



プロジェクトレビュー プラズマ燃焼実験のための先進計測

3. 高性能分布計測

3.1 高性能マイクロ波計測

間瀬 淳¹⁾, 近木祐一郎¹⁾, 伊藤直樹¹⁾, 横田裕也¹⁾, 長山好夫²⁾,
山口聡一朗²⁾, 徳沢季彦²⁾, 北條仁士³⁾

¹⁾九州大学産学連携センター, ²⁾核融合科学研究所, ³⁾筑波大学数理物質科学研究科

Keywords:

microwave diagnostics, microwave devices and systems, profile measurements, fluctuation measurements, imaging

3.1.1 はじめに

プラズマのマイクロ波・ミリ波計測は、電磁波のプラズマ中の伝搬に基づく伝搬定数の変化、電子の運動に起因する入射波の周波数・波数変化(ドップラーシフト)、およびプラズマからの放射パワーの評価などを利用しており、それぞれ、干渉法/反射法、散乱法、放射法に分類することができる。最近では、ミリ波帯の伝送技術およびアンテナ技術、マイクロ波集積回路(Microwave Integrated Circuit: MIC)やモノリシックマイクロ波集積回路(Monolithic MIC: MMIC)の発達によるマイクロ波・ミリ波デバイスの進展やハードおよびソフト両面における計算機技術の進歩により、上記計測システムが高性能化し、密度および温度の高時間・空間分解測定、さらにはプラズマ揺動の可視化も実現しつつある。

本章では、特定領域研究「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」のもとで進めてきた、先進的ミリ波計測法のためのマイクロ波・ミリ波デバイスの技術開発と、それらを組み合わせた計測システムの実機適用について、特に最近注目を集めているイメージング計測を中心に記述する。

3.1.2 位相イメージング干渉計

マイクロ波干渉計はプラズマの電子密度分布を測定する方法として標準的に用いられてきた。大型の磁場閉じ込めプラズマ(密度 $10^{19} - 10^{20} \text{ m}^{-3}$)では、プラズマによる電磁波の屈折の効果をさけるため、赤外から遠赤外線($\sim 100 \mu\text{m}$)の波長が入射波として用いられている。一方、半導体プロセスなどに使用される産業用プラズマや、磁場閉じ込めプラズマでも比較的低密度の領域では、マイクロ波あるいはミリ波電磁波の使用が可能である。

半径方向密度分布を得るためには多チャンネル干渉計が必要であるが、最近、プラズマの像を検出器上に描くというイメージングの概念を干渉計に適用した位相イメージ法が実用化されている。これは、入射波を準光学結像系、すなわち、レンズあるいはミラーなどを用いて拡大し、プラズマ断面全体に照射した後、その透過波を検出器アレイ上

に参照波とともに集光し、プラズマ断面の密度情報を得る方法である。

本干渉計をガンマ10に適用した例を図1に示す[1]。プローブビーム(周波数70 GHz)はコルゲート(スカラー)ホーンを出たのち放物面鏡により拡大されプラズマに照射される。透過光は、楕円面鏡をもつ受光系により集光され、ビームスプリッタによりローカルビームとミックスされたのちボウタイアンテナ上に位相像として描かれる。対向する測定窓間の距離は3 m、測定窓は40 cm×14 cmの熔融石英である。低周波のECRHパワーの混入を防ぐため受信測定窓にはダイクロイック板が設置されている。位相検出器としてはクオドラチャー方式を採用した。システムの空間分解はアンテナの間隔と光学系の倍率の積で評価され、垂直方向2.7 cm、水平方向2.5 cmである。

平成18年度、クオドラチャー位相検出器とバッファアンプおよびA/D変換器の増設を行い、4×4チャンネルの検出器全ての有効利用を図った。平成17年度までは密度分布の画像化に、同一条件のプラズマを5-10ショット要していたが、今年度より1-3ショットで得ることができるよう

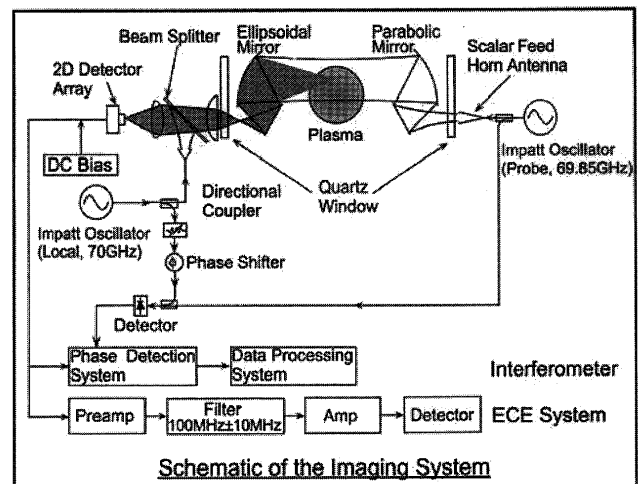


図1 位相イメージ法干渉計装置[1].

うになり、実験の高効率化を図ることができた。また、本システムは、時間分解にも優れているため、揺動の周波数スペクトルを得ることができ、チャンネル間の揺動の位相情報から波数スペクトルの導出も可能である。閉じ込め電位形成実験時の密度分布および揺動スペクトルの計測は、電位形成の物理的解明にも貢献することが期待される。

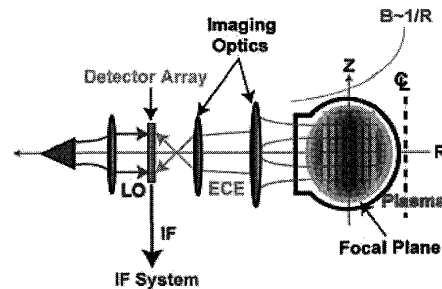
3.1.3 電子サイクロトロン放射イメージング (ECEI)

電子サイクロトロン放射 (ECE) 測定にイメージング方式を適用した場合の原理図を 図 2 (a) に示す。プラズマの断面像を集光光学系により検出器アレイ上に結像する。ヘテロダイン検波方式を採用しており、検出器はミキサとして動作、周波数変換された中間周波数 (IF) 信号を IF システムに供給する。ECE パワーは、等磁気面上の電子温度に比例するので、ポロイダル方向ないしトロイダル方向の電子温度分布がアレイ検出器で得られ、深さ方向 (半径方向) の分布が多チャンネル IF システムで得ることができるため、ECE イメージング測定から電子温度の断面像を描くことができる。また、測定の積分時間を短くする ($\sim 1 \mu\text{s}$) ことにより、電子温度の揺動成分を評価することができるが、多チャンネル検出間あるいは IF チャンネル間の相関関数から揺動の周波数に対する波数情報を導出することが可能となる [2, 3]。

図 2 (b) に ECE イメージングシステムの概略を示した。特定領域研究で進めてきた、ECE イメージングの要素技術の開発について記述する。最も重要な要素としてイメージングアレイと呼ばれている、多チャンネル検出器がある。当グループでは、ボウタイアンテナ [4]、ダブルバランストミキサアンテナ [5]、パッチアンテナ [6] などの適用を行ってきた。ここでは、指向性の対称性、集積化に優れているパッチアンテナを使用したイメージングアレイの設計製作について述べる。検出器 1 チャンネルの構成を図 3 (左) に示す。電磁界解析シミュレータにより周波数帯域 70–76 GHz に対する設計を行い、基板加工装置により製作する。テフロン基板上に、検出器 1 チャンネルに対して 4 つのパッチアンテナを配置、パッチアンテナ、アンテナ中心に接着したミキサ、およびミキサで周波数変換された信号成分を増幅するための HBT (ヘテロ接合バイポーラトランジスタ) アンプから構成される。アンテナの受信特性は、高利得かつ受信周波数帯域で軸対称な受信パターンが実現されており、チャンネル間のクロストークも小さいことが期待されるため、イメージングアレイにも適している。図 3 (右) に 5×5 素子パッチアンテナアレイを示す。

既に述べたように、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。通常の ECE ヘテロダイン受信方式では、基本となる IF 周波数は 1–10 GHz のマイクロ波領域である。従来は、マイクロ波同軸部品でパワーディバイダ、フィルタバンクを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た。

(a)



(b)

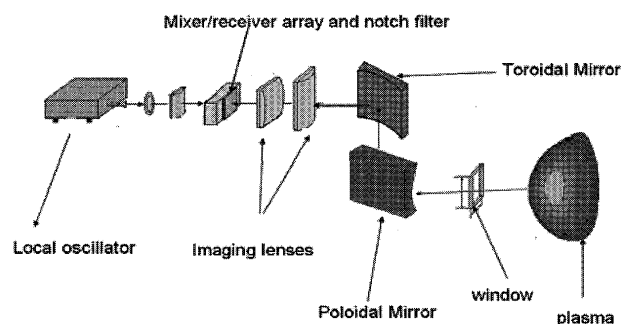


図 2 (a) 電子サイクロトロン放射 (ECE) イメージングの原理。
(b) ECE イメージング装置の概略。

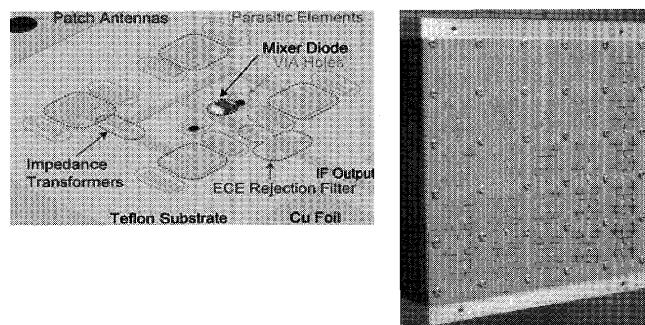


図 3 パッチアンテナの構成 (左) と 5×5 チャンネルイメージングアレイ (右)。

IF システムを平面基板上で多チャンネル化する場合、標準的なウィルキンソン形パワーディバイダ (WPD) を用いることが多い。しかしながら、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 50Ω に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することが考えられる。

これらの問題を解決するため、図 4 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、電磁界シミュレータを用いて設計・製作を行った。実際の基板マスクを図に示す。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。

ヘテロダイン検波では ECE パワーに比例した出力を得るため、IF 周波数信号 (1–10 GHz) をディテクタにより自乗検波するが、IF 各チャンネルの周波数において電圧応

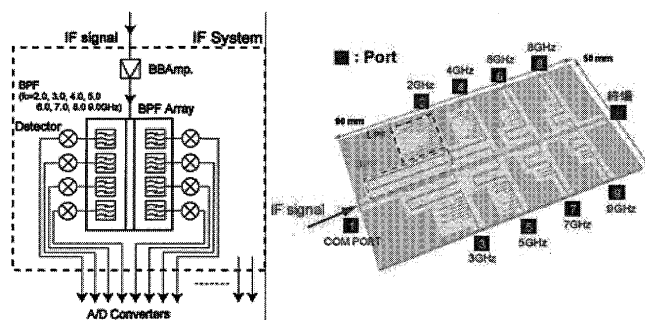


図4 集積化された中間周波数(IF)システム。

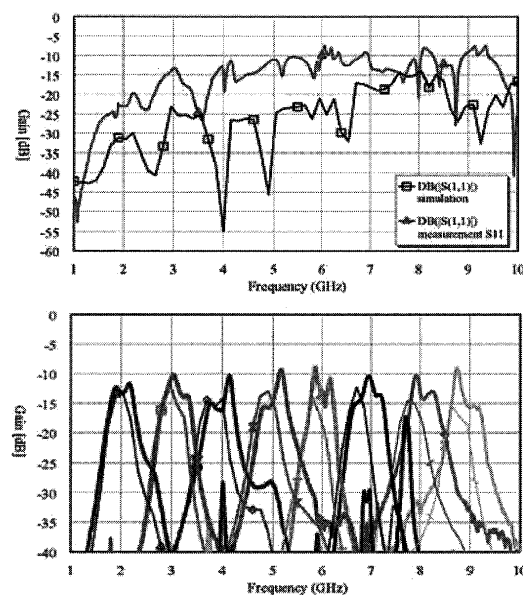


図5 IFシステムの特性。(a)反射率(S11), (b)透過率(S12)。

答の優れたものを得るべく、マイクロ波ディテクタの設計・製作も行った。市販されているマイクロ波帯域のディテクタを使用する場合、電圧定在波比が大きいため感度も悪くなるといった問題がある。そこで、各周波数帯域で整合したディテクタを用いることで、高感度かつ低コストを実現することを目的とした。このディテクタの性能評価の結果、既存のディテクタよりも高感度なもの(3 V/mW以上)を製作することができた。

イメージング計測システムでは、低周波領域のノイズは、導波管の遮断特性を利用したダイクロイックフィルタにより比較的容易に抑制できるが、高周波領域のノイズ、特に加熱用ジャイロトロンからの混入防止は困難かつ重要な課題である。一つの方法として、準光学的ノッチフィルタを製作しイメージングアレイ前面に使用することが考えられている。本課題に関しては、日米科学技術協力を通じて、米国UCDグループと研究協力を進めており、UCDで設計したフィルタを九州大学で検討し、九州日立マクセル(株)の超精密加工(Electro Fine Forming: EF2)技術を利用し製作している。現在は、図6(a)に示すパターンを素子とし、200×200 mmにわたって配列したフィルタを製作し、最適化を図っている。電磁界シミュレータを用いた設計および製作を行うが、まず金属膜厚を決定するため、同じパター

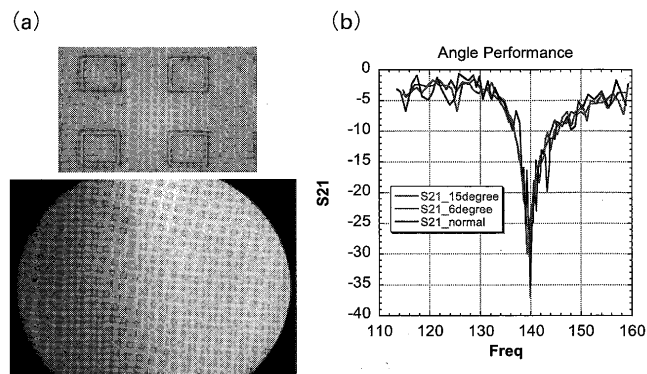


図6 (a)EF2で製作されたノッチフィルタのパターン、(b)周波数特性[7]。

ンで種々厚さのフィルタを製作し特性を評価した。その結果、25 μm の厚さで最も良いリジェクション度が得られることがわかった[7]。現在、フィルタ間隔800 μm 、各フィルタの大きさ、縦280 μm 、横360 μm 、線幅40 μm を基準としている。図6(b)に示すように、所要周波数140 GHzにおけるリジェクション度は-25 dB以上、バンド幅100-200 MHzと優れた特性で、入射角度依存性も0-15度ではほぼ同様な特性が得られている。本ノッチフィルタは、TEXTORにおけるECEイメージングシステム[8,9]に適用されている。

3.1.4 反射計

(1)超短パルス反射計

電磁波はプラズマ中でその周波数に対応した密度層(カットオフ層)で反射するという特性をもっている。このとき、プラズマのエッジから反射点までの電磁波の飛行時間ないし位相遅れを計測することができれば距離を算出し、密度分布を得ることができる。プラズマに入射する電磁波の周波数成分が広帯域になれば、広範囲の密度分布を得ることが可能となる。反射計を用いた電子密度分布測定における最大の課題は、真空窓あるいは導波管結合部などにおけるスプリアス反射とともに、反射波と参照波の間の干渉測定によって得られる位相変調信号(ビート信号)がプラズマの密度揺動による変調成分によりマスクされ、測定が困難となることである。この揺動成分の影響を避けるため、様々な手法が考案され適用されている。本研究では、その1方式として開発および改良が進められている超短パルス反射計について述べる。図7に核融合科学研究所・大型ヘリカル装置(LHD)に適用されたシステムの概略を示した[10]。

本体地下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9-20 GHz)により、低周波成分が導波管のカット周波数により抑制されるとともに、その分散特性によりチャー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、アクティブダブラで増倍された後さらにマイクロ波パワーアンプ(18-40 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

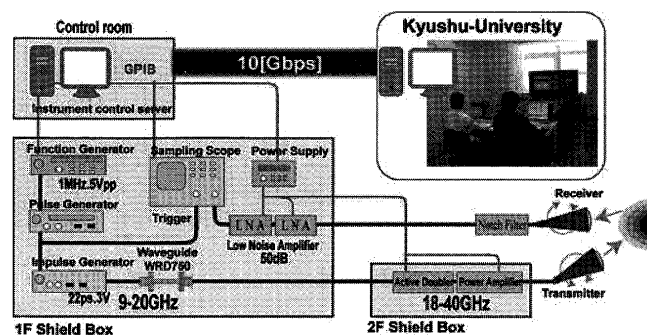


図7 LHDにおける超短パルス反射計装置。

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 (18–40 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し Signal Record Analysis (SRA) 法により解析される [11].

本反射計は、スーパー SINET を介した遠隔実験制御により、増幅器、アクティブダブラへの電源、サンプリングスコープ、超短パルス発生器などの装置立ち上げから、計測装置の運転条件まで変更可能となっている。制御は、MATLAB の Graphical User Interface (GUI) を構築することにより、GPIB により行われている。さらに、適宜変更される運転条件に沿ったアンテナ角度変更を実現するため、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、プログラムは GUI 化されている [12].

平成17年度までに構築された 26–40 GHz 超短パルス反射計装置の詳細は文献 [12] に記載されている。平成18年度、周波数領域の拡張のため、i) アクティブダブラを 26–40 GHz から 18–40 GHz のものに変更、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、iii) 導波管の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、iv) 18–40 GHz の広帯域マイクロ波アンプの使用、などを行った。

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 $(0.8\text{--}2.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ から $(0.4\text{--}2.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ となる。現在本システムにより LHD においてルーチ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。現在、遠赤外レーザ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 8 は後者により得られた結果で、両者の密度勾配が良く対応していることがわかる。

徳沢らは、反射波の信号解析にコンスタント・フラクション・ディスクリミネータ (Constant Fraction Discriminator: CFD) と時間電圧変換器 (Time to Amplitude Converter: TAC) を組み合わせたシステムを適用している [13]. 受信された反射波信号は、マイクロ波増幅されたのち高速検波器で自乗検波され再度パルス化される。CFD

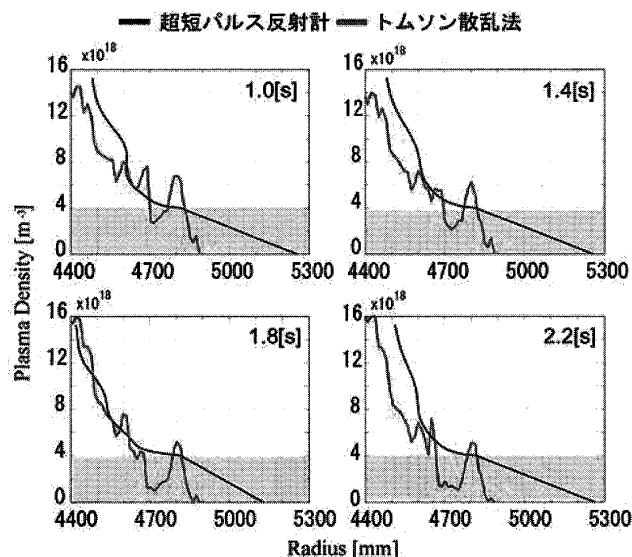


図8 再構成された密度分布

は、反射波パルスと不要なノイズ成分を弁別すること、入力パルスに応答し一定の振幅およびパルス幅をもった信号を出力する役目をもつ。TAC では、別途入力されたスタートパルスとその後入力される信号パルスをストップパルスとして、その間の時間差に比例した電圧出力を得る。図 9 は周波数 26–40 GHz, 10 チャンネルのフィルタバンクを使用したシステムである。

現在は、周波数 8–18 GHz のシステムを付加され、チャンネル数も増大し、28 チャンネルが稼動している。図 10 は 28 チャンネルのシステムで得られた信号から再構成した密度分布である。本システムは、時間分解に優れているため、同一チャンネルにおける時間変化信号から、密度のアイランド構造の変化、巨視的不安定性などの解明に資することができる [13].

現在信号源として、パルス幅 23 ps のインパルス発生器 (PSPL 社 4015) が使用されているが、最近パルス幅 16 ps のインパルス発生器 (PSPL 社 4016) が市販されており、これを用いると、測定可能な上限周波数として 40 GHz から 60 GHz への拡張が期待される。

反射計を用いると、プラズマの密度分布とともに、エッ

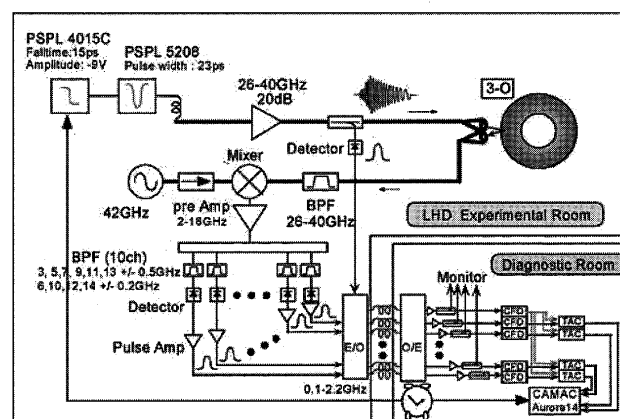


図9 CFD および TAC を用いた超短パルス反射計 [13].

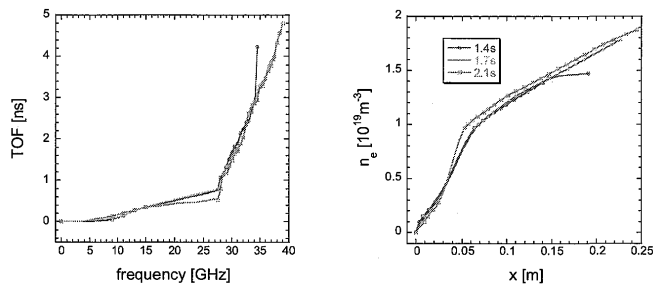


図10 同上装置により得られた密度分布

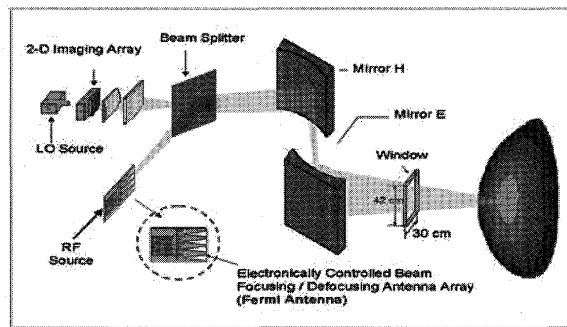


図11 マイクロ波イメージング反射計の原理[7].

ジ領域での密度勾配，さらにはプラズマ形状や回転速度も測定できる可能性があり，ITERにおいても主要計測手段として，特にダイバータプラズマへの適用が期待されている．超短パルス反射計をITERダイバータプラズマに適用する場合，密度 $10^{20} - 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ，反射計の周波数領域として $\sim 500 \text{ GHz}$ パルス幅 $1 - 2 \text{ ps}$ が必要とされている．電気回路でこのパルス幅を得ることは困難で，光伝導スイッチにフェムト秒レーザを照射することにより得られる短パルスが有効な可能性がある[14]．

(2) イメージング反射計 (MIR)

反射計にイメージング方式を適用する場合，図11に示すように，プラズマからの反射波信号を集光光学系により検出器アレイ上に結像する．深さ方向（半径方向）の密度分布が異なる入射周波数成分により得られ，ポロイダル方向ないしトロイダル方向の分布がアレイ検出器により得ることができる．MIRではプローブビームと受光系が同軸になるようにビームスプリッタによって混合する．ECEIと異なる点は，プラズマ中に密度揺動が存在するとき，カットオフ層で入射波が乱反射するため，反射波が広がることになる．受信された反射波から揺動の振舞いを含めたプラズマの像を忠実に再現するためには，できるだけ多くの反射波を集める必要があり，可能な限り大口径の受光光学系を使用することが不可欠となる[15]．また，入射波をカットオフ層に集光することが必要であり，異なるカットオフ層の位置やプラズマの変位に対応するためには，入射ビームの集光・発散および偏位を制御することが重要となってくる．このためのデバイスとして，図12(a)のようなフェーズドアレイアンテナを用いたデバイスが次世代イメージングシステムに適用するべく研究されている[16]．図12(b)にフェーズドアレイアンテナを九州日立マクセルEF2技

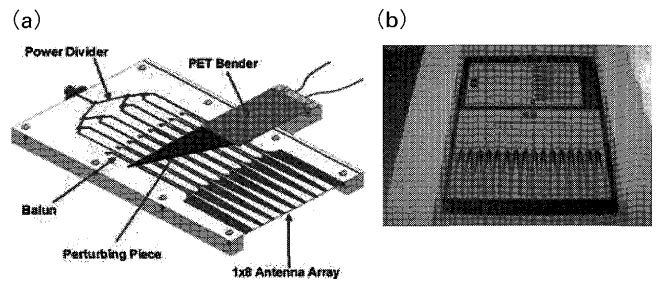


図12 (a)ピエゾ素子を用いたビーム制御デバイス，(b)EF2で製作されたフェーズドアレイアンテナ[16]．

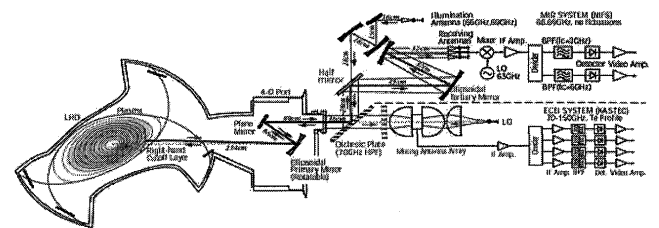


図13 LHDにおけるMIR/ECEI装置[17]．

術で製作したものを示した．現在，周波数 40 GHz でのテストが進行している．

MIRに使用する受光光学系は，ECEIにも適用できるため，両者を同じ場所に設置し，稼動することがなされている．図13にLHDに設置されているMIR/ECEIシステムを示した[17]．

3.1.5 ミリ波診断シミュレーション

計測装置が高度化するにつれ，システムの設計・製作を迅速に進めていくために，計算機を用いた装置のシミュレーションを行っていくことが極めて有効な手段となる．本節では，北條により研究が進められている，ミリ波領域の診断シミュレーションについて記述する．

計算機シミュレーションのための基礎方程式は，電場 E および磁場 B に対するマクスウェル方程式と誘導電流密度 J に対する運動方程式で構成される[18, 19]，すなわち，

$$\frac{\partial}{\partial t} B = -\nabla \times E, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} E = c^2 \nabla \times B - \frac{1}{\epsilon_0} J, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} J = \epsilon_0 \omega_{pe}^2 E - \frac{e}{m_e} J \times B_0, \quad (3)$$

ただし， $\omega_{pe} (= (e^2 n / m_e \epsilon_0)^{1/2})$ は電子プラズマ振動数， B_0 は外部磁場である．式(3)を導出する際，誘導電流密度は $J = -en_0 v_e$ (v_e 電子の流速)で表されたとする．式(1-3)は，外部磁場に垂直な正常波モード，異常波モードいずれの場合も記述することができる． $B_0 = B_0 e_z$ のとき E_z は次の分散関係をもつ正常波モードを表すことになる．

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 + c^2 k^2, \quad (4)$$

他方， E_x および E_y 成分は，異常波モードに対応し，分散関

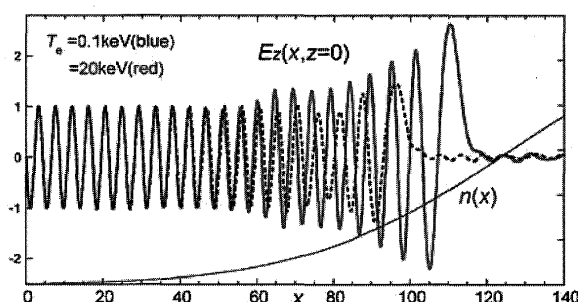


図14 ビーム中心($z=0$)における反射波信号 $E_z(x, t)$. $T_e=20$ keV (実線), 0.1 keV (破線) [18].

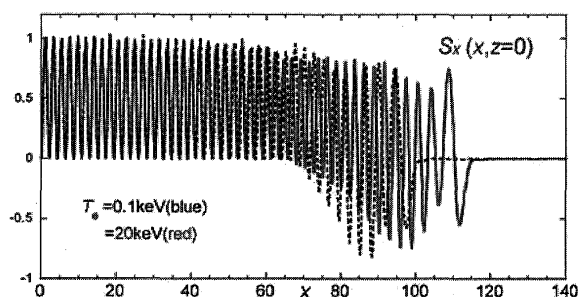


図15 ビーム中心($z=0$)における反射波信号 $S_x(x, t)$. $T_e=20$ keV (実線), 0.1 keV (破線) [18].

係は次式で表される.

$$\left(\frac{kc}{\omega}\right)^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{\omega^2 - \omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{pe}^2 - \omega_{ce}^2}, \quad (5)$$

ただし, ω_{ce} は電子サイクロトロン振動数である. OモードとXモード間のクロスポーラリゼーション散乱が, 式 $J \times B_0$ より生じることになる. 計算機コードは有限差分時間領域 (FDTD) 法に基づいている.

シミュレーションの例として, 燃焼プラズマにおけるミリ波伝搬で問題となる相対論的効果について議論する. 最も重要な効果は, 相対論的電子質量の変位によるカットオフ層の変化である [18]. 電子の質量 m_e は $m_e(1+5/\mu)^{1/2}$ となる. ここで, $\mu = m_e c^2 / T_e$ (T_e は電子温度である). このときカットオフ密度の変位は,

$$\frac{\Delta n}{n_c} = \frac{n_{c,rel} - n_c}{n_c} = \begin{cases} \sqrt{1+5/\mu} - 1, & (\text{O-mode cutoff}) \\ \frac{\sqrt{1+5/\mu} - 1}{1 - \omega_{ce}/\omega}, & (\text{upper X-mode cutoff}) \end{cases}$$

相対論的効果によるカットオフ密度のシフトは, 異常波モードのときより重要となる. 図14および図15は異常波伝搬に対する二次元シミュレーションの結果である. カットオフ位置の理論値は, $x_c = 98.2$ ($T_e = 0.1$ keV) および $x_c = 112.5$ ($T_e = 20$ keV) である. 電子密度分布が他の測定装置により得られた場合, 反射計による分布再構成結果との比較から電子温度分布を評価することも考えられている [19].

この診断シミュレータを利用し, 金属ロッドないしプラ

ズマロッドの配列 (フォトニクス結晶) によるビーム制御の研究も進められている [19]. フォトニクス結晶導波路を用いることにより, 従来困難とされてきたミリ波からサブミリ波帯におけるビームの伝送, 発散, 集光, フィルタリングなどが可能であり, 伝送損失あるいは挿入損失の課題が解決されるなら, 幅広い応用が期待される.

3.1.6 まとめ

核燃焼プラズマの主要計測法として期待されている, 反射計あるいは電子サイクロトロン放射 (ECE) 測定の改良, 特に同測定システムを画像計測システムとして発展させるための要素技術の開発と評価, 計測システムの大型装置適用の現状について, また, 計測システム開発の指針となる, 計算機を用いたミリ波診断シミュレーションについて記述した.

謝辞

本研究は, 科学研究費特定領域研究 (No. 16082205), 核融合科学研究所一般共同研究 (NIFS04KCHH002), 日本原子力研究開発機構協力研究, および, Super-SINET 共同研究により進められてきた.

参考文献

- [1] A. Mase *et al.*, to be published in Trans. Fusion Sci. Tech. **51**, 52 (2007).
- [2] H.K. Park *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 4239 (2003).
- [3] 長山, 間瀬, J. Plasma Fusion Res. **81**, 337 (2005).
- [4] A. Mase *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1445 (2003).
- [5] Y. Kogi *et al.*, Proc. Joint 30th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 13th Int. Conf. on Terahertz Electronics, Williamsburg, 604 (2005).
- [6] Y. Kogi *et al.*, Proc. 16th Int. Toki Conf., Toki (2006). to be published in Plasma Fusion Res.
- [7] Z. Shen *et al.*, Proc. 2006 IEEE AP-S International Symposium, Albuquerque (2006); Z. Shen *et al.*, Proc. 16th Int. Toki Conf., Toki (2006). to be published in Plasma Fusion Res.
- [8] H. Park *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 195003 (2006).
- [9] H. Park *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 195004 (2006).
- [10] Y. Kogi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3810 (2004).
- [11] Y. Yokota, A. Mase, Y. Kogi, T. Tokuzawa, and K. Kawahata, Plasma Fusion Res. **1**, 40.1-40.2 (2006).
- [12] A. Mase *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10E916 (2006).
- [13] T. Tokuzawa *et al.*, Nucl. Fusion **46**, S670 (2006).
- [14] T. Tokuzawa *et al.*, Proc. 16th Int. Toki Conf., Toki (2006).
- [15] M. Ignatenko, A. Mase, L. G. Bruskin, Y. Kogi and H. Hojo, Nucl. Fusion **46**, S760 (2006).
- [16] Lu Yang *et al.*, Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp., Hawaii (2007).
- [17] S. Yamaguchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10E930 (2006).
- [18] H. Hojo, A. Fukuchi, A. Itakura and A. Mase, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3813 (2004).
- [19] H. Hojo, A. Mase and K. Kawahata, Proc. 16th Int. Toki Conf., Toki (2006). to be published in Plasma Fusion Res.