

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21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：16H04620

研究課題名(和文) マイクロ波協同トムソン散乱計測の高性能化によるイオン閉じ込めと損失機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of ion confinement and its loss mechanism by the microwave collective Thomson scattering

研究代表者

田中 謙治 (Tanaka, Kenji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：50260047

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)：ジャイロトロンを用いた協同散乱計測を用いた高速イオン計測の開発と、損失機構の解明を目指したCO₂レーザー計測の開発に取り組んだ。必要に応じて低い周波数(77GHz)と高い周波数(154GHz)を使い分けることにした。154GHzは屈折の効果が小さく高い密度での計測に適している。154GHzでは1.375Tで高速イオンの信号を取得できたが、プラズマのパフォーマンスの良い2.75Tでは電子共鳴放射光の強度が散乱光強度よりも強く、優位な信号を得ることができなかった。一方、77GHzを用いて2.75Tにおいて、屈折の影響が小さく高速イオンの閉じ込め時間が長い、低い密度領域で高速イオンの信号を取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合反応で生成される高速イオンの閉じ込めの評価と、その損失機構の解明は核融合研究において重要である。核融合炉でも適用できる直接的な高速イオンの計測手法はマイクロ波を用いた協同散乱しかない。77GHzと154GHzの両者を用いることによりそれぞれの周波数における適用可能領域が明らかになった。高い周波数(154GHz)では信号強度が減少するとともに基本、または第二電子共鳴放射光が存在する場合、非常に強いノイズ源となり計測が困難になることが分かった。精度の良い高速イオン計測のためには、できるだけ低い周波数を用いて、屈折の効果を最小化する実験を行うのが適切であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have developed microwave collective Thomson scattering (CTS) and CO₂ laser diagnostics for the understanding of fast ion confinement and its loss mechanism. For CTS, we tried 154GHz gyrotron, which is suitable for high density operation due to the weak refraction effects. We obtained fast ion signal at 1.375T but we could not obtain at 2.75T due to the strong electron cyclotron emission. For the investigation, higher field is preferable for the better fast ion confinement. Then we succeeded to get fast ion signal using 77GHz gyrotron CTS at 2.75T. We made comparison experiments at different magnetic configuration. Then, 77GHz CTS showed clear difference of fast ion signal. Stronger (weaker) fast ion signal was obtained at smaller (larger) magnetic ripple configuration. CO₂ laser diagnostics were also prepared. The rapid reduction of the turbulence signal was found. This is due to transient formation of radial electric sheath due to the loss of fast ion.

研究分野：核融合学

キーワード：高速イオン トムソン散乱 協同トムソン散乱 核融合反応 ヘリカル 磁気リップル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合研究において D (重水素) T (三重水素) 核融合反応で生成された高速イオン (He^{2+} アルファ粒子) の閉じ込め性能と損失機構の解明は重要な研究課題である。現在の稼働中の実験装置では三重水素を用いた実験を実施することができず、DT 核融合反応は起こすことはできないため、その代わりに高速に加速した D または H (軽水素) の中性粒子ビームを入射し、それがイオン化した高速イオンの閉じ込めと損失機構を評価する。これらの模擬実験により、将来の核融合炉におけるアルファ粒子の閉じ込めと損失を支配する物理機構を明らかにすることが必要である。中性粒子ビームで入射された高速イオンは磁気面対象でなく、極めて強い非対称性を持つため、空間的な局所計測で、且つ、速度成分を分離した計測が必要であった。

2. 研究の目的

(1) マイクロ波を用いた協同トムソン散乱 (Microwave collective Thomson scattering; M-CTS) は将来の核融合炉においても適用可能であり、これらの空間、速度分解能を有する計測手法である。これまでの研究で協同トムソン散乱による高速イオンの初期データを取得したが、77GHz のジャイラトロンを用いていたため、密度が高い領域において屈折の効果により散乱体積の位置を精度よく決定することができなかった。本研究では高密度領域における計測の開発手法として高い周波数 (154GHz) のジャイラトロンを用いて計測することを提案した。

(2) 高速イオンによる信号の取得を示すだけでなく、閉じ込め機構と損失機構を明らかにすることを目的とした実験を行うことを提案した。損失機構の解明については、 CO_2 レーザー位相コントラストイメージング (CO_2 laser phase contrast imaging; CO_2 -PCI) および、 CO_2 レーザーヘテロダイン干渉計 (CO_2 laser heterodyne interferometer; CO_2 -HI) を用いた不安定性の計測にも取り組むことにした。

3. 研究の方法

(1) 研究は高速イオンの研究に必要な中性粒子ビーム加熱を備えている核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (Large Helical Device; LHD) で行うことにした。LHD では、平成 29 年度 3 月より重水素実験を開始し、重水素の高速イオンと、熱化した重水素イオンの間の核融合反応により中性子が生じる。実験室内に検出器を設置している CO_2 -PCI、 CO_2 -HI は中性子、および、ガンマ線から検出器の損傷を防ぐためにボロン添加のポリエチレンと鉛で検出器周りをシールドした。

(2) 本研究期間中において、初年度の平成 28 年 3 月から平成 29 年度の 1 月にかけては重水素実験のための準備を行い、実験データは平成 29 年 2 月から平成 29 年 8 月の実験 (19 サイクル LHD 実験) および、平成 30 年 10 月から平成 31 年 2 月の実験 (20 サイクル LHD 実験) で取得した。

19 サイクルの実験では主に 154GHz ジャイラトロンを用いた実験を行い、初めて計測を試みた 154GHz M-CTS の計測開発に注力した。また、中性子、ガンマ線照射環境下でシールドを設置することにより、 CO_2 -PCI、 CO_2 -HI が動作することを確認した。19 サイクル実験終了後ジャイラトロンのアライメントの調整を行い、M-CTS の計測位置の精度を向上させた。

20 サイクルの実験では 77GHz の M-CTS を用いた高速イオン閉じ込めの物理実験と、損失機構の解明について CO_2 -PCI、 CO_2 -HI を用いて高速イオン損失時の乱流揺動の応答についての実験データを取得した。

4. 研究成果

(1) 19 サイクル実験では屈折の効果の小さい 154GHz のジャイラトロンを用いた計測に取り組んだ。図 1 に 154GHz の光学系のレイアウトを示す。散乱体積は図 1 での黒塗りの部分でプラズマのほぼ中心に設定した。赤線で示すのが基本共鳴磁場強度の等高線で高磁場運転時には 2.75T、低磁場運転時には 1.375T を示す。プラズマの閉じ込めは磁場強度が強いほど良く、温度、密度も高くなるため M-CTS の計測に適する。過去の実験では 77GHz を用いた場合、屈折の効果が大きく、散乱体積の確定が困難であったので、屈折の影響が小さい 154GHz のジャイラトロンを用いた協同トムソン散乱の実験に取り組んだ。図 2 に計測システムを示す。散乱光は入射光の散乱していない迷光成分を除去するために 60dB 減衰するノッチフィルターで迷光成分を除去し、その後、151GHz のローカル発振器を用いて 154±3GHz の散乱

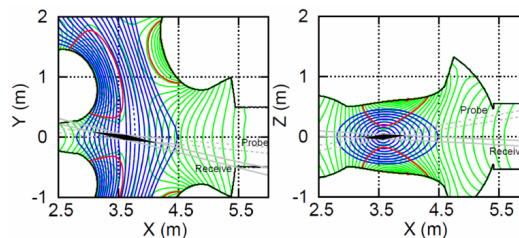


図 1 M-CTS の散乱光学系の上面図と側面図
緑線は磁場の等高線、青線は磁気面、灰色実線は入射ビーム、灰色点線は散乱ビーム、黒塗りつぶし部分が散乱体積を示す。赤線は基本共鳴磁場強度 (1.375T または 2.75T)

信号を 0-6GHz の散乱信号に周波数帯域を変換して計測した。検出システムはアナログ検出システムとデジタル検出システムの 2 系統で同時計測した。アナログ検出システムでは 100~200MHz の帯域を持つ 32 チャンネルのバンドパスフィルタを用いて 0-6GHz の散乱信号を周波数方向に 32 分割して取得した。出力は 100kHz の ADC でおよそ 10 秒間信号を取得し全放電時間を通じて信号の取得が可能である。一方でデジタル検出系ではミキサーの出力を増幅後直接 10GHz サンプルの高速 ADC で信号を取得した。デジタル検出システムでは 0-6GHz の帯域をデジタルフーリエ変換により連続的なスペクトルとして取得できる。アナログ検出システムに比べて高い周波数分解能で散乱信号を取得できるが、メモリの制限で最大 60msec しか信号を取得できない。よって、放電中に必要なタイミングにトリガーを設定し信号を取得した。

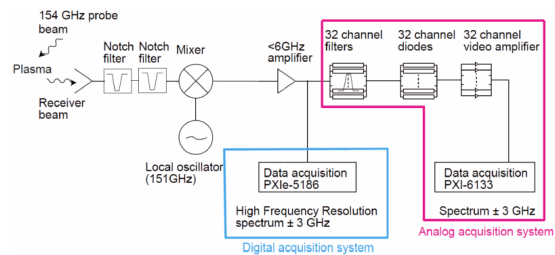


図 2 M-CTS 計測システム

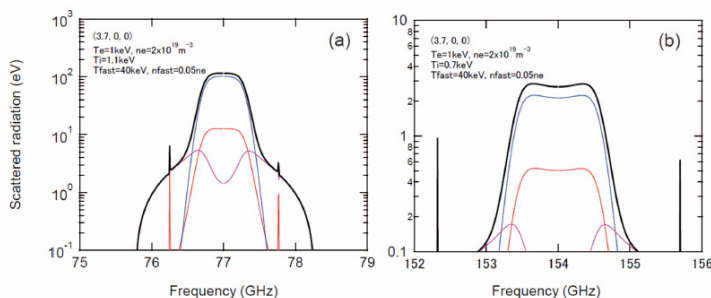


図 3 協同散乱スペクトル (a) 77GHz, (b) 154GHz
青線はバルクイオン、オレンジは電子、紫は高速イオンの成分

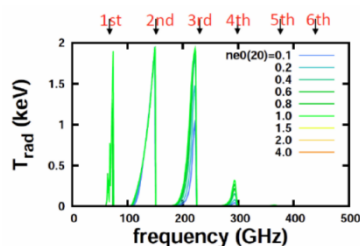


図 4 電子共鳴放射強度のスペクトル

(2) 協同散乱スペクトルは入射する電磁波の周波数により、散乱光強度とスペクトル形状が大きく変化する。図 3 に同じプラズマパラメータ (電子密度 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, バルク電子温度 1keV, バルクイオン温度 0.7keV, 高速イオン 40keV, 高速イオン密度 $1 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$) における 77GHz と 154GHz の協同散乱スペクトルを示す。図 3 に示すように 154GHz の散乱スペクトルは 77GHz の散乱スペクトルより、強度は一桁以上小さくなり、また、高速イオンによるスペクトルの広がりも小さくなる。また、協同散乱の主要なノイズ源となる電子サイクロトロン共鳴放射光 (Electron Cyclotron Emission ;ECE) は図 4 に示すように第 3 高調波 ECE までは強い信号強度を持つ。19 サイクル実験において高い温度密度を達成できる 2.75T の高磁場運転で 154GHz の M-CTS の計測を行ったが、有意な信号を得ることができなかった。これは、2.75T では 154GHz が第二高調波 ECE となり、それに対して十分強い散乱光強度が得られなかったためだと考えられる。そこで、磁場を 1.375T にして 154GHz の共同散乱計測を行った。1.375T では 154GHz は第四共鳴 ECE となり ECE ノイズは格段に小さくなる。その結果解析可能である有意な信号を得ることができた。

図 5 に 1.375T での 154GHz M-CTS の協同散乱信号の時間変化を示す。散乱信号と ECE 放射光を区別するためにジャイロトロンを発振を周期的に ON-OFF の運転をした。図 5 に示すようにジャイロトロン OFF 時では ECE 放射光はほとんど計測されていない。図 5 における実験では一定密度において受信アンテナをスキャンすることにより、散乱体積の位置を確定した。図 5 に示すように $t=4.45\text{sec}$ で散乱信号が最大となっており、この時に入射ビームと受信アンテナの交差部 (図 1 の黒塗りの部分) が最大になったことを意味する。 $t=4.76\text{sec}$ においてインパルス的な信号が出現しているが、これはジャイロトロン OFF 時に 154GHz 以外の寄生発振が出現したためだと考えられる。

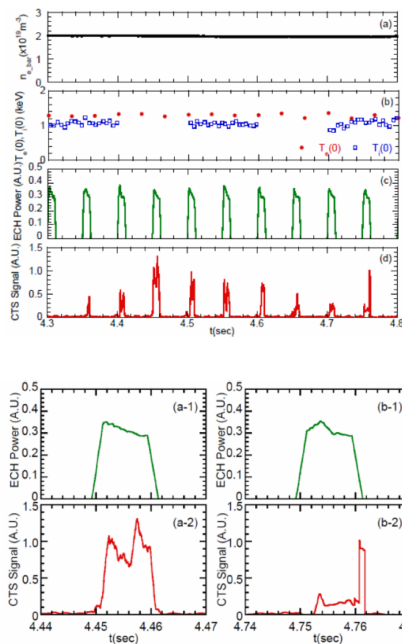


図 5 154GHz を用いた 1.375 運転における協同散乱信号

図 6 に同じプラズマパラメータ（電子密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, バルク電子温度 1keV, バルクイオン温度 1keV）における軽水素放電と重水素放電のアナログ検出システムで計測した協同散乱スペクトルの比較を示す。協同散乱の理論によれば重水素よりも軽水素のほうがスペクトル幅が広がることが示されており、図 6 において理論の予測通り、重水素プラズマでより広がった協同散乱スペクトルを取得した。また、図 6 において実線は高速イオンを含まないバルクイオンの成分のみで計算したスペクトルであるが、重水素、軽水素ともに計測したスペクトルは計算したスペクトルより広がっており、この部分が高速イオンによるスペクトル成分だと考えられる。

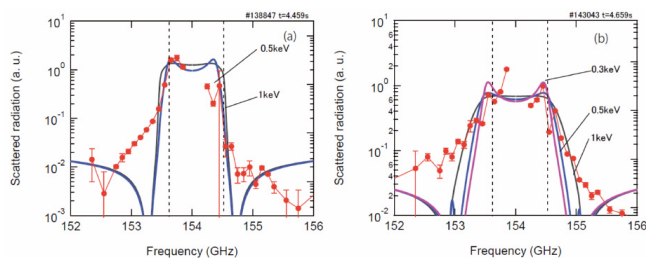


図 6 154GHz ジャイロトロンを用いた協同散乱スペクトル (a) 重水素、(b) 軽水素 ●は計測値、実線は計算値

以上の結果より 154GHz を用いた M-CTS の計測についてはバルクイオンと、高速イオンの計測の検証ができた。しかしながら、プラズマの温度密度が高い 2.75T での高磁場運転では十分な信号を得ることができなかった。よって、高速イオンの閉じ込めに関する研究は、より高い、温度密度での計測を行うために 77GHz を用いて 2.75T で実験を行い、屈折の効果の小さい低い密度（線平均電子密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 程度）での実験を 20 サイクルの実験で行うことにした。

(3) 77GHz の計測システムは図 1 と同様の光学系で図 2 のシステムにおいてミキサのローカル発振器を 74GHz に変更し、77GHz+3GHz の散乱信号を 0-6GHz のスペクトルとして計測した。

77GHz の計測システムの精度を評価するために協同散乱スペクトルからバルク電子温度とバルクイオン温度を決定して、電子温度は YAG レーザ非協同トムソン散乱計測 (incoherent Thomson scattering ; TS)、イオン温度は荷電交換分光 (Charge Exchange spectroscopy ; CXS) による計測値と比較した。図 7 にその結果を示す。図 7 に示すようにバルクイオン温度については M-CTS と CXS は良い一致を示したが、バルク電子温度については TS と 4keV 付近で大きな開きがある。ただし、TS は常に稼働しているため協同散乱スペクトルにおいてバルク電子温度は TS の計測値を用いることによりスペクトルの fitting parameter の数を減らして fitting の精度を上げることにした。

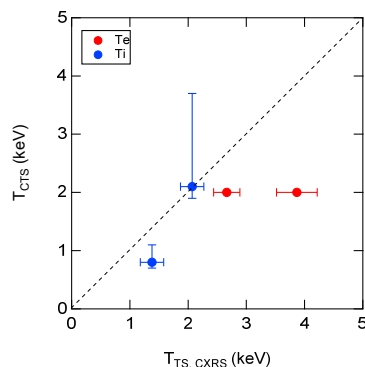


図 7 77GHz 協同トムソン散乱と他計測の比較

20 サイクルの実験では高速イオン閉じ込めの磁場配位依存性の実験データを取得した。ヘリカル系装置では磁場配位の最適化が将来のヘリカル核融合炉の設計の最適化に必要である。20 サイクルの実験では高速イオン閉じ込めに大きな影響を与える磁場強度の変化の高次の成分であるヘリカル磁気リップルが異なる二つの磁場配位（磁気軸位置 (Rax) が 3.6m と 3.9m) において協同散乱スペクトルの比較を行った。Rax=3.6m は Rax=3.9m よりもヘリカル磁気リップルが小さく理論的にバルクイオン、高速イオンともに閉じ込め性能が良いことが予測されている。図 8 にデジタル検出システムで取得した散乱スペクトルの比較を示す。76 および 78GHz 付近が高速イオンの成分に対応しそれより 77GHz に近い成分がバルク成分に対応する。77GHz+0.5GHz のバルク成分では Rax=3.6m の方がスペクトルの幅が広く、バルクイオン温度が高いことを示している。76 および 78GHz 付近が高速イオンの成分も Rax=3.6m の方がスペクトル強度が強く閉じ込められた高速イオン密度が高いことを示している。これらは理論的な予測と定性的に一致する。また、スペクトル形状が Rax=3.9m では特に高速イオン成分で強い非対称性が現れており、Rax=3.9m の配位においては高速イオンの速度成分により閉じ込め性能が異なることを示唆している。

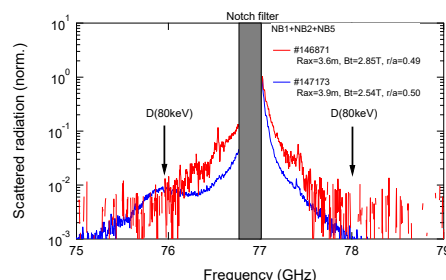


図 8 77GHz を用いて計測した協同散乱スペクトルの磁場配位依存性 赤 Rax=3.6m, 青 Rax=3.9m

CO₂-PCI, CO₂-HI を用いて高速イオンの損失に寄与する不安定性の計測に取り組んだ。現在のところ高速イオン励起による不安定性については明確な信号を確認できていない。しかし、CO₂-PCI を用いることにより、高速イオンが不安定性により損失したとき、図 9 に示すように過渡的に CO₂-PCI で計測した乱流揺動が大きく減少することが分かった。これは、高速イオ

ンが損失することにより、過渡的に大きな小半径方向の電場が形成され、それにより乱流揺動が安定化されたことを示唆している。よって、CO₂-PCIを用いて乱流揺動の変化を計測することにより高速イオンの損失を間接的にモニターできることが分かった。20 サイクルの実験では 77GHz M-CTS と CO₂-PCI の同時計測ができなかったが、今後の実験で同時計測することにより、乱流揺動の変化と高速イオンの損失の相関を明確にすることを検討している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① T. Saito, K. Tanaka, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma (他 5 名), (査読あり), "Oscillation Characteristics of a High Power 300 GHz Band Pulsed Gyrotron for Use in Collective Thomson Scattering Diagnostics", Plasma and Fusion Research: Regular Articles, Volume 14, 1406104 (2019)
- ② T. Saito, K. Tanaka, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma (他 6 名), (査読あり), "Development of 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in the Large Helical Device", Plasma Fusion Research Rapid communication, 2017 Volume 12 Pages 1206013 <https://doi.org/10.1585/pfr.12.1206013>
- ③ C. A. Michael, K. Tanaka (他 9 名), (査読あり), "Role of Helium-Hydrogen ratio on energetic interchange mode behaviour and its effect on ion temperature and micro-turbulence in LHD", Nucl. Fusion 58 (2018) 046013, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aaace0>
- ④ K. Tanaka, (他 23 名), (査読あり), "Collisionality dependence and ion species effects on heat transport in He and H plasma, and the role of ion scale turbulence in LHD", Nucl. Fusion 57 (2017) 116005 P.P. 1-15, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa79c6>
- ⑤ K. Tanaka, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Saito, D. Moseev and I. Abramovic, (査読あり) "154 GHz collective Thomson scattering in LHD", Journal of Instrumentation 13 C01010 (2017), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/01/C01010>
- ⑥ S. Kubo, M. Nishiura, K. Tanaka, T. Shimozuma (他 7 名), (査読あり), "Scattering volume in the collective Thomson scattering measurement using high power gyrotron in the LHD", Journal of Instrumentation, 11 C06005, (2016) [doi:10.1088/1748-0221/11/06/C06005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/06/C06005)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 西浦正樹, 久保伸, 田中謙治, 飯澤萌, 釧持尚輝, 下妻隆, 高橋裕己, 斉藤輝雄, "LHD における協同トムソン散乱計測により得られた散乱スペクトルの評価", 日本物理学会, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日
- ② 飯澤萌, 久保伸, 西浦正樹, 田中謙治, 下妻隆, LHD 実験グループ, "Collective Thomson Scattering Diagnostics and spectrum analysis in LHD", 第 35 回プラズマ核融合学会年会, 2018. 12. 3-12. 6 大阪大学吹田キャンパス
- ③ K. Tanaka, M. Nakata, Y. Ohtani, T. Tsujimura, H. Takahashi, M. Yokoyama, F. Warmer and the LHD Experiment Group, "Isotope effects on transport and turbulence in ECRH plasma of LHD", 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Japan, 12-17, November, 2018
- ④ K. Tanaka, (他 28 名) "Isotope effects on confinement and turbulence in ECRH plasma of LHD", 26th IAEA Fusion Energy Conference, Gandhinagar, India, 22-27 October 2018
- ⑤ Shin Kubo, Hiroshi Idei, Teruo Saito, Yoshinori Tatematsu, "Study on a direct detection of EBW by sub-Tera-Hz gyrotron scattering", 26th International Toki Conference, December 5-8, 2017, Toki, Japan
- ⑥ K. Tanaka and LHD experimental group, "Transport study in LHD deuterium experiments", 2017 plasma conference, Himeji, 20-24, November, 2017, Japan
- ⑦ T. Shimozuma, S. Kubo (他 8 名), "Current Status of the LHD ECRH System and Development of Dual-Frequency Gyrotrons", 2017 plasma conference, Himeji, 20-24, November, 2017, Japan
- ⑧ K. Tanaka, (他 23 名), "Isotope effects on transport and turbulence in LHD", The 21st International Stellarator-Heliotron Workshop ISHW2017, Kyoto, Japan, 2-6, October, 2017
- ⑨ K. Tanaka, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Saito, D. Moseev and I. Abramovic, "154 GHz collective Thomson scattering in LHD", 18th International Symposium on Laser Aided Plasma Diagnostics, Prague, Czech Republic 24-28 September 2017
- ⑩ K. Tanaka, (他 23 名), "Improvements of ion energy confinement in helium rich plasma of LHD",

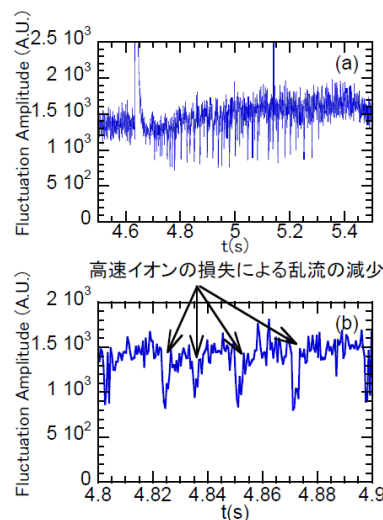


図 9 高速イオンの損失による乱流の過渡的な現象

26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 17-22 October 2016

- ⑪ K. Tanaka, (他 7 名) “Design of tangential viewing phase contrast imaging for turbulence measurements in JT-60SA”, 21st Topical conference on High Temperature Plasma Diagnostics, Madison, Wisconsin U.S.A, 5-6, June, 2016

[その他]

ホームページ等

九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻田中謙治研究室

<http://www.aees.kyushu-u.ac.jp/kenji%20tanaka/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：西浦 正樹

ローマ字氏名：Nishiura Masaki

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：60360616

研究分担者氏名：武村 勇輝

ローマ字氏名：Takemura Yuki

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：助教

研究者番号（8桁）：60705606

研究分担者氏名：久保 伸

ローマ字氏名：Kubo Shin

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：教授

研究者番号（8桁）：80170025

研究分担者氏名：下妻 隆

ローマ字氏名：Shimozuma Takashi

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：教授

研究者番号（8桁）：80270487