

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740359

研究課題名（和文） 重イオンビームプローブにおける多点同時計測器の研究開発

研究課題名（英文） Research and Development of Simultaneous Multipoint Analyzer for a heavy ion Beam Probe

研究代表者

宮田 良明 (MIYATA YOSHIAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・任期付研究員

研究者番号：40510029

研究成果の概要（和文）：高温プラズマ中の電位と密度を計測可能な重イオンビームプローブを用いて、プラズマ閉じ込めと関連があるプラズマ不安定性の成長、減衰過程のメカニズムを詳細に解明するために、空間二点同時計測可能な改良型分析器の開発、設置した。設置された改良型分析器の性能評価を行い、開発課題を十分に満たす性能が確認され、電位と密度の空間二点同時計測及び高精度局所電場計測に成功した。

研究成果の概要（英文）：The novel analyzer which can measure the space simultaneous multipoint has been developed and established to clarify the mechanism of growth and decay process of plasma instability related to the plasma confinement using a heavy ion beam probe which can measure the potential and density in the high temperature plasma. We evaluated the performance of established novel analyzer and confirmed the totally satisfying performance required for the development subject. It was successful to measure the space simultaneous multipoint of potential and density, and local electric field with absolute accuracy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学、プラズマ科学

キーワード：プラズマ計測、重イオンビームプローブ、多点同時計測法、静電揺動

1. 研究開始当初の背景

(1) タンデムミラー型閉じ込め装置 GAMMA 10 では磁場に加え、電位・電場を形成して効率の良いプラズマ閉じ込めを形成し、「核融合実用に必要不可欠で未解決な課題である、電位形成並びに電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明」を目的に研究を推進している。これは、電子サイクロトロン共鳴により加熱した電子流を端部に少量逃がす

ことで、プラズマ中に残る正電荷のイオンによる正電位を容易に生成、制御可能である特長を最大限に活用している。本研究では、装置に依らず普遍的な「電位形成並びに電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明」の本格的研究に備え、精密電位分布計測において既の実績のあるビームプローブに独自の改良を加えることで、コアプラズマ内の電位並びに密度、更にはプラズマ揺動の空間分布時間発展同時計測が可能で、高精度且

つ高信頼性を持つ、世界に先例のない計測システムを開発する。

(2) GAMMA10 に既設のビームプローブは金の中性粒子ビームをプラズマに入射し、プラズマの中で電離が進んだイオンを取り出し入射粒子とのエネルギー差からポテンシャルエネルギーである電位を計測できる。本方式はLi等を用いる計測器より、軌道積分効果が少なく、揺動などの高精度の要求される計測に向いている。本測定器を密度計測に用いる際に生じる問題点は、ビームがプラズマ中で減衰を受け、検出電流が微弱になることが挙げられる。この欠点を克服するために、高感度かつ、検出電流を増倍する能力をもつマイクロ・チャンネル・プレートを利用したビーム検出器の開発を行った。一方、プラズマ閉じ込めの評価に直接繋がる、輸送損失現象を引き起こす密度揺動と電位揺動の位相差計測は、まだ系統的に調べられてはおらず、確立された計測法はない。この位相差計測を実際に確立するべく、GAMMA10 において、既設の検出器から計測されている、揺動位相差に強く依存して励起されるドリフト波揺動並びにそれに起因する輸送損失が生じているプラズマについて本ビームプローブを用いて密度と電位の揺動の位相差測定を行った。更に、電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明のため、プラズマ揺動の空間分布時間発展同時計測を目的とした改良型分析器の開発が必要不可欠である。これまでのビームプローブでは、コアプラズマ中の任意一点しか計測することができず、電場計測法として、①入射ビーム角度変化により、ショット毎に計測位置を変更、②周期的な入射ビーム角度変化により、1 ショット内で計測位置を変更、していたが、局所電場、揺動解析の観点から困難であった。そこで、本研究では同時多点計測可能な改良型分析器の開発に至った。

(3) これまでの研究で、ビームプローブにおいてドリフト波揺動を多数観測しており、密度、電位揺動、並びにその位相差計測から径方向粒子束の存在を観測している。このドリフト波揺動に起因する径方向粒子束の存在と同時に、プラズマ閉じ込めの指標であるプラズマの蓄積エネルギーである反磁性量が周期的に大幅な増減を示し、径方向粒子束とプラズマ閉じ込めの関連が示唆される。以上のような結果から、ドリフト波揺動の成長、減衰過程、及び揺動による径方向粒子束によるプラズマ閉じ込めへの効果を研究している。また、上記(1)のような位置づけにおける「電位形成並びに電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理機構の究明」を目的とし、電位形成による揺動へ与える効果を研究している。これまでの研究で、電子サイクロトロン共鳴加

熱により、軸方向への閉じ込め改善と共に径方向に電場が形成され、ビームプローブで観測されている揺動強度が変化することを観測している。更に加熱パターンの変化、入射電力の増減により揺動へ与える効果が異なり、任意に電位分布を制御できる特徴を生かし、電位による密度、電位揺動、並びにその位相差に与える効果を研究している。

2. 研究の目的

ドリフト波揺動はプラズマ中に存在する圧力、密度勾配により駆動される普遍的な不安定性であり、その制御、特性の解明は核融合実用に必要不可欠で、未解決な課題である。これまでの研究では、ビームプローブにおいてドリフト波揺動に起因する径方向粒子束が観測され、プラズマ閉じ込めとの関連が示唆されている。特に、イオンサイクロトロン共鳴加熱による高温プラズマ生成時に、周期的なプラズマの蓄積エネルギーである反磁性量の大幅な増減から、特異なドリフト波揺動の成長、減衰過程が推測される。この成長、減衰過程のメカニズムを詳細に解明するためには、任意点の密度、電位揺動並びにその位相差計測と共に、改良型分析器を用いた空間分布時間発展同時計測による径方向位置に対する揺動伝搬を観測する必要がある。これにより、実験的な解析からドリフト波揺動に起因する径方向粒子束とプラズマ閉じ込めとの関連の定量的な議論、更にはドリフト波揺動の成長、減衰過程と位相差との関連を解明する。更に、空間分布時間発展同時計測を用い、電位形成時における高精度な局所電場計測、及び揺動の空間構造解析から電位形成と揺動への効果を定量的に解明する。

3. 研究の方法

(1) 既に設計が完了し、論文に掲載されている二点時間発展同時計測可能な改良型分析器を製作、設置する。これまでの設計から、既存のGNBP システムの高信頼性、高精度計測を最大限に活用しつつ、早期に二点時間発展同時計測を実現させるには、分析器入射スリットの改良が必要となる。また、既存の32 チャンネルビーム検出器の全チャンネルを最大限に活用するため、微小電流を増幅可能な高性能アンプ、及び揺動計測に最適なデータ取り込み系の構築を行う。設置された改良型分析器において、コアプラズマの電位を高精度絶対値計測可能にするため、校正実験を行い二点時間発展同時計測に適用する。まず、局所的な二点間の電位計測から高精度に局所電場を算出し、外部から電位/電場制御された時間

変化を求め、揺動に与える効果について定量的な検討を行う。また、二点におけるドリフト型揺動の強度、位相から波数の算出を行い、ドリフト波揺動の成長、減衰過程を実験的に解明する。更に、GNBPの特長である任意点の密度、電位揺動測定、更にそれらの位相差に起因する径方向粒子束を観測し、粒子束の強度、方向からプラズマ閉じ込めに与える効果を議論する。

(2) 初年度に導入した二点同時時間発展計測可能な改良型分析器を用いて、局所的な電場時間計測、及び外部からの電位/電場制御による揺動に与える効果を二点径方向位置における位相差に着目し、解明する。同時に、初年度の二点同時時間発展計測可能な改良型分析器の導入により得られた研究結果から、重点的な計測が必要な多点計測範囲の導出、更には工学的に改良型分析器内部でのビーム軌道の制御技術、ビーム検出器から得られたビーム電流量分布からの新たな電位算出法を基に大規模な多点時間発展同時計測可能な分析器の開発を行う。また、大規模な多点時間発展計測可能な改良型分析器には、多数の入射スリット、及び高精度なビーム検出器の導入が必要不可欠であり、初年度の研究結果から得られた分析器内部でのビーム軌道の制御技術、新たな電位算出法を基にこれまでにない独創的なコンパクト、且つ高信頼性の改良型分析器の設計、製作を行う。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① コアプラズマ中の高精度な電位/電場計測に適した能動的粒子計測法の重イオンビームプローブを用いて、プラズマ不安定性の一種である静電揺動やMHD揺動の成長、減衰過程のメカニズムを詳細に解明するため、空間二点同時計測可能な改良型分析器の設計、開発を行った。平成22年度において、既存の重イオンビームプローブの高信頼性、高精度計測を最大限に活用しつつ、早期に空間二点同時計測を実現させるため、空間二点同時計測可能な改良型分析器を製作、設置した(図1)。設置された改良型分析器の性能評価のため、較正実験を行い、開発課題を十分に満たす性能が確認され、空間二点同時計測に成功した(図2)。

② 平成23年度において、空間二点同時計測による電位/電場計測の精度向上に向け、検出器において検出されるビーム分布形状を計算機シミュレーションから予測し、ビーム分布を最適な形状にフィッティングする新たなデータ処理法を考案した。これにより、電位絶対値算出に必要なビーム分布の同定精度が改善

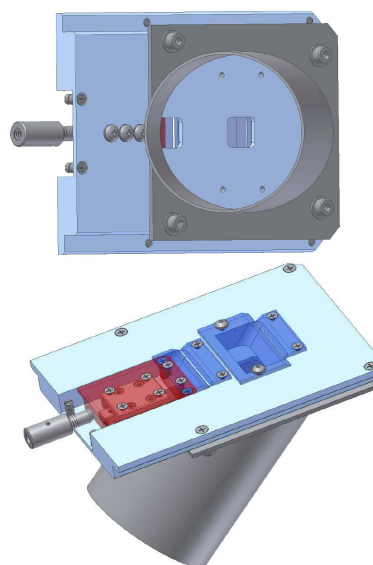


図 1. 空間二点同時計測可能な改良型分析器の概念図

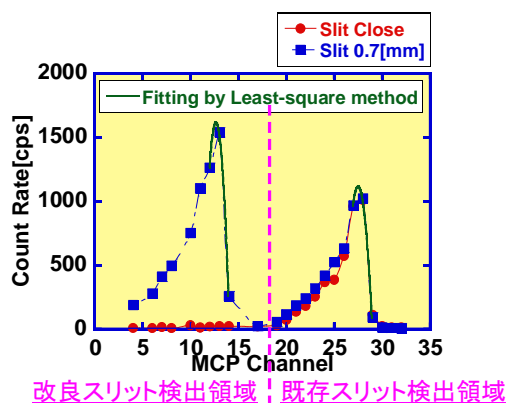


図 2. 改良型分析器において空間二点に対応した 2 つのイオンビーム分布の計測に成功 (横軸: 検出器チャンネル, 縦軸: イオンビーム量)

し、電位/電場の算出誤差が低減され、電位/電場計測精度が向上した(図3)。また、空間二点同時計測を用いて、コアプラズマ中の静電揺動の径方向位相差分布を評価し、揺動伝搬機構を解析した。以上の空間二点同時計測手法の精度向上により、高精度な径方向電場分布計測及び径方向位相差計測を実現し、電場形成による輸送低減の物理機構の究明に大きく貢献した(図4)。

③ 平成24年度において、詳細な較正実験を基に信号解析法を改善し、局所電場計測及び電位と密度揺動間の位相差計測の精度を向上させた。これらにより実現された高信頼性、高精度な局所電場及び空間位相差計測を用いて径方向損失の要因となり得る静電揺動の磁力線方向の伝搬機構及び電位/電場形成との相関を解析した(図5)。また、これまでの二点時間発展同時計測可能な改良型分析器の開発

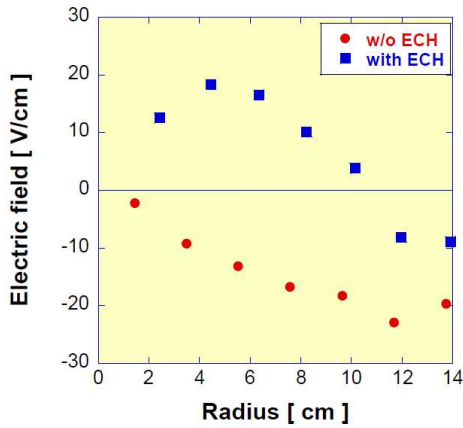


図 3. 改良型分析器で計測された局所電場分布から軸方向閉じ込め改善時 (with ECH) に正の電場が形成されることが判明 (横軸: 径方向位置、縦軸: 電場強度)

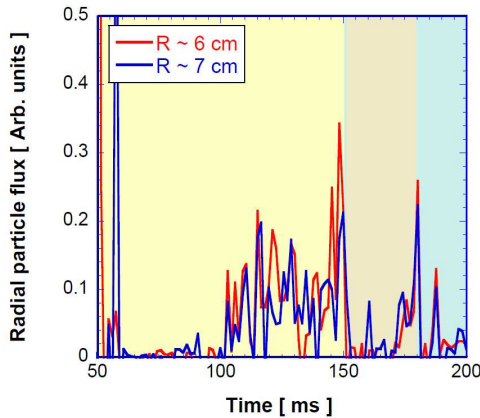


図 4. 径方向位置 R~6cm と R~7cm における径方向拡散粒子の時間変化から軸方向閉じ込め改善時 (150-180ms) に拡散粒子量が大幅に減少することが判明 (横軸: 時間、縦軸: 拡散粒子束)

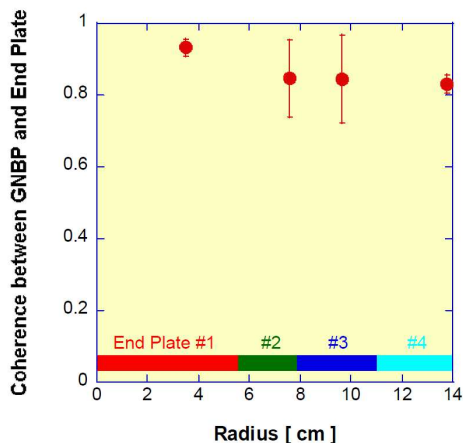


図 5. 主閉じ込め領域と装置端で観測された電位揺動のコヒーレンス分布から静電揺動の磁力線方向への伝搬を解明 (横軸: 径方向位置、縦軸: コヒーレンス)

で培われたイオンビーム制御技術を基に、大

規模な多点時間発展同時計測可能な新型分析器を設計した。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

詳細な3次元ビームシミュレーションから設計された空間二点同時計測可能な改良型分析器の十分な性能が確認され、本研究で培われたイオンビーム制御技術を用いることで、より高精度且つ高信頼性の重イオンビームプローブの開発が可能になった。また、本研究で初めて採用された「1つの検出器で空間二点同時計測」方式はコンパクトな分析器を実現でき、更に高精度揺動解析に必要な位相差計測に最適なため、国内外のプラズマ実験装置に重イオンビームプローブを導入し、プラズマ閉じ込め劣化を引き起こす揺動の成長、減衰過程のメカニズムを解明する事ができる。

(3) 今後の展望

プラズマ閉じ込め劣化を引き起こす揺動の成長、減衰過程のメカニズムを詳細に解明するためには、任意点の密度、電位揺動並びにその位相差計測と共に、改良型分析器を用いた空間分布時間発展同時計測による径方向位置に対する揺動伝搬を観測する。これにより、実験的な解析からドリフト波揺動に起因する径方向粒子束とプラズマ閉じ込めとの関連の定量的な議論、更にはドリフト波揺動の成長、減衰過程と位相差との関連を解明する。更に、空間分布時間発展同時計測を用い、電位形成時における高精度な局所電場計測、及び揺動の空間構造解析から電位形成と揺動への効果を定量的に解明する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 著者名: M Yoshikawa, M. Sakamoto, Y Miyata, M Aoyama, M Hirata, M Ichimura, T Imai, T Kariya, J Kohagura, R Minami, Y Nakashima, T Numakura, R Ikezoe, K Ichimura, K Furutachi, H Nakanishi and Y Nagayama, 論文標題: “Simultaneous Evaluation of Potential fluctuation from Core plasma to End Region in GAMMA 10”, 雑誌名: Nuclear Fusion, 査読の有無: 有, 発行年: 2013年, 掲載決定済
- ② 著者名: Yoshiaki MIYATA, Masayuki YOSHIKAWA, Mizuki SAKAMOTO, Masanori MIZUGUCHI, Fumiaki YAGUCHI, Masato

AOYAMA, Yoshiaki TANEMURA and Tsuyoshi IMAI, 論文標題：“First Results of Simultaneous Multipoint Plasma Potential Measurements by the use of Gold Neutral Beam Probe”, 雑誌名：Plasma and Fusion Research, 査読の有無：有, 巻：6, 最初と最後の頁：1202090-1 - 3, 発表年：2011年, DOI: 10.1585/pfr.6.1202090

- ③ 著者名：Yoshiaki Miyata, Masayuki Yoshikawa, Youhei Oono, Fumiaki Yaguchi, Makoto ICHIMURA, Tatsuya Murakami and Tsuyoshi Imai, 論文標題：“CORRELATION ANALYSIS OF ELECTROSTATIC FLUCTUATION BETWEEN CENTRAL AND END-CELLS IN GAMMA 10”, 雑誌名：Transaction of Fusion Science and Technology, 査読の有無：有, 巻：59, 1T, 最初と最後の頁：108 - 111, 発表年：2011年, http://www.ans.org/pubs/journals/fst/a_11585
- ④ 著者名：Yoshiaki MIYATA, Masayuki YOSHIKAWA, Fumiaki YAGUCHI, Makoto ICHIMURA, Tatsuya MURAKAMI and Tsuyoshi IMAI, 論文標題：“Correlation between Low-frequency Fluctuations and Plasma Stored Energy in GAMMA 10”, 雑誌名：Plasma and Fusion Research, 査読の有無：有, 巻：5, 最初と最後の頁：033-1 - 3, 発表年：2010年, DOI: 10.1585/pfr.5.033

[学会発表] (計2件)

- ① 発表者名：宮田 良明 他, 発表標題：“GAMMA 10におけるセントラル部とエンド部間の静電揺動の相関解析”, 学会等名：第27回プラズマ核融合学会年会, 発表年月日：2010年11月30日 - 12月3日, 発表場所：北海道・札幌市
- ② 発表者名：Yoshiaki Miyata 他, 発表標題：“CORRELATION ANALYSIS OF ELECTROSTATIC FLUCTUATION BETWEEN CENTRAL AND END-CELLS IN GAMMA 10”, 学会等名：8th International Conference on Open Magnetic systems for Plasma Confinement, 発表年月日：2010年7月5日 - 7月9日, 発表場所：ロシア・ノボシビルスク

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮田 良明 (MIYATA YOSHIAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核

融合研究開発部門・任期付研究員

研究者番号：40510029