

令和元年5月23日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04622

研究課題名(和文)3次元磁場効果によるプラズマ放射冷却の促進とダイバータ熱負荷軽減

研究課題名(英文)3D effects of magnetic topology on edge plasma radiation enhancement and divertor power load reduction

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め型核融合炉では装置壁への過剰な熱負荷が問題となっている。熱負荷を軽減するためにプラズマを放射冷却する方法が考えられている。本研究では3次元的に磁場構造が変化した場合にプラズマの放射冷却がどのように影響を受けるかについて調べた。その結果、外部から摂動を加えて磁場構造を変化させることにより、低荷数の不純物イオンが放射冷却を促進させること、その位置は閉じ込め領域よりも外側にあること、その時の装置壁への熱負荷は全体としては減少するが、局所的に増加するところがあること、放射冷却の量は摂動の強度に依存しないことなどが明らかになった。また現行のプラズマ輸送モデルで修正が必要な箇所を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果から、磁場閉じ込め型核融合炉における装置壁への過剰な熱負荷を、周辺磁場を変化させることによって制御できることが明らかになった。また、磁化プラズマ中における燃料粒子と不純物粒子の相互作用(原子・分子過程)に起因する放射損失過程によって、プラズマの熱エネルギーが電磁波として放出されること、またそれとともにエネルギー輸送過程の理解が深った。現状の数値シミュレーションで広く用いられているプラズマ輸送モデルの改善点が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In a magnetically confined nuclear fusion reactor, the excessive heat load on the plasma facing component (PFC) is a crucial issue. In order to mitigate the heat load, radiation cooling of edge plasma is considered as a possible scheme. We have investigated the impact of 3D edge magnetic field structure on the radiation cooling. It has been found that, the application of external magnetic perturbation field enhances radiation cooling from impurity ions of lower charge states, the enhanced radiation region is located outside of the confinement region, the total heat load on the PFC decreases, but there appears an increased region locally, and that the amount of radiation cooling is independent of the strength of the perturbation field. It is also found that the current transport model of plasma has to be improved in order to reproduce the experimental results.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合 ダイバータ 放射 3次元効果 磁力線構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ダイバータ板への熱負荷軽減は、核融合炉設計における喫緊の課題である。また、国際熱核融合実験炉 ITER では、摂動磁場を印加して周辺部の磁場を3次元的に変化させる運転が予定されており、その際にダイバータへの熱負荷がどのように影響を受けるかが緊急の研究課題となっている。研究開始当初、各装置において摂動磁場を印加した場合の影響についての実験が緒に就いたところであった。申請者らはこれに先駆け、周辺磁場の3次元性がダイバータプラズマに与える影響について、世界中の研究者と協力して装置間比較を行い研究を進めてきた。その結果、3次元的な磁場構造がダイバータプラズマの密度や不純物輸送に与える影響についての理解には進展があった。しかし、プラズマの放射冷却やダイバータ熱負荷に関しては、ほとんど研究がなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、核融合炉の周辺磁場構造の軸対称性が破れて3次元になるとき、磁場構造と不純物の発光分布の比較、ダイバータ熱負荷とそこに接続する磁力線構造との関係を調べることで、プラズマの放射冷却に与える影響を調べ、ダイバータ板への熱負荷がどれだけ軽減されるかを検証することを目的とする。プラズマ輸送シミュレーションと実験の比較を行い、観測結果の背後にある物理過程の考察を行うとともに、現行の輸送モデルの検証を行う。

3. 研究の方法

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD において、外部から共鳴摂動磁場 (RMP) を印加して周辺部の磁場構造を変化させる。不純物発光分布を2次元空間多チャンネル分光器で計測し、不純物の各荷数の発光分布と磁場構造との比較を行った。新たなトモグラフィー手法を開発して2次元発光分布から3次元発光分布を再構成した。全放射損失を抵抗性ポロメータで、不純物の各荷数の発光強度を真空紫外分光器で計測した。ダイバータ板への熱負荷の指標として、ダイバータプローブを用いてプラズマのイオン粒子束をトロイダル方向全周にわたって計測した。この他、不純物の発光スペクトルのドップラーシフトから流れの速度・向きを同定した。

得られた計測結果を、3次元プラズマ輸送シミュレーションコードと比較した。シミュレーションコードは LHD の3次元的な磁場構造を忠実に取り込んで、プラズマの粒子、運動量、エネルギー、不純物粒子輸送をモンテカルロ法によって計算している。

4. 研究成果

(1) 磁場構造と不純物発光分布との関係

本研究課題において、2次元多チャンネル分光器のチャンネル数を増加した。図1(a)に新しい視野内での磁力線接続長分布を示す。チャンネル数の増加によって、より広い視野（ダイバータレグ、X点、ストキャスティック領域、閉じ込め領域を含む）での計測が可能となった。得られた2次元発光分布は視線方向に積分されたものであるが、新たな手法をトモグラフィー解析に取り入れることにより、視線方向にデータを分解することに成功した。磁化プラズマの特徴として、磁力線方向に非常に速い輸送があることから、プラズマの分布は磁力線に沿って滑らかになる。新たなトモグラフィー解析では、この効果を発光強度の磁力線方向の2階微分としてトモグラフィー変換における正則化に取り入れ、繰り返し計算によって解を得た。様々な既知の分布をテストデータとして与えて本手法の妥当性を検証した。図1(b, c)はこうして得られた炭素不純物の発光強度分布を示す。イオンの荷数が低い不純物 (C^{1+}) からの発光は、図1(a)との比較から、ダイバータレグとストキャスティック領域の一部に分布しているが、より荷数が高い C^{3+} については、ダイバータレグでの発光はほとんど見られず、代わりに X 点を中心としたストキャスティック磁場領域に主に分布していることが明らかになった。3次元的な磁場構造におけるこのような不純物の発光分布の同定はこれまで行われておらず、初めての成果である。この結果から、LHD のようなヘリカル型装置における不純物の放射損失は、ダイバ

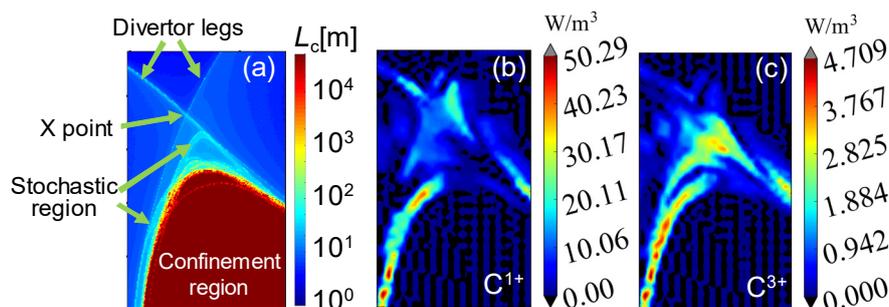


図1 多チャンネル分光器の観測視野における (a) 磁力線接続長 (L_c) 分布、(b) C^{1+} からの発光分布、(c) C^{3+} からの発光分布。トモグラフィー解析による再構成像。

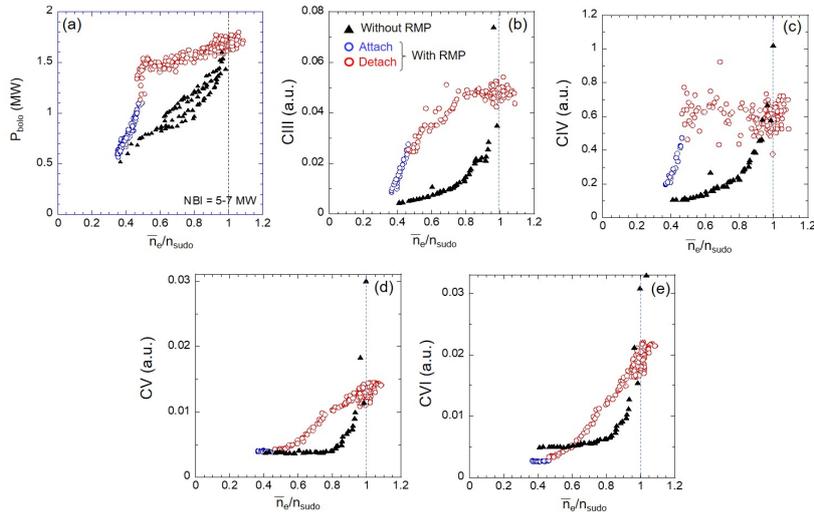


図2 (a)全放射損失(P_{bolo})、(b) CIII (C^{2+}) 発光、(c) CIV (C^{3+}) 発光、(d) CV (C^{4+}) 発光、(e) CVI (C^{5+}) 発光の密度依存性。密度は密度限界値 n_{sudo} で規格化。三角：RMP 無し、丸：RMP 有り。青丸：アタッチ状態(放射損失が小さい場合)、赤丸：デタッチ状態(放射損失が増大した場合)。

一タレグではなく、主にストキャスティック領域に集中していることが明らかになった。

外部共鳴擾動磁場 (RMP) を印加した場合に、プラズマからの放射損失が不純物イオンの各荷数でどのように変化するかを調べた。図2は RMP 有り、無しの場合のプラズマからの全放射損失 (P_{bolo})、および各荷数のイオンからの発光強度 (CIII, CIV, CV, CVI) の密度依存性を示している (CIII~CVI はそれぞれ C^{2+} ~ C^{5+} のイオンからの発光)。この図から、RMP を印加することにより、全放射損失は低密度領域で増加し、その後高密度領域では密度に対してあまり変化しない。一方、各不純物イオンからの発光強度は、CIII (C^{2+})、CIV (C^{3+}) からの密度依存性が全放射損失のものと同様の振る舞いをしていることがわかった。発光の絶対強度の解析を行った結果、CIV がもっとも強い発光であることがわかった。この結果から、RMP を印加することにより、低荷数の不純物イオンの発光が増加し、これが全体の放射損失の増加につながっていることが明らかになった。また、CV (C^{4+})、CVI (C^{5+}) については、全体の放射損失への寄与は小さいが、RMP を印加することにより増加している。これは RMP を印加することにより、不純物がより高温プラズマの領域に入り易くなっていることを示唆している。

図3は RMP 有り無しの場合の周辺部の磁力線構造と、プラズマの密度・温度から評価した炭素不純物の発光分布の時間発展を示している。ここで磁力線構造においては、磁力線の接続長 (ダイバータ板の間をつなぐ磁力線の長さ L_c) をプロットしている。時間の経過とともにプラズマの密度を増加させている。図3 (a) 上段に示すように、RMP を印加すると周辺部に長い磁力線領域の部分が現れる。発光分布 (図3 (a) 下段) は最初 $R=4.8$ m 付近の X 点で強くなる。時間が進むにつれて徐々に半径内側に移動し、 $t=3$ 秒で強くなると同時に $R=4.75$ m に固定されて放電が維持される。この位置は図3 (a) 上段から、RMP 印加によって現れる長い磁力線構造の端に対応している。一方、RMP を印加しない場合には、図3 (b) に示すように、時間の経過とともに (プラズマの密度の増加とともに) 発光のピークは半径内側に移動し、 $t=4$ 秒で閉じ込め領域に入ってプラズマが崩壊する。この解析結果から、RMP を印加することによって周辺部の磁場構造に長い磁力線領域が現れ、不純物の発光がこの長い磁力線領域の端に固定されることにより、放電が安定に維持されることが明らかになった。

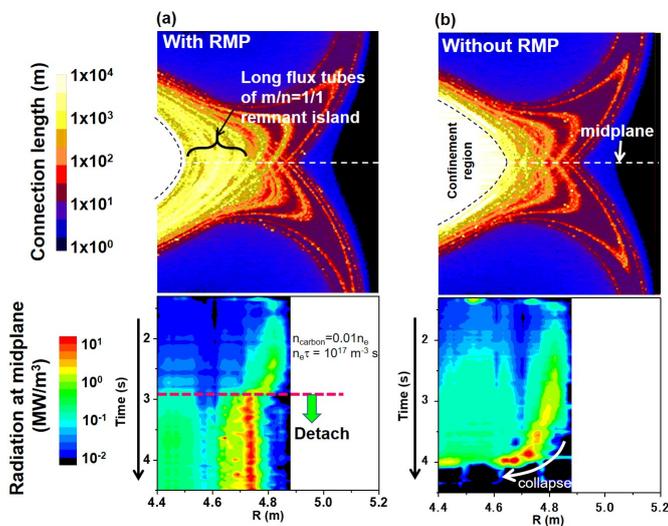


図3 LHD 周辺部の磁力線接続長分布 (上段) と赤道面上の不純物放射損失分布の時間発展 (下段)。(a) RMP 有り、(b) RMP 無し。

図3 (a) 上段から、RMP 印加によって現れる長い磁力線構造の端に対応している。一方、RMP を印加しない場合には、図3 (b) に示すように、時間の経過とともに (プラズマの密度の増加とともに) 発光のピークは半径内側に移動し、 $t=4$ 秒で閉じ込め領域に入ってプラズマが崩壊する。この解析結果から、RMP を印加することによって周辺部の磁場構造に長い磁力線領域が現れ、不純物の発光がこの長い磁力線領域の端に固定されることにより、放電が安定に維持されることが明らかになった。

これらの知見は、今後のダイバータ熱負荷軽減に向けた周辺磁場構造の最適化にとって重要な結果であると考えられ

る。

(2) 磁場構造の変化とダイバータ熱・粒子負荷の関係

RMP を印加した時のダイバータ熱負荷分布の変化について調べた。ここで、ダイバータ熱負荷の指標として、ダイバータ板に設置されたプローブによるイオン流束の測定結果を用いる。これまでの解析から、熱負荷とイオン流束はほぼ同じ振る舞いをする事がわかっている。図4はRMPを印加した時のダイバータ粒子束のトロイダル方向分布をRMP無しの場合に対する増減としてプロットしている。図4(a)はアタッチ状態(放射損失が小さい場合)、図4(b)はデタッチ状態(放射損失が増大した場合)をそれぞれ示している。図4(a)から、RMPを印加することにより、トロイダル方向に熱負荷が減少する箇所と増加する箇所があることがわかった。これはRMPのトロイダルモード数 $n=1$ に対応している。ダイバータ板に接続する磁力線の構造と比較した結果、RMPを印加することによって接続長(L_c)分布が変化し、より長い(あるいは短い)磁力線が接続する箇所では熱負荷が増加(あるいは減少)していることがわかった。一方、放射損失が増大した場合には、多くの場所で熱負荷が減少するが、特定のトロイダル位置ではRMP無しの場合に比べて増加することが明らかになった。またこの時の熱負荷分布は、必ずしも磁力線の接続長分布では説明できないことがわかった。この理由として、プラズマの輸送の変化、およびプラズマ中の電流による磁場構造の変化が考えられる。この点については、今後さらなる解析が必要である。熱負荷の増加がある箇所については、今後の課題として、追加の不純物入射をするか、あるいはRMPの位相を変化させて空間的に移動させる手法を試みる必要がある。RMP印加時のダイバータ熱負荷分布はトカマク装置でも極めて重要な課題として研究が進められており、本成果はその物理過程の理解に向けて重要な結果であるといえる。

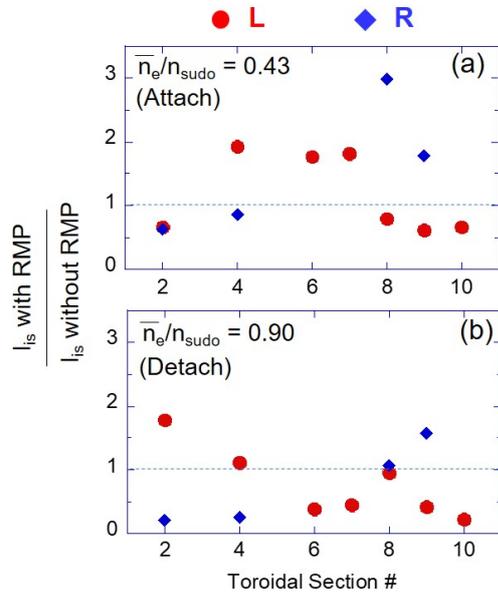


図4 ダイバータイオン粒子束のトロイダル方向分布。(a) アタッチ状態(放射損失が小さい場合)、(b) デタッチ状態(放射損失が増大した場合)。RMP 有りの値を RMP 無しの値で規格化。”L”，“R”はそれぞれ別のダイバータ列を意味する。

(3) RMP の強度を変化させた時の放射損失、ダイバータ熱負荷への影響

図5は摂動磁場RMPの強度を $B_r/B_0 \sim 0.12\%$ まで変化させた場合の放射損失、ダイバータ熱負荷(イオン流束)の密度依存性を示している。この実験から、RMPの強度が大きいほど、放射損失が増大を始める密度(デタッチメント遷移密度、 n_{det})が低く(図5(a)赤シンボル)、RMP強度を弱めるにつれて n_{det} は上昇する(同図緑シンボル)ことがわかった。また、ダイバータの熱負荷が軽減を始める密度も同様の振る舞いをする(図5(b))。密度をさらに上昇させると、RMPの強度によらず、 $n_e/n_{sudo} \sim 1$ 付近で放射崩壊した。このことから、RMP強度が大きいほど、放射損失を増大させてダイバータ熱負荷が軽減する運転密度領域($n_{det} \sim n_e/n_{sudo} = 1$)が広いことがわかった。一方で、最終的に到達する放射損失量、ダイバータ熱負荷はRMP強度にほとんど依存していない。この理由については現在のところ分かっていない。RMP強度による周辺磁場構造の変化の違いと不純物発光分布の関係、およびプラズマ中の電流による磁場構造への効果

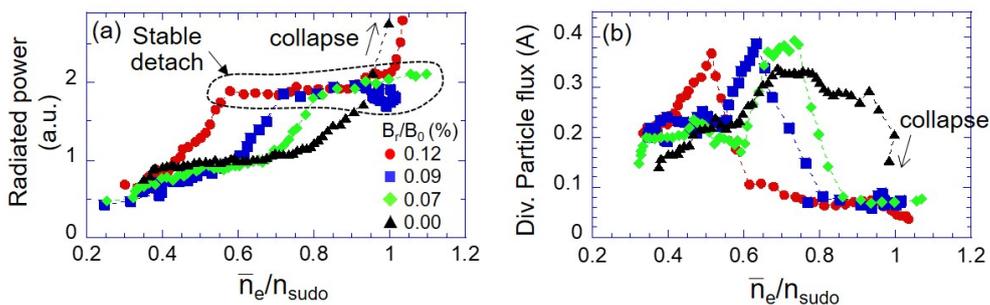


図5 RMP 強度を変化させた場合の(a)放射損失と(b)ダイバータイオン粒子束の密度依存性。

を考慮して、今後調べていく必要がある。トカマク装置においてもプラズマ応答によって RMP は遮蔽されたり増幅されるケースが観測されており、プラズマと摂動磁場の相互作用は未解明の課題である。

(4) シミュレーションと実験結果との比較

実験で得られた不純物発光・フロー速度分布と3次元数値シミュレーションとの比較を行った。発光分布との比較に関しては、ダイバータ板から不純物が射出される時のエネルギーが、これまで計算で用いてきた値よりも数倍～1桁ほど大きくすることによって、実験とシミュレーションが良く一致する傾向にあることがわかった。この原因の一つとして、炭素不純物が水素との化合物(メタンなど)を形成することにより、シミュレーションでは考慮されていない複雑な原子・分子過程が考えられる。フロー速度の比較については、シミュレーションはフローの向きといった定性的な実験結果は再現できるが、速度の絶対値については数倍程度のずれが見られた。不純物の輸送モデルにおける各項の係数を変化させたが、実験結果の発光分布とフロー分布を同時には再現できていない。これに関しては、背景プラズマの再現性ととも、モデルの見直しが必要であることが明らかになった。ITERでも本研究で用いたものと同じシミュレーションコードが使われており、本研究で明らかになったコードの修正点は広く他の装置でも考慮されるべき点である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① T. Kobayashi, M. Kobayashi, N. Iwama et al., “Single field-of-view tomographic imaging of 3D impurity emission distribution in magnetized edge plasma of LHD”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, 2018, 123502~123502, refereed.
<https://doi.org/10.1063/1.5048218>
- ② A. Kuzmin, M. Kobayashi, T. Nakano et al., “Analysis of the impurity flow velocity in a wide plasma parameter range for deuterium and hydrogen plasmas in the divertor legs of the stochastic layer in LHD”, *Nuclear Materials and Energy*, vol. 17, 2018, 217~221, refereed.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.11.009>
- ③ M. Kobayashi, S. Masuzaki, K. Tanaka et al., “Core plasma confinement during detachment transition with RMP application in LHD”, *Nuclear Materials and Energy*, vol. 17, 2018, 137~141, refereed.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.10.003>
- ④ S.Y. Dai, T. Oishi, G. Kawamura, M. Kobayashi et al., “Three-dimensional simulations of edge impurity flow obtained by the vacuum ultraviolet emission diagnostics in the Large Helical Device with EMC3-EIRENE”, *Nuclear Fusion*, vol. 58, 2018, 096024~096024, refereed.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aace69>
- ⑤ T. Oishi, S. Morita, S.Y. Dai, M. Kobayashi, et al., “Observation of carbon impurity flow in the edge stochastic magnetic field layer of Large Helical Device and its impact on the edge impurity control”, *Nuclear Fusion*, vol. 58, 2018, 016040, refereed.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa8f63>
- ⑥ S.Y. Dai, M. Kobayashi, G. Kawamura et al., “Investigation of heat flux deposition on divertor target on the Large Helical Device with EMC3-EIRENE modelling”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 59, 2017, 085013, refereed.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa7599>
- ⑦ Y. Nakamura, N. Tamura, M. Kobayashi et al., “A comprehensive study on impurity behavior in LHD long pulse discharges”, *Nuclear Materials and Energy*, vol. 12, 2017, 124-132, refereed.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.005>
- ⑧ Y. Feng, H. Frerichs, M. Kobayashi et al., “Monte-Carlo fluid approaches to detached plasmas in non-axisymmetric divertor configurations”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 59, 2017, 034006, refereed.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/59/3/034006>
- ⑨ J. W. Ahn, A. R. Briesemester, M. Kobayashi et al., “Effect of 3D magnetic perturbations on divertor conditions and detachment in tokamak and stellarator”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. 59, 2017, 084002, refereed.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa73ea>
- ⑩ 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”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, 2017, 033501, refereed.
<https://doi.org/10.1063/1.4976963>

⑪ H.M. Zhang, S. Morita, S. Dai, T. Oishi, M. Goto, X. Huang, G. Kawamura, M. Kobayashi, “Vertical profiles and two-dimensional distributions of carbon line emissions from C2+-C5+ ions in attached and RMP-assisted detached plasmas of large helical device”, Physics of Plasmas, vol.24, 2017, 022510, refereed.

<https://doi.org/10.1063/1.4976989>

⑫ M. Kobayashi, S. Morita, M. Goto, “2D distribution of hydrogen/impurity radiation and flow formation in stochastic layer during detachment transition in LHD”, Nuclear Materials and Energy, vol.12, 2017, 1043-1048, refereed.

<https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.12.023>

[学会発表] (計 7件)

① M. Kobayashi, “CORE TRANSPORT IMPROVEMENT IN STABLE DETACHMENT WITH RMP APPLICATION TO THE EDGE STOCHASTIC LAYER OF LHD”, 27th IAEA Fusion Energy Conference - IAEA CN-258, 2018.

② 小林政弘、” LHD における RMP 磁場印加によって安定化されたデタッチメント運転とコアプラズマ輸送の関係”, 第35回 プラズマ・核融合学会 年会, 2018.

③ M. Kobayashi, “Edge transport and plasma-wall interactions on LHD”, 643rd Wilhelm and Else Heraeus Seminar on “Impact of 3D magnetic fields on hot plasmas”, 2017.

④ M. Kobayashi, “Edge radiation control in stochastic magnetic field and with RMP application in LHD”, 2nd IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, 2017.

⑤ M. Kobayashi, “Development of spectroscopy system for study of edge impurity emission and transport in relation to divertor power load distribution in LHD”, Plasma Conference2017, 2017.

⑥ M. Kobayashi, “2D distribution of hydrogen/impurity radiation and flow formation in stochastic layer during detachment transition in LHD”, The 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2016.

⑦ 小林政弘、” LHD のストキャスティック磁場領域におけるデタッチメントの周辺輸送シミュレーション”、プラズマ・核融合学会、2016.

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：増崎 貴

ローマ字氏名：Masuzaki, Suguru

研究協力者氏名：森田 繁

ローマ字氏名：Morita, Shigeru

研究協力者氏名：Shuyu Dai

ローマ字氏名：Dai, Shuyu

研究協力者氏名：大石 鉄太郎

ローマ字氏名：Oishi, Tetsutarou

研究協力者氏名：Arseniy Kuzmin

ローマ字氏名：Kuzmin, Arseniy

研究協力者氏名：小林 汰輔

ローマ字氏名：Kobayashi, Taisuke

研究協力者氏名：河村 学思

ローマ字氏名：Kawamura, Gakushi

研究協力者氏名：Hongming Zhang

ローマ字氏名：Zhang, Hongming

研究協力者氏名：向井 清史

ローマ字氏名：Mukai, Kiyohumi

研究協力者氏名：Oliver Schmitz

ローマ字氏名：Schmitz, Oliver

研究協力者氏名：Aaron Bader

ローマ字氏名：Bader, Aaron

研究協力者氏名：Yuehe Feng

ローマ字氏名：Feng, Yuehe

研究協力者氏名：Joon-Wook Ahn

ローマ字氏名：Ahn, Joon-Wook

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。