

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：33903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656578

研究課題名(和文) ELMに伴う壁へのプラズマ熱負荷軽減に向けての新たな学術基盤の構築

研究課題名(英文) Construction of scientific base towards reduction of plasma power flow on fusion wall associated by ELM heat pulse

研究代表者

高村 秀一 (TAKAMURA, Shuichi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40023254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリウム損傷を受けて、繊維状ナノ構造を持つタングステン(W)が無損傷Wより熱伝達係数がシース電圧の広い範囲に亘って大きい事を実験的に観測し、原因としてナノ構造形成によるイオンのエネルギー反射係数の減少と表面からの電子放出に伴う冷却効果が関与している事を示し、これらを含めた新しい理論とも比較し、定性的な一致を得た。

電子放出に関してはイオンのオージェ効果が寄与すること、また熱パルによる熱電子放出が更なるWの昇温に重大な影響を持つことを実証した。

Wとモリブデンのナノ構造形成に関してはその成長初期過程を実験的に明らかにし、ナノループがプリカーサーになっている事を提案した。

研究成果の概要(英文)：Experiments have shown power transmission factor (PTF) for nanostructured tungsten (W) is greater than that for normal W over a wide range of sheath voltage. Both a reduction in ion energy reflection coefficient due to fiber-form nanostructure and a cooling effect associated by electron emission from the surface have been considered to explain the difference in PTF, which have been also included in our new PTF theory, and a qualitative agreement between the experiments and the new theory was obtained.

Concerning the electron emission from W surface, it is found that Auger effect of incident helium ions contributes to the electron emission in addition to secondary electron emission. Thermo-electron emission due to deuterium plasma heat pulse was found to give a serious influence on a further W temperature increase.

Nano-loops were identified to be an initial stage precursor of fiber-form nanostructure growth of W as well as Mo surface due to helium plasma exposure.

研究分野：プラズマ・核融合科学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合 プラズマ 壁相互作用 タングステン ヘリウム損傷 繊維状ナノ構造 電子放出 過渡的熱負荷 重水素プラズマ

1. 研究開始当初の背景

(1) ELMによる過渡熱負荷がダイバータ板を溶融させるのではないかと危惧されている。この場合、その熱負荷は周辺ペDESTALからのプラズマ熱流と壁表面における経験的熱伝達係数のみから評価されており、その中間は単なるエネルギー輸送路と考えられている。しかし介在するパワー緩衝層としてのシースの役割の理解が極めて乏しい。2010年初頭、代表者は「境界領域プラズマ理工学の基礎(468頁)」を発刊し、シース物理の学術的体系化を試みている。本内容の更なる発展が望まれる。

(2) Bergmanは2002年に国際誌 Nuclear Fusion に発表した論文の中で ELM に基づく初期高エネルギー電子熱流が2次電子放出に極めて敏感であり、放出係数を小さくすることにより熱流の激的抑制が達成されることを数値シミュレーションにより示した。

(3) 代表者は研究開始当初W表面のヘリウム照射によって形成されたナノ構造が、比較的大きな値を持つWの2次電子放出係数を著しく抑制することを発見 (S. Takamura et al., Plasma Fusion Res. 5 (2010) 049) し、シースの熱絶縁性の変化に伴う W の表面温度との相関に注目している。

2. 研究の目的

周辺ペDESTALから排出されるプラズマ特性と簡単な熱伝達係数を用いて壁への熱負荷が評価され、周辺プラズマ制御と材料開発の二面のみから研究が展開されてきた。我々はこの間に介在するシースというプラズマ緩衝層に焦点を当て、

- (1) 高温電子を伴うプラズマがシースを介して壁表面へ流入する熱流束密度の体系的理解、
- (2) 2次電子放出の少ない高融点金属材料と材料表面形態の選択によるシースの自立的熱負荷軽減策の模索、
- (3) パルスバイアスによる熱負荷軽減のための外部制御法の確立、

以上の観点より熱負荷軽減のための学術的基盤の構築を目的とする。

3. 研究の方法

愛知工業大学に既設の高密度二電子温度プラズマ発生装置AIT-PIDにおいて、2次電子放出に伴う熱伝達係数の実験的評価を、そのシース電圧依存性を明らかにする中で行うと共に、2次電子放出の少ない高融点金属材料を 1) 異なる高融点金属材料 2) 表面形態依存性(ナノ構造等)、等にわたって探索する。

一方熱伝達係数のシース電圧依存性ならびに浮遊電位の評価の基盤に立って、パルス熱負荷実験との対比の中で総合的理解を得た上で、ELMに伴うプラズマ電子熱負荷軽減のために、2次電子放出の少ないW材料の選択と適切なシース電圧の外部印加による制

御の道筋を示す。図1に装置の概略を示す。

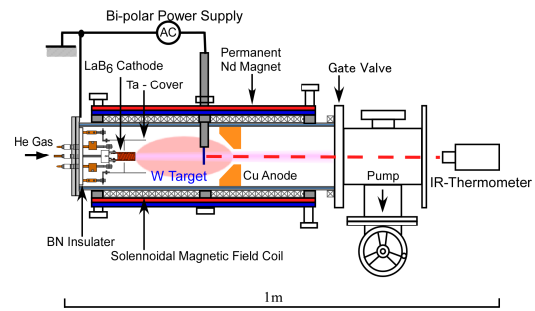


図1 熱伝達係数(PTF)測定時の、プラズマ発生装置AIT-PIDの配置。

4. 研究成果

(1) 高速電子を含むヘリウムプラズマにおけるシースを介した熱伝達係数(PTF: Power Transmission Factor)のシース電圧依存性の実測及び改良された理論との比較:

ヘリウム損傷を受けて繊維状ナノ構造を持つタングステンと無損傷のタングステンの両者に対して高温電子を含むヘリウム・プラズマ中で熱伝達係数のシース電圧依存性が評価された。シース電圧の広い範囲にわたって損傷タングステンは無損傷のこれに比して2倍程度大きなエネルギー伝達係数を持つことがわかった。その原因の一つはイオンエネルギー反射係数のナノ構造形成による減少と、電子放出に伴う冷却効果が関与している可能性が高いことを明らかにした(雑誌論文1)と7))。図2にその比較を示す。

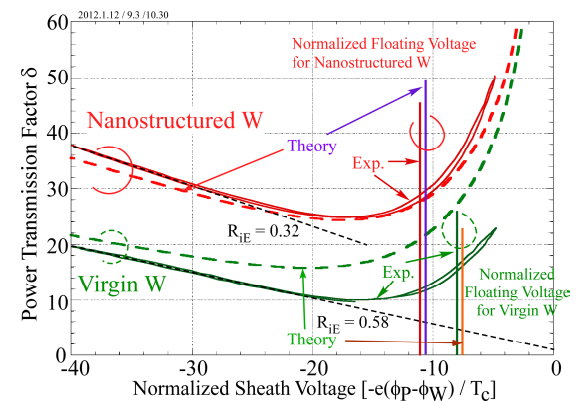


図2 電子放出に伴う冷却とイオンのエネルギー反射係数の違いを考慮した修正 PTF 理論と実験値との比較。規格化浮遊電位の理論と実験の比較も示す。修正理論においては、高温電子の割合 $\alpha=6.3\%$ 、温度比 $\beta=6$ そしてバルク電子温度 $Tc = 5 eV$ を採用。イオンのエネルギー反射係数は深バイアスの漸近線の傾きから得られる実験値を用いた。

(2) 電子放出に対するヘリウムイオンのオージェ効果の寄与:

プラズマ発生装置AIT-PIDでは高速電子が存在し、それによる2次電子放出のみが電子放

出の原因と考えてきた。しかし、高温電子が入ってこれない深いバイアス電圧印加においてもナノ構造形成と共にイオン電流の低下が見られた。すなわち形成前はイオンのオーギュ効果による電子放出があり流入電流は大きいに対して形成後は電子が出られなくなり正味のイオン電流のみとなり流入電流としては低下する（雑誌論文11））。

(3) 種々の高融点金属からの2次電子放出の比較：

種々の高融点金属からの2次電子放出：バルクの電子温度5eV、高温電子が10%含まれその実効温度が30eV程度のヘリウム・プラズマではMo > Ti > Ta > Wの順で2次電子放出によるシーズ電圧の大きさの低下が見られることがわかった。しかしWに代表されるように材料表面のヘリウム損傷効果もあるので注意が必要である。

(4) 重水素プラズマの安定生成とプラズマ熱パルスに対するタングステン薄板の応答：

4.1 コンパクトな高熱流プラズマ発生直線装置AIT-PIDにおいてはこれまで、ヘリウムとアルゴンが動作ガスであった。新たに重水素を導入したが、極めて安定に 10^{12} m^{-3} を超える高密度プラズマを発生できることが分かった。これにより本装置を活用して、核融合炉開発に向けての熱流制御に関する諸課題を学術的に研究できる見通しが得られた。

4.2 放電陰極と対向して設置された陰極にパルス電源からの負バイアス電圧を印加し、ターゲット温度3000Kを超える高温が得られた。この際、ターゲットの電位は熱電子放出により浅くなり、これが更にプラズマ熱流入を増大させることが判明した。図3にこの状況を示す。

4.3 繊維状ナノ構造において、Wナノ繊維の溶解が観測された。一方、無損傷WではW蒸気のプラズマ中への異常放出が観測された。これはWの熔融蒸発により対向プラズマが冷却され、原子状Wのプラズマ中での浸透長が著しく増加した結果と考えられる。

4.4 対向陰極ではなく、より好ましい放電陰極に直接負パルス電圧を加え、対向陰極の場合とほぼ同様の結果が得られた。

4.5 パルス電源の電流供給の能力は従来140Aであったが、IGBTスイッチング素子能力を活かし300Aに増大させることができた。この場合パルスの繰り返しのための待ち時間をこれまでより長い1分以上とする必要があるが、パルスパワーを格段に向上できる素地ができた（学会発表2））。

(5) タングステン表面における繊維状ナノ構造形成初期過程の実験的解明：

W表面にカバーをかぶせる事により1回の照射で成長の時間変化を空間変化に変換する手法を開発し、ループ構造の出現がプリカーサーであることを見つけた（雑誌論文2））。

図4にそのSEM写真を示す。

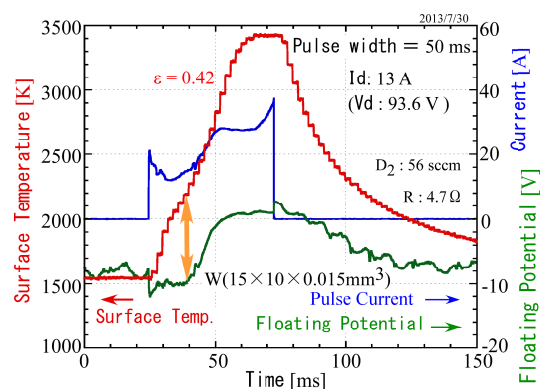


図3 重水素プラズマ中でタングステン箔板へのプラズマ熱パルスの印加実験。

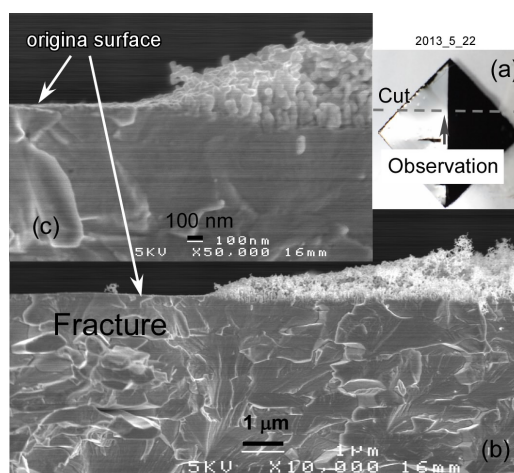


図4 タングステンの元面から損傷領域に至る境界の破断面 SEM 写真。(a) は巨視的な境界と破断線を示す。(b)と(c) は破断面の FE-SEM 写真。

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 24 件)

1) S. Takamura, S. Ono and N. Ohno: "Modified Power Transmission Factor of Tungsten in Plasmas with Hot Electron Component", Contributions to Plasma Physics, 査読：有；Vol. 54 (2014) 5 pages, DOI:10.1002/ctpp.201410016.

2) S. Takamura: "Initial Stage of Fiber-Form Nanostructure Growth on Refractory Metal Surfaces with Helium Plasma Irradiation", Plasma Fusion Research, 査読：有；Vol. 9 (2014)/Letters pp. 1302007 (3 pages), DOI:10.1585/pfr.9.1302007.

3) S. Katjia, M. Fukumoto, M. Tokitani, T. Nakano, Y. Noiri, N. Ohno, S. Masuzaki,

- S. Takamura, N. Yoshida, Y. Ueda:” Impact of arcing on carbon and tungsten: from the observation in JT-60U”, Nuclear Fusion, 査読: 有; Vol. 53 (2013) pp. 053013 (9 pages), DOI: 10.1088/0029-5515/53/5/053013.
- 4) S. Kajita, N. Ohno, S. Takamura:” Observation of Arc Spots Initiated on Nanostructured Tungsten”, IEEE Trans. on Plasma Sci., 査読: 有; Vol. 41 (2013) pp. 1889-1895, DOI: 10.1109/TPS.2013.2245346.
- 5) 高村秀一, 梶田信, 大野哲靖: 「ヘリウムプラズマ照射により高融点金属表面に形成されたナノ構造」、日本物理学会誌、査読: 無; Vol. 68 (2013) pp. 602-611.
- 6) 高村秀一: 「核融合エネルギー研究・開発の25年」、電気学会誌、査読: 無; Vol. 133 (2013) pp. 671-673.
- 7) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: ” Power Transmission Factor for Tungsten Target w/wo Fiber-form Nanostructure in He Plasmas with Hot Electron Component using Compact Plasma Device AIT-PID”, Transactions on Fusion Science and Technology, 査読: 有; Vol. 63 (2013) pp. 225-228.
- 8) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno : “Thermal Radiation Characteristics and Direct Evidence of Tungsten Cooling on the way to Nanostructure Formation on Its Surface”, Journal of Nuclear Materials, 査読: 有; Vol. 439 (2013) , DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.176.
- 9) T. Miyamoto, S. Takamura and H. Kurishita : “Recovery of Tungsten Surface with Fiber-Form Nanostructure by Plasma Exposures”, Plasma Science and Technology, 査読: 有; Vol. 15 (2013) pp. 161-165, DOI: 10.1088/1009-0630/15/2/17.
- 10) S. Kajita, N. Ohno, T. Yokochi, N. Yoshida, R. Yoshihara, S. Takamura and T. Hatae : “Optical properties of nanostructured tungsten in near infrared range”, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読: 有; Vol. 54 (2012) pp. 105015(7 pages), DOI: 10.1088/0741-3335/54/10/105015.
- 11) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: “Effects of fiber-form nanostructures on particle emissions from a tungsten surface in plasmas”, Nuclear Fusion, 査読: 有; Vol. 52 (2012) pp. 123001(8 pages), DOI: 10.1088/0029-5515/52/12/123001.
- 12) S. Takamura : “Characteristics of the compact plasma device AIT-PID with multicusp magnetic confinement”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読: 有; Vol. 7(S1) (2012) pp. S19-S24, DOI: 10.1002/tec.21801.
- 13) S. Kajita, N. Yoshida, R. Yoshihara, N. Ohno, T. Yokochi, M. Tokitani and S. Takamura : “TEM analysis of high temperature annealed W nanostructure surfaces”, Journal of Nuclear Materials, 査読: 有; Vol. 421 (2012) pp. 22-27, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.11.044.
- 14) S. Kajita, T. Hatae, T. Sakuma, S. Takamura, N. Ohno and K. Itami:” Fatal Damages due to Breakdown on a Diagnostic Mirror Located outside the Vacuum Vessel in JT-60U”, Plasma and Fusion Research, 査読: 有; Vol. 7 (2012) pp. 2405121 (4 pages), DOI: 10.1585/pfr.7.2405121.
- 15) S. Takamura, T. Miyamoto, Y. Tomida, T. Minagawa and N. Ohno: “Investigation on the effect of temperature excursion on the helium defects of tungsten surface by using compact plasma device”, Journal of Nuclear Materials, 査読: 有; Vol. 415 (2011) pp. S100-S103, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2010.12.021.
- 16) S. Kajita, S. Takamura and N. Ohno: “Motion of unipolar arc spots ignited on a nanostructured tungsten surface”, Plasma Physics and Controlled Fusion, 査読: 有; Vol. 53 (2011) 074002(13 pages), DOI: 10.1088/0741-3335/53/7/074002.
- 17) S. Kajita, , N. Ohno and S. Takamura: “Tungsten blow-off in response to the ignition of arcing: Revival of arcing issue in future fusion devices”, Journal of Nuclear Materials, 査読: 有; Vol. 415 (2011) pp. S42-S45, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2010.08.030.
- 18) S. Takamura and T. Miyamoto: “Recovery of Tungsten Surface with Fiber-Form Nanostructure by the Argon Plasma Irradiation at a High Surface Temperature”, Plasma Fusion Res./ Rapid Communications, 査読: 有; Vol. 6 (2011) 005(2 pages), DOI : 10.1585/pfr.6.1202005.

〔学会発表〕(計 27 件)

1) 高村秀一:「繊維状ナノ構造との遭遇とその成長初期段階」、日本物理学会第 69 回年次大会領域 2, 10 合同シンポジウム「ヘリウムプラズマ照射により誘起される金属表面ナノ構造の新展開」(招待講演)、2014 年 03 月 27 日～2014 年 03 月 30 日、東海大学湘南キャンパス、平塚市。

2) S. Takamura:” Nonlinear Interactions between Transient Deuterium Plasma Heat Pulse and Tungsten Material with Different Surface Morphology”, 19th ITPA Divertor-SOL Topical Group Meeting, 2014 年 01 月 20 日～2014 年 01 月 23 日, APA Hotel, Kanazawa, Japan.

3) S. Takamura:” Fusion Energy: Current Status and Its Future”, 2nd International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)-2013 (招待講演), 2013 年 12 月 19 日～2013 年 12 月 21 日, IUB Campus, Bashundhara, Dhaka, Bangladesh.

4) 高村秀一, 大野哲靖, 梶田信:” Formation of Nanostructured Tungsten with Arborescent Shape due to Helium Plasma Irradiation”, プラズマ・核融合学会第 30 回年会第 21 回論文賞受賞講演 (招待講演), 2013 年 12 月 03 日～2013 年 12 月 06 日, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都。

5) 高村秀一:「高融点金属表面の繊維状ナノ構造形成の物理過程解明に向けて」, プラズマ・核融合学会第 30 回年会 04aD18P, 2013 年 12 月 03 日～2013 年 12 月 06 日, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都。

6) S. Takamura, S. Ono, N. Ohno:” Modified Power Transmission Factor of Refractory Metals for Plasmas with Hot Electron Component”, 14th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 2013 年 09 月 23 日～2013 年 09 月 25 日, Cracow, Poland

7) 高村秀一, 友田壮, 伊藤貴理, 竹内秀人:「高融点金属における繊維状ナノ構造形成」, 平成 25 年度電気学会 A 部門大会, 2013 年 09 月 12 日～2013 年 09 月 13 日, 横浜国立大学、横浜市。

8) 高村秀一:「AIT-PID における重水素プラズマの生成とその PWI 研究への応用」, 核融合エネルギーフォーラム平成 25 年度合同会合, 2013 年 08 月 29 日～2013 年 08 月 30 日, つくばサイエンスインフォメーションセンター, つくば市。

9) 高村秀一:「2 電子温度プラズマータング

ステン壁におけるパワー伝達係数評価」, 2013 年度 NIFS 共同研究合同研究会, 2013 年 08 月 01 日～2013 年 08 月 02 日, 核融合科学研究, 土岐市。

10) 小野秀介, 高村秀一, 中西浩規, 松田翔:「エネルギー伝達係数の微視表面状態に対する依存性」, 電気学会全国大会, 2013 年 03 月 20 日～2013 年 03 月 22 日, 名古屋大学、名古屋市。

11) 高村秀一, 小野秀介, 大野哲靖:「繊維状ナノ構造形成タングステンの放射冷却特性とシース熱伝達係数」, 2012 年度 NIFS 共同研究合同研究会, 2012 年 12 月 20 日～2012 年 12 月 21 日, 核融合科学研究所、土岐市。

12) 高村秀一, 榊原司, 大野哲靖:「タングステン材料への炭素被覆による繊維状ナノ組織形成の阻止」, 第 29 回プラズマ核融合学会年会, 2012 年 11 月 27 日～2012 年 11 月 30 日, クローバープラザ, 春日市。

13) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: “Cooling Characteristics and Mitigation of He-Defected Tungsten with Nanostructured Surface”, Fusion Energy Conference 2012, 2012 年 10 月 08 日～10 月 13 日, San Diego, USA.

14) S. Takamura: “Power Transmission Factor for Tungsten Target w/o Fiber-Form Nanostructure in He Plasmas with Hot Electron Component using Compact Plasma Device AIT-PID”, Joint Conference of 9th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma confinement (OS2012) and 3rd International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF 2012), 2012 年 8 月 27 日～8 月 31 日, Tsukuba, Japan.

15) 高村秀一:「タングステンの表面特性から見た、ナノ構造形成に対する対処方策」, 平成 24 年度核融合エネルギーフォーラム・プラズマ物理サブクラスター合同会合, 2012 年 08 月 08 日～2012 年 08 月 09 日, 日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所、那珂市。

16) 高村秀一, 宮本隆徳:「プラズマ中におけるタングステン表面からの粒子放出への繊維状ナノ構造の効果」, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 06 月 28 日～2012 年 06 月 29 日, 神戸国際会議場, 神戸市。

17) 高村秀一:「タングステン表面へのエネルギー伝達係数の重要性とその評価」, NIFS 共同研究合同研究会, 2012 年 1 月 5—6 日, 核融合科学研究所、土岐市。

18) 高村秀一：「タングステンな構造形成時における温度低下の直接測定と全放射率の評価」、PWI 合同研究会、2011年12月13,14日、核融合科学研究所、土岐市。

19) 宮本隆徳、高村秀一：「繊維状ナノ構造 He 損傷タングステンの表面特性解析」、Plasma Conference 2011、2011年11月22—25日、石川県立音楽堂、金沢市。

20) S. Takamura, T. Miyamoto, J. Morisue and N. Ohno: “Power Transmission and Thermal Emission Characteristics of Tungsten Surface with and without Helium Defects “, 8th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association in 2011, 2011年11月1日～11月4日, Guilin, China.

21) T. Miyamoto and S. Takamura: “Recovery of Tungsten Surface with Fiber-Form Nanostructure by the Effect of Surface Temperature Increase in Plasmas “, *ibid.*

22) 宮本隆徳、高村秀一、出野慧：「ナノ繊維状構造を持つヘリウム損傷タングステン表面特性評価」、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、2011年9月26,27日、三重大学、津市。

23) 宮本隆徳、高村秀一：「ナノ繊維状構造を持つヘリウム損傷タングステンの修復」、平成23年度電気学会基礎・材料・共通部門大会、2011年9月21,22日、東京工業大学大岡山キャンパス、東京都。

24) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno : “Surface Characteristics of Tungsten Materials w/wo Helium Defects “, 2011 Japan-US Workshop on Heat Removal and Plasma Materials Interactions for Fusion, and IEA Workshop on Solid Surface Plasma Facing Components, 2011年8月29-31日, CO-OP INN Kyoto, Kyoto, Japan.

25) 高村 秀一、宮本隆徳、大野哲靖：「プラズマ対向壁材料としてのタングステンの表面特性」、核融合エネルギーフォーラム合同研究会、2011年7月20日～22日、つくばサイエンスインフォメーションセンター大会議室、つくば市。

26) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno : ” Outstanding Properties of Tungsten Material with Fiber-form Nanostructured Subsurface for the Wall of Fusion Reactor” , 38th EPS Conference on Plasma Physics, 2011年7月27日～8月1日, Strasbourg, France.

27) S. Kajita, N. Ohno, N. Yoshida and S. Takamura:” Tungsten Erosion by the Initiation of Unipolar Arcs in Nuclear Fusion Devices” , 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG2011), 28th August-2nd September 2011, Belfast, U.K.

[その他]

ホームページ (高村秀一)

<http://kyoin.aitech.ac.jp/ait/ENPMainServlet?nwid=008&targetTemplateID=009&pid=700843>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高村 秀一 (TAKAMURA, Shuichi)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：40023254

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

大宅 薫 (OHYA, Kaoru)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：10108855