

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月12日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340175

研究課題名（和文） アルヴェン固有モードの空間構造と高速イオン異常輸送の相関

研究課題名（英文） Correlation between Spatial Structure of Alfvén Eigenmodes and Anomalous Transport of Fast Ions

## 研究代表者

磯部 光孝 (ISOBE MITSUTAKA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00300731

研究成果の概要（和文）：将来の磁場閉じ込め核融合炉で問題となる可能性がある高速イオン励起アルヴェン固有モード（TAE）に起因する高速イオン輸送・損失に関する研究を大型ヘリカル装置において実施した。内寄せ配位から外寄せ配位へ、或いは有限 $\beta$ 効果により磁気軸位置が大半径方向にシフトするにつれ、TAEの固有関数が空間的に広がり、且つ高速粒子軌道の磁気面からの偏差が拡大し、磁気揺動振幅に対して損失高速イオン束の増加傾向が顕著になることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Effects of toroidicity-induced Alfvén eigenmodes on energetic-ion transport have been investigated in LHD plasmas heated by high-energy neutral beam injection. TAE-induced fast-ion losses were observed. The losses increase as the TAE fluctuation amplitude increases. The dependence of the observed TAE-induced fast-ion loss with respect to TAE fluctuation amplitude indicates that outward shift of a magnetic axis increases the anomalous fast-ion loss caused by TAE. This is supposed to be due to increase of orbit shift from flux surfaces and expansion of spatial distribution of TAEs in outward shifted plasmas.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：LHD、アルヴェン固有モード、高速イオン

## 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め方式による熱核融合炉を実現するには、プラズマ中における高速イオンは、クーロン衝突を経てその運動エネルギーを背景プラズマに十分与えるまで系内に留まる必要がある。将来の核燃焼プラズマにおいては、D-T反応により生成される高速 $\alpha$ 粒

子は、背景プラズマを加熱し、且つ核燃焼状態を維持する役割を担う。仮に、何らかの理由で $\alpha$ 粒子が損失した場合、核燃焼状態の維持が困難になるだけでなく、損失 $\alpha$ 粒子による第一壁への局所的な熱負荷の結果、装置に致命的損傷を与える可能性がある。 $\alpha$ 粒子の速度がアルヴェン波の位相速度程度になる

と、 $\alpha$ 粒子とアルヴェン波との共鳴相互作用が起り、 $\alpha$ 粒子から波にエネルギーが移行し（逆ランダウ減衰）、アルヴェン固有モードが励起される可能性がある。トロイダルアルヴェン固有モード（TAE）に代表される高速イオン励起 MHD 不安定性は、不安定性励起に寄与した高速 $\alpha$ 粒子自身の異常輸送・損失を引き起こすことが危惧されており、熱核融合炉の実現を目指した現在の磁場閉じ込め実験においては非常に関心の高い研究対象の一つとして、高速中性粒子ビーム（NB）入射やイオンサイクロトロン共鳴加熱（ICRH）によりプラズマ中に生じる高速イオンを用いた研究が各国で進められてきている。しかしながら、高速イオンに起因する不安定性の励起・安定化機構、不安定性の非線形発展過程、また不安定性による高速イオンの損失機構等において未解明な部分が依然として数多く残されており、当該分野研究は現時点において未だ道半ばの段階にあると言っても過言ではない。

かつては、非軸対称磁場リップルの存在により三次元磁場構造を持つヘリカルプラズマにおける高速イオンの閉じ込めは常に議論の対象であったが、その後の磁場配位研究の進展により、比較的良好に高速イオンが閉じ込められるようになり、コンパクトヘリカルシステム（CHS）、大型ヘリカル装置（LHD）（何れも核融合科学研究所）、W7-AS（独・マックスプランク物理研究所）等のヘリカルステラレータプラズマにおいて高速イオン励起 MHD 不安定性が観測されるようになった。研究代表者はこれまでに、小型のヘリカル装置 CHS（平成 18 年 8 月末にてプロジェクト終了）において、シンチレータに基づく磁気スペクトロメータ型の損失高速イオンプローブ（SLIP）を駆使して、NB 入射高速イオンにより励起された MHD 不安定性に起因した高速イオンの損失を観測し、観測された損失高速イオンのエネルギーやピッチ角から不安定性に起因する損失高速イオンの軌道の同定、並びに磁気揺動振幅と損失高速イオン束との関係等の議論を行ってきた。ただしこれまでの研究は、MHD 不安定性が引き起こした結果を観測しているに留まっており、そこで発生した現象の包括的理解には至っていない。励起条件・メカニズムや、高速掃引する揺動周波数と高速イオンの径方向への異常輸送・損失との関連を理解するには、AE 励起の要因となるプラズマ内部における高速イオンの速度・空間分布を精査し、揺動の空間構造やその周波数変動等の関連パラメータと、高速イオンの径方向への異常輸送、並びに損失高速イオンのエネルギーや実空間における損失位置分布を有機的に結びつけた形の議論を行う必要がある。本研究では、上記内容の研究を LHD におい

て進め、ヘリカルプラズマにおける高速イオン励起 MHD 不安定性と高速イオンの相互作用に関する包括的理解に向けて研究の展開を図る。

## 2. 研究の目的

本研究では、将来の核燃焼プラズマにおける $\alpha$ 粒子と MHD 不安定性の相互作用、及びその結果として生ずる $\alpha$ 粒子の異常輸送に関わる機構の解明を目指して研究を遂行した。ヘリカルプラズマにおける高速イオンと MHD 不安定性との相互作用、並びにその結果生ずる高速イオンの異常輸送について多角度から精査し、理論やシミュレーション結果との比較に耐えうる質の高いデータを取得し、将来の核燃焼プラズマにて起こりうる現象の予測に役立てることを目的とした。特に次の点について力点をおいた研究を進めた。1) 高速イオンによって励起されるトロイダルプラズマ特有の TAE に代表されるアルヴェン固有モードの内部構造の詳細な測定を行い、三次元磁場配位におけるシアアルヴェンスペクトルギャップ構造や固有関数との比較検討を行う。2) 不安定性励起の要因となる高速イオンの速度分布、並びに空間分布（勾配）を精査し、高速イオンによって励起される不安定性の励起条件、内部構造を明らかにする。3) 高速イオン励起不安定性の強い励起に伴い出現するバースト的振幅変動、モード周波数の高速掃引、周波数スペクトル分離等の非線形現象と高速イオンの異常輸送・損失との関連を明らかにする。

## 3. 研究の方法

LHD において低磁場条件 ( $B_f < 1$  T) の下、比較的密度の高い NB 入射加熱プラズマにおいて励起される TAE を対象に本研究を実施した。本研究においては、NB 入射高速イオンは、背景プラズマの加熱に加えて、TAE 励起の自由エネルギー源としての役割を持つ。高速イオンの損失は、エネルギーとピッチ角を同時に測定できる時間応答に優れたシンチレータに基づく磁気スペクトロメータ型損失高速イオンプローブを用いた。また、高速イオンの径方向輸送については、接線視野を持つ荷電交換高速中性粒子分析器、所謂 NPA を用いた。TAE の空間分布情報を実験的に得る目的で、高時間応答  $H\alpha$  光揺動検出器アレイを導入した。 $H\alpha$  光揺動は電子密度揺動を反映していると考えてよく、それ故に、 $H\alpha$  光アレイを用いてその揺動成分を精査することにより、AE に起因した電子密度揺動の内部構造の情報を抽出した。同実験観測と理論計算からの比較検討は、米国オークリッジ国立研究所の Donald A. Spong 博士の協力に

より導入したシアアルヴェン波を取り扱う理想 MHD 安定性解析コード AE3D を用いて行った。

#### 4. 研究成果

LHD の NB 入射加熱プラズマにおいて典型的に観測される TAE の磁気スペクトログラムを放電波形と併せて図 1 に示す。大半径方向外側に設置されたシンチレータ型損失高速イオンプローブの計測部の高速化を進めた結果、NB 入射加熱時に TAE 周波数と同じ周波数で振動する損失高速イオン束の検出に成功した (図 2)。このことから、LHD の NB 入射加熱時に励起される TAE は、Co-方向に周回する高速イオンにより励起されていることが推察される。

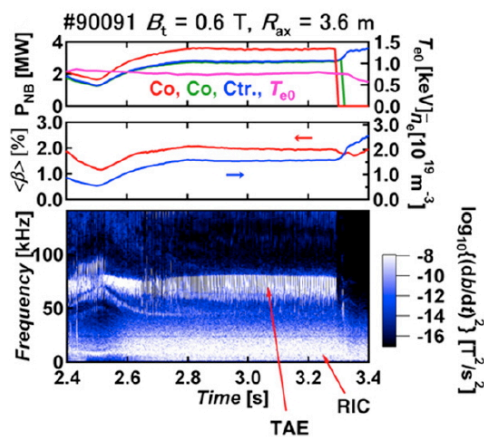


図 1. LHD の NB 入射放電にて典型的に観測されるトロイダルアルヴェン固有モード (TAE)。

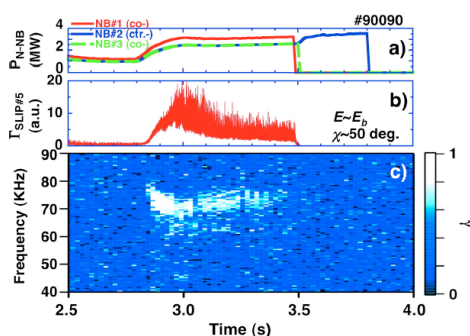


図 2. 損失高速イオン束振動と磁気振動の相互相関スペクトラム。

有限  $\beta$  効果により磁気軸位置が外側へシフトした場合、或いは外寄せ配位の場合、磁気軸がより内側にある場合に比して、磁気揺動振幅に対して損失高速イオン束の増加傾向が顕著になることが明らかになった (図 3)。また、TAE の内部構造の詳細な測定を行うべく、多視線 H $\alpha$  光アレイの計測部の高速化を

進めた結果、内寄せ、外寄せ配位において TAE による電子密度揺動の空間分布情報を引き出すことが出来た。同実験観測とシアアルヴェン波を取り扱う理想 MHD 安定性コード AE3D から推定される TAE による密度揺動との比較を行った結果、実験結果は概ね再現され、配位に関わらず、比較的揺動分布は径方向に大きな広がりを持つことが明らかになった。ただし、外寄せ配位の方が内寄せ配位に比して磁気シアが弱いため、TAE の空間的な広がりはより大きい。

また、幾つかの異なる  $\beta$  値の配位を対象に、TAE の空間分布や時間的に変動する TAE の振幅を考慮し、1) SLIP に到達する損失高速イオンのエネルギー・ピッチ角、2) 損失高速イオン束と磁気揺動振幅の相関、及び 3) 同相関の磁気軸位置依存性データの再現を試みている。その結果、以上の 3 項目において、コード計算は実験結果と良い一致を示した。このことは、将来の核融合炉における  $\alpha$  粒子の振る舞いを予測する上で、意義深く、有益な結果であると言える。

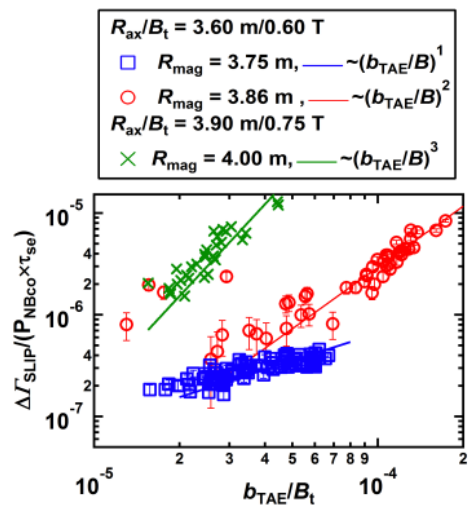


図 3. 磁気揺動振幅と損失高速イオン束との関係。

以上の成果は、次に示す国内学会、国際学会で報告を行うとともに、詳細については学術論文に纏めている。

#### 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 10 件)

- ① K. Toi, K. Ogawa, M. Isobe et al., Plasma Phys. Control. Fusion, Vol. 53, 2011, 024008.
- ② M. Isobe et al., Fast-Particle Diagnostics on LHD, Fusion Science and Technology, Vol.

- 58, 2010, pp.426-435.
- ③ M. Isobe et al., Effect of Energetic-Ion Driven MHD Instabilities on Energetic-Ion Transport in Compact Helical System and Large Helical Device, Contrib. Plasma Phys., Vol. 50, 2010, pp.540-545.
  - ④ K. Ogawa, M. Isobe et al., Observation of energetic-ion losses induced by various MHD instabilities in the Large Helical Device (LHD), Nuclear Fusion, Vol. 50, 2010, 084005.
  - ⑤ K. Toi, M. Isobe et al., Overview of Studies on Energetic-Ion-Driven MHD Instabilities in Stellarator/Helical Plasmas and Comparison with Tokamak, Contrib. Plasma Phys., Vol. 50, 2010, pp.493-500.
  - ⑥ K. Toi, M. Isobe et al., MHD Mode Destabilized by Energetic Ions on LHD, Fusion Science and Technology, Vol. 58, 2010, pp.186-193.
  - ⑦ A. Shimizu et al., Potential Measurement with the 6-MeV Heavy Ion Beam Probe of LHD, Plasma and Fusion Research, Vol. 5, 2010, S1015.
  - ⑧ K. Ogawa, M. Isobe, and K. Toi, Installation of Bidirectional Lost Fast-Ion Probe in the Large Helical Device, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8, 2009, pp.655-658.
  - ⑨ K. Ogawa, M. Isobe et al., Observation of Fast Ion Losses Induced by Various MHD Modes Driven by Fast Ions and Bulk Plasma Pressure in the Large Helical Device, Plasma and Fusion Research, Vol. 4, 2009, 033.
  - ⑩ K. Toi, M. Isobe et al., Contribution of the Large Helical Device Plasmas to Alfvén Eigenmode Physics in Toroidal Plasmas, Plasma Science and Technology, Vo. 11, 2009, pp.377-380.

[学会発表] (計 9 件)

- ① K. Ogawa, M. Isobe et al., Beam-ion losses due to magnetic field ripple under various plasma parameter ranges on the Large Helical Device, 21<sup>st</sup> International Toki conference, Toki, Japan, 28, Nov-1, Dec, 2011, **P2-23**.
- ② K. Ogawa, M. Isobe et al., Observation of TAE Induced Convective/Diffusive Losses and Comparison with Orbit Following Model in LHD, Plasma Conference 2011, Ishikawa, Japan, 22-25, Nov., 2011 **23P096-P**.
- ③ K. Ogawa, M. Isobe et al., Magnetic Configuration Effects on TAE Induced Losses and Comparison with Orbit Following Model in LHD, The 12<sup>th</sup> IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, Austin, Texas, the United state, 7-10, Sep., 2011, **I-7**.

- ④ 小川国大、東井和夫、磯部光孝等、LHDにおける周辺部に強く局在化したヘリシテイ誘起アルヴェン固有モードの観測、物理学会第66回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、2011年3月25日~28、**25aGW-12**.
- ⑤ M. Isobe et al., Characteristics of Anomalous Transport and Losses of Energetic Ions Caused by Alfvénic Modes in LHD Plasmas, 23<sup>rd</sup> IAEA Fusion Energy Conference 11-16 October 2010 Daejeon, Korea. **EXW/P7-09**.
- ⑥ K. Ogawa, M. Isobe et al., Fast Ion Losses Induced by Toroidal Alfvén Eigenmode and Resistive Interchange Mode in Various Magnetic Configurations of LHD, European Physical Society Conference, Dublin City University, Ireland, 21-25, Jun., 2010 **P4.153**.
- ⑦ 小川国大、磯部光孝等、LHDにおける高速イオン及びバルクプラズマ圧力駆動MHD不安定性による高速イオン損失の特性、日本物理学会2010年秋季大会、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、2010年9月23日~26日 **26aQJ-3**.
- ⑧ M. Isobe et al., Effect of energetic-ion driven MHD instabilities on energetic-ion transport in Compact Helical System and Large Helical Device, 17<sup>th</sup> International Stellarator/Heliotron Workshop, 12-16 October 2009, Princeton, New Jersey, USA. **I-30** (招待講演)
- ⑨ K. Ogawa, M. Isobe et al., Measurement of Fast-Ion losses Induced by Toroidal Alfvén Eigenmodes in the Large Helical Device, The 11<sup>th</sup> IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, Kyiv, Ukraine, 21-23, Sep., 2009 OT-10.

[図書] (計 1 件)

西野信博、大館暁、磯部光孝等、講座：高速カメラを利用した磁場閉じ込めプラズマ計測「3. 2次元センサーとしての高速カメラ」、Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 86, 2010, pp.543-550.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部 光孝 (ISOBE MITSUTAKA)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：00300731

(2)研究分担者

清水 昭博 (SHIMIZU AKIHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00390633