

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246120

研究課題名(和文) プラズモイドー定常高熱流プラズマ複合照射装置を用いた先進プラズマ壁相互作用研究

研究課題名(英文) Advanced Plasma-Wall Interaction Study by using Steady/Transient Dual Plasma Irradiation Device

研究代表者

大野 哲靖(OHNO, Noriyasu)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60203890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円、(間接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：定常高熱流ダイバータプラズマ模擬試験装置(名古屋大学)と高密度プラズモイド入射装置(兵庫県立大学)を結合したプラズモイドー定常高熱流プラズマ複合照射装置を開発した。プラズモイドのパラメータ計測(電子密度, イオン温度)をレーザー干渉計と分光計測を用いて行った。

また, プラズマ対向材料への熱負荷計測をカロリメータを用いて行うとともに, 熱流入過程を詳細に調べるために InGs ダイオードを用いた高時間分解の温度計測システムを開発した。

さらに, プラズモイドのタングステン材への照射実験を実行し, 表面構造変化を走査型電子顕微鏡計測により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To investigate synergistic effects of steady state plasma irradiation and transient heat/particle loads to plasma facing materials, a new plasma gun device was developed and was combined to the linear plasma device NAGDIS-I. To measure the plasma density, an interferometer measurement was developed; the ion temperature was measured spectroscopically.

The energy density of the pulsed plasma was measured with a calorimeter. We also developed the energy density measurement with InGs photo detectors with a high time resolution.

Moreover, a preliminary irradiation test of the plasma pulse to a tungsten sample was conducted, and the surface morphology change was shown with the analysis by a scanning electron microscope.

研究分野：工学

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 Edge Localized Mode ダイバータプラズマ模擬試験装置 プラズマガン
タングステン 熱負荷 温度計測

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現のためには、高性能な炉心プラズマを維持しつつ、炉壁は、熱的に十分耐えられ、損耗が少なくかつヘリウム灰や燃料などの粒子制御が確保されなければならない。炉心プラズマから流出する膨大な粒子流および熱流によるプラズマ対向材（ダイバータ板）の損傷低減が最も重要な課題の一つになっている。特に間歇的なプラズマ流出を伴う Edge Localized Mode (ELM)不安定やDisruption現象によるパルスの熱・粒子負荷によるプラズマ対向材の損傷が懸念されている。

国際熱核融合炉実験炉 (ITER) の科学技術諮問委員会 (STAC) および核融合エネルギーフォーラムのITER・BA技術推進委員会では、“Divertor material strategy”が重要課題として議論されている。特に炭素材使用によるトリチウム吸蔵問題を回避するために、ダイバータ材料として早期のタングステン使用が検討された。しかしプラズマ対向材料としてのタングステン材料の適用可能性は十分に明らかにされておらず、特にELM等の間歇的熱・粒子負荷に対するタングステン材の脆弱性の検証と高耐熱低損耗タングステン材開発の必要性が指摘された。

図1はパルスの熱・粒子負荷によるCFC炭素材とタングステン材の損傷過程を示している。ITERで想定されているパルス熱・粒子負荷によるタングステンは表面の溶融と溶融層の移動、亀裂発生とそれに伴う構造材の破壊、さらにドロプレット発生とプラズマへの不純物の混入が懸念されている。

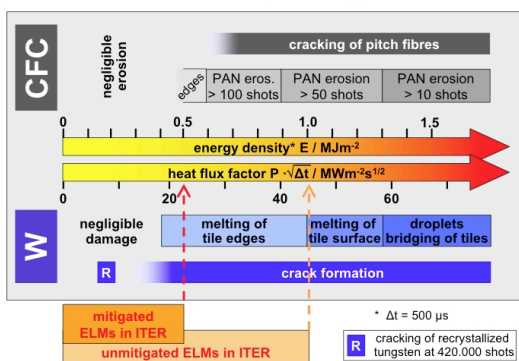


図1 ELM 負荷に対する CFC 材とタングステン材の損傷過程 (Linke ICFRM13 より)

プラズマ-タングステン相互作用研究は、申請者のグループを含め日本国内で精力的に行われ、タングステンに関する様々な問題点が指摘され、さらに高靱性を有するタングステン開発などが行われている。しかし、特に重要な ELM 様プラズマ負荷を含むダイバータ環境を模擬可能な装置が存在しないため、材料の健全性の検討など当該分野の研究進展に大きな障害になっている。

欧州研究グループは ELM プラズマ負荷を模擬可能な装置として、ロシアのプラズマガン装置を用いて材料損傷を評価しているが、パルス繰り返し回数や背景プラズマが存在しないなど課題が多い。

一方、パルス熱負荷としてレーザー、電子ビーム、プラズマを用いた場合、損傷過程が著しく異なることが報告されている。電子ビームは熱負荷のみであり、レーザーは表面の状態によってレーザーエネルギー吸収率が変わるため、ELM 環境の模擬として適当か問題がある。ELM 環境を模擬した繰り返しパルス負荷のシミュレーションでは、熱パルスと粒子パルスが同時に入射され、パルス間にも定常プラズマが照射される環境の実現が必要不可欠である。

2. 研究の目的

名古屋大学で開発された定常高熱流ダイバータプラズマ模擬試験装置と兵庫県立大学で開発された高密度プラズモイド入射装置を改良・融合することにより、世界的に類のないプラズモイド一定常高熱流プラズマ複合照射装置を開発する。

開発した複合照射装置を駆使し、プラズマ-タングステン材相互作用を高時間分解 2 次元分光計測により明らかにし、タングステン溶融層移動現象や蒸気遮蔽効果現象の物理機構を解明する。

3. 研究の方法

高密度プラズモイドを生成する磁化同軸プラズマガン装置の設計・製作を行い、定常高熱流ダイバータプラズマ模擬試験装置 NAGDIS-I と結合したプラズモイド一定常高熱流プラズマ複合照射装置(NAGDIS-PG)の開発を行った。

また、レーザー干渉計、分光計測、高速カメラ計測などによりプラズモイドのプラズマパラメータ計測を行い、さらにカロリメータ、InGaAs フォトダイオードを用いたプラズモイドの熱負荷計測を行った。

さらに、タングステン材料へのプラズモイド一定常プラズマ同時照射実験を行った。

4. 研究成果

(a) プラズモイド一定常高熱流プラズマ複合照射装置 (NAGDIS-PG) の開発

プラズモイド一定常高熱流プラズマ複合照射装置 NAGDIS-PG(図2, 3)は、パルス放電部分:磁化同軸プラズマガン(PG)と定常プラズマ生成部分:直線型定常プラズマ発生装置 NAGDIS-I から構成される。PG 装置は、パルス幅 100 ms で電子密度 10^{21} m^{-3} を超える高温・高密度のプラズマ塊(プラズモイド)を生成できる。プラズマ径は 8 cm 程度である。NAGDIS-I は最大磁場強度 0.15 T で、傍熱型 LaB₆陰極を用いた PIG (Philips Ionization Gauge) 放電で定常

プラズマを生成する。電子密度 $\sim 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 $5 \sim 15 \text{ eV}$ 、プラズマコラム径 $\sim 12 \text{ cm}$ である。

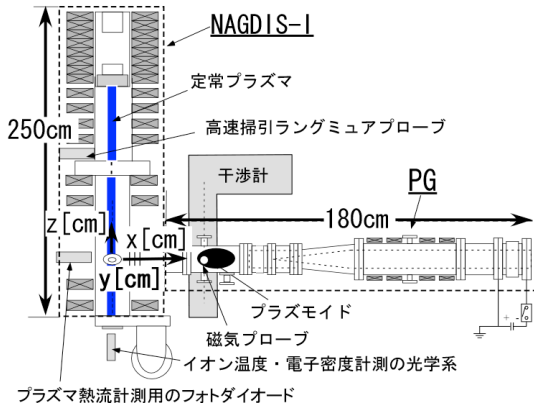


図2 プラズモイドー定常高熱流プラズマ複合照射装置 NAGDIS-PG の模式図。

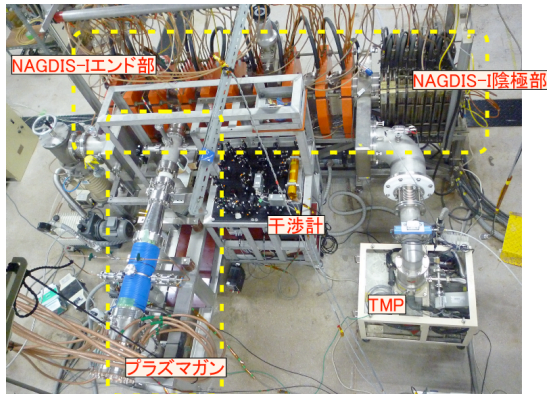


図3 プラズモイドー定常高熱流プラズマ複合照射装置 NAGDIS-PG の全体写真。

(b) プラズモイドのパラメータ計測

プラズモイドの電子密度、イオン温度計測をレーザー干渉計、分光計測を用いて行った。プラズモイドは、 10^{21} m^{-3} を超える電子密度を持つ点が大きな特徴であり、放電時間が 1 ms 以下と短いため、電子密度計測には十分な時間分解能が要求される。また、高密度であるために、プローブ計測を行えない。そのためレーザー干渉計を用いて密度計測を行った。レーザー干渉計を採用した理由は、時間・空間分解能が高く、レーザー光による非接触な計測である点が挙げられる。

ゼーマンレーザーを用いたヘテロダイン干渉計を採用した(図4)。ゼーマンレーザーとは、偏向面が直交している2つの直線偏光が、差周波 $D\omega$ を維持した状態で発振しているレーザーである。ゼーマンレーザーは、波長 633 nm 、差周波 $D\omega=208 \text{ kHz}$ という特性を持

つ。直線偏光ごとにビームスプリッターと偏光子で分離し、プローブ光とローカル光を生成する。参照信号は、図では分離したプローブ光とローカル光を再び重ねあわせて抽出しているが、レーザードライバ本体にも参照信号出力があるため、ドライバからも取得可能である。光検出器で得たビート信号をアンプで増幅後、Digital Demodulation法で解析、又は位相計に入力して位相差信号を取り出す。

レーザー干渉計による電子密度波形を図5(下)に示す。2種類の電子密度解析を行っており、赤線がDigital Demodulation法(DD法)、青線が位相計で算出した波形を示しており、緑線が磁気プローブ波形である。磁束密度波形の山と同じタイミングで電子密度波形の山が見られた。また、DD法、位相計で良い一致が見られ、位相計での計測が可能であることが確認できた。

プラズモイドの電子密度・イオン温度計測のた

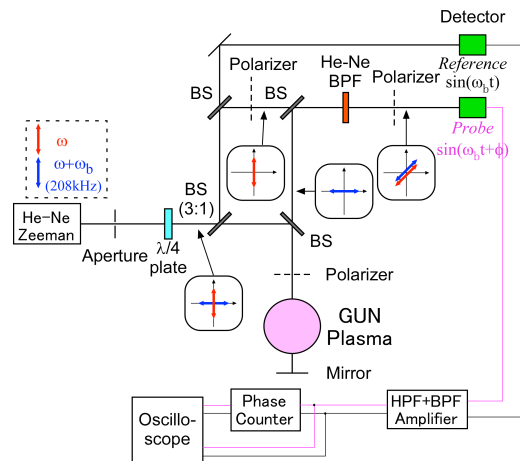


図4 干渉計測光学系の模式図

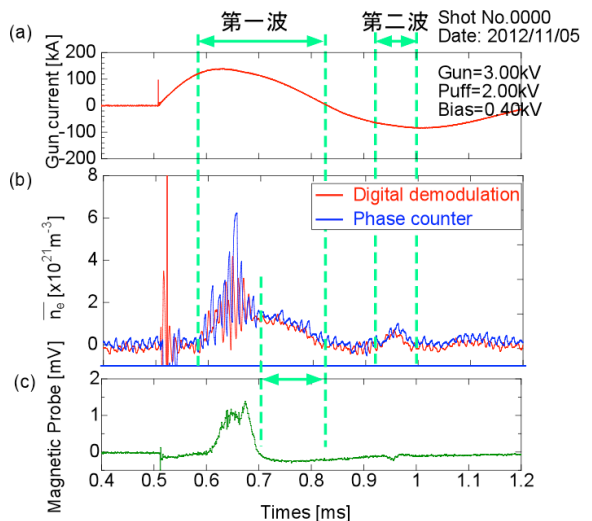


図5 (上) コンデンサバンク電源放電電流(下) 電子密度波形(赤:DD法、青:位相計、緑:磁気プローブ)

めに、HeIIの発光(主量子数遷移 $n = 3 - 4$, 中心波長 468.54 – 468.59 nm)となる13本の微細構造を持つ線スペクトルを計測した。発光スペクトルは中心波長に対し広がりを持ち、その要因として(1)ドップラー広がり(2)シュタルク広がり(3)ゼーマン分裂がある。

最初に、ゼーマン分裂効果の評価するために、磁気プローブでプラズモイド中の磁場 B_p を計測した。計測結果から $B_{p,max} = 60$ G となり、このHeII (468.6 nm)の遷移に対するゼーマン効果による分裂幅は $\Delta\lambda_z \sim 1.9 \times 10^{-4}$ nm である。分裂幅はスペクトルの広がり比べ非常に小さいため、ゼーマン効果の影響を考慮しない。

発光スペクトルを、フォーク関数でフィッティングを行うことで、ドップラー広がり・シュタルク広がりを算出し、ドップラー広がりからイオン温度、シュタルク広がりから電子密度を評価した。

レーザー干渉計、分光計測による電子密度計測の結果を図6に示す。プラズモイドは視線方向に電子密度分布を持つと考えられ、分光計測ではこの分布における最大値の評価を行っている。干渉計による電子密度計測の比較により、分光計測による電子密度評価が妥当であると考えられる。この結果から、プラズモイドはNAGDIS-I装置方向に進行するにつれ、電子密度が減少する。この要因はプラズマガンの容器(直径 8 cm)からより大きな容器である

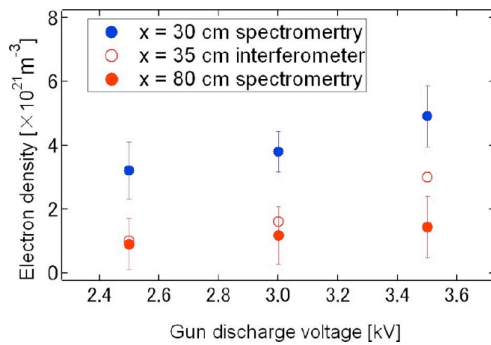


図6 分光計測、干渉計測によるプラズモイドの電子密度計測結果。

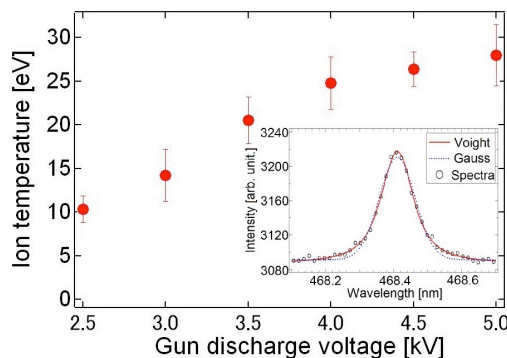


図7 イオン温度のガン放電電圧依存性。

NAGDIS-I にプラズモイドが広がって流入し、電子密度の減少すると考えられる。

図7にイオン温度のガン電圧依存性を示す。この結果からガン放電電圧に伴いイオン温度が増加すること、プラズモイドが磁場を横切ることによってイオン温度が数 eV 低下することが明らかになった。

(c) プラズマ対向材への熱負荷計測

カロリメータを製作し、プラズモイド単体、もしくはプラズモイドと定常プラズマ同時照射環境下でのプラズマ対向材料への熱負荷を計測した。

図8にプラズマ対向材料に流入するプラズマ熱負荷のガン電圧依存性を示す。プラズモイド単体照射においては(青丸)、ガン電圧増加に伴い熱負荷は増加し、ガン電圧 5kV において、 0.2 MJ/m^2 の熱負荷が得られている。一方、プラズモイドと定常プラズマ同時照射において、NAGDIS-I の放電電流が 10A の時には、プラズモイド単体の場合と殆ど変わらないが、放電電流が 35A の高密度定常プラズマの場合は、著しく熱負荷は増加し、最大 0.7 MJ/m^2 の熱負荷が得られている。この熱負荷は、単純にプラズモイドと定常プラズマの熱負荷を加算した熱負荷よりも著しく大きい。この結果は、プラズマモイドと定常照射による同時照射によって、非線形的に熱負荷が増加していることを示している。

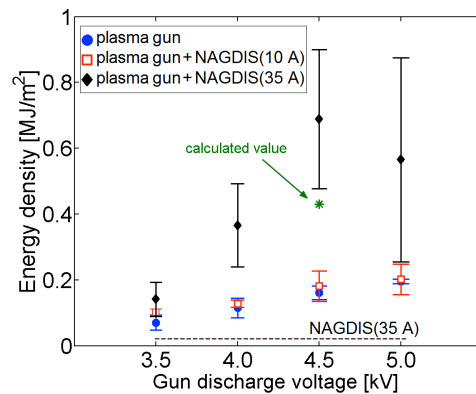


図8 プラズマ対向材料への熱負荷のガン電圧依存性。

カロリメータは時間応答が不十分なために、プラズマ熱負荷の時間変化を計測することができない。そのため、W 試料(100×100×0.1 mm³)を挿入し、InGaAs フォトダイオード(波長:700~1800 nm)を用いて、W 試料温度分布計測(時間分解能 3μs)を行い、熱負荷の時間発展計測を行った。定常プラズマ照射中のW 試料の温度を放射温度計で計測し、フォト

ダイオードの出力に対する温度依存性を評価した (図9)。

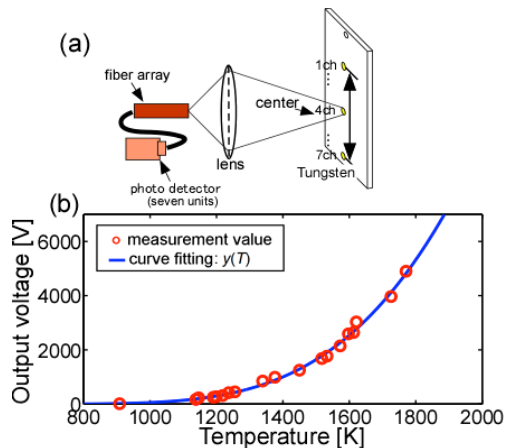


図9 InGaAs フォトダイオード出力の温度校正方法(a)と校正データ(b)。

図10は、プラズモイド単体(a)、プラズモイド・定常プラズマ同時照射(b)の時の、InGaAs フォトダイオード出力の時間発展を示している。プラズモイド単体照射の場合、プラズモイド照射により急激に温度が上昇し、最大温度は 1500 K に達する。その後、急激に温度が下がり初期温度に戻る。一方、同時照射の場合(放電電流 35A), 最高温度に達した後、非常にゆっくり温度が減少することが分か

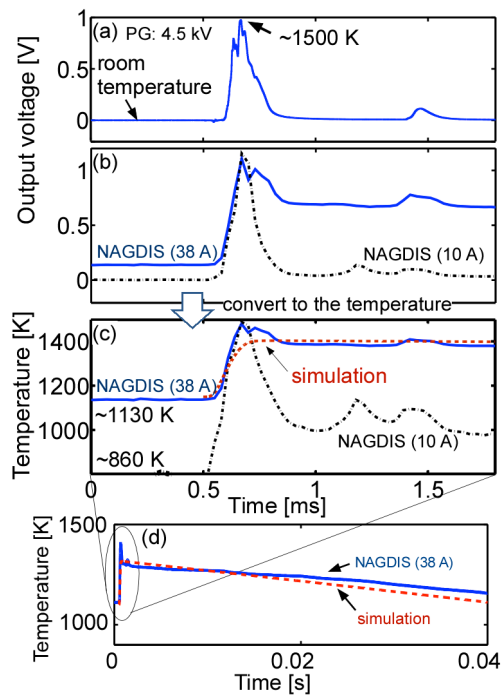


図10 InGaAs フォトダイオードの出力とプラズマ対向材背面温度の時間発展。

る。これは、プラズモイド入射後もプラズマ熱流の流入が続いていることを示唆している。

1次元の熱伝導方程式を解き、W板の背面温度上昇のシミュレーションを行った。シースを介して流入するプラズマの熱流 Q を仮定し、初期条件は室温、境界条件はシュテファン・ボルツマン法則から、W表・裏面からの放射エネルギーを考慮した。このシミュレーションから得た温度変化を(c), (d)に示す。この時、熱負荷は 0.45MJ/m^2 と評価される (図8)。以上の実験結果及びシミュレーション結果より、図8で観測された同時照射時の著しい熱負荷増加は、プラズモイド照射後のプラズマ熱負荷によることが分かった。

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 3 件)

- ① S.Kajita, N.Ohno, T.Akiyama, T.Uchiyama, M.Osaka, Y.Kikuchi, M.Nagata, “Development of steady/transient dual plasma irradiation device using a plasma gun”, Journal of Nuclear Materials, 査読有、Vol.483, 2013, pp.707-710. DOI:10.1016/j.jnucmat.2013.01.149.
- ② S.Kajita, T.Akiyama, T.Nihashi, M.Osaka, N.Ohno, Y.Kikuchi, I.Sakuma, M.Nagata, “Characterization of Gun Plasma Penetrated into a Steady State Plasma Device”, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 査読有、Vol.41, 2013, pp.3122-3128.
- ③ S.Kajita, G.De Termmerman, S.van Eden, T.de Kruif, N.Ohno, “Thermal response of nanostructured tungsten”, Nuclear Fusion, 査読有、Vol.54, 2014, 033005(10pp).

[学会発表] (計 9 件)

- ① 大野哲靖、尾坂将史、佐藤大介、梶田信、菊池祐介、永田正義「定常プラズマ・熱パルス複合照射装置におけるプラズマ熱流計測」日本物理学会第69回年会、2014.3.27-2014.3.30、東海大学
- ② 尾坂将史、佐藤大介、大野哲靖、梶田信、秋山毅志「NAGDIS-PGにおける発光スペクトル解析」日本物理学会2013年秋季大会、2013.9.25-2013.9.28、徳島大学
- ③ M.Osaka, D.Sato, N.Ohno, S.Kajita, T.Akiyama, “Spectral Analysis of the Emission and Evaluation of the Heat Load Characteristics in NAGDIS-PG”, ISPlasma 2014, 2014.3.2-2014.3.6, 名城大学
- ④ 二橋卓哉、大野哲靖、梶田信、高木誠、菊池祐介、永田正義「プラズモイド-定常高熱流プラズマ複合照射装置の開発及び磁化同軸プラズマガン装置の放電特性評

価」第 9 回核融合エネルギー連合講演会、
2012.6.28-29、神戸国際会議場

- ⑤ T.Nihashi, N.Ohno, S.Kajita, M.Osaka, M.Takagi, Y.Kikuchi, M.Nagata, T.Akyama, “Development of divertor simulator enabling simultaneous irradiation of steady-state high heat flux plasma and plasmoid”, OS2012, 2012.8.27-31, Epochal Tukuba
- ⑥ T.Uchiyama, T.Akiyama, T.Nihashi, S.Kajita, N.Ohno, Y.Kikuchi, N.Fukumoto, M.Nagata, “Measurement of Plasmoid Characteristics using Interferometer”, Plasma2011, 2011.11.22-24, 石川県立音楽堂
- ⑦ T.Nihashi, N.Ohno, S.Kajita, T.Uchiyama, M.Takagi, Y.Kikuchi, K.Ikuta, T.Iwamoto, I.Sakuma, M.Nagata, “Development of Divertor Simulator Enabling Simultaneous Irradiation of Steady-State High Heat Flux Plasma and Plasmoid”, Plasma2011, 2011.11.22-24, 石川県立音楽堂
- ⑧ 内山徹也、梶田信、大野哲靖、高木誠「接触・非接触 He プラズマの動的応答の分光学的診断」平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会、2010.8.30-31、中部大学
- ⑨ 内山徹也、大野哲靖、梶田信、高木誠「トロイダル・ダイバータ模擬装置における熱パルス付加印加時の接触・非接触プラズマの動的応答、プラズマ・核融合学会年会、2010.11.30-12.3、北海道大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

大野 哲靖 (OHNO Noriyasu)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：60203890

(2)研究分担者

高村 秀一 (TAKAMURA Shuichi)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号：40023254

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

永田 正義 (NAGATA Masayoshi)
兵庫県立大学・工学研究科・教授
研究者番号：00192237

菊池 祐介 (KIKUCHI Yusuke)
兵庫県立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00192237