

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：活動研究スタート支援

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22860009

研究課題名（和文） RF 負イオン源を用いた低仕事関数金属表面近傍での水素負イオンの特性評価

研究課題名（英文） Characteristics of negative hydrogen ions near the low work function surface in a Radio Frequency negative ion source

研究代表者 田中 のぞみ (TANAKA NOZOMI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60581296

研究成果の概要（和文）：数百 kHz 帯の低周波 RF イオン源内で生成した高密度プラズマ中における水素負イオンの密度計測を行い、その動作パラメータ、プラズマパラメータに関する特性の評価を行った。水素負イオン密度の計測には Cavity Ring Down (CRD)法を用いた。投入する RF パワーやプラズマ閉じ込めの改善に伴い、負イオン密度と共に負イオン密度は上昇する傾向を示した。この時、プラズマ生成部では電子温度が増加した。これらの結果は 0.4 Pa 程度の低ガス圧において、負イオンの元となる水素の振動励起分子が増加し、また電極近傍では中性粒子との衝突による負イオンの解離が抑制されることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：Characteristics of negative hydrogen ion ( $H^-$ ) density in a RF ion source were studied. Cavity Ring Down (CRD) method was utilized for  $H^-$  measurements. The  $H^-$  density increased as the electron density with increase of input RF power or improvement of plasma confinement. A large increase in  $H^-$  density was observed with decreasing gas pressure, and increase of electron temperature was observed in the driver. This implies: 1) increase of vibrationally excited hydrogen molecules that forms  $H^-$  ions in the source, and 2) decrease of dissociation process of  $H^-$  due to collisions with hydrogen molecules.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011 年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：プラズマ加熱、水素負イオン源、RF 負イオン源、負イオン密度計測、Cavity-Ring-Down 法

## 1. 研究開始当初の背景

水素/重水素負イオン( $H^-$ または $D^-$ )を用いた NBI (Neutral Beam Injection)方式は核融合を目指した高温プラズマの加熱と維持にとつ

て最も信頼性があり不可欠な方法として大型化、高電圧化、大電流化がすすめられている。国際熱核融合実験炉 ITER 以降の次世代の核融合開発における NBI には長時間定常

運転が求められており、高効率でメンテナンスフリーの負イオン源が必要とされている。現在主流となっているフィラメントを用いたアーク放電方式のイオン源は、フィラメントの損傷やタングステンスパッタによる表面の汚染に関連した負イオン電流量の低下などの問題点があり、不適當である。一方 RF 放電を用いたイオン源にはこのような問題は無く、そのため、外部アンテナ方式の高周波(RF)放電を用いたイオン源が ITER における NBI 負イオン源として採用され開発が進められている。

しかし、RF 放電プラズマは従来のアーク放電プラズマと比べ、負イオン表面生成に寄与する水素原子や正イオンの成分比や電子エネルギー分布関数、プラズマポテンシャルも異なるなどプラズマの特性パラメータが大きく相違することから、アーク放電方式と同じ形状でイオン源を構成することは負イオン生成効率を悪くする。特にイオン源内部や電極近傍における生成過程や引き出し特性はいまだ未解明な部分が多く、放電条件の違いにおける水素負イオン量の絶対量計測を実施し、その分布計測など詳細な計測をすることが求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、RF イオン源内部のプラズマ諸量の観測と負イオン生成量の絶対値計測を実施し、その相関を明らかにする。負イオン密度の絶対値計測法として、YAG レーザーを用い、負イオンの光脱離反応を利用した Cavity ring-down (CRD) 法を利用する。この計測値とラングミュアプローブによる電子温度、電子密度、分光法を利用した水素原子計測を組み合わせることで、セシウム(Cs)添加型 RF 負イオン源の基本的な動作特性評価を行う。

本研究では、高周波電源として、MOSFET を用いたインバータ方式の電源を用いることで、安価な電源回路で高効率な高周波印加を実現し、小型でも実機相当の高密度プラズマ条件 (電子密度  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  以上、電子温度 5-10 (eV)) 下での負イオン生成過程を評価することが特徴の一つである。高周波プラズマ生成を利用することで、高密度プラズマの生成が可能であり、負イオンが生成されるプラズマ電極近傍のフィルタ磁場、電極表面温度、セシウム(Cs)添加効果に関してその時間的変化の観測を行うことにより、金属表面近傍での水素負イオン生成過程の解明を目指す。

## 3. 研究の方法

実験には FET を用いた低周波数(0.3-0.5 kHz)、高密度水素負イオン源を用いた(図 1)。負イオン源はプラズマ生成部と拡散部から構成される。水素負イオン生成には 2 通りの

生成方法がある。1) 生成部で生成された水素の振動励起分子が、フィルタ磁場によりイオン源下流部に存在する低速( $\sim 1 \text{ eV}$ )の電子と解離性付着反応をすることで生成される体積生成、2) ビーム引き出し部のプラズマ電極にセシウムを添加することにより電極近傍で生成される表面生成である。負イオン生成過程の解明と生成効率の改善のためにはイオン源内部の負イオン量を直接計測することが不可欠である。このため、電極近傍のレーザーポートを用いて負イオン計測を行った。イオン源の代表的な動作パラメータは RF パワー、動作ガス圧力、フィルタ磁場、そして生成部に取り付けられたプラズマ閉じ込め用の外部磁場である。これらのパラメータに対し、プローブによる電子密度、電子温度計測、分光計測を負イオン計測に組み合わせ、本負イオン源の、水素負イオン生成に関わる基本的な動作特性を評価した。

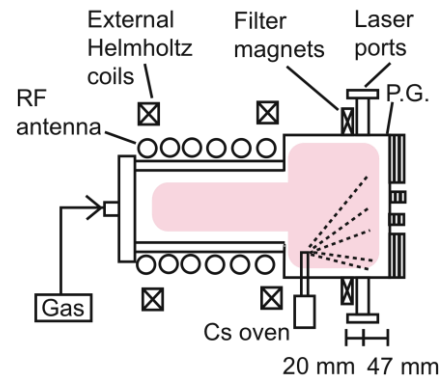
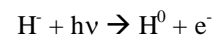


図 1: RF 水素負イオン源概略図

水素負イオン計測には負イオンの光脱離反応



を利用した二つの方法を用いた。光脱離計測では、イオン源内にレーザー光を照射し、脱離した電子密度増加を静電プローブで測定することにより、負イオンと電子の密度比を計測する。この方法は従来水素負イオン計測に用いられ、信頼度が高く CRD 計測の評価に用いる事ができる。一方 Cavity ring-down (CRD) 法では二枚の正対した超高反射率ミラー(>99.999%) 間を、片方から入射したレーザーパルス光を多重反射させる事で、もう片方のミラーから出射される微量の光の強度を計測する。この減衰波形の減衰時間を、負イオンの有無で比較することで、負イオンの線平均絶対値密度を計測することが可能である。CRD 法は装置やプラズマに非接触で計測を行うため、ビーム引き出し時やセシウム添加時に影響を受けにくいという利点があり、NBI 用水素負イオン源における計測にとって

非常に有利な方法である。

#### 4. 研究成果

##### (1) 光脱離計測による負イオン密度比計測

引き出し電極近傍のレーザーポートから YAG レーザーを入射し、上部にプローブを挿入して、光脱離計測を行った。得られた負イオン/電子密度比はフィルタ磁場が無い場合、2-4%であったのに対し、フィルタ磁場をかけることにより、10%程度まで急激に増加した。図2にフィルタ磁場有り無しでの、密度比動作ガス圧依存性の結果を示す。0.3-1 Pa の範囲で、低压側程密度比が高くなるという傾向が見られた。RF 投入パワーと外部磁場を変化させ、密度比を計測した結果、密度比にほとんど変化は見られなかった。

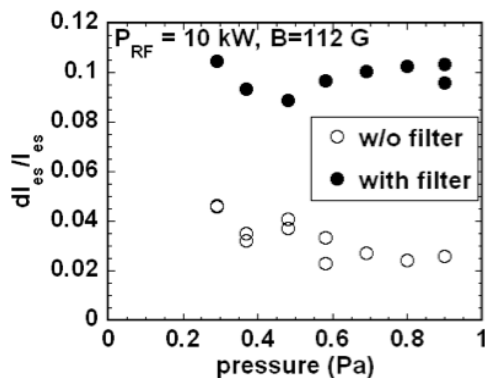


図 2: 負イオン密度比の動作ガス圧依存

##### (2) CRD 法による負イオン密度絶対値計測

###### ① レーザー光路上でのプラズマ密度分布

CRD 計測では、レーザーがプラズマ中を通過し、負イオンを光脱離することを利用して、線積分された密度情報が得られる。水素負イオン密度は以下の式で表され、均一なプラズマを仮定している。

$$n_{H^-} = \frac{1}{c} \left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \frac{d}{L} \frac{1}{\sigma}$$

ここで  $n_{H^-}$ : 負イオン密度、 $c$ : 光速、 $\tau$ : プラズマ中での減衰時間、 $\tau_0$ : 真空中での減衰時間、 $d$ : ミラー間の距離、 $L$ : プラズマ長である。一方実際のプラズマは密度分布を持つため、始めにレーザー光路上での電子密度分布の評価を行った。得られた電子密度の分布はガウス分布をしており、その幅  $\sigma$  は外部磁場の強度により、90-105 mm 程度である事が明らかとなった。CRD 計測ではこれにより得られた  $\sigma$  をプラズマ長とした。

###### ② 計測系の構築及び CRD 信号の評価

構築した CRD システムを図 3 に示す。1.3 m 程度の短管をレーザーポートの両端に取り付け、最端部にミラーを取り付けた。CRD 法

ではミラーの角度とアライメントが重要である、ミラー角度調整用の機構を取り付け、より精密な設置が可能になった。用いたレーザーはパルス長 ~8 ns、レーザーパワー ~20 mJ の、Nd: YAG 基本波(1064 nm)である。

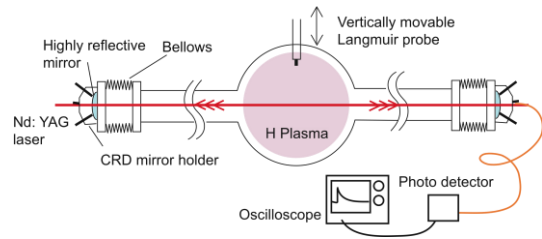


図 3: CRD 負イオン計測システム

測定では真空中で 300  $\mu$ s 程度の減衰時間を確保することができ、またミラー角度のアライメントを精密にすることにより減衰時間のエラーを 1  $\mu$ s 以下に抑えることに成功した。これにより、水素負イオン密度にして最小で  $10^{15} \text{ m}^{-3}$  台以上の計測を可能にした。典型的な CRD 減衰信号を図 4 に示す。

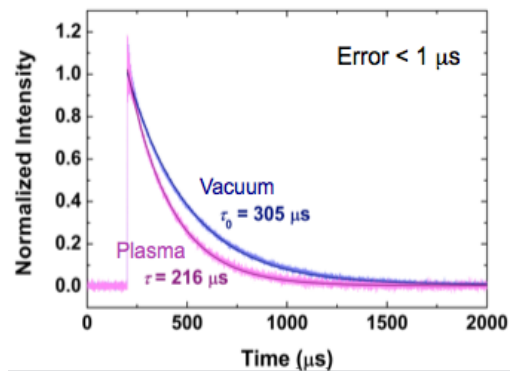


図 4: 真空中の CRD 減衰時間  $\tau_0$  およびプラズマ中の減衰時間  $\tau$

###### ③ 負イオン密度の特性評価

イオン源の基本パラメータに関して水素負イオンのイオン源動作特性を評価した。

得られた水素負イオン密度は  $10^{16} \text{ m}^{-3}$  程度であり、プローブを用いた光脱離計測実験結果とオーダーが一致した。また、上部ポート(図 3)にプローブを挿入し、中心部での電子密度を計測した。負イオン/電子密度比は数%であり、光脱離計測が局所的な計測であり、密度が高いプラズマ中心部で計測を行った事を考慮すると、光脱離計測と CRD 計測は良い一致を示したと言える。

電極近傍の負イオン密度と電子密度は投入パワーの増加に伴い増加する傾向を示したが、負イオン/電子密度比は一定であった。この傾向は前述した光脱離計測でも観測された。これらの結果から、投入パワーに応じ

て電子密度が増加することにより負イオン密度が増加することが明らかになった。閉じ込め磁場を増加すると共に負イオン密度は急激に増加した。これによりプラズマ閉じ込めの改善により、負イオン及び電子密度が急激に増加し、それに伴い負イオン密度も増加するという特性が明らかとなった。0.4-1.1 Paの範囲では動作ガス圧が低い程負イオン密度及び密度比は高い値を示した。負イオン/電子密度比も低圧側で増加し、光脱離計測と同じような傾向を示した。図5に投入パワーで規格化した負イオン密度のガス圧依存性を示す。

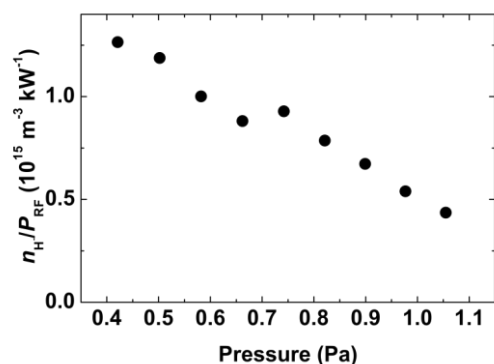


図5: 負イオン密度の動作ガス圧依存性

プローブ計測により、低い動作ガス圧でプラズマ生成部の電子温度が高い値を示す特性が得られている。これらの特性から、低ガス圧下では、負イオンの元となる水素の振動励起分子が増加し、また電極近傍では中性粒子との衝突による負イオンの解離が抑制されることを示唆した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①. N. Tanaka, T. Matsuno, T. Funaoi, A. Ando, Y. Tauchi, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, "Laser measurement of H<sup>-</sup> ions in a field-effect-transistor based radio frequency ion source" Review of Scientific Instruments **83** 02A731/1-3 (2012) (査読有)

②. A. Ando, T. Matsuno, T. Funaoi, N. Tanaka, K. Tsumori, Y. Takeiri, "H<sup>-</sup> beam extraction from a cesium seeded field effect transistor based radio frequency negative hydrogen ion source", Review of Scientific Instruments **83** 02B122/1-3 (2012) (査読有)

③. A. Ando, T. Matsuno, T. Funaoi, N. Tanaka, Y. Takeiri, K. Tsumori, "Characteristics of Hydrogen Negative Ion Source with FET based RF system", AIP conf. Proc. **1390**, 322-328 (2011) (査読有)

[学会発表] (計6件)

①. 田中のぞみ, 松野哲郎, 船生拓也, 安藤晃, 田内 康, 津守克嘉, 竹入康彦, "高周波イオン源における CRD 法を用いた水素負イオン密度計測", 日本物理学会第 67 回年次大会, 兵庫県西宮市(関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス), 2012 年 3 月 26 日

②. N. Tanaka, T. Matsuno, T. Funaoi, A. Ando, Y. Tauchi, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, "Production and Measurement of Negative Hydrogen Ions in a FET based RF Ion Source", 21st International Toki Conference, Toki, Gifu, Japan, November 28, 2011

③. 田中のぞみ, 松野哲郎, 船生拓也, 安藤晃, 田内 康, 津守克嘉, 竹入康彦, "高周波負イオン源内における水素負イオンのレーザー計測-Diagnostics of Negative Hydrogen Ions in a RF Ion Source by Using YAG laser", Plasma Conference 2011, 石川県金沢市(石川音楽堂), 2011 年 11 月 22 日

④. N. Tanaka, T. Matsuno, T. Funaoi, A. Ando, Y. Tauchi, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, "Laser measurement of H<sup>-</sup> ions in a FET based RF ion source", 14th International Conference on Ion Sources, Gairdini-Naxos, Italy, September 13, 2011

⑤. 田中のぞみ, 松野哲郎, 船生拓也, 安藤晃, 田内 康, 津守克嘉, 竹入康彦, "高周波負イオン源から引き出された H<sup>-</sup>ビームの基礎特性", 30pC02、プラズマ・核融合学会第 27 回年会, 北海道札幌市 (北海道大学学術交流会館), 2010 年 11 月 30 日

⑥. 松野哲郎, 船生拓也, 田中のぞみ, 安藤晃, 田内 康, 津守克嘉, 竹入康彦, "RF イオン源における水素負イオン生成", 30P18、プラズマ・核融合学会第 27 回年会, 北海道札幌市 (北海道大学学術交流会館), 2010 年 11 月 30 日

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 のぞみ (TANAKA NOZOMI)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60581296

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：