

最前線で活躍する古典的な計測手法 ～静電プローブ～

田中 宏彦

皆さんは何かモノの温度を測るといったとき、どのような方法を想像しますか？理科の実験で使ったガラス製の温度計を最初に思いつく人や、空港で体表温度を調べる赤外線サーモグラフィが頭をよぎる人もいるかもしれません。核融合プラズマの計測でも、これらと同じように、直接プラズマに触れる方法と、電磁波を介して遠くから調べる方法の、大きく2通りが適材適所で使われています。今回は“直接触れる計測法”の一つとして知られる静電プローブ法についてご紹介したいと思います。

静電プローブ、というと普段の生活では聞き慣れない言葉ですが、この計測では電気を通す小さな針(電極)のことをそのように呼びます。図1に代表的な静電プローブ計測の概略図を示します。この例では、プラズマに直接電極を挿し入れて、電極と真空容器の間に電圧をかけています。プラズマはマイナスやプラスの電荷を帯びた電気・イオンの集合体なので、電圧のかけ方によってそれぞれの粒子は挙動を変えて、電極に引き寄せられたり離れたりします。このとき、高いエネルギーをもった粒子は小さな電圧がかかっても大きく動きを変えませんが、低いエネルギーの粒子は簡単に軌道が変更されます。これらの振る舞いは電極中に流れる電流

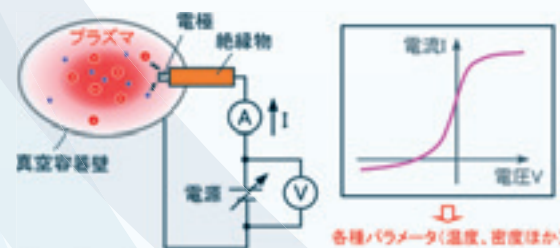


図1 静電プローブ計測の一例。電極(静電プローブ)に流れる電流と電圧の特性からプラズマの温度や密度を求めることができます。

の形として検出され、またプラズマの濃さ(密度)が高いほど電流値の振幅は大きくなります。以上のようなプラズマの持つ電気的な特性を利用して、静電プローブ法ではプラズマの温度(エネルギー分布)や密度、その他の性質を診断することができます。プラズマ研究初期から用いられてきた古典的な計測手法ですが、簡便かつ信頼性が高いため、現在でも多くのプラズマ・核融合研究装置において利用されています。

さて、大型ヘリカル装置(LHD)では、磁力線のかごに閉じ込められたプラズマ(炉心プラズマ)の温度は数百万度～数千万度(平成25年度実験での最高イオン温度は約9,400万度!)もあるため、ここに静電プローブを挿入しても、短い時間で電極材料が溶けたり昇華(液体状態を経ないで気体に転移)したりしてしまいます。では、プラズマ全てがこのような超高温かという、そうではなく、かごの端に近づくとも温度は数百万度以下まで下がってきます。普通、プラズマは磁力線に沿って動く性質を持つため、ほとんどのプラズマは磁力線のかごの中にとどまっているのですが、一部のプラズマはかごから外に漏れ出てきます。磁力線のかごの端付近から外側のことを“周辺領域”と呼び、ここに存在するプラズマを“周辺プラズマ”と呼びます。LHDでは主にこの周辺プラズマを対象として、静電プローブ計測を大いに活用しています。周辺プラズマの温度は数万度～数十万度と炉心に比べて低く、このプラズマは磁力線に沿って運ばれて「ダイバータ板」と呼ばれる耐熱性の材料にぶつかった後、中性ガス化され、その後真空ポンプにより排気されます。このように、周辺プラズマは材料に直接接触することから、壁材の損耗や不純物の発生といったプラズマ-材料相互作用を発生させます。大規模出力となる将来の核融合発電炉では、相互作用も著しく大きくなるこ

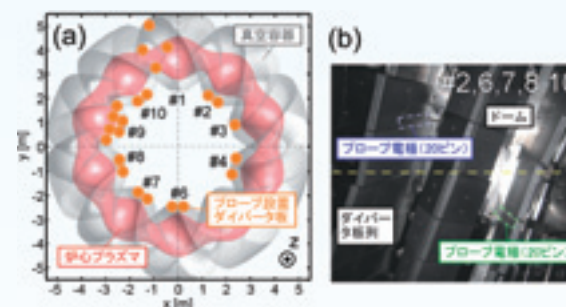


図2 (a)ダイバータ板埋め込み型静電プローブの設置位置(上面図)と(b)写真。

とが予想されることから、周辺プラズマのパラメータや振る舞いを正確に把握し評価することが炉設計を進める上で特に重要となっています。

ダイバータ板前面のプラズマを詳細に調べることを目的として、LHDでは非常にたくさんの静電プローブ電極をダイバータ板上に設置しています。昨年度の実験で運用した静電プローブの位置を図2にまとめました。静電プローブ計測では、細い電極を用いることで、計測範囲を小さな空間内に限定できる特長(高い空間分解能)がある代わりに、広い範囲に渡っての計測を行うためには、たくさんのプローブ電極を並べて配置する必要があります。ヘリカル装置で発生する3次元的で複雑な現象をうまく捉えるため、LHDでは13枚のダイバータ板上のそれぞれに約20ピンずつの電極を並べて、計約460カ所での同時信号計測を行いました。この数は同規模の軸対称装置と比べても多いといえます。

ダイバータ板埋め込み型静電プローブの弱点として、測定位置がその場に固定されるため、ダイバータ板から離れた位置のプラズマ特性を捉えられないことがあります。そこでLHDでは、圧縮空気を使ってピストンのように高速で電極を挿し込み・引き込みできる高速掃引型の静電プローブも併せて研究に使用しています。図3に高速掃引型静電プローブの掃引軌道と周辺プラズマの位置関係を示します。1回の掃引には1秒かからないため、1放電の間に掃引軌道上のパラメータを連続的に取得することができます。加えて、プラズマへの電極挿入が短時間に収まることから、炉心近くの少し温度や密度が高いプラズマも計測することができます。

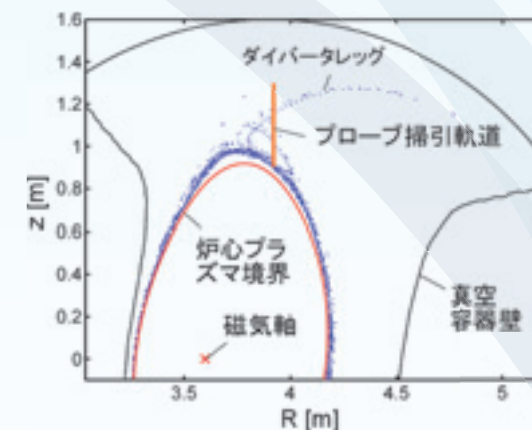


図3 装置断面内における高速掃引型静電プローブの掃引軌道と周辺磁力線構造。

近年、周辺プラズマ特性に大きな影響を与える現象として、「プラズマブロップ輸送」と呼ばれる現象が注目を集めています。これは、多数のプラズマの塊(ブロップ)が磁力線を横切り炉壁に向かって飛行する現象です。一つ一つのブロップの大きさは磁力線と垂直方向に数ミリ～数センチと小さいため、計測には高い空間分解能が求められます。現在、LHDでは、図4のような数本の電極を組み合わせた静電プローブを掃引して、複数のパラメータを同時計測することで、同輸送現象の詳細な特性の評価を進めています。将来的に、ヘリカル型核融合炉における同現象の影響の大きさを明らかにしたいと考えています。

(高密度プラズマ物理研究系 助教)

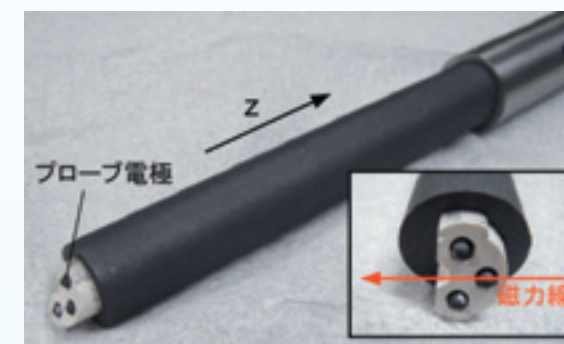


図4 高速掃引型の3芯静電プローブ写真。挿入位置の磁場の構造を計算して設計しています。