

報告番号



甲第

966号

# 主論文の要旨

非平衡セシウムプラズマの  
題名 輸送現象に関する研究

氏名 山田 諄

# 主論文の要旨

報告番号 ※甲第 966 号 氏名 山 田 諄

21世紀には化石燃料が枯渇することが予想され、新しいエネルギー発生に関心が集まっている。核融合は閉じこめ方式の研究段階であり、炉の実現は今世紀には困難視されている。この見地から内外において新しいエネルギー変換方式の開発が盛んになった。従来の火力発電方式の効率を高くする目的でMHD発電が考えられ、太陽熱を利用する熱電子発電が考えられている。これらはいわゆる直接発電方式で、エネルギー変換の媒体としてアルカリ金属プラズマの高導電性が利用される。また宇宙におけるロケットの推進に用いられるイオンロケットにもこのようなアルカリ金属プラズマが利用される。特にセシウムは単体原子としては最低の電離電圧を持っており、励起断面積や電離断面積が大きく容易に電離や励起をおこなうので広くプラズマ機器に利用される。これらプラズマ機器の大部分において、密度や導電性を高めるため外部界が加わり電子温度がイオンや中性原子温度より高い非平衡プラズマが見られる。このような非平衡セシウムプラズマ中で起る種種の基礎過程を明らかにし輸送現象を解明してゆくことが本論文の目的である。また工学的応用の見地からすれば、電子密度や導電率の大きなプラズマを得ることは非常に有益であり、このため新しい形の

# 主論文の要旨

2

報告番号	※甲第	号	氏名	山	田	諄
------	-----	---	----	---	---	---

プラズマ源の発生とその中における輸送現象の解明も本研究の重要な部分を占めている。

本論文は6章から構成されている。第1章では、非平衡セシウムプラズマに関する従来の研究を概観し、本研究の目的と意義および本論文の構成について述べた。

第2章では、非平衡セシウムプラズマの巨視的性質を微視的過程から導くため、セシウムプラズマ中で起る電離、励起、再結合、拡散、放射等の色々な基礎過程について詳しく述べられ、それらの過程の単位時間当りの発生割合が求められ、その結果を用いて衝突-放射モデルに基く発生と消滅のつり合から電子密度が求められた。

セシウムプラズマにおいては基底状態にある原子と電子との衝突による直接電離よりも励起原子からの累積電離のほうが荷電粒子の発生に支配的であり、励起原子が輸送現象に重要な役割をはたしていることが指摘されているが、従来の衝突-放射モデルにおいては共鳴励起準位への励起断面積が他の準位へのそれに比べ十分大きいという理由によって、励起原子として共鳴励起原子しか考慮されていない。しかし他の準位の励起原子がプラズマの巨視的性質に影響を与えないだろうかという疑問が残る。そこで

# 主論文の要旨

3

報告番号	※甲第	号	氏名	山	田	諄
------	-----	---	----	---	---	---

最低励起準位から数え最高7つの励起準位まで考えた衝突-放射モデルから電子密度を求め、取扱うプラズマの温度や圧力の条件により考慮すべき励起準位の数の目安を与え励起原子の役割について考えた。ここで求めた電子密度は電子温度や圧力が高いときは局所的熱平衡状態における Saha の式から計算される値に近いが、温度や圧力が低くなると Saha の式から求めた値より小さくなる。これは衝突過程により保たれていた局所的熱平衡状態が、温度や圧力が低くなるとともに拡散や放射による損失が増え熱平衡状態が破れるためである。またモデルに含まれる励起準位の数を変えた衝突-放射モデルによる電子密度の計算結果によれば、密度や温度の高いときには共鳴励起準位のみを考慮すれば十分であるが、密度や温度が低いとき、例えば、中性原子密度  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度  $1800^\circ \text{ K}$  のとき共鳴励起準位のみを考慮した場合の電子密度は7つの励起準位を考えた場合の約  $1/8$  だけ小さい。これは共鳴励起準位への励起確率は他の準位へのそれと比べ大きい励起準位からの電離確率はエネルギーの高い準位からの電離のほうが大きいためである。従って励起原子が荷電粒子の発生に重要な役割をはたしていることがわかった。第3章では、放電を維持するために必要な直流電界に

# 主論文の要旨

4

報告番号 ※甲第 号 氏名 山 田 諄

比べ十分小さい振幅を持った交流電界を印加した時、電子の速度、密度、温度ばかりでなく励起原子密度も交流電界により擾動をうけるとして、第2章で述べた衝突、放射過程を考慮した流体力学の基本式からインピーダンスの絶対値を求め陽光柱プラズマにおける実験結果と比較検討をおこない、励起原子のプラズマの動的性質への寄与を明らかにした。

プラズマのインピーダンスは印加された交流電界により電子の速度のみが擾動をうけると仮定して導かれた簡単な公式が従来から提案されており、周波数の十分高い領域で実測と良く一致することが既に確かめられている。しかし、セシウムのように励起断面積や電離断面積の大きなプラズマにおいて周波数の低い領域でこの公式からずれることが予想される。実際、電子の速度のみでなく電子密度、温度、励起原子密度の擾動を考慮して計算されたインピーダンスの絶対値は周波数の低い領域 ( $10^4$  Hz 以下) において従来の公式で計算されるより小さい値を示す。これは印加された交流電界により電子密度、温度、励起原子密度が擾動をうけ実効的にこれらの値が増加するためである。しかし周波数が高くなるにつれ、励起原子密度、電子密度、温度の擾動が交流電界に追従できなくなり、ついに電子の速度のみ

# 主論文の要旨

5

報告番号	※甲第	号	氏名	山田 諄
<p>が振動をうけ従来の公式に一致する。セシウム放電管の陽光柱におけるインピーダンスの絶対値の測定結果は計算値とかなり良く一致しておりここで考えたモデルが正しいことを示している。また励起原子が関与する衝突周波数は非常に大きく、励起原子が電子のエネルギー損失、従ってインピーダンスに大きく寄与していることがわかった。</p>				
<p>第4章では、セシウム金属蒸気に外部から共鳴光を照射することにより従来とはまったく異なる方法によりプラズマが作られた。光による直接電離はその断面積が小さくレーザを除けば強力な光源がないため、一般には光の照射により作られたプラズマは利用されていない。しかしここでは光の吸収に共鳴を利用しているのので吸収効率が良く圧力 <math>10^{-3} \sim 10^{-1}</math> torr で <math>10^{11} \text{ cm}^{-3}</math> 程度の密度を持った内部に電流のない静かなプラズマが得られた。このような共鳴光電離プラズマをMHD発電プラズマの導電率向上のために付加したり、波動現象の研究のための新しいプラズマ源として利用するため、その輸送現象を明確にすることは重要である。共鳴光電離プラズマは通常の放電プラズマとは異なる種々の性質を持っていることが明らかになった。即ち、共鳴光電離プラズマにおいては励起原子を通して外部よりエネルギー</p>				

# 主論文の要旨

6

報告番号	※甲第	号	氏名	山	田	諄
------	-----	---	----	---	---	---

が注入されるので励起原子密度が高く、励起原子間の衝突により分子状イオンが発生する。ここでも励起原子がプラズマの発生に重要な役割をはたす。また、共鳴光の照射を止めた後のプラズマの減衰時間より荷電粒子の損失として解離再結合が寄与しており、従って分子状イオンが支配的である。さらに、このようなプラズマの半径方向密度分布は中心に極小値を持ち管壁に向って単調に増加する分布を示し、電子密度や中性気体圧力の増加とともに分布は急になる。

共鳴光電離プラズマが通常の放電プラズマとは異なり放電管の外側で高い特異な密度分布を持つことを利用して、通常の放電に共鳴光の照射を組合せた複合方式を用いることにより、単調減少する分布から単調増加する分布まで、あるいは矩形に近い分布等、かなり広い範囲にわたって半径方向密度分布を制御することができた。またその密度分布は放電プラズマと共鳴光電離プラズマの密度分布の理論値を加え合せることにより近似的に表わされることが示された。

第5章では、平行ルビレーザ光をセシウム金属蒸気に照射して発生するプラズマのふるまいが研究された。セシウム蒸気にレーザ光を照射して破壊の

# 主論文の要旨

7

報告番号    ※甲第    号    氏名    山    田    諄

しきい値と破壊機構に関する研究は既におこなわれて  
いるが、これをプラズマ生成に利用する研究は十  
分おこなわれていない。レーザー光は平行ビームのま  
まであり、さらにアパーチャーを通して照射される  
のでレンズで集光した場合に比べプラズマの断面の  
評価が正確にでき、また管軸方向に一様なプラズマ  
が発生するので一次的になり解析が容易になるとい  
う利点がある。

レーザー光の照射によって発生したプラズマの中  
性気体中への膨張機構は圧力が低いとき、プラズマが  
ピークに達する時間が距離とともに二次曲線的に増  
加し拡散により径方向へ膨張してゆくことがわか  
った。一方圧力が低いとき、ピークに達する時間は距  
離とともに直線的に増加し、ほぼイオン音波の速度  
で膨張する。レーザー光の照射により放電管の中心軸  
上に発生したプラズマの電子密度は、レーザー光強度  
が弱いとき強度の二乗に比例して増加し、レーザー光  
の二光子吸収がおこっていることがわかった。しか  
しルビールーザーの光子エネルギー  $1.78 \text{ eV}$  の2倍は  
セシウムの電離エネルギー  $3.89 \text{ eV}$  に  $0.32 \text{ eV}$  不足  
し、二光子電離はエネルギー的に起り得ない。二光  
子吸収によりセシウムの  $9D$  状態へ一旦励起され、  
この励起状態から光电効果または衝突により電離し

# 主論文の要旨

8

報告番号	※甲第	号	氏名	山	田	諄
------	-----	---	----	---	---	---

たとえて計算された電離確率は実測値よりも2桁も小さな値を示し、十分定量的な説明をすることができなかつた。この問題は理論家が現在鋭意解析を進めている新しい問題であり、重要な資料となろう。

第6章では、本研究によって得られた結果を要約し、今後の問題点を述べた。