

修士学位論文要約（平成29年3月）

## セシウム添加型大口径高周波プラズマ源の 負イオン生成およびビーム引出し評価

佐々木 佑晃

指導教員：安藤 晃， 研究指導教員：高橋 和貴

### Negative Hydrogen Ion Beam Extraction from a Large Diameter Radio-Frequency Plasma Source with Cesium Effect

Yuko SASAKI

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori TAKAHASHI

Production of high density negative hydrogen ions and prevention of ion destruction by collisions with energetic electrons are required to increase negative hydrogen ion beam current. As for the magnetic filter, electron temperature decreased from 2 eV to 1 eV near the plasma grid with the increase of the magnetic filter field strength. As for the Cs seeding, negative hydrogen ion current ( $I_{acc}$ ) increased 4 times and decrease of the ratio  $e^-/H$  was observed. Negative hydrogen ion beam extraction was performed with the Cs seeding to acquire the basic characteristics of beam currents. Maximum  $J_{H^-}$  is  $\sim 10 \text{ mA/cm}^2$  at  $V_{ext} = 9 \text{ kV}$  was obtained.

#### 1. 研究背景

核融合発電の実現に向けて、主要加熱方法となる中性粒子ビーム入射装置(Neutral Beam Injection)の開発が進められている。国際核融合実験装置(ITER)では、100keV を超える高エネルギー粒子の中性化効率がよい水素負イオンを用いた NBI システムが採用され、プラズマの持続的加熱に向け長時間運転(3600 sec)時での大電流、高エネルギーの重水素負イオンビーム引出し( $200 \text{ A/m}^2, 1 \text{ MeV}$ )が予定されている。これらの課題に向けて内部電極不要の高周波プラズマ生成の高周波水素負イオン源の開発が欧州・日本で行われている<sup>1,2)</sup>。水素負イオン源では Cs 導入による表面生成法での負イオン生成が有用であり、表面生成を促進するために、PG 表面の温度調節による Cs 層厚さの調節、イオン源内での Cs の挙動の理解が重要となる。生成された負イオンは

高温電子との衝突によって容易に破壊されてしまう事から、イオン源ではフィルタ磁場をビーム引き出し部前面に設置し、電子温度の冷却(1 eV 程度)を行っている。先行研究から本実験装置において、PG 近傍での電子温度( $T_e$ )が約 2 eV と十分に電子温度が低下していないことが課題となっていた。

今回、ITER-NBI のプラズマ生成部と同程度の直徑を有する大口径高周波(rf)水素負イオン源を用い、ITER-NBI 要件を達成すべく、磁気フィルタの最適化及び Cs 導入時のビーム引出しによる負イオン電流の計測を行い、基礎特性の評価を行った。

#### 2. 実験装置

本実験装置の概略図を図 1 に示す。生成部(Driver region), 拡散部(Expansion region), 引出し部(Extraction region)から構成され、生成部は ITER-NBI と同様の大きさで、拡散部が ITER-NBI の 1/8 のサイズとなっている。生成部バッカプレート及び拡散部壁にはネオジム磁石によるカスプ磁場が形成され、PG 近傍におけるプラズマ密度の増加が先行研究で報告されている。Cs オーブンは  $z = 460 \text{ mm}$  に位置し、PG 表面に向かって Cs が導入される。また Cs 導入時にはライナーと呼ばれる金属容器をイオン源拡散部内に設置し壁温度調節が可能になっている。高周波電源は高 DC-rf 変換効率の FET インバータ電源を使用し、0.3 MHz, 30 kW の電力を投入することが出来る。ビーム引出し時にはイオン源が高电压になり、かつ rf 電源が接地状態にあることから伝送路間には絶縁トランジスタが挿入されている。絶縁トランジスタを含むことで印加電力が低下することから、今回は通常はガス圧力 0.3 Pa で、ビ

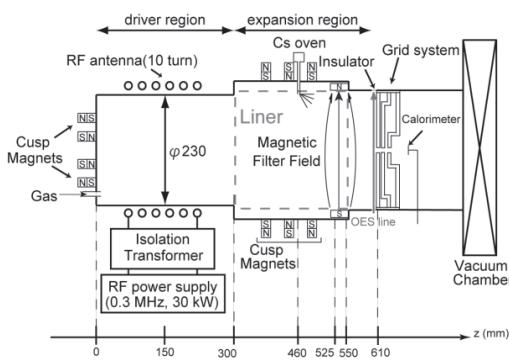


図 1 大口径高周波水素負イオン源概略図

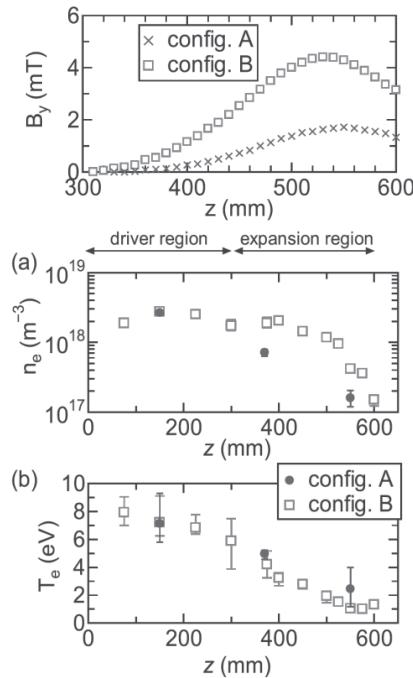


図2 フィルタ磁場強度分布とプラズマ軸方向分布 (a)電子密度, (b)電子温度<sup>3)</sup>

ーム引き出し時にはガス圧力 0.6 Pa で実験を行った。ビーム引出し電極系はプラズマ電極(PG), 引出し電極(EG), 接地電極(GG)の3枚で構成され, PG-EG間に負イオンを引出すための引出し電圧  $V_{ext}$  ( $< 10$  kV), EG-GG間に負イオンを収束・加速するための加速電圧  $V_{acc}$  ( $< 30$  kV)が印加される。負イオンの引出しの時に同時に電子も引出されるが, EG 内部の電子偏向磁石によって偏向, 除去される。

### 3. フィルタ磁場強度変化時の軸方向分布変化<sup>3)</sup>

図2にフィルタ磁場強度変化時におけるプラズマ軸方向分布を示す。絶縁トランス挿入無しで 0.3Pa, 18 kWにおいてラングミュアプローブによって計測を行った。磁場形状 A, B どちらにおいてもフィルタ磁場の生成部への侵入が無いことから同様のプラズマであることが図2よりわかる。拡散部では磁場強度を大きくした時にフィルタ磁場下流において電子温度が 1 eV 程度まで減少し, 負イオン破壊に寄与する電子を減らすことが出来たことが示唆される。

### 4. Cs 添加時におけるビーム引出し時の引出し電圧依存

図3はCs添加時での各加速電圧におけるビーム引出し  $V_{ext}$  依存の結果である。Cs添加の有無で負イオン電流( $I_{acc}$ )が約4倍増加し, また電子負イオン比( $e^-/H^+$ )が大きく減少している。これはCs添加によるPG近傍での表面生成効果を示している。

$V_{ext}$  の増加に伴い,  $I_{acc}$  も線形的に増加している。

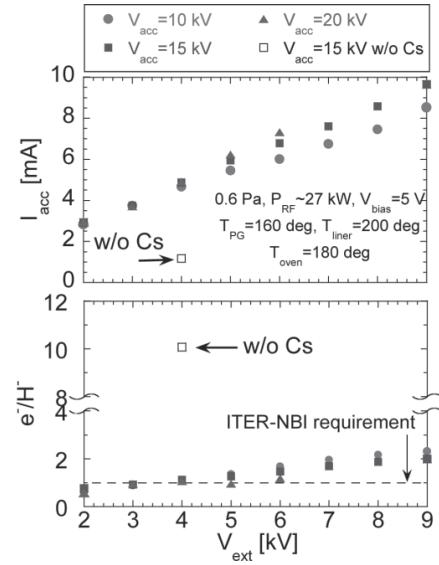


図3 ビーム引出し  $V_{ext}$  依存

$V_{ext}$  の増加に伴い, イオン源側への引出し電界の染み出しが大きくなつたため, PG 近傍の負イオンがより多く引き出されたことが考察される。 $V_{acc}$  と  $V_{ext}$  の増加に伴い電子負イオン比が増加する傾向となつた。この結果についても引出し電界の染み出しへによって多くの電子が引き出されていることが示唆される。また, 引出し電圧の変化によって引出し電界とプラズマの境界面の形状が変化, ビームの収束性が変化, 負イオンが下流まで引き出される前にEGに衝突している可能性も示唆される。

### 5. まとめ

ビーム引出しにおける負イオン電流量増加に向けて, フィルタ磁場強化及び Cs 導入を今回行った。先行研究では PG 近傍で負イオン電流値を4倍まで増加したことを確認, 最大で 10 mA/cm $^2$  の電流密度を達成した。水素での運転時には 28 mA/cm $^2$  が ITER-NBI での目標値のため, 性能向上にむけて Cs の導入条件について最適化及び, ビームの発散性などの評価が今後求められる。

### 文献

- P. Franzen, U. Fantz, D. Wunderlich, B. Heinemann, R. Riedl, W. Kraus, M. Froschle, B. Ruf, R. Nocentini and the NNBI Team, Nucl., **55**, 053005 (2015).
- A. Ando, T. Matsuno, T. Funaoi, N. Tanaka, K. Tsumori, and Y. Takeiri, Rev. Sci. Instrum., **83**, 02B122 (2012).
- Y. Sasaki, S. Takayama, H. Nakano, A. Komuro, K. Takahashi, and A. Ando, Plasma Fusion Res., **11**, 2405088 (2016).