

氏 名 松下 啓行

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 928 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 計測用ビームと中性子分析器を用いた高エネルギー粒子
閉じ込めの研究

論文審査委員	主 査 教授	金子 修
	教授	岡村 昇一
	教授	居田 克巳
	グループ	草間 義紀（日本原子力研究
	リーダー	開発機構）
	助教授	村上 定義（京都大学）

論文内容の要旨

磁場閉じ込め装置を用いて核融合発電を実現するためには、プラズマを一億度以上に加熱して核融合反応を起こし、D-T反応によって生成される高エネルギーの α 粒子による高温プラズマの維持が必要である。現在の高温プラズマ実験ではプラズマを加熱する手法として中性粒子入射（NBI）加熱が広く用いられており、これまでに多くの成果をあげている。NBI加熱ではプラズマ中に高エネルギー粒子を入射し、衝突緩和過程を通してその運動エネルギーを背景プラズマに移行させる事によりプラズマを加熱している。そのため高エネルギー粒子が衝突緩和する過程の途中で損失すると、十分にプラズマを加熱する事ができない。プラズマを加熱するためには、高エネルギー粒子の閉じ込め時間が減速時間よりも十分長いという条件が必要となる。

トカマク装置においては磁場配位に軸対称性が存在するため、角運動量保存による良好な粒子閉じ込めが保証される。そのためトカマク装置においてはMHD不安定性に起因する異常損失が存在しない場合、高エネルギー粒子の閉じ込めは概ね古典的な解釈で説明できる。一方ヘリカル装置においては非軸対称リップルの存在により粒子軌道は軸対称系に比べて複雑になり、高エネルギー粒子のリップル輸送とロスコーンの存在が閉じ込めに関して大きな影響を及ぼす。これまでのCHS実験において、接線入射された高エネルギー粒子の振る舞いは東山サイトにおける重水素ビーム入射実験等により調べられ、概ね古典的であるとの結果を得ている。一方、垂直入射された高エネルギー粒子についても実験が行われており、ヘリカルリップル捕捉粒子のドリフト軌道と磁気面が一致する配位（磁気軸位置87.7cm）において重水素ビーム入射実験が行われた。垂直入射された36keVの重水素イオンの粒子閉じ込め時間は0.2ms程度であり、減速時間の35msに比べて著しく短いという結果を得た。実験結果よりロスコーンの存在が示唆されるが、その空間構造までは調べられていない。

以上の結果を受け、本実験ではロスコーン構造を実験により明らかにする事を目的とした。ロスコーンは粒子のエネルギーとピッチ角に依存するため、これらのパラメータを制御できる計測用ビーム（Diagnostic Neutral Beam : DNB）をCHS装置に設置した。DNBはトーラス中心より1.58mの位置にあるピボット点を中心に、ビームラインを赤道面上で水平方向に走査する事が可能である。ビームラインを走査しDNBのプラズマへの入射角を変化させる事により、入射された高エネルギー粒子のピッチ角分布の制御を行う。ビームの発散角は 0.9° 、焦点位置でのビーム半径は5cmとなっており、加熱NBI（発散角 1.2° 、ビーム半径10cm）よりも収束したビームを入射できる。

DNBによって入射された高エネルギー粒子に対し中性粒子分析器（Neutral Particle Analyzer : NPA）を用いてエネルギー分布の計測を行った。NPAもDNBと同様に水平方向の走査ができるように設計し、検出する粒子のピッチ角を測定できるようにした。DNBとNPAはヘリカル捕捉粒子を観測するために、トーラスの赤道面上で 180° 離れた位置に設置している。そのため軌道損失しトーラスを周回できない粒子はNPAで観測されない。

DNB とNPAを用いた計測によりロスコーン境界の検証実験を行った。実験に先立って無衝突の軌道計算を用い、高エネルギー粒子の閉じ込め領域と損失領域の境界を確認した。計算結果より、磁気軸87.7cmの配位において28keVの高エネルギー粒子は、ピッチ角90°付近を中心にロスコーン領域が存在し、ピッチ角が97°付近に閉じ込め領域と損失領域の境界が存在する。閉じ込め領域への入射から損失領域への入射となるように、DNBの入射角を接線から徐々に垂直に変化させてECHプラズマに入射する実験を行った。損失領域においては、軌道損失にいたる特性時間は数 μ 秒程度であり、これらの粒子はNPAの視線に届く前に損失すると考えられる。このことからNPAで観測される中性粒子束の変化から、閉じ込め領域と損失領域の境界が実験によって確認できる。NPAの視線を放電毎に走査することにより、DNBによって入射された高エネルギー粒子のエネルギースペクトルをピッチ角分布も含めて詳細に計測した。その結果NPAで観測される粒子束はDNBの入射角に依存し、計算で求めたロスコーン境界を境に観測される中性粒子束が急激に減少する様子が観測された。HFREYAコードを用い粒子の電離点を求め、閉じ込め領域に入射された粒子の数をDNBの各入射角について比較すると、実験で得られた中性粒子束のDNB入射角依存性とほぼ一致した。DNBの入射エネルギー成分(28keV)に対応する高エネルギー粒子に関してはロスコーン損失が確認されたが、1/3エネルギー成分(9.3keV)の粒子は閉じ込められている様子が観測された。

同様の実験を磁場配位を変えて行う事により、ロスコーン境界の違いを観測できるか確認した。CHS装置では磁気軸96.2cmの配位では軌道計算により求められたロスコーン境界がピッチ角105°付近になり、磁気軸87.7cmの配位よりも損失領域が広がる。磁気軸96.2cmの配位においても観測される中性粒子束のDNB入射角依存性は計算と一致し、内寄せ配位よりも広いロスコーンが実験によって観測された。磁気軸96.2cmの配位では1/3エネルギー成分の粒子に関しても軌道損失している事が確認された。

次に観測されたエネルギースペクトルの傾きから、高エネルギー粒子の閉じ込め特性を調べた。エネルギースペクトルの傾きは高エネルギー粒子のエネルギー減衰と損失時間の比で決まるため、Fokker-Planck方程式の定常解におけるエネルギー減衰の項の表式を用いてエネルギースペクトルにフィッティングを行い磁気軸87.7cmの配位における粒子損失の特性時間を見積もった。粒子損失の特性時間はDNBを閉じ込め領域に入射している時は6ms程度であったが、損失領域に近づくにつれて徐々に短くなっていった。これは損失領域近傍の粒子ほどわずかなピッチ角散乱によって容易に損失する事を示している。

以上のようにDNBとNPAを用いた計測を行い、高エネルギー粒子の閉じ込め領域と損失領域の境界近傍に存在する粒子の閉じ込め特性を実験的に調べる事が可能となった。実験的に観測した高エネルギー粒子のロスコーン境界は軌道計算によって求めた境界とほぼ一致し、磁気軸を変えてロスコーン形状を変化させた場合、実験によってその変化分が観測された。エネルギースペクトルの傾きから高エネルギー粒子損失の特性時間を見積もると、垂直入射された粒子に関しては内寄せ配位においても1ms以下となる事からCHS装置

においては 30keV 程度の高エネルギー捕捉粒子を閉じ込める事が困難であると考えられる。10keV 程度のエネルギーを持つ粒子に関しては内寄せ配位による閉じ込め改善が観測されており、ラーマー半径の影響が閉じ込め特性に大きな影響を与えていると考えられる。

論文の審査結果の要旨

松下君の論文は、ヘリカル型外部導体コイルによる磁場閉じ込め装置であるコンパクトヘリカル装置（CHS）に於いて、入射角度が可変な計測用中性粒子ビーム入射装置（DNBI）と計測角度が可変な中性粒子エネルギー分析器（NPA）を組み合わせることにより高エネルギー粒子閉じ込め条件を実験的に評価したものである。

CHSのようなヘリカル型磁場閉じ込め装置では、3次元的な磁場構造が持つ空間的な磁場の強弱が、速度空間内の一部のプラズマ粒子を局所的に捕捉する。核融合実験ではプラズマを加熱するために高エネルギービームを入射するが、入射する高エネルギーイオンがこのような磁場に捕捉されると、磁場配位の条件によってはプラズマにエネルギーを与える前にプラズマ閉じ込め領域から逃げることもあり、その場合は加熱効率が落ちる。同様なことは将来の核融合炉でのアルファ粒子加熱でも言える。従ってこの損失条件を評価することは高温プラズマを生成する上で大変重要であるが、この条件は実空間と速度空間に於ける高エネルギーイオンの位置に依存する複雑なものである。

この損失条件を調べるためには実空間及び速度空間での初期条件が判っているイオンを生成し、その振る舞いを知る必要がある。松下君はDNBIにより入射された高エネルギーイオンのエネルギー分布を一定の初期条件の下で精密に計測することで、CHSの持つ高エネルギーイオン損失領域の存在を実験的に検証した。具体的にはまず固定された角度で入射されたDNBIにより生成された高エネルギーイオンのエネルギー分布をNPAの角度スキャンにより求めた。これにより速度空間上での分布が求まる。このプロセスをDNBIの入射角を変えては行い入射角への依存を調べた。次に測定した速度分布関数を積分することにより求められる粒子束を、DNBI入射ビーム軌道から計算で評価した閉じ込め領域と入射ビームの発生（電離した点）分布との重なりから推測できる粒子生存率と比較した。得られた結果は両者の良い一致を示した。そこでこの手法による閉じ込め磁場構造（磁気軸位置）やビームエネルギーによる損失領域の違いの評価も行い、いずれも損失領域が予想される場所に存在することでよく説明できることを示した。

上記の数値解析による損失領域の評価については、DNBI入射軸に沿って発生したイオンの粒子軌道を計算し粒子が一定時間以上プラズマ内に止まっているか否かで判定しているが、松下君は計算に当たり通常用いられる案内中心近似は用いず、運動方程式を直接解くことでより正確な判定を可能とした。この結果、案内中心近似では粒子閉じ込めが良いとされる磁気軸内寄せ配位に於いても磁場に垂直方向に入射されたエネルギーの高いイオンは無衝突遷移により損失することが分かり、垂直入射DNBI加熱が有効でないというCHSの実験結果がよく説明できることを示した。このことはイオンの有限ラーマ半径効果が特にピッチ角90度付近の粒子閉じ込めに関しては重要であることを示唆している。

高エネルギーイオンの損失領域の実験的測定は、軸対称型装置であるトカマク装置に於いては多くの例があるものの、損失領域の存在がより重要な意味を持つヘリカル型装置で

はこれまで実験的に検証された例はない。松下君の研究はCHSの持つ高エネルギー損失領域を実験的に初めて明らかにしたものである。そしてその結果を基に、実験的に観測された中性粒子入射加熱（NBI）の入射方向による加熱効率の違いを説明した。

このように、本論文は磁場閉じ込め方式核融合装置の持つ高エネルギー粒子閉じ込め性能に直接関わる損失領域の存在の有無を、3次元構造を持つヘリカル型装置に於いて実験的に初めて明らかにしたものである。この結果は高エネルギー粒子を用いたプラズマ加熱に於いて行われているモンテカルロシミュレーションによる加熱効率評価の妥当性を実験的に与えたものでもある。審査委員会は本論文内容が博士（学術）の称号を授与するに値するものであると判断した。

申請者に対する口述試験は本人による論文内容の説明を受けながら適宜質疑応答を行う形式で実施した。松下君の発表は、論旨が明快になるよう構成を練った跡が見られるわかりやすいものであった。審査委員からの質問は基礎的な理解を問うものに始まり、実験設定や計測手法の妥当性、計測結果の評価、計算に用いた仮定の是非、結果の評価・位置づけ、物理的説明、他の研究結果との比較など多岐にわたったが、いずれにも的確に答えた。実験研究を行う上での基礎的な知識・技術、並びにプラズマに関わる専門的な知識、更に計算技術を身につけていると判断した。又、2月2日に開催された論文公開発表会に於いては、指定時間内に内容を要領よくまとめて発表し、聴衆からの質問にも明確に答えていた。

本論文は日本語で執筆されているが、アブストラクトは英語で書かれ、またこれまでの研究成果を英語論文1件に筆頭著者としてまとめ、査読付き外国雑誌に投稿し受理されているので、英語力に関しても問題はないと判断した。

以上の結果を以て審査委員会は全員一致で本論文に関する審査を合格とした。