

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249132

研究課題名(和文) パルス高熱負荷によるタングステン材料の溶融・凝固挙動の解明と表面保護層の評価

研究課題名(英文) Melt layer dynamics and solidification behavior of tungsten by pulsed heat loading and evaluation of surface protection layer

研究代表者

上田 良夫 (Yoshio, Ueda)

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) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)： ディスラプション熱負荷を模擬できるレーザーを用いて、Wの溶融挙動の研究を行った。その結果、融点を越えて沸点に近づくと、表面の不安定性が顕著になること、溶融層の安定性は、W材料(純W、W-Re合金、W-Ta合金)で異なること、が分かった。また、Alの表面保護層は表面の損傷を大きく低減できることが示された。表面損傷を持つWモノブロックの熱負荷試験より、表面損傷は大きな亀裂の起点として働くことが分かった。

蒸気遮蔽シミュレーションを粒子法(PIC法)を用いて行った。その結果、Be対向壁では蒸気遮蔽効果が熱負荷の低減に大きく貢献したが、Wの蒸気遮蔽効果は小さいという結果が得られた。

研究成果の概要(英文)： To simulate heat loadings by disruption in tokamak fusion reactors, pulsed laser irradiation experiments to tungsten were performed. Surfaces of melt layers became unstable as surface temperature approaches boiling temperature. As a result, significant surface morphology changes and particle emissions become significant. Melt layer stability for different W materials (pure W, W-Re, W-Ta) showed different behavior as melt layer of W-Ta was lost by bumping while the other two W materials were not. Surface protection layers by Al thin film can effectively protect surface damage. Surface damage (cracking and uneven re-solidified layers) became initiation points for large cracking. Simulation of vapor shielding was performed with a particle simulation code (PIC method). The results showed that Be PFM effectively cools down incoming plasma, but W PFM does not penetrate into edge plasma and does not cool the plasma as effectively as Be PFM.

研究分野：核融合理工学

キーワード：タングステン ディスラプション パルス熱負荷 溶融挙動 表面保護 蒸気遮蔽

1. 研究開始当初の背景

核融合炉において、高熱負荷を受けるプラズマ対向材料第一候補材のタングステンは、ディスラプションや ELM (プラズマ周辺局在モード) 等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微粒子の発生とそれに伴う異常損耗や、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懸念される。

したがって、パルス高熱負荷制御は核融合炉の長期間の安定運転に不可欠であり、そのためのディスラプションや ELM の制御研究が進んでいる。しかしながら、ディスラプションなどによるパルス高熱負荷を完全に抑制することは、プラズマ制御の観点からは極めて高いハードルであり、現実的ではない。このことから、パルス高熱負荷によるプラズマ対向材料の溶融・凝固・破壊挙動の理解、蒸気遮蔽効果の評価、それに基づく許容熱負荷評価は核融合炉実現のために必要である。

これまで、タングステン材料に対するパルス高熱負荷影響の研究は、ELM 様パルス熱負荷 (パルス幅: 0.2 ~ 1 ms、1 パルスあたり熱入力: 0.1~2.0 MJ/m² (表面溶融熱負荷の最大 2 倍程度)) による亀裂の発生・進展や表面溶融の影響の研究が、特に繰り返し回数が多い場合 (10² ~ 10⁶ ショット) について行われてきた。しかしながら、核融合炉におけるディスラプションを想定したパルス高熱負荷 (パルス幅: ~ 2 ms、熱入力: 最大 ~ 20 MJ/m² (表面溶融熱負荷の 10 倍程度)) でのタングステンの溶融・凝固挙動の体系的な研究は行われていない。また、溶融軽減を目的とした表面保護の研究もほとんど行われていない。さらに、溶融層から発生した金属蒸気がプラズマを冷却して、実効的な熱負荷を低減する蒸気遮蔽効果の信頼できる定量的評価は不十分である。

2. 研究の目的

本研究では、ディスラプション時の熱負荷に相当する、表面溶融熱負荷を大きく超えるパルス熱負荷が強磁場下で印加された場合の溶融・凝固現象の解明、及び初期的な蒸気遮蔽効果の評価を行う。さらに、表面の溶融が W モノブロックの健全性に与える影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) ディスラプション様の熱負荷 (最大 20 MJ/m²、パルス幅: 1 ~ 5 ms) が、タングステン系材料 (純タングステン、タングステン合金、タングステン複合材料) に照射された場合の溶融層の挙動を、溶接用パルス Nd/YAG レーザー (最大 7.5 kW、パルス幅 5 ms) を用いて調べる。溶融時の表面温度分布や表面形状の変化を高速カメラを用いて評価する。

(2) シミュレーション (Cubic Interpolated Propagation (CIP) 法) を用いて、W 溶融

層のシミュレーション手法を開発し、実験結果との対応性を検討する。

(3) タングステン表面に低融点材 (Sn、Al) の保護層を形成し、パルス熱負荷に対する保護層の溶融・昇華によるタングステン基材への影響を系統的に調べる。

(4) ITER のタングステンモノブロック材を用いたプラズマ対向機器について、ELM やディスラプション様熱負荷による溶融で生じた脆化や亀裂が定常熱サイクルに与える影響を評価する。

(5) 新たに開発した、1 次元蒸気遮蔽シミュレーションコードを用いて、蒸気遮蔽効果の評価を行い、既存の実験データ (プラズマガン実験) との対応性を評価する。

4. 研究成果

(1) W 溶融実験

Nd/YAG レーザー (波長 1064nm) を W 試料に照射し、表面の溶融状態を調べる実験装置を製作した。その概略図を図 1 に示す。レーザーの照射最大パワーは 7 kW で、スポットサイズは 0.6 mm である。タングステンのエネルギー吸収率を 0.3 とすると、最大で 6.4 GW/m² のパワー密度の照射が可能であり、これは、室温 W への溶融限界熱負荷のほぼ 4.2 倍に対応する (パルス幅 1 ms、常温照射の場合)。

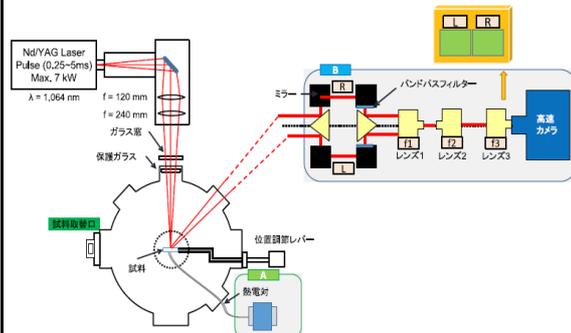


図 1 レーザー照射実験装置

溶融面から放出される熱輻射光 (450 nm、600 nm) を測定しこれらの強度比から表面温度分布を求めた。その結果を図 2 に示す。簡単な熱解析の結果と一致したことから、パワーが低い条件では、レーザーの吸収率は、液体金属状態であっても、ほぼ 0.3 と仮定して良いことが分かった。しかし、溶融限界の 2.5

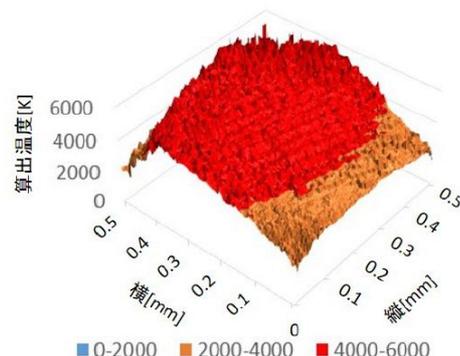


図 2 2 色温度測定による表面温度分布

倍以上のパワーを与えると、レーザーの吸収率が上昇し始め、溶融限界の3倍程度で0.55程度まで上昇した。また、このような条件下では、高温部が偏って存在し、さらに溶融金属が動いていることが分かった。詳細な解析は今後行うが、金属蒸気の反力により生じた不安定性などがこれらの原因と考えられる。

レーザースポット中心の温度の時間変化を図3に示す。(a)は溶融限界の1.5倍、(b)は溶融限界の2.3倍のエネルギーを照射した場合である。表面温度が5000 Kに近づくと、温度が振動し、溶融金属の表面が不安定になっていることが示唆される。また、これらの照射後の表面状態を図4に示す。表面温度が振動する条件(図3(b))では、凝固後の表面に同心円状の波状構造が現れており、溶融表面がダイナミックに運動していたことが分かる。今後は、これらの表面形状から凝固のメカニズムや溶融タングステンの物性値などを導出を試みる。

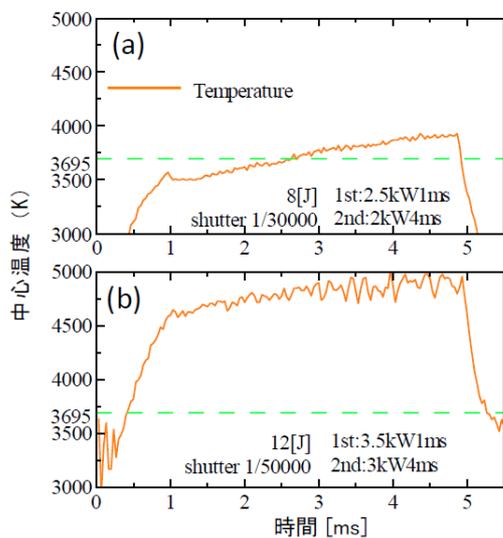


図3 スポット中心の温度変化

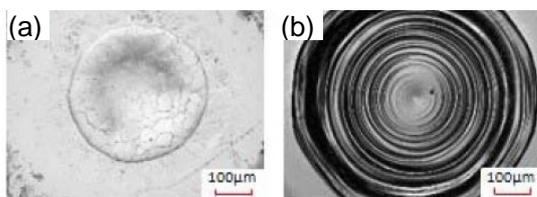


図4 凝固後の表面形状。(a)と(b)は図3の(a)と(b)に対応

さらに異なるW材料(純W、W-Re、W-Ta)についてレーザー熱負荷実験を行った。エネルギーが低い場合は、溶融層の凝固挙動はどれもほぼ同じで、中心が少しへこみ周辺が盛り上がる。しかしながら、エネルギーを高くすると、逆に中心が盛り上がり、また、図4のような細かいしわの様な形状が、純WとW-Reでは見られた。一方、W-Taでは突沸が起こり、溶融粒子放出により、溶融部分がほぼすべて失われるという現象があった。これらより、純WやW-Reが溶融・凝固挙動という観点からは使用が望ましいと言える。

(2) 溶融層挙動のシミュレーション

Wへのレーザー照射実験によるWの溶融とその溶融層の挙動をC-CUP法(CIP-Combined Unified Procedure)を用いて、シミュレーションすることを試みた。この方法では、連続の式、運動方程式、エネルギー輸送方程式、状態方程式を用いて、密度と温度、及び圧力を算出する。今回の様な相変化を伴う系の計算に用いられる手法である。

この手法を用いて、まずナノ秒オーダーのレーザーアブレーションのシミュレーションを行ったところ、おおむね実験と対応する結果が得られた。今後はレーザー溶融を再現するためのチューニングを施して、W溶融の正確な計算を行い、溶融タングステンの特性評価を行う。

(3) 表面保護層による溶融影響の低減

タングステンのパルス熱負荷による損傷の低減法として、表面保護層の影響評価を行った。表面保護層として、低融点材料であるAlとSnのターゲットを用いて、W試料の上に1 μmの膜をマグネトロンスパッタリングにより生成した。その後、パルス幅0.5 msでパルスエネルギーを変化させてレーザーを照射し、保護膜の有無がWの溶融挙動に与える影響を評価した。

Wに直接熱負荷を与えた場合(a)と、Alの保護膜を形成した場合(b)について、溶融後の凝固層の形状を調べた結果を図5に示す。すべてのエネルギー密度条件で、表面の溶融が観察された。特に保護膜無しで5.2 GW/m²

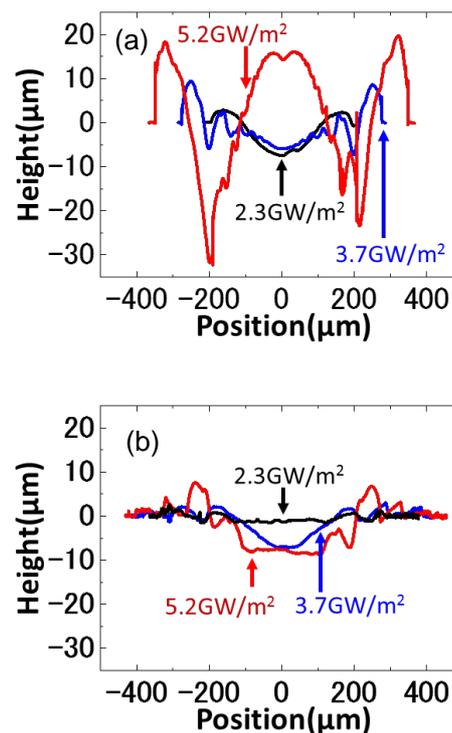


図5 Alの保護膜(1 μm)によるW溶融挙動の違い(パルス幅0.5 ms)(a)保護膜無し、(b)保護膜有

の場合は、溶融層の温度が沸点近傍まで上昇し、表面形状の大きな変化が観察された(図5(a))。一方でAlの保護膜がある場合(図5(b))は、表面の溶融はどのパルス熱負荷条件でも少なく、特に最大のパルス熱負荷条件においても、表面形状の大きな変化は認められず、わずか1 μmの保護膜でもその保護効果は非常に大きいことが分かった。Alの蒸気圧曲線は、Beのそれに近く、ITERでBeが堆積したWダイバータでも同様の保護効果があると思われる。また、Sn保護層の場合も実験したが、SnがWと急激に合金化して、かえって表面損傷が大きくなった。さらに今後は異なる材料を評価する。

(4) 表面損傷を持つWモノブロック材の熱負荷試験

表面にパルス熱負荷を与えて、表面に損傷(亀裂、溶融)を与えたWモノブロック試料について、ITERの定常熱負荷(10 MW/m²、300サイクル)とSlow Transient熱負荷(20 MW/m²、300サイクル)を与えて、表面状態の変化や冷却管にまで達する大きな亀裂の発生の有無を調べた。

実験では、パルスプラズマにより、熱負荷(溶融限界以下、溶融限界以上)を与えたWモノブロック、および電子ビームで溶融痕を形成したWモノブロックについて、表面損傷なしのものとともに、熱負荷実験を行った。その結果を図6に示す。まず、ITERの定常熱負荷であ

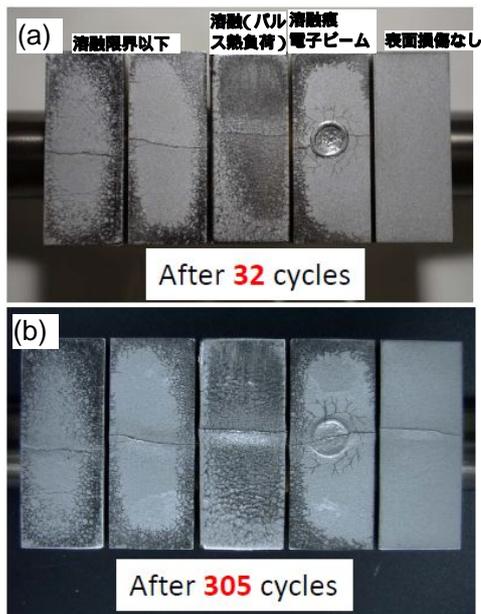


図6 表面損傷を持つWモノブロックに、20 MW/m²の熱負荷を(a)32サイクルと(b)305サイクル、照射したのちの表面状態。

る10 MW/m² - 300ショットの照射を行ったが、特に変化は見られなかった。次に、20 MW/m²の熱負荷で繰り返し照射を行った結果、Wモノブロックを横断する大きな亀裂が、表面損傷のあるモノブロックで32サイクル以下で発生した(図6(a))。一方、表面損傷の無いWモノブロックでは、32サイクルの熱負荷では大きな亀裂

は見られないが、305サイクルの熱負荷印加後に、同様の亀裂が見られた(図6(b))。

最近の研究で、Wのバルク材料を亀裂が入りにくいものに変えることで、20 MW/m²、1000サイクルの条件でも亀裂が発生しないことが分かっており、この実験ではバルク材料にやや問題があったことが分かっている。しかしながら、その様な場合でも表面の損傷の有無は亀裂発生に対して大きな影響を与えることが分かってきた。すなわち、表面損傷は亀裂の起点となり、容易に亀裂を発生させることが明らかになった。今後、大きな亀裂の発生しない材料を使用したWモノブロックにおいても、表面損傷が亀裂の進展に影響しないかどうかを確かめる必要がある。

(5) 蒸気遮蔽効果のシミュレーション

ディスラプションにおいて、高いエネルギーを持つプラズマが対向壁に接触した場合に、初期の熱で溶融した対向壁材料が蒸発してプラズマを冷却し、壁への実効的な熱負荷を下げる効果があることが知られている。しかしながら、この現象を定量的に評価することは簡単ではなく、プラズマ相・気相・液相・固相が隣接・混合する複雑な状態における液体金属の挙動、粒子の電離・輸送・凝集、及び放射輸送などの様々な現象を、粒子モデルや流体モデルを適材適所に利用して評価しなければならない。特に、これまでの研究では、主に流体モデルを用いた研究が主流であったが、このモデルではプラズマと溶融金属表面近傍における粒子の運動を正しく記述できないという問題があった。そこで、本研究では、PIC法を用いた粒子コードにより対向壁近傍のプラズマ特性や粒子の運動をより正確に記述することで、精度の高い蒸気遮蔽効果の見積もりを行った。

図7にシミュレーションの結果を示す。ここでは、対向壁からの距離のみを空間変数とした1次元モデルで計算を行っている。ベリリウム対向壁(a)の場合は、壁から放出されたベリリウム蒸気が、壁近傍で高い放射損失を示し、プラズマの温度を下けていることが分かる。一方、タングステン対向壁(b)の場合は、壁から放出されたタングステンが短い距離で電離し、その後ラーマ-運動によって再堆積する確率が高く、プラズマ中へ効率よく侵入することができず、放射損失もベリリウムに比べて小さく、プラズマ冷却の効果が低いことが示された。

この結果は、タングステンの場合は、蒸気遮蔽効果が効率的に働かない可能性を示唆しており、ディスラプションに対する壁の耐性という観点からは好ましくない。今後は、基礎過程の適切なモデリングや、実験結果との比較などを通して、さらに信頼性の高い結果を得ることを目的とする。

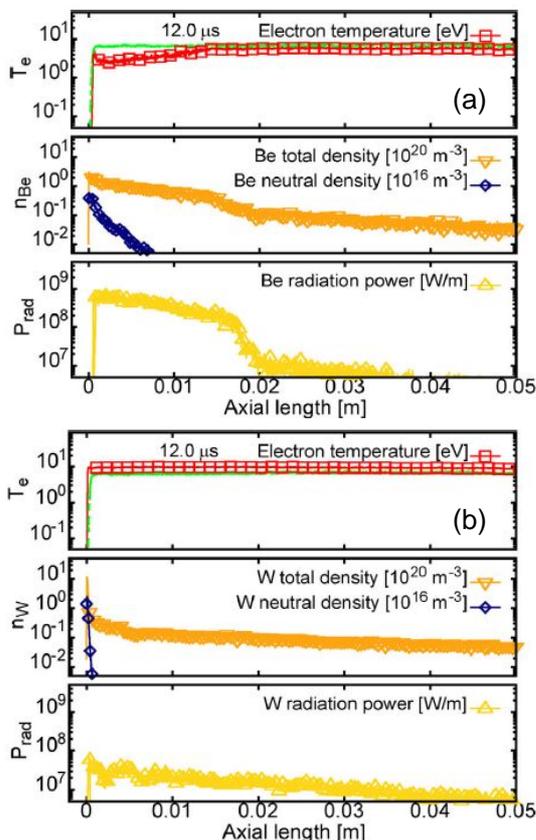


図7 蒸気遮蔽効果のシミュレーション結果。(a)ベリリウム対向壁、(b)タングステン対向壁。上から、電子温度、W密度、放射損失。

(6) まとめ

ディスラプションの熱負荷を正確に模擬できるレーザーを用いて、表面温度の2次元計測やステレオ撮像法を用いて、タングステンの溶融挙動の研究を行った。その結果、融点を超えて沸点に近づくと、表面の不安定性が顕著になることが分かった。これは蒸発原子の反力や、液体金属内部の対流の影響と考えられる。また、溶融層の安定性は、W材料(純W、W-Re合金、W-Ta合金)で異なり、純WやW-Reが沸点近傍でも突沸しないという点で望ましい。

ディスラプション熱負荷からの表面損傷保護の観点では、Alを表面保護層として用いると表面の損傷を大きく低減できることが示された。

表面に損傷を持つWモノブロックの熱負荷試験より、表面損傷は大きな亀裂の起点として働くことが分かった。ただ、バルク材の特性向上により、表面損傷からの亀裂の進展を防止できる可能性がある。

蒸気遮蔽効果のシミュレーションを従来あまり用いられてこなかった粒子法(PIC法)を用いて行った。その結果、Be対向壁では蒸気遮蔽効果が熱負荷の低減に大きく貢献したが、タングステンの蒸気遮蔽効果は小さく、今後のさらなる検討の必要性を示唆した。

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25件)

T. Maeji, K. Ibano, S. Yoshikawa, D. Inoue, S. Kuroyanagi, K. Mori, E. Hoashi, K. Yamanoi, N. Sarukura, Y. Ueda, Laser energy absorption coefficient and in-situ temperature measurement of laser-melted tungsten, Fusion Engineering and Design, 査読有, in print, 2017

10.1016/j.fusengdes.2017.04.025

D. Inoue, K. Ibano, S. Yoshikawa, T. Maeji, Y. Ueda, Molten layer characteristics of W materials and film coated W by pulsed laser irradiation, Fusion Engineering and Design, 査読有, in print, 2017

10.1016/j.fusengdes.2017.03.160

K. Ibano, D. Nishijima, J.H. Yu, M.J. Baldwin, R.P. Doerner, T. Takizuka, H.T. Lee, Y. Ueda, Observation and particle simulation of vaporized W, Mo, and Be in PISCES-B plasma for vapor-shielding studies, Nuclear Materials and Energy, 査読有, in print, 2017

10.1016/j.nme.2017.01.016

Y. Hamaji, H.T. Lee, A. Kreter, S. Möller, M. Rasinski, M. Tokitani, S. Masuzaki, A. Sagara, M. Oya, K. Ibano, Y. Ueda, R. Sakamoto, Damage and deuterium retention of re-solidified tungsten following vertical displacement event-like heat load, Nuclear Materials and Energy, 査読有, in print, 2017

10.1016/j.nme.2016.11.003

K. Ibano, S. Togo, T.L. Lang, Y. Ogawa, H.T. Lee, Y. Ueda, T. Takizuka, Simulations of Tungsten Re-deposition Using a Particle-In-Cell Code with Non-uniform Super Particle Sizes, Contribution of Plasma Physics, 査読有, Vol. 56, 2016, pp. 705-710

10.1002/ctpp.201610040

Kikuchi, Y., Sakuma, I., Kitagawa, Y., Asai, Y., Onishi, K., Fukumoto, N., Nagata, M., Ueda, Y., Kurishita, H., Surface modifications on toughened, fine-grained, recrystallized tungsten with repetitive ELM-like pulsed plasma irradiation, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 463, 2015, pp. 206-209

10.1016/j.jnucmat.2014.11.107

Tanaka, Y., Lee, H.T., Ueda, Y., Nagata, M., Kikuchi, Y., Suzuki, S., Seki, Y., Effect of surface damage on thermal response of tungsten monoblocks, 査読

有, Fusion Science and Technology, 2015, Vol. 68, 2015, pp. 433-437
10.13182/FST15-109

Ibano, K., Tsutsui, T., Lang, T.L., Togo, S., Ogawa, Y., Effects of impurity transport and melt layer motion to the tungsten wall erosion during anomaly events, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 463, 2015, pp. 185-188
10.1016/j.jnucmat.2014.09.082

Y. Ueda, J.W. Coenen, G. De Temmerman, R.P. Doerner, J. Linke, V. Philipps, E. Tsitrona, Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond, Fusion Engineering and Design, 査読有, Vol. 89, 2014, pp. 901-906
10.1016/j.fusengdes.2014.02.078

[学会発表](計71件)

中根優人、菊池祐介、伊庭野健造、上田良夫、福本直之、永田正義、同軸プラズマガンを用いた ELM 様パルスプラズマ照射におけるプラズマ・蒸気混合層の発光分光計測、第33回プラズマ・核融合学会、2016年11月29日、東北大学青葉キャンパス(宮城県)

伊庭野健造、西島大輔、Jonathan Yu、Matthew Baldwin、Russ Doerner、Lee Heun Tae、上田良夫、Be 堆積物層由来蒸気によるプラズマ冷却効果の観察、第33回プラズマ・核融合学会、2016年11月30日、東北大学青葉キャンパス(宮城県)

T. Maeji, K. Ibano, S. Yoshikawa, D. Inoue, S. Kuroyanagi, K. Mori, E. Hoashi, K. Yamanoi, N. Sarukura, Y. Ueda, Measurement of tungsten optical absorption rate and dynamics of W melting behavior, 29th SOFT, September 2016, Prague, Czech Republic

D. Inoue, K. Ibano, S. Yoshikawa, T. Maeji, Y. Ueda, Molten layer characteristics of W materials and its protective coatings by pulsed laser irradiation, 29th SOFT, September 2016, Prague, Czech Republic

K. Ibano, D. Nishijima, J.H. Yu, M.J. Baldwin, R.P. Doerner, T. Takizuka, H.T. Lee, Y. Ueda, Observation of vaporized W, Mo, and Be in PISCES-B plasma and validation of a particle code for the vapor-shielding study, 22nd PSI, May 30-June 3 2016, Rome, Italy

Y. Kikuchi, I. Sakuma, T. Nakazono, W. Isono, 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,

22nd PSI, May 30-June 3 2016, Rome, Italy

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 良夫 (UEDA Yoshio)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30193816

(2) 研究分担者

中村 浩章 (NAKAMURA Hiroaki)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：30311210

帆足 英二 (HOASHI Eiji)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40520698

鈴木 哲 (SUZUKI Satoshi)
量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所・グループリーダー
研究者番号：60354619

伊庭野 健造 (IBANO Kenzo)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80647470

リ ハンテ (Lee Heun Tae)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：90643297