

レーザー誘起蛍光法を用いたプラズマ流ベクトル計測法の開発

66201 赤沼茂樹

(指導教官 小野 靖 教授)

Key Word : laser-induced fluorescence, scrape off layer, plasma flow, rapid-frequency-scan laser, doppler shift

1 はじめに

今年建設が始まる国際熱核融合実験炉 (ITER) では、初めて核融合反応により自己加熱を行う“燃焼プラズマ”が生成され維持される。核融合反応の結果生成される α 粒子の持つエネルギーは、プラズマ粒子との衝突によりプラズマ粒子を加熱し、そのあとスクレイプオフ層 (SOL) を通じてダイバータへと流出する。SOL に流れ込んだ粒子と熱、プラズマ対向壁より発生した不純物は主に磁力線方向に輸送され、コアプラズマから十分離れたダイバータ板に接触する。このように SOL にはコアプラズマからの熱流の処理と、コアプラズマへの不純物混入を抑制する役割を果たしている。

近年この SOL プラズマの流速計測の研究が重要視されている。ダイバータ板にかかる熱負荷軽減のために、SOL にアルゴンやネオン等の不純物を導入して放射熱を増加させる方法や、非接触ダイバータなどの方法が研究されている。また SOL プラズマではプラズマ流が逆転する現象や、非拡散的な輸送機構の存在などの、特有なプラズマの流れがある。このように熱負荷軽減方法の研究や、SOL プラズマ特有の現象を解明するために、プラズマ流計測法の研究が注目されている。

1.1 新しく提案するスクレイプオフ層プラズマ流ベクトル計測法

図1に本計測方法の概略図を示す。プラズマに高速波長掃引 (RAFS) レーザー光を二方向から入射し、レーザー誘起蛍光 (LIF) を起こし、その蛍光を集光レンズを用いて光ファイバーに集光する。集光した光を光ファイバーにより光電子増倍管 (PMT) と分光器にそれぞれ伝送し、光強度時間発展計測とドップラーシフト計測をそれぞれ行う。

光強度時間発展計測の原理は以下のとおりである。プラズマ中の粒子は高速で運動しているため、ドップラー効果により運動状態で LIF の吸収光波長が変化する。RAFS レーザーによって入射レーザー光の波長を変化させると、プラズマ粒子の速度分布によってレーザー光を吸収する粒子の個数が変化するため、放出光の強度が変化する。この放出光の光強度の変化と入射光の波長変化を相関させることによってレーザー光と平行な方向の流速分布がわかる。ドップラーシフト計測の原理は、LIF の放出光の波長もドップラー効果により運動状態で変化するため、放出光の波長変化を計測することによって観測方向に対して垂直な方向の流速がわかる。これら二つの方法を同時に行うことによってプラズマ流速の三成分の二次元分布が一度のレーザー光入射によって計測することができる。

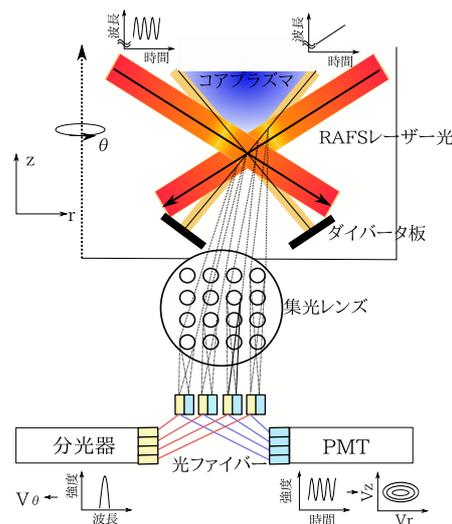


図1: SOL プラズマ流ベクトル計測法の概略図

1.2 レーザー誘起蛍光法

レーザー誘起蛍光 (LIF) 法の原理は次のようなものである。レーザー光をプラズマ中に入射させ、プラズマ中の原子・イオンの束縛電子を低いエネルギー準位から高いエネルギー準位に励起させる。励起した原子・イオンは自然放出か誘導放出により光を放出する。その光を検出器により計測する。本実験ではイオンとして Ar II を使用し、励起波長 $611.492\text{nm}(3d^2G_{9/4}-4p^2F_{7/2})$ 、放出波長 $460.957\text{nm}(4p^2F_{7/2}-3s^2D_{5/2})$ の三準位系を用いる。

2 実験装置

2.1 レーザーシステム

LIF の励起光を供給するために YAG-色素 (Dye) レーザーを用いる。YAG レーザーを用いて色素を励起させ、回折格子を用いて放出する波長を選択する。LIF を起こすために必要なエネルギーは、各パラメーターより 1.5mJ と計算された。励起波長における YAG-Dye レーザーのエネルギーを測定した結果、約 2mJ であることがわかった。この他に球状トカマク装置 UTST で実験を行うために、レーザー光の伝送経路の製作と同期システムの作成、レーザー光の波長較正を行った。

2.2 光強度時間発展計測システム

RAFSによってレーザー光の波長を変化させたとき、LIFの蛍光の光強度変化を計測するために、光強度時間発展計測システムの設計・製作を行った。このシステムは次のようになっている。LIFの蛍光をレンズにより光ファイバーバンドルに集光し、PMTまで伝送する。このときレンズと光ファイバーバンドルの間にバンドパスフィルター(BPF)を挿入し、蛍光以外の光を遮断する。伝送された光信号はPMTにより電気信号(電流)に変換され、 $I-V$ 変換回路により電流を電圧に変換し、オシロスコープでその電圧を計測する。このシステムについてレンズ、BPF、光ファイバーバンドルまでの系を集光・伝送系とし、集光・伝送系の集光・伝送効率は37%、透過波長は $460.957\text{nm} \pm 1\text{nm}$ となった。PMT、 $I-V$ 変換回路、オシロスコープまでの系を測定系とし、測定系の光電変換効率は 280V/W 、周波数応答性は 150MHz となった。

2.3 ドップラーシフト計測システム

観測面と垂直な方向の波長変化によって生じるドップラーシフトを計測するために、ドップラーシフト計測システムの構築と性能評価を行った。ドップラーシフト計測システムは光ファイバーで光を伝送し、カメラレンズにより分光器の入射スリットに集光させる。入射した光は分光器でスペクトル光に分解され、出射スリットで再び集光され、そのスペクトル光をCCDカメラで観測する。CCDカメラ画像は横方向が空間チャンネル、縦方向が波長チャンネルとなっており、これによって各光ファイバーに入射した光の波長を測定することができる。光の波長を測定するために波長校正ランプを用いて、CCDの1pixelあたりの波長変化、逆線分散を測定し、励起波長 611.5nm で 0.019nm/pixel 、蛍光波長 460.957nm で 0.022nm/pixel であることがわかった。

3 放電実験

3.1 水素プラズマの発光観測

球状トカマク装置UTSTで水素プラズマの発光を二つの計測システムで観測した。光強度時間発展計測システムはBPFを外して発光を観測し、UTSTの放電波形とPMT検出電圧が一致していることを確認した。この結果より光強度時間発展計測システムの動作確認を行うことができた。ドップラーシフト計測システムは水素プラズマの $\text{H}\alpha$ 線の観測を行い、 $\text{H}\alpha$ 線のCCD画像を撮ることができた。この結果よりドップラーシフト計測システムの動作確認を行うことができた。

3.2 アルゴンプラズマの発光の光強度計測

アルゴンプラズマの発光を光強度時間発展計測システムにより観測した。図2にアルゴンプラズマの発光を観測したときのPMT検出電圧とUTSTの放電波形を示す。このときPMT検出電圧が -4V 以下の電圧が検出していないのは、発光強度が大きすぎるためPMT検出電圧の限界値を越えているためである。アルゴンプラズマの発光はLIF計測のバックグラウンドになるため、バックグラウンドが

PMT検出電圧の限界を越えている現状では、LIF計測を行うことができない。そのためバックグラウンド光を減少させる対策が必要になる。

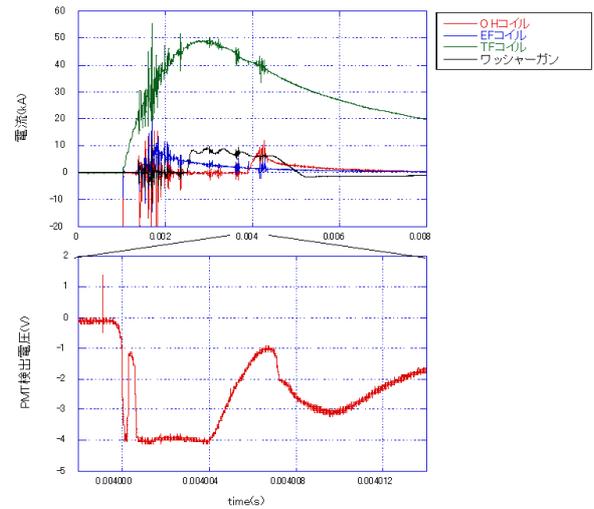


図2: アルゴンプラズマの発光観測

3.3 アルゴンプラズマの発光のドップラーシフト計測

アルゴンプラズマの発光よりドップラーシフト計測を行った。校正用Xeランプのスペクトル線 462.428nm を基準にし、分光器の性能評価で求めた逆線分散を用いてアルゴンプラズマの発光の波長を求めた。このスペクトルの波長と校正値を比較してドップラーシフトを求め、 $v = c\Delta\lambda/\lambda$ より流速を求めた。この結果、最大 6km/s の流速が計測された。

4 結論

新しく提案したSOLプラズマ流計測法の検証のために、レーザーシステム、光強度時間発展計測システム、ドップラーシフト計測システムの設計・製作、性能評価を行った。構築したシステムでUTSTで水素プラズマの発光観測をした結果、すべてのシステムが正常に動作していることを確認した。アルゴンプラズマの発光観測を光強度時間発展計測システムで行った結果、発光強度が大きく、PMT検出電圧の限界値を越えてしまい、LIF計測を行うことができなかった。ドップラーシフト計測システムについてはアルゴンプラズマの発光よりドップラーシフト計測を行い、最大 6km/s の流速があることがわかった。

今後の展望として以下のことを行う必要がある。まず光強度時間発展計測システムのアルゴンプラズマによる発光強度を抑え、バックグラウンド光を小さくする。次に本システムの未完成部分であるRAFS機構の開発とレーザー光のシートビームにするシステムの開発が必要である。また必要な性能を十分満たしていない、レーザーエネルギーとドップラーシフト計測システムの逆線分散を向上させることが必要であると考えられる。