

論文審査の結果の要旨

氏名 宗岡 均

プラズマガス温度を室温以下で制御したプラズマ（クライオプラズマ）が、プラズマ材料プロセスやプラズマ医療などの分野で注目されている。本論文は、超臨界流体を含む高密度流体中での本プラズマの発生の研究、及び、その診断に関する研究を通じ、本プラズマにおけるプラズマガス温度の重要性を明らかにしている。

本論文は全4章から構成されている。

第1章では、序論として、プラズマガス温度が室温以下で制御された高圧非平衡のプラズマ（クライオプラズマ）の研究に至った背景に関して、その基礎および応用の観点から先行研究とともにまとめられ、本研究の目的が明示されている。

第2章では、ヘリウムクライオプラズマ中の化学反応におけるプラズマガス温度の役割・重要性について、実験・計算両面から研究を行っている。2.1節において実験装置や実験条件がまとめられている。2.2節にて、プラズマガス温度について熱シミュレーションおよびレーザー干渉計を用いて評価を行い、本研究で用いたプラズマではガス温度上昇が10 K程度以下に抑制されていることを確認している。次に、各種プラズマ診断（電流電圧測定、発光分光測定、レーザー吸収分光測定）により、発光種の発光強度の時間変化と電流挙動（2.3節）、準安定ヘリウム原子の密度や寿命（2.4節）において、ガス温度に依存する結果を得ている。2.5節では、ヘリウムと微量の不純物（窒素、酸素、水）を含む系について、素過程におけるガス温度依存性を考慮した反応セットを組み立て、反応モデルの構築を行っている。2.6節では、この反応モデルを用いた考察がなされている。まず、上記測定によって得られたガス温度依存性が半定量的に再現されることが述べられており、さらに、ガス温度に依存したヘリウムクライオプラズマ中の反応がガス温度に依存して大きく変化することを議論している。その結果、特に準安定ヘリウム原子の関与する個々の反応におけるガス温度依存性の違いや、相転移の存在が系全体としての反応の大きな変化をもたらすことが示されている。そして、例えば準安定ヘリウム原子の拡散による消失についての考察などから、一つの反応モデルとしてガス温度依存性を考慮した反応セットを構築した本研究の意義を述べている。

第3章では、臨界温度を5.2 Kという極低温に持つヘリウムについて、密度揺らぎを持つ超臨界流体を含む高密度流体中における絶縁破壊機構についての研究を行っている。これまでに、超臨界流体中のプラズマは臨界点近傍において特異な反応場となり、さらに、数マイクロメートル以下の極短ギャップ放電において絶縁破壊電圧が臨界点近傍で局所的低下を示すという臨界異常が知られていた。本論文は、3.1節において上記背景が述べられ、3.2節では、実験手法の改善により絶縁破壊電圧の多数回の測定を可能とし、

ヘリウムにおける絶縁破壊電圧の臨界異常の存在を示している。3.3 節では、液体的泡モデルの拡張により液体的領域においても実験結果をよく再現できることを示している。次に 3.4 節において、剛体球クラスターモデルにより密度揺らぎを持つ流体中での電子の平均自由行程を評価し、絶縁破壊電圧のガス密度依存性について測定結果と強い相関を示すことを明らかにしている。そして 3.5 節では、局所空隙モデルにより流体の揺らぎを統計的に捉え、絶縁破壊時の実効的な電子の平均自由行程を求めることにより、ギャップ依存性を含む臨界異常の測定値を再現することに成功しており、高圧気体や密度揺らぎを持つ流体中における絶縁破壊機構への理解を深めている。

第 4 章では、本研究の総括を述べている。

以上、本論文の研究は、ヘリウムを例に挙げプラズマガス温度が室温以下で制御された高圧非平衡のプラズマ（クライオプラズマ）中の化学反応におけるプラズマガス温度の役割と重要性について明らかにし、さらに、密度揺らぎを持つ流体中の放電物理において局所的な流体構造中の電子の運動についての知見をもたらすものである。これらの結果は、本プラズマの生成および反応についてより厳密な理解をもたらし、プラズマガス温度について着目し、制御することの必要性を示すものである。今後、より精緻なプラズマ制御が必要となる新たな材料プロセスなどの応用開発に繋がることが期待される。ゆえに本論文はプラズマ材料科学において新しい研究分野の基礎づくりに貢献するものと判断できる。

なお、本研究の第 2 章は、占部継一郎、Stauss Sven、崔宰赫、寺嶋和夫との共同研究であり、第 3 章は占部継一郎、Stauss Sven、寺嶋和夫との共同研究であるが、論文提出者が主体となって、研究の立案、分析、および、検証を行ったもので論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって本論文に対して博士（科学）の学位の授与を認める。