

氏名	こ 寺 慶
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第122号
学位授与の日付	平成17年9月26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	高エネルギー大電流電子源としてのヘリカル装置利用のための基礎研究

論文調査委員 (主査) 教授 小西 哲之 教授 吉川 潔 教授 水内 亨

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トーラスプラズマ装置中に発生する高エネルギーの電子(逃走電子)を装置の外に引き出すことによって大電流電子源として利用するために数値計算を行い、電子源としての利用の実現可能性を検討した結果をまとめたもので、7章からなっている。

第1章は序論であり、研究の目的とその背景を示している。

電子線の用途や用途ごとに必要とする電子のエネルギーと電流、一方ではトーラス装置中に発生する逃走電子の特徴から、電子線源として利用するときの電子のエネルギー $\sim 2\text{MeV}$ 、電流値 $\sim 100\text{mA}$ を本研究で対象とする領域とした。この領域は他の既存の電子源では困難かつ高価であり効率も低い。大出力で経済的な電子源が可能であれば様々な応用可能性がある。本論文ではトーラス型の装置として、製作実績があり、コイル配置から電子の引き出しやすいヘリカル装置を対象として選択しており、その技術的な特徴を述べている。

第2章では電子を引き出すための基本的な装置構成について考察している。

ヘリカル装置中に発生する逃走電子を電子線源として利用するためには、電子を装置から引き出すための磁場を作る一方、電子を加速するための閉じ込め領域には影響を与えてはならない。そのため、電子を引き出すための磁場を作る引き出しコイル及び、閉じ込め領域での引き出しコイルの磁場を打ち消すキャンセルコイルの配置を新たに考案している。

第3章ではコイルの電流や加速電圧と引き出される電子のエネルギーや電流値の関係を定量的に評価するために、磁場と粒子軌道の数値計算法を導出している。まず、コイルによって作られる磁場の計算式を導出し、次に粒子軌道の運動方程式を相対論効果を入れて解いた。コイルの電流や加速電圧と荷電粒子の運動の関係を求めるために、装置の半径とコイルの電流で磁場と電場の規格化を行った。その結果、電子のエネルギーは装置の半径に依存せず、コイルの電流のみに依存することを明らかにし、その関係を示した。これにより装置から引き出せる電子のエネルギーを容易に見積もることができる。さらに、プラズマ中に安定して流すことのできる電流の最大値とコイル電流の関係を求め、電子のエネルギーや加速電圧と装置から引き出すことのできる電流量の関係を導出している。

第4章では数値計算を行うための様々な条件を決定している。様々な加速電圧での電子の軌道計算を行って粒子軌道に対する加速電圧の影響を調べ、この後の計算に用いる加速電圧の値を決定した。また、電子の初期のエネルギーが引き出される電子の割合に影響を与えないことも示している。

第5章では、第4章までに示した加速電圧、コイル電流と引き出される電子のエネルギーや電流値の関係をを用いて、ヘリカル装置を電子源として利用するための最適化を行い、得られる電子のエネルギー、電流値やそのとき求められる装置のパラメータを明らかにしている。ここでは電子を装置の全体から引き出す場合の計算を行った。引き出しコイルを装置全体に取りつける場合、対称性がよく、閉じこめ領域への影響を容易に打ち消すことができる。はじめにコイル配置を最適化し、発生する逃走電子の約90%のを引き出すことが可能であることを明らかにしている。さらに引き出される電子の空間分布を

調べ、垂直方向には装置半径の約10%の幅で均一に分布することを示した。これを利用すれば、装置の外周に沿って照射対象を移動させながら照射することによって大量のターゲットに一様に電子を照射することが可能である。次に引き出される電子のエネルギーと電流を求めた。エネルギーはヘリカルコイルの電流から導かれ、たとえばヘリオトロンで実績のあるヘリカルコイル電流 90kA で、2MeV の電子を引き出せることを示した。一方引き出される電流は相対論領域ではエネルギーによらずほぼ一定で、加速電圧が 200V/turn であれば、2MeV で電流値 130mA 以上の電子を引き出すことが可能である。またイオンの挙動も解析し、電子に比べてエネルギーが極めて小さく電子の引き出しに際して問題とならないことを明らかにしている。このように、所期の目的である MeV 級、大電流の電子線が半径 1m 程度のヘリカル装置を用いて高効率で発生できる可能性を示している。

第6章では、ビームなどのように電子を装置の一部から引き出す場合についての検討結果を示している。装置の一部にだけ引き出しコイルを取りつけると磁場の対称性が失われ、磁気面が形成されず閉じこめ領域が縮小して電子の加速が困難となる。この問題を解決するため、磁場の高次の項まで解析し、磁場の乱れを補正するキャンセルコイルと補正コイルを追加する2つの方法を考案してその効果を評価した。この結果、ほとんど形成されなかった磁気面が、提示した解決法によって引き出しコイルを装置全周に取り付けた場合と同程度の大きさにまでなる事を明らかにしている。また、照射に用いる電子の利用効率では、装置全体から引き出すよりも高い値を達成する可能性を示している。

第7章はまとめとしてこれまでの結果を整理し、プラズマ閉じ込め用のヘリカル装置を電子源として使用する可能性を総合的に評価している。すなわち、すでに装置として製作、運転の実績のある小型のヘリオトロン D 級の装置をもとに、これに意図的に逃走電子を外部からの電磁力によって発生する一方、引き出しコイルなどを配して運転条件を最適化することにより、電子線を引き出すための概念設計を行ったものである。この結果、2MeV、100mA 級の電子を準定常に引き出すための磁場配位、運転条件を示し、実現の可能性を明らかにし、これまでにない形式の大容量電子線源として利用するための基礎を確立したものと結論づけている。

#### 論文審査の結果の要旨

本論文は、大電流電子源として、トラスプラズマ装置を利用する可能性について検討したものであり、ヘリカル装置において高エネルギーの逃走電子を発生し、閉じ込め磁場から引き出しコイルによってそれを引き出すための主要な技術課題を解析的に評価しており、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) 装置の構造から大電流の電子線を引き出しやすいヘリカル装置を選択し、装置構成と引き出しコイル、その閉じ込め磁場への影響を補正するコイルの配置を考案してその最適化を行った。
- 2) コイルの電流や加速電圧と引き出される電子の運動の関係を求めるために、装置寸法とコイルの電流で電場と磁場の規格化を行った。その結果電子エネルギーは装置半径に依存せずコイル電流のみで決定できることを明らかにし、それを利用して電子源の概念設計を容易にする方法を見出した。
- 3) ヘリカル装置に設置したコイルと電子の加速、引き出しの条件を最適化し、発生する高エネルギー電子の90%を引き出せることを明らかにした。また運転条件と得られる電子線の関係を見出し、2MeV、100mA 級の電子線が高効率で得られることを示した。
- 4) 実際の電子線照射装置で要求されるビーム状の電子線の取り出しに際して磁場の対称性が失われて閉じ込め領域が縮小し、電子が加速できない問題を検討して、引き出しコイルの作る磁場のテイラー級数2次項を打ち消すよう補正コイルを追加し、位置と電流を最適化する解決策を見出した。
- 5) これらの結果から、ヘリカル装置に引き出しコイルなどを配して運転条件を最適化することにより、大容量の電子線を引き出すことが可能であることを示し、その装置概念を示すとともに運転領域、特性を明らかにした。

以上要するに本論文は、比較的小型のプラズマ閉じ込め装置であるヘリカル装置を用いて、従来極めて困難であった領域の電子線を発生する独創的な方法を示し、電子線の新たな利用可能性を拓くとともに、電磁場における荷電粒子の発生、利用の工学における数値解析の方法について研究した結果をまとめたものであり、学術上、応用上、寄与するところが少ない。

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17年8月18日実施した論文内容とそれに関連した諮問の結果合格と認めた。