

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686133

研究課題名(和文)ヘリウム照射材料上での単極アークのキャラクタリゼーションと発生機構

研究課題名(英文)Characterization of Unipolar Arcing Initiated on Materials Exposed to Helium Plasmas

研究代表者

梶田 信(Kajita, Shin)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：00455297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,400,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉におけるアーキングの影響を明らかにするために、ヘリウム照射によりナノ構造化されたタングステン(W)を用いて材料物性評価及びアーキングの点弧の条件と影響を明らかにするとともに、大型実験炉におけるアーキングの影響を評価した。初期的なプロセスを議論するために、電界電子放出特性へのヘリウム照射の影響を実験的に明らかにした。アーク痕の解析や分光計測から陰極点の動きや発生するプラズマ温度を評価した。陰極点のフラクタル的な動きを明らかにするとともに、温度は0.8 eV程度であることを示した。またアーキングの影響を評価するためにWのエロージョン量を評価し、0.1 mg/C程度であることを示した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the influence of arcing in the nuclear fusion reactor, experiments were conducted to reveal the effect and conditions of arcing. Material properties of nanostructured tungsten (W) was evaluated, and the influence of arcing in a large experimental reactor JT-60U was investigated. To discuss the initial process of arcing, the effects of helium irradiation on the field electron emission characteristics were experimentally investigated. The motion and the temperature of the generated plasma around the cathode spot were revealed from analysis of arc trail and spectroscopic measurement. The temperature was ~0.8 eV, and the fractal feature of arc spot motion was revealed. In addition, it was shown that the erosion rate of W was about 0.1 mg/C on the nanostructured W.

研究分野：プラズマ材料相互作用

キーワード：ナノ構造 タングステン アーキング

1. 研究開始当初の背景

核融合炉実現において、プラズマと材料の相互作用は重要な課題の一つであり、トリチウム制御の観点から、ITERの重水素放電以降、さらには定常核融合炉(デモ)では対向材としてタングステンなどの高融点金属材料の使用が不可避と考えられている。核融合炉内でのアーキングは、1970年、1980年代に盛んに研究がなされたが、1990年代以降、ダイバータ配位が主流になり、スパッタリングが支配的な不純物源と考えられるようになって以来、問題視されなくなった。しかし、近年、ELMなどの間欠的現象に伴い、世界各国の装置でアーキング現象の発生が報告され始めた。しかしながら、核融合炉で想定される材料損傷や間歇的に熱パルスが単極アーキング発生に与える影響は全く理解されておらず、これまでの知見では、単極アーキングの発生頻度やそれに伴う不純物発生量の予測ができない。

申請者は直線型プラズマ装置で、核融合炉環境下でのアーキングの発生に関して研究を行い、定常プラズマ中での単極アーキングの観測に成功し、その特性を、浮遊電位の変化、高速カメラによる観察、アーキング痕跡の詳細な解析から明らかにしてきた。

2. 研究の目的

本課題では、申請者が行ってきた実験をさらに進展させ、実機に近い環境で、様々な条件下で実験を行い、材料とプラズマの特性の詳細な計測を行い、アーキングの発生条件と発生・持続機構を理解し、核融合研究に資することを目的とする。具体的には、

- (1) レーザーを用いた模擬実験を実施し、アーキングの発生条件を、特に、プラズマパラメータ依存性(プラズマ密度、温度、バイアス電圧、磁場強度依存性)の観点から明らかにする。加えて、アーキングの発生条件に与える表面構造の影響を定量的に明らかにするために、ヘリウム照射による電界放出係数の変化を評価し、電界放出係数と発生条件との関係を実験的に明らかにする。
- (2) アーク再点孤の様子の高速観察と分光法によるアークスポットのキャラクタリゼーションを実施する。アーク電流やアーク電圧の高速計測及び高速カメラを用いて、時間的なアーク再点孤の様子を明らかにする。加えて、アークスポットを高速分光計測診断を行い、アークスポットのキャラクタリゼーションを行う。
- (3) 高速カメラによるWからの発光量及び材料の損耗量から、アーク発生による不純物放出量を明らかにする。さらに、日本の大型装置のアーク痕跡を調べ、それらと本実験で得られた結果を比較し、大型装置におけるアーク問題に関する知見とする(大型装置との比較)。

3. 研究の方法

基幹装置としてダイバータプラズマ模擬装置を用いて、定常プラズマとパルスの熱粒子負荷を照射し、アーク/単極アークを発生させる。熱粒子負荷としては、レーザーに加え、パルス重畳放電等を用いる。発生したアークの動きを高速度カメラで計測すると共に、分光計測を行い、アークプラズマの温度密度を評価を試みる。様々な条件下で実験を行い、アークの発生条件を、照射熱源やバルクプラズマの条件と、材料物性(仕事関数、電界放出係数)という観点から特定する。実験結果とアークの詳細な理論モデルとの比較を行い、単極アークに関しての実験的な検証を行う。さらに、本基礎研究をもとにして大型装置などでの観測結果と比較を行う。

4. 研究成果

(1) アーク点孤の初期的なプロセスを議論するために、ナノ構造Wの電界電子放出特性を計測した。電界電子放出電流は、ナノ構造形成により、クリーンなWに比べて図1に示すように5桁近く上昇していた。さらに、ナノ構造が間歇的な熱負荷にさらされると、熱伝導率が著しく減少し、さらに熱的に孤立した部分において局所的な異常加熱が起こり、極めて弱いエネルギーでも、融点近くまで温度上昇する可能性がある。この電界電子放出電流の増加と局所加熱の組み合わせにより、熱電界放出により放出される電流密度は著しく増加し、アーキングが極めて点弧されやすくなると考えられる。

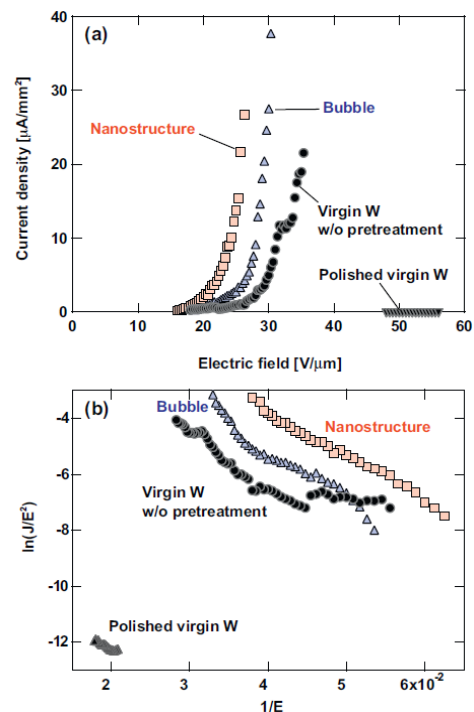


図1 (a)様々なWサンプルからの電界電子放出電流密度, (b) Fowler-Nordheim プロット。

また物性評価の一環として、ナノ構造が形成されたタングステンとバルクタングステンの表面積を BET 法で計測し、その変化を明らかにした。更に、試料をトリチウムガスに曝露し、滞留量の比較を行った。表面積測定の結果、BET 法で求めたナノ W の表面積はマイクロな幾何学的形状から得られる値の約 10 倍程度となっており、ナノ構造の発達により表面積が著しく増大すると共に、フルエンスと共にナノ W の表面積が増加することが分かった。

(2) NAGDIS-II において、ヘリウムプラズマ中でナノ構造体上にレーザー照射を行いアークを誘起し、アークスポットの高速カメラでの観察や分光学的な観察を行った。点弧直後のアークスポットは、マイクロなスケールではランダム運動しながら、グローバルには磁場の影響を受け $j \times B$ 方向に動く。これまでに、アーク痕のフラクタル解析から、磁場中ではアーク痕が自己アフィンなフラクタル性を示すことが分かっており、高速カメラの観察結果は、アーク痕解析の結果と一致している。

図 2 に、ナノ構造上に形成されたアーク痕の SEM 写真を示す。コントラストを調整し二値化している。磁場が強くなると痕跡のランダム性が強くなる。アーク痕のフラクタル解析から、磁場中ではアーク痕が自己アフィンなフラクタル性を示し、マイクロなスケールでのフラクタル次元は 0.2 T では 1.46 ± 0.10 であり、0.02 T では 2.07 ± 0.18 であった。0.02 T では局所的にはほぼ磁場の影響を受けずランダムな運動をしていることが明らかになった。

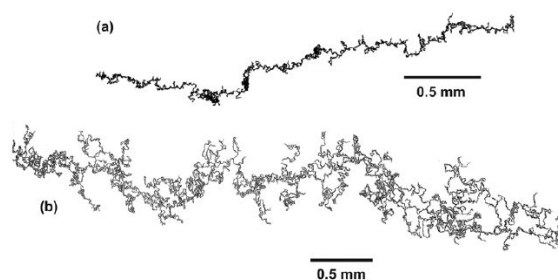


図 2 ナノ構造上に形成されたアーク痕の SEM 写真をデジタル化したもの。(a)は 0.2 T での痕跡、(b)は 0.02 T での痕跡である。

アークスポットからの発光を分光観察すると、多数の輝線スペクトルに加えて、可視領域に連続的なブロードなスペクトルが観察された。これは、W からの多数の発光スペクトルの集合か、もしくは、加熱されたスポットからの黒体輻射によるものと思われる。図 3(a)に示すように、WI 及び WII の発光強度を用いて、ポルツマンプロットからアークスポットの温度を評価したところ、凡そ ~ 0.8 eV 程度であった。

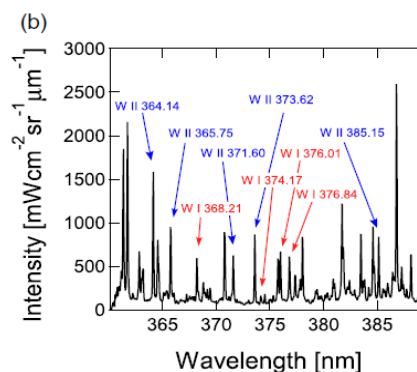
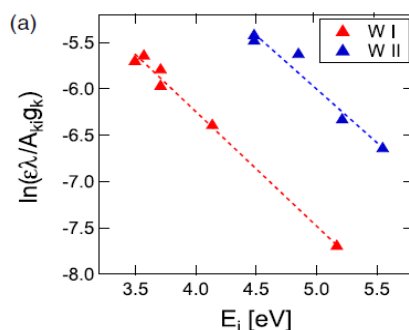


図 3 アークスポットからの発光強度のポルツマンプロットと、典型的なスペクトル。

(3) 核融合炉においては、アークの点弧により放出される W の量が重要な物理量となる。このエロージョンの量を評価するために、アーク痕の断面観察を行った。図 4 にナノ構造の断面 TEM 画像を示す。この断面 TEM 画像から、アークにより放出された W 量を評価したところ、ナノ構造の厚みにも依存するが、シングルスポットにおいては、凡そ 0.1 mgC^{-1} 程度のエロージョンレートであり、グループが形成されると、増加することが明らかになった。

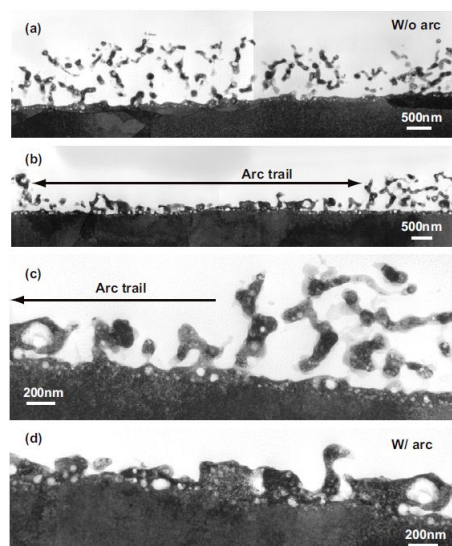


図 4 ナノ構造タングステン上の TEM 画像。(a)はアークなし、(b),(c),(d)はアークあり。(d)はグループスポット。

さらに、大型トカマク JT-60U におけるアーク痕の解析を行った。図 5 にレーザー顕微鏡で観察した JT-60U の炭素バツフルを示す。アーク痕の一部は、数十 μm 程度の深さに至っており、おそらく、堆積層が剥離していると考えられる。組成分析をした結果、構成要素は主に炭素で、その他には鉄、酸素、ニッケル等が含まれていた。質量パーセント濃度としては、炭素 59 %Wt、鉄 17 %Wt、酸素 12 %Wt 程度であった。スパッタリングによる損耗は、アークの損耗に比べると極めて大きく、アークが非常に頻繁に起こっていない限り（例えば、100 Hz 程度）、おそらくアークによる損耗が炭素系材料のスパッタリングを上回ることができないことが明らかになった。

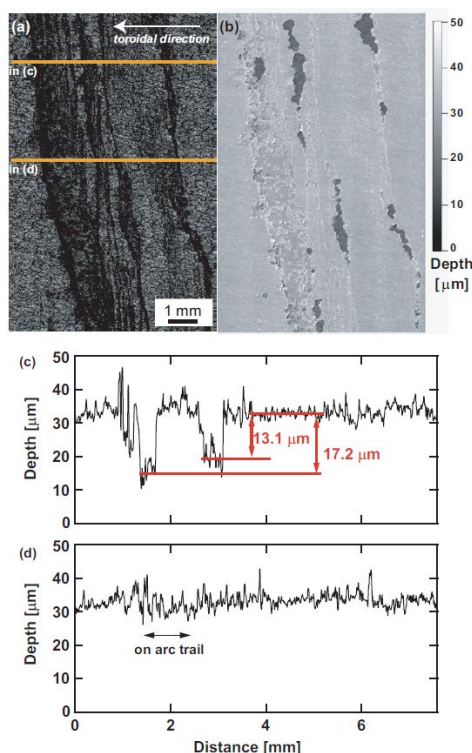


図 5 JT-60U の炭素バツフル板の(a)レーザー顕微鏡画像、(b)高さの 2 次元分布。(c) ,(d) は異なる線上での高さ分布。

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)

M.Tokitani, S.Kajita, S.Masuzaki, Y.Hirahata, N.Ohno, T.Tanabe, LHD Experiment Group, “Exfoliation of the tungsten fiberform nano-structure by unipolar arcing in the LHD divertor plasma”, Nucl. Fusion, 51 (2011) 102001.
 S.Kajita, D.Nishijima, R.Doerner, K.Umstadter, J.Yu, N.Ohno, Y.Ueda, “Beryllium erosion induced by transient heat loads and subsequent reactions in a

deuterium plasma”, Journal of Nuclear Materials, 420 (2012) 252-257.

Y.Ueda, H.T.Lee, N.Ohno, S.Kajita, A.Kimura, R.Kasada, T.Nagasaka, Y.Hatano, A.Hasegawa, H.Kurishita, Y.Oya, “Recent progress of tungsten R&D for fusion application in Japan”, Physica Scripta, T145 (2011) 014029.

S.Kajita, N.Yoshida, R.Yoshihara, N.Ohno, T.Yokochi, M.Tokitani, S.Takamura, “TEM analysis of high temperature annealed W nanostructure surface”, Journal of Nuclear Materials, 421 (2012) 22-27.

M.Yamagiwa, Y.Nakamura, N.Matsunami, N.Ohno, S.Kajita, M.Takagi, M.Tokitani, S.Masuzaki, A.Sagara, K.Nishimura, “In situ measurement of hydrogen isotope retention using a high heat flux plasma generator with ion beam analysis”, Physica Scripta, T145 (2011) 014032.

S.Kajita, N.Ohno, N.Yoshida, R.Yoshihara, S.Takamura, “Arcing on tungsten subjected to helium and transients: ignition conditions and erosion rates”, Plasma Phys. Control. Fusion, 54 (2012) 035009.

S.Kajita, T.Uchiyama, N.Ohno, “Superimposition of Pulses to Steady Arc Discharge in Toroidal Divertor Simulator”, Plasma and Fusion Research, 7 (2012) 1405100.

S.Kajita, N.Ohno, T.Yokochi, N.Yoshida, R.Yoshihara, S.Takamura, T.Hatae, “Optical properties of nanostructured tungsten in near infrared range”, Plasma Phys. Control. Fusion, 54 (2012) 105015 (7 pp).

S.Kajita, N.Ohno, S.Takamura, “Observation of Arc Spots Initiated on Nanostructured Tungsten”, IEEE TRANSACTION ON PLASMA SCIENCE, 41 (2013) 1889-1895.

S.Kajita, T.nishiwaki, N.Ohno, K.Sawada, M.Takagi, “Deuterium Atomic Density Estimation in Recombining Plasmas Using Self-Absorption Spectroscopy”, IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, 8 (2013) 1-6.

S.Kajita, N.Ohno, T.Akiyama, et al., “Development of steady/transient dual plasma irradiation device using a plasma gun”, J. Nucl. Mater. 438 (2013) S707-S710.

S.Kajita, D.Hwangbo, N.Ohno, M.M.Tsvetoukh, S.A.Barengolts, “Arc spot grouping: An entanglement of arc

- spot cells”, J. Applied Phys., 116 (2014) 233302.
- S.Kajita, Y.Tsuji, N.Ohno, “Fractality of self-grown nanostructured tungsten by He plasma irradiation”, Physics Letters, 378 (2014) 2533-2538.
- D.Hwangbo, S.Kajita, S.Barengolts, M.M.Tsvetoukh, N.Ohno, “Transition in velocity and grouping of arc spot on different nanostructured tungsten electrodes”, Results in Physics, 4 (2014), 33-39.
- S.Kajita, N.Yoshida, N.Ohno, et al., “Helium plasma irradiation on single crystal tungsten and undersized atom doped tungsten alloys”, PHYSICA SCRIPTA, 89 (2014) 025602 (7 pp).
- S.Kajita, G.De Temmerman, T.Morgan, et al., “Thermal response of nanostructured tungsten”, Nucl. Fusion, 54 (2014) 33005.
- S.Kajita, D.Kitaoka, N.Ohno, et al., “Surface modification of titanium using He plasma”, APPLIED SURFACE SCIENCE, 303 (2014) 438-445.
- D.Hwangbo, S.Kajita, M.Osaka, et al., “Spectroscopic Study and Motion Analysis of Arc Spot Initiated on Nanostructured Tungsten”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 52 (2013) 11NC02.
- S.Kajita, R.Yasuhara, M.Sato, N.Ohno, M.Tokitani, N.Yoshida, “Enhancement of multi-pulse laser induced damage threshold on Cu mirror under vacuum condition”, Optics Express, 21 (2013) 17275-17284.
- S.Kajita, N.Ohno, Y.Hirahata, M.Hiramatsu, “Filed Emission Property of Nanostructured Tungsten Formed by Helium Plasma Irradiation”, Fusion Engineering and Design, 88 (2013) 2842-2847.
- ⑲ M.Sato, S.Kajita, R.Yasuhara, N.Ohno, M.Tokitani, N.Yoshida, Y.Tawara, “Assessment of multi-pulse laser-induced damage threshold of metallic mirrors for Thomson scattering system”, Optics Express, 21 (2013) 9333-9342.
- ⑳ S.Kajita, M.Fukumoto, M.Tokitani, T.Nakano, et al., “Impact of arcing on carbon and tungsten: from the observations in JT-60U, LHD and NAGDIS-II”, Nuclear Fusion, 53 (2013) 53013.
- ㉑ S.Kajita, N.Ohno, M.Yajima, J.Kato, “Growth annealing equilibrium of tungsten nanostructures by helium, plasma irradiation in non-eroding regimes”, J. Nucl. Mater., 440 (2013) 55-62.
- ㉒ S.Kajita, T.Yoshida, D.Kitaoka, R.Etoh, M.Yajima, et al., “Helium plasma implantation on metals: Nanostructure formation and visible-light photocatalytic response”, J. Applied. Phys., 113 (2013) 134301.
- [学会発表](計 14 件)
- S.Kajita, N.Ohno, S.Takamura, M.Tokitani, S.Masuzaki, N.Yoshida, T.Hatae, M.Fukumoto, K.Itami, T.Nakano, Y.Ueda, “Revival of Arcing Issue in Fusion Reactors”, PLASMA2011 (招待講演), 2011.11.21-25, 石川県立音楽堂(石川県).
- S.Kajita, N.Ohno, N.Yoshida, S.Takamura, “Tungsten Erosion by the Initiation of Unipolar Arcs in Nuclear Fusion Devices”, The 30th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 2011.8.28-9.2, ベルファスト(イギリス).
- Y.Ueda, H.T.Lee, N.Ohno, S.Kajita, A.Kimura, R.Kasada, T.Nagasaka, Y.Hatano, A.Hasegawa, H.Kurishita, “Recent Progress of Tungsten R&D for Fusion Application in Japan”, 13th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications and 1st International Conference on Fusion Energy Materials Science, 2011.5.9-13, ローゼンハイム(ドイツ).
- S.Kajita, T.Hatae, S.Takamura, N.Ohno, K.Itami, “Fatal damages due to breakdown on a diagnostic mirror located outside the vacuum vessel in JT-60U”, International Toki Conference, 2011.11.29, 土岐市(岐阜県).
- S.Kajita, N.Ohno, T.Akiyama, T.Uchiyama, T.Nihashi, M.Osaka, Y.Kikuchi, M.Nagata, “Development of Steady/Transient Dual Plasma irradiation Device Using a Plasma Gun”, 20th International Conference on Plasma Surface Interactions in Fusion Devices (PSI2012), Aachen (Germany), 2012.5.21-5.25.
- S.Kajita, N.Ohno, S.Takamura, “Observation of Arc Spots Initiated on Nanostructured Tungsten”, XXVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Temsk (Russia), 2012.8.27-8.31.
- 野村泰幸、梶田信、大野哲靖「スパッタリング領域におけるヘリウムプラズマ照射時のアーク発生条件とタングステンナノ構造成長」プラズマ・核融合学会第30回年会、2013.12.3-6、東京工業大学
- S.Kajita, G.De Temmerman, T.Morgan, T.de Kruif, S.van Eden, N.Ohno, “Thermal response of nanostructured tungsten”, プラ

ズマ・核融合学会第 30 回年会、
2013.12.3-6、東京工業大学
梶田信「繊維状ナノタングステン上での
単極アークの発生とそのキャラクタリ
ゼーション」日本物理学会 2014 年春季
大会(招待講演)、2014.3.28、東海大学
梶田信「ヘリウムプラズマ照射によるタ
ングステンナノ構造の形成と物性変化」
日本物理学会 2014 年春季大会、2014.3.29、
東海大学
Y.Noiri, S.Kajita, N.Ohno, “Nanosturcture
growth and ignition of arcing by helium
plasma irradiation to tungsten in sputtering
regime”, 21st International Conference on
Plasma Surface Interactions 2014,
2014.5.26-30, 金沢市.
S.Kajita, “Morphology changes in W under
high D/He fluence: overview, implications
for ITER, application to WEST”, 1st WEST
International Workshop(招 待 講 演),
2014.6.30, Aix en provence, France.
Y.Noiri, S.Kajita, N.Ohno, “Initiation of
arcing on tungsten electrode exposed to
steady state plasmas”, 24th International
Toki Conference, 2014.11.4-7, 土岐市(岐
阜県).
梶田信、大野哲靖、吉田朋子「ヘリウム
プラズマ照射による金属材料のナノ構
造化とその応用」第 10 回核融合エネル
ギー連合講演会(招待講演)、2014.6.19-20、
つくば市(茨城県).

〔図書〕(計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

梶田 信 (Kajita Shin)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・
准教授
研究者番号：00455297

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし