

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03509

研究課題名（和文）サブテラヘルツ帯協同トムソン散乱計測による高密度プラズマイオンの直接計測

研究課題名（英文）Direct measurement of ions in a high-density plasma with collective Thomson scattering diagnostics

研究代表者

斉藤 輝雄 (Saito, Teruo)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・特命教授

研究者番号：80143163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：福井大と核融合研との共同研究により開発した303 GHz高出力ジャイロトロンを核融合研に設置し、使用周波数帯の異なる加熱用既設コルゲート導波管による303 GHz出力の伝送特性の計測・解析などの準備を経て、大型ヘリカル装置LHDでの協同トムソン散乱計測を実施した。ただし、現状で明確な散乱信号を得るには至っていない。

また、サブテラヘルツ帯高出力ジャイロトロンのパルス幅全体にわたる単独発振の実現とモード競合計算による物理解釈、および、設計モード以外で発見した多周波数発振現象を真空窓からの反射波とのモード競合として理論的に説明し、それぞれ学術論文として発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

協同トムソン散乱計測は核融合を目指す高温プラズマ中のイオン温度の計測法として有望である。本研究では、高密度プラズマにも適用可能なサブテラヘルツ帯周波数のジャイロトロンを用いて、核融合科学研究所の実験装置LHDにおいて協同トムソン散乱計測を行った。サブテラヘルツ帯協同トムソン散乱計測実現に向けた第一歩である。

また、高出力サブテラヘルツ帯ジャイロトロンにおける単独発振の実現や、反射波が存在する場合の多周波数発振現象の発見および反射波を取り入れたモード間相互作用としての理論的説明など、ジャイロトロン研究の学術的成果を得た。

研究成果の概要（英文）：Collective Thomson scattering experiment was carried out on LHD with a 303 GHz high power gyrotron that was developed through collaboration between University of Fukui and National Institute for Fusion Science. Transmission characteristics of the 303 GHz power through existing corrugated waveguides for electron heating with different frequencies were measured and analyzed. Definite scattering signal has not been obtained yet.

Two papers were published for (i) realization of single mode oscillation of a high power sub THz gyrotron during the full pulse width and physics interpretation with mode competition calculation, and (ii) observation of a multi-peak frequency spectrum for a mode different from the design mode and a theoretical explanation as mode competition with a wave reflected from the vacuum window.

研究分野：テラヘルツ波理工学

キーワード：プラズマ計測 協同トムソン散乱 サブテラヘルツ帯ジャイロトロン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プラズマ中に電磁波を入射すると、イオンの熱揺動に追従して協同的に運動する電子の速度分布を反映したスペクトルを持つ散乱波が得られ、水素イオン温度や熱化前の高速水素イオンの速度分布関数を直接計測できる。この協同トムソン散乱 CTS 条件は、計測されるイオンの揺動が電子にデバイ遮蔽されないことである。電磁波の散乱では、入射波、散乱波および揺動波はベクトルの波数整合条件を満たす必要がある。核融合プラズマにおいて空間分解能のよい散乱角 90 度付近において CTS 計測を実現するには、ミリ波から遠赤外領域の入射波が必要である。また、断面積の小さいトムソン散乱で有意信号を得るため数 100 kW の高出力が求められる。

CTS 計測は電子加熱用の高出力ジャイロトロンを用いて始まった。JET において、イオンサイクロトロン加熱による高速イオンが初めて計測された。TEXTOR や ASDEX では、NBI 生成高速イオンの減速過程や saw tooth 崩壊に伴う高速イオンの輸送機構等の研究が始まっている。LHD においても、電子加熱用 77 GHz, 154 GHz ジャイロトロンを用いる CTS 計測が始まっている。

しかし、プラズマ断面内の電子サイクロトロン共鳴層の存在や高密度プラズマでの入射波のカットオフ等の障害のため、電子加熱用ジャイロトロンでは広範なパラメータを持つプラズマへの適用が困難である。

2. 研究の目的

本研究では、核融合研の大型ヘリカル装置 (LHD) の高密度プラズマを用いて、サブテラヘルツ帯 CTS による水素イオンの直接計測を実証する。入射電磁波源には、平成 25 年度 - 28 年度の科研費基盤 (A) において目標を超える性能を達成して開発に成功した周波数 303 GHz、出力 300 kW 以上のサブテラヘルツジャイロトロンを用いる。このジャイロトロンを用いて、 10^{23} m^{-3} を超える高密度プラズマや不純物ホールのあるプラズマのイオン温度計測を可能にする。さらに、挑戦的課題として LHD で始まる重水素実験において重要な水素・重水素イオン密度比の計測も視野に入れた。これから、77 GHz, 154 GHz ジャイロトロンによる CTS 計測と合わせて、CTS 計測の適用領域の拡大を目指した。

3. 研究の方法

本研究では開発を完了した 303 GHz 高出力ジャイロトロンと LHD に既設の電子加熱用伝送系を組合せて CTS 計測装置を構築し、LHD 中の高密度プラズマイオンを計測する。手順は

- (1) まず、福井大学においてジャイロトロンの最高性能確認および高出力サブテラヘルツジャイロトロンとして重要な物理データの取得と予備導波管を用いた伝送試験を行う。
- (2) つぎにジャイロトロンを核融合研に移設、現場でのジャイロトロン発振確認後、既設伝送系と組み合わせて CTS 計測装置を構築し、伝送試験、散乱信号受信システムの確認をおこなう。その後、LHD 実験サイクル中に CTS 計測を試行、課題を抽出し、解決策をまとめる。
- (3) 課題の解決策を講じ、LHD においてサブテラヘルツ帯協同トムソン散乱計測を実現する。

4. 研究成果

(1) ジャイロトロンの性能確認と物理データ取得

散乱信号の SN 比向上のために重要となる長パルス化を進めた。容量 2 μF のコンデンサーとオン/オフ機能のみ的高速半導体スイッチで構成される電源を用いてパルス幅 100 μs まで延伸した。さらに、発振パルスの立ち上がり、定常時、立ち上がりの全期間において、TE_{22,2} モードの単一モード発振を確認した。この結果をモード競合計算で解析し、電子加速電圧の極めて速いが有限の立ち上がり時間の重要性を見いだした。これらの結果をサブテラヘルツ帯高出力ジャイロトロンの設計・動作特性の知見として国内学会の他、世界から研究者が集まる赤外とミリ波の国際会議等で報告し、最終的に学術論文として公表した ()。最高出力 300 kW 以上を得た結果は先行科研費基盤 (A) の成果として公表済みである ()。

ジャイロトロンは核融合研の加熱機器室に設置するため、LHD 本体までの長距離伝送には既設の 3.5 インチコルゲート導波管系を用いた。この導波管は 300 GHz 帯に対して最適化されていない。予備導波管等を用いてジャイロトロン出力の伝送試験を行った。この結果、既設の導波管系を用いて長距離伝送可能であることを確認した。また、別途進めてきた 1.25 インチコルゲート導波管による伝送試験の結果も解析し、入力ビームの非軸対称性に起因する高次モード発生量を評価した。

二重真空窓を用いて、共振器部の磁場強度の調整により、TE_{22,2} モードの他に TE_{21,2} モードおよび TE_{23,2} モードの発振を確認した。これらのモードの周波数は TE_{22,2} モードの周波数とは異なるため、サファイア板 1 枚の一重真空窓では大きい反射が生じ、発振に強く影響す

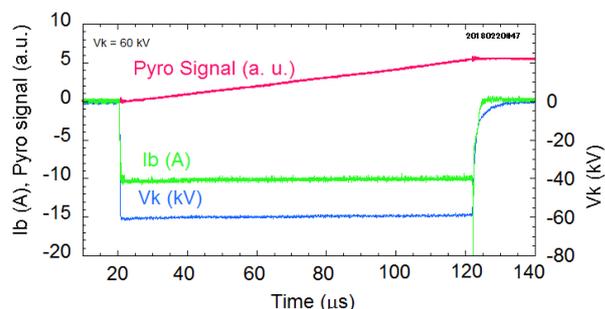


図 1 パルス幅 100 μs までの安定発振の確認

る。その典型例を図2に示す。(a)図は一重窓の場合に観測された TE_{21,2} モードの周波数スペクトルである。約 35 MHz の等間隔に並んだ複数ピークが見られる。一方(b)図は二重真空窓構成とし、TE_{21,2} モードの周波数に対する反射を最小化した場合のスペクトルである。きれいな単一ピークスペクトルが観測される。

国際共同研究による理論解析の結果、(a)図の複数ピークスペクトルは、counter-rotating mode として共振器に帰る反射波と本来の co-rotating mode の競合による振幅振動が生じるためであることをつきとめ、学術論文として公表した()。

(2)核融合研への移設、CTS 計測装置の構築

2018 年度早期にジャイロトロンを核融合研に移設・加熱装置室にジャイロトロンを設置後、ジャイロトロンが発振特性の確認、3.5 インチコルゲート導波管にジャイロトロン出力ビームを結合するミラー系、導波管真空窓および導波管切替器を製作した。さらに、高感度受信系の動作確認後、LHD 実験期間の後半にサブテラヘルツ帯ジャイロトロンを用いた CTS 実験を試行するまで準備ができた。これらは斉藤、久保、田中、西浦に加え、研究協力者の下妻と福井大学工学研究科の大学院生2名が協力して行った。図3は加熱装置室に設置されたジャイロトロン(写真左端)と既設導波管係に出力ビームを結合するためのミラー伝送系を示している。

(3)CTS 計測の試行

2018 年度の LHD 実験第 20 サイクルにおいて初めてのサブテラヘルツ帯 CTS 計測を試行した。しかし、明確な散乱信号を得ることができなかった。この CTS 計測試行では LHD の実験スケジュールの制約により、事前に LHD 本体までのジャイロトロン出力伝送試験を実施できなかった。

2019 年度は、出力ビームを 3.5 インチコルゲート導波管系へ結合するミラー系の光軸を精密に調整した後、LHD 真空容器窓直前においてジャイロトロン出力の伝送を確認した。さらに、伝送系途中に挿入されている2つの偏波器の設定角度に対する伝送電力の依存性マップを作成した。以上の準備を経て、LHD 装置における CTS 実験を行った。しかし、これまでのところ明確な散乱信号の受信には至っていない。

<引用文献>

Teruo SAITO, et al., "Oscillation Characteristics of a High Power 300 GHz Band Pulsed Gyrotron for Use in Collective Thomson Scattering Diagnostics," *Plasma and Fusion Research* **14**, 1406104 (2019), DOI: 10.1585/pfr.14.1406104.

Teruo SAITO, et al., "Development of 300 GHz Band Gyrotron for Collective Thomson Scattering Diagnostics in the Large Helical Device," *Plasma and Fusion Research* **12**, 126013 (2017), DOI: 10.1585/pfr.12.1206013

Teruo SAITO, et al., "Developments for collective Thomson scattering equipment with a sub-THz gyrotron in LHD," *EPJ Web of Conferences* **203**, 03012 (2018), DOI: 10.1051/epjconf/201920303012.

Teruo SAITO, et al., "Effect of Reflection on Mode Competition and Multi-Frequency Oscillation in a High-Power Sub-THz Gyrotron: Experimental Observation and Theoretical Analysis," *J. Infrared Milli. Terahertz Waves* **41**, (2020), published online on 4 May 2020, DOI: 10.1007/s10762-020-00695-1.

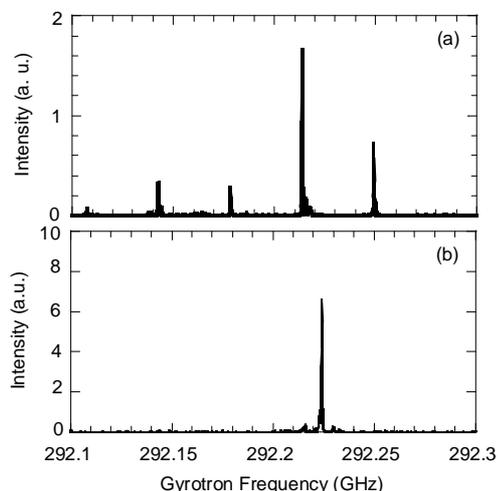


図2 TE_{21,2} モードの周波数スペクトル (a)単一サファイア板真空窓の場合と(b)二重サファイア板の場合

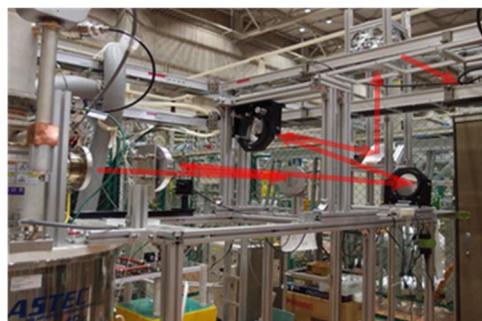


図3 核融合研の加熱装置室に設置されたジャイロトロン(写真左端)とミラー伝送系の構築

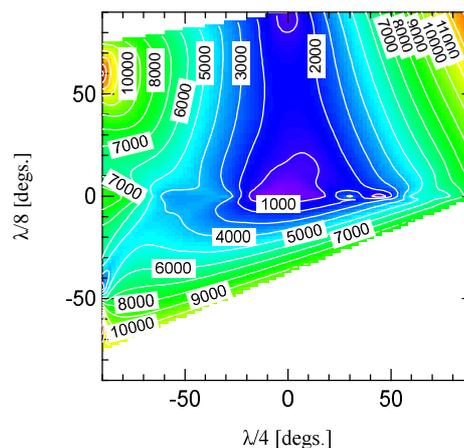


図4 既設伝送系に挿入されている偏波器設定角度に対する伝送電力の依存性マップ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Teruo SAITO, Shunsuke TANAKA, Ryuji SHINBAYASHI, Yoshinori TATEMATSU, Yuusuke YAMAGUCHI, Masafumi FUKUNARI, Shin KUBO, Takashi SHIMOZUMA, Kenji TANAKA and Masaki NISHIURA	4. 巻 14
2. 論文標題 Oscillation Characteristics of a High Power 300 GHz Band Pulsed Gyrotron for Use in Collective Thomson Scattering Diagnostics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1406104-1 -9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1406104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Nishiura, K. Tanaka, S. Kubo, T. Saito, N. Kenmochi, H. Nuga, R. Seki, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T.I. Tsujimura, R. Yanai, Y. Tatematsu and LHD Experiment Group	4. 巻 15
2. 論文標題 Collective Thomson scattering with 77, 154, and 300 GHz sources in LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01002-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/01/C01002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Teruo Saito, Maria M. Melnikova, Nikita M. Ryskin, Shunsuke Tanaka, Ryuji Shinbayashi, Yuusuke Yamaguchi, Masafumi Fukunari, Yoshinori Tatematsu	4. 巻 41
2. 論文標題 Effect of Reflection on Mode Competition and Multi-Frequency Oscillation in a High-Power Sub-THz Gyrotron: Experimental Observation and Theoretical Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-020-00695-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Saito Teruo, Tatematsu Yoshinori, Yamaguchi Yuusuke, Fukunari Masafumi, Hirobe Takumi, Shinbayashi Ryushi, Tanaka Shunsuke, Ohkubo Kunizo, Kubo Shin, Shimozuma Takashi, Tanaka Kenji, Nishiura Masaki	4. 巻 203
2. 論文標題 Developments for collective Thomson scattering equipment with a sub-THz gyrotron in LHD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 03012 ~ 03012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/epjconf/201920303012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Teruo Saito, Shunsuke Tanaka, Ryuji Shinbayashi, Yuusuke Yamaguchi, Masafumi Fukunari, Yoshinori Tatematsu, Maria M. Melnikova, and Nikita M. Ryskin
2. 発表標題 Observation of Multi-Peak Frequency Spectrum in a High Power Sub-THz Gyrotron
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nishiura, K. Tanaka, S. Kubo, T. Saito, N. Kenmochi, H. Nuga, R. Seki, T. Shimosuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. I. Tsujimura, R. Yanai, Y. Tatematsu, LHD experiment group
2. 発表標題 Collective Thomson scattering with 77, 154, and 300 GHz sources in LHD
3. 学会等名 Laser Aided Plasma Diagnostics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斉藤輝雄、山口裕資、福成雅史、立松芳典
2. 発表標題 300GHz 帯高出力ジャイロトロンの開発
3. 学会等名 第28回(2019年度)日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斉藤輝雄, 田中俊輔, 新林竜志, 山口裕資, 福成雅史, 立松芳典, Maria M. Melnikova, and Nikita M. Ryskin
2. 発表標題 300 GHz帯高出力ジャイロトロンにおける複数ピーク周波数スペクトルの観測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, T. Hirobe, R. Shinbayashi, S. Tanaka, K. Ohkubo, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura
2. 発表標題 Developments for collective Thomson scattering equipment with a sub-THz gyrotron in LHD
3. 学会等名 20th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission (ECE) and Electron Cyclotron Resonance Heating (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Saito, S. Tanaka, R. Shinbayashi, T. Hirobe, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, Y. Tatematsu, K. Ohkubo, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura
2. 発表標題 Developments of Equipment for Sub-THz Collective Thomson Scattering in LHD
3. 学会等名 43 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斉藤輝雄, 田中俊輔, 新林竜志, 山口裕資, 福成雅史, 立松芳典, 大久保邦三, 久保伸, 下妻隆, 田中謙治, 西浦正樹
2. 発表標題 LHDにおけるサブテラヘルツ帯協同トムソン散乱計測のための機器開発と準備
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中俊輔, 斉藤輝雄, 新林竜志, 山口裕資, 福成雅史, 立松芳典, 久保伸, 下妻隆, 田中謙治, 西浦正樹
2. 発表標題 LHD における CTS 計測用 300 GHz 帯ジャイロトロン の発振特性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新林竜志, 田中俊輔, 斉藤輝雄, 大久保邦三, 山口裕資, 福成雅史, 立松芳典, 久保伸, 下妻隆, 田中謙治, 西浦正樹
2. 発表標題 LHDにおける300GHz帯CTS計測用ジャイロトロン出力ビームの整形と3.5インチコルゲート導波管伝送試験
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Saito, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, Y. Tatematsu, T. Hirobe, R. Shinbayashi, S. Tanaka, S. Kubo, T. Shimosuma, K. Tanaka and M. Nishiura
2. 発表標題 Design Consideration and Oscillation Characteristics of High-Power 300 GHz Gyrotron
3. 学会等名 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中俊輔, 廣部匠, 新林竜志, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 斉藤輝雄, 久保伸, 下妻隆, 田中謙治, 西浦正樹
2. 発表標題 300 GHz帯CTS計測用パルスジャイロトロンの安定発振の確認と発振特性の検討
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 廣部匠, 新林竜志, 田中俊輔, 横山哲士, 山口裕資, 福成雅史, 斉藤輝雄, 立松芳典, 大久保邦三, 久保伸, 下妻隆, 田中謙治, 西浦正樹
2. 発表標題 300 GHz帯CTS計測用パルスジャイロトロン出力を用いたコルゲート導波管伝送試験
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新林竜志, 廣部匠, 田中俊輔, 横山哲士, 山口裕資, 福成雅史, 斉藤輝雄, 立松芳典, 大久保邦三, 久保伸, 下妻隆, 田中謙治, 西浦正樹
2. 発表標題 300 GHz帯CTS計測用パルスジャイロトロン出力を用いたコルゲート導波管伝送試験
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	立松 芳典 (Tatematsu Yoshinori) (50261756)	福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授 (13401)	
研究分担者	久保 伸 (Kubo Shin) (80170025)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	
研究分担者	田中 謙治 (Tanaka Kenji) (50260047)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	
研究分担者	西浦 正樹 (Nishiura Masaki) (60360616)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
研究協力者	下妻 隆 (Shimozuma Takashi) (80270487)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	