

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820440

研究課題名(和文)ヘリカル・直線型装置の非接触ダイバータ領域中における非拡散的プラズマ輸送研究

研究課題名(英文)Study of non-diffusive plasma transport in detached divertor regions of helical and linear devices

研究代表者

田中 宏彦(Tanaka, Hirohiko)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：60609981

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置LHDおよび直線型装置NAGDIS-IIを使用して、非接触ダイバータ状態時に顕著化する非拡散的輸送に関する研究を進展させた。LHDでは多チャンネル計測系の整備や高時間分解能計測、磁力線追跡計算ならびに高速掃引プローブ計測を行うことで、輸送発生位置や輸送速度などを調査した。NAGDIS-IIでは、接触・非接触状態遷移時における計測から、非拡散的輸送増大に対する電離フロント位置の重要性を示すとともに、詳細な輸送特性評価を行うための径方向・周方向分割電極を製作・適用した。

研究成果の概要(英文)：We have promoted the study about the non-diffusive transport enhanced under the detached divertor condition by using the Large Helical Device (LHD) and the linear plasma device NAGDIS-II. In LHD, multi-point and high temporal resolution measurements, the magnetic field tracing, and the fast reciprocating probe measurement were carried out in order to investigate the generation position, propagation velocity, and so on. In NAGDIS-II, a measurement in the transient state from attached to detached divertor conditions implied an importance of the ionization-front position for enhancement of the non-diffusive transport. In addition, we applied the newly-made radially and azimuthally separated electrodes to clarify detailed transport characteristics.

研究分野：核融合学

キーワード：非接触プラズマ 非拡散的輸送 ヘリカル 直線 ダイバータ Blob 揺動 統計的解析

1. 研究開始当初の背景

核融合発電炉の実現には、1億度を越える超高温のプラズマを、有限サイズの真空容器内に長時間安定に生成・維持することが求められる。磁場の外側から外側(周辺領域)にもれ出したプラズマは、磁力線に沿って運ばれて、ダイバータ領域内に設置された高耐熱性の材料(ダイバータ板)に到達する。より一層の大出力化が予想される将来の核融合炉では、材料要求値を上回る高熱・粒子束が炉心からもれ出てくることから、ダイバータ板前面で熱・粒子負荷を十分に低減することが必須の課題となっている。現在、特に有望な負荷低減手法として、ダイバータ領域内の中性ガス圧を増加させることで生じるプラズマ・ガス相互作用(放射損失の増大ならびに再結合過程の促進)を利用した非接触ダイバータが期待されている。

研究代表者らはこれまでの一連の研究において、非接触ダイバータ状態時の周辺領域中で、磁場を横切る非拡散的なプラズマ輸送の増大を示唆する結果を大型ヘリカル装置LHDおよび直線型ダイバータ模擬試験装置NAGDIS-IIにより得ている。このような磁場を横切る輸送は、ダイバータ板に局所的に流入していた熱・粒子束を広域化させ、結果的に単位面積当たりの負荷を低減させる効果を持つことが期待される。同輸送現象をもたらす効果を定量的に評価し、輸送に寄与する条件やパラメータを同定することが極めて重要と考えられるが、これまで明らかとなっていない。

2. 研究の目的

本研究は2つの異なる磁場配位置置(LHD、NAGDIS-II)を相補的に用いることで、非接触ダイバータプラズマ中に顕著に現れる磁場を横切る非拡散的輸送現象を調査する。具体的には、LHDにおける3次元多点計測を行うとともに、NAGDIS-IIでは詳細計測可能な計測系を整えることで、磁場を横切る輸送が粒子束低減に寄与する割合や粒子束輸送増大に強く関連する条件・パラメータを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 3次元的で複雑な磁場構造を持つLHDでの定量評価を行うためには、局所計測では不十分で、広範囲にわたる計測が必要不可欠である。本研究ではトロイダル・ポロイダル角の異なる複数のダイバータ板上に埋め込まれた静電プローブでの同時計測を実施するとともに、特徴的な静電揺動発生箇所を高時間分解能のアナログ/デジタル変換器を適用することで、非拡散的輸送による粒子束広域化効果の3次元的な異方性を調査する。また、真空磁場計算コードKMAGによる磁場構造解析により、輸送と磁場構造との関係性を明らかにする。

(2) 直線型装置はその単純な構造から、計測結果の解釈が容易な特長を有し、かつ様々な実験条件の組み合わせを試行するのに適している。本研究では粒子束輸送の詳細計測を行うための径方向・周方向分割電極を新たに製作し、NAGDIS-IIに適用する。

4. 研究成果

(1) LHDでは $m/n = 1/1$ ( $m, n$ はそれぞれポロイダルおよびトロイダルモード数)の共鳴摂動磁場(RMP)を印加した際に非接触ダイバータ状態を比較的安定に維持できることが分かっている。このようなRMP印加はヘリカル対称性を崩すため、通常よりさらに多点での計測が望まれる。そこで既存の計測系に加えて、ポロイダル方向に離れたダイバータ板上に100チャンネルの静電プローブ電極を増設し、これにより計約460箇所での同時静電揺動計測を実施した。

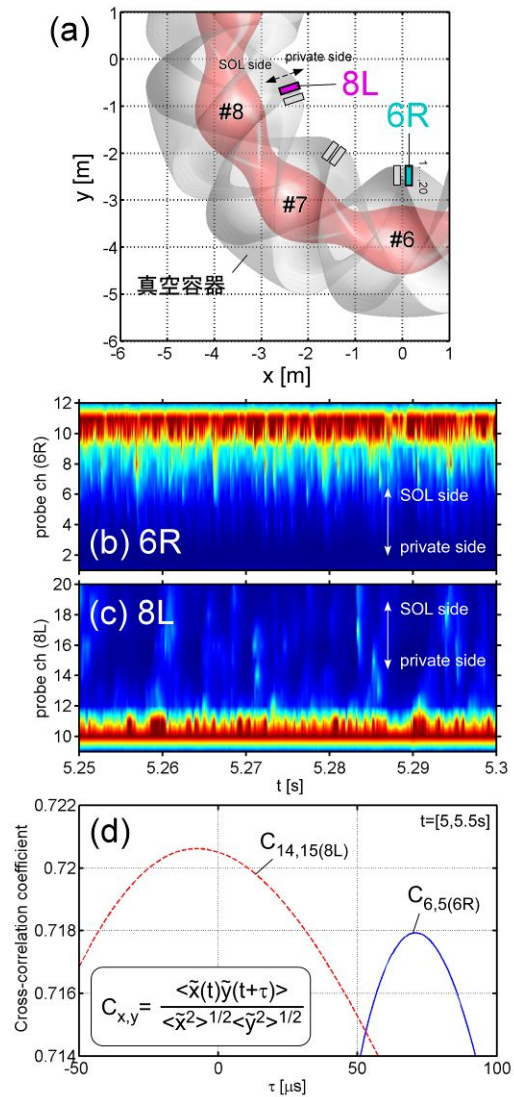


図1 (a)ダイバータプローブアレイ配置、(b)6R および(c)8L の板上で計測されたイオン飽和電流、(d)相互相関係数

図1には、特徴的な揺動特性が観測されたダイバータ板上(図1(a)の6Rおよび8L)において高時間分解能計測(サンプリング周波数: 1 MHz)を行った結果を示す。6Rでは生にスパイク的な揺動がストライク点近傍のプライベート領域側で出現しているのに対し(図1(b)), 8Lではストライク点から少し離れたSOL側で現れている(図1(c))。揺動の伝搬方向を調べるために相互相関解析を適用した結果を図1(d)に示す。同図において、 $C_{6,5(6R)}$ は70  $\mu$ s付近でピークしている。これより6Rの板上のch6とch5の間では、揺動は平均約70  $\mu$ sの時間差でプライベート領域方向へと伝搬していることがわかる。一方、 $C_{14,15(8L)}$ はサンプリング間隔に近い $\tau$ で最大値をとっており、8Lの板上のch14とch15間ではほぼ時間差無く正スパイクが現れていることが確認された。

これらの揺動発生位置と伝搬方向は、ダイバータ板上流における輸送発生位置によって決まっているものと考えられる。特徴的なスパイク揺動の見られたダイバータ板上から磁力線追跡計算を行った結果、RMP印加により拡大された $m/n = 1/1$ 磁気島のX点近傍を上記磁力線が通過していることが分かった。このため、非拡散的輸送は磁気島X点近傍で発生している可能性が高い。磁気島X点がトロイダル方向に進むにつれてSOL領域とプライベート領域をまたぐことで、図1に見られる結果が得られたものと推測される。過去の研究で、非接触ダイバータ状態時の磁気島X点近傍における放射損失の増大が報告されていることから、輸送発生領域は非接触プラズマ前面の電離フロントや再結合フロント周辺であることが示唆される。

加えて、RMPの印加された非接触ダイバータ状態時における高速掃引静電プローブ計測を行った。3芯のプローブヘッドの中心でイオン飽和電流、残り2芯で浮遊電位を計測して条件付き平均法を適用することで、顕著化した間欠的揺動の内部電場を初めて評価した。図2に解析結果を示す。間欠的なプラズマ構造内部には有意な電場が確認され、これより間欠的構造はExBドリフトにより輸送されていることが分かった。電場はプローブヘッド表面上で約5.4V/mと見積もられたことから、ドリフト速度は約470 m/sとなり、これは接触ダイバータ状態時において観測される間欠的輸送(Plasma Blob輸送)の速度と比べて速い値である。さらに正スパイクの持続時間とドリフト速度から求められるプローブヘッド表面と垂直方向のサイズは約70 mmとなった。これは、輸送発生位置とプローブヘッドの間で磁束管が引き伸ばされた効果に由来する可能性がある。

この他、ダイバータ板上のストライク点に沿ってプローブ電極を並べることで、トリプルプローブ法の適用を行った。これにより正スパイク中のプラズマパラメータの高時間分解能計測を行った。

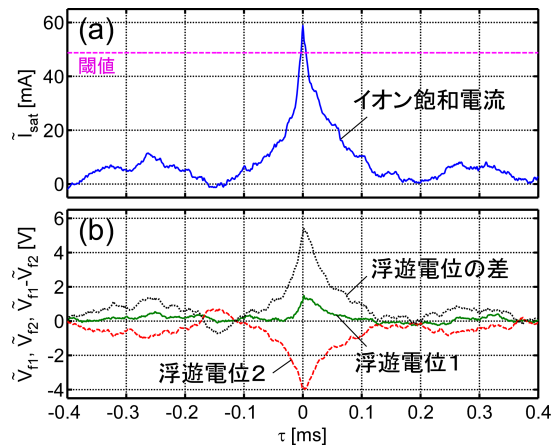


図2 (a)イオン飽和電流の自己条件付き平均波形、(b)2点における浮遊電位および浮遊電位の差の相互条件付き平均波形

(2) NAGDIS-II では分割電極設計の前準備として、プラズマ柱より径の大きな円形終端板を用いた予備実験を行った。真空ポンプに繋がるバルブの開閉操作から接触 - 非接触状態を急速に遷移させることで、非接触プラズマ前面の電離フロント近傍の構造を磁力線方向にスキャンした。

図3に終端板に流入するイオン粒子束の時間発展、ならびにより上流位置で装置側面から挿入した静電プローブにより計測されたイオン粒子束の径方向分布変化を示す。同図より、終端板への流入粒子束の著しい減少の後に周辺部へ粒子束分布が広域化する様子が確認される。この結果は、電離フロントが終端板から離れることが径方向輸送に影響を与えている可能性を示している。

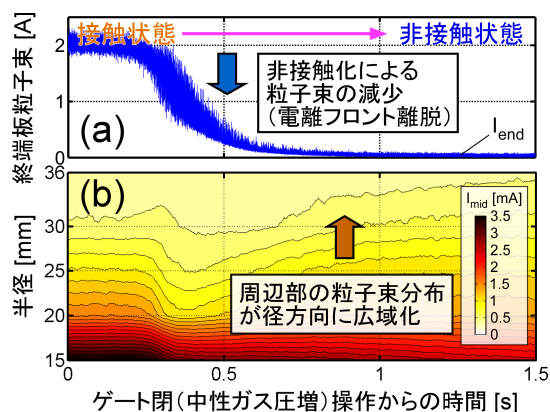


図3 (a)接触状態から非接触状態への遷移時に終端板へ流入するイオン粒子束変化、(b)終端板上流位置におけるイオン粒子束の径方向分布変化

なお終端板上の粒子束減少時には、最初は負のスパイク揺動が観測され、その後正のスパイク波形が支配的に現れた。これは、電離フロントの磁力線方向の空間振動を捉えている可能性がある。このような時間変化する正・負スパイク揺動の解析手法として、複数

の統計的解析手法（3 次の中心モーメント、ウェーブレット変換、プリマルチプライドスペクトラム）を結合した新たな解析手法を開発した。これは、揺動成分とその2乗のコスペクトル（雑誌論文にてキュービックスペクトルと定義）の周波数方向積分が、3 次の中心モーメントと一致することを利用して、同手法の適用により、負・正スパイクは数キロヘルツ帯の成分により構成されることが分かった（図4）。

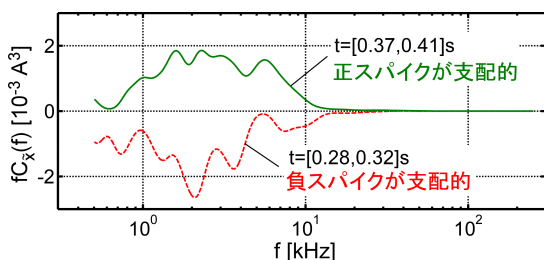


図4 終端板への流入イオン粒子束のプリマルチプライドキュービックスペクトル

NAGDIS-II での予備実験で得られた径方向分布や揺動特性から、径方向・周方向に多チャンネルの電極を埋め込んだ分割電極を製作した（図5）。接触 - 非接触状態遷移時の高時間分解能計測の結果、特に、径方向中心付近の電極で数キロヘルツ帯の大振幅揺動の発生を確認した。今後の追実験から、同分割電極による詳細な計測・解析を進めていく予定である。



図5 製作した分割電極

(3) 非接触化現象はプラズマと中性粒子の相互作用により生じることから、電離フロントや再結合フロントの空間構造は中性粒子分布に強く依存すると考えられる。さらに、磁場に捕捉されない中性粒子は、終端板等の3次元構造物の影響を直接受ける。複数の装置間の結果を比較し考察する上で、異なる終端板形状がもたらす中性粒子分布の違いを把握しておくことが重要であるが、電荷を持たない中性粒子分布の実験計測は容易ではない。そこで、LHD において導入されている環状装置用の3次元輸送コード EMC3-EIRENE

を直線型装置に転用し、プラズマ - 中性粒子輸送シミュレーションを実施した。初期計算の一例を図6に示す。任意の3次元形状の終端板構造を組み込んだ計算が可能となり、終端板形状に依存して中性粒子分布が変化する様子を確認した。終端板形状の異なる装置間比較を進めていく上で、重要な計算環境を整えたと考えている。

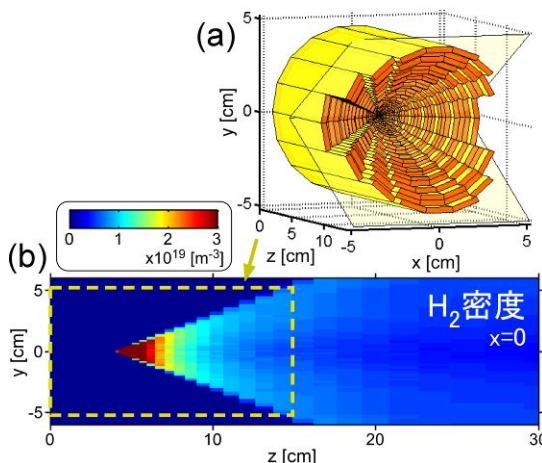


図6 (a)V字型終端板のグリッド構造、(b)垂直断面における水素分子密度の初期計算結果

#### 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)

H. Tanaka, N. Ohno, T. Onda, K. Takeyama, S. Kajita, T. Kuwabara, and Y. Tsuji, “Statistical analysis of particle flux flowing into the end-target in between attached and detached states in the linear divertor plasma simulator in NAGDIS-II”, Contributions to Plasma Physics, 査読有, 2016 (In press).

T. Kuwabara, H. Tanaka, G. Kawamura, N. Ohno, H. Nishikata, M. Kobayashi, and Y. Feng, “Modeling of linear divertor plasma simulator experiments with three-dimensional target structure by using EMC3-EIRENE code”, Contributions to Plasma Physics, 査読有, 2016 (In press).

H. Tanaka, S. Masuzaki, N. Ohno, T. Morisaki, Y. Tsuji, and LHD Experiment Group, “Multi-pin Langmuir probe measurement for identification of blob propagation characteristics in the Large Helical Device”, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 463 巻, 2015, pp. 761-764.

DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.117

〔学会発表〕(計7件)

田中 宏彦、大野 哲靖、増崎 貴、小林 政弘、秋山 毅志、森崎 友宏、成嶋 吉朗、本島 徹、坂本 隆一、辻 義之、LHD 実験グループ、“RMPにより安定化されたLHD非接触プラズマ中のトロイダル異方性解析”、第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24-27日、名古屋大学東山キャンパス、愛知、口頭 25pB01。  
H. Tanaka, N. Ohno, T. Onda, S. Kajita, T. Kuwabara, and Y. Tsuji, “Statistical analysis of particle flux flowing into the end-target in between attached and detached states in the linear divertor plasma simulator in NAGDIS-II”, 15<sup>th</sup> International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, September 9-11, 2015, Nara, Japan, poster P1-19.

田中 宏彦、大野 哲靖、桑原 竜弥、裏川 杜彦、小林 政弘、河村 学思、Y. Feng、“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年6月19-20日、つくば国際会議場、茨城、ポスター 20-019。  
H. Tanaka, S. Masuzaki, N. Ohno, T. Morisaki, Y. Tsuji, and LHD Experiment Group, “Multi-pin Langmuir probe measurement for identification of blob propagation characteristics in the Large Helical Device”, 21<sup>st</sup> International Conference on Plasma Surface Interactions, May 26-30, 2014, Kanazawa, Japan, Poster P2-035.

田中 宏彦、増崎 貴、大野 哲靖、小林 政弘、森崎 友宏、辻 義之、LHD 実験グループ、“LHD非接触ダイバータ中の間欠的揺動伝搬とRMP印加磁場のトロイダル異方性解析”、第30回プラズマ・核融合学会年会、2013年12月3-6日、東京工業大学大岡山キャンパス、東京、ポスター 03aE41P。  
H. Tanaka, S. Masuzaki, N. Ohno, M. Kobayashi, T. Morisaki, Y. Suzuki, and LHD Experiment Group, “Multi-point analysis for understanding poloidal asymmetry of divertor flux in the Large Helical Device”, 23<sup>rd</sup> International Toki Conference, November 18-21, 2013, Toki, Japan, Poster P1-47.

H. Tanaka, S. Masuzaki, N. Ohno, M. Kobayashi, T. Akiyama, T. Morisaki, Y. Tsuji, and LHD Experiment Group, “Toroidal asymmetric behavior of divertor flux during the RMP assisted detached plasma operation in LHD”, Joint 19<sup>th</sup> ISHW and 16<sup>th</sup> RFP workshop, September 16-20, 2013, Padova, Italy,

Poster C4.

〔その他〕

MATLAB/Octave プログラム公開ページ：  
<http://www.ees.nagoya-u.ac.jp/~koukai/purakaku85/>  
研究成果：  
<http://hdp.nifs.ac.jp/sokei/tanaka/jisseki/jisseki.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 宏彦 (TANAKA, Hirohiko)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：60609981