

氏名(本籍)	いし かわ まさ お 石川正男(東京都)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第3110号
学位授与年月日	平成15年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	物理学研究科
学位論文題目	Study of Fast Ion Transport using Neutron Emission Profile Measurement on JT-60U (JT-60Uにおける中性子発生分布測定を用いた高速イオンの輸送に関する研究)
主査	筑波大学客員教授 工学博士 三浦幸俊
副査	筑波大学教授 理学博士 谷津潔
副査	筑波大学教授 理学博士 長照二
副査	筑波大学客員助教授 工学博士 藤田隆明

### 論文の内容の要旨

核燃焼プラズマにおいては、DT反応で生成された高速の $\alpha$ 粒子が、プラズマとのクーロン衝突によりプラズマを加熱する、いわゆる「 $\alpha$ 粒子加熱」が起こる。この「 $\alpha$ 粒子加熱」による自己点火を維持することが核融合炉の実現に向けて重要な課題である。しかし、高速の $\alpha$ 粒子は、クーロン衝突による加熱過程で減衰し速度がアルヴェン波の位相速度程度になると、アルヴェン波との共鳴的な相互作用を起こし、アルヴェン固有モード(AE)と呼ばれる電磁流体的な大域的モードを逆ランダウ減衰によって不安定にする可能性がある。この不安定性は、100kHz帯の大きな振幅の磁場揺動を伴い、逆にこの不安定性の駆動源であった $\alpha$ 粒子をプラズマ閉じ込め領域外に急速に放出してしまう可能性がある。このため $\alpha$ 粒子加熱が低下し、自己点火条件が維持されなくなるとともに、放出された高速の $\alpha$ 粒子が第一壁に大きな損傷を与える事が危惧される。このことから、大型トカマクでは中性粒子ビーム(NB)入射やイオンサイクロトロン波帯の高周波(ICRF)による加熱によって生成される高速イオンを利用して、アルヴェン固有モードを励起し、その影響を調べる研究が進められている。本論文では、(1)「中性子発生分布測定装置の開発」を行ない、これをJT-60Uトカマクの負イオン源中性粒子ビーム(N-NB)を用いたAE実験に適用し、(2)「中性子発生分布測定を用いた高速イオンの輸送研究」を行なった。

「中性子発生分布測定装置の開発」においては、6チャンネルのコリメータを縦列扇状に配置した大型中性子コリメータを設置し、中性子発生分布の測定装置を開発した。開発当初、検出器として、広く中性子計測に用いられているNE213有機液体シンチレータを用いていたが、この検出器は中性子だけでなくガンマ線にも感度を持つために、ガンマ線の除去なしに詳細な中性子の振る舞いを調べることはできなかった。そこで、この問題を解決するために、ロシアのTRINITY研究所で開発された「スチルベン中性子検出器」を初めて導入した。そして、カリフォルニウム( $^{252}\text{Cf}$ )中性子線源およびナトリウム( $^{22}\text{Na}$ )、コバルト( $^{60}\text{Co}$ )、セシウム( $^{137}\text{Cs}$ )等のガンマ線源を用いてその性能を調べた結果、十分なガンマ線弁別機能を有していることを確認した。さらに、日本原子力研究所東海研究所にある核融合中性子工学用中性子源(FNS)におけるDD反応による中性子照射実験において、JT-60Uの重水素プラズマ実験を模擬した性能試験を行ない、DD中性子に対する最適化を図り、実際のJT-60Uの実験において本検出器が十分に適用可能である事を示した。また、MCNP(A general Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport)と呼ばれるモンテカルロコードを用いて、真空容器、中性子コリメータアレイによる中性

子の散乱・減衰効果の評価を行ない、実際の測定値に対する補正計数を見積もった。そして、この「スチルベン中性子検出器」を、JT60-Uのプラズマ実験に適用し、得られた中性子発生分布は計算コードを用いたシミュレーション結果と良い一致を示すことを確認し、JT60-Uにおける中性子発生分布測定を確立させた。

「中性子発生分布測定を用いた高速イオンの輸送研究」においては、N-NB (397keV) を用いたJT60-UでのAE実験に、開発した中性子発生分布を初めて導入した。N-NB入射により、ALE (Abrupt Large-amplitude Event) と呼ばれる振幅の大きなバーストモードが発生した時には、顕著な中性子発生量の変化が見られた。中性子発生分布の測定では、ALE発生時に中心領域 (規格化小半径  $r/a < 0.34$ ) のチャンネルの信号が減少し、一方周辺領域 ( $r/a < 0.48$ ) のチャンネルの信号が増加する傾向が見られた。この時、中性子発生量の成分はビームイオンとバルクイオンによるビーム-サーマル成分が約90%、そしてビームイオン同士のビーム-ビーム成分が約10%とビーム成分が支配的である。そこで、この中性子発生分布の測定から、ALEによる高速イオンの輸送評価を行なった。具体的には測定された中性子発生分布の変化から、高速イオンの密度分布の変化を評価した。ただし、実際に測定で得られている中性子発生量は視線に沿った線積分値であるため、Abel変換を行ない、(A) 中性子発生量はビーム-サーマル成分のみである、(B) 高速イオンのエネルギー分布はStixの定常解に従う、(C) ALEによって影響を受ける高速イオンのエネルギー領域は、波と粒子との間の共鳴条件 (wave-particle resonance condition) を満たす、との仮定のもと、高速イオンの密度分布の変化を評価した結果、ALEによって中心領域 ( $r/a < 0.4$ ) の高速イオンの約20%が周辺領域に再分配され、その一部のみが損失するという結果を世界で初めて示した。

## 審査の結果の要旨

本研究では、高速イオンの輸送を調べる上で重要な測定装置である「中性子発生分布測定装置」の開発を行った。その過程で、「スチルベン検出器」のガンマ線と中性子との分離特性、絶対較正を行った。また、モンテカルロコードを用いて、真空容器、中性子コリメータアレイによる中性子の散乱・減衰効果の評価を行ない、実際の測定値に対する補正計数を見積もった。そして、JT60-Uのプラズマ実験で得られた中性子発生分布は、計算コードを用いたシミュレーション結果と良く一致していることを示し、JT60-Uにおける中性子発生分布測定を確立させた。このことは将来の核融合炉における中性子測定装置開発につながる有意義な成果であると評価される。

JT60-UにおけるN-NBを用いたAE研究では、開発した中性子発生分布測定装置を用いて高速イオンがバーストモードにより輸送される過程を評価し、バーストモードにより高速イオンが空間的に再分配されるが、大きく損失される訳ではないことを世界で初めて明らかにした。この研究の成果は、 $\alpha$ 粒子加熱による核燃焼プラズマの理解に向けて重要な研究であると評価される。

以上のように、本研究は、新しい測定装置の開発・確立と、未解明な物理現象の解明に貢献した研究成果をまとめたものと認められる。

よって、著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。