



## 講座 電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最前線

### 5. おわりに

間瀬 淳

九州大学産学連携センター

(原稿受付：2011年5月30日)

マイクロ波・ミリ波領域の電磁波を用いた計測法は、全天候型の遠隔探査（リモートセンシング）や、誘電体媒質中の透過特性を生かした、物体内部の非破壊検査の手段として、様々な分野で適用されてきた。プラズマ物理の分野では、プラズマの遮断周波数、共鳴周波数などの特性周波数が、マイクロ波、ミリ波に分布し、電磁波とプラズマとの相互作用が興味をもたらしこともあり、プラズマ物理の研究が盛んになりつつあった1960年前後から、放射、散乱などの素過程の研究を中心に進められてきた。

1970年前後からは、トカマクを中心とした磁場閉じ込め方式の進展によりプラズマが高温・高密度化し、プローブに代わる非接触、非摂動計測法として、分光計測や粒子計測とともに、殆どの磁場閉じ込め装置に適用されるようになった。

電磁波計測法は、透過（干渉／偏光）法、反射法、放射法、および散乱法に分類され、その原理や理論的背景、システム開発、計測手法、および計測分解・誤差評価などの研究が進められ、多くの研究成果が発表されている。

「シーズ (seeds) とニーズ (needs)」というキーワードは、産業界ではよく使われる言葉であるが、プラズマ計測研究の分野においても、このキーワードを当てはめてみることができる。「シーズ」は計測技術および計測システムのための要素技術であり、プラズマ側がその運転や物理機構解明のために必要とするパラメータ、およびその時間・空間分解能を「ニーズ」ということができる。

本講座を例にとると、第3章「先進計測技術・最近の進展」の中の「3.1 マイクロ波イメージング」は、最近のマイクロ波・ミリ波デバイスの集積化、電子計算機のハード、ソフト両面における技術がシーズであり、磁場閉じ込め装置におけるプラズマ密度・温度の二次元・三次元分布計測、プラズマ揺動の時間・空間解析の重要性がニーズとなり発展してきたものである。「3.2 ドップラー反射計」では、揺動の波数スペクトル計測に用いられてきた散乱計測と最近著しい進展がある反射計測との融合技術がシーズとしてあり、プラズマの異常輸送の研究における回転計測の重要性がニーズとなってきた。「3.3 散乱計測」については、完全電離プラズマにおけるイオン温度（速度分布関数）測定のためのコレクティブ散乱の重要性は、30年以上

も前から提唱されてきたが、技術的困難さから実現が遅れていた。プラズマ閉じ込めの研究が進展し、燃焼プラズマ研究の必要性が現実なものとなってきた現在、プラズマ燃焼実験におけるアルファ粒子、特に閉じ込められたアルファ粒子の計測が緊急な課題（ニーズ）となっている。プラズマ計測へのジャイロトロン発振器の適用に関する技術、マイクロ波伝送回路の技術、さらには信号処理技術における進展がこれを現実にするものとして適用されてきたわけである。

第4章「ITER 実験での課題と新たな取り組み」においても同様である。すなわち、次期装置計画の実現、ITER装置の建設および運転により、燃焼プラズマの計測という新しい挑戦が始まっており、長年開発・改良が進められ、基本的には確立したと考えられている、透過（干渉／偏光）、反射、放射計測においても、さらなる改良が不可欠となっている。「4.1 電子密度計測の課題と開発状況」、「4.2 電子温度計測の課題と開発状況」、「4.3 電磁波測定における相対論的効果の導入」では、いずれも燃焼プラズマ計測では不可避で、最も重要な課題（ニーズ）と、それを解決するべく進められている技術開発（シーズ）が紹介されている。

これまでに述べてきたように、「シーズとニーズ」の密接な結びつきがプラズマ計測の研究基盤となってきたことは言うまでもないが、計測法や構成要素において最先端の技術を追求することや、プラズマ物理の解明に不可欠となるパラメータを同定するための理論的背景が明らかになることで、計測研究のブレークスルーが得られることも多々ある。計測グループだけでなく、他の研究グループや理論研究者との研究協力もきわめて重要となっている。

本講座で紹介している電磁波計測法は、高温・高密度プラズマを対象とすることが多いが、プラズマの屈折率（誘電率）は、電磁波の周波数とプラズマ周波数あるいは電子サイクロトロン周波数の比の関数であり、実験室プラズマのように低磁場、低密度に対しては、周波数を下げることで使用することができる。たとえば、周波数8-18 GHzのマイクロ波領域を利用し、透過干渉計、反射計を組み立てることができれば、計測システムは、すべて同軸部品あるいは集積化基板回路で構成することができるた

め、極めて小型かつ安価となる。十分適用する価値はあると考えている。

第1章にも記述されているように、本講座は、電磁波を用いたプラズマ計測の基礎となる電磁波伝搬解析および計測原理から、プラズマ先進計測における最近の進展、さらに ITER を含めた燃焼プラズマ計測での課題について記述

されており、プラズマ科学や核融合学の研究をスタートした学生、大学院生は勿論、プラズマ・核融合の研究者やコミュニティにも有益なものとなっている。電磁波計測法の開発・改良が進むとともに、これら計測法を利用しプラズマ・核融合分野の研究がさらに進んでいくことを願っている。