

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360385

研究課題名(和文) マイクロ波協同トムソン散乱計測の高精度化と高速イオン物理の新展開

研究課題名(英文) New approach of investigation about fast ion physics by using a newly developed 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・准教授

研究者番号：50260047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：高出力マイクロ波ジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱による高速イオンの速度分布関数の計測手法の開発と、それを用いた高速イオン物理の研究を行った。また、マクスウェル分布に緩和し、熱化したバルクイオン成分も計測対象にした。フィルターバンクシステムによる散乱スペクトルの時間変化計測と高速デジタルによる散乱スペクトルの詳細計測の同時計測を可能にした。複数の視線での計測を行い、最適な計測配位を見出した。高速イオンの速度分布関数について協同トムソン散乱計測による評価値と理論予測の比較を行い定性的な一致を得た。さらにはイオンパーシュタイン波の計測によるイオン比の計測の初期データを取得することに成功した。

研究成果の概要(英文)：This project aims to investigate the fast ion physics in magnetically confined plasma. For this purpose, we developed the microwave collective Thomson scattering (CTS) by using a high power gyrotron. CTS can measure both thermalized bulk ion components and non-thermalized fast ion components.

Two detection systems were developed. One is a filter bank system with slow digitizer (100kHz sample for 80sec) to measure temporal evolution of CTS spectrum, the other is a fast digitizer system (10GHz sample for 80msec) to measure fine structure of CTS spectrum. Scattering geometry was optimized for the precise measurements in order to reduce stray radiation. Measured CTS spectrum was compared with theoretical model calculated by numerical code, then, qualitative agreements were obtained. From the measurements of bulk ion components by using a fast digitizer system, ion density ratio was measured from the modulated spectrum due to ion Bernstein waves.

研究分野：磁場閉じ込め核融合

キーワード：磁場閉じ込め核融合 マイクロ波 協同散乱 トムソン散乱 高速イオン ジャイロトロン

1. 研究開始当初の背景

(1) 将来の重水素(D)、三重水素(T)を用いた磁場閉じ込め核融合炉において DT 核融合で生成される高速アルファ粒子(3.5MeV He²⁺イオン)は持続的な追加熱に用いられるため、その閉じ込め特性を評価することは重要である。また、磁場閉じ込めプラズマにおけるイオン温度、およびイオン密度比の測定は核融合炉の性能を評価するための重要な物理量である。これら高速イオンおよび熱化したバルクイオンの計測に電磁波光源を用いた協同トムソン散乱(Collective Thomson Scattering ; CTS)は強力な計測手法でありその開発が強く望まれている。現在、核融合を目指した磁場閉じ込めプラズマ装置での研究では軽水素、または重水素プラズマでの閉じ込め研究を行っており、核融合反応は起きない。よって、粒子加熱の代わりに中性粒子ビーム(Neutral Beam;NB)を用いた加熱を行い、NBにより入射される50~150keVの高速イオンおよびそれにより高温(~10keV)となった熱化したバルクイオンの閉じ込め研究を行っている。

(2) 平成 21-23 年度の基盤研究 B「高出力マイクロ波光源を用いた協同トムソン散乱による高速イオン計測手法の開発」において加熱用の高出力マイクロ波ジャイラトロンを用いることにより、バルクイオンおよび高速イオン計測の基盤技術を確立した。CTS の計測システムを核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(Large Helical Device;LHD)に設置し、LHDにおけるNB加熱プラズマを計測対象とした。これまでの研究開発の結果、計測精度の向上と、物理解析が残された課題であった。

2. 研究の目的

本研究では計測精度の向上を目指した、マイクロ波散乱光学系の最適化および、検出器システムの開発を行うことを計画した。これを用いて異なる計測視野を用いた計測により異なる散乱成分を計測することにより散乱スペクトルを高精度で計測することを目指した。また、これらの計測結果を数値シミュレーションと比較することにより高速イオンの閉じ込め特性を明らかにすることも目標とした。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に本研究において開発した 77GHz ジャイラトロンを入射光源としたマイクロ波 CTS の検出システムを示す。図 1 に示すように入射した 77GHz からの散乱光をアンテナで受信した後、二段のノッチフィルターで迷光を 120dB 減衰させた。その後 74GHz の局発発振機を用いて 77+/-3GHz の信号を信号処理が容易になる 0-6GHz の周波数に変換して信号を取得した。信号処理は二つの処理系よりなる。一つはフィルターバンクシステムで 100MHz から 200MHz の帯域を持つフィルタで

周波数分割し、32ch で 0-6GHz の信号を計測する。フィルターバンクシステムでは全プラズマ放電時間を通じて散乱スペクトルの時間変化計測が可能である。一方、バルクイオン温度や、バルクイオン密度の情報を含む 77 +/-1GHz 付近の詳細なスペクトル構造を計測するにはフィルターバンクシステムでは周波数分解能が不十分なのでその前段で信号を分岐して 10GHz の高速デジタイザを用いた信号を並行して取得した。ただし、高速デジタイザのメモリの制限により信号の取得時間は 80ms に限定された。図 2 にフィルターバンクと高速デジタイザで取得したスペクトルの比較を示す。スペクトル形状はおよそ一致しており、フィルターバンクのチャンネル間の相対較正が精度良くできていることがわかった。

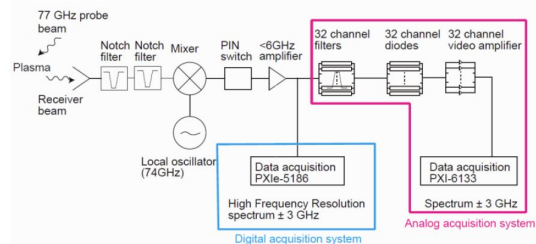


図 1 77GHz CTS システム図

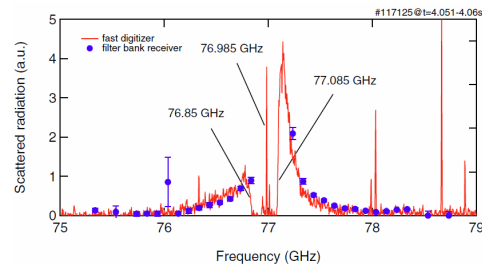


図 2 フィルターバンクと高速デジタイザのスペクトルの比較

(2) 迷光の低減と精度のよい散乱スペクトルの計測のために、いくつかの計測配位をテストしたが最終的には図 3 に示す配位が最も精度良く計測できることがわかった。図 3 の配位では probe beam と receive beam が重なる散乱体積が基本共鳴層の前面にあり、probe beam を吸収するために計測の障害となる迷光を劇的に低減することができた。

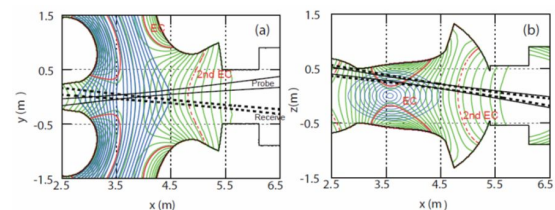


図 3 CTS の入射マイクロ波 (probe; 黒実線) および散乱マイクロ波 (receive ; 黒点線) (a) 上面図、(b) 側面図 EC 基本共鳴層、2nd EC 第二高調波共鳴層

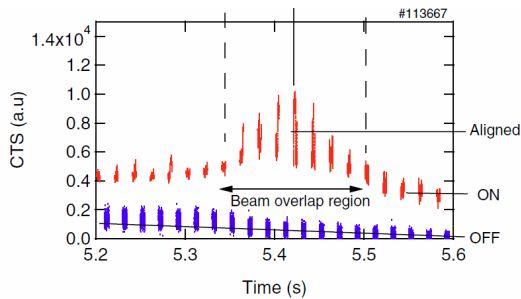


図4 散乱体積スキャンの信号変化
赤; ジャイロトロン ON 時、青; OFF 時

(3) アンテナが正確にアライメントされていることを確認するために、高速モーターを用いたアンテナ駆動機構を開発し1秒程度で散乱体積をスキャンし散乱光の変化を計測することによりアンテナのアライメントを確認した。図4にジャイロトロンを周期的に変調し、アンテナをスキャンしたときの信号変化を示す。ON時の信号の最大値が現れており、このとき散乱体積が最大になったと考えられる。ただし、このときの散乱体積の位置は計算から予測される位置よりも40mm程度(プラズマ小半径の5%程度)ずれている。これはマイクロ波の屈折の効果により散乱体積位置がずれたためだと考えられる。また、散乱体積がゼロとなるアンテナアライメントでも信号はゼロになっておらず、これは散乱体積以外の位置で散乱した散乱光が真空容器内で反射される多重散乱による信号が混入したと考えられる。スペクトル解析では多重散乱の成分を差し引いて解析することが必要であることがわかった。

4. 研究成果

(1) 図3の光学系のレイアウトでCTSの時間変化をフィルターバンクシステムで計測した。図5に示すように電子密度、電子温度、イオン温度は時間的にほぼ一定である。t=5.04sで閉じ込め磁場の接線方向に入射した中性粒子ビーム(N-NB2)を停止するとCTSスペクトルの周波数シフトが中心周波数(図上で0GHz、77GHzに対応) ± 1.5 GHzよりも大きい成分が減少した。図6にt=4.92sec, t=5.22secにおける計測したスペクトルと計算スペクトルを示す。図6において計算スペクトルは高速イオンを含まない熱化したバルクイオンの成分のみで計算した。いずれのタイミングでも計測したスペクトルは中心(Measured 0GHz)に対して非対称となっている。これはプラズマのトロイダル回転、ポロイダル回転によるドップラーシフトによると考えられる。また、図6(a)に示すように t=4.92secにおいて計測周波数の-1GHz以下の成分が高速イオンの寄与がないと仮定して計算したスペクトルと大きくずれる。一方、このずれはt=5.22secでは小さくなっている。両者のタイミングでの違いはN-NB2の有無である。N-NB2が入射されているt=4.92secではN-NB2により入射された高

速イオン成分により-1GHz以下のスペクトル強度が高速イオンを考慮していない計算スペクトルよりも大きくなったと考えられる。よって、t=4.92secにおける計測値と計算値のずれはN-NB2による高速イオン成分によるものだと考えられる。

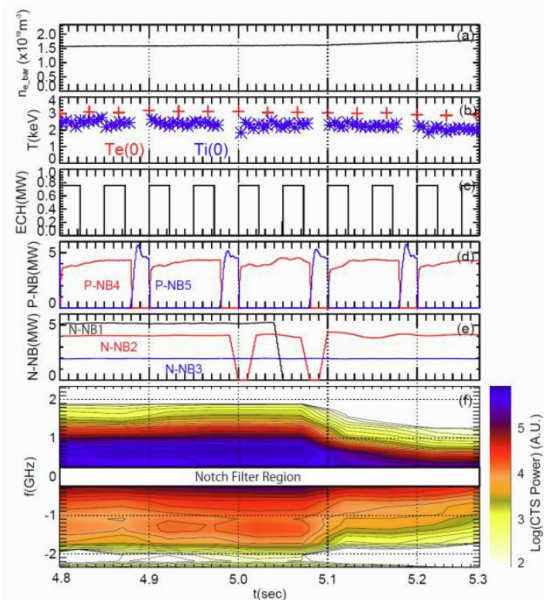


図5 (a)線平均電子密度、(b)中心電子温度 Te、イオン温度 Ti、(c)ECH パワー、(d)垂直入射 NB パワー、(e)接線入射 NB パワー、(f)CTS スペクトルの時間変化。0GHz は 77GHz に対応。

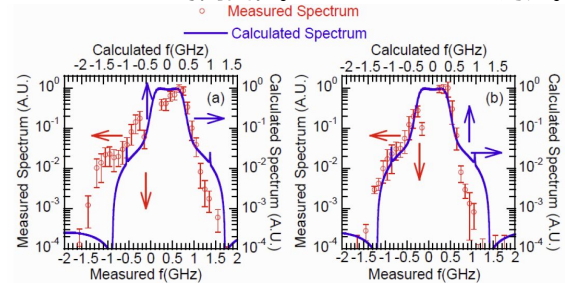


図6 (a) t=4.92sec, (b) t=5.22sec における CTS スペクトル。

(2) 計測したスペクトルを定量的に評価するために MORCH コード(引用文献)による数値シミュレーションとの比較を行った。図7は磁力線に接線方向に入射した中性粒子ビーム(NB2, NB3)と垂直方向に入射した中性粒子ビーム(NB4)の速度分布関数の数値計算結果である。図7においてNB2, NB3は接線入射の方向が逆なため、磁場に並行方向の速度の非対称性は逆になる。一方、NB4は磁場に平行な速度成分は対称な速度成分を持つ。CTSで計測する波数成分を図中に矢印で示す。CTSは図中の矢印への射影成分を計測することになる。図8(a)に測定波数に沿った速度成分を、図8(b)にCTSで計測した速度分布関数を示す。測定した速度成分は計測波数とフィルターバンクの周波数の関係より評価した。図8(a)に示すように計測波数への射影成分は負の速度成分が大きくなる非対称性を示しており、それと同様な非対称性を図8(b)に示すように計測した。MORCH コードは

入射された中性粒子ビームの速度分布関数とプラズマ中での減速過程を高速イオンの軌道損失を考慮したうえで評価している。計測したスペクトル形状は理論予測と類似している。しかし、現在のところ、絶対値較正ができておらず、今後絶対値についても理論予測との比較検証を行う必要がある。

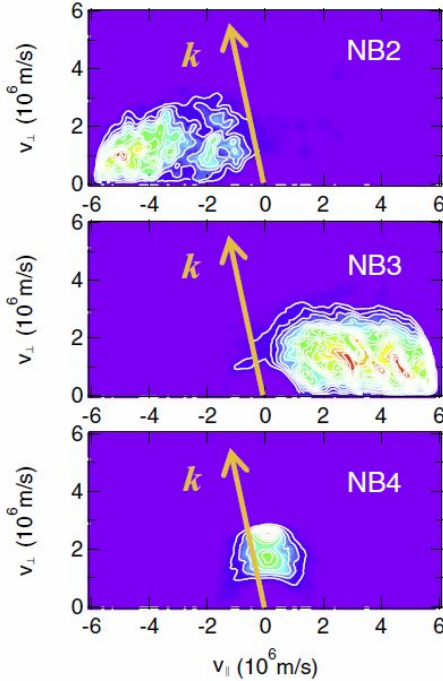


図7 シミュレーションで予測される中性粒子ビームにより入射された高速イオンの速度分布関数。横軸は磁力線に並行方向の速度、縦軸は垂直方向の速度。NB2, NB3; 磁力線の接線方向に入射、NB4; 垂直方向に入射。矢印は CTS で計測する波数成分を示す。

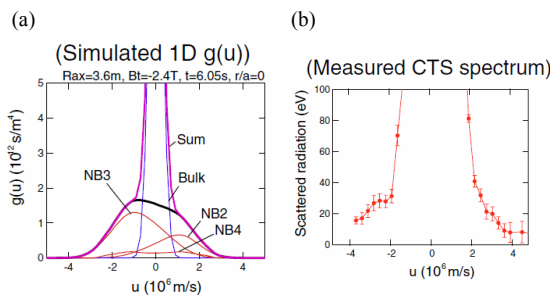


図8 (a) CTS の視線に沿った速度分布関数 (b) 計測した CTS スペクトルから評価した速度分布関数

(3) 図1に示した高速デジタルを用いて熱化したバルクイオンによる散乱スペクトルの詳細計測からイオン密度比を評価した。プラズマ中の磁場に垂直な揺動成分を計測するとイオンバーシュタイン波 (Ion Bernstein Wave; IBW) を計測することができる。図9に磁力線と垂直方向の波数成分を高速デジタルで計測した CTS スペクトルと、それから数度散乱角度をずらしたときの CTS スペクトルを示す。図9(a)に示すように直交する波数成分を計測することにより、IBW

による離散的な周波数ピークを計測した。一方、散乱角度を図9(a)より数度ずらした場合は図9(b)に示すように、このような離散的ピークは観測されなかった。図9(a)においてピーク間の間隔 21MHz は計測位置におけるイオンのサイクロトロン周波数に対応しており、散乱理論の予測と一致する。計測したプラズマは H^+ と He^{2+} の混合プラズマであり、隣り合うピークの強度比より H^+ と He^{2+} のイオン密度を評価できる。今後、散乱理論との詳細な比較を進めイオン密度比の定量的評価を行う。また、 $H\alpha$ と HeI ラインの分光強度から評価したイオン密度比とのクロスチェックを行う予定である。

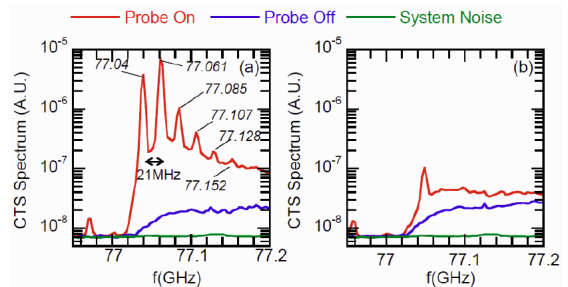


図9 (a) 磁場に垂直方向の散乱スペクトル (b) 散乱角を(a)から数度ずらしたときのスペクトル

(4) 本研究においてマイクロ波 CTS を開発し、計測精度の向上を目指し、計測装置の開発を行った。システムの動作確認では散乱体積が最大となるアンテナアライメントを実験的に確認したが、屈折の影響や多重散乱の影響があることが明らかとなった。これらの影響を取り除くにはより高い周波数のマイクロ波光源を用いて屈折、多重散乱の影響を低減することが有効であると考えられる。フィルターバンクを用いたシステムでは高速イオンが計測できていることを確認し、理論予測との定性的な一致を得た。今後は絶対較正を行い、高速イオンの密度の絶対値について理論予測と比較する。いくつかの計測視線での計測を行ったもの異なる視線による同時計測は行うことができなかった。これは当初フィルターバンクシステムによる計測と高速デジタルによる計測を異なる視線での計測を計画していたが、第二視線の受信系アンテナを整備できなかったこと、および、同じ視線でフィルターバンクと高速デジタルで同時計測するとスペクトル計測のクロスチェックとなり有用であることがわかったためである。

バルクイオンについては高速デジタルを用いた詳細計測を生かして IBW による離散周波数スペクトルの計測に成功しイオン密度比計測のための基盤技術を獲得した。

<引用文献>

R. Seki et al, "Monte-Carlo Study Based on Real Coordinates for Perpendicularly Injected High-Energy Ions in the LHD High-Beta Plasma", Plasma Fusion Res.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- K. Tanaka, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma, T. Saito,(査読有り)” Progress of microwave collective Thomson scattering in LHD”, Journal of Instrumentation, C12001,(2015)1-8,DOI:10.1088/1748-0221/10/12/C12001
- M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma(他9名)(査読有り)” Improved notch filter for microwave plasma diagnostics in 70 GHz range”, Journal of Instrumentation, C12014,(2015)1-6,DOI:10.1088/1748-0221/10/12/C12014
- Y. Yamaguchi, T. Saito, S. Kubo, T. Shimozuma, M. Nishiura, K. Tanaka (他6名),(査読有り)” High-power pulsed gyrotron for 300 GHz-band collective Thomson scattering diagnostics in the Large Helical Device, Nucl. Fusion, 55, (2015), 013002,1-10, DOI: 10.1088/0029-5515/55/1/013002
- M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, R. Seki, S. Ogasawara, T. Shimozuma,” Recent Progress of Collective Thomson Scattering Diagnostic for LHD and Design Study for JT-60SA”, (査読無し)” Proceeding s of The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies”, (2014), Vol. 1, 5p-3, 1-7 <http://fir.u-fukui.ac.jp/IWFIRT/IWFIRT2014/index.html>
- Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, R. Seki, S. Ogasawara, T. Shimozuma, (他9名),(査読有り)” Spectrum response and analysis of 77 GHz band collective Thomson scattering diagnostic for bulk and fast ions in LHD plasmas, Nuclear Fusion,54, (2014), 023006, 1-10,DOI: 10.1088/0029-5515/54/2/023006
- K. Okada, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka ((他7名),(査読有り)” Development of fast steering mirror control system for plasma heating and diagnostics”, Review of Scientific Instruments 85, 11E811 (2014); DOI: 10.1063/1.4891044
- S. Ogasawara, S. Kubo, M. Nishiura, Y. Tatematsu, T. Saito, K. Tanaka, T. Shimozuma, “Optimization of Megawatt 77-GHz Gyrotron operation for Application to Collective Thomson”, (査読有り), Plasma and Fusion Research, Vol. 8 (2013), 2402069, 1-4, DOI: 10.1585/pfr.8.2402069
- M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, T.

Shimozuma, S. Kobayashi, K. Okada, “70 GHz range notch filter for microwave plasma diagnostics”,(査読有り) Plasma Fusion Research, Vol. 8, (2013), 2402027, 1-4,DOI: 10.1585/pfr.8.2402027

M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma (他 1 3 名),(査読無し)” Experimental and simulated fast ion velocity distributions on collective Thomson scattering diagnostic in the Large Helical Device”, Proceeding of Proceeding of 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics 16th International Congress on Plasma Physics,(2012), P1. 070, <http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/pdf/P1.070.pdf>

S. Ogasawara, S. Kubo, M. Nishiura, Y. Tatematsu, T. Saito, K. Tanaka, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi (他8名),(査読有り)” Suppression of Spurious Mode Oscillation in Megawatt 77 GHz Gyrotron as a high quality probe beam source for the Collective Thomson Scattering in LHD, Review of Scientific Instruments, Vol 82 (2012), 10D731m DOI: 10.1063/1.4740257

S. Ogasawara, S. Kubo, M. Nishiura, Y. Tatematsu, T. Saito, K. Tanaka, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, (他4名),(査読有り)” Identification of Spurious Modes of High-Power 77-GHz Gyrotron for Collective Thomson Scattering in LHD”, Plasma and Fusion Research, Vol.7 (2012), 2405061- 1 – 4, DOI: 10.1585/pfr.7.2405061

〔学会発表〕(計 15 件)

K. Tanaka, M. Nishiura, S. Kubo, T. Shimozuma,” Progress of microwave collective Thomson scattering in LHD”, 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2015, Sep. 27th-Oct. 1st, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO, Sapporo, Japan

M. Nishiura, K. Tanaka, S. Kubo, T. Shimozuma,” Improved notch filter for microwave plasma diagnostics in 70 GHz range”, 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2015, Sep. 27th-Oct. 1st, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO, Sapporo, Japan

S. Kubo, M. Nishiura, K. Tanaka, T. Shimozuma,” Scattering volume study in the collective Thomson scattering measurement using high power gyrotron in the LHD”, 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2015, Sep. 27th-Oct. 1st, CHATERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO, Sapporo, Japan

S. Kubo, T. Shimozuma, M. Nishiura, K. Tanaka(他 1 0 名) (招待講演) , Strong

Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Application, 2014, July 24t-July 30th, Nizhyni Novgorod, Russia

西浦正樹、久保伸、田中謙治、下妻隆,” LHD 共同トムソン散乱計測の最近の進展と JT-60SA への適用検討”, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014 年 06 月 20 日 ~ 2014 年 06 月 20 日, つくば国際会議場(茨城県つくば市)

S. Kubo, T.Shimozuma, M. Nishiura, K. Tanaka,” Collective Thomson scattering volume scan experiments using high power gyrotron in the LHD”, High Temperature Plasma Diagnostics 2014, 2014, June 1st~June 5^t, Atlanta, USA

M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma,(招待講演),” Recent Progress of Collective Thomson Scattering Diagnostic for LHD and Design Study for JT-60SA”, The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies, 2014(IW-FIRT2014), 2014, March 15th-7th, University of Fukui, Fukui, Japan

K. Tanaka (招待講演),”Diagnostic development and recent results of transport study in LHD”, KSTAR Conference 2014,2014, Feb.24th – 26th, Gangwon-do, Korea

S. Kubo, T.Shimozuma (他 12 名)” Improvement of 3D multi-ray-tracing Code ”LHD Gauss”, 23rd International Toki Conference (ITC-23),2013, Nov,18th-21st, Ceratopia Toki, Toki, Japan

M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, R. Seki, S. Ogasawara, T. Shimozuma,” Progress on collective Thomson scattering diagnostic in the Large Helical Device”, 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2013, July 1st-2013, July 5th, Espoo, Finland

西浦正樹、久保伸、田中謙治、下妻隆,” LHD 協同トムソン散乱計測の高性能化”, 第 29 回プラズマ・核融合学会年会, 2012 年 11 月 29 日, クローバープラザ 春日市

M. Nishiura, S.Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma(他 1 2 名),” Notch Filter in 70 GHz Range for Microwave Plasma Diagnostics”, 22nd International Toki Conference, 2012, Nov.19-22, Ceratopia Toki, Toki, Japan

M. Nishiura, S.Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma (他 1 3 名)” Experimental and simulated fast ion velocity distributions on collective Thomson scattering diagnostic in the Large Helical Device”, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics 16th International Congress on Plasma Physics, 2012, July 2-6, Stockholm, Sweden

小笠原慎弥、久保伸、西浦正樹、立松芳典、斉藤輝雄、田中謙治、下妻隆,” LHD における協同トムソン散乱計測に向けた ECH 用大電力ジャイロトロン運転パラメータの最適化”, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 29 日, 神戸国際会議場、神戸

西浦正樹、久保伸、田中謙治、關良輔、小笠原慎弥、下妻隆,” ミリ波協同トムソン散乱スペクトル信号の考察”, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 29 日, 神戸国際会議場、神戸

6. 研究組織

(1)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・准教授

研究者番号：50260047

(2)研究分担者

久保 伸 (KUBO SHIN)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：80170025

下妻 隆 (SHIMOZUMA TAKASHI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号：80270487

西浦 正樹 (NISHIURA MASAKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60360616

(3)連携研究者

斉藤 輝雄 (SAITO TERUO)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号：80143163

立松 芳典 (TATEMATSU YOSHINORI)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・准教授

研究者番号：50261756

村上 定義 (MURAKAMI SADAYOSHI)

京都大学・工学系研究科・教授
研究者番号：40249967