

閉じ込め装置の分光診断

Plasma spectroscopy in fusion device

後藤 基志 [1]; 森田 繁 [1]

Motoshi Goto[1]; Shigeru Morita[1]

[1] 核融合研

[1] NIFS

磁場閉じ込め方式の核融合プラズマに対する分光計測の目的はさまざまであるが、その計測手法は大別してふたつに分けられる。ひとつは高波長分解分光器を用いた発光線プロファイルの計測で、発光線の広がりや分裂を詳細に観測し、それらの発生原因となるプラズマのパラメータ等を導き出すものである。もうひとつは、比較的波長分散の小さな分光器を用いて広い波長範囲を同時に計測し、あるイオン種に対するさまざまな励起準位からの発光線強度を求めるものである。このような計測は、モデル計算との比較から、観測される発光線強度分布を形成するプラズマの状態を求めることを目的としている。近年、安定した放電が比較的長時間維持できるようになってきたこと、CCD 検出器等によるダイナミックレンジの広い計測が実現したことなどにより、どちらの計測目的においても、高い精度の計測が実現されている。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 LHD では、さまざまな分光器を用いて、上記ふたつの目的に添った、X 線領域から可視領域にわたる広い波長範囲の計測が行われている。高波長分解計測の例としてドップラー広がりを用いたイオン温度計測が挙げられる。ヘリウム様アルゴンイオンの共鳴線を対象として、中心イオン温度の基本計測として利用されている。観測には結晶分光器と CCD 検出器を用い、5 秒から 10 秒程度の放電時間に対して 200 frames/s の時間分解で常時計測が行われている。

可視域の計測では、ゼーマン効果により分裂した発光線の利用が挙げられる。可視域の発光は一般にプラズマ周辺部に局在しており、コリメータレンズ等を用いて視線に空間分解能を持たせたとしても、計測される信号が視線重複位置での発光の重ね合わせとなることは避けられない。しかしながら、同一視線上に複数存在する発光位置における磁場強度が互いに異なる場合、対応する発光線分裂の大きさがそれぞれ異なるため、詳細な発光線プロファイルの解析により各発光成分を分離して求めることが可能となる。LHD では、あるポロイダル断面全体を約 40 の視線によって観測し、プラズマを取り巻く可視発光線強度の非一様性を求めることに成功している。

一方、水素原子を含む水素様イオンやヘリウム原子については、ある程度モデル計算が確立しており、励起準位間のポピュレーション分布について定量的な議論を行うことが可能である。LHD では、絶対感度校正された低波長分散の可視分光器を用いて、およそ 200 nm から 700 nm の範囲の発光スペクトル全体を同時に観測し、水素原子、ヘリウム原子およびヘリウムイオンに対して励起準位のポピュレーション分布を求め、モデル計算と比較することにより、プラズマ状態の評価を行っている。ダイバータ非接触プラズマ形成の確認およびそのプラズマパラメータ計測などがその例である。

また、LHD プラズマの主な不純物である炭素イオンについては、中性から水素様イオンまで 6 つの電離段階のイオンからの発光線を、真空紫外分光器と可視分光器を用いて同時に観測している。現在開発中の計算モデルを用いた包括的な解析は、プラズマ診断のためだけでなく、一般に困難である真空紫外分光器の感度校正にも有用である。

このような計測ではさまざまな強度の発光線を同時に計測する必要があるため、広いダイナミックレンジを持つ検出器が望ましい。現在 LHD の計測で用いている CCD 検出器の AD 変換器は 16 ビットの精度を持ち、3 桁以上強度の異なる発光線を同時に計測することが可能である。ポピュレーション分布計測の実現のためにはこのような検出器の発展の寄与が大きい。