

## H $\alpha$ イメージングで水素負イオン源の引出領域を可視化する

池田 勝 則

大型ヘリカル装置(LHD)ではプラズマを加熱する手法の一つとして、中性粒子入射加熱装置(NBI)を使用しています。この装置から入射された高エネルギーの水素原子はプラズマ中の水素イオンと荷電交換することで高エネルギーの水素イオンに置き換わり、結果としてプラズマ全体のイオン温度を上昇させます。LHDのNBIでは水素負イオン源(図1)を開発してLHD実験の当初から高エネルギー水素ビームの生成及び入射に成功しています。

ここで「水素負イオン」という聞き慣れない言葉が出てきました。水素原子は陽子1個と電子1個で構成されています。例えばLHDの水素プラズマでは原子の結合が解けてバラバラの状態になり、正の電荷を持つ陽子(水素の正イオン)と負の電荷を持つ電子になっています。イオン源の中の

水素プラズマも同様に電子と正イオンに分離しやすいので、加熱ビームとして正イオンビームを利用するのが最も簡単であり、多くの実験装置では正イオン源を用いたNBIでプラズマ加熱を行ってきました。しかしながら水素の正イオンはエネルギーを上げていくと中性化(イオンから原子に変換すること)させることができなくなります。一方で負の電荷を持つ水素負イオンはエネルギーを上げて中性化の効率が落ちないため高エネルギービーム生成には水素負イオンが必要不可欠になります。水素負イオンは陽子1個と電子2個で構成され、水素の原子に電子を付着させることで実現できます。この反応は低温のプラズマ中にごく僅か存在していますが、生成量を劇的に上昇させる「表面生成」と呼ばれる方法の発見がブレイクスルーとなりました。この方法では電子が放出されやすい低仕事関数の金属表面状態を作り、その表面近くで低温のプラズマを作ることで水素原子やイオンに電子を付着させます(図2)。生成された水素負イオンはビーム引出穴から電位差を用いて引き出され、ビームに必要なエネルギーまで加速されて放出されます。このイオン源内での水素負イオンの分布と挙動を観測できれば、ビーム分布の最適化や安定したNBIの運転に役立ちます。

今回開発したイメージング計測装置は、プラズマから放射される光を2次元分布として計測しま

す。波長選択は光学フィルターを用い、レンズを使ってイメージコンジット(光ファイバーを束ねた管)に集光します。これは入射したイメージをそのままの形で対面から出力できる特殊なガラス管です。この対面をCCDカメラに接続します。観測領域が狭くて、なおかつ高電圧を印加するために、この特殊な光学系を使用しています。計測するのは水素のバルマー線(H $\alpha$ 線)で656ナノメートルの波長を持ちます。このH $\alpha$ 線は太陽から放射されている光の一つです。H $\alpha$ 線の発光強度は水素原子の中の電子の励起(エネルギー準位が上がること)と脱励起(エネルギー準位が下がること)によって決まり、エネルギー差が光として放出されます。したがって、励起された状態の水素原子の数にH $\alpha$ 線の発光強度は依存するのですが、水素負イオンが多く存在する特殊な場合には、水素正イオンと負イオンが衝突することで電荷を交換する相互中性化反応が起こり、その反応で水素原子が励起されます。水素負イオン源の電極近傍では電子温度が低いため、電子との衝突による励起より相互中性化反応による励起が顕著に現れます。引出穴から負イオンをビームとして引き出した時には空間に存在する負イオンが減少し、その結果として相互中性化反応によるH $\alpha$ 線の発光強度が減少するため、2次元のH $\alpha$ 線の発光強度分布を計測し、ビーム引き出し前後の差分を取ると電極表面近傍の水素負イオンの引き出し分布が分かるという仕組みです。

本研究で得られた典型的な結果を図3に示します。まず、観測ポートから見える領域の写真(図3(a))を見てみましょう。ビームの元となるプラズマ放電は視野の左方向にあります。負イオンはプラズマ電極表面の引出穴から引き出されて右の方向へ向かいます。円形の引出穴はプラズマ電極表面上に規則正しく並んでいて、観測視線とプラズマ電極の角度が小さいために、見た目上は台形のような形状で撮影されます。カメラの視線の中心からプラズマ電極までの距離は11mmで電極の幅はおよそ30cmとなっています。図3(b)はH $\alpha$ 線の波長の2次元イメージになります。ここでは空間位置が把握しやすいようにイオン源内部構造物をワイヤーフレームで書き足しています。このイオン源ではフィラメントを用いたプラズマ放電を行っているため、対面と電極穴付近にフィラメントからの放射光が反射しています。視線の中心ではこの背景放射光は5%程度に抑えられており、H $\alpha$ 光の分布がほぼ一様に分布していることが確かめられました。図3(c)はビーム引き出し中のH $\alpha$ 光

分布からビーム引き出し前の分布の差分をイメージ化したものです。ここでは、赤色が減少している領域、緑色が変化無しの領域、青色が上昇している領域を示しています。電極穴の真横にスポット状の強いH $\alpha$ 光の減少が観測されています。H $\alpha$ の減少は負イオンの減少を示しています。この結果から、電極表面で生成された負イオンが引き出し領域に広く分布していること、またその負イオンがイオン源の空間領域の広範囲から電極穴を通して引き出されていることが実験的に確かめられました。この成果は負イオン引き出しの物理的機構を知る上で重要な知見で、負イオン生成とビーム引き出しに関わる数値計算モデルの構築、均一な負イオンビーム生成及び高パワーで安定な運転技術の確立などの負イオン源方式のNBI装置の重要課題の解決に貢献します。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

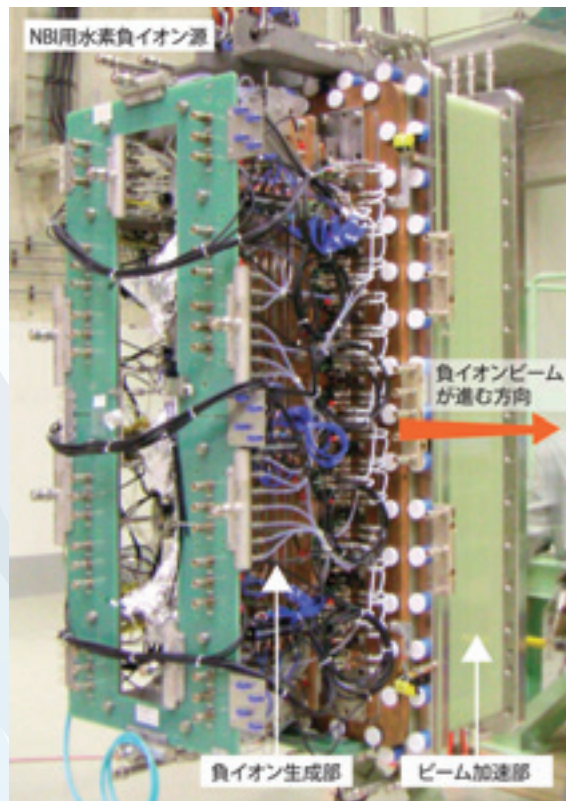


図1 LHD用水素負イオン源

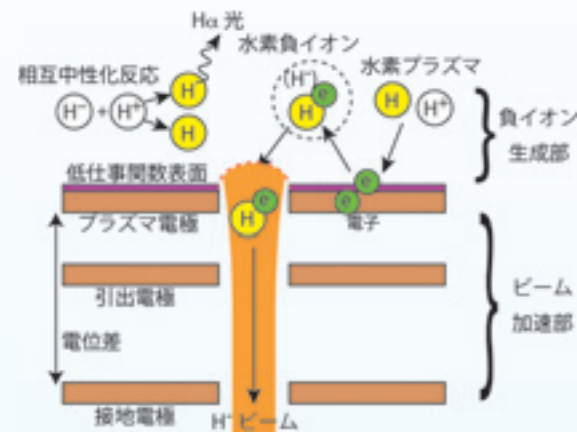


図2 水素負イオンの表面生成とビーム引き出し

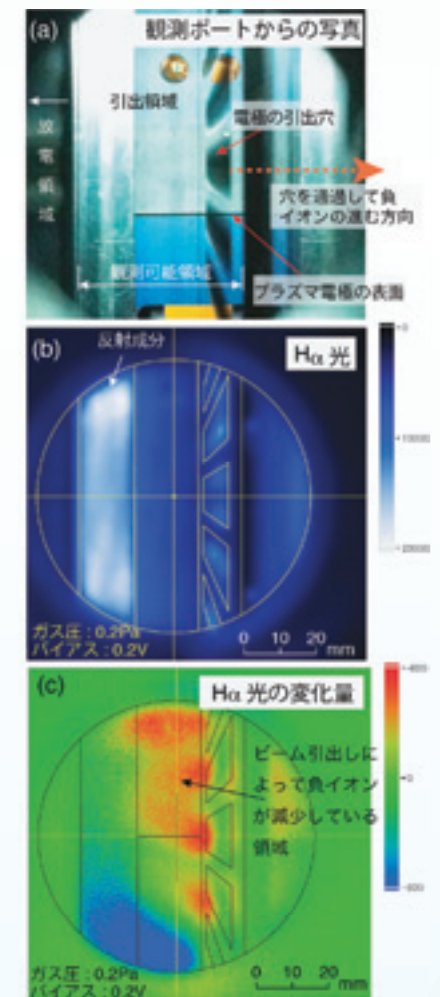


図3 (a)観測ポートからの写真、(b)H $\alpha$ 光の2次元イメージ、(c)H $\alpha$ 光の差分イメージ