

氏 名	たか まつ てる ひさ 高 松 輝 久
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 157 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 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	Research and Development of an Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device for Humanitarian Landmine Detection (人道的対人地雷探査のための慣性静電核融合装置の研究開発)
論文調査委員	(主査) 教授 吉川 潔 教授 小西 哲之 助教授 増田 開

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、小型の核融合装置である慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合装置の高性能化を目的に、核融合反応に直接関わるイオンビーム生成特性について、理論的、実験的解明を行うと共に、応用例として超小型・高性能が必須の人的対人地雷探知用可搬型中性子源への応用を目的にさまざまな研究課題について研究を行った結果をまとめたもので、7章からなっている。

第1章の序論では、まず、IECの特徴、研究・応用の現状、及び実用性向上の可能性について述べ、研究目的と理論的背景を明らかにしている。また、IECの実用化に際しての課題について述べており、特に核反応効率が低いこととその原因、さらにはそれらに対する改善策を論じ、装置の小型化と中性子エネルギースペクトルを応用にあわせて最適化する必要があることを述べ、実用化に際しての問題点を明らかにしている。さらに、本論文全体の構成について述べている。

第2章では低ガス圧化にともなう IEC 装置の性能改善について、その原理と方法について述べ、それにより期待されるイオンエネルギーの増加について説明している。また、実際にマグネトロン放電を利用した構造が簡単で高性能が期待できるイオン源を作成し、IEC 装置に組み込み、低ガス圧領域におけるイオン源付加型 IEC の性能を評価している。その結果、グロー放電とイオンビームによるハイブリッド放電領域など新しい3種類の領域のあることを明らかにしている。さらに、このイオン源付き IEC 装置によって従来に比べて1/10までガス圧力を低減することに成功し、それによりイオンエネルギーの増加や IEC 内におけるイオンの再循環が促進されていることを示している。

第3章では、第2章で得られた結果をより直接的に実証するため、分光計測法を用いてイオンのエネルギー分布の測定を行い、イオンエネルギーが増大していることを明らかにしている。さらに求めたエネルギー分布から中性子発生率への影響を定量的に求め、実験値と比較、評価している。その結果、ガス圧力を 1.0Pa から 0.8Pa へ低減したときにイオンの平均エネルギーは30%向上している事を見いだしている。

第4章では、実用化への課題である中性子源の小型化と長時間安定動作について、直径 20cm の小型 IEC 装置を製作し、その動作特性について論じている。その結果、小型の高電圧導入端子に窒化硼素スリーブを併用することにより、小型化にもかかわらず従来と同程度以上の中性子を長時間生成することに成功している。さらにチャンバー温度が中性子の生成率に影響することを明らかにし、大電流での長時間運転に対応するには水冷式のチャンバーが有効であると示している。また、陰極の大きさや導入端子の絶縁体構造が IEC の中性子発生率に与える影響を調べ、陰極直径の大きいほうが中性子発生率が増加すること、しかし大きすぎた場合には IEC の放電が不安定になることを明らかにしており、最適化の必要性を指摘している。

第5章では2重フルジャケット方式の水冷真空容器を製作し、その運転特性を評価している。地雷探査に中性子捕獲ガンマ線を利用する場合、核反応断面積が大きくなる熱中性子領域が望ましい。一方、IEC 内の D-D 核融合反応では 2.5MeV 単色の高エネルギー中性子が生成されるため、熱速度まで減速する必要がある。そのため新たに製作した IEC 装置は冷却

と中性子減速を同時に行えるよう冷却水系を設計した。その結果、大出力運転時にも IEC 装置は安定して中性子を発生でき、さらに冷却水により中性子が減速され、装置下部へは熱中性子束が2倍程度増加していることを明らかにしている。さらに、冷却水の層の厚さを場所によって変えることで、中性子の空間分布に指向性を持たせることに成功している。

第6章では、屋外応用を想定して、より簡便な排気・ガス供給性能を持つ非蒸発型ゲッターポンプ（NEG）の特性について調べている。NEG を設置した閉鎖型構造の IEC 装置について実験を行い、従来のガス供給系と分子ポンプからなる排気系と比べて、ガス圧力制御が必要な点は変わらないが、結果として NEG ポンプによる IEC 装置運転は極めて円滑に重水素ガス供給、圧力制御ができることを明らかにし、従来方式と同様の性能が得られることを確認している。

これらの成果を元に最終的に開発された IEC 中性子源を用いて地雷探査の模擬実験を行って総合的な IEC 装置特性評価を行っている。すなわち、爆薬に多く含まれる窒素原子からの γ 線計測の観点から、窒素含有率の高いメラミン樹脂を爆薬に見立てて、これに IEC 装置からの中性子を照射し窒素からの捕獲ガンマ線の検出を試みたものである。容器内土中メラミンを埋めた場合と埋めなかった場合の計測ガンマ線を比較し、その結果、メラミン樹脂がある場合、バックグラウンドと比べて明らかに有意なガンマ線カウント数を得ている。以上本研究の成果は IEC 中性子源が地雷探査装置だけでなく他の様々な応用分野に利用できる可能性を示すものである。

第7章は結論であり、IEC 中性子源に関して本研究で得られた結果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、グロー放電などによって生成したイオンをメッシュ状中空陰極による電界で電極中心に加速・収束させて核融合を生起する慣性静電閉じ込め（Inertial Electrostatic Confinement: IEC）核融合装置の高性能化を目指した研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. マグネトロン放電による外部イオン源を用いて IEC 装置の低圧力運転に成功し、またグロー放電が不可能な圧力領域で、ハイブリッド放電モード、ならびにビームインジェクションモードと呼ぶべき新しい動作モードが存在することを見いだした。また、イオンのエネルギー上昇と再循環の促進により、それぞれのモードにおける規格化中性子発生率が、グロー放電の場合より優れていることを実験的に明らかにした。
2. ドップラーシフトを利用した分光計測でハイブリッド放電モードにおけるイオンエネルギー分布の測定を行い、グロー放電と比較して、イオン平均エネルギーが30%程度向上していることを明らかにした。さらに、実測したエネルギー分布と核融合反応断面積から中性子発生率を評価し、実験値と大きく矛盾しないことを明らかにした。
3. 超小型の IEC 中性子源を設計、製作し、また高電圧導入端子部に窒化硼素絶縁体を併用して従来の大型 IEC 装置以上の中性子発生率と絶縁破壊の抑制を実現した。さらに、水冷ジャケットの設置により、大出力運転時における安定した中性子発生の可能性を示すとともに、陰極サイズ効果についても、大口径陰極により中性子発生率が増加するが、条件により IEC 放電特性が不安定になることを実験で明らかにした。
4. 冷却ジャケット部分を生成中性子の減速材ならびに反射材として利用する方式を考案し、実験と MCNP コードを用いた解析によって、実際に上部の厚い冷却部により等方的に発生する中性子が減速、反射され、その結果薄い冷却部の下方部に熱中性子束が大幅に増加し、指向性のある中性子空間分布の実現が可能であることを明らかにした。
5. 以上の研究成果を元に、人道的対地雷探知装置実験のための超小型高フラックス IEC 中性子源を設計、製作し、実際に模擬爆薬（メラミン樹脂）に含まれる窒素原子からの捕獲ガンマ線の計測によって窒素原子の検出に成功し、IEC 中性子源が地雷探知用中性子源に十分応用可能であることを示した。

以上、本論文は IEC 装置の性能改善のため理論、実験両面で基礎的研究を行い新たな知見を得るとともに、実用化にむけて動作安定性や中性子利用効率向上などについて学術的に検討を行い、新型 IEC 装置を提案、実験で性能評価を行い、同装置が十分応用に供せられる特性を有しており、さらに、地雷探知実験用に開発した IEC 装置が模擬爆薬探知に有効であることを明らかにするなど、学術上・実際上寄与するところが少なくない。

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19年2月19日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。