

氏 名 正木 伸吾

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2303 号

学位授与の日付 2022 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 中性粒子ビーム入射装置用負イオン源における水素同位体
効果

論文審査委員 主 査 森崎 友宏
核融合科学専攻 教授
津守 克嘉
核融合科学専攻 教授
小林 政弘
核融合科学専攻 准教授
中野 治久
核融合科学研究所 准教授
安藤 晃
東北大学 大学院工学研究科 教授
稲垣 滋
九州大学 応用力学研究所 教授

博士論文の要旨

氏 名 正木 伸吾

論文題目 中性粒子ビーム入射装置用負イオン源における水素同位体効果

中性粒子ビーム入射装置(NBI)は磁場によるプラズマ閉じ込め装置全般におけるプラズマ加熱, およびトカマク型閉じ込め装置における電流駆動の重要な役割を担っている. 中性粒子ビームは正または負イオンビームを所定のエネルギーまで静電加速した後, 閉じ込め磁場を通過できる中性粒子に変換する. 正イオンビームでは 100 keV 以上のビームエネルギー域で中性化効率が急激に減衰するため, 核融合プラズマ加熱に必要な高エネルギー・高電力ビーム入射には, 中性化効率がビームエネルギーに依らない負イオン型 NBI が必須となる.

将来の核融合炉プラズマでは, 核融合反応断面積の大きい重水素(D)と三重水素(T)による核融合反応が想定されている. 国際的に研究開発が進められている国際熱核融合実験炉(ITER)計画では, 重水素による負イオン型 NBI が用いられるように, 核融合炉を目指した大型プラズマ閉じ込め装置では高エネルギービーム入射が必須なため, 入射ビーム種を軽水素(H)から重水素に切り替える必要がある. 他方, ビーム源である重水素負イオン源では軽水素と比較して, 負イオンビーム電流の減少や, 負イオンと共に引き出される電子ビーム電流の増加といった現象が生じる. 特に, 過剰な電子ビーム電流は引出電極への熱負荷となり, 電極間のブレイクダウンや同電極の溶損に至るため, 重水素運転時におけるビーム入射電力向上の障害となっている. しかし, 上記の現象は軽水素と重水素の相違(同位体効果)に起因していると考えられる一方で, これまでその機構について, 負イオン源内部におけるプラズマの詳細な計測とその物理解釈がなされていない.

負イオンビームは, 負イオン源の放電容器中に生成されたプラズマから負イオンを多孔型電極によって静電的に引出・加速させることで形成される. そのため, 水素同位体による引出孔近傍, いわゆる負イオン引出領域における荷電粒子(負イオン, 正イオン, 電子)の空間分布の相違は, ビームの組成と分布に影響を及ぼす. また, 静的な空間分布以外に, 負イオン引出孔近傍での荷電粒子の運動もビーム特性に影響を与える. しかし, 個々の荷電粒子の運動を捉えることは不可能である. 一方, 巨視的な動的挙動を表す荷電粒子の流れにも同位体効果が現れると考えられる. 以上を踏まえて, 本研究では NBI 用負イオン源における同位体効果, 特に重水素運転時における最重要課題である電子ビーム電流増加問題の原因解明を目指し, 負イオン引出領域における荷電粒子の密度分布と, それらの流れにおける軽水素と重水素の相違について明らかにすることを目的とした.

まず, 負イオン引出領域における軽水素プラズマ中と重水素プラズマ中の負イオン密度の空間分布計測を行った. 局所的な負イオン密度は, プローブ計測より得られる電子密度を基に, 光脱離ラングミュアプローブ法によって得られる光脱離電流と組み合わせることで通常は導出する. しかし, NBI に用いられるセシウム(Cs)添加型負イオン源では, 電子密度が極めて低いイオン性プラズマが形成されるため, 電子より負イオンの密度が高くな

りプローブ計測による電子密度の評価が困難である．そのため，光脱離電流をキャビティリングダウン分光(CRD)法により得られた線平均負イオン密度で較正することで局所的な負イオン密度を導出した．その結果，重水素では軽水素と比較して，負イオン源の周辺領域まで広がった分布形状となっていることを見出した．また，CRD計測より，負イオンの線平均密度は，重水素では軽水素の1.3倍高いという結果が得られた．これらの結果より，軽水素に対する重水素での線平均負イオン密度の増加は，負イオン源周辺領域での密度増加に因るものであることを明らかにした．電子密度の分布計測に関しては，上記のようにCs添加型負イオン源ではプローブ計測による電子密度の評価が困難なため，電荷中性条件より正イオン密度と負イオン密度の差分から導出する必要がある．そのため，プローブ計測の正イオン飽和電流より正イオン密度の分布計測を行った．その結果，重水素での正イオン密度は軽水素に対して分布形状を変えずに1.6倍増加していることを見出した．また，正イオン密度と負イオン密度の分布を踏まえて電荷中性条件より電子密度分布を導出したところ，重水素では軽水素と比較して，負イオン源の中心付近で電子密度が2倍増加していることが明らかとなった．さらに，正イオン密度と負イオン密度の関係を調べた結果，負イオン密度は正イオン密度が低い領域では，軽水素と重水素共に正イオン密度に対して単調増加する傾向を示した一方，ある一定以上の正イオン密度の増加に対して飽和する傾向が明らかとなった．この結果より，軽水素と重水素における負イオン密度の分布形状の相違は，負イオン密度の正イオン密度に対するこの非線形依存性に起因する可能性を指摘した．また，負イオン源の放電容器とバイアス絶縁環の間にスペーサーフランジを導入することでプラズマ生成領域から拡散する正イオンが横切るフィルター磁場の磁力線を増加させ，負イオン引出領域における荷電粒子の密度計測を行った．その結果，正イオン密度と負イオン密度共に減少し，スペーサーフランジ非導入時と同様な負イオン密度の正イオン密度依存性が得られた．このことから，中性原子密度はスペーサーフランジ導入によって変化しないと考えられるため，負イオン生成の親粒子として中性原子より正イオンの方が支配的であるという可能性を指摘した．

次に，荷電粒子の流れ計測に向けて，方向性プローブを新たに設計・製作した．従来型の方向性プローブでは，4本の探針より得られた計測データを平均化することで探針の中心部における流れを導出していた．しかし，この手法では探針間の密度勾配や4本ある探針が異なる磁場領域に入ることにより，流れ計測に誤差が生じる可能性がある．この問題を解決するため，粒子の流れを遮蔽するフラップを単一探針の周囲で回転させながら計測することで流れを導出する新型方向性プローブを開発し，負イオン引出領域における軽水素プラズマ中と重水素プラズマ中の正イオンの流れ計測を行った．その結果，正イオンの流れ方向は軽水素と重水素で同一で，プラズマ生成領域から負イオン引出領域へ向かう一方，軽水素での流れの速さは重水素の約 $\sqrt{2}$ 倍であることを見出し，正イオンの流れの運動エネルギーは軽水素と重水素でほぼ同程度であることを明らかにした．また，計測した正イオンの流れの速度および正イオン密度より，軽水素プラズマと重水素プラズマ共に両極性拡散によって正イオンがプラズマ生成領域から拡散していることを示し，さらに重水素プラズマでは両極性拡散によって，負イオン引出領域における電子密度が増加している可能性を指摘した．

以上より本研究では，荷電粒子の密度分布計測および新たに開発した方向性プローブを

用いた荷電粒子の流れ計測より，負イオン源の運転ガス種を軽水素から重水素へ切り替えると，正イオン密度と負イオン密度が共に増加する一方で，正イオン密度の増加に対して負イオンの生成効率が低下するため，プラズマ生成領域から負イオン引出領域へ流入する正イオンに伴って流入する電子が増加することを明らかにした．その結果，負イオン引出領域における電子密度が増加し，電子ビーム電流が増加するという結論が得られた．

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 正木 伸吾Title
論文題目 中性粒子ビーム入射装置用負イオン源における水素同位体効果

大型核融合実験装置に閉じ込めるプラズマの加熱と電流駆動には、負イオン型中性粒子ビーム入射装置 (n-NBI) が必須となる。核融合炉を想定したプラズマ実験では、n-NBI による入射ビーム種として重水素を用いる。重水素を負イオンビームとして加速する場合、軽水素を加速する場合と比較して、負イオンビーム電流が減少する一方、負イオンビームに伴う電子ビーム電流の割合は増加する。このため重水素で高い負イオンビーム電流を得ようとするるとに伴う絶縁破壊の危険性も増加することから、負イオンビーム電力は制限せざるを得ない。従って、大電力 n-NBI を実現するためには、負イオン源内の正負イオンとともに、電子や中性粒子の挙動を包括的に理解する必要がある。

本研究は、n-NBI 用負イオン源において重水素ビームを加速する際、随伴電子電流が増加する原因を明らかにするとともに、ビーム引出領域内の荷電粒子の密度分布と「流れ」計測から、軽水素と重水素の相違が負イオン生成にもたらす効果（水素同位体効果）を解明することを目的としている。

先行研究で、負イオン源の動作ガスを軽水素から重水素に替えると、キャビティリングダウン(CRD)法で計測した線平均負イオン密度が、1.3 倍増加することが明らかになっている。この現象に対して出願者は、新たに開発した光脱離ラングミュアプローブを用いてビーム引出領域内における負イオンの密度分布計測を行った。その結果、負イオンの密度は、負イオン源中央部においては軽水素と重水素で大差は無いが、周辺部では重水素の方が高く、平坦な負イオン密度分布を形成していることが明らかになった。一方正イオン密度は、全領域で重水素の方が軽水素より約 1.6 倍高いため、重水素を用いた負イオン源中の電子密度は、軽水素を用いた負イオン源の約 2 倍高い値になることを示した。これらの知見から、出願者は重水素時の随伴電子電流の増加は、引出領域の電子密度の増加に起因していることを明らかにした。

負イオンの生成起源となる粒子(親粒子)に関する考察も行った。負イオンの親粒子は、その正イオンか中性原子のいずれかであるが、その質量数の違いが負イオン生成量に影響を与えると考えられている(同位体効果)。この問題を明らかにするために出願者は、負イオン源中に存在する負イオンの密度と正イオンの密度の相関を調べ、それが同位体間(軽水素と重水素)で異なるか否かを調べた。その結果、生成される負イオンと正イオンの相関関係に、同位体間で相違は存在しないことが明らかになった。親粒子を特定するために出願者は、正イオンは磁場の影響を受けるが中性粒子は影響を受けないという性質を利用した実験を行った。負イオン源内の負イオン生成部に流れ込むプラズマを制限する磁気フィルター(磁気フィルタ)の厚さを増加したところ、負イオン生成量は減少した。これは正イオンの流入量

が、磁気フィルターの影響で減少したことが要因であると考えられる。この実験結果により出願者は、負イオンの生成には、中性粒子より寧ろ正イオンが大きく関与している、という重要な結論を導いた。また出願者は、新型方向性光脱離ラングミュアプローブを新たに開発して荷電粒子の「流れ」分布を測定し、軽水素・重水素プラズマ共に両極性拡散によって引出領域に拡散していることも明らかにした。

本研究は、NBI用負イオン源における同位体効果、特に重水素運転時における電子ビーム電流増加の原因を、新たに開発した計測器を用いて荷電粒子の密度分布や流束分布を行って明らかにした。この成果は、今後のNBI用負イオン源開発に重要な指針を与え、核融合研究全体の発展に大きく貢献するものと期待される。

以上の研究成果について出願者は博士論文を執筆し、成果の一部は3編の筆頭著者論文として国際学術雑誌に掲載された。また、出願者は国際学会での3回のポスター発表と、国内学会での2回のポスター発表を行なっている。出願者による研究成果は、博士論文の内容に十分値するものであり、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な価値を有し、合格に値するものであると判定した。