

(4) ミリ波イメージング装置による揺動計測

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	九州大学産学連携センター
	川端 一男	核融合科学研究所
	長山 好夫	核融合科学研究所
	田中 謙治	核融合科学研究所
	徳沢 季彦	核融合科学研究所
	稲垣 滋	核融合科学研究所

はじめに

磁場閉じ込めプラズマでは、不安定性に起因する揺動成分が閉じ込めを支配していると考えられているが、その物理機構について十分に解明されたとは言い難い。プラズマの揺動計測では、プラズマを乱さないことは勿論、i) 周波数および波数スペクトルが得られること、ii) 時間変化および空間分布が得られること、が重要な点であるが、i)、ii) を同時に満足する手法が未だ確立していないのが現状である。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を可能とするため、上記課題を解決する最適手段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、電子サイクロトロン放射 (ECE) イメージングおよび超短パルス反射計について、実験装置の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 への定期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

遠隔実験システムを用いた超短パルス反射計の全体図を図 1 に示す。本体棟 1 階シールドボックス内に設置されているインパルス発生器からの超短パルス波 (22 ps, 3 V) は、WRD-750 導波管 (帯域 7-20 GHz) により低周波成分がカットされると共に、導波管の分散特性によりチャ-プ化されたパルスとなる。これを 14 m の低損失同軸ケーブルにより LHD 本体近傍まで伝送され、アクティブダブラーで遜倍された後さらにマイクロ波パワーアンプ (26-40 GHz, 30 dB) で増幅されたものを入射波として用いている。反射波信号は、同じ同軸ケーブルでシールドボックスまで伝送されるが、伝送損失を補償するため、前後でマイクロ波低雑音アンプを

使用している（26-40 GHz，28 dB）。信号波形は周波数帯域 50 GHz の高速サンプリングスコープにより直接記録され，Signal Record Analysis (SRA) 法により密度分布として再構成される。

遠隔実験システムについては，増幅器，アクティブダブラーへの電源，サンプリングスコープ，超短パルス発振器等の装置の立ち上げから，計測装置の運転条件変更をまず可能とした。この制御は GPIB により行うので，MATLAB の Graphical User Interface (GUI) を構築した。さらに，適宜変更される運転条件に合わせたフレキシブルなアンテナ角度変更を可能にするため，アンテナ角度遠隔制御装置を導入している。制御プログラムは Visual Basic net を利用して構築，

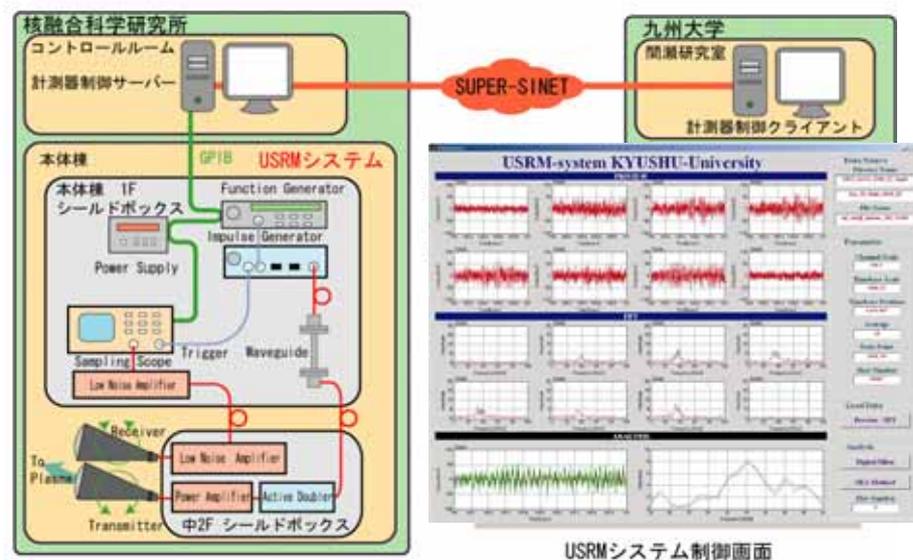


図1 遠隔実験システムを用いた超短パルス反射計装置。

構築したプログラムは GUI 化され，Windows が OS としてインストールされている PC 全てで使用することができる。

計測された反射計信号波形は，データ解析ソフト MATLAB により収集・解析を行う。システムの遠隔制御と同様に MATLAB の GUI ツールを用いて，測定データ解析用プログラムを作成した。その画面を図1右下に示す。左側が反射波とスペクトルの時間変化を，右側が制御パラメータを示す。

平成17年度も本システムによりルーチン的な測定を進めてきている。反射計で密度分布を再構成する際，密度がゼロになる値，すなわち初期値を設定する必要がある。昨年度はLHDのセパトリクス位置を初期値と設定していたが，平成17年度では，遠赤外レーザー干渉計で得られた分布を参照して初期値を設定する試みを行っている。

B．電子サイクロトロン放射イメージング

ミリ波を用いたイメージング測定は、位相イメージング、電子サイクロトロン放射イメージング (ECEI)、反射計イメージング (MIR) と適用が広がっている。ミリ波イメージング装置ではヘテロダイン検波方式が多く使用されており、SN 比の向上のため中間周波数 (IF) として 1-10 GHz を利用することが多い。また、イメージング計測のためには多チャンネル方式が不可欠となっている。特に電子温度揺動測定では ECEI 装置で受信される温度揺動信号の強度が装置雑音や熱雑音と同程度なため、高精度なシステムの開発が要求されている。

ECE 信号を受信するアンテナアレイの性能は非常に重要であり、ゲイン、帯域等を評価基準として高性能化を図ってきた。当研究室でもボウタイアンテナ、ダブルバランストミキサアンテナ (DBMA) などの製作評価を行ってきたが、図 2 に示すパッチアンテナを用いると、研究室内での製作も可能で最適化が容易であるため、本アンテナでの測定準備を進めている。IF 回路の集積化及び多チャンネル化も進めている。アンテナアレイで受信される ECE 信号は局部発振器の LO 信号によりヘテロダイン検波され、IF 信号受信回路で処理される。IF 信号回路の製作にはマイクロストリップ線路を用いた。広帯域及び狭帯域アンプ、帯域通過フィルタ、検波器より構成される。電磁界シミュレータによる設計と開発を行い、基板加工装置による加工作業、実測による試験と評価を行った。受信回路の広帯域及び狭帯域アンプは回路パターンに半導体素子などを組み込み製作した。製作された回路の特性を評価し、図 3 に示すように、シミュレーションとほぼ対応する結果が得られた。

今回製作した検出器アレイおよび IF 回路を LHD の ECEI に設置するべく準備中である。光学系は図 4 にも示されるマイクロ波イメージング反射計 (MIR) の光学系を利用し、ダイクロイックフィルタで分離することにより MIR と ECEI の同時測定が可能となる。17 年度の実機実験を目標としている。

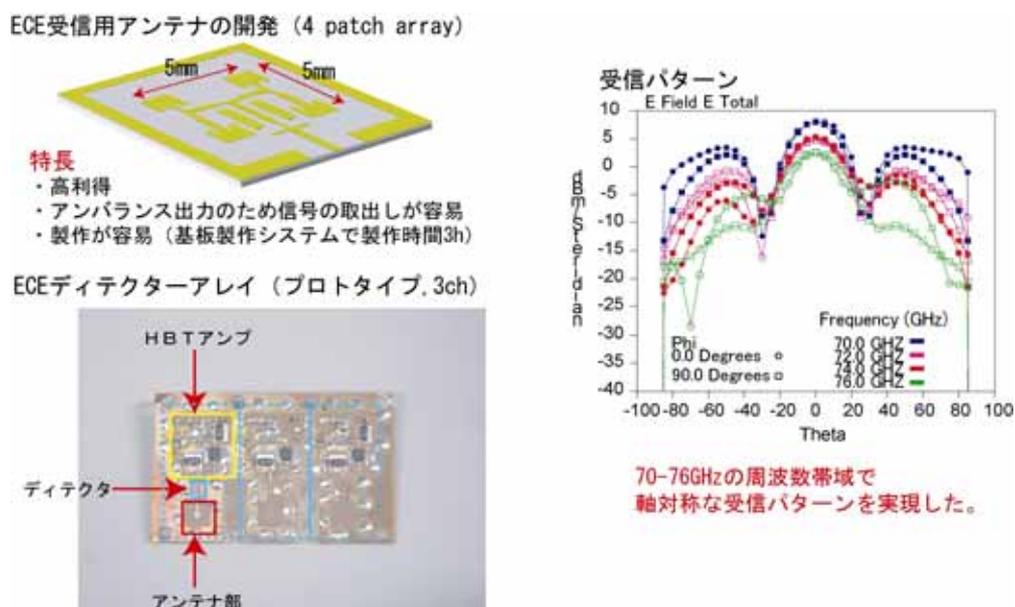


図 2 70 GHz 帯用イメージングアレイと受信パターン。

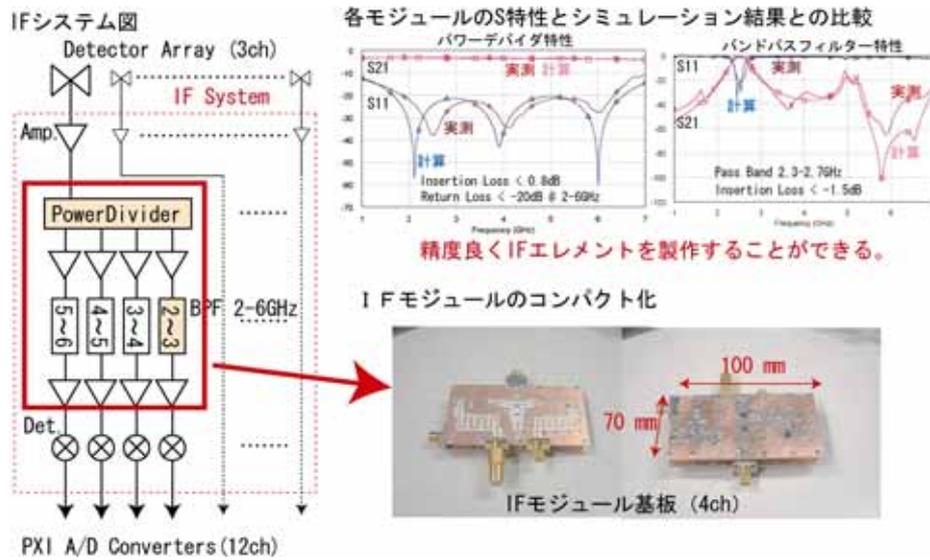


図3 マイクロ波集積回路技術を用いたIF回路の製作。

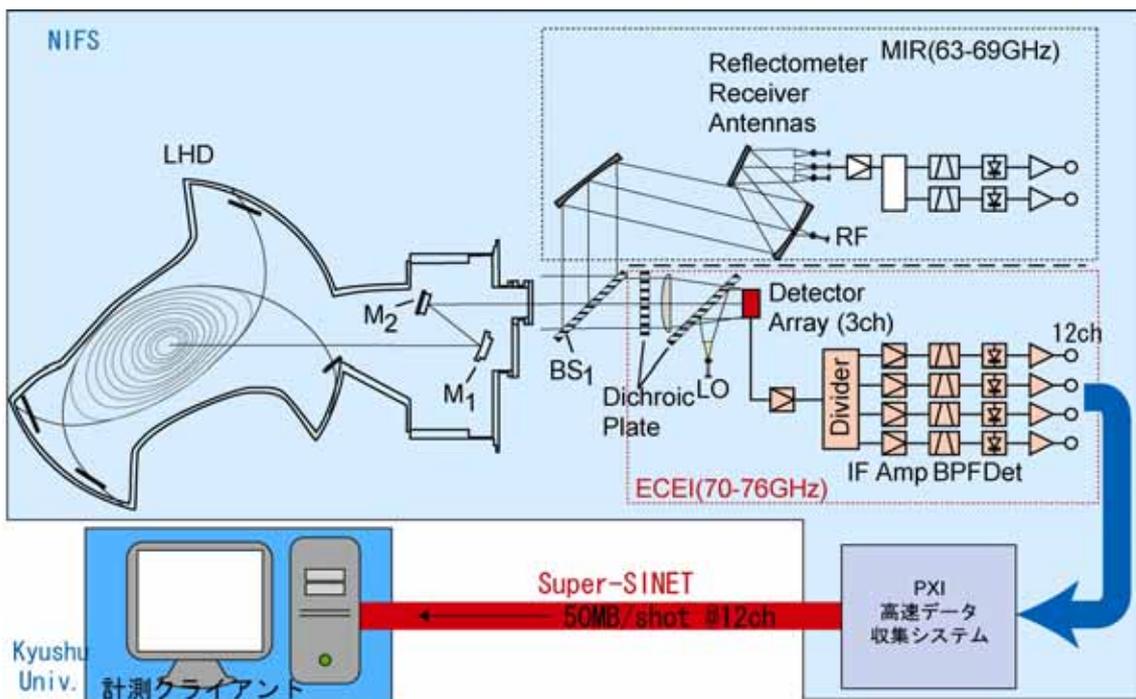


図4 Super-SINETを用いたミリ波イメージングシステム。

まとめ

超短パルス反射計システムではルーチン的な稼動を進めてきた。また、電子サイクロトロン放射イメージングのためのイメージングアレイおよびIF回路の設計・製作を進め、LHD本体への適用を進めた。

今後の計画・課題

超短パル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，平成 18 年度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，電子温度スペクトルの情報提供を図っていく。

【参考文献】

- [1] 横田，間瀬，内田，近木，徳沢，川端，田中，長山，第22回プラズマ・核融合学会年会，タワーホール船堀 (2005).
- [2] 横田，間瀬，内田，近木，徳沢，川端，田中，長山，プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第9回支部大会，長崎 (2005).
- [3] 工藤，近木，間瀬，伊藤，長山，山口，川端，坂田，大山，第 22 回プラズマ・核融合学会年会，タワーホール船堀 (2005).
- [4] 工藤，近木，間瀬，伊藤，長山，山口，川端，坂田，大山，プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第9回支部大会，長崎 (2005).
- [5] Y. Kogi, A. Mase, K. Kudo, M. Ignatenko, N. Ito, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, M. Aoi, E. Sakata, Int. J. Infrared and Millimeter Waves (to be published).