

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
研究期間：2006~2009
課題番号：18360445
研究課題名 (和文) 高ベータヘリカルプラズマにおけるビーム圧力のMHD平衡、安定性に対する影響
研究課題名 (英文) Effects of beam pressure on the MHD equilibria and stabilities in high beta helical plasmas
研究代表者
渡辺 清政 (WATANABE KIYOMASA)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：00249963

研究成果の概要 (和文)：「粒子束、熱流束測定プローブ」を設計・製作し、実験に適用することにより、再突入高速イオンによる熱流束分布を計測した。高速イオンの実空間速度分布関数を評価する数値計算コードを開発し、高ベータヘリカル磁場配位において中性粒子ビーム入射加熱に起因するビーム圧力分布と圧力非等方度を評価した。モンテカルロコードで評価した圧力非等方度を使って校正した磁気計測器により、LHD 実験における圧力非等方度を系統的に計測し、それと磁気軸位置移動量の関係をいくつかの理論モデルと比較した。

研究成果の概要 (英文)：A probe to measure the particle and heat flux was designed and installed in a helical device, and it is applied to measure the heat flux from the reentering fast ions. The distribution function analyzing code of the fast ions in the high beta helical plasmas was developed, and it is applied to the evaluation of the beam pressure profile and its anisotropy induced by the neutral beam injection. The dependence of the magnetic axis shift on the pressure anisotropy was evaluated by the magnetic probe signal based on the calibration with the Monte-Carlo method, and its results are studied through the comparison with some theoretical models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18 年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
19 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
20 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
21 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：プラズマ・核融合、ビーム圧力、MHD 平衡・安定性、ヘリカル、磁場閉じ込め、非等方圧力

1. 研究開始当初の背景

大型ヘリカル装置・LHD(核融合科学研究所)では、経済的な核融合炉と同等の高ベータ値(プラズマ圧力と磁気エネルギーの比)運転が実現されており、核融合炉を模擬する高ベータ研究が進んでいる。LHD を代表とするヘリ

オトロン方式(ヘリカル型の一つで特に連続ヘリカルコイルで閉じ込め磁場を発生させている炉方式)では、プラズマ周辺部に「磁気丘」と呼ばれる圧力駆動型 MHD 不安定性にとっては好ましくない閉じ込め領域が存在しており、ベータ値が高くなるとこの領域が MHD

不安定となり、ある値以上ベータ値が上昇しなくなることが懸念されていた。しかしながら、LHDの高ベータ実験では、懸念されていた破壊的なMHD不安定性は観測されていない。一方、LHDの高ベータ運転は低磁場(0.5T以下)、比較的低密度(結果的に高電子温度)、接線中性粒子ビーム加熱(低磁場でも高速イオンの閉じ込め性能が良い)で達成されており、全プラズマ蓄積エネルギーに対するビーム圧力の割合がかなり高く、かつ強い圧力非等方度の存在が指摘されており、このような状況は核融合炉心プラズマ状況とは大きく異なる。

このような状況下でのビーム圧力の正確な評価法とそれを考慮したMHD平衡の同定法の確立とそれに基づくMHD不安定性の研究は、LHDで観測された高ベータ実験成果に基づく核融合炉性能の予測精度の向上の観点から、非常に重要な研究課題と位置づけられている。

2. 研究の目的(申請時)

ヘリカル型核融合炉においてビーム圧力(熱化イオンに比べ10倍以上高いエネルギーを持つイオンの圧力)がMHD平衡、安定性に与える影響を明らかにし、問題点があればその対策を講ずることが本研究課題の最終目標である。本研究課題では、大型ヘリカル装置・LHD(核融合科学研究所)で実験、計測を行い、数値計算コードの予測との比較を通じて、以下の課題の解決を目指す。

(1) 中性粒子ビーム入射(NBI)に起因したビーム圧力の評価法の確立、(2)ビーム圧力及びそれに起因した非等方度を考慮したMHD平衡の同定法の確立、(3)高ベータプラズマにおける「再突入」高速イオンの定常ビーム圧力に占める割合の評価、(4)ビーム圧力自身及び非等方度の圧力駆動型MHD不安定性に与える影響の評価。

3. 研究の方法

(1) 低磁場運転のヘリカルプラズマでは、高速イオンの軌道は磁気面から大きくズレることが予測され、この領域のビーム圧力の正確な評価のためには、最外殻磁気面外を運動する通過高速イオン(通過型再突入高速イオン)の閉じ込め性能を知る必要がある。強磁場領域の最外殻磁気面外の「高速イオンの粒子束、熱流束計測プローブ」を製作し、大型ヘリカル装置(LHD)実験で計測を行うことにより、通過型再突入高速イオンの閉じ込め性能に関するデータを収集する。

(2) 再突入高速イオンも考慮可能な高速イオンの実空間速度分布関数を評価する数値計算コードを開発し、これを有限ベータLHD配位に適用することにより、LHDの高ベータ放電における(NBI)に起因するビーム圧力の

空間分布、圧力非等方度分布を評価する。得られた結果を(1)の結果と比較することにより、開発したコードの妥当性を検証する。

(3) スイス、ローザンヌプラズマ物理研究所が主体となって開発された非等方圧力版3次元MHD平衡解析コード(ANIMEC)をLHDの有限ベータ平衡解析に適用し、圧力非等方度に対して、典型的なMHD平衡量である磁気軸位置移動量や反磁性計測における圧力非等方度の関係に対するデータを取得する。

(4) (2)で開発したコードで評価した圧力非等方度データベースを元に、反磁性磁束・サドルループ磁束の計測信号の校正を行い、中世粒子ビーム入射加熱LHDプラズマの圧力非等方度の計測を行う。一方、電子温度分布計測から磁気軸位置移動量の圧力非等方度依存性を調べる。得られた結果を(3)やいくつかの理論予測モデルと比較し、(3)の非等方圧力版3次元MHD平衡解析手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 「通過型再突入高速イオン測定プローブ」を製作し、それをLHD実験へ適用し以下の結果を得た。最外殻磁気面外の再突入軌道上の熱負荷分布を最外殻磁気面からの距離の関数として表示した結果を図1に示す。図1により、熱負荷は最外殻から離れるにつれて指数的に減少し、その減少率の異なる領域が少なくとも2箇所存在することが確かめられた。また、最外殻からより遠い領域の減少率の特長は、近い領域のそれより約2.5倍長いことがわかった。さらに、熱負荷分布の運転磁場強度依存性やNBIの入射視線依存性も取得した。

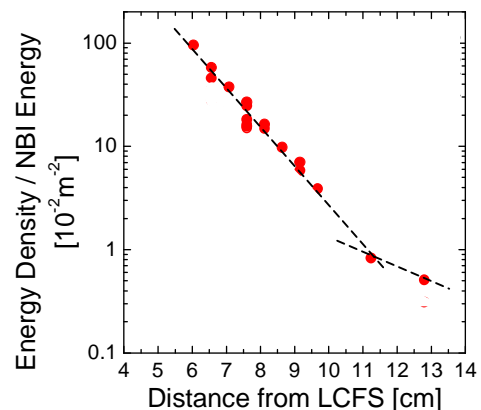


図1 最高プラズマ蓄積エネルギーを達成したLHD配位において、ほぼ磁力線に順方向に入射されたNBIに起因する高速イオンの熱負荷分布を最外殻磁気面(LCFS)からの距離の関数として表示。

(2) 再突入高速イオンも考慮可能な高速イオ

ンの実空間速度分布関数を評価する数値計算コード(MORH)を開発し、LHD 高ベータ配位においてビーム圧力の評価を行い、以下の結果を得た(図2)。加熱効率が高いと予測される磁場と同じ向きに入射した中性粒子ビームが入射された低磁場(LHD の高ベータ実験が行われる運転磁場、0.5T)放電の場合、軌道と磁気面のズレの効果で高速イオンの密度分布の尖塔化が和らぐことがわかった。また、再突入粒子の効果も考慮するか否かで、周辺領域はもちろん、磁気軸付近のビーム圧力分布も大きく影響(絶対値で 1~2 割程度)を受けることがわかった。圧力非等方度は、軌道と磁気面のズレの効果で、中心付近の圧力非等方度は弱まり、周辺付近の圧力非等方度は強まることわかった。また、再突入粒子の効果も考慮することで周辺付近の圧力非等方度は弱まることわかった。さらに、周辺付近の磁場に平行方向に対する垂直方向のビーム圧力比は磁場が低いほど大きくなり、低磁場ほど非等方度が高くなる可能性がわかった。

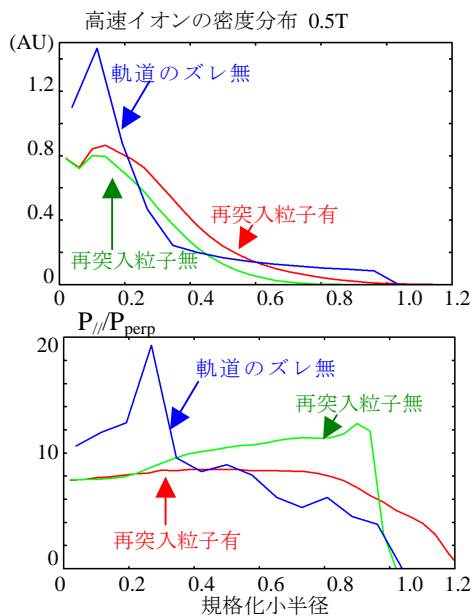


図 2 高ベータ配位における高速イオン密度分布(上)と圧力非等方度分布(下)の計算例。磁場配位はLHDで、磁場強度は0.5T。高速イオンは、ほぼ磁力線の順方向に入射。

(3) モンテカルロコードで評価した圧力非等方度を使って校正した磁気計測器により、LHD 実験における圧力非等方度を系統的に計測した。モンテカルロコードで評価した圧力非等方度を使った校正は、その校正曲線が幅広い圧力非等方度領域において分散が小さいことが妥当性の根拠となった。代表的なMHD 平衡量である磁気軸位置の大半径方向

移動量(電子温度分布の最大値から評価)を得られた圧力非等方度の関数として整理し、いくつかの理論モデルと比較した結果、Hitcho らの理論予測と矛盾しないところがわかった(図3)。しかしながら、その他の磁気軸シフト量は全プラズマ蓄積エネルギーに依存するというモデルも、Hitcho らの理論予測と同程度の精度で矛盾しないことがわかり、今後この差異を明確化する必要があることがわかった。

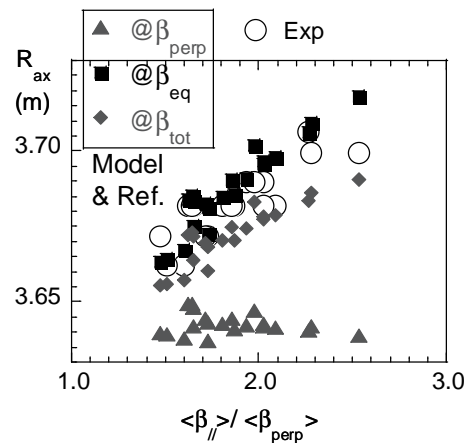


図 3 磁気軸位置移動量の圧力非等方度に対する依存性。反磁性計測による平均ベータ値はほぼ 1%と一定。真空時の磁気軸位置は 3.6m。 $\beta_{total}=(2p_{\perp}+p_{\parallel})/3B^2$, $\beta_{\perp}=p_{\perp}/B^2$, $\beta_{\parallel}=(p_{\perp}+p_{\parallel})/2B^2$ [W.N.G Hitcho, Nucl. Fusion (1983)]. p_{\perp} , p_{\parallel} は磁場に垂直、平行方向の圧力。

(4) 磁気面の存在を仮定した非等方圧力版 3次元MHD 平衡コード(ANIMEC)をLHD の非等方圧力時のMHD 平衡を評価できるように整備した。非等方圧力の入力モデルとして、2重マクスウェル分布と接線入射NBI のフォッカープランク定常解に基づくモデルを適用した。また、得られたLHD の非等方圧力MHD 平衡配位における交換型MHD 不安定特性とバルーニング不安定特性を数値的に調べ、以下の結果を得た。交換型MHD 不安定性は磁力線方向の圧力非等方度が強くなるにつれ、安定化される。一方、バルーニング不安定性は圧力の非等方度の影響をあまり受けない。

(5) 今後の展望
申請時の研究計画のうち、個々の研究については以下のような大きな進展があった。①再突入領域の高速イオンの熱流束計測が可能になった。②高速イオンの実空間速度分布関数の理論予測が可能になった。③非等方圧力を考慮したMHD 平衡、安定特性の数値解析が可能になった。しかしながら、以上の成果

を有機的に組み合わせた研究手法が未確立である。具体的に未確立の研究手法は以下の通りである。①非等方圧力平衡コードに基づく磁気計測器の校正とそれに基づく観測された圧力非等方度の評価とその磁気軸移動量依存性の整理、及び数値計算コードとの比較。②実空間速度分布関数評価コードと矛盾のない非等方圧力の分布入力条件の同定。③再突入粒子の計測結果に基づく速度分布関数評価コードの妥当性の検証。

個々の研究成果は上がっているので、1-2年で「ヘリカル型核融合炉においてビーム圧力がMHD平衡、安定性に与える影響を明らかにし、問題点があればその対策を講ずる」という申請時の最終目標に迫れる可能性が高い。

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 16 件)

- ① K.Y. Watanabe, Y. Suzuki, S. Sakakibara et al.: "CHARACTERISTICS OF MHD EQUILIBRIUM AND RELATED ISSUES ON LHD", Fusion Science & Technology, 査読有, 50 巻, 7 号, 2010 年.
- ② Ryosuke SEKI, Yutaka MATSUMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Kiyomasa WATANABE, Kiyotaka HAMAMATSU and Masafumi ITAGAKI: "Monte-Carlo Study Based on Real Coordinates for Perpendicularly Injected High-Energy Ions in the LHD High-Beta Plasma", Plasma and Fusion Research, 査読有り, 5 巻, 2010 年, 014_1-3.
- ③ L. Brocher, W.A. Cooper, J.P. Graves, G.A. Cooper, Y. Narushima and K.Y. Watanabe: "Drift stabilization of ballooning modes in a high- β LHD configuration", Nuclear Fusion, 査読有, 50 巻, 2010 年, 025009_1-7.
- ④ W.A. Cooper, S.P. Hirshman, P. Merkel, J.P. Graves, J. Kisslinger, H.F.G. Wobig, Y. Narushima, S. Okamura, K.Y. Watanabe: "Three-dimensional anisotropic pressure free boundary equilibria", Computer Physics Communications, 査読有, 180 巻, 2009 年, 1524-1533.
- ⑤ K. Nagaoka, M. Isobe, K. Toi, K. Goto, T. Ito, Y. Todo, M. Osakabe, S. Ohshima, A. Shimizu, A. Fujisawa, H. Nakano, Y. Takeiri, K.Y. Watanabe, T. Akiyama, Y. Yoshimura, C. Suzuki, S. Nishimura, K. Matsuoka, S. Okamura and the CHS experimental group, "Local observations of fast ion responses to energetic particle modes using a directional probe in the Compact Helical System (CHS)", Nuclear Fusion, 査読有, 48 巻, 2008 年, 084005_1-9.

[学会発表] (計 15 件)

- ① K.Y. Watanabe et al.: "Anisotropic Pressure Effect on the MHD Equilibrium in LHD", 19th International Toki Conference, 2009/12/9, Toki, Japan.
- ② R. Seki, Y. Matsumoto, Y. Suzuki, K.Y. Watanabe et al.: "Monte-Carlo Study of Perpendicularly Injected High-Energy Particles using Real Coordinate System in LHD", 17th International International Stellarator/Heliotron Workshop, 2009/10/14, Princeton, USA.
- ③ K.Y. Watanabe et al.: "Recent study of the high performance confinement and the high beta plasmas on the Large Helical Devices", 18th International Toki conference, 2008/12/9, Toki, Japan.
- ④ 渡邊 清政 他: 「LHDにおける圧力非等方度のMHD平衡への影響」, プラズマ・核融合学会年会, 2007年11月27日, イーグレ姫路.
- ⑤ K.Y. Watanabe et al.: "Confinement study on the reactor relevant high beta LHD plasmas", Joint Conference of 17th International Toki Conference and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop, 2007年10月18日, セラトピア土岐.

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡邊 清政 (WATANABE KIYOMASA)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 00249963

(2)研究分担者

榊原 悟 (SAKAKIBARA SATORU)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 90280594
(H18->H19:研究連携者)
長壁 正樹 (OSAKABE MASAKI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 90280601
(H18->H19:研究連携者)
永岡 賢一 (NAGAOKA KENICHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 20353443
(H18->H19:研究連携者)
鈴木 康浩 (SUZUKI YASUHIRO)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 20397558
(H18->H19:研究連携者)
松本 裕 (MATSUMOTO YUTAKA)

北海道大学・工学研究科・助教
研究者番号：40360929
(H18->H19:研究連携者)
後藤 基志(GOTO MOTOSHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
助教
研究者番号：00290916
(H19:研究連携者)

(3)連携研究者

榊原 悟 (SAKAKIBARA SATORU)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
准教授
研究者番号：90280594
長壁 正樹(OSAKABE MASAKI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
准教授
研究者番号：90280601
永岡 賢一(NAGAOKA KENICHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
助教
研究者番号：20353443
鈴木 康浩(SUZUKI YASUHIRO)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
助教
研究者番号：20397558
松本 裕(MATSUMOTO YUTAKA)
北海道大学・工学研究科・助教
研究者番号：40360929
後藤 基志(GOTO MOTOSHI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
助教
研究者番号：00290916
関 良輔(SDEKI RYOUSKE)
北海道大学・工学研究科・博士後期課程
研究者番号：80581066

研究協力者

W.A.Cooper
ローザンヌプラズマ物理研究所(スイス)・
主任研究員
V.Pustovitov
クルチャトフ研究所(ロシア)・主任研究員