

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630423

研究課題名(和文)ミリ波散乱計測を応用した高温プラズマ中の燃料イオンの先進分析手法の提案

研究課題名(英文)Proposal of advanced fueling diagnostic in high temperature plasmas by millimeter wave scattering

研究代表者

西浦 正樹(Nishiura, Masaki)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60360616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの自己燃焼維持と性能向上のために、DT核融合反応の燃料イオン比計測は必須である。高放射線環境下で耐放射線性を有するミリ波協同トムソン散乱(Collective Thomson Scattering:CTS)計測を応用した2手法の燃料イオン比計測(スペクトル解析もしくはイオンBernstein波計測)を新たに提案した。H25年度は散乱スペクトルの周波数分解能を高速デジタイザの信号をFFT解析することで向上させた。H26年度は送受信アンテナの改良により、プラズマ中のイオンBernstein波様の波動を検出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：For performance enhancement of self-burning fusion-plasmas, the fueling ratio of ions in DT nuclear fusion is essential. We proposed two methods for ion fueling ratio diagnostic by millimeter wave collective Thomson scattering; spectrum analysis and ion Bernstein wave detection. In the first year, the frequency resolution is enhanced by a fast digitizer combined with FFT analysis. In the second year, improvement of receiver antenna leads to succeed excited harmonic waves like an ion Bernstein wave.

研究分野：プラズマ物理，核融合

キーワード：協同トムソン散乱 ミリ波 スペクトル イオンBernstein波 プラズマ 核融合 イオン温度 分布関数

### 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの自己燃焼維持と性能向上のために、DT 核融合反応の元となる燃料イオン比計測は必須である。核融合プラズマ中の D, T, 粒子の燃料イオン比計測は、分光計測や中性子計測などが提案されている。高放射線環境のためその計測可能性が懸念されている。そこで我々は耐放射線性を有するミリ波協同トムソン散乱 (Collective Thomson Scattering: CTS) 計測を応用した燃料イオン比計測を新たに提案する。

### 2. 研究の目的

本研究は核融合プラズマ中の DD や DT 核燃焼効率を明らかにすることを目的とし、今までに無い燃料イオン (D, T) + 自己加熱イオン (粒子) 計測手法を提案する。高温プラズマ中で非接触質量分析を行うためにミリ波協同トムソン散乱 (CTS) 計測手法が基本原理となる。CTS スペクトルのバルクイオンに対応する領域を超高周波数分解能  $\Delta f$  (速度分解能) で観測することによりスペクトル形状から各イオン成分に分離する。目的達成のために  $\Delta f \sim$  数 MHz を有するギガヘルツ帯デジタル信号処理 (DSP) 受信機の開発を進める。本研究の挑戦は従来の燃料イオン比計測の問題点であった耐放射線性を解決するだけでなく、燃料 DT と自己加熱 粒子の密度が同時に得られる画期的な提案である。核融合閉じ込め物理と自己燃焼モデリング精度の飛躍的向上が期待できる。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するために H25-26 年度にかけ (a) デジタル信号処理 (GHz-DSP) 受信機の開発を行った。従来のフィルターバンク型 CTS 受信機に比べ感度・時間分解能が一桁以上向上することを示す必要があった。GHz-DSP 受信機の主要な構成要素は核融合科学研究所の別用途で購入した高速デジタル (帯域幅 5GHz, メモリ 1GB) を用いた。本システム組み上げ後、黒体炉を模擬散乱信号源として輻射強度の検出効率を実験的に求めた。H25 年度から (b) D と プラズマを模擬する H と不純物イオン混合プラズマを対象とした燃料イオン CTS 計測による多種イオン分布関数の観測と解析によるイオン種分離を目標に実験を進めた。H25 年度は LHD に於いてその予備実験を行い、取得した散乱信号データを解析し、計測手法の確立を目指した。H26 年度は前年度の結果を踏まえ、受信機の改良を行い、本手法によるイオン比計測の精度向上を目指した。

### 4. 研究成果

プローブビーム中に含まれる不要モードノイズを緩和・抑制する対策を施した。昨年度の実験結果を基に、放電中に受信ビーム視線を空間掃引しプローブビーム (20r ポート) と受信ビーム (1.5L ポート) が交差する散乱体

積を最大とするようにアライメントを行った。そのアライメントを確認後、CTS スペクトルを測定した。Ar のドップラー広がりから得られたイオン温度  $T_i \sim 1\text{keV}$  において、図 1 に示すように CTS スペクトルはノッチフィルターの周波数幅内に入っている部分が多く、スペクトル広がり高い周波数側にしか見られなかった。今後、高  $T_i$  実験のイオン温度の高い条件における計測、CXRS や Ar 分光によるイオン温度との比較、等を行う予定である。

送受信ビームに 77 GHz を用いているが、実験条件によってはビーム軌道の屈折効果が見られた。その影響を抑えるために 154 GHz 帯や 300 GHz 帯を用いた計測の検討を進めている。

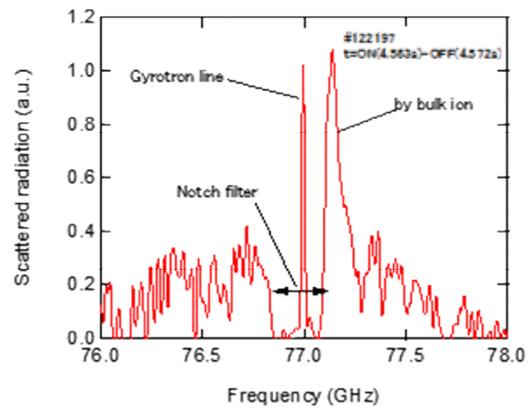


図 1 LHD において測定した CTS スペクトル。イオン温度  $T_i \sim 1\text{keV}$ 。

新たに高速デジタルを導入することにより得られた CTS スペクトルの時間変化を図 2 は示している。プローブビームは 20ms-ON, 20ms-OFF で変調して入射することにより背景の電子サイクロトロン輻射成分を差し引いた。周波数分解能が上がることで、不要なノイズ信号、プローブビームの周波数掃引、CTS スペクトル広がり時間変化が観測できるようになった。従来の広帯域 32 チャンネル受信機ともスペクトル形状は良く一致していた。

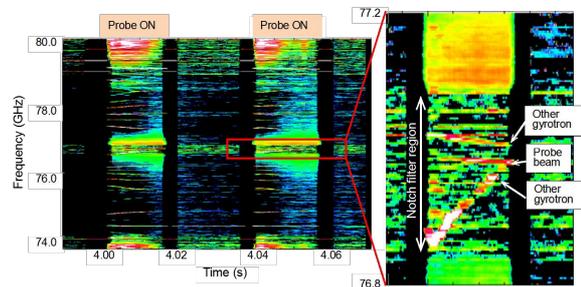


図 2 CTS スペクトルの時間変化。

20-R(77GHz)をプローブビームとして、20-LL において CTS 信号を受信した。測定位置が

(R,T,Z)=(3.9,0,0.1)の時、 $k_{||} \sim 0$  となるが (3.9,0,0.2)にすると IBW は計算上では観測できない．実験に於いても Z=0.1 の時は図3に示すように強い励起波動が観測されたが、Z=0.2 になるとそのような励起波動は見られなかった．観測された波動は IBW の  $k_{||}$  に強く依存するという特徴に関しては一致するが、水素の場合、周波数の間隔  $df \sim 40\text{MHz}$  である点が、本実験で観測された周波数間隔は  $df \sim 21\text{-}37\text{MHz}$  であった．周辺密度が高くなると IBW 励起波動が見えなくなることが分かった．

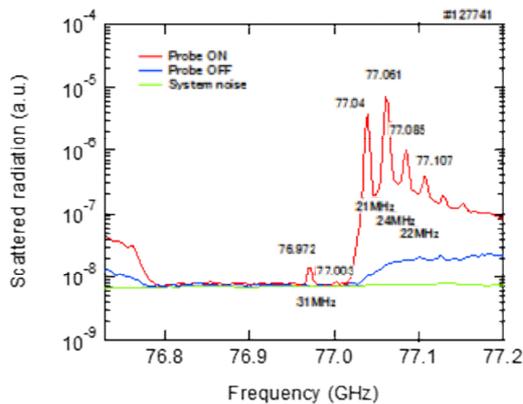


図3 観測されたイオン Bernstein 波様の励起波動．

電子サイクロトロン加熱に使う大電力ミリ波ビームを用いた協同トムソン散乱計測により、バルク・高速イオンの速度分布関数を測定することができる．その計測には狭帯域で減衰率が 120dB 以上のノッチフィルターが必要であり、その開発を行った．ミリ波コンポーネントの中で、ジャイロトロンメインモードの除去のためには減衰量が 120dB 程度必要であることがこれまでの計測結果から分かっている．それに比較して不要モードは 30dB 以上あれば良いため、比較的開発が容易になる．キャビティー型ノッチフィルターの試作を開始した．

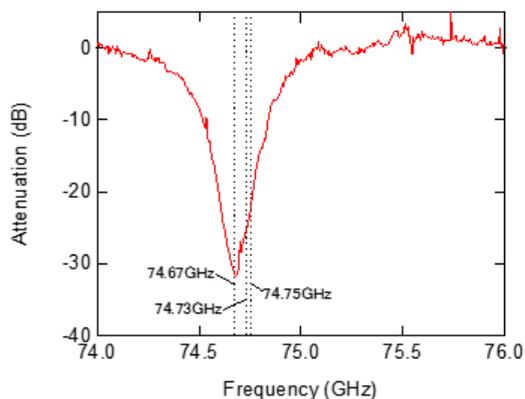


図4 ノッチフィルターの透過特性．

初代試作機では 8 キャビティーノッチフィルターを試作し、図4のような特性を得ている．事前に HFSS によりシミュレーションを行っている．シミュレーションでは現れない不要なノッチが 77GHz と 78GHz 付近に存在する．製作精度、キャビティー長を調整するためのスクリーンの形状など改良の余地がある．これら問題点を解決させ、154GHz 帯のノッチフィルターの開発につなげる予定である．

#### 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 6 件)

Yuusuke Yamaguchi, Teruo Saito, Yoshinori Tatematsu et al., High-power pulsed gyrotron for 300 GHz-band collective Thomson scattering diagnostics in the Large Helical Device, Nuclear Fusion, 査読有, 55, 2015, 013002:1-10  
DOI:10.1088/0029-5515/55/1/013002

K. Okada, M. Nishiura, S. Kubo et al., Development of Fast Steering Mirror Control System for Plasma Heating and Diagnostics, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85, 2014, 11E811:1-3  
DOI:10.1063/1.4891044

M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka et al., Spectrum response and analysis of 77-GHz band collective Thomson scattering diagnostic for bulk and fast ions in LHD plasmas, Nuclear Fusion, 査読有, 54, 2014, 023006:1-10  
DOI:10.1088/0029-5515/54/2/023006

M. Nishiura, S. Kubo, K. Tanaka et al., Recent Progress of Collective Thomson Scattering Diagnostic for LHD and Design Study for JT-60SA, Proceedings of The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2014(IWFIRT2014), 査読無, 2014, 5p-3:1-7

Masaki NISHIURA, Shin KUBO, Kenji TANAKA et al., 70 GHz range notch filter for microwave plasma diagnostics, Plasma and Fusion Research, 査読有, 8, 2013, 2402027:1-4  
DOI:10.1585/pfr.8.2402027

S. Ogasawara, S. Kubo, M. Nishiura et al., Optimization of Megawatt 77-GHz

Gyrotron operation for Application to Collective Thomson Scattering in LHD, Plasma and Fusion Research, 査読有, 8, 2013, 2402069:1-4  
DOI:10.1585/pfr.8.2402069

〔学会発表〕(計 4件)

M. Nishiura et al., Spectrum analysis of 77GHz collective Thomson scattering diagnostic in LHD, February 25-27, Daejeon, Korea

西浦正樹, 他, LHD 協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, June 20, 2015, つくば国際会議場(茨城県つくば市)

M. Nishiura et al., 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), March 5-7, 福井大学(招待講演)

M. Nishiura et al., Progress on collective Thomson scattering diagnostic in the Large Helical Device, 40th European Physical Society Conference on Plasma Physics, July 1-5, 2013, Espoo, Finland

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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: 6 0 3 6 0 6 1 6

(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: 8 0 1 7 0 0 2 5

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: 5 0 2 6 0 0 4 7

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: 8 0 2 7 0 4 8 7

(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: 8 0 1 4 3 1 6 3

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: 5 0 2 6 1 7 5 6