

高速水素原子ビーム放射分光法による核融合プラズマの診断

Diagnostics of the Fusion Plasmas Using Fast Hydrogen Atomic Beam Emission Spectroscopy

門 信一郎 [1]; 大石 鉄太郎 [2]

Shinichiro Kado[1]; Tetsutarou Oishi[2]

[1] 東大高温プラズマ研究セ; [2] 東大院・工

[1] High Temperature Plasma Ctr., Univ. Tokyo; [2] none

高速中性粒子ビームの素過程とプラズマ計測

核融合を目指した、磁場によって閉じ込められたトラス状の高温プラズマのパラメータは径方向に分布をもつため、発光分光で得られる値は最も明るい場所の値を反映することになる。一般に可視光の発光は電子温度の低い周辺部で強いため、中心部の計測は困難であり、なんらかの工夫が必要である。

中性粒子ビームはイオン化されるまでは磁場に拘束されないため、電離による損失を防げばプラズマ中心部まで入射することができ、入射されたビームからの発光、およびバルクプラズマのビームへの応答から種々のパラメータの分布計測が可能となる。

プラズマへの浸透長を大きくするには、ビームを高速化する必要がある。放電生成されたプラズマから正あるいは負イオンを引き出す（正、負イオン源といわれる）。加速された高速イオンビームを中性化セルにおいて中性ガスと接触させ、荷電交換反応によって高速中性粒子ビームを生成する。

本研究では中性粒子ビーム入射 (neutral beam injection: NBI) 加熱システムを利用し、高速水素原子ビームからの Balmer- 輝線スペクトルから得られる物理量、及びそれらの計測結果について述べる。

ビーム原子の励起はプラズマとの衝突過程により行われ、ビームのエネルギーに依存する。主量子数 $n=3$ 準位への励起には電子衝突とイオン衝突があり、正イオン源による 40 keV 程度のビームであれば両者が同程度の寄与であるが、100 keV 以上になる負イオン源によるビームであればイオン衝突が優勢になる。ビーム輝線の強度はビーム密度とプラズマ密度、及び $n=3$ 準位への励起速度係数の積で表される。従って、強度の空間変化が密度分布を、強度の揺動が密度揺動を表す。この原理に基づく揺動計測法をビーム放射分光法 (beam emission spectroscopy: BES) という (我国では他にビームプローブ分光、ビーム発光分光といわれることもある)。ビーム輝線は観測方向を適当にとればバルクの Balmer- 輝線から分離して計測することができる。長時間分解計測には干渉フィルターとアパランシェフォトダイオード (APD) が、高波長分解計測には回折格子型分光器と CCD 検出器が用いられる。

ビーム放射分光法 (BES)

プラズマの粒子・熱拡散係数は粒子間衝突から予測される新古典理論にくらべ 1 ~ 2 桁大きく、急速にプラズマが損失してしまうことが、閉じ込め研究の初期から指摘されてきた。その原因として、様々なパラメータの勾配を自由エネルギーとした微視的乱流が指摘されており、揺動計測の必要性が言及されてきた。1980 年代に開発された BES は輸送への寄与が大きいとされる長波長揺動のイメージ計測に適している。その後いくつかのトカマクプラズマに適用されてきたが、磁場構造の複雑なヘリカル型における開発は著者らの核融合科学研究所コンパクトヘリカルシステム (CHS) における研究が初であった。CHS ではある条件で境界層の粒子閉じ込めが改善され、勾配が急峻になるいわゆる輸送障壁が発見され、BES は密度分布の高速モニタとして有用なものとなっている、さらに輸送障壁に付随しておきる特有な境界層高調波振動 (Edge harmonic oscillation: EHO) が同定された [T.Oishi, S. Kado, et. al., Nucl. Fusion 46, 317 (2006)]. これはトカマクプラズマにおいても観測されており、共通する物理の解明が望まれている。

モーショナルシュタルク効果 (MSE) 分光

速度 v で磁場 B 中を運動する高速ビームの原子核は $v \times B$ の電場を感じ、シュタルク分裂を起こす (Motional Stark Effect: MSE)。今の場合、目的はこの誘導電場の測定ではなく、シュタルク効果による偏光したビーム輝線の偏光分離計測である。電場中では場の方向は $M=\pm 1$ (縮退) であり、成分 (senkrecht) を与える。従って、観測位置から見たときの光の直線偏光・円偏光成分と光の傾きから誘導電場ベクトル、さらにそれを生成する磁場ベクトルの方向がわかる。磁場ベクトルの方向は、トラス装置の磁場の局所的な回転変換角に相当し、これよりプラズマ中の電流分布を与える。直線偏光子で 4 方向への偏光投影成分を抜き出した後回折格子型分光器と CCD 検出器で波長スペクトルを測定するか、放電中に光弾性変調器 (photoelastic modulator: PEM) で光学遅延量を掃引し、偏光角を調べる。

前項の BES 計測は MSE 計測で分光、偏光計測を行わずに高速化したものに相当する。従って近年の負イオン源によるビームが高速化、超伝導コイル採用による磁場の強度化に伴い、シュタルク分裂も大きくなり、大型装置においては 1nm を越える配位もある。BES の干渉フィルター等設計時はこの MSE まで考慮して行う必要がでてきた。

本研究は NIFS 一般共同研究 (NIFS02KZPD003, NIFS05KLBB002) による。