

局所水素負イオン密度計測法の改良と水素負イオンの流れの反転の実測 ～水素負イオン源の高性能化に向けて～

中野 治久

磁場閉じ込め型核融合炉では、1 億度以上のプラズマを生成し、定常的に維持する必要があります。プラズマをこのような高温に加熱・維持する装置の一つに中性粒子ビーム入射装置 (NBI) があります。核融合炉用 NBI では高エネルギーの水素 (または重水素) ビームを生成するために水素負イオン源を用いることが計画されています。水素負イオン源とは水素負イオン (水素原子に電子が一つ余分に付いた電氣的に負に帯電した粒子) のビームを生成する装置です。核融合炉開発のためのプラズマ基礎実験を行っている核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) においても一部の NBI に水素負イオン源を用いています。水素負イオン源を用いた NBI は日本でのみ (当研究所及び量子科学技術研究開発機構那珂核融合研究所) 運用実績があり、日本はこの分野で世界をリードしています。

図 1 に水素負イオン源の断面図を示します。水素負イオン源は、イオン源プラズマ部とビームを生成するビーム加速部に分けることができます。

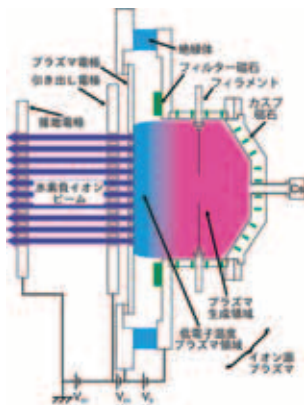


図 1 : NBI用水素負イオン源の断面図。

このうち、イオン源プラズマ部はさらにプラズマ生成領域と低電子温度領域に分けることができます。水素負イオンはプラズマ電極表面で生成され、低電子温度領域に広がってから、ビームとして引き出されます。

NBI 用の大型水素負イオン源の開発は、これまで主に装置の大型化や耐電圧の強化など

工学的な側面から進められてきました。さらなる水素負イオン源の高性能化には、イオン源プラズマの粒子の振る舞いや電位構造の変化など、イオン源プラズマの物理の理解を基礎とした水素負イオン源開発が重要であると考えています。そこで我々は、水素負イオンの主な生成領域であり、イオン源プラズマとビームの境界領域であるプラズマ電極表面近傍のプラズマの物理研究を行っています。今回は、この物理研究をする上で必要であった局所水素負イオン密度計測法の改良と、実験的に明らかになった水素負イオン源内の水素負イオ

ンの流れの振る舞いについて紹介します。

局所水素負イオン密度計測法の改良

水素負イオン密度計測法としてキャビティ・リングダウン法 (CRD 法) とラングミュアプローブ支援レーザー光脱離法 (LP-PD 法) が知られています。CRD 法はレーザー吸収分光法の一つです。水素負イオンは 1064 ナノメートル (ナノは 10 億分の 1) の波長のレーザー光を吸収することで電子が一つ剥ぎ取られ、水素原子となります (光脱離反応)。水素負イオンが含まれるイオン源プラズマにこのレーザーを入射すると、イオン源プラズマからの透過レーザー光量より水素負イオンへ吸収されたレーザー光量を見積もることができます。この吸収レーザー光量から、水素負イオン密度が評価できるのです。この計測法は、レーザー光線上の平均密度 (線平均密度) の絶対値を評価できる一方、局所的な密度は分かりません。

LP-PD 法は、ラングミュアプローブ (LP) 法と光脱離 (PD) 反応を組み合わせた計測法です。LP は先端に約 1 ミリメートル (mm) の金属電極が付いた探針です。LP 電極に正の電圧を印加することで、イオン源プラズマ中の LP 電極周りの負に帯電した粒子を捕集します。負に帯電した粒子が概ね電子である場合、LP に流れる電流を用いて電極周りの局所的な電子密度を評価できます。この時に LP 電極に直径数ミリメートルのレーザーのパルス (パルス幅: 数ナノ秒) を照射し、LP 電極周りに少量存在する水素負イオンの全てを脱離反応させます。脱離した電子 (脱離電子) が LP に捕集されて LP に流れる電流がパルス的に増加します。この電流の増分 (光脱離信号) が電子密度の増分として評価されます。元の水素負イオンと脱離電子は同数なので、この電子密度の増分から LP 電極周りの局所的な水素負イオン密度が評価できます。一方、上述したようにプラズマ電極近傍では電極表面で水素負イオンが生成されるため、水素負イオン密度が電子密度と同程度以上となっています。この状況では LP に流れる電流に対する水素負イオンの寄与が大きくなって電子密度の正確な評価が難しくなると同時に、この従来の LP-PD 法での水素負イオン密度も評価が困難になってしまいます。

そこで我々は、LP-PD 法を改良し、水素負イオン密度比が高いプラズマにおいても局所的な水素

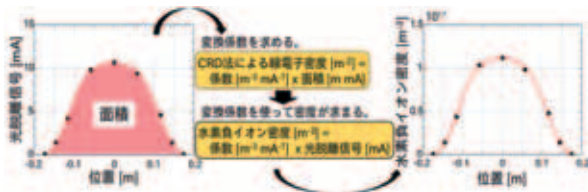


図2 水素負イオンの局所密度計測法の原理。左グラフの縦及び横軸の単位はそれぞれミリアンペア及びメートル。右グラフの縦及び横軸の単位はそれぞれ毎立方メートル及びメートル。

負イオン密度を計測する手法を開発しました(図2)。まず、LP-PD法を用いてレーザー光線の入射軸方向に沿った光脱離信号分布を計測します。この時の光脱離信号はミリアンペア(mA)程度でした。この分布とCRD法で得られた水素負イオンの線密度(毎平方メートル、 m^{-2})から光脱離信号を水素負イオン密度に変換する係数(毎立方メートル毎ミリアンペア、 $m^{-3} mA^{-1}$)を求めます。この係数と光脱離信号から局所的な水素負イオン密度(毎立方メートル、 m^{-3})の絶対値を評価することが可能となりました。これにより、水素負イオン密度分布とプラズマ分布(正イオン密度分布、電子密度分布、電位分布など)及び引き出されるビーム分布との関係性を定量的に評価することが可能になりました。

水素負イオンの流れの反転

LP-PD法を応用することで、水素負イオン源内で水素負イオンがどのように流れているかを調べることができます。図3に水素負イオンの流れの計測法の概念図を示します。LP-PD法でパルスレーザーを入射するとLPに流れる電流がパルス的に増加すると述べました。脱離電子によって増加した電流はある時間で元の電流値に戻ります。これは、レーザー径外にある水素負イオンの運動によって、LP近傍の水素負イオン密度が回復するためです。LPに流れる電流が元に戻る時間(マイクロ秒程度(マイクロは100万分の1))は、レーザーの半径をイオンの運動の平均速度で割った時間に相当します。ここで、水素負イオンに流れがあるとします。障害物(セラミック)をはさんで流れの両側にLP電極を配置してLP-PD法を行います。例えば、図3のLP(A)とLP(B)の対です。

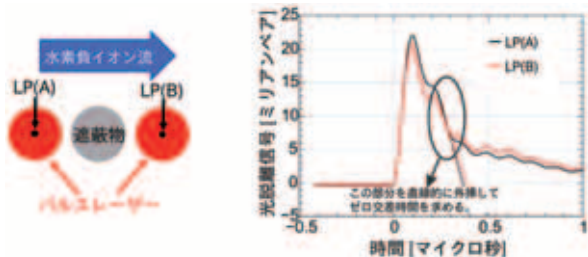


図3 水素負イオンの流れの計測原理。左図の黒点はラングミュアプローブ(LP)電極、赤円はパルスレーザーの断面図。右図はLP(A)と(B)の実際の光脱離信号波形。ゼロ秒でパルスレーザーをLP電極に照射しています。

障害物上流側では、水素負イオンがLP電極上流側からレーザー径内に流れてくる影響を受けるため、電流回復時間は障害物がない場合に比べて早くなります。一方、障害物下流側では、水素負イオンがLP電極下流側からレーザー径外へ流れ去る影響を受けるため、電流回復時間が遅くなります。この電流回復時間の差より負イオンの流れの速さを見積もります。実際には、二次元の流れの方向がLP電極A-B軸の方向に一致するとは限りません。そこでこの計測を90度回転させた方向に対しても行うことで、流れの速度ベクトル(速さと向き)として評価します。さらに、計測位置をプラズマ電極近傍で二次元に動かすことで、水素負イオンの流れの分布(流線分布)を実験的に評価しました。図4はビーム引き出し中の流線分布の一例です。プラズマ電極表面で生成された水素負イオンは、ビームと逆方向の初速度を持ってプラズマ電極から放出されます。図4からビームを引き出すことによって、水素負イオンはプラズマ電極のビーム引き出し孔上部でビームと逆方向からビーム方向に流れが反転する場合があることを初めて実験的に明らかにしました。本研究成果を更に進めることで水素負イオンビームを高効率かつ安定的に大電流化するための設計指針を与えることができます。

本研究成果を含む関連研究は、2016年に英国オックスフォード市で開催された負イオンに関する国際会議(NIBS)においてNIBS award(NIBS賞)として評価を頂きました。水素負イオン源は我々が研究・開発を進めている核融合エネルギー分野の他、素粒子・原子核物理学実験や物質・生命科学実験に用いられる高エネルギー加速器施設、またガン治療法の一つで粒子線治療法のひとつであるホウ素中性子捕捉療法等にも利用されています。本研究は、水素負イオン源の高性能化を通してこれらの分野の発展にも寄与するものと期待されます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

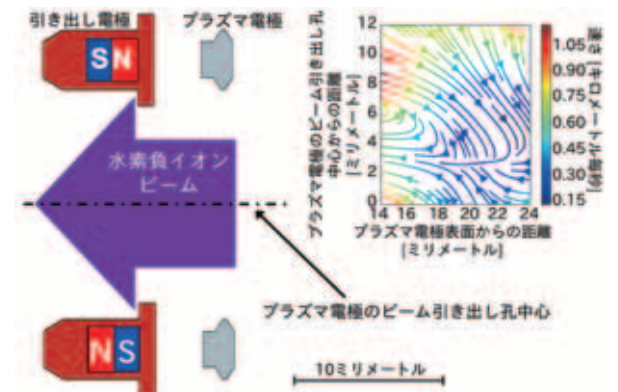


図4 プラズマ電極と引き出し電極間に電圧を印加して水素負イオンビームを引き出した時の水素負イオンの流れ(流線分布)。グラフの位置はプラズマ電極を基準として、実際に計測して流れを評価した領域に対応します。