

平成18年度LHDミリ波計測遠隔実験システム成果報告

九州大学産学連携センター

責任者：間瀬 淳 九州大学産学連携センター

参加研究者：近木祐一郎（特任助手） 九州大学産学連携センター

横田裕也（修士課程2年）九州大学産学連携センター

迫田卓也（修士課程1年）九州大学産学連携センター

【はじめに】

マイクロ波／ミリ波を用いた反射計あるいはサイクロトロン放射（ECE）測定は、プラズマ装置本体へのアクセスが良いこと、測定ポートの要求が少ないにもかかわらず、プラズマ諸量（密度・温度、磁場等）の二・三次元分布と同時に、揺動成分のスペクトル分布測定も可能となるため。燃焼プラズマの最適な計測法の一つとして期待されている。本研究は、これら計測法の開発と核融合科学研究所 LHD 装置への適用を有効に進めていくためスーパーSINET を利用していくものである。

【研究目的】

本研究では、LHD 計画共同研究プロジェクトにより開発が進められ、現在 LHD 本体に設置されているミリ波計測システム、すなわち、超短パルス反射計および電子サイクロトロン放射（ECE）イメージングについて、測定装置の機器制御からデータの取得・転送および解析までの全てを遠隔で実現するシステムを、スーパーSINET を介して構築することにより、LHD への定常的な実験参加を図っていくことを目的としている。

【研究内容・成果】

A. 超短パルス反射計

超短パルス反射計システムの概略図を図1に示す。平成18年度周波数領域の拡張のため以下の作業を行った。

i) インパルス出力を8-18 GHzの導波管を通してチャープ化し、アクティブダブラーにより逡倍する。逡倍した後の周波数領域を26-40 GHz から18-40 GHzのものに変更する。

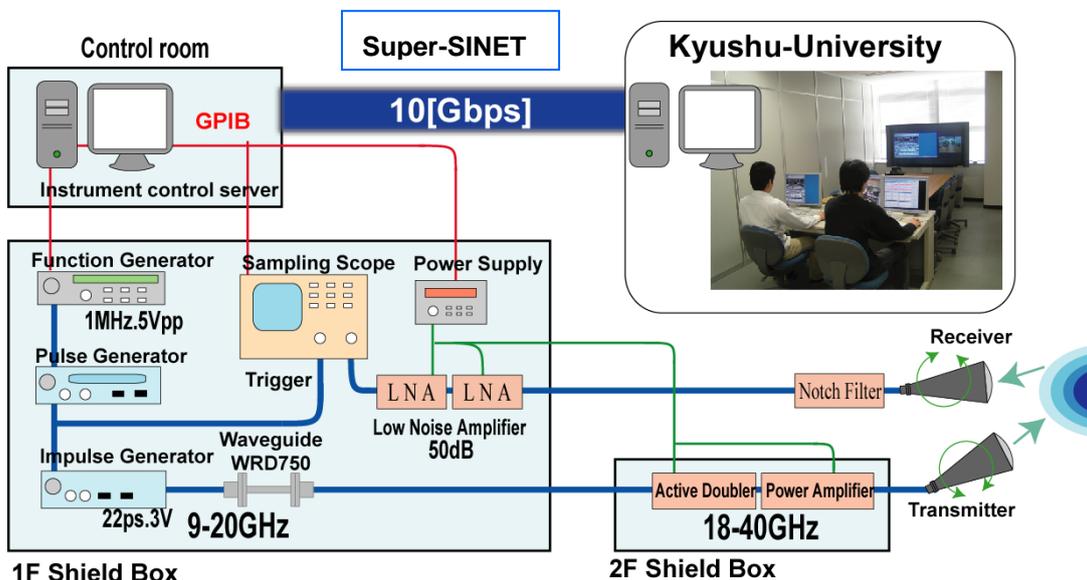


図1. 遠隔実験システムを用いた超短パルス反射計装置の概略.

- ii) 同軸・導波管変換器の周波数帯域拡大のためダブルリッジ導波管 (WRD-180C24: 周波数 18-40 GHz) を使用する。
- iii) カットオフ周波数が 26 GHz から 18 GHz になるよう送受信ホーンの設計製作を行う。
- iv) 受信ホーンで検出された反射波を 18-40 GHz の広帯域マイクロ波アンプで増幅する。

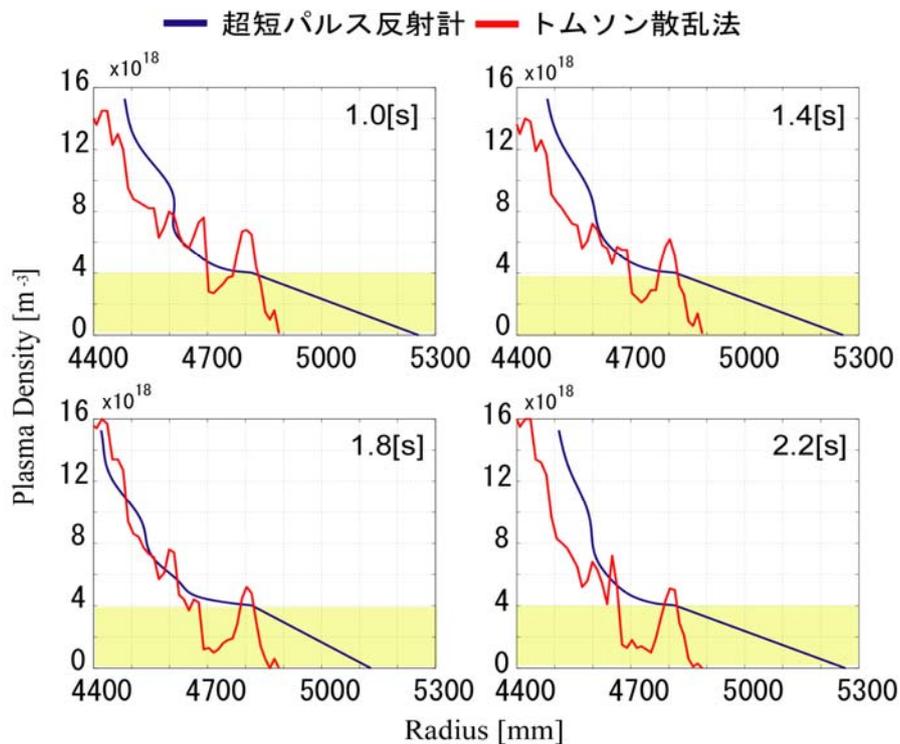


図2. SRA法を用いた密度分布再構成の例.

測定周波数が 26-40 GHz から 18-40 GHz となることにより、測定可能な密度領域は $(0.8-2.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ から $(0.4-2.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ となり、仮定領域を半分に減少させることができる。現在本システムによりルーチン的な測定が進められている。反射計で密度分布を再構成する際、特に正常波モードを使用する場合には、密度がゼロになる半径位置、すなわち初期値を設定する必要がある。平成18年度は、遠赤外レーザー干渉計あるいはトムソン散乱測定装置で得られた分布を参照して初期値を決定する試みを行っている。図2 は後者により得られた結果で、両者の密度勾配が対応していることがわかる。

B. 電子サイクロトロン放射イメージング

ECE イメージングは、プラズマから放射される ECE 信号を、イメージングアレイ（多チャンネル検出器）で計測し解析することにより、等磁気面上の電子温度分布および電子温度揺動のスペクトル分布を得ようとするものである。ECE 信号の検波方式には、周波数（空間）分解・時間分解に優れたヘテロダイン方式が採用されており、得られた中間周波数（IF）信号を多チャンネル化することで、半径方向にも詳細な計測を行うことができる。平成 18 年度は、ECE イメージングに適した IF システムの改良を進めることを行った。

基本となるヘテロダイン IF 周波数は、一般的には 1-10 GHz のマイクロ波領域であり、従来は、マイクロ波同軸部品で構成することが多く、チャンネル数の増大により非常にコストが高くなる傾向にあった。本研究では、マイクロ波集積回路技術を利用して回路を基板化することにより低コスト化を図っている。

平成 17 年度までは、図 3（左）に示すような標準的なウィルキンソン形パワーディバイダ（WPD）を用いることにより多チャンネル化を図ってきた。しかし、パワーディバイダとバンドパスフィルタを接続した場合、パワーディバイダ入力ポートにおけるリターンロスが大きく測定に支障をきたす現象がある。この原因として、フィルタ帯域周波数範囲では 50 Ω に

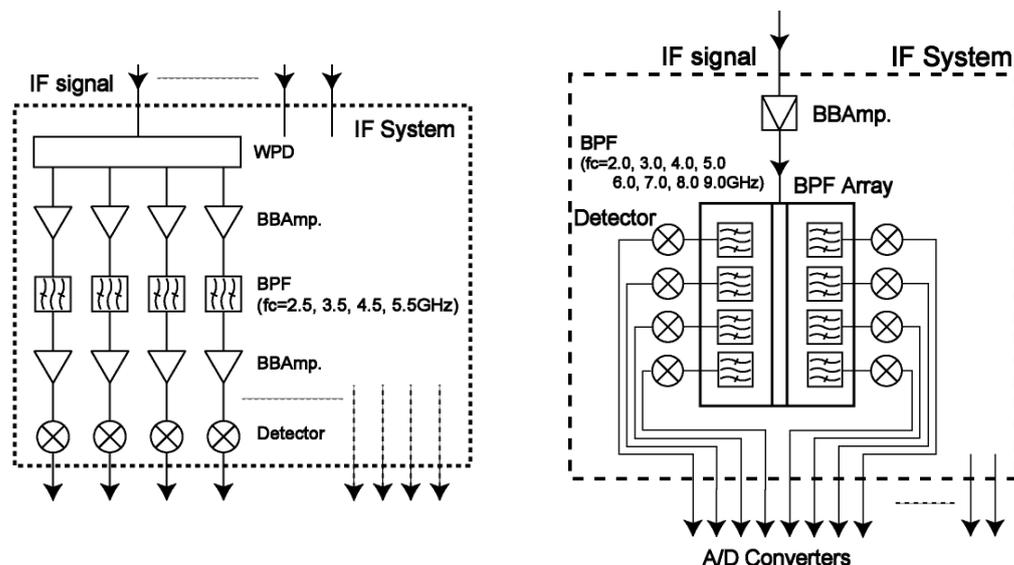


図 3. (左) 従来の IF 回路の概略、(右) 新しい IF 回路の概略.

整合がとれているが、帯域外でインピーダンスがミスマッチしたことが考えられる。

これらの問題を解決するため、図 3（右）のように、パワーディバイダとバンドパスフィルタが一体となった回路を考案し、設計・製作を行った。実際の基板マスクを図 4 に示す。この新しい IF 回路の性能評価の結果、図 5 のようにリターンロスも減少し、低コストを維持しながら特性の良い IF システムを製作できることが実証された。

各チャンネルの周波数領域において検出器応答の優れたものを得るべく、ビデオディテクタの設計・製作も行った。市販されてい



図 4. IF 回路の基板マスク.

る広帯域 (1-12 GHz) のディテクタを使用する場合、電圧定在波比が悪く、感度も悪くなるといった問題がある。そこで、各周波数帯域に整合したディテクタを設計・製作することで、高感度かつ低コストを実現することを

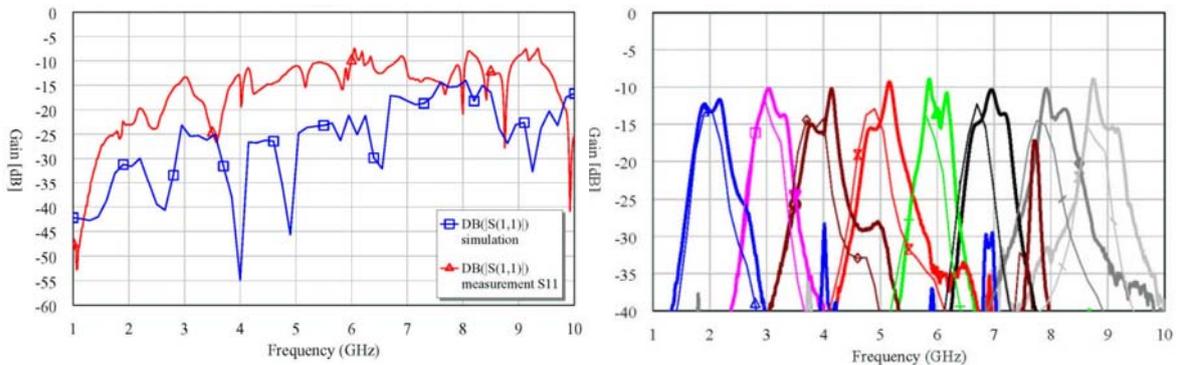


図 5. IF 回路の特性—シミュレーションと実験結果、上：反射特性 (S_{11})、下：通過特性 (S_{21}).

目的とした。このビデオディテクタの性能評価の結果、既存のビデオディテクタよりも高感度なもの (3V/mW 以上) を製作することができた。

【まとめ】

超短パルス反射計の広帯域特性を活用するため、周波数領域を 26-40 GHz から 18-40 GHz に拡張するようシステム変更を行った。これにより低密度側の測定限界が $0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ から $0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ となり、仮定領域を半分に減少させることができた。反射計信号に Signal Record Analysis (SRA) 法を適用し、初期値としてトムソン散乱測定で得られた密度を適用して再構成を行った結果、密度勾配が良く対応することがわかった。

ECE イメージング装置では、ヘテロダイン中間周波数 (IF) 回路の改良を進め、チャンネル間のクロストークの極めて少ない多チャンネルシステムの製作を実現した。平成 19 年始め、新しく製作したイメージングアレイ (多チャンネル検出器) と IF 回路を組み合わせた測定実験を実施した。

スーパーサイネットを用いた遠隔実験制御システムは、大学院修士課程の学生にも LHD 実験への参加が容易となるため、研究意欲の向上にも寄与している。

【今後の計画・課題】

超短パルス反射計および電子サイクロトロン放射イメージング装置について、システムの信頼度向上を図り、オンラインでの LHD 周辺プラズマの密度分布情報ないし、電子温度・揺動スペクトル分布の情報提供を図っていく。

【成果発表】

論文発表

- 1) Z. Shen, N. Ito, E. Sakata, C. Domier, Y. Liang, N. C. Luhmann, Jr., and A. Mase, Proc. 2006 IEEE AP-S International Symposium, Albuquerque (2006.6).
- 2) A. Mase, Y. Yokota, K. Uchida, Y. Kogi, N. Ito, T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Nagayama, and H. Hojo, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10, 10E916-1-3 (2006. 10).
- 3) Y. Yokota, A. Mase, Y. Kogi, T. Tokuzawa, and K. Kawahata, Plasma Fusion Res. **1**, 40.1-40.2 (2006.10).
- 4) N. Ito, A. Mase, N. Seko, M. Tamada, E. Sakata, and Y. Kogi, Proc. 2006 Asia Pacific Microwave Conference, **3**, 2031 (2006.12).
- 5) N. Ito, A. Mase, N. Seko, M. Tamada, E. Sakata, and Y. Kogi, Japan. J. Appl. Phys. **45**, 9244 (2006.12).
- 6) A. Mase, Y. Kogi, H. Hojo, M. Yoshikawa, A. Itakura, T. Cho, T. Tokuzawa, K. Kawahata, Y. Nagayama, N. Oyama, N. C. Luhmann, Jr., H. Park, and E. Mazzucato, to be published in Tran. Fusion Sci. Tech. (2007.3).

口頭発表

- 1) A. Mase, The 3rd Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, Matsushima (2006.8).
- 2) N. Ito, A. Mase, Y. Kogi, N. Seko, M. Tamada, and E. Sakata, The 2006 Joint 31st Int. Conf. On Infrared and Millimeter Waves and 14th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai (2006.9).
- 3) 横田、間瀬、近木、徳沢、川端、長山、田中：第23回プラズマ・核融合学会年会、筑波大学 (2006年11月) 30aB06.
- 4) 迫田卓也, 近木祐一郎, 間瀬 淳, 長山好夫, 山口聡一郎, 川端一男, 坂田栄二, 大山直幸, プラズマ・核融合学会第23回年会, 筑波大学 (2006年11月) 30pC14P.
- 5) 横田、間瀬、近木、徳沢、川端、長山：プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第10回支部大会、九州大学 (2006.12) D2.
- 6) 迫田卓也, 近木祐一郎, 間瀬 淳, 伊藤直樹, 長山好夫, 山口聡一郎, 川端一男, 坂田栄二, 大山直幸, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第10回支部大会, 九州大学 (2006年12月) P-4.