

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 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22860076

研究課題名（和文）高速イオン励起揺動の励起機構の解明

研究課題名（英文）Investigation of excitation mechanisms of fluctuation driven by fast ions

研究代表者

伊藤隆文（ITO TAKAFUMI）

核融合科学研究所 ヘリカル研究部・COE 研究員

研究者番号：60581056

研究成果の概要（和文）：

核融合プラズマにおいて、高速イオンはプラズマ中に励起される揺動と相互作用して異常輸送あるいは第一壁へ損失する可能性がある。このため、高速イオンと揺動との相関を実験的に調べることが不可欠である。本研究では、高速イオンの速度分布および密度の空間分布を同時に測定できる高速イオン荷電交換分光法（FICXS）を用いて、これを高速化して揺動計測に対応させ、高速イオンによる揺動励起の物理機構の解明に寄与することを目的とする。まず、揺動と特に相互作用しやすい周回粒子に対応するため、トロイダル形状のプラズマを接線方向から観測する視野を整備し、観測結果から高速イオン速度分布および密度分布を評価する計算コードを構築した。計算コードでは計測ビーム分布、原子過程や偏光等の要素を現実的に即して詳細に取り込む改良を行い、120keV/amu 程度までの周回粒子の速度分布および密度分布が再現できた。これにより、不純物線による寄与が十分無視できる波長域において中性化した高速イオンからの荷電交換光の高速な観測に成功した。

研究成果の概要（英文）：

In fusion plasmas, fast ions interacting with fluctuations might cause redistributions and the serious damage to a first wall. Therefore it is required to experimentally investigate the correlation between the fluctuations and the fast ion behavior. For this purpose, we tried to establish high temporal sampling measurement in Fast Ion charge eXchange Spectroscopy (FICXS) which can simultaneously measure fast ion velocity distribution and its spatial profile. On the Large Helical Device (LHD), tangential viewing geometry for the FICXS diagnostic has been arranged to selectively measure passing particles which can easily interact with the fluctuation. A numerical simulation code for the evaluation of fast ion profiles based on the experimental observation has been developed. The velocity distribution and its density profile for the passing particle with energy less than 120keV/amu have been confirmed by the numerical analysis implemented with actual experimental condition, realistic atomic processes and optical effects. Finally, the charge exchange emission from reneutralized fast ions has been successfully observed by the high temporal measurement in the wavelength range where line intensities for the impurities are sufficiently low.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,170,000	351,000	1,521,000
2011 年度	1,060,000	318,000	1,378,000
年度			
年度			
年度			

総計	2,230,000	669,000	2,899,000
----	-----------	---------	-----------

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：核融合，ヘリカル，高速イオン，速度分布，アルヴェン固有モード，荷電交換分光

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合炉において、高速イオン閉じ込めの悪化、すなわち、高速イオンの第一壁方向への輸送は、核反応の低下や炉内機器の損傷を生じる可能性がある。高速イオン輸送の悪化の物理機構は、主に、閉じ込め磁場を生成するコイルの構造によるもの（磁場リップルなど）と、プラズマ中に励起される揺動によるものに大別できる。現在、コイルなどの外部的な要因によるものは、機器の補正により改善が可能とされている。一方で、プラズマ中の揺動、特に高速イオンと相互作用するアルヴェン固有モード（AE）などの電磁流体的（MHD）モードあるいは乱流のような揺動は、プラズマの性能に密接に関係しており、磁場構造のみならずプラズマおよび高速イオン自身の多様なパラメータに対して複雑な応答をする。そのため、高速イオンの速度分布およびその空間分布を詳細に計測し、このような揺動との相関あるいは物理機構を明らかにする必要がある。

(2) これまで、揺動については磁気プローブを初めとした信頼性の高い計測法により古くから研究がなされてきた。一方で、高速イオンの速度分布およびその空間分布の同時計測は、主に多チャンネル化された中性粒子分析器（NPA）などにより行われてきたが、速度空間および実空間における視野および分解能を十分に得るためには設備が複雑で高価になる、中性化した高速イオンが検出器に到達するまでの間の複雑な原子過程を評価しなければならない、などの問題点がある。これに対し、大型ヘリカル装置において開発が進められている、ビームプローブ分光法（FICXS）は、空間的な多チャンネル化が容易であり、速度空間においても比較的広い視野が見込める。また、計測ビームによる荷電交換光を用いて速度分布を評価するため、視線とビーム軌跡の交差点という非常に局所的な計測点となる利点がある。

このように、本計測法を確立・発展させることが、プラズマ中の各種揺動と高速イオン挙動の相関を明らかにする上で重要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では既に大型ヘリカル装置（LHD）に設置されている光学系を用いることで、高速イオンの速度分布関数の空間分布と密度分布が得られる高速イオン荷電交換分光（FICXS）計測を確立し、高速サンプリングに対応した機器を増設することで各種揺動と高速イオンの相互作用性の直接計測を目指す。これにより、高速イオンによるプラズマ中のモードの不安定化機構の解明に寄与することを最終的な目標とする。

3. 研究の方法

本研究を遂行するため、要素的には次の3つの項目を順次達成する必要がある。すなわち、荷電交換光評価のための計算コードの構築、揺動検出のための計測機器の整備、そしてこれらを用いた、特にAEや乱流などを対象にした実験解析法の確立である。

(1) FICXS計測は、高速イオンと計測ビームとの荷電交換反応によって生じる放射光（ $H\alpha$ 線）のドップラーシフトとその強度から、高速イオン速度と密度を識別する。この放射光をFICX成分と称する。FICX成分は可視光領域の不純物線に比べて非常に小さく、その現れ方も速度分布を反映しているために明確なピークを持たない。そのため、FICX成分の観測値から高速イオン速度分布を精度良く評価するためには数値計算との比較が必須となる。研究の初期から中期段階にかけて、高速イオン速度分布とその密度の絶対量を評価するための計算コードの構築を行う。

(2) FICXS計測では、通常、CCDカメラによってFICX成分の空間一波長の2次元分布をイメージとして観測している。しかし、そのサンプリング周波数は高々0.2kHz程度であり、数十kHz以上の領域にあるAEなどの揺動との相関を調べるには不十分である。そこで、(1)の数値計算によって不純物線等の不要な成分が十分少ないと確かめられた波長域におけるFICX成分を光電子増倍管（PMT）によって高速に観測することを試みる。この際、特定波長に注目した観測を行うため、必要に応じてモノクロメータの導入や光学系の分割などの整備を行う。

(3) 高速イオンと揺動との相関は、例えば次のような現象として現れると推測される。

①共鳴により高速イオンが揺動を増幅する

場合、揺動の増大にともなって特定の高速イオン速度成分の減少が観測される。②振幅が増大した揺動によって高速イオンが輸送される場合、空間的な増減は揺動強度分布を反映する（揺動が大きい位置では高速イオン密度の減少が顕著になる）。したがって、磁気プローブ信号による揺動強度およびFICX成分の時間発展の比較が有効である。この際、揺動の時間および空間スケールを考慮する必要があると思われる。局所揺動強度は将来的に同一視線においてビーム放射分光（BES）計測を導入することで比較の対象とすることを予定している。

4. 研究成果

(1) 本研究で注目している高速イオンは、AE と相互作用しやすいトロイダル方向の速度成分が支配的な周回粒子と呼ばれるものである。そこで、同方向の高速イオン速度に対する分解能を向上させるとともに、高いS/N比で観測を行うため、接線方向の視野を新たに整備した。これにより、120keV/amu程度までの速度を持つ高速イオン密度の観測に成功した。また、高速イオン速度分布を評価するため、計算コードを構築し理論との比較を行った。本計算コードは実際の計測ビーム分布や原子過程・偏光等の効果の詳細に取り込むことにより、FICX成分の絶対量（光子数）を見積もることができる。これにより、不純物線等の影響の十分少ない波長域を選定することができた。

(2)

一方、同視野にPMT検出器を増設し、高速サンプリング計測を行った。まず、荷電交換反応率が比較的高いエネルギー帯（35～65keV）に対応する波長帯（662～664nm）を選び観測を行った。これにより、中性粒子ビーム入射（NBI）加熱およびバルク密度の上昇とともに増加する荷電交換光の観測に成功した。このとき、AEなどの高速イオンと相互作用する揺動が励起されているにも関わらず、その相関は不鮮明であった。これは、AEと相互作用しやすい高速イオンのエネルギーが高く（例えば入射エネルギー180keV程度）、用いた計測ビーム（40keV）による荷電交換半能率が低くS/N比が十分でないことが要因の一つと考えられる。今後、S/N比向上のため、光学系の見直しやアバランシェフォトダイオード（APD）のような量子効率の良い検出器への換装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4件）

(1) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他3名), "High Speed Detection of Doppler-shifted Ha Lights from Charge Exchange Interaction for Measurement of Fast Ion Distribution", Annual report of National Institute for Fusion Science 2010-2011, 査読無し, 2011, p138, URL: <http://www.nifs.ac.jp/report/annrep11/pdf/138.pdf>.

(2) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他4名), "Fast Ion Charge Exchange Spectroscopy on Tangential Viewing Geometry in LHD", Annual report of National Institute for Fusion Science 2010-2011, 査読無し, 2011, p80, URL: <http://www.nifs.ac.jp/report/annrep11/pdf/080.pdf>.

(3) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他4名), "The diagnostic technique for fast-ions spatial distribution measurement via charge exchange spectroscopy on LHD", Proceeding of JSPS-CAS Core University Program Seminar on Production and Control of High Performance Plasmas with Advanced Plasma Heating and Diagnostic Systems, 査読無し, Research report NIFS-PROC series Vol. 84, 2011, pp284~293.

(4) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他10名), "Fast ion charge exchange spectroscopy adapted for tangential viewing geometry in LHD", Review of Scientific Instruments, 査読有り, Vol. 81, 2010, pp10D327-1~10D327-4, DOI:10.1063/1.3502331.

〔学会発表〕（計7件）

(1) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他8名), "Development and application of active charge exchange spectroscopy for study of fast ion distribution and transport on LHD", 18th International Stellarator/Heliotron Workshop & 10th Asia Pacific Plasma Theory Conference, P2.5, Feb. 1 2012, South Durras, New South Wales, Australia.

(2) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他8名), "Experimental evaluation of fast ion confinement by fast ion charge exchange spectroscopy in LHD", Plasma Conference 2011, 23D10, 2011年11月23日, 石川県金沢市。

(3) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他8名), "Fast ion charge exchange spectroscopy for high energy ions produced by N-NB", 12th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, P1.13, Sep. 8 2011, Austin, Texas, USA.

(4) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他4名), "The

diagnostic technique for fast-ions spatial distribution measurement via charge exchange spectroscopy on LHD”, JSPS-CAS Core University Program Seminar on Production and Control of High Performance Plasmas with Advanced Plasma Heating and Diagnostic Systems, Nov. 3 2010, Guilin city, Guangxi, PRC.

(5) M. Osakabe, T. Ito, R. Seki (他 13 名), “Evaluation of Fast-ion Confinement with Three dimensional Magnetic Field Configurations on LHD”, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, EXW/P7-22, Oct. 15 2010, Daejeon, ROK.

(6) 伊藤隆文, 長壁正樹, 居田克己 (他 10 名), “LHD における高速イオン荷電交換分光による高速イオン分布の観測”, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 11A-08p, 2010 年 6 月 11 日, 岐阜県高山市。

(7) T. Ito, M. Osakabe, K. Ida (他 10 名), “Fast ion charge exchange spectroscopy adapted for tangential viewing geometry in LHD”, 18th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, B35, May 17 2010, Wildwood, New Jersey, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 隆文 (ITO TAKAFUMI)

核融合科学研究所 へリカル研究部・COE
研究員

研究者番号 : 60581056

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :