

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04236

研究課題名(和文)統計的磁気面領域におけるプラズマ輸送のダイバータ熱・粒子負荷分布への効果

研究課題名(英文)Effect of plasma transport in the stochastic magnetic field lines layer on the divertor heat and particle load profiles

研究代表者

増崎 貴 (Masuzaki, Suguru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80280593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：核融合エネルギーの実用化研究を行っている磁場閉じ込めプラズマ装置において重要なダイバータへの熱と粒子の流れについて、核融合科学研究所の装置LHDにおける実験での観測を、計算機シミュレーションで再現できるようにすることにより、シミュレーションコードの改良を進めた。また、そのために必要な、プラズマからの発光を分析する設備を整備した。シミュレーションで再現できない観測結果についてデータ解析を進め、高温プラズマ周辺部からダイバータへつながる磁場構造が変化している可能性があることを示した。

研究成果の概要(英文)：Divertor is an essential part in fusion devices. Understanding of heat and particle transport to divertor from high temperature and density core plasma is an important issue in the fusion research. In this study, we conducted improvements of a plasma and neutral particle transport code, EMC3-EIRENE with comparison between the experimental data and the results of simulation with the code. We measured the heat and particle fluxes profiles on a divertor tile, and constructed 2-dimensional visible spectroscopy for measuring hydrogen and impurities behavior in divertor. The profiles change during plasma discharge. The simulation can reproduce basic profile, but that cannot reproduce modified profile. Additional data analysis suggest that the modification of the profile is caused by a modification of magnetic field lines structure. By the spectroscopy, we got the data related to impurities behaviors. We will try to reproduce the behaviors with the improved code.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：ダイバータ熱・粒子束分布 統計的磁気面 EMC3-EIRENE 2次元可視分光計測 LHD 静電プローブ 周辺プラズマ輸送

1. 研究開始当初の背景

核融合炉では、核反応生成物であるヘリウム灰の除去と、燃料である三重水素の効率的な利用のために、ダイバータによる粒子制御が必須である。また、熱・粒子負荷が集中するダイバータ板の健全性を確保するためには、ダイバータへの熱負荷を低減する熱制御も必須となる。ヘリオトロン型核融合装置は、閉じ込め磁場配位形成にプラズマ電流を要しないためディスラプションの無い安定した運転が期待できるという特長とともに、ダイバータ磁力線構造（ヘリカルダイバータ）が専用のコイル無しに自然に存在しており、これを用いた粒子制御が可能という特長がある。図1に示すように、ヘリカルダイバータは、ヘリカルコイルと同じ回転変換で回転する2つのX点をもつ。そのため同サイズのポロイダルダイバータ配位トカマク装置に比べて長いダイバータトレース長をもち、原理的により大きな受熱面積となり得る。一方、図2に示すようにヘリカルダイバータの熱・粒子負荷分布は非均一であり、長いダイバータトレース長を使い切っておらず、場所によっては熱・粒子負荷が大きく、また別の場所では負荷が小さい。

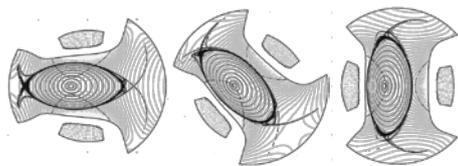


図1 LHDの3つのポロイダル断面におけるヘリカルダイバータ配位。いずれも左側がトラス内側。

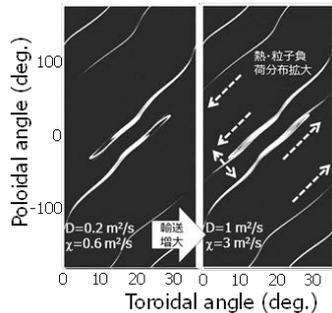


図2 ミュレーションで得られたヘリカルダイバータの粒子負荷分布(1トロイダルセクション分)。黒から白へ、粒子負荷が大きくなる。左右で磁力線を横切る輸送係数が異なる。

ヘリカルダイバータ配位では、閉じた磁気面外側に統計的磁気面領域や磁気島鎖が共存する開いた磁力線領域が存在している。このような開いた磁力線領域は、ドイツのモジュラ型ステラレータや、エルゴディックダイバータ配位のトカマク装置にも存在している。また Edge localized Mode (ELM) によるダイバータへの大きな熱負荷を抑制するために共鳴擾乱磁場 (RMP) を印加したポロイダルダイバータ配位のトカマク装置にも存在するため、近年 ITER や将来の炉を見据え

て、このような領域でのプラズマや不純物の輸送研究が盛んに行われている。申請者らはこれまで LHD において、ダイバータ部及び開いた磁力線領域のプラズマ分布計測と、ドイツで開発された3次元プラズマ輸送コード EMC3 と中性粒子輸送コード EIRENE を用いた計算から、このような領域におけるプラズマ・不純物輸送について研究を進めてきた。その結果、開いた磁力線領域における磁力線を横切る輸送が大きくなると、熱・粒子負荷分布の非均一性を弱めるように、すなわち高い熱流束を減ずる方向に働くことが分かってきた。図2には輸送係数が異なる2つのヘリカルダイバータ粒子負荷分布のシミュレーション結果を示している。輸送が大きいとヘリカル方向に粒子負荷分布が広がっていることが分かる。また実験とシミュレーションの比較から、プラズマ温度が高い場合は、低い場合に比べて磁力線を横切る輸送が大きいことが示唆されており、その場合、予想されるように熱・粒子負荷分布が拡大する様子が静電プローブアレイで観測されている。シミュレーションの確からしさは実験との比較で高めてきた。

LHD では 2010 年にダイバータの一部を開構造化してダイバータ部の中性粒子圧力を高める実験を行った。この開構造化設計のために中性粒子輸送コード EIRENE を用いた。ヘリカルダイバータの開構造化の計算では磁力線構造だけでなく、バッフル板やドームもヘリカル形状となるため、計算メッシュの構築が複雑であったが、実験で得られたダイバータ部の中性粒子圧力挙動、水素原子発光分布は EIRENE コードで予測された挙動とほぼ一致した。この計算では背景プラズマパラメータや分布は固定していたが、研究の進展により昨年、EMC3 もダイバータ部の複雑構造を取り扱うことができるようになり、EMC3 と EIRENE を組み合わせた形で、さらに予測精度を高めてダイバータ熱・粒子負荷分布の変化を調べる準備が整った。

これまでヘリオトロン型核融合炉におけるダイバータプラズマシミュレーションは、磁場構造の複雑さや開いた磁力線領域の輸送の理解が十分に得られていなかったこと、また真空容器内構造物の複雑さのため行われていなかったが、上述のような LHD における研究の進展を踏まえて、確度をもって実施する土台ができつつある。LHD 実験で観測される現象を理解し、将来の炉条件でのダイバータの熱・粒子負荷分布を予測するためには、EMC3-EIRENE コードの改良が必要である。特に改良が必要なのは、磁力線を横切る輸送係数にバリエーションを持たせることである。最近の研究の進展により、大半径方向に輸送係数の分布を作ることができるようになってきているが、上述のように LHD の実験では輸送係数にプラズマパラメータ依存性があることが示唆されているので、さらに詳細なバリエーションを持たせること

が必要と考えられる。

本研究の学術的な特色・独創的な点は、3次元プラズマ・中性粒子輸送シミュレーションコード **EMC3-EIRENE** について、LHDにおける実験結果の再現を行うことを通して、その予測性能を高める点にある。そのためにコードへ改良を加えていく。上述のように磁力線を横切る輸送係数に空間的なバリエーションを設定することや、強いシアをもつヘリカルダイバータ配位のダイバータ近傍の磁力線構造及び炉内構造を、これまで以上に現実に即して再現する計算用メッシュを構築する。これにより、非軸対称構造をもつLHDの統計的磁気面領域におけるプラズマ輸送を、実験と計算機シミュレーションから理解し、将来の核融合炉のダイバータプラズマを予測する。ヘリオトロン型装置のみならず、ドイツで建設が進んでいるモジュラ型ステラレータ、ヴェンデルシュタイン7-Xや、ITERなど共鳴擾乱磁場を印加したポロイダルダイバータ配位トカマクの周辺プラズマ輸送研究に大きなインパクトを与えることができる。

## 2. 研究の目的

本研究は、ヘリオトロン型核融合装置の閉じた磁気面外側に存在する統計的磁気面領域における輸送がヘリカルダイバータの熱・粒子負荷分布の非均一性に与える影響を、実験と計算機シミュレーションから明らかにし、ヘリカル型核融合炉へ外挿可能なモデルを得ることを目的とする。シミュレーションには、3次元プラズマ・中性粒子輸送計算コードである **EMC3-EIRENE** コードを用いる。シミュレーションの予測性能を高めるために大型ヘリカル装置 (LHD) におけるヘリカルダイバータの熱・粒子負荷分布データおよび不純物発光データを静電プローブおよび2次元可視分光計測によりそれぞれ得、**EMC3-EIRENE** コードに改良を加えてその分布を再現する。これにより、ヘリオトロン型炉における熱・粒子制御設計のために必要なダイバータ熱・粒子負荷分布予測を行う。

## 3. 研究の方法

大型ヘリカル装置 (LHD) におけるダイバータ熱・粒子負荷分布計測及び統計的磁気面領域の電子温度・密度分布計測を行う。また、ダイバータ部の2次元可視分光計測システムを構築してダイバータ部の不純物発光分布計測を行う。既存の3次元プラズマ・中性粒子輸送コードである **EMC3-EIRENE** に必要な改良を加えつつ、LHDで計測された各分布を矛盾なく再現することにより、同コードの予測性能を高めるとともに、統計的磁気面領域の輸送がダイバータ熱・粒子負荷分布に与える影響について理解を得る。**EMC3-EIRENE** コードを用いて、現在核融合科学研究所において設計中のヘリオトロン型核融合炉における熱・粒子制御設計のために必要な、ダイ

バータプラズマパラメータ、ダイバータ上の熱・粒子負荷分布の予測計算を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、下記の成果が得られた。

(1) **EMC3-EIRENE** コードを用いたLHD周辺プラズマシミュレーションの高度化

**EMC3-EIRENE** の計算メッシュを、これまで以上に実際のLHD磁場構造に近づけた計算用メッシュを構築した。以後のシミュレーションはこのメッシュを用いて行っている。

LHD 実験中に観測されているダイバータ板上の熱・粒子束分布の変化を **EMC3-EIRENE** コードを用いたシミュレーションで再現し、その物理機構を明らかにすることを試みた。従来のコードでは、分布の変化は再現できなかった。分布の変化が、磁力線を横切る輸送係数の変化によることを考え、これまで固定値としていたこの輸送係数について、磁場強度、電子温度依存性をもたせ、空間的に変化するようにした。図3にLHDの磁場強度と、計算で用いる輸送係数分布の一例を示す。また、図4にシミュレーション結果と実験データの比較を示す。図4に示すように、輸送係数をシミュレーションでは再現できなかった。この

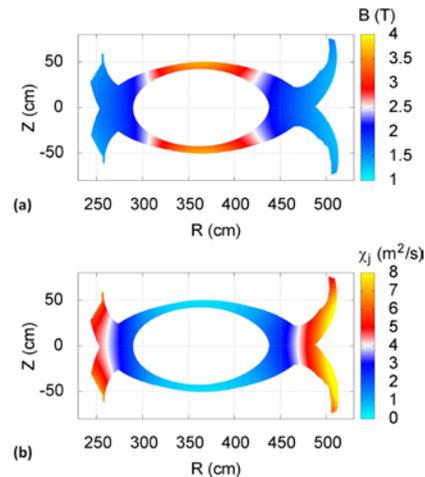


図3 (a)LHDの横長ポロイダル断面における磁場強度分布、(b)計算で用いる輸送係数分布の一例。[発表論文1より]

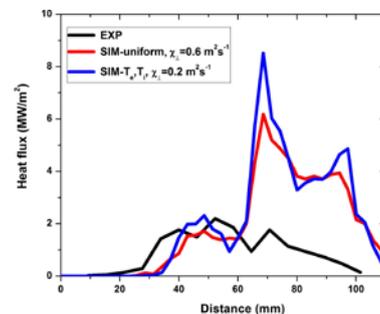


図4 LHDで観測されているダイバータ板熱流束分布の一例(黒線)と、従来の固定された輸送係数を用いた計算結果(赤)、輸送係数に温度依存性をもたせた計算結果(青)。[発表論文1より]

ことから、観測されている熱・粒子束分布変化は、輸送係数の変化によるものではなく、他の物理機構によるものと考えられた。[発表論文 1]これについては、後の項(3)で再度触れる。

従来トーラスの一部を計算領域としていたが、トーラス全周を計算領域とし、局所的な不純物ガスパフの効果をシミュレーションで扱えるようにした。これにより、ダイバータ板熱・粒子負荷軽減のために導入した不純物（ネオンおよび窒素）の影響の違いを明らかにした。LHD 実験では、ネオンの場合はトーラス全周にわたりダイバータの粒子負荷軽減が見られたが、窒素の場合はトロイダル異方性が見られた。シミュレーションでは、ネオンと窒素のリサイクリング率を変えて計算することにより、それぞれ実験結果を再現することができた。[発表論文 2, 3]図 5 に、窒素導入により、ダイバータへの粒子束がどのように変化したか、窒素の有無で粒子束の比をとって、示した。横軸はLHDのトロイダル番号である。各トロイダルセクションに2カ所、静電プローブアレイを設置して計測した結果である。窒素導入部と磁力線が繋がっているダイバータ部において、粒子束の減少が顕著である。

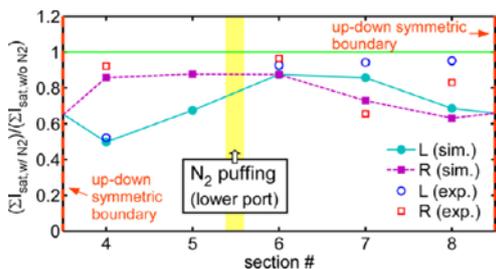


図5 窒素パフを行った場合の、ダイバータ粒子束のトロイダル方向の変化。横軸はLHDのトロイダルセクション番号。縦軸は各セクションに2カ所(LとR)設置している静電プローブアレイへのイオン飽和電流の、窒素導入(横軸5と6の間から導入)の有無の比。[発表論文 2 より]

## (2) LHDにおける2次元可視分光計測

LHDダイバータ部における不純物挙動を観測し、EMC3-EIRENEコードを用いたシミュレーションによりその挙動を再現することにより、EMC3-EIRENEコードの高度化、予測の高精度化を行った。図6に、本研究で構築した2次元分光計測の視野を示す。LHDのトーラス外側の観測ポートから、上部ダイバータ部を見込む視野である。図7に、放電中の、発光スペクトルのドップラーシフトから評価した、1価の炭素の流速の2次元分布を示す。放電開始からの時刻4.47秒、5.67秒、6.87秒における分布を示している。6.87秒においては、ダイバータデタッチメント状態となっている。各時刻で流速分布が変化していることが分かる。今後はEMC3-EIRENEコードを用いたシミュレーションを行い、このよ

うな実験結果を再現できるよう、コードの高度化を継続して進める。

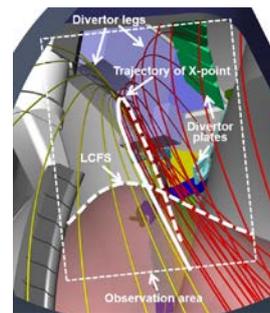


図6 2次元分光計測の視野(白細破線部)[発表論文 5 より]

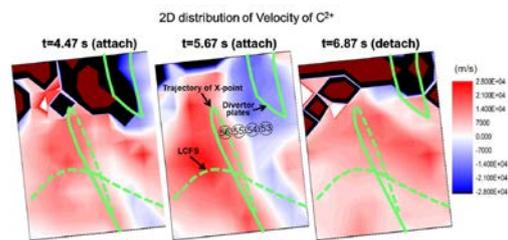


図7 2次元可視分光計測で得られた、1価の炭素イオンの流速分布。放電開始から4.47秒、5.67秒、6.87秒について示している。後の2つ時刻では、ダイバータデタッチメント状態となっている。[発表論文 5 より]

## (3) ダイバータ部静電プローブデータの多変数分析

(1)において述べたように、EMC3-EIRENEコードの改良を行い、磁力線を横切る輸送係数について磁場強度依存性、電子温度依存性を導入したが、シミュレーションでは実験で観測されているダイバータ板上の熱・粒子束分布の変化を再現することができなかった。そこで、ダイバータ板上の粒子束分布と、その上流である周辺プラズマパラメータの関係について、固有値直交分解を用いた多変数分析を行った。これまでに、熱・粒子束分布は、上流の電子温度がある程度高い場合に変わることが分かっていたが、今回の解析から、閉じた磁気面内周辺部のプラズマ圧力勾配が分布変化に関係していることが分かった。プラズマ圧力勾配が大きい場合、分布はEMC3-EIRENEコードを用いたシミュレーションで再現できない分布となる。シミュレーションでは、真空での磁力線構造を用いているが、圧力勾配で駆動される電流により磁力線構造が変化し、そのためダイバータにおける熱・粒子束分布が変化すると考えられる。LHD周辺プラズマ輸送をシミュレーションにより予測するためには、このような磁力線構造の変化も考慮しなければならない可能性があることが示された。[発表論文 6]

## 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 6 件)

[1] S. Dai, M. Kobayashi, G. Kawamura, S. Masuzaki, H. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Feng, D. Z. Wang and the LHD experimental group, “Investigation of heat flux deposition on divertor target on the Large Helical Device with EMC3-EIRENE modelling”, Plasma Phys. Control. Fusion Vol. 59 (2017) 085013. (査読有)

[2] H. Tanaka, G. Kawamura, S. Masuzaki, M. Kobayashi, T. Akiyama, B. J. Peterson, K. Mukai, R. Sano, S. Y. Dai, R. Sakamoto, T. Morisaki, N. Ohno, and the LHD experiment group, “Toroidally symmetric/asymmetric effect on the divertor flux due to neon/nitrogen seeding in LHD”, Nucl. Mater. Energy Vol. 12 (2017) 241-246. (査読有)

[3] G. Kawamura, H. Tanaka, K. Mukai, B. J. Peterson, S. Y. Dai, S. Masuzaki, M. Kobayashi, Y. Suzuki, Y. Feng, “Three-dimensional impurity transport modelling of neon-seeded and nitrogen-seeded LHD plasmas”, to be published on Plasma Phys. Control. Fusion. (査読有)

[4] M. Kobayashi, S. Morita, M. Goto, “Space-resolved visible spectroscopy for two-dimensional measurement of hydrogen and impurity emission spectra and of plasma flow in the edge stochastic layer of LHD”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 88 (2017) 033501. (査読有)

[5] M. Kobayashi, S. Morita, M. Goto, and the LHD experiment group, “2D distribution of hydrogen/impurity radiation and flow formation in stochastic layer during detachment transition in LHD”, Nucl. Mater. Energy Vol. 12 (2017) 1043-1048. (査読有)

[6] H. Tanaka, S. Masuzaki, M. Kobayashi, G. Kawamura, Y. Suzuki, G. Motojima, T. Murase, R. Sakamoto, T. Morisaki, N. Ohno and the LHD experiment group, “Characterized divertor footprint profile modified with the edge pressure gradient in the Large Helical Device”, submitted to Plasma Phys. Control. Fusion. (査読有)

[国際会議発表] (計 7 件)

[1] S. Masuzaki, H. Tanaka, M. Kobayashi, G. Kawamura, Y. Suzuki, N. Ezumi, M. Goto, T. Oishi, S. Morita, M. Tokitani, M. Yajima, M. W. Jakubowski, P. Drewelow, and the LHD experiment group, “Comparison of the

divertor plasma properties between H and D discharges in the Large Helical Device”, 21<sup>st</sup> International Stellarator-Heliotron Workshop, 2-6 October, 2017. (Invited)

[2] H. Tanaka, S. Masuzaki, M. Kobayashi, G. Kawamura, G. Motojima, T. Murase, R. Sakamoto, T. Morisaki, N. Ohno, and the LHD Experiment group, 21<sup>st</sup> International Stellarator-Heliotron Workshop, 2-6 October, 2017.

[3] G. Kawamura, K. Mukai, B. J. Peterson, H. Tanaka, S. Dai, M. Kobayashi, S. Masuzaki, Y. Suzuki, Y. Feng, and the LHD experiment group, “Modeling study on three-dimensional impurity transport in impurity-seeded LHD plasma”, 21<sup>st</sup> International Stellarator-Heliotron Workshop, 2-6 October, 2017.

[4] S. Masuzaki, M. Kobayashi, H. Tanaka, G. Kawamura, M. Shoji, M. Tokitani, and the LHD experiment group, “The mechanisms of the changes in the heat and particle fluxes profiles on the helical divertor in the Large Helical Device”, PLASMA 2017, International Conference on Research and Applications of Plasmas, 18-22 September, 2017, Warsaw, Poland

[5] H. Tanaka, S. Masuzaki, G. Kawamura, T. Akiyama, M. Kobayashi, B. J. Peterson, K. Mukai, R. Sano, S. N. Pandya, S. Dai, R. Sakamoto, T. Morisaki, N. Ohno, and the LHD experiment group, “Impacts of nitrogen and neon seeding on the divertor particle and heat loads in LHD”, 22<sup>nd</sup> International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 30 May-3 June, 2016, Rome, Italy.

[6] M. Kobayashi, S. Morita, R. Sano, B. J. Peterson, M. Goto, the LHD experiment group, “Relation between impurity/hydrogen emissions and edge stochastic magnetic structure at detachment transition observed in LHD divertor region”, 20<sup>th</sup> International Stellarator/Heliotron Workshop, 5-9 October, 2015, Greifswald, Germany. (Invited)

[7] G. Kawamura, M. Kobayashi, S. Dai, K. Mukai, R. Sano, B. J. Peterson, Y. Feng, “Three-dimensional transport analysis of plasma, neutrals and impurities in LHD peripheral regions with impurity gas-puff”, 15<sup>th</sup> International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 9-11 September, 2015, Nara, Japan. (Invited)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

増崎 貴 (MASUZAKI Suguru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80280593

(2) 研究分担者

小林 政弘 (KOBAYASHI Masahiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：30399307  
(平成29年度より連携研究者)

田中 宏彦 (TANAKA Hirohiko)  
名古屋大学・工学研究科・助教  
研究者番号：60609981  
(平成29年度より連携研究者)

(3) 連携研究者

河村 学志 (KAWAMURA Gakushi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：70509520

時谷 政行 (TOKITANI Masayuki)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：30455208

森崎 友宏 (MORISAKI Tomohiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：60280591

庄司 主 (SHOJI Mamoru)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：00280602

(4) 研究協力者

DAI Shyuyu  
Dalian University of Technology

鈴木 康浩 (SUZUKI Yasuhiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

JAKUBOWSKI Marcin  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

DREWELow Peter  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

FENG Yunfeng  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik