Visible spectroscopic measurement of ion temperature in He and Ne sheet plasma

可視分光法によるHeおよびNeシートプラズマ中のイオン温度測定

Ryoichiro MURATA, Hitoshi NAKAJIMA and Shigeyasu SAKAMOTO

Department of Nuclear Engineering, School of Engineering, Tokai University,

1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 JAPAN

TEL: 81-463-58-1211(Ext.5519), FAX: 81-463-69-1961, E-mail: 8jasm024@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

Akihiro MATSUBARA, Akira TONEGAWA

Department of Physics, School of Science, Tokai University

Kazutaka KAWAMURA, Kazuo TAKAYAMA

Research Institute of Science & Technology, Tokai University

(Received 15, November 1999 Accepted 6, March 2000)

As the simulated experiment of a gas divertor in a fusion reactor, we measured ion temperature of He and Ne sheet plasma by using visible spectroscopy. The ion temperature shows 1.5 [eV] for He⁺, and 4.7 [eV] for Ne⁺. The larger the discharge current, the larger the ion temperature becomes. On the other hand, increase of gas flow rate shows the decrease of ion temperature.

Keywords: Ion temperature, Visible spectroscopy, Sheet plasma, Gas divertor and Doppler broadening

I. INTRODUCTION

直線型のプラズマ装置を用いた核融合実験装置のダイバータ部の模擬研究が盛んに行われているが、¹ そのようなプラズマ中のイオン温度が報告された例は少ない。² しかしプラズマがダイバータ板へ与える熱負荷など、プラズマと壁との相互作用を考える上でイオンのエネルギー、すなわちイオン温度は非常に重要なパラメータの一つといえる。今回報告する直線型プラズマ装置(シートプラズマ生成装置: ISD Isotope Separation Device)についてもガスダイバータ模擬実験を行っており、HeおよびNeのシートプラズマを生成して、可視分光法を用いてそのイオン温度測定を行った。なお、Heは炉心プラズマからダイバータ領域へ流入する「He灰」、Neはダイバータ領域に流入する高温プラズマの冷却ガス³ として有力視されていることから、本研究においてHeとNeを使用した。なお、比較的高密度(10^{16} [m⁻³]程度かそれ以上)のプラズマによる熱流と、外部磁場(分光測定部での磁束密度: 約0.27[T])による影響が大きいため、ファラデーカップなどを用いて直接的にイオン温度測定を行うことは非常に困難であり、プラズマに対して非接触的に測定を行う分光法はこれらの点で優れている。また、本研究においてプラズマ生成用の熱陰極材料を従来の BaO(酸化バリウム)から LaB₆(六ホウ化ランタン)に変更したことにより、プラズマ放電電流の上限を20[A]から50[A]まで引き上げることに成功した。

II. EXPERIMENTAL

プラズマ中のイオンが Maxwell 速度分布則に従うとすれば、イオンから放射される光のスペクトル波形はドップラー効果によって Gaussian 型に広がることが知られている(ドップラー広がり)。⁴⁻⁶ この時、Gaussian の全半値幅($\Delta\lambda_{D1/2}$:[nm])とイオン温度(T_i :[eV])との関係は次式で与えられる。

$$T_i = 1.7 \times 10^8 \times A \times \left(\frac{\Delta\lambda_{D1/2}}{\lambda_0} \right)^2 \quad (1)$$

ここで A は着目しているイオンの原子量: [-], λ_0 はそのイオンから放射されるスペクトルの波長: [nm]である。本研究では、He: HeII 468.568[nm]、Ne: NeII 373.494[nm]の光を使用し

FIG.1. Schematic diagram of visible spectroscopic measurement system.

た。Figure 1 に可視分光計測の概略図を示す。シートプラズマからの光はプラズマに対して直角方向に取り出し、レンズと鏡で分光器(SPEX-1404 Double Spectrometer, Czerny-Turner Mount type)へ導く。分光器で波長ごとに分解された光は、HeもしくはNeのイオン放射スペクトルについて光電子増倍管により出力し、微小電流計(TR8652)とデータ収集装置(RT3424)で波形データとして記録する。その波形データについて PC 上で Gaussian をフィッティングして全半値幅を求め、その値から(1)式によってイオン温度を計算した。また、本研究におけるイオン温度計算の際には、分光器のスリット幅から求まる装置幅によってのみ全半値幅の補正を行い、また、プラズマの密度や磁場によるスペクトル波形の広がり、すなわちシュタルク効果とゼーマン効果による広がりには影響が小さく無視できるため、ドップラー広がりだけに着目した。

シートプラズマの生成条件は、プラズマ放電電流を20[A]から最大50[A]の間で変化させ、放電ガスの流量を He: 85, 100[sccm]、Ne: 70, 85, 100[sccm]とした。また He 放電時については、放電安定化を図るために、プラズマ放電部に対して Ne を4[sccm]、分光測定部近傍へ放電ガスとは別に He を30[sccm]導入した。外部磁場の磁束密度は、放電領域: 約0.23[T]、分光測定部: 0.27[T]。図中の誤差は同一の測定点について2,3回測定を行い、その平均値からのバラツキの程度を示す。

III. RESULT and DISCUSSION

Figure 2 にプラズマ放電電流: I_d [A] に対する He シートプラズマ中のイオン温度: T_i [eV] を示す。He ガス流量: Q_{He} が $85 + \alpha$ [sccm] (α は放電ガス以外に導入している Ne: 4[sccm] と He: 30[sccm] のガス流量を表す)・放電電流が 20[A] の場合にイオン温度は約 1.5[eV] を示し、放電電流の増加とともに 2[eV] 程度まで上昇している。また、He ガス流量を $100 + \alpha$ [sccm] (放電ガス流量だけを変化させた) に上昇させると、イオン温度は全体的に 0.5[eV] 程度低下することが判る。

Figure 3 に Ne シートプラズマにおけるイオン温度を示す。Ne ガス流量: Q_{Ne} が 70[sccm]・放電電流が 20[A] の場合、イオン温度は約 4.7[eV] であり、放電電流の増加とともにイオン温度が上昇し、かつ Ne ガス流量の増加とともにイオン温度が低下する、という He シートプラズマと同様の傾向が得られている。よって、シートプラズマ中のイオン温度の放電電流・放電ガス流量による制御の可能性が示唆される。

イオン温度の放電電流・放電ガス流量に対するこれらの傾向は、放電領域におけるプラズマの電離度に関係すると考えられる。放電ガス流量が一定であるときに、放電電流を増加させることはプラズマの電離度を上昇させ、プラズマ中を流れる電流の担い手である電子の密度を増加させることを意味する。一方でシートプラズマ生成装置に使用した「TP-D (Test Plasma generated by DC discharge) 型プラズマ源」の特徴として、放電電流の増加に伴って放電領域の中性ガス圧が上昇することが経験的に知られており、プラズマ中のイオンと電子とのクーロン衝突頻度も増加する。そのためにプラズマの放電電流を増加させることによってイオンと電子の密度が増し、かつクーロン衝突がより頻繁に起こるため、本来低温であると考えられているイオンの温度が高温の電子温度 (シートプラズマ中の電子温度は 10[eV] 程度である) に近づく結果、数[eV] のオーダーにまで上昇するものと考えられる。なお、この時にガス流量を増加させると、放電領域の中性ガス圧がさらに上昇してイオンと電子との衝突頻度がより頻繁になるが、イオンと中性粒子との衝突頻度も増加するためにイオン温度は低下する (He および Ne の中性粒子の温度は、可視分光法によって He: 0.5、Ne: 2[eV] 程度と見積もられている)。そのため、放電電流を増加させ、イオンが電子によって加熱されたとしても、低温の中性粒子との衝突による冷却の割合も多くなるため、相対的にイオン温度は低下する。

なお、本研究において Ne ガス流量をより少なくした場合 (Q_{Ne} : 50[sccm]) にイオン温度が急激に上昇し、またそれに伴ってシートプラズマそのものが通常よりも暗くなり (“Dark mode”, Fig.4 参照)、プラズマ終端部に設置した Target の浮遊電位が低下するなどの現象が確認されたが、これらの現象について詳しいことは今のところ不明である。

IV. CONCLUSION

可視分光法を用いて、He および Ne シートプラズマ中のイオン温度を測定した。その結果、He と Ne のどちらのシートプラズマについても、プラズマの放電電流を増加させるとイオン温度は上昇した。放電ガス流量を増加させた場合についても He、Ne とともにイオン温度は低下した。Ne シートプラズマについては、プラズマが暗くなるとともにイオン温度が急激に上昇する現象が確認された。

FIG.2. Variation of T_i with I_d at various Q_{He} for He sheet plasma.

FIG.3. Variation of T_i with I_d at various Q_{Ne} for Ne sheet plasma.

FIG.4. Variation of T_i with I_d at various Q_{Ne} for Ne sheet plasma, including the “Dark mode”.

V. REFERENCES

- ¹ Y. Uesugi, J. Plasma and Fusion Res., **69**, 1163–1169 (1993)
- ² T. Imai, Touhokudaigaku Dentsuu Danwakai Kiroku, **67**, 210–211 (1998)
- ³ L. Schmitz, L. Blush, G. Chevalier, R. Lehmer, Y. Hirooka et al., J. Nucl. Mater, **196–198**, 841 (1992)
- ⁴ The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research editing, Purazumashindan no kiso (Nagoya Univ. Publishing Society, 1990)
- ⁵ Y. Fujioka editing, Bunkougaku (Kodansha, 1967)
- ⁶ H. R. Griem, Plasma Spectroscopy (McGrow Hill, NY, 1964)

Presented at '99 SAS Intelligent Symposium