

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23760816

研究課題名（和文） ストキャスティック磁場による高 Z 不純物の遮蔽効果

研究課題名（英文） Screening effect of high Z impurity in stochastic magnetic field

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・助教

研究者番号：30399307

研究成果の概要（和文）：現在、核融合炉実現のために注目を集めている周辺ストキャスティック磁場（統計的に乱れた磁力線構造領域）における不純物の輸送を調べるため、3次元数値シミュレーションと分光計測を用いて両者の比較・解析を行った。高密度プラズマ運転時における不純物遮蔽効果を立証する解析結果を得た。また、高い荷数を持つ不純物（鉄）においても遮蔽効果を確認した。これら遮蔽効果は、ストキャスティック磁場の幾何学的構造に起因していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Impurity transport has been analyzed in edge stochastic layer of magnetically confined fusion devices, using three dimensional numerical simulation and spectroscopy measurements. It has been confirmed that there is clear screening effect on impurity at high density plasma operation. It is also found that the screening effect is available for high Z impurity (Fe). These screening effects have been found due to the geometrical effects of the stochastic magnetic field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：周辺プラズマ、ストキャスティック磁場、不純物輸送

1. 研究開始当初の背景

ストキャスティックな磁場構造の存在は、磁場閉じ込め装置において早い段階（1960年代）から予測されており、プラズマの輸送に関する議論が行われてきた。図1に示すように磁気島の重なり合いによってできた磁力線が磁場を横切る輸送によって相互作用するため、輸送特性が大きく変わると考えられる。米国の TEXT、フランスの Tore Supra、ドイツの TEXTOR-DED 等において、ストキャスティック磁場を利用してプラズマ輸送を制御する実験が行われてきた。不純物の遮蔽効果が観測されているが、その物理機構はいまだ未解明である。近年は ITER(国

際熱核融合実験炉)で ELM 制御のためにストキャスティック磁場を用いることが予定されていることから、そこでのプラズマ輸送の解明が重要となってきている。

研究代表者は博士課程のころからこの分野の研究に従事してきた。最近は大規模ヘリカル装置(LHD)において不純物輸送の研究を続けており、分光計測と数値シミュレーションの比較から、高密度プラズマ運転領域で不純物遮蔽が起こっている可能性を示した。今後さらなる不純物輸送の解明には、従来型モデルと実験の定量的な比較を含めた、より詳細なモデルの検証が必要である。

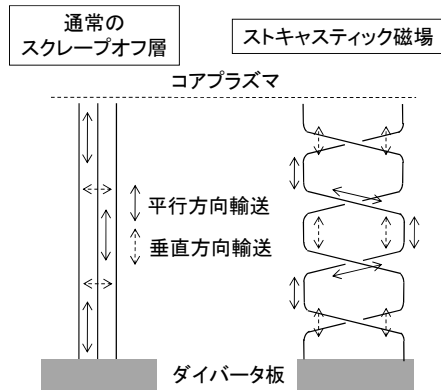


図1 磁力線構造の概念図. 左: 通常のスクレープオフ層、右: ストキャスティック磁場.

2. 研究の目的

上記の研究の背景を踏まえ、磁場閉じ込め装置の周辺部ストキャスティック (stochastic) 磁場における不純物の遮蔽効果について、分光計測の強化と能動的な実験により定量的な評価をおこなう。これまでの炭素不純物に関する研究を定量的な解析に発展させるとともに、高Z不純物の遮蔽効果について解析を拡張する。2次元軸対称なトカマク磁場配位で広く用いられてきた不純物輸送モデルが、3次元非軸対称なストキャスティック磁場においてどこまで適用可能かを、実験結果とシミュレーションを定量的に比較することにより検証する。

3. 研究の方法

ストキャスティック磁場を有したプラズマ生成装置として、核融合科学研究所のLHDを用いる。本装置は研究代表者がこれまで研究を行ってきた装置であり、各種測定器 (分光計測、ダイバータ・周辺プラズマ計測)、数値シミュレーションの準備が整っている。また、LHDは磁場配位の形成にプラズマ電流を必要とせず、外部コイルのみによって磁場構造が決定されるため、数値計算によって精度よくプラズマ中の磁場構造を計算できる。このことはこれまでの電子温度分布計測と数値シミュレーションとの比較から確認されている。従って不純物輸送シミュレーションとの比較において、磁場構造の影響、輸送モデルによる効果を直接的に検証できる。また、分光計測については、VUV (真空紫外)、EUV (極端紫外)、可視分光器が整備されており、研究を進める上での準備が整っている。本研究はこれらの分光計測を増強すると共に、新たにダイバータ分光計測を加え、また数値シミュレーションを高Z不純物への拡張することにより解析を定量的および高Z不純物へと拡張する。

4. 研究成果

(1) 不純物からの発光の分布計測とシミュレーションとの比較

増強された分光器により炭素からの発光の空間分布計測を行い、これと数値シミュレーションとの比較を行った。図2にその結果を示す。図2(a)は3次元数値シミュレーションによる炭素不純物 (C^{3+}) の分布の計算結果である。プラズマの密度が上昇するにつれて半径方向外側に移動している様子が見られる。これは高密度になるにつれて背景プラズマの半径外向きの流れと不純物との間の摩擦

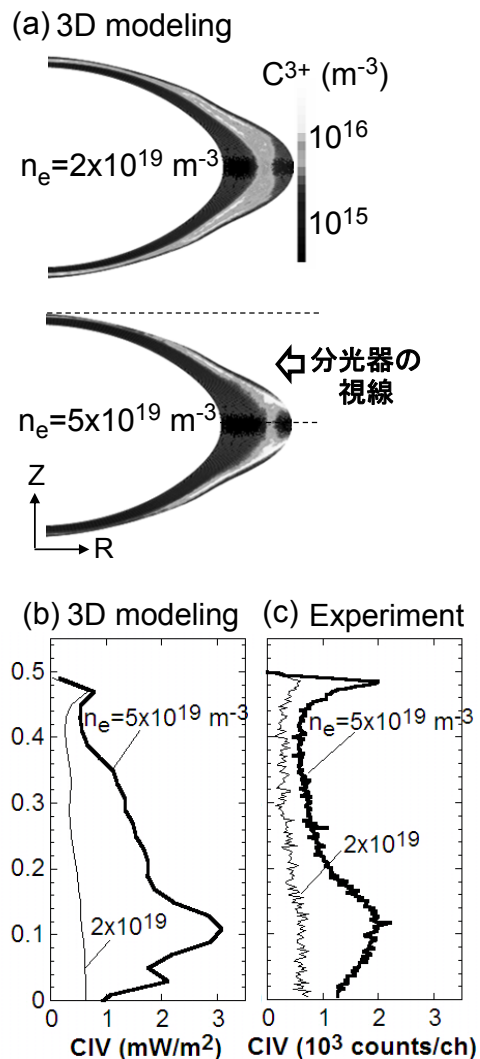


図2 (a) 3次元数値シミュレーションによる炭素不純物分布 (C^{3+}) の計算結果。上: 低密度 ($2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)、下: 高密度 ($5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)。 (b) 数値シミュレーション結果から、分光器の視線に沿って積分された炭素からの発光強度のZ (鉛直) 方向分布。 (c) 実験により得られた発光強度のZ方向分布。

力が増え、その結果不純物が外向きに押し返されるためである。図 2 (b)は、分光計測との比較を念頭に、得られた炭素不純物 (C^{3+}) から発せられる発光 (CIV) の強度分布を图中に示す「分光器の視線」に従って水平方向に視線積分して得られたものである。プラズマ密度の上昇により、炭素がより径方向外側に移動することにより、赤道面付近のダイバータレグ構造を反映した分布となる。このため、 $Z=0.1m$ 付近にピークが現れることが示された。図 2 (c)は実験における計測結果を示す。シミュレーションと同様に、 $Z=0.1 m$ 付近に明瞭なピークが現れている。この結果から、確かに高密度運転領域で、炭素不純物に対する遮蔽効果が現れていることがより確証をもって示されたといえる。

(2) 不純物遮蔽効果への磁場構造の影響

磁力線構造の役割について調べるために、その幾何学的性質が大きく異なる装置、ヘリオトロン配位の LHD と X 点ダイバータトカマク配位の HL-2A (西南物理研究所、中国) の比較を行った。図 3 は数値シミュレーション

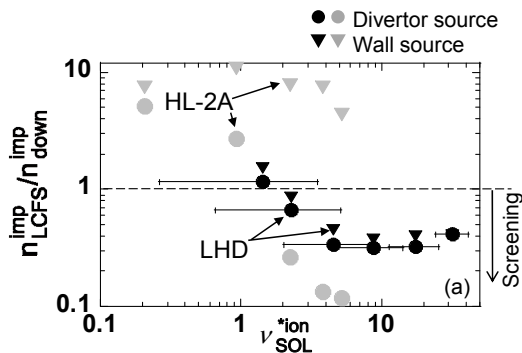


図 3 不純物遮蔽効果の衝突周波数依存性。黒：LHD、灰色：HL-2A。○：ダイバータ板から飛来する不純物、●：第一壁から飛来する不純物。

により得られた遮蔽効果の衝突周波数依存性について、LHD と HL-2A の結果を示す。

不純物遮蔽の指標として、ダイバータ近傍 (下流) の不純物密度 (n_{down}^{imp}) と最外殻磁気面 (LCFS) 近傍の密度 (n_{LCFS}^{imp}) の比、

$$n_{LCFS}^{imp} / n_{down}^{imp}$$

を用いた。この値が 1 を下回れば遮蔽効果が現れるとみなせる。この図から、LHD の場合には、第一壁・ダイバータ板の両方から飛来する不純物に対して高密度領域 (高衝突周波数) で遮蔽効果があることがわかった。一方、

HL-2A では、ダイバータ板からの不純物については非常に強い遮蔽効果がある反面、第一壁からの不純物に対してはほとんど遮蔽効果がないという結果を得た。この理由について、シミュレーション結果を精査することにより以下のように説明できることがわかった。

1. LHD のような周辺部がストキャスティック磁場になっている場合には、磁力線が壁につながる前に、プラズマの周りを何周も周回するため、プラズマパラメータがポロイダル方向により均一になる。このため、高密度運転時には、上述の摩擦力の効果がポロイダル全方向に対して現れ、従ってあらゆる方向から飛来する不純物に対して有効に働いている。一方、X 点ダイバータ配位のトカマク装置の SOL では、磁力線がポロイダル方向に 1 周しかしないため、プラズマパラメータがポロイダル方向に非対称になる。すなわち、ダイバータ付近では高密度・低温なプラズマが生成され、摩擦力は大きくなるが、ダイバータ板から離れるほど、すなわち赤道面付近では比較的高温・低密度プラズマとなり、摩擦力が効かなくなる。このため、第一壁から飛来する不純物に対しては遮蔽効果がほとんど無くなってしまふ。

2. トカマク装置の SOL では、磁力線はそのダイバータ板へのつながり方 (ダイバータ板までの接続距離、およびその到達点のポロイダル・トロイダル位置) が段階的 (秩序的) に層状に分布している。一方でストキャスティック磁場領域では、磁力線のカオス的性質 (初期値敏感性) のため、ダイバータ板へのつながり方が大きく異なる磁力線が、小さな空間スケール (輸送のスケールに対して) の中に複雑に入り組んでいる。このため、磁力線を横切る方向の輸送によって磁力線間の相互作用 (粒子・エネルギー輸送) が促進され、結果として磁化プラズマの特徴である、磁力線方向の強い指向性が失われる。具体的には、磁力線に沿ったプラズマの圧力保存が破れ易くなる。これは、赤道付近のプラズマ圧力がダイバータ板までほぼ保存されると考えられているトカマク SOL との大きな違いである。トカマク SOL の場合には、この圧力保存のために、ダイバータ板付近で低温・高密度のプラズマが生成されると、上流側の赤道付近では高温・低密度にならざるを得ない。結果として衝突周波数の関数である摩擦力が弱まる。一方で、圧力保存が破れているストキャスティック磁場では、上流と下流の結合が緩和されているために、上流側でも比較的高密度・低温なプラズマが実現される。その結果、不純物遮蔽に有効な摩擦力が維持される傾向にあることがわかった。

(3) 高Z不純物の遮蔽効果

鉄からの発光についても分光計測を行い、特に閉じ込め領域とストキャスティック領域の境界付近に存在すると思われる荷数 15+ のイオンについて着目した。磁気面に沿ってプラズマパラメータが一定であると仮定して、観測結果をアーベル変換し、鉄の 15+ イオンの絶対密度を評価する解析を行った。その結果、図4に示すように、プラズマの密度の上昇に伴い、鉄の密度は減少することがわかった。その傾向は数値シミュレーションの結果と良く一致した。このように、不純物遮蔽が荷数の違う不純物に対しても働くことが示された。これは、摩擦力等の不純物に加わる力のバランスが荷数にほとんど依存しないというモデルの予測と矛盾しない。また、数値シミュレーションが示すところに依ると、ストキャスティック領域の遮蔽効果は炭素よりも鉄に対してより強く作用することがわかった。これは、不純物中性粒子の第一電離電圧が炭素が~11eV であるのに対して鉄は~8eV と低く、プラズマのより外側で電離されるため、プラズマの摩擦力（半径外側にいくほど大きい）をより効果的に受けるためである。このように、輸送の効果以外にも、原子・分子過程に起因する要素が結果として不純物の分布に影響することがわかった。

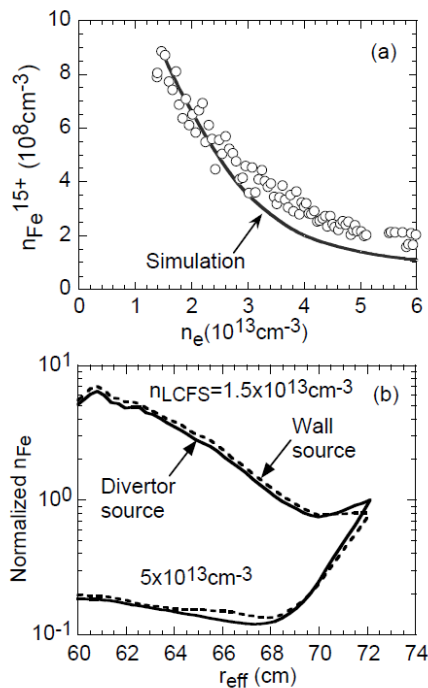


図4 (a) 鉄(15+)密度のプラズマ密度依存性。○：実験結果、-：数値シミュレーション。(b) 数値シミュレーションによって得られた鉄(15+)密度の径方向分布。

但し、以上の炭素、鉄に関する不純物輸送解析については、その発生量の同定にまでは至らなかったため、遮蔽効果の定量的な評価は今後の課題として残されている。これについては、入射量が制御できるネオンやアルゴン等の実験を行い、研究を進めていきたいと考えている。

(4) 数値シミュレーションの適用範囲について

今回の数値シミュレーションによる輸送解析において、背景プラズマの温度・密度分布がシミュレーションによってうまく再現できない領域があることが判明した。これはシミュレーション中で用いている輸送係数に関する仮定、すなわち磁力線を横切る方向の輸送係数は空間で一定であることに起因している。このため、輸送係数を空間的に変化できるようにコードの改良を行った。現在のところ、新コードの基本的なベンチマークはほぼ終了しており、今後はこの新しい数値計算コードを用いることにより更に詳細で精度の良い輸送解析を行っていく予定である。

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1件)

(1) M. Kobayashi, S. Morita, C.F. Dong, 他14名, Y. Feng (8番目), S. Masuzaki (9番目), M. Goto (10番目), “Edge Impurity Transport Study in Stochastic Layer of LHD and Scrape-off Layer of HL-2A”, Nuclear Fusion vol.53 (2013) 033011.
DOI: 10.1088/0029-5515/53/3/033011

〔学会発表〕(計3件)

(1) M. Kobayashi, S. Morita, M. Goto, S. Masuzaki, T. Morisaki, the LHD experiment group, Y. Feng, “Measurements of hydrogen/impurity emission distribution in the stochastic layer of LHD and comparison with fluid plasma transport model in attached and detached divertor plasma”, 6th International Workshop on Stochasticity in Fusion Plasmas, 2013年3月18-21日、ユーリッヒ、ドイツ。

(2) 小林政弘, 森田繁, C.F. Dong, Y. Feng, 後藤基志, 増崎貴, 他10名, “ヘリカル装置LHDとトカマク装置HL-2Aにおける周辺不純物

輸送の比較”、第29回プラズマ・核融合学会
年会、2012年11月27日～2012年11月30日、福
岡県春日市。

(3) S.Morita, C.F.Dong, M.Kobayashi,
M.Goto, I.Murakami, 他15名、S. Masuzaki
(13番目)、” Low Concentration of Iron as
First Wall Material in LHD Plasmas with
Edge Ergodic Layer ”, 24th IAEA Fusion
Energy Conference; IAEA CN-197, 2012年10
月08日～2012年10月13日, サンディエゴ、ア
メリカ。

6. 研究組織

(1) 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・助教
研究者番号：30399307

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

森田 繁 (MORITA SHIGERU)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：80174423
後藤 基志 (GOTO MOTOSHI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：00290916
増崎 貴 (MASUZAKI SUGURU)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：80280593

(4) 研究協力者

Chunfeng Dong
核融合科学研究所・COE 研究員
Yuehe Feng
マックスプランク研究所(ドイツ)・主任研
究員