

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360378

研究課題名(和文) タンデムミラー端部及び高出力中性粒子ビームを用いたダイバータ・ELM模擬研究

研究課題名(英文) Study on Divertor and ELM Simulation Using Tandem Mirror End-Region and High Power Neutral Particle Beam

研究代表者

中嶋 洋輔 (Nakashima, Yousuke)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：00188939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合炉プラズマからの高熱流粒子束を処理するダイバータの運転に必要な知見を得るために、大型タンデムミラー装置ガンマ10の高熱流束を利用したダイバータ模擬実験を行った。ガンマ10端部に熱流と粒子束計測器を設置し、1平米当たり10MW以上の高熱流の発生と、その高周波電力による高い制御性を確認した。また、端部に設置したダイバータ模擬実験モジュールを用いて、端部から流出してくる高熱流プラズマのエネルギーを低減し、非接触プラズマの形成に成功した。また、周辺プラズマから間欠的に流出するELMと呼ばれるパルス熱流束を模擬するイオンビーム入射装置を開発し、開放磁場中の収束性等基本的特性を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, divertor simulation experiments have been performed by using high heat-flux plasma flow from the end of the large tandem mirror device GAMMA 10 in order to investigate the operation scenario for the divertor which is an essential component for nuclear fusion reactors. A diagnostic tool was installed at the mirror end and the heat flux of more than 10 MW/m has been achieved under a good controllability with the radio frequency power applied to the tandem mirror plasma. By using a divertor simulation experimental module installed at the end-mirror exit, high heat-flux plasma flow injected from the end-mirror was successfully reduced and formation of plasma detachment was clearly confirmed. In order to simulate the intermittent heat flow from the periphery plasma in edge region, a new ion beam injection system was developed and fundamental characteristics on beam convergence under to open magnetic field configuration of GAMMA 10 end-cell have been studied.

研究分野：プラズマ物理学，核融合

キーワード：ダイバータ模擬 タンデムミラー 高熱流束 非接触プラズマ 高速中性粒子ビーム

### 1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉において、コアプラズマから流出する燃料粒子やヘリウム灰、不純物粒子を処理するため必須の構成要素であるダイバータの実現は、国際熱核融合実験装置 ITER においても急務の課題となっている。ITER では、通常運転時の熱負荷は、 $5 \cdot 20 \text{ MW/m}^2$  と見積もられており、このような高熱負荷からダイバータ板を保護するためには、ダイバータ部のプラズマを適切に制御することにより、非接触プラズマ状態に保つことが、核融合炉運転シナリオとして極めて重要な鍵を握っている。また、ELM と呼ばれる大熱流を伴うプラズマ流が核融合プラズマの周辺部に発生し、ダイバータへの熱負荷の大きな問題となっている。このようなダイバータ運転の実現に向けて国内外では、ダイバータを模擬するための様々な実験装置が開発され実験が行われてきた。ところがこれらの実験装置には、小規模の実験装置が多く、プラズマ流の口径も高々  $2\text{--}3 \text{ cm}$   $\phi$  と小さい。また、これらの実験装置の多くは、低磁場下における電極を用いた直流放電によるものであり、電極等の境界条件を持たない強磁場高温トカマクプラズマからのプラズマ流を完全に模擬していることにはならない。このことは非接触プラズマの長時間維持の実験環境を再現する上で、大きな障害となっている可能性がある。我々が使用する大型タンデムミラー装置では、高周波やマイクロ波、中性粒子ビームといった、現在の核融合実験装置と同じ規模のプラズマ生成・加熱装置を用いて高温プラズマを生成しており、従来の小型プラズマ模擬装置とは本質的に異なるプラズマ流を生成可能である。このように大規模装置を用いた核融合プラズマに近い環境下（強磁場、高イオン温度、高電子温度、電氣的に電極から完全に浮いた状態のプラズマ）におけるダイバータ模擬が大いに期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、将来の核融合炉の実現に必要な不可欠で未解決の研究課題であるダイバータ実現のための諸課題を解決することを目的として、開放端磁場配位を持つ大型タンデムミラー装置 (GAMMA 10) の端部から流出する端損失プラズマ流を利用する。ミラー端部から流出するプラズマの特性を評価する。更に、このプラズマ流に対して、不純物ガスを入射して放射冷却を促進させプラズマ流の持つ大きな熱量を減少させることにより、実機ダイバータプラズマを模擬する為に必要な非接触プラズマの生成・維持のための知見を得る。並行して、ダイバータへの熱負荷の重大な研究課題である ELM 模擬を目的として高出力ビームを用いたダイバータ候補材への初期照射実験を行い、プラズマと材料表面との相互作用、非接触プラズマ状態の定常維持の為の物理機構の解明に向けた知見を得

ることによって、ITER 等の将来のトカマク装置への要素還元研究に貢献する。

### 3. 研究の方法

(1) 熱流束と粒子束を同時に計測する方向性プローブ (マッハプローブ) と熱電対を組んだカロリメータの計測モジュールを用いて、タンデムミラー端部のミラーズロート外側近傍において、端損失プラズマ流の直接計測を行う。粒子束強度は、マッハプローブによりイオン飽和電流を計測し、評価する。GAMMA 10 プラズマを生成・加熱しているイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 波動のパワーやプラズマ密度を制御するガスパフの量を変化させることにより、端損失プラズマ流への効果を検証する。また、電子サイクロトロン加熱 (ECRH) を用いて、同部のプラズマを制御し、上記熱流・粒子流計測モジュール、可視光 2 次元イメージ計測システムを用いて、端損失プラズマ流を高熱流・高粒子束化及び ELM 模擬実験に向けたプラズマ生成手法を最適化してゆく。

(2) GAMMA 10 西エンド部に設置したダイバータ模擬実験装置 (D-モジュール) に高温プラズマ流を導入し、モジュール内に入射した不純物ガスとの相互作用によって、プラズマ冷却を促進し非接触プラズマを生成、その特性をモジュール内に設置した V 字ターゲット状の静電プローブ、カロリメータを用いて計測する。併せて高速カメラ、分光器によるターゲット前面の可視光を計測する。

(3) ELM 模擬や高エネルギー粒子と材料表面との相互作用を研究する目的で、GAMMA 10 端部に高エネルギーイオンビーム入射装置を製作・設置し、開いた磁力線構造を持つ磁場配位下でのイオンビームの特性評価実験とダイバータ候補材であるタングステン試料への初期照射実験を開始する。

### 4. 研究成果

#### (1) ミラー端部における高熱流生成

図 1 に、GAMMA 10 の全体図と西エンド部の真空容器断面及び設置した計測器の概略図を示す。ミラー端部から流出するプラズマ流は、約 30cm 離れた位置に設置したカロリ-

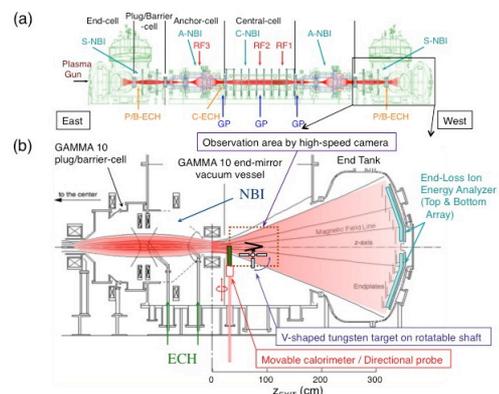


図 1 GAMMA 10 全体図 (a)、及び西エンド概略図 (b)

メータと方向性プローブで熱流および粒子束として測定される。また、約 300cm 離れたエンドタンクの内壁に、端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) によるイオンの軸方向のエネルギー、及びその径方向分布が測定できるようにになっている。

図 2 は、プローブとカロリメータで測定されたイオン温度  $T_{i//}$  と ELIEA で測定されたものを比較してセントラル部において ICRF 波動で生成・加熱されたプラズマの内部エネルギーに相当する反磁性量に対してプロットしている。図から判るように、イオン温度はセントラル部で生成されたプラズマの内部エネルギーの増加に伴い上昇し、それぞれの計測器で得られた結果も良く一致していることが判った。また、粒子束強度についても ELIEA の測定から、セントラル部の線密度に比例して増加していることが確認された。

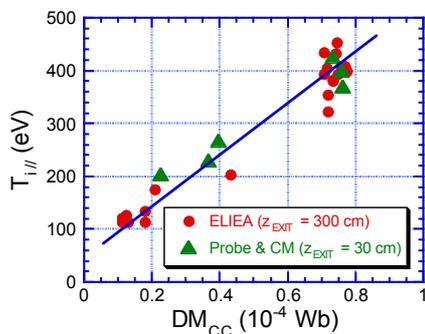


図 2 測定されたイオン温度とセントラル部プラズマの反磁性量の関係

図 3 は、カロリメータで測定された熱流束の ECRH パワー依存性を示す。この実験では ICRF 生成されたプラズマに対して ECH の短パルスの ECRH (5-10ms) を重畳した際に発生した高エネルギー電子流による熱流を計測したものである。図から ECRH パワーの上昇に伴い、着実に熱流束が増加しており、得約 400kW のパワーで ITER ダイバータの熱負荷の目安である、10 MW/m<sup>2</sup>を上回る値を達成していることが判った。

以上の結果から大型タンデムミラー装置を利用したダイバータ模擬実験の優位性が確

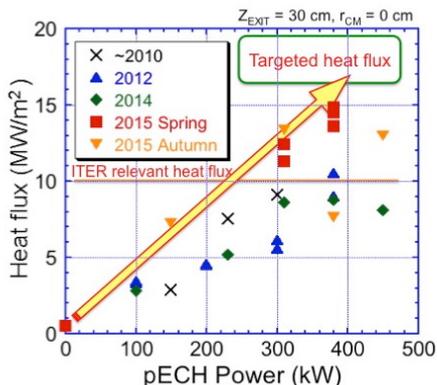


図 3 ECRH 印加中の熱流束密度の ECH パワー依存性

認され更なる高熱流束、高粒子束のプラズマ流発生への見通しを得ることが出来た。

(2) 不純物ガスによる非接触プラズマ形成

図 4 は、非接触プラズマ形成・特性測定実験の為に西エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュール (D-モジュール) の概略図を示す。本モジュールは、SUS 製の断面 50×48 cm、長さ 70 cm の直方体の容器で、前方にある φ20 cm の円形ポートから、端損失プラズマ流が導入される。容器内部には、V 字形の 2 枚のタングステン製ターゲット (30 cm×35 cm) が設置されており、V 字形開口部の角度が 15 度から 80 度まで可変となっている。また、後部排出口が設置され、扉の開き角度を変えることにより、容器内部の中性粒子圧力を制御できるようになっている。

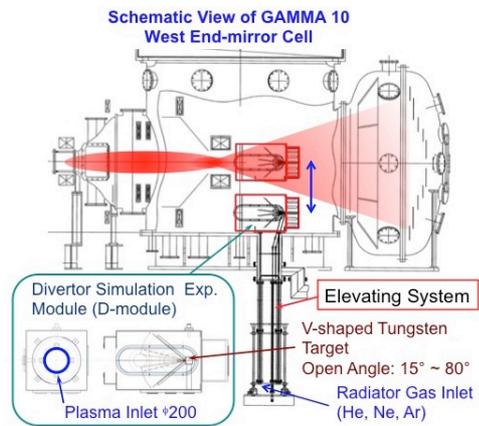


図 4 西エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュールの概略図

図 5 は、不純物ガス入射実験の概略図である。D-モジュールには 3 カ所のガス導入系が設置されていて、本実験では、前方とターゲット板下側からの 2 カ所を用いてそれぞれ水素と希ガス (Ar, Xe) を用いて実験を行った。ターゲット上には、静電プローブとカロリメータが各々 13 個づつと、V 字のコーナー部の隙間にカロリメータとプローブが一对設置されている。

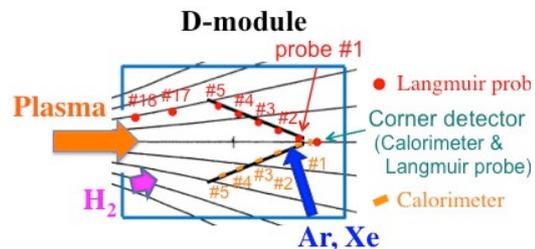


図 5 不純物ガス導入による非接触プラズマ形成実験の概略図

図 6 は上記ガス導入口から Xe ガスと H<sub>2</sub> ガスを入射した場合の、モジュール内の V 字ターゲットのコーナー部に設置したイオン飽和電流値の時間変化を示している。ガス入射はプラズマ放電の 0.3 秒程度前から行っており、プラズマ入射前にガスはモジュール内に

満たされている。ガス入射量は、ガス導入用ピエゾ弁の上流にあるリザーバーのプレナム圧を変化させて制御している。図から判るように Xe ガス入射量が増えるに従ってイオン束の減少が見られ、水素との同時入射では、ガスの無い場合に比べて 3%以下に低下していることがわかった。この現象から非接触プラズマが形成されていることが確認された。

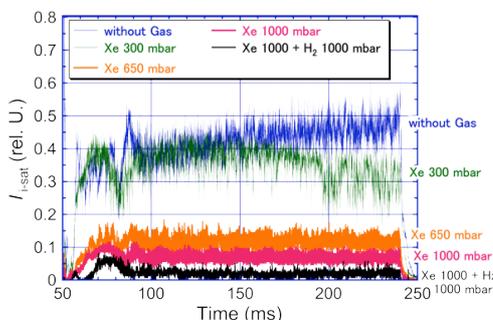


図6 D-モジュール内に Xe ガスと H<sub>2</sub> を入射した場合のV字コーナー部で検出したイオン飽和電流値の時間変化

図7に、同様の条件において高速カメラで測定したターゲット前面の可視光発光の2次元イメージを示す。Dモジュール内に Xe 及び H<sub>2</sub> ガスを各々1000mbar のプレナム圧で同時入射することによってV字ターゲットの前面での明るい発光が観測され、コーナー部分で、極端に減光していることが判った。この結果からも、プラズマがターゲット近傍で非接触化していることが認められた。

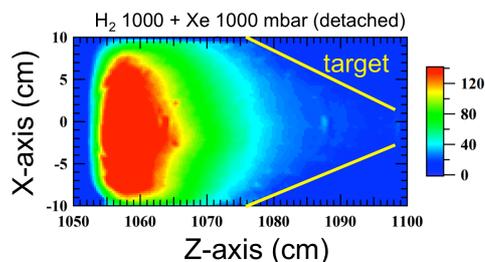


図7 D-モジュール内に Xe ガスと H<sub>2</sub> を入射した場合のV字コーナー部で検出したイオン飽和電流値の時間変化

以上の他にも ECRH を用いたターゲット近傍プラズマの接触-非接触遷移実験や、N<sub>2</sub> や Ne ガスを用いた放射冷却実験など、様々なダイバータ模擬実験が行われ、興味深い結果が得られた。

(3) ビームと材料表面との相互作用研究の為の照射システム開発と初期照射実験

ELM 模擬研究や高エネルギービームとダイバータ候補材料との相互作用研究も目差したイオンビーム照射システムの開発とそれを用いた初期照射実験を開始した。図8に GAMMA10 西エンド部に設置したイオンビーム

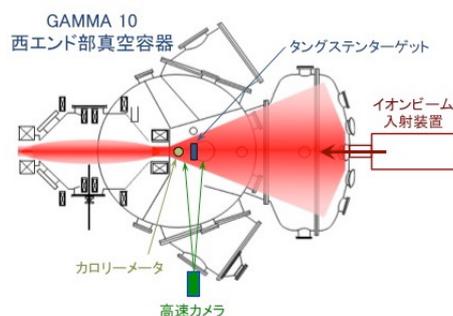


図8 GAMMA10 西エンド部に設置したイオンビーム入射装置と計測系の概略図

ム入射装置と計測系の概略図を示す。イオン源は、マルチカusp磁場を用いたバケット型イオン源を使用し、定格 20kV10A のビーム引き出し性能を持っている。イオンビーム種は水素イオンで、約 2m のドリフト管を経てエンド部真空容器からエンドミラーコイルに向かって入射され、ビームは端部で下流に向かって広がった磁力線を遡るように進む。標的であるタングステン板はコイルの手前約 70cm に設置され、ビームと標的との相互作用光は、水平方向に設置した高速カメラで撮影される。

図9(a)は、20kV、5A のイオンビームをターゲットに照射した際のターゲット上での発光を高速カメラで撮影した輝度の空間分布を示している。図9(b)は輝度のピーク値を磁場強度に対してプロットしている。GAMMA10 に印加した磁場強度が上昇するにつれてビームの分布がピーキングし、中心の強度も増加して行くことが認められ、エンド部で広がっている磁場構造に沿ってビームが収束してゆく様子が確認された。このことから、絞られた磁場配位に向かって高エネルギーイオンを注入し高出力の熱源として ELM 模擬を目差したビーム入射系の設計に重要な指針を得ることが出来た。

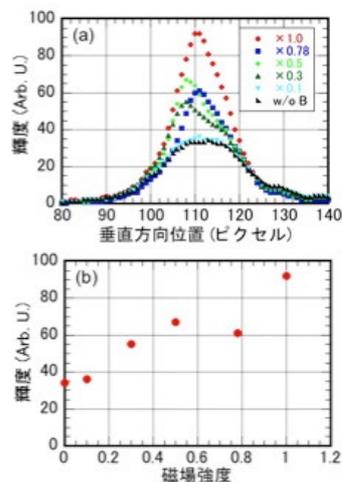


図9 高速カメラで観測したターゲット上発光の上下方向分布(a)とピーク輝度の磁場依存性(b)

## 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 16 件)

① K. Ichimura, Y. Nakashima, Md. M. Islam, Md. S. Islam, K. Shimizu, 他 (全 15 名 2 番目), Study of the axial plasma confinement for high particle flux operations in GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research, 査読有 11 巻 (2016) 2405043.

DOI: 10.1585/pfr.11.2405045.

② Md. S. Islam, Y. Nakashima, H. Matsuura, K. Ichimura, Md. M. Islam, 他 (全 13 名 2 番目), Study of Heat and Particle flux in the case of Gas Injection in the D-module of GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research, 査読有 11 巻 (2016) 2402042.

DOI: 10.1585/pfr.11.2402042.

③ Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, K. Oki, 他 (全 36 名筆頭), Progress of divertor simulation research toward the realization of detached plasma using a large tandem mirror device, Journal of Nuclear Materials, 査読有 463 巻 (2015) 537-540.

DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.12.063.

④ Y. Nakashima, M. Sakamoto, H. Takeda, K. Ichimura, Y. Hosoda, 他 (全 20 名筆頭) Recent Results of Divertor Simulation Experiments Using D-Module in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, Fusion Science and Technology, 査読有 68 巻 (2015) 28-35.

DOI: 10.13182/FST14-882.

⑤ K. Shimizu, Y. Nakashima, Y. Hosoda, K. Ichimura, H. Takeda, 他 (全 10 名 2 番目), Spectroscopic Measurements in the Experiments of Gas Injection to the Divertor Simulation Experimental Module of GAMMA 10/PDX, 査読有 68 巻 (2015) 130-135.

DOI: 10.13182/FST14-881.

⑥ M. Iwamoto, Y. Nakashima, H. Matsuura, H. Takeda, K. Hosoi, 他 (全 16 名 2 番目) Measurement of heat flux by using Calorimeter in D-module of GAMMA 10/PDX, Plasma and Fusion Research, 査読有 9 巻 (2014) 3402121.

DOI: 10.1585/pfr.9.3402121.

⑦ K. Ichimura, Y. Nakashima, H. Takeda, K. Hosoi, S. Kigure, 他 (全 16 名 2 番目) The first experiment of MPD Jet injection into GAMMA 10 plasma, Plasma and Fusion Research, 査読有 9 巻 (2014) 3406098.

DOI: 10.1585/pfr.9.3406098.

⑧ Y. Hosoda, Y. Nakashima, Y. Iida, K. Hosoi, K. Ichimura, 他 (全 19 名 2 番目) Plasma spectral measurements in the D-module of the GAMMA 10/PDX end-cell, Plasma and Fusion Research, 査読有 9 巻 (2014) 3402087.

DOI: 10.1585/pfr.9.3402087.

⑨ H. Takeda, Y. Nakashima, Y. Iida, K. Hosoi, T. Furuta, 他 (全 13 名 2 番目) Simulation of

radiation cooling effects in the GAMMA 10 west end-cell using fluid model, Contributions to Plasma Physics, 査読有 54 巻 (2014) 605.

DOI: 10.1002/ctpp.201410036.

⑩ Y. Nakashima, M. Sakamoto, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, 他 (全 23 名筆頭) First Results and Future Research Plan of Divertor Simulation Experiments Using D-Module in the End-cell of the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有 63 巻 (2013) 100-105.

⑪ M. Sakamoto, K. Oki, Y. Nakashima, Y. Akabane, Y. Nagatsuka, 他 (全 14 名 3 番目) Plasma Characterization in Divertor Simulation Experiments with a V-Shaped Target on GAMMA 10/PDX, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有 63 巻 (2013) 188-192.

⑫ K. Ichimura, Y. Nakashima, H. Takeda, K. Hosoi, H. Ueda, 他 (全 12 名 2 番目) Investigation of the Plasma Heating Effects on the End-loss Ion Flux of the Tandem Mirror GAMMA 10, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有 63 巻 (2013) 209-212.

⑬ H. Takeda, Y. Nakashima, K. Hosoi, K. Ichimura, T. Furuta, 他 (全 12 名 2 番目) Numerical simulation study for background plasma in the GAMMA 10 end-mirror cell, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有 63 巻 (2013) 414-416.

⑭ Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, M. Sakamoto, M. Hirata, 他 (全 32 名筆頭), Recent Results of Divertor Simulation Research Using an End-cell of a Large Tandem Mirror Device, Journal of Nuclear Materials, 査読有 438 巻 (2013) S738-S741.

DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.157.

⑮ H. Takeda, Y. Nakashima, K. Hosoi, K. Ichimura, T. Furuta, 他 (全 15 名 2 番目), Divertor simulation study using the GAMMA 10 end-mirror cell, Plasma and Fusion Research, 査読有 7 巻 (2012) 2405151.

DOI: 10.1585/pfr.7.2405151.

⑯ K. Ichimura, Y. Nakashima, K. Hosoi, H. Takeda, T. Ishii, 他 (全 14 名 2 番目), Divertor simulation study using the GAMMA 10 end-mirror cell, Plasma and Fusion Research, 査読有 7 巻 (2012) 2405147.

DOI: 10.1585/pfr.7.2405147.

[学会発表] (計 47 件)

① 中嶋洋輔 他, 大型タンデムミラーを用いた非接触プラズマ生成とその特性評価の進展, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 2015 年 11 月 24 日, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 (愛知県名古屋市)

② 福井良磨, 中嶋洋輔 他, プラズマ壁相互作用研究のためのイオンビーム入射システムの開発, 第 32 回プラズマ・核融合学会年会, 2015 年 11 月 24 日, 名古屋大学東山キ

キャンパス・豊田講堂（愛知県名古屋市）

③ K. Ichimura, Y. Nakashima, 他, Study of the axial plasma confinement for high particle flux operations in GAMMA 10/PDX, 25th International Toki Conference (国際会議), 2015年, 11月3日セラトピア土岐(岐阜県土岐市)

④ 中嶋洋輔, 他 GAMMA 10/PDX エンド部における非接触プラズマ形成とその特性評価, Plasma Conference 2014, 2014年11月20日朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

⑤ Y. Nakashima, M. Sakamoto, 他 Development of Divertor Simulation Research in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, 25th IAEA Fusion Energy Conference (国際会議), 2014年10月17日 Hotel Park Inn Pribaltiyskaya (St. Petersburg, Russia)

⑥ Y. Nakashima, M. Sakamoto, 他, Recent Results of Divertor Simulation Experiments Using D-Module in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, 10th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (国際会議), 2014年8月27日 Daejeon Convention Center (Daejeon Korea)

⑦ Y. Nakashima, H. Takeda, K. Ichimura, 他, Progress of divertor simulation research toward the realization of detached plasma using a large tandem mirror device, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (国際会議), 2014年5月26日石川音楽堂(石川県金沢市)

⑧ 中嶋洋輔, 他 大型タンデムミラー装置を用いたダイバータ模擬の為の大熱流束プラズマの発生と非接触プラズマ実現に向けた研究の進展, プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013年12月6日 東京工業大学, 大岡山キャンパス(東京都目黒区)

⑨ 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 他, GAMMA 10/PDX タンデムミラー端部におけるダイバータ模擬実験の進展, プラズマ・核融合学会第29回年会, 2012年11月28日クローバープラザ(福岡県春日市)

⑩ Y. Nakashima, M. Sakamoto, 他, Characteristics of High Heat-flux Generation and Divertor Simulation Experiments in the End-cell of the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, 22nd International Toki Conference (国際会議), 2012年11月21日セラトピア土岐(岐阜県土岐市)

⑪ Y. Nakashima, M. Sakamoto, 他, Plasma Characteristics of the End-cell of the GAMMA 10 Tandem Mirror for the Divertor Simulation Experiment, 24th IAEA Fusion Energy Conference (国際会議), 2012年10月12日 Hotel Hilton San Diego Bayfront (San Diego, USA)

⑫ Y. Nakashima, M. Sakamoto, 他, First Results and Future Research Plan of Divertor Simulation Experiments Using D-Module in the End-cell of the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, Joint Conference of the International

Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement and the International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (国際会議), 2012年8月29日つくば国際会議場(茨城県つくば市)

⑬ Y. Nakashima, H. Takeda, 他, Recent Results of Divertor Simulation Research Using an End-cell of a Large Tandem Mirror Device 20th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (国際会議), 2012年5月24日 Eurogress Aachen (Aschen, Germany)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中嶋 洋輔 (NAKASHIMA, Yousuke)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 00188939

### (2) 研究分担者

坂本 瑞樹 (SAKAMOTO, Mizuki)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 30235189

吉川 正志 (YOSHIKAWA, Masayuki)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 00272138

西野 信博 (NISHINO, Nobuhiro)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70243590

市村 真 (ICHIMURA, Makoto)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 10151482

小林 進二 (KOBAYASHI, Shinji)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号: 70346055

庄司 主 (SHOJI, Mamoru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部, 高密度プラズマ物理研究系・准教授

研究者番号: 00280602

今井 剛 (IMAI, Tsuyoshi)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 80354637

市村 和也 (ICHIMURA, Kazuya)

筑波大学・プラズマ研究センター・研究員

研究者番号: 20756001

### (3) 連携研究者

池添 竜也 (IKEZOE, Ryuya)

筑波大学・プラズマ研究センター・助教

研究者番号: 7058249