials(ICFRM-18) (国際学会)
4. 発表年 2017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	菊池 祐介  (Kikuchi Yusuke)  (00433326)	兵庫県立大学・工学研究科・准教授    (24506)	

6. 研究組織（つづき）

	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	帆足 英二 (Hoashi Eiji)  (40520698)	大阪大学・工学研究科・准教授  (14401)	
研究分担者	仲野 友英 (Nakano Tomohide)  (50354593)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・上席研究員（定常）  (82502)	
研究分担者	沖田 隆文 (Okita Takafumi)  (50772183)	大阪大学・工学研究科・助教  (14401)	
研究分担者	古河 裕之 (Furukawa Hiroyuki)  (70222271)	公益財団法人レーザー技術総合研究所・理論・シミュレーションチーム・研究員  (74417)	
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	L e e H e u n T a e (Lee Tae)  (90643297)	大阪大学・工学研究科・講師  (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関

米国	University of California, San Diego			
米国	Oak Ridge National Laboratory			