

氏名	のぼり お かず ゆき 登 尾 一 幸
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 144 号
学位授与の日付	平成 18 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	分子過程を考慮した粒子コードによる慣性静電閉じ込め核融合 (IECF) 装置の動作解析
論文調査委員	(主査) 教授 小西哲之 教授 吉川 潔 助教授 山本 靖

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、小型軽量で可搬型の中性子・陽子源として応用が期待される慣性静電閉じ込め核融合 (IECF) 装置についての、原子分子過程を考慮した粒子シミュレーションによる解析と、それによる本装置における物理現象についての考察、さらにその結果に基づく核融合反応率の向上手法の提案とその実験的検証に関するものであり、序論と本論 7 章で構成される。

序論では研究対象とする IECF 研究の意義、学術上及び実用上の位置づけ、および本研究の目的である装置内部の物理現象の記述におけるシミュレーションの意義と位置づけが示されている。続く第 1 章では IECF 装置の動作原理、研究の歴史および現状とそれにより明らかとなる課題について述べられている。特に、IECF 装置が基本的にグロー放電現象に基づくものであり、かつ生成した荷電粒子による電位分布の効果によって粒子の加速と幾何学的収束による効果で核融合反応が起こると考えられていたこと、それらに対する実験結果の矛盾から、より正確な本方式の物理的描像が必要とされることが示されている。すなわち、IECF 装置内の現象は、電界により加速された荷電粒子と装置内に存在する中性ガス等との荷電交換などの原子分子過程が重要な役割を果たしており、電位構造、粒子の挙動やエネルギー分布、核融合反応による中性子発生もこの過程を含むシミュレーションによってのみ初めて理解しようという考えに本研究が基づくことが説明されている。

第 2 章では本研究において開発された、原子分子過程を考慮した空間一次元・速度二次元の粒子コードの開発について述べられている。本コードは、既存のグロー放電のシミュレーションコードを基礎においているが、原子分子過程や核融合反応を記述するために多くの改良と追加が行われている。すなわち、通常のグロー放電装置と異なるグリッド状の陰極を扱うためのモデル化や、追跡粒子種をイオン ( $D^+$ ,  $D_2^+$ ,  $D_3^+$ )、高速中性粒子 ( $D$ ,  $D_2$ ) および電子とすることとし、各追跡粒子と残留ガスとの原子分子衝突過程を解析する計算過程について述べられている。また、核融合反応発生機構として 3 種類の反応率の計算方法についても説明している。

第 3 章では、従来 IECF 装置の一般的な運転範囲であった比較的高ガス圧におけるグロー放電領域についての解析結果が示されている。原子分子過程を考慮した解析の結果、本装置においては通常のグロー放電と異なり中性粒子やイオンと残留ガスとの反応による荷電粒子の生成により放電が維持されていることを明らかにした。また、高速イオン同士の反応と、高速イオンと中性ガスによるビーム・バックグラウンド反応それぞれの寄与を求め、ビーム・バックグラウンド反応が中性子生成率の大部分を占めていることを示した。この結果は、従来実験で疑問となっていた中性子発生の空間分布の問題を明快に説明している。さらに、ガス圧の低下とともに印加電圧が上昇し、イオンのエネルギーが増加することもこの計算の結果明らかにされており、中性子生成率の増加にはより低圧の領域で運転すべきことを示唆している。

第 4 章では、ガス圧を低下させた条件 (0.6Pa 以下) における解析結果が示される。イオンの残留ガスとの衝突によるエネルギー損失が低減し、平均自由行程が伸びるが陰極の幾何学的透過率により計算される値に収束することが示される。しかし、この領域でも中性子発生の中心はビーム・バックグラウンド反応によることも同時に見出され、ターゲットとなる残留ガス密度の減少のため結果として中性子生成率そのものはほぼガス圧に比例して減少することが明らかにされ、これは報告

された実験結果のメカニズムを説明している。

第5章では実験では困難な領域を含む、外部イオン源による供給電流を前章の2mAから200mAとした場合の電位分布の変化と中性子生成率の影響についての解析が示される。電流を増加することで、高速イオン同士の衝突によるビーム・ビーム反応率は電流値の2乗に比例して増加すると従来は考えられていた。しかし本解析では陰極内部にてイオンの空間電荷による仮想陽極が形成され、これによりイオンが減速されるためビーム・ビーム反応率は電流値の2乗に比例して増加しないことが示される。またイオン供給電流の25倍程度の電子を陰極内部にて供給することでこの仮想陽極が抑制することができ、これにより中性子生成率も5倍に増加することが明らかにされる。これらの結果により、各運転領域におけるIECF装置の特性と、性能の最適化の指針、および限界が明らかになった。

本コードは原子分子過程が扱えるため、気相だけでなく電極表面に吸着された粒子を含む反応率の解析が可能である。第6章ではこの表面反応の計算結果を示し、その中性子発生への寄与が大きいことを見出している。特に、空間中の粒子の少ない低ガス圧領域ではこの効果は顕著であり、ガス圧に対する変化のシミュレーションの結果から、陰極表面における反応率が低ガス圧にて、陽極表面における反応率は高ガス圧にて増加することが示された。この計算予測を検証するために、円筒形装置を用い、電極表面に水素吸蔵性のあるチタンを蒸着した実験を行った結果、中性子発生は顕著な増加を示し、ガス圧への依存性も計算と一致することが明らかとなった。

第7章は結論であり、本研究の意義がまとめられている。IECF装置における放電と中性子発生の現象の本質が原子分子過程に大きく依存するという認識に基づいたシミュレーションコードを開発し、解析したことにより、これまで実験的に観測されている現象が初めて統一的に理解、説明された。また、実験的研究が不十分なし不可能な領域における現象についても、特性を記述し、設計の最適化、現象の理解が可能となった。さらに、電極表面反応の寄与を指摘するとともに、中性子発生の増加に向けてこの過程を積極的に利用することを提案し、計算により予測された中性子発生の増加が実際に得られることを実験的に検証した。これら一連の成果により、IECF装置における中性子発生について、物理的な現象が広い運転領域で理解されるとともに、実用的な中性子発生装置としての設計、最適化に向けた基盤が確立された。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、小型軽量で可搬型の中性子・陽子源として応用が期待される慣性静電閉じ込め核融合（IECF）装置について、原子分子過程に着目して現象をモデル化し、空間1次元速度2次元の粒子コードを開発して、粒子の発生消滅過程を含む自己完結的な計算を実現し、装置内の電位分布や各種原子分子過程の分布や頻度、その結果としての放電特性や電界構造、各種機構による中性子生成率について解析し、性能の向上手法を研究した結果をまとめたものであって、得られた主な成果は以下の通りである。

実験研究の多い領域（0.6~4Pa, 60kV以下）の解析では、通常のグロー放電と異なり、中性粒子やイオンによる荷電粒子の生成により放電が維持されていること、中性子発生のほとんどがビーム・バックグラウンド反応であり、ガス圧の減少により印加電圧が上昇して中性子発生量が増加することを明らかにした。これらの結果は実験結果を統一的に説明している。

実験的な研究が少ない低ガス圧領域（0.5Pa以下、外部イオン源によるアシスト放電）の解析では、ガス圧の減少に伴い荷電交換反応によるエネルギー損失が減少すること、イオンの消滅は陰極との衝突過程が支配的になること、中性子発生率は、バックグラウンドガス密度の減少の影響により増加しないことを定量的に示している。この領域でイオン電流値を増加させた動作解析では、イオンの空間電荷による陰極内部の電位分布の変化、その結果としてのビーム・ビーム反応率の変化を求め、実験が不十分なし困難な領域での動作特性を記述し、最適化の指針と限界を明らかにした。さらに、電極表面原子の寄与を解析により明らかにするとともに、それを積極的に利用する中性子生成率増大手法を提案し、チタン蒸着電極により表面粒子密度を増加し、実験的検証に成功している。

これらの結果より、本研究は、原子分子過程に着目したコードの開発により、IECF放電の物理を定性的定量的に説明し、現在のIECF実験に総合的理解を与え、現象を広範囲に記述するとともに、今後の装置の最適化と性能向上に大きく貢献する、エネルギー科学上の成果であると結論される。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年10月23日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。