

内部導体装置Mini-RTにおける偏光分光計測

学生証番号 56210 氏名 坂田 大輔
(指導教員 小川 雄一 教授)

Key Words : polarization, alignment, anisotropy, high energy electron,

1. 研究背景

1.1 プラズマ中の高エネルギー電子

内部導体装置Mini-RTは、近年提唱された二流体緩和平衡理論[1]を実証するために立ち上げられた、高 β プラズマの生成を目的とするプラズマ実験装置である(図1)。Mini-RTの一番の特徴は、コイルの磁気浮上制御が可能な点で、コイルを浮上させることで電子温度、密度の向上が確認されている。現在、Mini-RTを用いた研究のホットトピックの一つが、高エネルギー電子の温度、密度の定量評価である。Mini-RTにおいて高エネルギー電子は、2.45GHzのECH(electron cyclotron heating)により生成され、その結果、磁場に垂直方向に高エネルギーな非等方プラズマとなる。高エネルギー電子のパラメータが電子の加熱効率に影響することが知られており、したがって、高エネルギー電子の定量評価が可能になれば、ガス圧等の実験パラメータと加熱効率との相関を知ることができ、Mini-RTプラズマのさらなる理解につながる事が期待されている。

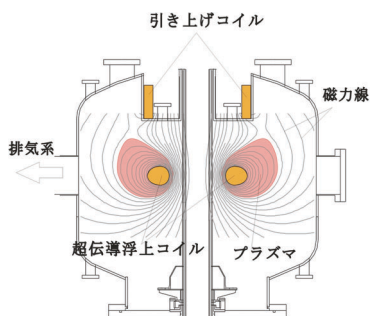


図1. Mini-RT断面図。

1.2 偏光分光計測

高エネルギー電子を定量的に評価する方法として、近年、プラズマ偏光分光計測が注目されている。既存の分光法との大きな違いは、偏光分光では、非等方なプラズマを仮定することができるため、ECHプラズマ実験の計測により適している点である。非等方な電子衝突による励起が、磁気副準位間の不均一な励起(alignment)をもたらし、その原子が自然放射によって下準位へ遷移する際の放射光が、偏光と

なって観測されるという原理である。偏光分光で観測する物理量は、二つの直交(磁力線方向を基準)する偏光成分 I_π 、 I_σ であり、これから偏光度AL

$$A_L \equiv (I_\pi - I_\sigma) / (I_\pi + 2I_\sigma) \quad (1)$$

の実験値が求まる。偏光度ALは、alignment $a(p)$ を用いて、

$$A_L(p, s) = (-1)^{J_p + J_s} \sqrt{\frac{3}{2}} (2J_p + 1) \begin{Bmatrix} J_p & J_p & 2 \\ 1 & 1 & J_s \end{Bmatrix} \frac{a(p)}{n(p)} \quad (2)$$

とかけ、ここで求まる $a(p)$ を理論計算値と比較することで、高エネルギー電子の温度、密度が同定される($n(p)$ に関しても同様な比較が必要だが、ここでは割愛する)。(2)式で、 $\{ \}$ は6jシンボルで、遷移元準位 p 、遷移先準位 s の全角運動量 J_p 、 J_s で表される。

定性的には、高エネルギー電子ビームの方向に対して、垂直方向の偏光成分が大きくなることが実験的に知られている[4]。したがって、磁力線に垂直な成分が高エネルギーのECHプラズマでは、 I_π が大きくなり、偏光度ALは正值となると予想される。

この実験事実を踏まえ、本研究では、高エネルギー電子の定量的評価に向けた研究の1st-stepとして、偏光分光計測系を導入し、Mini-RTを用いたHeプラズマ分光実験により偏光度ALの値を求め、各種実験パラメータとの関係をまとめ考察した。

2. Mini-RTにおける偏光分光計測系

Mini-RTに導入した偏光分光計測系の概観を図2に示した。観測ラインは断面積等の理論データ、実験データの比較的多いHeIラインを用いるため、400nm以下の短波長域でも高透過率特性をもつ石英ガラスを、真空容器窓材($\Phi=150\text{mm}$)および集光レンズ($\Phi=75\text{mm}$, $f=150\text{mm}$)に採用した。偏光分離素子は、視野角が広く透過特性の良いグラントムソンプリズム($\Phi=10\text{mm}$, $L=30\text{mm}$)を用いた。プリズムで I_π 、 I_σ に分離された放射光は、後方に設置された光ファイバーに取り込まれたあと分光器へと入射し、CCD上で二つの偏光成分の光量を積算して偏光度ALの実験値を求めた。また、集光系は水平面内で回転可能であり、それにより、 $R=210\sim 400\text{mm}$ のプラズマ領域での観測を行うことができる設計とした。

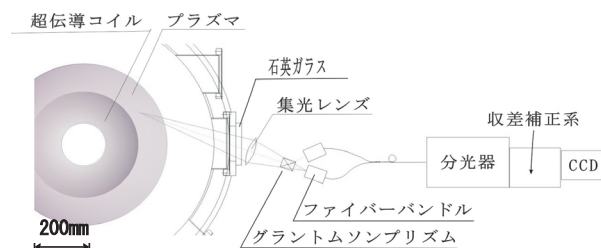


図2. 偏光分光系概観

3. Heプラズマの偏光度AL

Mini-RT実験でHeIラインの観測を行った結果、728nm~318nmの22本のラインを観測できた(図3)。理論的にS軌道からの放射は偏光度0であるが、実際は0.1程度の値となった。この値をオフセットとみなし、他のラインの偏光度を校正すると、およそ+0.03以下の正值であった。これから、Mini-RTプラズマで磁力線垂直方向の高エネルギー電子が存在することが実験的に確認できた。また、上準位がn¹Dの放射光の偏光度(図中A~D)が比較的大きな値となった。

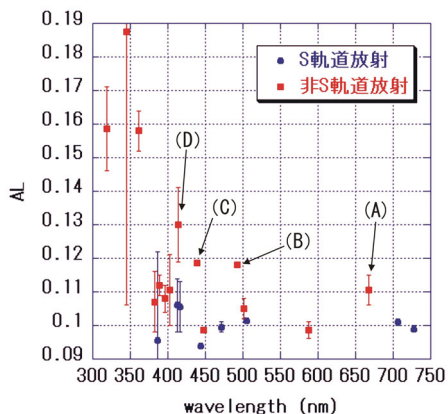


図3. HeIラインの偏光度。Phe=6.0×10²Pa、R=225mm、Pin=2.5kw、コイル支持状態、IF=45~36A。(A)667.8nm:2¹P-3¹D,(B)492.2nm:2¹P-4¹D,(C)438.8nm:2¹P-5¹S,(D)414.4nm:2¹P-6¹D

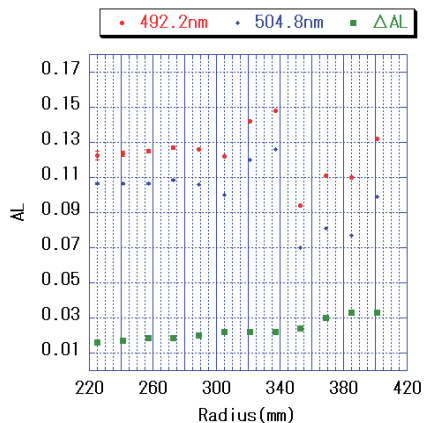


図4. 偏光度の空間依存性。Phe=6.0×10²Pa、Pin=2.5kw、コイル支持状態、IF=62~55A。

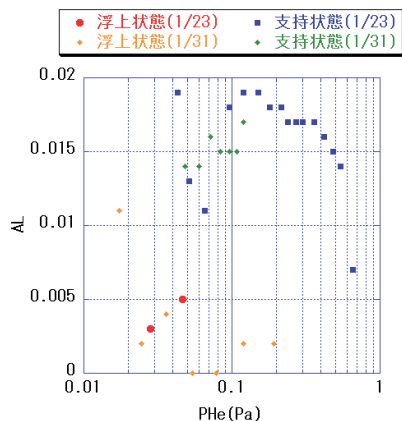


図5. 偏光度のガス圧依存性。波長は492.2nm、R=225mm、Pin=2.5kw。

図4はコイル支持状態で偏光度ALの空間依存性を調べた結果である。これから、プラズマ外側ほど偏光度の値が大きくなる傾向が得られ、プラズマは外側ほど非等方であるといえる。

図5は偏光度ALのガス圧依存性をコイル支持状態・浮上状態の2パターンで行った結果である。図5から、R=225mmでは、支持状態のほうが浮上状態より偏光度が大きく、より非等方なプラズマであることがわかる。

4. まとめ

本研究では、非等方的な高エネルギー電子の定量的評価を目的とし、偏光分光計測系をMini-RTに導入した。偏光度ALの計測実験より以下のことが得られた。

- ・支持状態にて偏光度は+0.03以下の正值であった
- ・偏光度が正值であることから高エネルギー電子の存在を偏光実験により確認できた
- ・n¹D軌道からの放射(667.8nm、492.2nm、438.8nm、414.4nm)の偏光度が大きいう特徴がある
- ・入射電力は電子速度分布の非等方に影響しない
- ・点火直後に最外殻磁気面付近の非等方が強く、磁力線垂直方向の高エネルギー電子が多く存在する
- ・電子サイクロトロン共鳴面の位置は電子の非等方に寄与しない

5. 参考文献

[1] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett., 81, 4863(1998).
 [2] T. Fujimoto and S. A. Kazantsev, Plasma Phys. Control. Fusion 39, 1267 (1997).
 [3] A. Iwamae, Plasma Phys. Control Fusion 47 (2005) L41-L48
 [4] Hedlle D.W.O. and Gallagher J.W., Rev. Mod. Phys. 61, 221 (1989).