

ヘリカル型閉じ込め装置における
イオン種の違いが粒子輸送に与える影響
に関する研究

大谷 芳明

概要

本論文は、ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響(イオン種効果)についての研究をまとめたものである。粒子輸送に対するイオン種効果はASDEX トカマク及び Compact Helical System (CHS) において調べられ、それぞれ異なる密度依存性が示されているが、新古典拡散やジャイロボーム拡散では粒子輸送に与えるイオン種効果の影響について説明できない。本論文では、ヘリカル型装置であるヘリオトロンJ及びLHDにおいて粒子輸送に与えるイオン種効果の影響を評価した。これは、粒子輸送に対するイオン種効果の物理機構解明に向けた基礎実験であるだけでなく、将来のヘリカル型核融合炉設計において、軽水素(H)・重水素(D)による先行研究結果から重水素-三重水素混合プラズマの閉じ込め性能を外挿する上でも重要な知見となる。

DプラズマとHプラズマの粒子輸送係数を比較するため、ヘリオトロンJにおいてECH加熱のD及びHプラズマに対して50, 100, 125 Hzの変調周波数で密度変調実験を行い、粒子拡散係数と対流速度を評価した。Dプラズマの粒子拡散係数及び磁気軸中心へ向かう対流(内向き対流)速度はHプラズマよりも小さく評価され粒子輸送係数に水素同位体効果があることが示された。対流速度に対する水素同位体効果はASDEX, CHSと異なる特徴が見られたが、Hプラズマと比べてDプラズマの粒子拡散係数が小さい特徴は一致した。

HプラズマとHeプラズマの粒子輸送係数を比較するため、LHDにおいてECH加熱のH及びHeプラズマに対して密度変調実験を行い、粒子拡散係数と対流速度を評価した。Heプラズマの粒子拡散係数はHプラズマと比較して、中心領域では小さく、周辺領域では大きい。また、中心領域の対流速度はHプラズマは外向き、Heプラズマは内向きであり、周辺領域でのHとHeプラズマの対流速度は同程度であった。ASDEX トカマクと異なり、粒子拡散係数に対するH-Heイオン種効果が周辺領域と中心領域で異なった。粒子輸送係数に対するイオン種効果の衝突周波数依存性を評価したところ、周辺の電子内部輸送障壁が形成されていないL-mode領域において粒子拡散係数に対するイオン種効果には明確な衝突周波数依存性が見られた。高衝突周波数領域でヘリウムプラズマの粒子拡散係数が軽水素プラズマよりも大きくなる傾向が示された。一方、対流速度に明確なイオン種効果は現れなかった。

粒子輸送係数に対するイオン種効果の衝突周波数依存性を議論するために、ヘリオトロンJ, LHD 及び CHS の3つの装置で評価した粒子輸送係数の比較を行った。3つの装置の粒子拡散係数は衝突周波数の減少に伴い粒子拡散係数が増大する傾向が一致した。LHDでは、粒子拡散係数に対するH-Heイオン効果は衝突周波数の減少により減少する。CHSでは、粒子拡散係数に対する水素同位体効果は衝突周波数の減少に伴い増大する。また、ヘリオトロンJにおいても低衝突周波数領域で水素同位体効果が現れる特徴は一致した。よって、LHDの結果とCHSとヘリオトロンJの結果は逆の特徴がある。一方、対流速度に対しては、LHDではH-Heイオン種効果、CHSでは水素同位体効果が見られなかったが、ヘリオトロンJではわずかに水素同位体効果が見られ、装置間で違いがあることが分かった。

第1章 序論

核融合を用いた発電は、火力発電と比較して発電時に発生する CO_2 が無い、核分裂による原子力発電と比較して高レベルの放射性廃棄物が核融合反応において生成されず暴走の危険性もない、また、資源に偏在がないという観点から、昨今のエネルギー問題を解決する手段として非常に有力な候補である。核融合炉の実現のためには、プラズマ化した高温・高密度の燃料イオン (D, T) を長いエネルギー閉じ込め時間で閉じ込める必要がある。

プラズマ粒子を閉じ込める手法の一つである磁場閉じ込め方式による核融合 (磁場閉じ込め核融合) は、荷電粒子がローレンツ力により磁場に巻き付いて運動するという性質を用いプラズマ粒子を閉じ込める手法である。磁場閉じ込め型装置において、良好な閉じ込めを実現するためには、粒子の閉じ込めを良くする必要がある。粒子の閉じ込め性能の理解のためには、粒子輸送特性を解明する必要がある。

イオンの粒子束は次式によって表されるものとする (粒子束の式)。

$$\Gamma_i = -D\nabla n_i + n_i V \quad (1.1)$$

ここで、 Γ_i はイオンの粒子束、 n_i はプラズマ密度、 D は粒子拡散係数、 V は対流速度である。対流速度の向きは、磁気軸からプラズマの最外殻へ向かう方向を正と定めている。これを外向き対流、プラズマの最外殻から磁気軸中心へ向かう方向を内向き対流と定義する。プラズマのイオンを直接計測することは困難であるため、一般的に電子密度計測の結果から粒子輸送解析が行う。プラズマの準中性条件からイオン密度 n_i と電子密度 n_e は等しく、イオンの粒子束 Γ_i も電子の粒子束 Γ_e と等しいと考えると、電子の粒子輸送特性を調べることでイオンの粒子輸送特性を評価することができる。粒子輸送解析においては、粒子拡散係数と対流速度という2つのパラメータを評価することが必要である。そのため、密度分布の形状からだけでは評価できず、密度分布の過渡応答を調べる必要がある。粒子拡散係数と対流速度という2つのパラメータを同時に決めるために、ある磁気面における電子の連続の式 (粒子バランスの式) を用いる。これは、

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma_e + S_e \quad (1.2)$$

と表すことができる。ここで S_e は電子の単位時間、単位体積当たりの発生量 (粒子ソース) である。

ガスパフを用いた密度変調実験による粒子輸送係数の評価手法は、これまで多くの磁場閉じ込め装置において行われ、粒子輸送係数の同定に用いられてきた [1][2].

実際の DT 反応による核融合炉の設計段階において、炉の性能を評価するためには、これまでのプラズマ閉じ込め装置の実験から得られた知見から、粒子、熱、エネルギーの閉じ込め性能を予測しなければならない。そのためには、水素同位体の違いがプラズマの閉じ込め性能に与える影響 (水素同位体効果) を評価することが重要となる。また、粒子輸送の物理機構解明という観点では、粒子輸送に対してイオンの質量が影響を及ぼすのか或いはイオンの電荷が影響するのかという問題があり、軽水素プラズマとヘリウムプラズマの違いが粒子輸送に与える影響 (H-He イオン種効果) を研究することも必要であると考えられる。ASDEX と CHS において粒子輸送に対する水素同位体効果及び H-He イオン種効果 (本論文では、総称してイオン種効果と言う) に関する先行研究について述べる。ASDEX では、ガスパフを用いた密度変調実験によって軽水素、重水素、ヘリウムプラズマの粒子輸送係数が評価された [3][4].

イオン種の違いによって粒子輸送に与える影響は、ASDEX や CHS で示された重水素プラズマと軽水素プラズマに対する実験結果と新古典輸送、ジャイロボーム拡散の理論が予測するものと異なっており、イオン種の質量が粒子輸送を減少させるという物理機構は未解明である。また、重水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子輸送が同程度であるという ASDEX の結果は、イオン種の質量によって粒子輸送が変化するだけでなく、イオン種の電荷によっても粒子輸送が変化するというを示唆している。さらに、この結果は、ジャイロボーム拡散の予測とは異なっている。将来のヘリカル型閉じ込め方式による核融合炉実現のためには、

- ヘリカル型閉じ込め装置による DT 核融合反応を用いた核融合炉を設計するためには、軽水素プラズマや重水素プラズマによる先行研究の結果から DT 混合プラズマの閉じ込め性能を外挿する上で重要な知見である。
- 軽水素プラズマ、重水素プラズマ及びヘリウムプラズマの粒子輸送の比較を行うことにより、プラズマのイオン種の違いが粒子輸送に与える影響の質量依存性、電荷依存性を実験的に調べることで粒子輸送の物理機構解明の一助となる。

という観点から、イオン種の違いが粒子輸送に与える影響を調べるのが重要である。

本研究では、ヘリカル型装置の粒子輸送にイオン種の違いが与える影響を調べることを目的としている。具体的には、次に挙げる先行研究における問題点の解決を目的としている。

1. 装置によって軽水素プラズマ、重水素プラズマ及びヘリウムプラズマの粒子輸送係数の密度依存性が異なっており、イオン種の違いが粒子輸送係数に与える影響には装置によって異なる可能性がある。

2. 衝突周波数は電子密度に依存性を持つので、イオン種の違いによる粒子輸送係数に与える影響は衝突周波数依存性がある可能性がある。

この2つの仮説を検証するために、1. に対してはヘリオトロンJ装置 [5][6][7][8] において軽水素プラズマと重水素プラズマの粒子輸送係数の比較及び大型ヘリカル装置 (LHD)[9][10][11] において軽水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子輸送係数の比較を行った。2. に対しては LHD において軽水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子輸送係数の衝突周波数依存性を比較することで評価を行った。

本論文は全7章で構成される。

第1章では、これまでの粒子輸送研究、イオン種が粒子輸送に与える影響について調査された先行研究について述べ、本研究の目的と意義について述べた。第2章では、粒子輸送係数の評価を行うために開発された遠赤外レーザー干渉計について述べる。第3章では、粒子輸送係数の評価に用いる密度変調法について述べる。まず、電子密度の線積分値に対する変調周波数成分の径方向分布を評価するために分布再構成手法について述べる。次に、電子密度の線積分値から変調周波数成分を抽出する手法について述べ、分布再構成手法を適用し変調周波数成分の径方向分布を評価する手法について述べる。その後、LHD、ヘリオトロンJにおける具体的な粒子輸送係数評価方法について述べる。第4章では、ヘリオトロンJにおいて行った重水素プラズマと軽水素プラズマに対する密度変調法による粒子輸送係数の評価及び比較について述べる。第5章では、LHD において行ったヘリウムプラズマと軽水素プラズマに対する密度変調法による粒子輸送係数の評価及び比較について述べる。また、L-mode 領域における粒子輸送係数の衝突周波数依存性について述べる。第6章では、ヘリオトロンJ, LHD 及び CHS の結果から、粒子輸送に与えるイオン種効果の衝突周波数に対する依存性について議論する。最後に、第7章で総括を行う。

第2章 遠赤外レーザー干渉計の開発

密度変調法による粒子輸送係数の評価を行うためには密度変調の伝搬特性の評価及び高密度プラズマ計測を目的として、磁気軸を外した位置を視線に持つ FIR レーザー干渉計の開発を行った。要求仕様である、計測可能電子密度領域が $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3} - 1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $10 \mu\text{s}$ 以下の時間分解能、 25 mm 以下の空間分解能を満たすように以下のように設計を行った。

プラズマの電子密度勾配による屈折の影響は磁気軸を外した視線においては大きいことが予測されるため、高密度放電においても、プラズマの屈折効果によるビームの曲がりを低減する必要がある。このため、光源には波長 $337 \mu\text{m}$ の HCN レーザーを開発した。干渉計システムは、ビームの強度変化が計測に影響せず、密度の増減が評価できるヘテロダイン検波を採用し、低密度のプラズマ計測も可能で機器設置の空間的制約も少ないマイケルソン干渉計を構築した。HCN レーザーを使用した場合においても、高密度放電時にはビームはプラズマの屈折効果によってわずかに曲がってしまう。ビームの屈折による影響でどの程度の電子密度までを計測可能であるか 3次元磁場構造も考慮に入れて評価するために、レイトレーシングコード TRAVIS を用いて、高密度放電時のビームの軌跡を評価した。この結果、ヘリオトロン J で生成された最高密度 $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマであっても、検出器前のレンズ内にビーム中心は戻ることが確認された。さらに、近軸近似によりガウシアンビームを模擬し、高密度放電時において検出されるビームのパワーを評価した結果、 $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマに対しても 60 % のパワーがレンズに到達することが確認された。また、Super Rotating Grating [12] により 1MHz の周波数シフトをかけることにより 1 MHz のビート信号を得ることができる。このビート信号に対して、解析信号を用いて位相評価を行い、 $4 \mu\text{s}$ の時間分解能で計測することができる。空間分解能においては集光設計において、プラズマ通過中でのビーム径を 25 mm 以下にすることで実現した。

今までのところ、FIR レーザー干渉計を用いて、中心電子密度が $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度のプラズマ計測ができることを実験的には確認できていない。しかしながら、マイクロ波干渉計で計測できない密度領域である線平均電子密度で $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ を超えるプラズマの計測には成功した。光線追跡の結果からは $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマに対しても計測が可能であるので、今後の高密度プラズマ放電において実験的に $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマ計測が可能であることを示す必要がある。

第3章 粒子輸送係数評価手法

本研究では、ヘリオトロンJ装置とLHDに対して密度変調実験を行うことにより、粒子輸送係数の評価を行う。密度変調法は外部からの粒子供給量を正弦波的に増減させることにより、周辺領域の電子密度に変調を与え、その空間的な伝搬から、粒子拡散係数と対流速度を評価する手法である。プラズマの周辺部から粒子供給量を増減させることにより、プラズマ周辺に供給される粒子ソースに変調を加えると、プラズマに入射された中性粒子はプラズマ粒子との衝突過程によりイオンと電子に電離する。その結果、プラズマの電子及びイオン密度が増減し変調されることとなる。粒子供給量を増減させることによって周辺領域にかけられた密度変調はプラズマの周辺部から磁気軸中心へと伝搬していく。この過程で密度変調の振幅強度は減衰し、伝搬する密度変調の位相は中心に向かうにつれて遅れることになる。この伝搬過程は、プラズマの粒子輸送特性、すなわち粒子拡散係数と対流速度によって決まる。したがって、密度の変調周波数成分を計測し、その振幅強度比と位相差を評価することにより、粒子拡散係数と対流速度を評価することができる。

次に、干渉計から求めた密度変調成分の線積分値から、密度変調成分の径方向分布を評価する手法を示した。線積分値から分布へと再構成を行う際には、Tikhonov-Phillips 正則化法を用い、正則化パラメータは一般交差検証法によって評価した。線積分電子密度から密度変調成分は、高速フーリエ変換を各視線で得られた線積分電子密度に適用することで求める。各視線の密度変調成分を基準となる視線の密度変調成分と比較することにより振幅強度比及び位相差を評価する。

変調実験における粒子拡散係数 D_{mod} 、対流速度 V_{mod} の径方向分布を仮定し、式(1.1)と、式(1.2)を変調成分に対して適用した

$$\tilde{\Gamma}_e = -D_{mod}\nabla\tilde{n}_e + \tilde{n}_eV_{mod} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial\tilde{n}_e}{\partial t} = -\nabla\cdot\tilde{\Gamma}_e + \tilde{S}_e \quad (3.2)$$

を用いて、密度変調成分の径方向分布を評価する。ここで、 $\tilde{\Gamma}_e$ 、 \tilde{n}_e 、 \tilde{S}_e は、それぞれ変調周波数成分の電子の粒子束、電子密度分布及び粒子ソース分布である。式(3.1)、(3.2)を数値的に解くことにより、 \tilde{n}_e^{calc} を求める。 \tilde{n}_e^{calc} は複素数であり、これを用いて干渉計の視線間において計測される振幅強度比と位相差を評価することができる。

LHD では干渉計の計測視線が 13ch であるため, 干渉計によって得られる密度変調成分の線積分値から Tikhonov-Phillips 正則化法を用い, 密度変調成分の径方向分布を評価することができる. したがって, 粒子輸送係数の評価を行う際にも密度変調成分の径方向分布と一致するような D_{mod} , V_{mod} を探索することができる. 数値計算によって \tilde{n}_e^{calc} を評価するため, D_{mod} と V_{mod} は規格化小半径 ρ の関数として次式のような分布形状を仮定した.

$$D_{mod} = \begin{cases} D_{mod}^{core} & (\rho < 0.425) \\ D_{mod}^{core} + \frac{D_{mod}^{edge} - D_{mod}^{core}}{0.825 - 0.425}(\rho - 0.425) & (0.425 < \rho < 0.825) \\ D_{mod}^{edge} & (0.825 < \rho) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$V_{mod} = \begin{cases} V_{mod}^{core} \frac{\rho}{0.775} & (\rho < 0.775) \\ V_{mod}^{core} + \frac{V_{mod}^{edge} - V_{mod}^{core}}{1.175 - 0.775}(\rho - 0.775) & (0.775 < \rho) \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで, D_{mod}^{core} は $\rho < 0.425$ における粒子拡散係数, D_{mod}^{edge} は $\rho > 0.825$ における粒子拡散係数であり, V_{mod}^{core} は $\rho = 0.775$ における対流速度, V_{mod}^{edge} は $\rho = 1.175$ における対流速度である. この分布形状は実験結果を参考にして決定した. 粒子ソースはモンテカルロ中性粒子輸送シミュレーションコード EIRENE を用いて計算された結果を用いており, 軽水素とヘリウムプラズマとで異なる分布を用いている [13][14]. この粒子拡散係数と対流速度の径方向分布及び粒子ソースを用いて, \tilde{n}_e^{calc} を評価した.

最適な解を評価するために, 実験値の密度変調成分の径方向分布と計算値の密度変調成分の径方向分布との二乗誤差 χ^2 を定義し, 最小化する最適な D_{mod}^{core} , V_{mod}^{core} , D_{mod}^{edge} , V_{mod}^{edge} を探索した.

現在, ヘリオトロン J には干渉計が 2 視線しかないため詳細な密度分布計測ができない. この状況下で粒子輸送係数を評価するために, まず D_{mod} 及び V_{mod} の分布を

$$D_{mod}(r) = D_{mod0}(const) \quad (3.5)$$

$$V_{mod}(r) = V_{mod0} \frac{r}{a_M} \quad (3.6)$$

と仮定する. ここで, $a_M = 1.2a$ は最外殻磁気面の半径 a を拡張した値である. 粒子ソースの分布はヘリオトロン J における先行研究で中性粒子モンテカルロシミュレーションコード DEGAS を用いて計算された結果を参考に

$$|\tilde{S}_e(\rho)| = S_{e0} \exp \left[- \left(\frac{\rho - 1.08}{0.35} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

としている [15][16][17]. 本解析においては, 重水素プラズマと軽水素プラズマに対する粒子ソース分布を同じ分布とした.

次に, マイクロ波干渉計と FIR レーザー干渉計の視線間で評価される振幅比 R_a^{exp} と位相差 ϕ^{exp} を評価する.

$$R_a^{exp} = \frac{\|\tilde{n}^{FIR_{exp}}\|}{\|\tilde{n}^{MICRO_{exp}}\|} \quad (3.8)$$

$$\phi^{exp} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\tilde{n}^{FIR_{exp}} \cdot \tilde{n}^{MICRO_{exp}*})}{\text{Re}(\tilde{n}^{FIR_{exp}} \cdot \tilde{n}^{MICRO_{exp}*})} \right] \quad (3.9)$$

ここで, $\tilde{n}^{FIR_{exp}}$, $\tilde{n}^{MICRO_{exp}}$ は FIR レーザー干渉計及びマイクロ波干渉計で計測した線平均電子密度の変調周波数成分である.

変調周波数成分に対するフーリエ成分の実部と虚部の径方向分布 \tilde{n}_e^{calc} を評価する. このとき, プラズマの小半径は 0.18 m であると仮定し, $\rho = 0.01 - 1.2$ まで 0.01 刻みで解析を行った. 得られた変調周波数成分の径方向分布を干渉計の視線に対して視線積分を行った. 実座標と規格化小半径の関係を用いて, \tilde{n}_e^{calc} の FIR レーザー干渉計による視線平均及びマイクロ波干渉計による視線平均 $\tilde{n}^{FIR_{calc}}$, $\tilde{n}^{MICRO_{calc}}$ をそれぞれ求める. これらを用いて 2 つの干渉計間の振幅比と位相差は,

$$R_a^{calc} = \frac{\|\tilde{n}^{FIR_{calc}}\|}{\|\tilde{n}^{MICRO_{calc}}\|} \quad (3.10)$$

$$\phi^{calc} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\tilde{n}^{FIR_{calc}} \cdot \tilde{n}^{MICRO_{calc}*})}{\text{Re}(\tilde{n}^{FIR_{calc}} \cdot \tilde{n}^{MICRO_{calc}*})} \right] \quad (3.11)$$

と求めることができる.

計算結果と実験結果が一致する最適な解を評価するために, 二乗誤差 χ^2 を定義し, 最小化するような D_{mod} , V_{mod} を探索した.

第4章 ヘリオトロンJにおける重水素プラズマと軽水素プラズマに対する粒子輸送の比較

ヘリオトロンJにおいて、重水素プラズマと軽水素プラズマに対して密度の減衰時間の評価及び密度変調実験を行うことにより、粒子輸送に対する水素同位体効果が与える影響を評価した。これは、現在のヘリオトロンJ装置と同じ磁場配位を持つ核融合炉を設計するために重要な知見となるのみならず、粒子輸送に与える水素同位体効果の物理機構解明への一助となりうる重要な研究である。

まず、実効的な粒子閉じ込め時間の違いを、ガスパフからの粒子供給を切り、密度の減衰時間を評価することにより比較した。その結果、重水素プラズマの密度の減衰時間は 11 ms、軽水素プラズマの密度の減衰時間は 8 ms と重水素プラズマの方が実効的な粒子の閉じ込め時間が長いという結論を得た。しかしながら、ガスパフはオフにしたものの、密度の減衰時間には放電管壁からのリサイクリングによる粒子供給は含まれているため、単純にこの結果からだけでは、重水素プラズマの粒子閉じ込めが良いという判断はできない。

そこで、放電管壁からのリサイクリングによる粒子供給を考慮に入れずに、定量的に粒子の閉じ込めを評価するため、密度変調法を用いて粒子拡散係数と対流速度を個別に評価した。その結果を用いて、重水素プラズマと軽水素プラズマの粒子輸送特性の違い調べた。放電条件は、線平均電子密度 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、中心電子温度 1 - 1.3 keV のプラズマに対して評価を行った。変調周波数は 50, 100, 125 Hz を選択した。

実験によって2つの干渉計で計測した線平均電子密度に対してFFTをかけ得られるスペクトルの変調周波数成分に対して相関解析を行うことにより、2視線間の変調振幅比と位相差を評価した。その結果、軽水素プラズマと重水素プラズマの変調振幅比には有意な差が見られた。この結果に対して粒子輸送係数の評価を試みた。粒子輸送係数及び粒子ソースの径方向分布形状のモデルを仮定して、変調振幅及び位相遅れの径方向分布を評価した。この変調振幅及び位相遅れの径方向分布から2つの干渉計によって計測されうる振幅強度比と位相差を計算し、実験結果と比較することにより粒子輸送係数を評価した。その結果、重水素プラズマに対しては 50 Hz, 100 Hz, 125 Hz の変調周波数から得られた粒子拡散係数は、軽水素プラズマで得られた粒子拡散係数と比較して小さく評価された。と

りわけ, 50 Hz の変調周波数の場合, 重水素プラズマの粒子拡散係数は, 40 % 程度小さく見積もられた.

実効的閉じ込め時間と粒子拡散係数から求めた閉じ込め時間を比較したところ, 重水素プラズマと軽水素プラズマの粒子拡散係数から求めた閉じ込め時間の差は, 実効的閉じ込め時間の差よりも小さかった. 重水素プラズマの方が閉じ込め時間が長いという特徴は一致しているが, 実効的な閉じ込め時間で見られた重水素プラズマと軽水素プラズマの差には, 粒子輸送の違いとリサイクリングの違いが両方含まれていることが分かった.

ASDEX, CHS と粒子拡散係数に現れる水素同位体効果の比較を行うと, ヘリオトロン J の場合においても重水素プラズマの粒子拡散係数が軽水素プラズマと比較して小さいという特徴は一致した. しかしながら, 対流速度に現れる水素同位体効果に対しては装置間で差異が見られた. この原因として, 磁場配位の違いや加熱手法の違いがあげられる. この切り分けには, ヘリオトロン J において ECH プラズマに対して磁場配位依存性を評価する必要があると考えられる. また, 対流速度は, 温度勾配に起因する非対角項等の量をまとめたものである. したがって, ASDEX, CHS, ヘリオトロン J の密度変調実験において加熱手法が異なっているため, 温度勾配分布の違いが生じ対流速度に現れる水素同位体効果に差異が現れた可能性もある. この検証のためには, NBI 加熱プラズマに対する粒子輸送係数の評価及び温度勾配も考慮に入れた粒子輸送解析を行う必要があると考えられる.

評価された粒子輸送係数を用いて電子密度分布を評価すると Nd:YAG トムソン散乱計測で評価した電子密度分布と比較してピークした分布となった. この原因は, 粒子輸送係数の径方向分布モデルが実際のプラズマの粒子輸送係数の径方向分布と異なっていることが影響している可能性が考えられる. 現状 2 視線の干渉計しかないため, フィッティングパラメータが 2 つしか決めることができない. フィッティングパラメータを増やして解析を行うためには, 多チャンネル化を進め電子密度の径方向分布を評価する必要がある. 先行研究では, 干渉計測によって電子密度を評価するためには 5 ch あれば可能であることが示されている [18]. これにより, 粒子輸送係数のモデルが実際の粒子輸送係数の径方向分布と違うことによって内向き対流が増大したのかどうかを切り分けることが可能である. また, 密度勾配と粒子束の間に強い非線形性がある場合, 密度変調法によって求めた粒子拡散係数と対流速度は定常状態の粒子拡散係数及び対流速度と一致しないという指摘もある [19]. 多チャンネル化によって粒子輸送係数の径方向分布モデルに起因するものなのか, 密度変調法によって求めた粒子輸送係数と定常状態の粒子輸送係数に違いがあるのかを切り分けることが可能になると考えられる.

第5章 LHDにおける軽水素プラズマとヘリウムプラズマに対する粒子輸送の比較

ヘリカル型装置において、軽水素とヘリウムプラズマの粒子輸送に違いがあるかどうかは明らかではなく、この違いを定量的に評価することは重要である。ヘリウムプラズマの粒子輸送係数の評価は重水素プラズマの粒子輸送係数と併せることにより、粒子輸送係数に対するイオン種の質量及び電荷が与える影響に関する物理機構解明への一助となると考えられる。本章では、第3章において示した手法をLHDで生成されたECH加熱プラズマの密度変調実験へ適用し、その結果を用いて、軽水素プラズマ及びヘリウムプラズマの粒子輸送係数を評価及びその差異を比較した。

まず、同じ放電条件の軽水素プラズマとヘリウムプラズマに対して密度変調法によって粒子輸送係数の評価を行った。ECH加熱の中心電子密度 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、中心電子温度は 2.5 - 3.0 keV 程度のプラズマパラメータをもつ軽水素プラズマとヘリウムプラズマに対して 1.25 Hz で密度変調をかけ、密度変調成分の振幅強度と位相遅れを評価した。周辺領域では軽水素プラズマの方がヘリウムプラズマより変調振幅が大きく、評価された位相遅れは同程度であった。中心領域では軽水素プラズマとヘリウムプラズマで位相分布に構造的な違いが見られた。この変調成分に対して粒子拡散係数と対流速度を評価すると、軽水素プラズマはヘリウムプラズマと比較して、中心領域の粒子拡散係数が大きく、周辺領域の粒子拡散係数が小さいことが示された。また、対流速度に関しては、軽水素プラズマにおいては中心では外向きの対流が強い傾向にあり、周辺部では同程度の内向き対流速度であった。

さらに、粒子拡散係数と対流速度の衝突周波数依存性を評価することを試みた。そのため、広い衝突周波数領域で粒子拡散係数と対流速度を評価するために、中心電子温度の高い時間領域及び 2.5 Hz の変調周波数のものも解析に含めた。中心領域においては、粒子輸送係数に顕著な衝突周波数依存性はなかった。本実験条件のヘリウムプラズマは揺動の安定・不安定の境界上にあるため、わずかなパラメータの違いで揺動強度が変化する可能性がある。そのため、粒子拡散係数にばらつきが生じたのではないかと予測される。一方、周辺部の粒子拡散係数と対流速度の衝突周波数依存性を評価したところ、軽水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子拡散係数は、 $1/\nu$ 領域では差がないが、プラトー領域においては

ヘリウムプラズマの粒子拡散係数が大きくなる傾向が示された。一方、対流速度に関しては、衝突周波数によらずイオン種効果は見られなかった。中心電子温度の高い時間領域では中心領域では、e-ITBが発生していると考えられるが、周辺領域では温度勾配も小さくL-mode領域であると考えられる。よって、ECH加熱のL-mode領域における軽水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子拡散係数に対するイオン種効果には衝突周波数依存性があり、プラトー領域でヘリウムプラズマの粒子輸送が大きくなる傾向が示されたといえる。

以上のことから、粒子輸送係数に対するH-Heイオン種効果があることは確認された。軽水素プラズマとヘリウムプラズマは質量のみならず電荷も異なっている。そのため、本実験からでは粒子輸送係数に質量依存性があるのか、電荷依存性があるのかを評価することができない。この問題は、軽水素イオンと同じ電荷で異なる質量を持つ重水素イオンに対して密度変調法を用いて粒子輸送係数を評価することで明らかにできると考えられる。また、粒子輸送係数に対するH-Heイオン種効果はASDEXの結果と異なり、中心領域と周辺領域で異なることが分かった。さらに、L-mode領域では粒子輸送係数に対するH-Heイオン種効果は衝突周波数に対して依存性を持つこともわかった。

第6章 ヘリオトロンJ, LHD及びCHS における粒子輸送係数の比較

本章では, LHD, CHS 及びヘリオトロンJの粒子輸送係数の規格化衝突周波数依存性について評価を行った. 本章で扱ったデータは, LHD 及びヘリオトロンJではECHプラズマに対する粒子輸送係数, CHSではNBIプラズマに対する粒子輸送係数である [2]. また, LHDでは軽水素プラズマとヘリウムプラズマの比較, ヘリオトロンJ及びCHSでは軽水素プラズマと重水素プラズマの比較を行ったデータである.

粒子拡散係数はいずれの装置, 加熱手法, イオン種によらず規格化衝突周波数の減少に伴って粒子拡散係数が増大するという傾向が一致し, 粒子拡散係数は装置によらず規格化衝突周波数で整理できる可能性を示した. 一方, 対流速度に対しては, ヘリオトロンJの対流速度が他装置と比較して非常に大きな内向き対流となり, とりわけ, 高い変調周波数においてこの傾向は顕著であった. この点に関しては, フィッティングパラメータが不足しているのか実際にこのような大きな内向き対流を持つのかの切り分けができていないため, 議論は困難である.

次に, LHDとCHSにおいて粒子拡散係数に対するイオン種効果の比較を行った. LHDの軽水素プラズマとヘリウムプラズマを比較すると, 衝突周波数の増大とともに軽水素プラズマに対するヘリウムプラズマの粒子拡散係数が大きくなり, H-Heイオン種効果が明確になってくる. 一方, CHSの軽水素プラズマに対する重水素プラズマの粒子拡散係数を比較すると衝突周波数の減少とともに重水素プラズマに対する軽水素プラズマの粒子拡散係数が大きくなり, 水素同位体効果が明確になってくる. 以上の結果から, 装置の違い, 加熱手法の違いがイオン種効果の大小関係に影響を与えないと仮定すれば, H-Heイオン種効果と水素同位体効果の衝突周波数依存性が異なることが示唆される. 重水素イオンとヘリウムイオンは質量及び電荷がともに異なっている. CHSでは質量の増加とともに粒子拡散係数が小さくなる傾向が現れたことから, LHDにおいてヘリウムイオンの粒子拡散係数が軽水素プラズマよりも大きくなった原因は電荷によるものである可能性が考えられる. しかしながら, LHDとCHSの間では, 装置サイズ, 磁場配位, 加熱方法が異なっており, 単一装置で軽水素, 重水素, ヘリウムプラズマの粒子拡散係数を比較して, この傾向が現れることを検証する必要がある. 一方で, ヘリオトロンJプラズマの衝突周波数領域は, CHSで生成されたプラズマの衝突周波数領域とくらべて小さい. このような低い衝突周

波数領域においても重水素プラズマの方が粒子拡散係数が小さいという傾向は一致した。したがって、CHS とヘリオトロン J の実験では装置の違い、加熱方法の違いはあるものの、低衝突周波数領域で質量の大きい水素同位体の粒子拡散係数が小さくなる可能性が示唆された。また、ヘリオトロン J プラズマの対流速度の絶対値の比較に関する議論は困難であるのに対して、LHD, CHS ではイオン種の違いにより対流速度に大きな違いは無かったが、ヘリオトロン J ではわずかに重水素プラズマの方が内向き対流が小さい傾向にあった。

第7章 総括

本論文では、粒子輸送に対するイオン種の違いが与える効果を評価することを目的とした。そのために、ヘリオトロンJプラズマの粒子輸送係数を密度変調法により評価するためにFIRレーザー干渉計を開発した。開発したFIRレーザー干渉計と既存のマイクロ波干渉計から得られる線平均電子密度を基に、軽水素プラズマと重水素プラズマの粒子拡散係数及び対流速度を評価し、水素同位体効果が粒子輸送に与える影響を評価した。ヘリオトロンJにおける標準磁場配位のプラズマを対象として、粒子輸送に対する水素同位体効果を評価した。

また、LHDにおける軽水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子拡散係数及び対流速度を評価し、イオン種が粒子輸送に与える影響を評価した。磁気軸 $R = 3.6$ m のプラズマ粒子輸送に対する軽水素、ヘリウム間のイオン種の効果を評価した。

これは、粒子輸送に対するイオン種の違いが与える効果を解明するのみならず、将来のヘリカル型DT核融合による核融合炉における閉じ込め性能を評価する上で重要な意味合いを持つだけでなく、トーラスプラズマの粒子輸送に対する水素同位体効果に関する物理機構の解明にも寄与することができる重要な研究テーマであり、本論文はその基礎研究として意義がある。

各章の要旨を以下に述べる。

第1章では、エネルギー問題について述べ、核融合研究の重要性について概説した。また、これまでの粒子輸送研究について示し、ASDEX トカマク及びCHSにおいて行われたイオン種の違いによる粒子輸送係数の依存性を調べた先行研究について述べた。さらに、新古典輸送及び異常輸送について概説し、これらの表式からではASDEXやCHSの結果を説明することができないということについて述べた。

第2章では、粒子輸送係数評価のため開発した遠赤外レーザー干渉計について述べた。本FIRレーザー干渉計は磁気軸を外した位置に視線が設計されており、密度変調法により変調された密度の伝搬特性を評価することができる。また、粒子輸送研究においては、幅広い密度領域における粒子輸送係数の評価が必要であるため、電子密度が $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマ計測が可能であるように設計している。また、計測例として電子密度がおおよそ $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマの計測結果を示した。

第3章では、本研究において用いた密度変調法について述べた。粒子輸送を評価するためにはプラズマの密度勾配によって生じる粒子束である拡散項と密度勾配がない状態においても生じる粒子束である対流項を個別に求める必要がある。そのためには、密度変調の伝搬特性を求める必要がある。密度変調の伝搬特性である変調振幅分布と位相分布を、干渉計測によって得られた線積分電子密度から評価するため、Tikhonov-Phillips 法及び一般交差検証による正則化パラメータの探索手法を用いた分布再構成手法を示した。

密度変調実験によって得られる線積分電子密度から粒子輸送係数を評価する手法を示した。干渉計測によって得られる線積分電子密度から、密度変調成分の線積分値を評価する手法を示した。この実験結果に対して Fitting 法により粒子拡散係数と対流速の最適値を探索する手法を示した。最後に、この手法をヘリオトロン J 及び LHD に適用する方法をそれぞれ示した。

第4章では、粒子輸送係数に与える水素同位体効果の影響を評価するために、ヘリオトロン J において重水素プラズマと軽水素プラズマの粒子輸送の比較を行った。まず、重水素プラズマと軽水素プラズマの実効的粒子閉じ込め時間の評価を行った。加熱条件は ECH で、線平均電子密度 $0.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマに対して粒子供給を止めた後の減衰時間を比較することで評価を行った。その結果、重水素プラズマ及び軽水素プラズマの実効的粒子閉じ込め時間はそれぞれ 11 ms, 8 ms であり、重水素プラズマの閉じ込めが良い可能性が示唆されたが、リサイクリングによる粒子ソースによって差が生じた可能性もある。リサイクリングによる粒子ソースの影響を除くために、密度変調実験を行い、粒子拡散係数と対流速の評価を行った。プラズマは ECH によって加熱し、線平均電子密度 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とした。変調周波数には、50 Hz, 100 Hz, 125 Hz を用いた。計測には2つの干渉計を用い、主として $0.05 < \rho < 0.35$ の領域に生じる変調振幅強度と位相差を評価した。粒子ソースは重水素と軽水素と同じ分布を利用した。粒子輸送係数の評価を行った結果、50 Hz の密度変調実験において、重水素プラズマの粒子拡散係数は軽水素プラズマより 40 % ほど小さいことがわかった。また、対流速は 50 Hz の密度変調実験において、重水素プラズマの方が軽水素プラズマより内向きの対流が 15 m/s 大きかった。100, 125 Hz でも同様の傾向が見られたが、その差はわずかであった。これは、粒子輸送係数の径方向分布の仮定によって生じた可能性と、実際に粒子輸送係数に変調周波数依存性がある可能性が考えられ、今後明らかにしていく必要がある。

ヘリオトロン J における粒子拡散係数の解析結果は、ASDEX トカマクや低密度領域における CHS の結果と同じく、重水素プラズマの方が軽水素プラズマより小さかった。ヘリオトロン J の対流速は、ASDEX トカマクと異なり、周辺部では重水素プラズマの方が軽水素プラズマよりも内向き対流が小さかった。CHS では、重水素プラズマの方が軽水素プラズマよりも内向き対流が大きく、ヘリオトロン J と逆の特徴が示された。よって、ヘ

リオトロン J における対流速度への水素同位体効果は、ASDEX トカマク、CHS の結果と異なる特徴があることが示された。

第 5 章では、イオン種の違いが粒子輸送係数に与える影響を評価するために、LHD において軽水素プラズマとヘリウムプラズマに対する密度変調実験を行った。ガスパフによって 1.25 Hz で密度変調がかけられた ECH 加熱の軽水素プラズマとヘリウムプラズマに対して粒子輸送係数の評価を行った。軽水素プラズマとヘリウムプラズマのプラズマパラメータをそろえるために、線積分電子密度 $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ 、中心電子温度 2.5 – 3.0 keV のプラズマに対して、粒子輸送係数を評価した。その結果、軽水素プラズマの中心領域の粒子拡散係数はヘリウムプラズマと比べて大きく、軽水素プラズマの周辺領域の粒子拡散係数はヘリウムプラズマと比べて小さいことが示された。また、 $\rho = 0.775$ における軽水素プラズマの対流速度はヘリウムプラズマと比較して外向きの対流が強い傾向にあり、 $\rho = 1.175$ では軽水素プラズマの対流速度はヘリウムプラズマと同程度の対流速度であることが示された。

ASDEX トカマクにおいてはプラズマ全域でヘリウムプラズマの粒子拡散係数が軽水素プラズマより小さく評価されており、本研究の結果と比較すると異なる。よって、軽水素プラズマとヘリウムプラズマの粒子輸送においても装置間で異なることが示された。

粒子輸送に対するイオン種効果の衝突周波数依存性を評価した。中心領域 ($\rho = 0.3$) では、粒子拡散係数、対流速度に衝突周波数依存性は見られなかったが周辺領域 ($\rho = 0.9$: L-mode 領域) の粒子輸送係数には明確な衝突周波数依存性が見られた。粒子拡散係数に対して $1/\nu$ 領域ではイオン種による影響がないが、プラトー領域においては 1.5 - 2 倍程度ヘリウムプラズマの方が大きく、粒子拡散係数に対する H-He イオン種効果に衝突周波数依存性があることが示された。また、対流速度に対しては、粒子拡散係数と比較して両者に顕著な差がないことが示された。よって、LHD の ECH 加熱プラズマにおいては、粒子拡散係数に衝突周波数依存性がありプラトー領域で明確なイオン種による差が現れることがわかった。

第 6 章では、粒子輸送係数の規格化衝突周波数依存性を調べるために、LHD、CHS 及びヘリオトロン J の実験結果の比較を行った。L-mode 領域の比較を行うため、LHD に対しては $\rho = 0.9$ 、CHS に対しては $\rho = 0.7$ 、ヘリオトロン J に対しては $\rho = 0.7$ の位置を解析対象とした。いずれの装置においても、粒子拡散係数は規格化衝突周波数の減少に伴い増大する傾向が見られた。一方対流速度については、顕著な衝突周波数依存性は見られなかった。次に、CHS 及び LHD に対して粒子拡散係数に表れるイオン種効果の衝突周波数依存性を比較した。CHS の水素同位体効果では、衝突周波数の減少に伴い重水素プラズマの方が軽水素プラズマよりも粒子拡散係数が小さくなる傾向がある。一方、LHD のイオン種効果では、衝突周波数の増大に伴いヘリウムプラズマの方が軽水素プラズマよりも粒子拡散

係数が大きくなる傾向があり、CHSに現れた水素同位体効果の衝突周波数依存性と逆の傾向を示した。これは、装置、加熱手法により各イオン種の粒子拡散係数の大小関係が変わらないならば、粒子拡散係数に対する水素同位体効果とH-Heイオン種効果とは逆の衝突周波数依存性を持つ可能性が示された。ヘリオトロンJにおける衝突周波数領域は、 $1/\nu$ 領域であり、粒子拡散係数は重水素プラズマの方が軽水素プラズマよりも小さかった。CHSの結果とあわせると、低衝突周波数領域で粒子拡散係数に水素同位体効果が現れると予測される。しかしながら、装置・加熱手法が異なるプラズマの比較であり実験結果も1点しかないので、ヘリオトロンJにおいても条件をそろえ衝突周波数スキャンを行う必要がある。

一方、対流速度については、LHDやCHSではイオン種効果、水素同位体効果が見られなかった。また、ヘリオトロンJの対流速度はLHD、CHSと比較して非常に大きな内向き対流となった。この原因として粒子輸送係数の径方向分布形状の仮定による影響があると考えられるため絶対値の比較は困難であるが、他装置と比較してわずかに水素同位体効果が見られた。今後、多チャンネル化を行い対流速度の径方向分布を考慮に入れた上で対流速度の絶対値の比較を行う必要がある。

本論文で得られた粒子輸送に対するイオン種効果をより明確にするためには、評価する衝突周波数領域を広げる必要がある。また、装置間比較の観点からは個々の装置で軽水素、重水素、ヘリウムプラズマの粒子輸送を比較する必要がある。さらに、乱流の成長率と粒子輸送の関連も調べられるべきと考えられる。そのために、ヘリオトロンJにおいては、

- 電子密度の径方向分布をより詳細に評価し、粒子輸送係数の径方向分布を評価。
- 磁場配位・加熱手法と水素同位体効果の関係の評価。

といったことを調べられることが期待される。さらに、様々な磁場配位へ拡張することにより、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位における水素同位体効果に関する知見が得られると考えられる。

一方、LHDにおいては、重水素プラズマの粒子輸送を評価することにより、粒子輸送に対するイオン種の質量依存性、電荷依存性が明確になる。そのため、

- 軽水素と重水素の比較を行い、ヘリオトロンJでの結果と比較する。
- 軽水素と重水素の比較を行い、今回評価した軽水素とヘリウムに対する実験結果と比較する。
- イオン温度計測を行い新古典輸送を数値計算で評価し、実験結果と差をとることで異常輸送を評価する。
- 衝突周波数と揺動強度の依存性を実験的に評価する。

といったことを調べられる必要がある。また、磁場配位によってイオン種が粒子輸送に与える影響が変わるか否かの議論や、装置間比較に関する研究も進むと考えられる。

参考文献

- [1] K. W. Gentle et al., Plasma Phys. Control. Fusion Vol.26, No.12 (1984)
- [2] K. Tanaka et al., Plasma Phys. Controlled Fusion 58 055011(2016)
- [3] K. W. Gentle et al., Nucl. Fusion, Vol. 32. No. 2 (1992)
- [4] M. Bessenrodt-Weberpals et al., J. Nucl. Mater. 196-198, 943-947 (1992)
- [5] T. Obiki et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1992 (Proc. 14th Int. Conf, Wurzburg, 1992) Vol.2, IAEA, Vienna 403.(1993)
- [6] F. Sano et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES 3 26 (2000)
- [7] T. Obiki et al., Nucl. Fusion 41 833 (2001)
- [8] M. Wakatani, Stellarator and Heliotron Devices (Oxford, New York, 1998).
- [9] O. Motojima, et al., Nucl. Fusion 40, 599 (2000).
- [10] 竹入康彦, 核融合科学技術委員会, 原型炉開発総合戦略タスクフォース 12月24日 (2015)
- [11] 核融合科学研究所ホームページ ” <http://www.nifs.ac.jp/> ”
- [12] T.Maekawa et al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 62, p. 304 (1991)
- [13] D. Reiter, P. Gogen, U. Samm, J. Nucl. Mater. 196198, 1059 (1992)
- [14] Shoji et al., J. Nucl. Mater. 363365, 827832 (2007)
- [15] S. Kobayashi et al., Proceedings of the 31th EPS Conference on Plasma Physics, London, P5-097 (2004)
- [16] D.B. Heifetz et al., J. Comp. Phys. 46, 309 (1982)

- [17] D.B. Heifetz, *Physics of Plasma-Wall Interactions in Controlled Fusion*, Eds. D.E. Post and R. Behrisch (Plenum Press, New York 1986) p.695.
- [18] N. Shi et al., *Rev. Sci. Instrum.* 85 053506 (2014)
- [19] N. J. Lopes Cardozo, *Plasma Phys. Control. Fusion* 37 799 (1995)