

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289337

研究課題名(和文)長磁力線ダイバータ配位におけるプラズマデタッチメント特性の解明

研究課題名(英文) Investigation on Plasma Detachment in Long Leg Divertor Configuration

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉実現において重要な課題であるプラズマ熱流制御のために、直線型プラズマ装置 NAGDIS-II を用いて、磁場構造がプラズマデタッチメント特性に与える影響について調べた。発散磁場配位と収束磁場配位が非接触プラズマ形成への影響を調べたところ、発散磁場構造から収束磁場構造への変化に伴い、ターゲット板へのイオン飽和電流値が著しく減少し、体積再結合過程が強まっていることが分光計測から観測された。また、可動エンドプレートにより磁力線の接続長を変化させたところ、接触-非接触プラズマの遷移が明瞭に観測され、磁力線長ならびに磁場勾配制御がプラズマデタッチメント制御に有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：Reduction of the heat flux to plasma facing components (PFC) is the most critical issue for the realization of fusion power plant. Plasma detachment is thought to be one of the most promising methods to reduce the heat load onto the PFC. We have investigated the dependence of the property of the plasma detachment on the magnetic structure by using a linear plasma device. In magnetically contracting plasmas toward the PFC, plasma density goes up along the magnetic field, leading to the enhancement of the volumetric plasma recombination. Therefore, the magnetically contracting plasma has an advantage for the formation of plasma detachment. It is also found that the variation of magnetic connection length leads to the transition from attached plasma to detached one. It can be concluded that control of magnetic structure including connection length and its gradient is the effective method to control plasma detachment.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合 非接触プラズマ 熱流制御 先進ダイバータ 体積再結合過程 非拡散的輸送 安定性

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。特に、炉心プラズマから周辺に流出する膨大な粒子流および熱流を制御し、プラズマ対向材(ダイバータ板)の損傷を低減することが最重要課題の一つである。

プラズマデタッチメント現象(図1)は、プラズマ-ガス相互作用により放射および荷電効果過程でプラズマを冷却し、プラズマを低温高密度状態にし、最終的には電子イオン再結合過程(放射+3体再結合過程)によりプラズマを気相中で消失させるというものであり、ダイバータ領域での粒子・熱流制御法の切り札と考えられている。この時生成されるプラズマを非接触プラズマという。

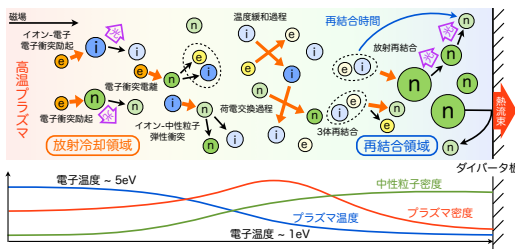


図1 プラズマデタッチメント現象：沿磁力線方向の非接触プラズマの構造

本手法の原理実証は、直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置、トカマク、ヘリカル装置などで行われた。現在建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) のダイバータにおいては最も熱・粒子負荷が大きいストライク点付近を非接触化させる部分非接触プラズマが採用されている。

一方、ITER の次期計画として、発電実証炉 (DEMO 炉) の設計活動が行われている。SlimCS DEMO 炉設計においては、炉心からダイバータ領域に流出するプラズマ熱流は 550MW と想定されており、ITER の 100 MW に比べて極めて大きい。DEMO 炉の大きさは ITER 程度であるので、現在のダイバータ配位を用いると、ダイバータ板への粒子・熱負荷の大きさはタングステンなどの対向材料の許容限界をはるかに超えると考えられている。

以上の背景のもと、新しいダイバータ配位が提案されている。代表的な配位として、Super X や Isolated ダイバータ配位がある。これらはいわゆる長磁力線ダイバータ配位(図2)である。X 点からダイバータ板への磁力線長を引き延ばし、ダイバータ領域を狭めリサイクリング中性粒子の閉じ込めを改善することで放射冷却効果を高める。また磁力線方向の熱流の勾配を小さくできるため、非接触プラズマを安定的に生成出来ると期待されている。

しかし、磁力線構造が非接触プラズマ生成に与える影響に関する実験的な検証は行われておらず、プラズマデタッチメントによる粒

子流・熱流制御の適用可能性は明らかになっていない。磁場閉じ込め定常核融合炉の実現のためには、先進ダイバータ配位におけるプラズマデタッチメント現象を用いた粒子流・熱流制御の確立は不可欠な課題である。

2. 研究の目的

先進ダイバータ配位におけるプラズマデタッチメント現象による粒子流・熱流制御の可能性を、直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置を駆使した実験研究により明らかにする。

特に分光計測により、中性粒子を含めた非接触プラズマ中のエネルギーバランスを明らかにするとともに、中性粒子輸送制御可能なダイバータモジュールを用いて効率的な非接触プラズマ生成手法を確立する。以上により、先進ダイバータ配位でのプラズマデタッチメント制御手法を確立し、核融合発電実現に貢献する。

3. 研究の方法

非接触プラズマ中のエネルギーバランスを理解するためには、基本パラメータである電子密度、温度、さらに中性ガスの温度の計測が重要である。今回、電子密度・温度計測に関してはトムソン散乱計測、中性ガス温度計測にはレーザー吸収分光計測を整備した。

-トムソン散乱による電子温度・密度計測-

直線型プラズマ生成装置 NAGDIS-II において非接触プラズマの正確な電子温度、電子密度を求めるため、レーザートムソン散乱計測システム (LTS) の開発を行った。

本研究は、LTS による低温プラズマ(1eV)の計測の大きな実績を有する DIFFER 研究所 (オランダ) の Hennie van der Meiden 博士との共同で行った。レーザーには 532 nm の Nd : YAG レーザーを使用した。トムソン散乱光取得のためにレーザー光路の最適化を行い、プリュースターポート、バッフル板、ビューイングダンプ等の迷光対策を施した。その結果、信号ノイズ比を改善でき、トムソン散乱信号の取得に成功した。

図2に LTS の装置構成の概略図を示す。観測系はファイバーと集光レンズで校正されている。使用したファイバーはコア径 0.23 mm、23 チャンネル(ただし、両端のチャン

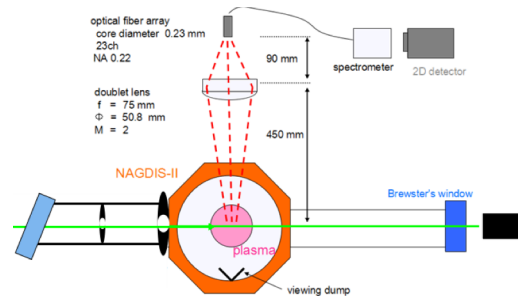


図2 NAGDIS-II 装置におけるトムソン散乱計測システムの概要

ネルはアライメント用で分光器に導入されていない)、NA 0.22 のファイバーアレイを用いている。ファイバーアレイの列の向きはレーザー進行方向と同じにすることで、プラズマの径方向分布を計測可能である。集光レンズは $f = 75 \text{ mm}$ 、 $\phi = 50.8 \text{ mm}$ のダブルレットレンズを利用した。図3に NAGDIS-II において得られたトムソン散乱スペクトルを示す。レーザーの波長である 532 nm を中心に信号の広がり方が確認で NAGDIS-II においてトムソン散乱光の取得に成功した。 532 nm における迷光は飽和には至っておらず、レイリーブロックなどの物理フィルターを用いることなく、トムソン散乱信号を計測可能であることが示された。フィッティングの半値半幅、信号強度から、今回のプラズマ条件における電子温度、電子密度をそれぞれ、 3.1 eV 、 $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と得ることができた。

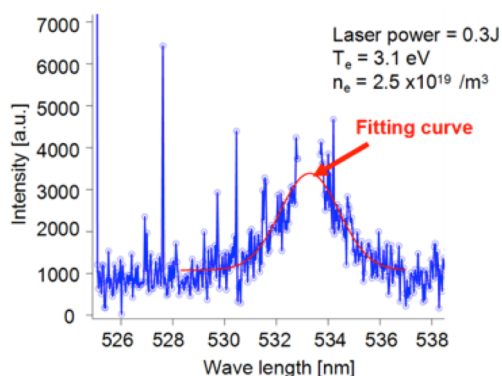


図3 トムソン散乱計測スペクトル

-レーザー吸収分光による中性粒子温度計測-
プラズマ中の中性粒子温度はドップラー広がりを観測することで測定することが可能であるが、中性粒子温度は低温であるためドップラー幅が狭く発光分光法を用いた計測は困難である。レーザー吸収分光を用いた中性粒子温度計測系の構築し中性粒子温度計測を行った。

図4にレーザー吸収分光計測系の概略図を示す。ECDL(外部共振器型可変波長レーザー)の波長を掃引し、波長計を用いてモニタリングする。レーザーのシングルモード発振はファブリペロー

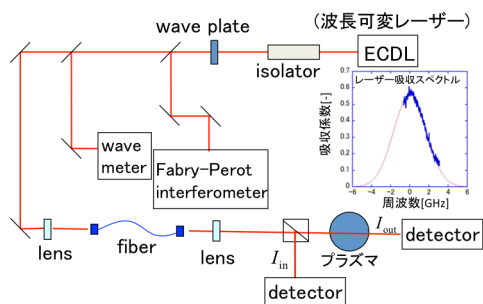


図4 レーザー吸収分光計測系の概略図

干渉計で確認する。また、それぞれプラズマを通過前、通過後のレーザー強度を測定し、吸収スペクトルを取得し温度を計測する。 1083 nm (HeI:23S \rightarrow 33P)のレーザー波長を用いてヘリウムプラズマに対して、吸収スペクトル(図4の挿入図参照)の半値全幅から中性粒子温度は 334 K が得られている。

4. 研究成果

発散・収束磁場配位が非接触プラズマの形成に与える影響

ダイバータ配位のトカマク装置における非接触ダイバータの放射領域は位置的に不安定であり、放射領域がダイバータレグに沿って X 点に移動し (X 点 MARFE の発生)、炉心プラズマ性能が劣化することが観測されている。この放射領域の位置不安定性は、原子・分子過程やダイバータ領域の磁場構造から説明がなされている。ダイバータ配位のトカマク装置では、ダイバータ板に向かって磁力線間隔が狭まりプラズマも 2 次的に収束する傾向にあり、そのためダイバータ板に向かうにつれて中性ガスとの相互作用が弱まる。このため、放射領域は最もプラズマが広がっている (中性ガスとの相互作用が大きい) X 点方向に移動すると磁場構造の観点からは理論的に説明されている。Super X ダイバータ配位では、磁力線間隔はダイバータ板に向かって広がるので、放射領域をダイバータ板近傍に安定維持することが可能だと考えられている。しかし、非接触ダイバータプラズマ生成に対する発散・収束磁場の構造の影響は明らかではなく、実験的な検証が必要である。

NAGDIS-II 装置を用いて、発散磁場配位と収束磁場配位が非接触プラズマ生成に与える影響を実験的に調べた。図5に実験配置を示す。2 台の磁場用電源を用いて、上流側と下流側の磁場強度を変化させ、発散磁場配位、収束磁場配位を模擬した。このとき、装置端に設置されたターゲット板に流入するイオン飽和電流を計測した。図6にターゲット板へのイオン飽和電流値の下流磁場強度依存性を示す。上流側の磁場強度は 0.1 T で一定である。発散磁場構造から収束磁場構造への変化に伴い、ターゲット板へのイオン飽和電流値が著しく減少していることが分かる。また、収束磁場構造の時、体積再結合過程が強まっていることが分光計測から観測されている。この結果より、収束磁場構造は非接触プラズマ形成を強めることが示唆される。

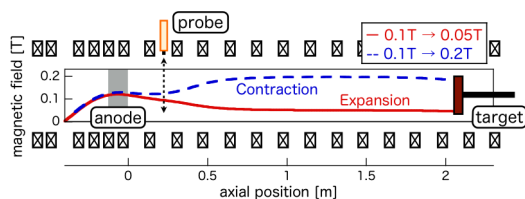


図5 実験配置と発散・収束磁場の構造

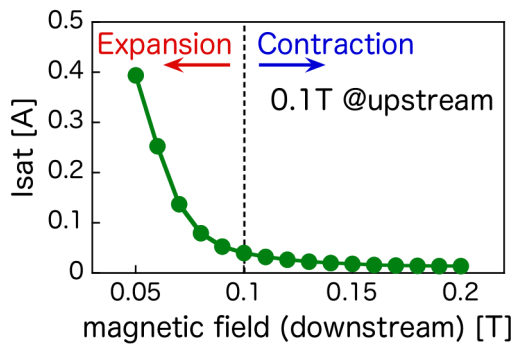


図6 ターゲット板へのイオン飽和電流

非接触再結合プラズマの磁力線接続長依存性

NAGDIS-II には装置下流に可変式終端板が設けられており、これにより磁力線接続長 (L_C) を変えることができる (図7). 磁力線接続長 L_C を変化させ、陽極から約 0.18 m (陽極に最も近い観測窓) の位置 UP 部, 陽極から約 1.0 m の MID 部でプローブ及び分光計測を行うことより、非接触プラズマ形成に磁力線接続長が与える影響について調査した。

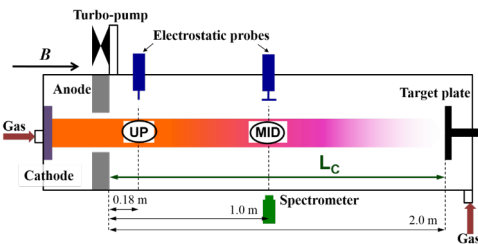


図7 磁力線長可変実験の概要および計測系

図8はUP部のイオン飽和電流の磁力線接続長 L_C 依存性を示している。イオン飽和電流の径方向分布は L_C に対して、ほとんど変化し

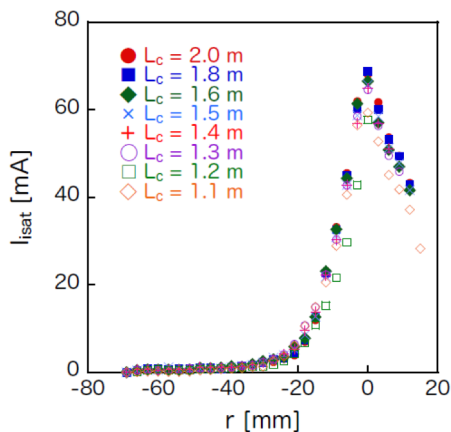


図8 UP部におけるイオン飽和電流の径方向依存性

ないことがわかる。したがって、今回の実験において、プラズマ源におけるプラズマ生成は L_C の変化によって影響を受けていないことがわかる。図9にプラズマの L_C 変化させた場合の、MID 部で観測されたプラズマの様子を示している。 L_C が短くなると、再結合プラズマ状態から、電離進行プラズマに移行することが明瞭に観測された。

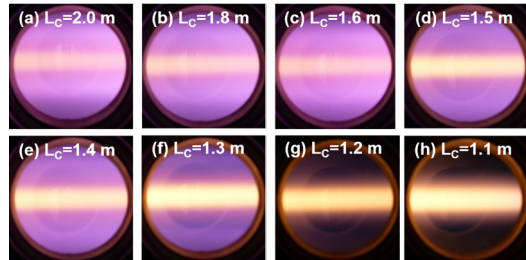


図9 磁力線長の変化に伴う MID 部におけるプラズマの様子の変化

図10にHe原子発光の分光計測結果を示す。(a)は低励起準位からの遷移発光強度 ($3^3D \rightarrow 2^3P$: 587.6 nm) の径方向分布, (b)は再結合過程に伴う高励起準位からの遷移発光強度 ($7^3P \rightarrow 2^3P$: 370.5 nm) の径方向分布および磁力線接続長 (L_C) 依存性である。横軸は L_C , 縦軸は径方向, カラーマップが発光強度を表す。図10(a)より, L_C が長い (~2.0 m) 場合, 周辺部の発光が大きくなっていることがわかる。一方, $L_C < 1.4$ m の場合, プラズマコラム周辺部の発光が減少し, プラズマコラム中心部が増加する。図10(b)より, $L_C < 1.4$ m において, 再結合過程に伴う高励起準位からの発光が著しく減少している。一方で, $L_C > 1.4$ m において, 周辺部の発光が大きい。この二つの結果から, L_C が短くなると周辺部に広がる再結合過程が消失し, 電離進行プラズマへ変化していることが明瞭に示された。

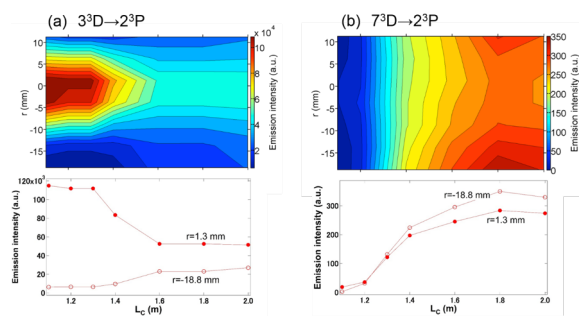


図10 He原子の発光強度の L_C 依存性。(a) $3^3D \rightarrow 2^3P$, (b) $7^3P \rightarrow 2^3P$.

非接触プラズマ条件下でのプラズマの流れ計測

核融合装置において周辺プラズマの流れはダイバータ領域の熱、粒子、不純物輸送を決定する上で重要な役割を果たす。炉壁近傍では中性ガスとの相互作用によって形成される

非接触プラズマによって、ダイバータ板への熱負荷を低減させることが考えられており、非接触プラズマにおけるプラズマの流れの理解が必要である。

図 1 1 に NAGIDS-II を用いて非接触プラズマ条件下で行ったプラズマ流計測結果を模式的に示す。プラズマ源により発生した直後のプラズマは電離過程が支配的な電離進行プラズマであるが、電離フロントと呼ばれる高密度領域を過ぎると再結合が盛んに起こりプラズマとしては消滅する。プラズマ流の計測結果からプラズマの流れは電離フロントを境に周辺部で逆転するという結果が得られた。これは電離フロント領域における磁力線を横切った輸送が増大され、プラズマ柱より外側に吐き出された後、磁力線に沿って軸方向に拡散していることを示唆している。

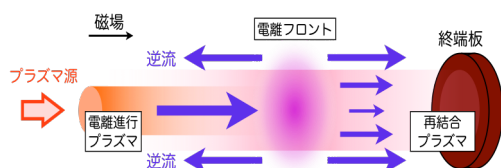


図 1 1 プラズマの流れ分布の模式図

逆流が観測された位置でのイオン飽和電流 I_{sat} の波形は正スパイクを多く含む(Skewness が正な)ものであったため、典型的なバースト波形を得るために条件付き平均(CA)法を適用した(図 12)。2 倍の標準偏差 σ をしきい値として設け、取り出した波形のピーク値を時間 0 に合わせて平均した。また、同時刻のマッハ数も示してある(順流の向きを符号正とする)。 I_{sat} の急激な立ち上がりは高密度なプラズマが通過したことによるものと考えられ、同時にマッハ数が負の値を取っていることから、間歇的なプラズマの吐き出し現象がプラズマの逆流に寄与していると考えられる。

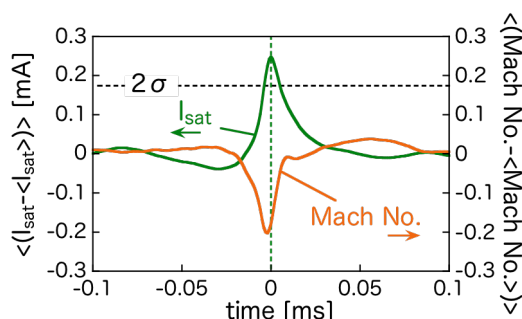


図 1 2 イオン飽和電流とマッハ数の時間依存性 (条件付き平均(CA)法)

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 4 件)

- ① Y.Hayashi, N.Ohno, S.Kajita, H.Tanaka, “Plasma flow in peripheral region of detached plasma in linear plasma device”, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.23, 2016.1, 012511(7 pp).
- ② Y.Hayashi, H.Nishikata, N.Ohno, S.Kajita, “Strong Reduction of Ion Flux to a Target Plate in a Magnetically Contracting Detached Plasma”, Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, 査読有, Vol.11, 2016.2, 1205005(2 pp).
- ③ Y.Hayashi, Y.Suzuki, N.Ohno, M.Okamoto, Y.Kikuchi, S.Sakakibara, K.Watanabe, Y.Takemura, “Influence of external resonant magnetic perturbation field on edge plasma of small tokamak HYBTOK-II”, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol.463, 2015, 463-466.
- ④ D.Reiser, N.Ohno, H.Tanaka, L.Vela, “A plasma source driven predator-prey like mechanism as a potential cause of spiraling intermittencies in linear plasma devices”, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.21, 2014.3, 032302(10 pp).

[学会発表] (計 28 件)

- ① N.Ohno, “Contribution of Linear Plasma Devices in PMI Research”, SOFE2015, 2015.5.31-6.4, Austin, USA, 招待講演.
- ② H.Nishikata, Y.Hayashi, N.Ohno, S.Kajita, T.Kuwabara, “Detailed Analysis of Plasma Resistivity in Detached Plasmas”, PET15, 2015.9.9-11 (Nara Kasugano International Forum IRAKA).
- ③ H.Tanaka, N.Ohno, T.Onda, S.Kajita, T.Kuwabara, Y.Tsuji, “Statistical analysis of particle flux flowing into the end-target in between attached and detached states in the linear divertor plasma simulator NAGDIS-II”, PET15, 2015.9.9-11 (Nara Kasugano International Forum IRAKA).
- ④ T.Kuwabara, H.Tanaka, G.Kawamura, N.Ohno, M.Kobayashi, Y.Feng, “Modelling of the linear divertor plasma simulator NAGDIS-II by using EMC3-Eirene code”, PET15, 2015.9.9-11 (Nara Kasugano International Forum IRAKA).
- ⑤ T.Onda, N.Ohno, S.Kajita, H.Tanaka, T.Kuwabara, “Mode structure analysis of detached plasma using a 2D image”, PET15, 2015.9.9-11 (Nara Kasugano International Forum IRAKA).
- ⑥ Y.Hayashi, K.Jesko, H.J.van der Meiden, J.Vemimmen, T.W.Morgan, N.Ohno, S.Kajita, “Characterization of detached recombining plasma in Pilot-PSI”, ITC25, 2015.11.3-6(セラトピア土岐).
- ⑦ T.Onda, S.Kajita, A.Tonegawa, T.Iijima, N.Ohno, “Observation of Plasma Dynamics in

- TPD-sheet IV”, ITC25, 2015.11.3-6(セラトピア土岐).
- ⑧ T.Tsujihara, M.Arakaki, S.Kajita, N.Ohno, “Measurement of atomic temperature in detached recombining plasma by laser absorption spectroscopy”, ITC25, 2015.11.3-6(セラトピア土岐).
- ⑨ T.Tsujihara, M.Aramaki, S.Kajita, N.Ohno, “Measurement of neutral temperature in detached plasmas in NAGDIS-II by laser absorption spectroscopy”, ISPlasma2016/IC-PLANTS2016, 2016.3.6-10(名古屋大学).
- ⑩ 辻原匡志, 荒巻光利, 梶田信, 大野哲靖「レーザー吸収分光を用いた非接触プラズマ中の中性粒子温度計測」プラズマ核融合学会第32回年会, 2015.11.24-27 名古屋大学
- ⑪ 竹山紘平, 大野哲靖, 田中宏彦, 梶田信, 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 吉川正志, 高木誠「直線型装置 NAGDIS-II における非接触プラズマ電離フロント近傍の揺動計測」プラズマ核融合学会第32回年会, 2015.11.24-27 名古屋大学
- ⑫ 桑原竜弥, 田中宏彦, 河村学思, 西方勇人, 大野哲靖, 小林政広, Y.Feng「直線型ダイバータプラズマ模擬装置 NAGDIS-II における EMC3-EIRENE シミュレーション」プラズマ核融合学会第32回年会, 2015.11.24-27 名古屋大学
- ⑬ 林祐貴, 西方勇人, 大野哲靖, 恩田卓哉, 梶田信「非接触プラズマ計測における探針特性の異常性に関する装置間比較」プラズマ核融合学会第32回年会, 2015.11.24-27 名古屋大学
- ⑭ T.Kuwabara, H.Tanaka, G.Kawamura, N.Ohno, M.Kobayashi, Y.Feng, “EMC3-Eirene simulation modeling of linear divertor plasma simulators”, 24th International Toki Conference, 2014.11.4-7(NIFS).
- ⑮ Y.Hayashi, N.Ohno, S.Kajita, T.Onda, H.Tanaka, “Reversal plasma flow measurement on detached plasma in linear divertor simulator NAGDIS-II”, 24th International Toki Conference, 2014.11.4-7(NIFS).
- ⑯ N.Ohno, H.Tanaka, S.Masuzaki, M.Kobayashi, T.Akiyama, T.Morisaki, Y.Narushima, G.Motojima, Y.Tsuiji, “Plasma Structure Change and Intermittent Fluctuation near Magnetic Island X-Point under Detached Plasma Condition in LHD”, 25th IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE, 2014.10.13-18(St.Petersburg, Russia).
- ⑰ R.Doerner, G.De Temmerman, N.Ohno, “Contributions of Linear Plasma Devices to PMI Research”, 25th IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE, 2014.10.13-18(St.Petersburg, Russia).
- ⑱ T.Onda, N.Ohno, S.Kajita, H.Tanaka, T.Kuwabara, “Correlation between plasma blob and its related structural change of plasma column in detached plasma”, Plasma Conference 2014, 2014.11.18-21(朱鷺メッセ 新潟).
- ⑲ M.Urakawa, N.Ohno, Y.Nakashima, M.Shoji, “Analysis of Neutral Particle Distribution in the Closed Divertor Module in the Linear Plasma Device NAGDIS-II”, Plasma Conference 2014, 2014.11.18-21(朱鷺メッセ 新潟).
- ⑳ T.Onda, S.Kajita, T.Iijima, A.Tonegawa, N.Ohno, “Dynamics of Sheet Plasmas Observed by a High-Speed Camera”, ISPlasma2015/IC-PLANTS2015, 2015.3.26-31(名古屋大学)
- ㉑ 田中宏彦, 大野哲靖, 桑原竜弥, 裏川杜彦, 小林政広, 河村学思, Feng Yuhe「直線型ダイバータプラズマへの EMC3-EIRENE コードの適用」第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014.6.19-20, エポカルつくば
- ㉒ 恩田卓哉, 大野哲靖, 梶田信, 田中宏彦, 桑原竜弥, 玉越晃和「直線型装置における Plasma Blob 伝搬挙動と発生時のプラズマ柱構造変化の高速カメラ計測」第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014.6.19-20, エポカルつくば
- ㉓ T.Yashiro, K.Sawada, N.Ohno, S.Kajita, K.Taniguchi, S.Hidaka, S.Knowaki, “Analysis of Fulcher-band Intensity of Molecular Hydrogen in the Divertor Plasma Simulator using Time Evolution Collisional-Radiative Model”, ISETS'13, 2013.12.13-15, 名古屋大学
- ㉔ T.Yashiro, N.Ohno, S.Kajita, H.Kamaya, A.Tamakoshi, T.Onda, “Dependence of Detached Plasma Formation on Magnetic Connection Length”, ISPlasma2014, 2014.3.2-6, 名城大学
- ㉕ 玉越晃和, 恩田卓哉, 大野哲靖, 田中宏彦, 梶田信「直線型装置における Plasma Blob 発生・輸送現象の高速カメラ計測」日本物理学会2013年秋季大会, 2013.9.25-28 徳島大学常三島キャンパス
- ㉖ 八代崇憲, 釜谷大樹, 大野哲靖, 梶田信「ダイバータプラズマ模擬実験装置における非接触プラズマ形成の磁力線長依存性の調査」日本物理学会2013年秋季大会, 2013.9.25-28 徳島大学常三島キャンパス
- ㉗ 大野哲靖「ダイバータ熱負荷制御の課題」プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013.12.3-6 東京工業大学(シンポジウム)
- ㉘ 裏川杜彦, 富山貴史, 大野哲靖, 中嶋洋輔, 庄司主, 細井克洋「閉ダイバータモジュールへの DEGAS コードの適用」プラズマ・核融合学会第30回年会, 2013.12.3-6 東京工業大学(口頭発表)

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