Measurement of the negative ions temperature in the hydrogen sheet plasma using an omegatron mass spectrometer contained a function of an ion energy analyzer

エネルギーフィルターを備えたオメガトロン型質量分析器による水素シートプラズマ中での負イオン温度計測

Toshikio TAKIMOTO, Takaaki IJIMA, Yuta TANAKA, Akira TONEGAWA, Kazutaka KAWAMURA

Department of Physics, School of Science, Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292, Japan

TEL: x81-463-58-1211(EX.3681) e-mail: 2bsp1208@mail.ac.jp, atone@tsc.u-tokai.ac.jp

Kohnosuke SATO

Chubu Electric Power Co. Inc. 20-1, Kitasekiyama, Ohdaka-cyo, Midori-ku, Nagoya, Aichi, 459-8522, Japan

(Received 25 January, 2016 Accepted 12 December, 2016)

We succeeded in measuring the negative hydrogen ions temperature T_{H^-} in the sheet plasma by using an omegatron mass spectrometer. The T_{H^-} was determined by measuring the ion current as a function of the ion repeller voltage V_{G2} using the omegatron mass spectrometer. Calculated using an energy distribution function, T_{H^-} was approximately 0.27 eV in the sheet plasma.

Keywords : Sheet plasma, Negative ion, Volume production, Omegatron mass spectrometer

I. INTRODUCTION

現在、負イオンは磁場閉じ込め型核融合炉の中性粒子ビーム入射加熱装置などのイオン源において重要な役割を果たすと考えられている。これらの装置内においては磁場の影響があるため、四重極子型質量分析器 (Q-mass) などの質量分析器による負イオンの粒子計測は困難である。そのため、通常ではレーザー光脱離法^{1,2}による負イオン計測が主流となっている。しかし、このレーザー光脱離法は、照射領域内の負イオンを破壊することで生じる脱離電子電流ピークの緩和時間から負イオ

ンを計測しているため、負イオン種を判別することは難しい。これらの理由から、我々は磁場中での測定が可能なオメガトロン型質量分析器³を用いることを考えた。

本研究では、負イオン源として東海大学の直線型シートプラズマ生成装置 TPD-Sheet IV (Test Plasma produced by Direct current for Sheet plasma IV)⁴⁻⁶を用いた。本装置では、体積生成法を用いて水素負イオンを生成している。体積生成では、まず高エネルギー電子 $e(\text{fast})$ ($T_e \geq 10 - 15$ eV) の衝突によって水素分子が励起される (式(1))。その後、解離性電子付着の反応断面積が大きい振動準位 6 以上の励起した水素分子 $H_2^*(v > 5)$ に、低エネルギー電子 $e(\text{slow})$ ($T_e \sim 1 - 2$ eV) が衝突することで、水素負イオン H^- が生成される (式(2))。^{4,7-11}

SAS Award was given to this paper presented as Poster Presentation at the 2015 SAS Symposium.

ここから分かるように、体積生成法では高エネルギー電子と低エネルギー電子の領域が必要となる。また、励起した水素分子は短寿命であるため、二つの領域は相応に近接している必要がある。本装置では、これら2つの条件をシートプラズマの高温である中心領域 ($T_e \geq 10 - 12 \text{ eV}$) と低温である周辺領域 ($T_e \sim 1 - 2 \text{ eV}$) において達成している。⁴そこで、本研究では TPD-Sheet IV で生成した水素プラズマ中における負イオン種の同定と負イオン温度の計測を、オメガトロン型質量分析器により行うことを目的とする。

II. EXPERIMENTAL SETUPS

本研究で用いた負イオン源である、直線型シートプラズマ生成装置 TPD-Sheet IV の概念図を Fig. 1 に示す。TPD-Sheet IV で生成されるプラズマは、放電領域と実験領域の二領域に分けられる。水素シートプラズマは LaB_6 熱陰極とスリット (幅 40 mm × 高さ 2 mm) を持つ陽極間の直流放電により生成される。また、11 個の長方形の磁気コイルが 0.094 T で一定の磁場を実験領域に生成することで、実験領域まで生成されたプラズマを導く。シートプラズマは放電陽極から Z 軸方向に 0.7 m 離れた、水冷され電気的に浮いたターゲットプレートで終端する。プラズマは 0.05 Pa の放電チャンバー内において、放電出力 7.6 ~ 25 kW で生成される。二次ガスはガスフィーダーから供給される。このガスフィーダーは実験領

域内の陽極から 0.6 m, シートプラズマの下 20 mm の位置に設置されている。二次水素ガスは低圧の実験領域内の水素シートプラズマへ垂直に供給される。実験領域内の中性ガス圧力は、二次水素ガス供給によって 0.1 ~ 2.3 Pa の間で制御される。このとき、放電領域へのコンダクタンスが十分に小さいため、実験領域内の中性ガス圧力は放電領域内でのプラズマ生成には影響しない。

TPD-Sheet IV において、シートプラズマに二次ガスを垂直に導入する利点として、(i)放電領域と実験 (負イオン生成) 領域が分けられているため、プラズマのパラメータや状態を二つの領域において自由に設定できること(ii)放電をしながら放電電流とガス流量を自由に变化させることで、プラズマ密度と電子温度に幅広い変化を与えられること(iii)二次水素ガスを低温プラズマと高温プラズマの両方が存在する狭い領域へ垂直に供給することで、シートプラズマが大きな温度勾配を持つプラズマのような境界を持つことになる、⁴ という点が挙げられる。先に述べたが、(iii)が負イオン生成におけるシートプラズマの重要な特性であり、過去の研究における電子温度分布の計測から確認されている。

Fig. 1. Cross-sectional diagram of TPD-SheetIV.

Fig. 2. Cross-sectional diagram of the omegatron mass spectrometer.

負イオン計測に用いるオメガトロン型質量分析器の概念図を Fig. 2 に示す. オメガトロン型質量分析器はピンホール ($\phi=1.5$ mm) が開いたターゲットプレートの後ろに設置され, 差動排気されている. オメガトロン質量分析器は電氣的に絶縁されており, プラズマ中に入れるために全体を完全に覆った箱体のチャンバーとなっており, 水冷されている. 質量分析器の計測領域内部では, 第 1 グリッド (G1) で正の電圧を印加し正イオンの追い返し, 負イオンの引き込みが行われる. その後, 第 2 グリッド (G2) および第 3 グリッド (G3) にプラズマ中の浮遊電位と同等の電圧を印加し, 加速した負イオンの減速が行われる. 最後に, チャンバー内に引き込まれた負イオンの Larmor 半径を, チャンバー上部の電極に印加した高周波電場 (Sine 波) により増大させ, 電子と分離し, チャンバー下部に設置されたコレクタ電極で捕集する. このとき, 高周波を掃引することで, イオンサイクロトロン周波数 $f_c = eB/2\pi m$ と高周波電場の周波数が等しいときのみ, 検出される電流値にピークが現れる. また, オメガトロン型質量分析器で負イオン温度を計測する場合は, 第 2 グリッドの印加電圧 V_{G2} を変化させることで, 第 1 グリッドで引き込んだ負イオンのうち, 印加電圧以下のエネルギーしか持たない負イオンを選択的に排除する. これによってコレクタ電極で検出される負イオン電流ピーク I_{H^-} の変化が生じるため, 第 2 グリッドの印加電圧との相関 (V - I 特性) を得ることができる.

III. RESULT AND DISCUSSION

放電電力 13 kW における, コレクタ電流 I_C と高周波電極への印加周波数との相関を Fig. 3 に示す. 負イオン

Fig. 3. The negative hydrogen ions mass spectrum by measuring the omegatron mass spectrometer.

を計測する際は, 実験領域内の中性ガス圧力 $P=0.3$ Pa, プラズマ中心から垂直方向に $Y=12$ mm, グリッド電圧 $V_{G2}=5$ V に設定した. また, 計測領域の磁場強度は $B=0.08$ T で, このときの水素負イオン H^- のサイクロトロン周波数は $f_c = 1.2$ MHz であり, Fig. 3 の電流ピークの位置とよく一致している. したがって, シートプラズマ中における H^- のイオン種分析を行うことができたと考えられる.

オメガトロン型質量分析器で得られた, 第 2 グリッドの印加電圧 V_{G2} に対する負イオン電流ピーク I_{H^-} の変化と, その微分曲線 dI_{H^-}/dV_{G2} を Fig. 4 に示す. 実験条件は, 放電電力が 13 kW, $P=0.3$ Pa, $Y=12$ mm と質量分析の場合と同じである. 実験から得られた V - I 特性から水素負イオンの平行方向の速度分布関数を求めることで, 水素負イオン温度 T_{H^-} を以下の式のように求めることができる.¹²

$$T_{H^-} \approx \left\langle \frac{(m_{H^-})v_{\parallel}^2}{2e} \right\rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(m_{H^-})v_{\parallel}^2}{2e} f(v_{\parallel}) dv_{\parallel}}{\int_{-\infty}^{\infty} f(v_{\parallel}) dv_{\parallel}} \quad (3)$$

ここで, $v_{\parallel}$ は負イオンの平行速度成分, m_{H^-} は水素負イオンの質量である. (3) 式より, 水素負イオン温度 T_{H^-} は 0.27 eV と求まった. ここで, 負イオンの体積生成における水素分子の解離エネルギー¹³ (<2 eV) と比較すると, 得られた水素負イオン温度 T_{H^-} は十分に小さいため, 妥当な数値であると判断できる.

Fig. 4. Characteristics of $V_{G2} - I_{H^-}$ and dI_{H^-}/dV_{G2} curve as a function of repeller bias voltage V_{G2} by measuring the omegatron mass spectrometer.

IV. SUMMARY AND FUTURE PLAN

本研究では, オメガトロン型質量分析器により直線型ダイバータ模擬装置 TPD-Sheet IV で生成した水素シー

トプラズマ中の負イオン種および負イオン温度の計測を目的とした。実験では、水素負イオン H^- の特定に成功し、水素負イオン温度 T_{H^-} を 0.27 eV と求めることができた。

マルチグリッド式イオンエネルギーアナライザーのイオン温度計測においては、グリッドメッシュの細かさがエネルギー分解能に影響するという報告¹⁴があるが、我々の計測装置では電流の検出にイオンサイクロトロン加熱を用いているため、これらの機構が相互に影響し合っていると予想される。したがって、イオンサイクロトロン加熱がイオン温度計測に及ぼす影響を明らかにしていくことが今後の課題であると考ええる。

REFERENCES

- ¹ M. Bacal, G. W. Hamilton, A. M. Bruneteau, H. J. Doucet and J. Taillet: Rev. Sci. Instrum., 50, 719 (1979).
- ² P. Devynck, J. Auvray, M. Bacal, P. Berlemont, J. Bruneteau, R. Leroy and R. A. Stern: Rev. Sci. Instrum., 60, 2873 (1989).
- ³ E. M. Hollmann, G. Antar, R. P. Doerner and S. C. Luckhardt: Rev. Sci. Instrum., 72, 623 (2001).
- ⁴ A. Tonegawa, K. Kumita, M. Ono, T. Shibuya and K. Kawamura: Jpn. J. Appl. Phys., 45, 8212 (2006).
- ⁵ H. Yazawa, A. Tonegawa, M. Ono, T. Shibuya and K. Kawamura: Jpn. J. Appl. Phys., 45, 8208 (2006).
- ⁶ T. Iijima, S. Hagiwara, S. Tanaka, A. Tonegawa, K. Kawamura and K. Sato: Fusion Science and Technology, 63, 417 (2013).
- ⁷ W. G. Graham: J. Phys., D 17, 2225 (1984).
- ⁸ R. I. Hall, I. Čadež, M. Landau, F. Pichou, and C. Schermann: Phys. Rev. Lett., 60, 337 (1988).
- ⁹ C. Schermann, F. Pichou, M. Landau, I. Čadež and R. I. Hall: J. Chem. Phys., 101, 8152 (1994).
- ¹⁰ O. Fukumasa, N. Mizuki and E. Niitani: Rev. Sci. Instrum., 69, 995 (1998).
- ¹¹ O. Fukumasa, S. Mori, N. Nakada, Y. Tauchi, M. Hamabe, K. Tsumori and Y. Takeiri: Contrib. Plasma Phys., 44, 516 (2004).
- ¹² A. Matsubara, A. Tonegawa, T. Shibuya, K. Sato, K. Kawamura and K. Takayama: J. Appl. Phys., 89, 5326 (2001).
- ¹³ R. Celiberto, R.K. Janev, A. Laricchiuta, M. Capitelli, J.M. Wadehra, D.E. Atems: Atomic Data and Nuclear Data Tables, 77, 161-213 (2001).
- ¹⁴ H. Ikezi and R. J. Taylor: J. Appl. Phys., 41, 738 (1970).