

## 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 4 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 年～2011 年

課題番号：21360455

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Development of collective Thomson scattering by using a high power gyrotron for the fast ion measurements

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では磁場閉じ込めプラズマにおける高速イオンの計測手法として高出力マイクロ波光源であるプラズマ加熱用ジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱システムを開発し、大型ヘリカル装置に適用した。協同トムソン散乱システムはイオンの熱的な運動が誘起する電子密度の揺らぎを計測し、計測したスペクトル形状からイオンの温度、及び密度を計測する手法である。本研究期間中に計測システムを完成させ信号の取得に成功した。詳細な物理解析を行うにはさらなる計測精度の向上が必要である。

研究成果の概要（英文）：

The collective Thomson scattering (CTS) system by using a high power gyrotron was developed and installed in Large helical Device in order to measure fast ion distribution of magnetically confined plasmas. The CTS measures electron density fluctuation induced by the thermal ion motions. From the spectrum shape, temperature and density of ions can be estimated. The measurement system was developed, and then CTS signal was obtained from plasmas of the Large Helical Device. However, further developments are necessary to improve the measurement accuracy for the physics study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学

キーワード：協同散乱、バルクイオン、高速イオン、ECE、NBI、磁場閉じ込めプラズマ、LHD

## 1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉では核融合反応により生成された高速イオンが主要な加熱となるので高速イオンの閉じ込め特性を実験的に明らかにすることは重要である。現在のところ、このような高速イオンを局所的に計測する

手法は限られており、特に MeV 単位のエネルギーを持つ高速イオンの局所計測は実現していない。協同トムソン散乱 (Collective Thomson Scattering; CTS) はこのような高エネルギーを局所的に計測できる可能性を持つため、本課題において計測手法の開発に取

り組んだ。また、計測は核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (Large helical Device; LHD) で計測を行うことにした。これは、光源として必要な高出力 (~500kW) のマイクロ波ジャイロトロンがすでに整備されていること、高速イオンの生成、およびイオン加熱を行う中性粒子ビーム加熱(Neutral Beam Injection; NBI)が整備されていること、計測精度のクロスチェックを行うための分光計測が整備されているためである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は高速イオンの温度、密度を計測する手法としてマイクロ波を用いた協同散乱計測手法を開発することである。核融合反応により生成される高速ヘリウムイオン ( $\alpha$  粒子) を模擬するために中性粒子ビーム加熱により入射した高速中性粒子が荷電交換して生成された高速イオンを計測することを目的とする。CTS は高速イオンだけでなくマクスウェル分布に緩和したバルク成分のイオン温度、イオン密度も計測することができる。バルクのイオン温度は分光計測などにより既に確立した手法がある。これら、確立した手法により計測したバルクイオン温度と比較することにより計測精度の評価をすることができる。

## 3. 研究の方法

核融合反応においてアルファ粒子が自己加熱を維持するにはその閉じ込め特性を理解することが極めて重要である。現在の磁場閉じ込め装置ではD-T 反応の実験はできないが、アルファ粒子の代わりに中性粒子ビームやイオンサイクロトロン共鳴により高速イオンを生成し、それを閉じ込めプラズマに入射することにより、アルファ粒子の閉じ込めの模擬実験を行うことができる。図1に電磁波散乱計測の原理を示す。プラズマ中に電磁波を入射し、入射電磁波 (波数  $k_i$ ) 散乱電磁波 (波数  $k_s$ ) プラズマ中の電子密度揺動 (波数  $K$ ) により散乱される。電子密度揺動の波長がデバイ長 ( $\lambda_d$ ) より長い場合 ( $K\lambda_d < 1$ ) は、電子はイオンの運動に追従した協同運動 (collective motion) を起こす。散乱スペ

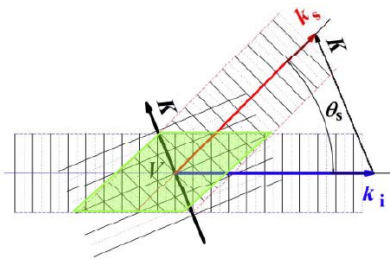


図1 計測領域の入射、散乱、揺動波の関係。

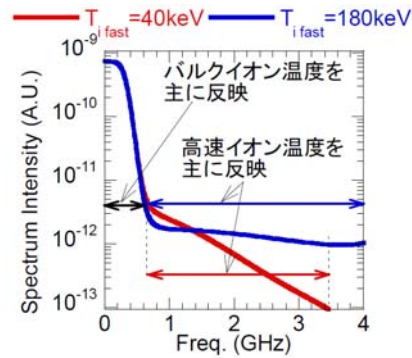


図2 協同トムソン散乱スペクトルの高速イオンエネルギーが40keVと180keVの場合の計算例。計算に使用したプラズマパラメータは  $n_e = n_i = 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ,  $T_e = T_i = 1 \text{keV}$ ,  $n_{\text{fast}} = 1 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$  である。

クトルは電子とイオンの熱運動の情報を与える。マイクロ波領域の波長 (波長 2~10mm) を用いることにより  $K\lambda_d < 1$  なる協同トムソン散乱の条件を達成することができる。本研究で用いる 77GHz 電磁波の場合、図2に示すように協同トムソン散乱スペクトルの計算からドップラーシフト周波数の低い成分 (< 0.5GHz) は主にバルクイオンの情報を含み、周波数の高い成分は高速イオン (> 0.5GHz) の情報を含んでいる。両成分のスペクトルの広がりから温度が、また強度から密度を求めることができる。同じバルクパラメータに対して高速イオンを 40keV, 180keV と変えた場合、その傾きに明確な違いが現れ高速イオンの温度を識別できることが計算からわかった。

この計算によるスペクトルの信号強度及び周波数広がりから、ヘテロダイン検波とフィルターバンクによるCTS受信回路の設計と開発を行った。その回路図を図3に示す。ノッチフィルターによりジャイロトロン の迷光を取り除いた後、74-80GHz 帯の RF 信号をヘテロダイン検波により中間周波数 0-6GHz に周波数変換している。その中間周波数は 100 もしくは 200MHz の周波数帯域フィルターを 32 チャンネル用意し、スペクトル分解す

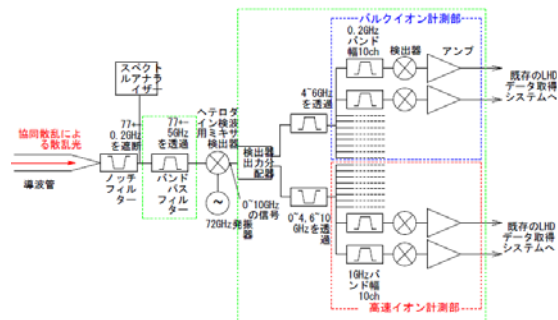


図3 CTS 受信機の回路図

る。それらの信号は検波器からアンプを通して増幅された後、データ収集システムへ送られる。各チャンネルの感度調整と絶対値較正は、液体窒素や黒体炉を用いて行った。また、実際に LHD から受信機までの総合的な較正は、LHD の電子サイクロトロン共鳴輻射 (electron cyclotron emission; ECE) を用いて行った。

#### 4. 研究成果

図 4 に計測断面における入射マイクロ波の入射ビームを青直線で示し、散乱光を赤直線で示す。両者が重なる部分が散乱体積である。実験では図 4 に示すように入射した方向に対して後方から散乱光を受光するシステムとした。プラズマ中には赤曲線で示す ECE 共鳴層があり、そこからの放射光と散乱光を区別するために散乱体積を ECE 共鳴層からはずした配位とした。しかし、ECE 放射光は真空容器内を反射して受信系に混入する可能性がある。よって、入射ジャイロトロンを時間的に On-Off を繰り返すことにより On 時の散乱 + ECE 光から Off 時の ECE 光を差し引いて背景光の ECE を除去することにした。

図 5 に周期変調した信号の時間変化を示す。図 5 において左列は周波数が入射マイクロ波の周波数に対して 0.5GHz 以下の広がりを持つバルクイオンによる散乱光の信号を示し、右列は 0.5GHz 以上の周波数広がりを持つ高速イオンによる散乱信号を示す。左列のバルクイオンにチャンネルでは生信号の変化から明確に On 時 (赤線) と Off 時 (緑線) で信号に差があり散乱信号を取得できていることが分かる。一方、右列の高速イオンのチャンネルでは生信号の変化からは信号の取得は明確ではない。そこで信号の差し引きの積算操作を行い高速イオンのスペクトルの計測精度の改善を試みた。図 6 に積算後のス

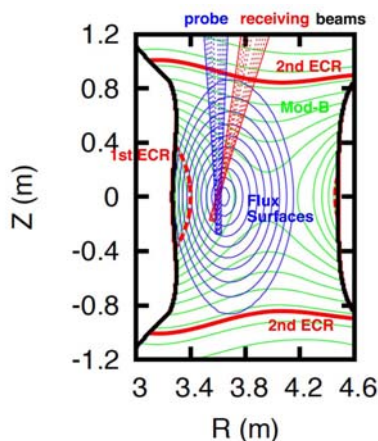


図 4 LHD ポロイダル断面と入射・受信・揺動ベクトルの関係。

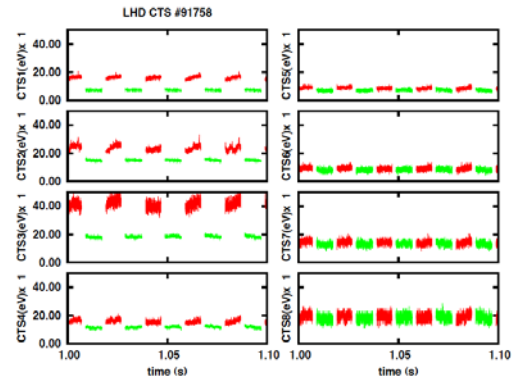


図 5 CTS 変調信号 左列はバルクチャンネル、右列は高速イオンチャンネルの信号を示している。

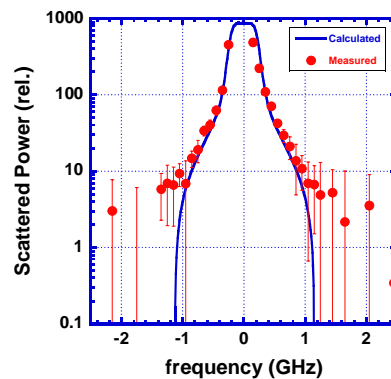


図 6 計測した協同トムソン散乱スペクトル (赤丸)。実線は他計測から得られたプラズマパラメータを用いて計算したスペクトルを示している。

クトルの計測結果を示す。

図 6 に示すように 2GHz 程度まで信号を取得できていることが分かった。また、計測したスペクトルから高速イオンの密度を評価を試みた。ここで、高速イオン密度のみを未知数とするために、それ以外のスペクトル形状、および、強度に寄与するプラズマパラメータは他の計測での計測値を用いた。電子温度は非協同 YAG レーザートムソン散乱から求めた  $T_e = 0.8$  keV、バルクのイオン温度はアルゴン発光のドップラー幅から求めた  $T_i = 0.7$  keV、電子密度、およびバルクのイオン密度は等しいと仮定し、遠赤外線レーザー干渉計から得られた電子密度  $n_e = 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  を用いた。その結果、実験結果が合うように 40keV の高速イオンの密度を決定したところ、図 6 に示すような青線となり高速イオンの密度は  $n_{\text{fast}} = 2.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  を得た。この値は LHD における高速イオン速度分布関数を評価することができる数値計算コードと比較して 7 倍程度過大評価している。図 6 に示すように現状では 0.5GHz 以上の高速イオンによるスペクトル成分は SNR が十分でないこともあり、

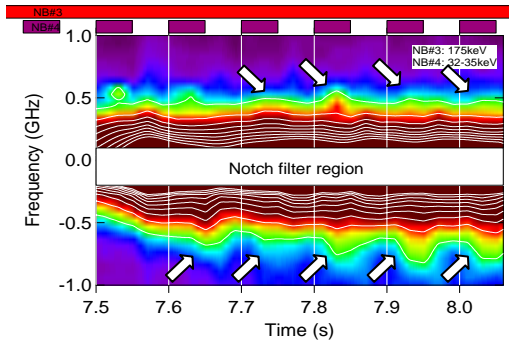


図 7 協同トムソン散乱信号のスペクトルの時間変化。矢印はスペクトル強度がNBIの入射に反応している領域を示している。

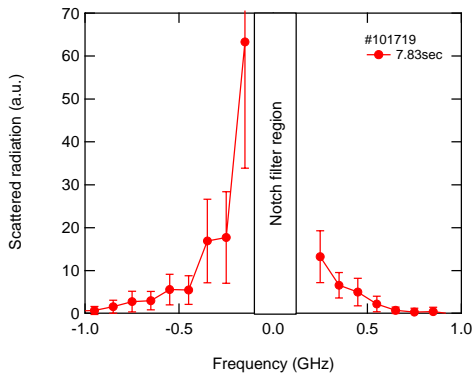


図 8 図 7 の時刻  $t=7.83s$  における CTS スペクトル。

今後システムの改善により SNR を向上させ、高速イオン密度の定量評価の精度の向上を目指す。

高速イオン計測の確認の他の手法として高速イオンを入射する NBI を周期変調することによりスペクトルの応答を計測した。180keV の高速イオンを磁力線に対して接線方向に入射する NBI を時間的一定入射し、それに対して 40keV の高速イオンを磁力線に対して垂直入射する NBI を 50msec On, 50msec off の周期変調を行い重畳した。図 7 に協同散乱スペクトルの時間変化を示す。図 7 に示すように 0.5-1GHz, -0.5-1GHz の周波数領域において図中に矢印で示すように垂直 NBI の入射に伴い、スペクトル強度が増加していることが分かる。図 2 に示すように 0.5GHz 以上の領域では 40keV の高速イオンによる寄与と考えられ、図 7 の計測結果は高速イオンが計測されている定性的な結果を示していると言える。図 7 の  $t=7.83s$  におけるスペクトルを図 8 に示す。

図 8 に示すようにスペクトルには正の周波数と負の周波数で非対称性が見られる。この非対称性は接線入射ビームの影響によるこ

とも考えられるが、詳細については今後、数値シミュレーションとの比較を通じて検討を行う。また、図 7 の実験では ECE ノイズを除去するためのマイクロ波変調を行っておらず、高速イオンの計測精度を向上させるために入射マイクロ波も変調した実験データを取得する必要がある。

以上のように、2009-2011 年度にかけ本研究課題であるジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱計測手法の開発を行い、高速イオンの検出を行った。システムは完成し高速イオンによるスペクトルを計測することはできたが、計測精度が十分でなく、詳細な高速イオンの密度、物理的挙動を確定するに至っていない。今後は計測精度を向上させ、その後、高速イオンのシミュレーションコードと詳細な比較を行うことにより高速イオンの閉じ込め特性を定量的に明らかにすることを目指す。

計測精度が劣化する原因として、受信計測アンテナの方向設定に誤差がある可能性がある。これについては最終年度の実験で 1 放電時間中にアンテナの方向をスキャンし、散乱信号の変化を計測した。図 9 に計測結果を示す。 $t=5s$  付近で散乱体積が最大になるタイミングで散乱信号も最大となるが、それ以外の  $t=6.7s$  付近でも信号が増加しており、何らかの原因で計測すべき散乱信号以外のマイクロ波信号が混入していること示唆している。共鳴層の影響、真空容器壁で反射したマイクロ波の多重散乱などが原因と考えられるが、今後原因を究明してノイズの除去を行い、計測精度の向上に取り組みたい。

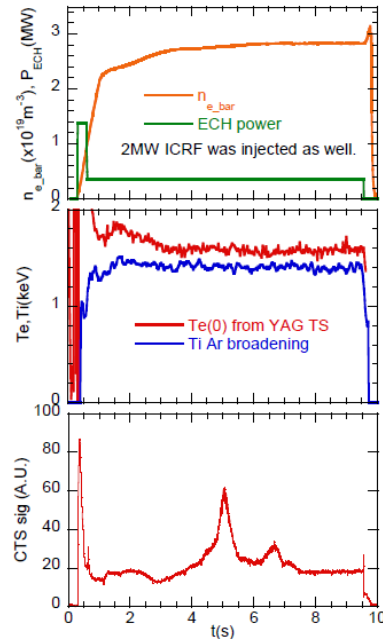


図 9 一定放電中における散乱体積のスキャンによる信号強度の変化



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 7 件)

- ① M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma, T. Saito, Y. Tatematsu(他 4 名 3 番目), (査読あり) ”Development of Collective Thomson Scattering diagnostic for bulk and fast ions in the Large Helical Device” J. Plasma Fusion Res. Vol.6, (2011) 2402068-1-5.  
DOI: 10.1585/pfr.6.2402068
- ② 久保伸, 田中謙治, 西浦正樹, “プラズマ核融合学会誌 小特集 3.先進計測技術・最近の進展, 3.3 散乱計測”, (査読なし), プラズマ核融合学会誌, 2011 年 87 巻 (350-357)
- ③ S. Kubo, M. Nishiura, K. Tanaka, Y. Tatematsu, T. Saito (他 12 名 3 番目), (査読あり), ”Collective Thomson scattering of a high power electron cyclotron resonance heating beam in LHD”, Review of Scientific Instruments, Vol.81, (2010)10D535-1-6.  
DOI: 10.1063/1.3481165
- ④ S.Kubo, M.Nishiura, K.Tanaka, T.Shimozuma, Y.Tatematsu, T.Saito, Y.Yoshimura, (他 4 名 3 番目), (査読あり), ”Collective Thomson Scattering Study using Gyrotron in LHD”, Journal of Plasma Fusion Research, 5, S1038-1-6. DOI: 10.1585/pfr.5.S1038
- ⑤ S.Kubo, M.Nishiura, K.Tanaka, N.Tamura, T.Shimozuma, Y.Tatematsu, T.Saito, (他 5 名 3 番目), (査読あり), ”Collective Thomson Scattering of 77 GHz High-Power ECRH Beam in LHD”, Contribution of Plasma Physics, (2010), 50, 624-628.  
DOI: 10.1002/ctpp.200900042
- ⑥ S.Kubo, M.Nishiura, K.Tanaka, N.Tamura, T.Shimozuma, Y.Tatematsu, T.Saito, (他 6 名 3 番目), (査読あり) ”Estimation of the Effective Collective Thomson Scattering Volume using the Gaussian Beam in LHD ECRH System”, Journal of Plasma Fusion Research, 5, S2103-1-4,  
DOI: 10.1585/pfr.5.S2103
- ⑦ M.Nishiura, S.Kubo, K.Tanaka, T.Shimozuma, T.Saito, Y.Tatematsu, (他 5 名 3 番目) (査読あり), ”Initial result of collective Thomson scattering using 77 GHz gyrotron for bulk and tail ion diagnostics in the Large Helical Device”, Journal of Physics, conference series, (2010), 227, 012013 1-4, (<http://iopscience.iop.org/1742-6596/227/1/012014>)

[学会発表] (計 21 件)

- ① K. Tanaka, (他 8 名), “Development of Collective Thomson Scattering Diagnostic

for Bulk and Fast Ions in the Large Helical Device”, 15th International Symposium on LASER-AIDED PLASMA DIAGNOSTICS, Jeju, Korea, 2011/10/11.

- ② M. Nishiura, (他 10 名), ”Observation of fast ion velocity distribution and driven waves by Collective Thomson Scattering Diagnostic in the Large Helical Device”, European Physical Society, 38th Conference on Plasma Physics, 2011/6/28, Strasbourg, France
- ③ M. Nishiura, (他 10 名) “Development of collective Thomson scattering diagnostic for bulk and fast ions in the Large Helical Device”, 12th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 2011/9/8, Texas, USA
- ④ S. Ogasawara, M. Nishiura, (他 10 名) “Identification of Spurious Modes of High Power 77 GHz Gyrotron for Collective Thomson Scattering in LHD”,
- ⑤ M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka, T. Shimozuma, T. Saito, Y. Tatematsu, K. Kawahata, ” Observation of Fast Ion Velocity Distribution and Driven Waves by Collective Thomson Scattering Diagnostic”, Plasma Conference 2011, 2011/11/22, Kanazawa, Japan
- ⑥ S. Ogasawara, M. Nishiura, (他 10 名) ”Oscillation mode identification of high power 77 GHz gyrotron in LHD”, Plasma Conference 2011, 2011/11/22, Kanazawa, Japan
- ⑦ S. Kubo, (他 10 名) ”Collective Thomson scattering of a high power electron cyclotron resonance heating beam in LHD”, 18<sup>th</sup> Topical Conference High Temperature Plasma Diagnostics, May 16-20, 2010, WilWood, New Jersey, U.S.A
- ⑧ S. Kubo, (他 10 名), “ECRH and ECE in high Te, low density plasmas of LHD”, 16th International Workshop on ECE & ECRH, 2010.04.12-16, Sanya, China
- ⑨ M. Nishiura, (他 10 名) ” Development of Collective Thomson Scattering diagnostic for bulk and fast ions in the Large Helical Device”, The 20th International Toki Conference, 7-10 December, 2010, Toki, Japan
- ⑩ 西浦正樹 他 10 名, “ジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱における散乱信号の解析”, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 2010 年 6 月 11 日, 高山文化センター
- ⑪ 西浦正樹 他 10 名, ”波数と磁場ベクトルの協同トムソン散乱スペクトルへの影

- 響”, 日本物理学会, 2010年9月25日, 大阪府立大学
- ⑫ M.Nishiura 他 10 名, ” Initial result of collective Thomson scattering using 77 GHz gyrotron for bulk and tail ion diagnostics in the Large Helical Device”, 14<sup>th</sup> International Symposium on Laser Aided Plasma Diagnostics, Sep. 21-24, 2009, Treviso, Italy
- ⑬ S.Kubo 他 10 名, ” Collective Thomson Scattering of 77 GHz High Power ECRH Beam in LHD”, 17th International Stellarator/Heliotron Workshop, 2-16 October, 2009, Princeton, U.S.A
- ⑭ S.Kubo 他 11 名, ” Estimation of the Effective Collective Thomson Scattering Volume using the Gaussian Beam in LHD ECRH System”, 19<sup>th</sup> International Toki Conference on Plasma and Controlled Fusion, December 8 - 11, 2009, Toki, Japan
- ⑮ M.Nishiura 他 10 名, ” Assessments of Collective Thomson Scattering Diagnostic for Parallel and Perpendicular Velocity Components in the Large Helical Device”, 19<sup>th</sup> International Toki Conference on Plasma and Controlled Fusion, December 8 - 11, 2009
- ⑯ 西浦正樹 他 10 名, “LHD における協同トムソン散乱計測のスペクトル解析”, 物理学会 2009 年秋の分科会, 2009/9/26, 熊本大学
- ⑰ 田村奈美子, 久保伸 他 10 名, ” LHD における 77GHz ジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱計測の高精度化”, 物理学会 2009 年秋の分科会, 2009/9/26, 熊本大学
- ⑱ 西浦正樹 他 9 名, ” 協同トムソン散乱計測におけるプラズマ中の電磁波揺動解析”, プラズマ核融合学会プラズマ核融合学会第 26 回年会, 2009/12/1-12/4, 京都国際交流センター
- ⑲ 久保伸 他 6 名, ” 協同トムソン散乱計測時の散乱体積と背景電子サイクロトロン放射強度の評価”, プラズマ核融合学会プラズマ核融合学会第 26 回年会, 2009/12/1-12/4, 京都国際交流センター
- ⑳ 田村奈美子, 久保伸 他 8 名, ” LHD における 77GHz ジャイロトロンを用いた協同トムソン散乱計測の高精度化”, プラズマ核融合学会プラズマ核融合学会第 26 回年会, 2009/12/1-12/4, 京都国際交流センター
- ㉑ 田中謙治 他 5 名, ” テラヘルツ帯光源のプラズマ科学・核融合研究への応用-協同トムソン散乱 (Collective Thomson Scattering; CTS) 実験への適用”, プラ

ズマ核融合学会プラズマ核融合学会第 26 回年会, 2009/12/1-12/4, 京都国際交流センター

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし。

## 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

村岡 克紀 (MURAOKA KATSUNORI)

中部大学・工学部・教授

研究者番号 : 80038546

森下 (川端) 一男 (KAWAHATA KAZUO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号 : 60109353

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)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号 : 60360616

### (3) 研究連携者

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

野竹 孝志 (NOTAKE TAKASHI)

理化学研究所・研究員

研究者番号 : 70413995

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