

講座

電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最前線

Plasma Diagnostics with Electromagnetic Waves: Fundamentals and Frontiers

1. はじめに

出射 浩

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター

(原稿受付2011年4月20日)

電磁波によるプラズマ計測は、プラズマへの擾乱が少なく、プラズマの密度、温度等の基本パラメータを測定できるため、古くから広く用いられてきた。ITER以降の燃焼プラズマに対しても、パラメータの計測手法が限定される中、比較的容易に中性子遮蔽もできることから、有望な手法として重視されている。

電磁波を用いたプラズマ計測の原理は、興味深いプラズマ・波動相互作用を活用したものである。計測対象となるプラズマは、比較的低温、密度の低い実験室プラズマから、高温・高密度の核融合燃焼プラズマまでと広範なパラメータ領域となる。本講座では、プラズマ科学や核融合学の研究をスタートした学生、大学院生から若手研究者を対象として、まず、電磁波を用いたプラズマ計測の原理(理論)、検波方式や計測技術といった基礎的事項、主な計測結果を解説する。その後、イメージング法やドップラー反射法などのプラズマ先進計測における最近の進展、さらにITER以降の燃焼プラズマ計測での課題と新たな取り組みを紹介する。

本講座の構成、およびそれぞれの執筆者は次のとおりである。

2. 電磁波を用いたプラズマ計測の基礎

九州大 間瀬 淳, 核融合研 川端一男

電磁波を用いた計測法は、電磁波の電界ベクトル E および伝搬方向を示す波数ベクトルとプラズマの閉じ込め磁場 B_0 の位置関係により屈折率(誘電率)が異なる表式で与えられることに基づいている。代表的なものとして、干渉法/偏光法、反射法、放射法、散乱法がある。本章では、これら計測法の基本的原理を記述し、各測定法の実際を述べる。

3. 先進計測技術・最近の進展

3.1 マイクロ波イメージング

核融合研 長山好夫・吉永智一, 福岡工業大 近木祐一郎
プラズマ揺動の時間・空間計測のため、マイクロ波イメージング法が開発されている。本節では電子温度揺動計測のための電子サイクロトロン放射イメージング(ECEI)、電子密度揺動計測のためのイメージング反射計(MIR)を紹介する。いずれも二次元あるいは三次元計測が可能である。マイクロ波イメージングのキーデバイスとシステム、および最新の実験について紹介する。

3.2 ドップラー反射計

核融合研 徳沢季彦, 東京大 江尻 晶

本節では、近年注目を浴びているドップラー反射計について解説する。ドップラー反射計は入射マイクロ波のカットオフ現象と密度揺動による後方散乱現象とを共用することによって、プラズマの回転速度を空間分解良く測定する手法である。計測原理に併せ、ゾーナル流であるGAM(Geodesic Acoustic Mode)観測など最近の計測結果も紹介する。

3.3 散乱計測

核融合研 久保 伸, 田中謙治, 西浦正樹

本節では散乱計測のうち、協同トムソン散乱を取り上げ、特有な原理、計測手法を概説する。協同散乱と非協同散乱の違い、散乱計測に必要なプローブビームや受信回路といった計測システムの概要を解説し、散乱断面積の評価と実験観測との比較にも触れ、イオンの速度分布関数観測や波動観測といった最近の実験結果を紹介する。

4. ITER 実験での課題と新たな取り組み

4.1 電子密度計測の課題と開発状況

核融合研 秋山毅志

本節では ITER 以降での電子密度計測の課題（反射鏡の光学特性保持など）とその対策，現在進められている信頼性の高い密度計測手法（偏光計，ディスパージョン干渉計など）の開発状況について述べる。

4.2 電子温度計測の課題と開発状況 九州大 出射 浩

本節では ITER 以降での電子温度計測の課題として，高温プラズマでの観測高調波のオーバーラッピングやトムソン計測温度との差といった問題，高い観測周波数による計測伝送系での問題を解説する．併せて，周波数変換後の高速サンプリング処理による詳細な周波数スペクトラム計測への取り組みを紹介する。

4.3 電磁波測定における相対論的効果の導入

北條仁士，九州大 間瀬 淳

電子温度が 10 keV 以上と高温になると，温度の効果（相対論的効果）を分散関係（誘電率表式）に含める必要があ

る．干渉法，反射法ならびに放射法を中心に相対論的効果について解説する。

扱う電磁波の周波数（ないし波長）は，主にプラズマ密度，閉じ込め磁場で決まるプラズマ周波数，サイクロトロン周波数で特徴づけられるが，本講座において対象とする範囲をマイクロ波・ミリ波からサブミリ波・赤外線領域までとし，さらに波長の短い可視光領域等は除外する。

本講座を通じ，読者がプラズマパラメータの計測法を理解し，計測に発生し得るエラー，測定限界，考慮すべき補正とそのパラメータ範囲等を正しく把握することを期待する．さらに基礎となる測定技術，最新の測定技術を知り，課題となっている点を理解することで，さらなる測定技術の開発へと繋がっていくことを期待する．歴史が示すように，1桁高い時間分解能，空間分解能，精度の計測が実現されれば，プラズマ物理研究の新しい局面を拓くことができると考えている。