

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 9日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2012

課題番号：20360414

研究課題名（和文） 新しい高粒子束プラズマ源を用いたタングステン壁ヘリウム損傷過程の解明とその制御

研究課題名（英文） Investigation and Control of Helium Defects Process on Tungsten Wall by using Newly Developed High Particle Flux Plasma Source

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

研究成果の概要（和文）：高密度（ $\geq 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ）、2電子温度（高温 $\sim 30 \text{ eV}$ 、低温 $\sim 5 \text{ eV}$ ）のプラズマを発生する装置 AIT-PID を完成し、これを用いてタングステン（W）の収容なヘリウム損傷であるナノ構造形成過程の観察と、そのような W の表面特性（電子放出、赤外線放射特性、スパッタリング等）を明らかにすると共に、プラズマ・アニーリングによるその修復を示し、また炭素薄膜によるナノ構造形成の抑制法を示した。

研究成果の概要（英文）： The new plasma device, AIT-PID, has been constructed, producing the high heat flux plasmas with high density of more than  $10^{18} \text{ m}^{-3}$  and the high electron energy (the high temperature  $\sim 30 \text{ eV}$ ; the low one  $\sim 5 \text{ eV}$ ). The fiber-form nanostructure, one of the important helium defect of tungsten (W), has been formed on the various grade of W's. The surface properties like electron emission, radiation emissivity and sputtering yield have been investigating, showing serious effects of nanostructure on these characteristics. In addition the way of recovering from such defects has been demonstrated with the technique of plasma annealing, and the mitigation method using a thin carbon fil has been clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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：プラズマ・核融合、プラズマ-壁相互作用、タングステン、繊維状ナノ構造ヘリウム損傷、高熱流プラズマ生成、黒体、熱伝達係数

## 1. 研究開始当初の背景

タングステン(W)のヘリウム(He)損傷に関する当時の認識はバブル/ホールが典型的な損傷形態であると考えられていた。我々が繊維状ナノ構造の形成に関する最初の論文を発表したのが2006年であり、その後UCSD

において Baldwin と Doerner が追認したのが2008年である。形成温度領域が1000～2000Kとマイクロ・サイズのバブル/ホール形成より低くITERダイバータで十分想定される温度範囲であることにより、関心が広まりPW分野のトピックスの一つとなり始めた時期

である。本研究は極めて時宜を得ており、繊維状ナノ構造形成ならびにそのような W のプラズマ対向壁としての特性に関してタイムリーな貢献ができた。

一方、PWI の重要性から世界的に直線型プラズマ発生装置の役割に関する議論が始められた時期でもあり、小型・コンパクトではあるが新しいプラズマ照射装置 AIT-PID は本分野の学術の進展に貢献できる基盤技術として意義がある。

## 2. 研究の目的

- (1) PWI 研究のための高熱流・高粒子束の新しいプラズマ照射装置を構築すること。
- (2) 製造方法の異なる W の He 損傷過程の解明とそのプラズマ対向壁としての特性。
- (3) He 損傷の抑制・制御の可能性を明らかにする。
- (4) 以上よりプラズマ対向壁としての W 材料開発戦略の方向性を探る。

## 3. 研究の方法

- (1) He, Ar(アルゴン), D(重水素), CH<sub>4</sub>(メタン)プラズマ照射装置として、本科研費で整備された高熱流プラズマ発生装置 AIT-PID を用いる。
- (2) 高融点金属試料板の温度計測には赤外線波長 0.5 μm の放射温度計のみならず R 又は K 型の絶縁型シース熱電対 (シース径 0.5mm φ) を用いる。
- (3) 試料表面や断面の観察には愛知工業大学総合技術研究所設置の FE-SEM を用いる。一部、主として断面の高分解観察のため外注。
- (4) 試料への既知の熱負荷源として、AIT-PID の陰極を電子ビーム源として用いる。
- (5) 金属試料からの電子放出はプラズマ中における浮遊電位の変化より間接的に知る。
- (6) 採取された時間の関数としてのアナログ・データの採取には WE7000 (旧横河電機 (株)) の AD 変換器を用いる。
- (7) 可視域の分光計測は小型の HR-4000 分光器 (オーシャンオプティクス (株)) を用いる

## 4. 研究成果

- (1) 高熱流プラズマ照射装置の構築：強い縦磁場を採用せず、替りに方位角方向 6 極のマルチカスプ磁場と弱い縦磁場を組み合わせ円筒容器の一端に LaB<sub>6</sub> 陰極を配した材料照射用プラズマ発生装置 AIT-PID は  $1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  以上で電子温度が低温成分 $\sim$ 5eV, 10%弱の高温成分 $\sim$ 30eV の高熱流 He プラズマの生成が可能である。重水素についても同様のポテンシャルを持つことがわかっ

た。

Ar プラズマはほぼバルク成分のみで同様のプラズマ密度を持つ。コンパクトで省エネルギーながら PWI の基本装置として十分な能力を有すると判断される。

図 1 に装置の概要を示す。

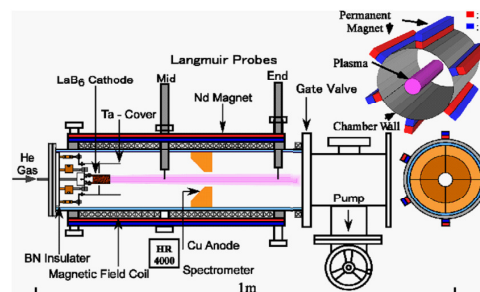


図 1 高熱流プラズマ発生装置、AIT-PID

- (2) W ナノ構造形成による粒子放出の抑制：AIT-PID の優れた特徴である、高温電子は W に対して 2 次電子を放出させるに十分なエネルギーを持つ。電子放出は浮遊電位を浅くし、浮遊電圧を低下させる。この電位の変化より、ナノ構造は 2 次電子放出を抑制することを明らかにした。希ガス原子イオンの入射によるオージェ効果等による電子放出にも抑制効果を持つことがわかった。一方、Ar 等の重いイオンによる W のスパッタリングに対しても抑制効果があることを明らかにした。いずれも図 2 に示すようなナノ構造による深いトレンチ構造が粒子放出抑制に影響をもたらしていると考えられる。

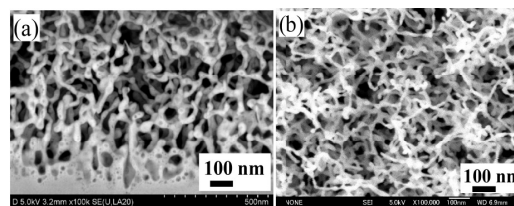


図 2 タングステン表面に形成された繊維状ナノ構造。(a) 断面、(b) 表面 の SEM 写真。

- (3) ナノ構造に対する表面温度履歴効果とそれを進展させた表面修復の試み：一度形成された繊維状ナノ構造を持つ表面をナノ構造形成温度上限近くに、ヘリウム・イオンの衝撃エネルギーを 6eV 以下にしてプラズマ・アニーリングとして温度上昇させると、繊維構造の縮減そして径の太くなる現象を明らかにした。これを十分高温で長時間行うことにより見かけ上表面の繊維を消失させることができる。また W の製造

方法により修復に違いがあり、粒礫の小さいTFGR-Wでは修復に長い時間を要した。

(4) ナノ構造形成の抑制：メタン混合 He 放電により W 表面に炭素膜を形成したところ、He 入射に基づくスパッタによって膜厚が減少しても膜の残存している間はナノ構造形成を抑制できることを示した。ITER ではベリリウムが炭素の役割を果たすことも指摘した。

(5) ナノ構造形成 W の全放射率の評価：ナノ構造形成に伴い、著しい放射冷却が発生する。放射パワーはシュテファン・ボルツマンの式によって表されるが、全放射率が係数としてかかる。この全放射率を分光ではなく図3に示すように既知の電子ビーム熱負荷と熱電対による正確な温度計測より明らかにして、限りなく完全黒体（全放射率 $\sim 1.0$ ）に近いことを明らかにした。

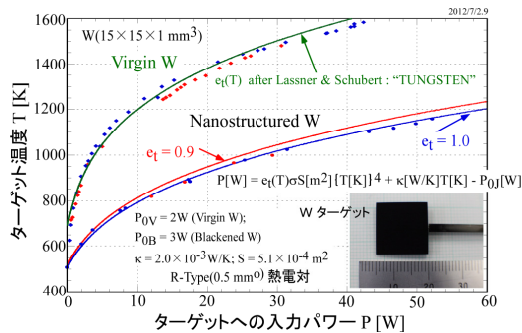


図3 電子ビームによる W ターゲットへの入射パワー  $P$  と R 型熱電対で測定された W の温度  $T$  の関係。

(6) 異なる高融点金属におけるナノ構造形成：ナノ構造形成の理論モデル構築のためには W 以外の金属でのナノ構造形成のための温度範囲の同定は興味深い。まずモリブデンに関しては、780K $\sim$ 1000K であることが熱電対計測により明らかにされた。同じく高融点のタンタルではこのような温度範囲ではバブル/ホールが形成されるのみであり、さらに低い温度での試みが期待される。

(7) ナノ構造形成 W の熱伝達係数の評価：W 表面のシースを介しての熱伝達係数を計測し、概ね無損傷タングステンの2倍の値を有することを明らかにした。

(8) プラズマ対向壁としての W：プラズマ熱負荷を考えると、2 次電子放出の抑制、放射冷却の増大はプラズマ対向壁として好ましい特性である。加えて、スパッタリ

ング抑制やクラッキング耐性の向上も同様であるが、単極アークの誘起という弱点を有することも明らかにした。この上で W 材料の運用を考えていくことを提示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 20 件)

1) 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) in press.

2) 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

3) 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

4) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: "Effect of Fiber-Form Nanostructure on the Particle Emission from Tungsten Surface in Plasmas", Bulletin of Research Institute for Industrial Technology, AIT, 査読：無；Vol.14 (2012) pp.27-34, <http://so-ken.aitech.ac.jp/soken/report/2012.html>

5) 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

6) 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

7) 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

8) S. Kajita, N. Yoshida, R. Yoshihara, N. Ohno, T. Yokochi, M. Tokitani and S. Takamura : “TEM analysis of high temperature annealed W nanostructure surface”, Journal of Nuclear Materials, 査読:有; Vol.421 (2012) pp.22-27, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.11.044

9) 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

10) 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

11) 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

12) 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

13) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno : “Deepening of Floating Potential for Tungsten Target Plate on the way to Nanostructure Formation”, Plasma Fusion Res./ Rapid Communications, 査読:有; Vo

l.5 (2110 039(2 pages), DOI : 10.1585/PFR.5.039

14) S. Takamura, N. Ohno, M. Kando, G. Kushida and T. Tsujikawa: “Compact Plasma Device for PWI Studies”, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 査読:有; Vol.9 (2010) pp.441-445, [http://www.jspf.or.jp/JPFRS/PDF/Vol9/jpfrs2010\\_09-441.pdf](http://www.jspf.or.jp/JPFRS/PDF/Vol9/jpfrs2010_09-441.pdf)

15) S. Kajita, N. Ohno, S. Takamura and Y. Tsuji: “Direct Observation of Cathode Spot Grouping using Nanostructured Electrode” Physics Letters A, 査読:有; Vol.373 (2009) 4273-4277, DOI: 10.1016/j.physleta.2009.09.038

16) N. Ohno, S. Kajita, M. Takagi and S. Takamura : “Development of Divertor Plasma Simulators with High Heat Flux Plasmas and Its Application to Nuclear Fusion Study”, IEEJ Transactions, 査読:有; Vol.4 (2009) pp.476-487, DOI: 10.1002/tee.20433

17) N. Ohno, M. Yshimi, M. Tokitani, S. Takamura, K. Tokunaga and N. Yoshida : “Spherical cauliflower-like carbon dust formed by interaction between deuterium plasma and graphite target and its internal structure”, Journal of Nuclear Materials, 査読:有; Vol.390-391 (2009) pp.61-64, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.051

18) S. Kajita, S. Takamura and N. Ohno : “Prompt Ignition of a Unipolar Arc on Helium Irradiated Tungsten”, Nuclear Fusion, 査読:有; Vol.49, (2009) pp.032002(4pages), DOI: 10.1088/0029-5515/49/3/032002

19) 大野哲靖、高村秀一 : 「核融合プラズマとプラズマプロセッシングの橋渡」, プラズマ・核融合学会誌、査読:無; Vol.84 (2008) pp.740-749, [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2008\\_11/jspf2008\\_11-740.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2008_11/jspf2008_11-740.pdf)

[学会発表] (計 30 件)

1) 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。
- 2) 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。
  - 3) 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。
  - 4) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: “Cooling Characteristics and Mitigation of He-Defected Tungsten with Nanostructured Surface”, 2012 年 10 月 08 日～10 月 13 日, San Diego, USA.
  - 5) 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”, Joint Conference of 9<sup>th</sup> International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma confinement (OS2012) and 3<sup>rd</sup> International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF 2012), 2012 年 8 月 27 日～8 月 31 日、Tsukuba, Japan.
  - 6) 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。
  - 7) 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。
  - 8) 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。
  - 9) 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 1 月 13, 14 日、核融合科学研究所、土岐市。
  - 10) 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 1 月 22 - 25 日、石川県立音楽堂、金沢市。
  - 11) S. Takamura, T. Miyamoto, J. Morisue and N. Ohno: “Power Transmission and Thermal Emission Characteristics of Tungsten Surface with and without Helium Defects”, 8<sup>th</sup> General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association in 2011, 2011 年 11 月 1 日～11 月 4 日, Guilin, China.
  - 12) T. Miyamoto and S. Takamura: “Recovery of Tungsten Surface with Fiber-Form Nanostructure by the Effect of Surface Temperature Increase in Plasmas”, *ibid.*
  - 13) 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。
  - 14) 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。
  - 15) 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.
  - 16) 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。
  - 17) S. Takamura, T. Miyamoto and N.

- Ohno: " Outstanding Properties of Tungsten Material with Fiber-form Nanostructured Subsurface for the Wall of Fusion Reactor", 38<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics, 2011年7月27日～8月1日, Strasbourg, France.
- 18) 高村秀一: シンポジウム III 「極限重相科学によるタングステン PWI 研究の新展開」、第27回プラズマ・核融合学会年会、パネラー「3. PWI 研究の現状と課題」、2010年11月30日～12月3日、北海道大学学術交流会館（北海道）、札幌市。
- 19) 恵比根拓也、高村秀一、海野翔太、宮本隆徳: 「コンパクトプラズマ発生装置 AIT-PID における PWI のための高密度プラズマ生成」、同上。
- 20) 宮本隆徳、高村秀一、恵比根拓也、森本泰介、成瀬貴臣、大野哲靖: 「ヘリウム損傷タングステンの表面特性とその修復」、同上。
- 21) 高村秀一、宮本隆徳、大野哲靖: 「ヘリウム損傷タングステンの特性評価とその修復」、PWI 合同研究会、核融合科学研究所（岐阜県）。2011年11月17～18日。
- 22) 宮本隆徳、高村秀一、恵比根拓也、森本泰介、成瀬貴臣: 「ヘリウム損傷タングステンの温度履歴とその修復」、平成22年度電気関係学会東海支部連合大会、中部大学（愛知県）。2011年8月30～31日。
- 23) 恵比根拓也、高村秀一、宮本隆徳、森本泰介、成瀬貴臣: 「コンパクトプラズマ発生装置 AIT-PID におけるモータ駆動高速探針計測システム」、同上。
- 24) S. KAJITA, S. Takamura and N. Ohno: "Ignition of Self-sustained Unipolar Arc in a Plasma", International Congress on Plasma Physics, ICPP-LAWPP2010, Chile, (Invited Talk), 2010年8月8～13日, Santiago, Chile.
- 25) 高村秀一、宮本隆徳、大野哲靖: 「タングステン材料表面のヘリウム損傷に及ぼす温度履歴効果」、第8回核融合エネルギー連合講演会、2010年6月10日～11日、高山市民文化会館（岐阜県）。
- 26) S. Takamura, T. Miyamoto and N. Ohno: " Investigation on the Effect of Temperature Excursion on the Helium Defects of Tungsten Surface by using Compact Plasma Device", 19<sup>th</sup> International Conference on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2010年5月24～28日, San Diego, California, USA.
- 27) 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", 同上。
- 28) 大野哲靖、梶田信、高村秀一: 「核融合プラズマ対向材料としての高融点材料の現状と課題」、プラズマ科学シンポジウム2009、2009年2月4日、名古屋大学。
- 〔図書〕（計 1 件）
- 1) 高村秀一: 森北出版株式会社、「境界領域プラズマ理工学の基礎」、2010年、468頁。
- 〔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 SHUIHI)  
 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  
 ・ 栗下裕明 ( KURISHITA HIROAKI )  
 東北大学・金属材料研究所・准教授  
 研究者番号: 50112298  
 ・ 高橋昭如 (TAKAHASHI AKIYUKI)  
 東京理科大学・工学部・准教授  
 研究者番号: 0036444  
 ・ 大野哲靖 (OONO MORIYASU)  
 名古屋大学大学院工学研究科・教授  
 研究者番号: 60203890