

令和元年5月23日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06939

研究課題名(和文) 低周波波動印加による超高ベータトラスの加熱および電流駆動法の開発

研究課題名(英文) Heating and current drive in an extremely high-beta torus due to excitation of low-frequency wave

研究代表者

浅井 朋彦 (ASAI, Tomohiko)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：00386004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：極限的に高いベータ値(～100%)を最大の特徴とする磁場反転配位(Field-Reversed Configuration: FRC)は、C-2U(米・TAE社)において、NBIによる維持で2msを超える粒子閉じ込めが実現されたことから世界的に注目を集めた。一方でその高ベータ特性のため、NBI以外の加熱・電流駆動の手段がなく、新たな手法の確立なしには核融合炉心とはなり難いと考えられる。本研究では、FRC内部を加熱可能な低周波波動印加について、そのターゲットとなるFRCを生成するための衝突合体生成装置を開発し、低周波波動励起を行うことで、その伝播特性や加熱・電流駆動の可能性を実験により評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トカマク等とは異なる方式で核融合によるエネルギー生産を目指す核融合ベンチャーが、北米や欧州を中心に多数設立され、ITER建設の遅れとも相まって世界的に注目を集めている。このうち、複数の企業が極限的なベータ値(～100%)を持つFRC方式を採用しているが、上記のような極めて特異的な性質のため、NBI以外の効果的な加熱・電流駆動法が確立していなかった。本研究では、この極めてベータ値が高い、すなわち高密度・低磁場特性を持つFRCの中心加熱法として、低周波磁場励起による加熱法の効果を実験的に評価した。また、実験の対象となるFRC衝突合体実験装置FAT-CMを開発し、日本国内における実験拠点を確立した。

研究成果の概要(英文)：A Field-Reversed Configuration (FRC) has the highest beta value close to 100%. It had been known as a pulse high-density experiment in the history of fusion development. However, the FRC has gotten attention because of the demonstrated long lived FRC due to NBI at TAE technologies Inc., California, USA. On the other hand, except for NBI, heating and current drive methods are limited in a FRC because of its high-beta nature. In this work, excitation of low-frequency wave has been demonstrated as a new technique to heat the core region of FRC. The experiments have been performed newly developed FRC collisional merging device of FAT-CM at Nihon University.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：高ベータ 磁場閉じ込めプラズマ 磁場反転配位 コンパクトトラス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

極限的に高いベータ値（ $\sim 100\%$ ）を最大の特徴とする磁場反転配位（Field-Reversed Configuration: FRC）は、TAEテクノロジー社（米国・加州）のC-2U装置において、これまでのパルス動作ではなく、中性粒子ビーム入射（NBI）による維持で2msを超える粒子閉じ込めが実現されたことから、世界的に注目を集めた。また、トカマク、ヘリカル等とは異なる方式で核融合によるエネルギー生産を目指す核融合ベンチャーが、北米や欧州を中心に多数設立され、ITER建設の遅れとも相まって世界的に注目を集めている。このうち、複数の企業が極限的なベータ値（ $\sim 100\%$ ）を持つFRC方式を採用しているが、上記のような極めて特異的な性質のため、NBI以外の加熱・電流駆動の手段が極めて限られており、新たな手法の確立なしには、核融合炉心とはなり難いと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、FRC内部を加熱可能な低周波波動加熱および電流駆動法について、実験・理論の両面からその理解と確立を目指して実施された。波動加熱やNBIなどの手法による中心加熱の効率が低下すると考えられる高ベータ状態における加熱・電流駆動法の開発は、トラス系共通の課題であり、広く関連分野に寄与するものと期待される。

3. 研究の方法

逆磁場テータピンチFRC装置FATを改造することで、超音速で2つのプラズモイドを衝突合体させることで高性能なFRCを生成可能なFRC衝突合体生成装置FAT-CMを開発、本実験を実施した。アンテナはFRC閉じ込め領域の両端部に対称に取り付けられており、移送時のFRCとは干渉せず、衝突合体後大きく膨張したFRC内に低周波波動を励起させる。励起・伝播した波動は、プラズマ内部に挿入された磁気プローブアレイで観測され、また加熱の効果などはイオンドップラー分光法などによって確認された。

4. 研究成果

(1) 本研究では、まず波動励起実験の対象となる衝突合体によるFRC生成を実現するため、既存の逆磁場シータピンチ型FRC装置FATを改造、アルヴェン速度を超える200-300km/sの速

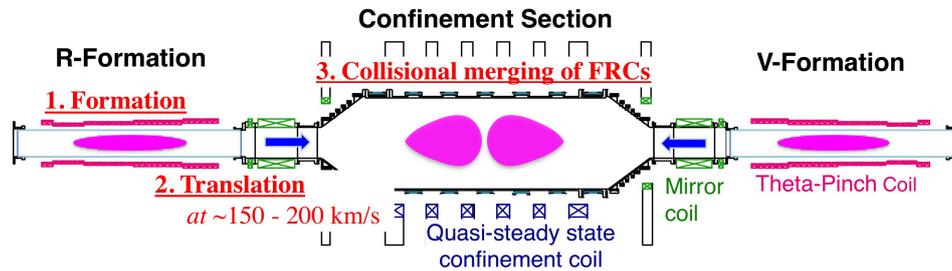


図1 FAT-CM装置概観図

度で2つのFRCを移送・衝突合体させるための装置改造を行った。FAT-CMと名付けられた本装置は、全長約2mの2つの逆磁場シータピンチ型生成部と、ステンレス鋼製で準定常閉じ込め磁場コイルを持つ閉じ込め領域からなる（図1）。

生成された2つの磁化プラズモイドは閉じ込め部中央で衝突し、この際に生じる衝撃波加熱や緩和過程を経てFRCへと緩和する。波動励起に用いるアンテナは閉じ込め領域両端に設置されているが、通過時にはプラズモイドの径は十分に細くアンテナとは干渉せず、衝突合体後に加熱・膨張することで、アンテナと強くカップリングし、FRC内における波動励起が可能となる。

図2に衝突合体生成されたFRCの半径、捕捉磁束および線積分電子密度の時間発展を示す。生成されたFRCは、衝突合体によってその半径が4~5倍程度に膨張し、またそれに合わせて密度も増大する。また、捕捉磁束が大きく増大することも特徴である。

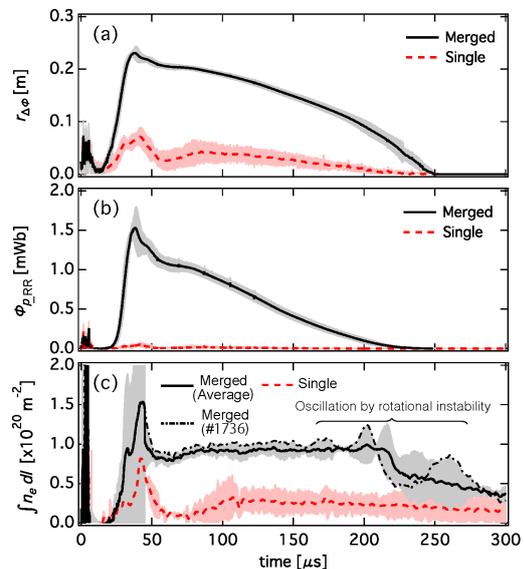


図2 合体生成FRCの諸パラメータの時間発展

(2) FRC の衝突合体やアンテナにより励起される振動磁場とそれに対する FRC の応答は、LamyRidge code を用いて軸対称抵抗性 MHD シミュレーションにより評価した (図 3)。移送・衝突合体される FRC は、実験による観測結果と同様に衝突により大きく膨張し、磁気リコネクションなどの過程を経て、1つの FRC へと緩和する。また、外部閉じ込め磁場と同程度の振動磁場を、波動励起用のアンテナで印加しても、巨視的な安定性を保つことが確認された。

(3) 衝突・合体時の FRC の振る舞いや波動の励起・伝播過程、それによる加熱の効果を評価するため衝突時の特性を評価する手段の一つとして、高速応答型の中性子ディテクタの開発を進めた。光電子増倍管 (H6614-70・浜松ホトニクス) をディテクタに用い、また高速応答性の高いプラスチックシンチレータを採用して構築されたシステムにより、 ~ 10 マイクロ秒程度の時間応答を持つ中性子ディテクタの開発に成功した。これを用いて FRC プラズマのインパクト時に生じる D-D 核融合反応による中性子発生を確認した。また、プラズマ中のイオン、中性粒子のエネルギーおよび流速を観測するため、ドップラー分光システムの開発を進めた。移送に伴う磁気圧差による膨張のため密度がおよそ一桁低下する移送部において観測を行うため、石英製ライトガイドとのマッチングを最適化したコリメータを設計、ドップラー分光計測系を構築した。本システムを用いて衝突合体前後のイオン温度の変化を観測、衝撃波や波動印加による加熱メカニズムの実験的検証が進んだ。

(4) 衝突合体生成された FRC において低周波波動の伝播の様子を図 4 に示す。この実験では、FRC 外部で遮断されず内部まで伝播可能と考えられる 50kHz \sim 100kHz 帯域の振動磁場を印加、励起された波動の伝播や減衰の様子を内部磁気プローブアレイにより観測した。この実験の結果、励起された波動を FRC のセパトトリックス内部に伝播させ、それを観測することに成功した。また、大域的なプラズマの応答から、加熱に伴うと考えられる体積の増大などを観測した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① [Tomohiko Asai](#), [Tsutomu Takahashi](#), [Junichi Sekiguchi](#), Daichi Kobayashi, Shigefumi Okada, Hiroshi Gota, Thomas Roche, [Michiaki Inomoto](#), Sean Dettrick, Yung Mok, Michl W Binderbauer, Toshiki Tajima and [Toshiki Takahashi](#), “Collisional merging formation of a field-reversed configuration in the FAT-CM device”, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 59, 056024 (2019)
- ② Akiyoshi Hosozawa, [Tomohiko Asai](#), [Tsutomu Takahashi](#), [Junichi Sekiguchi](#), Kouji Hirohashi, Shigefumi Okada, Hiroshi Gota, Thomas Roche, [Michiaki Inomoto](#) and [Toshiki Takahashi](#), Collisional Merging of Field-Reversed Configurations in the FAT-CM Device Form Targets for the Excitation of Low-Frequency Waves, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 14, 2402041 (2019)
- ③ Takahiro Urano, [Toshiki Takahashi](#), Akiyoshi Hosozawa, [Tomohiko Asai](#) and Shigefumi Okada, “Hybrid Simulation Study on Anisotropic Response of Ions to a Low-Frequency Wave in a Field-Reversed Configuration”, Plasma and Fusion Research, 査読有, 14, 1203064 (2019)
- ④ Takahiro Urano, [Toshiki Takahashi](#), Akiyoshi Hosozawa, [Tomohiko Asai](#), Shigefumi Okada, “Hybrid Simulation of a High-Beta Linear Plasma Column Applied with a Low

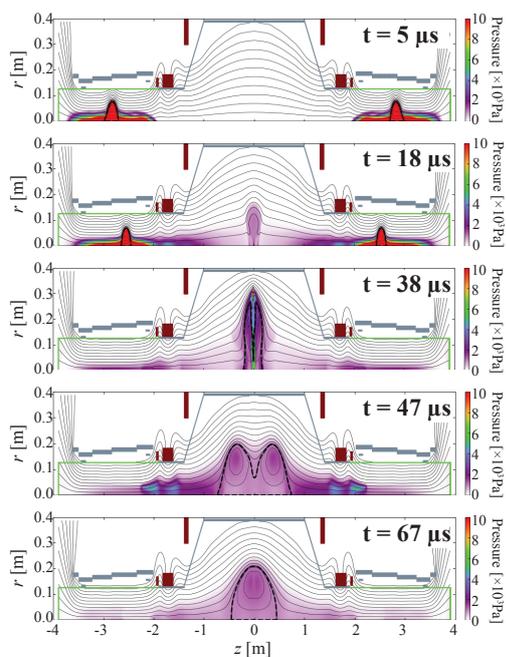


図 3 LamyRidge code による軸対称 MHD シミュレーションの結果の一例

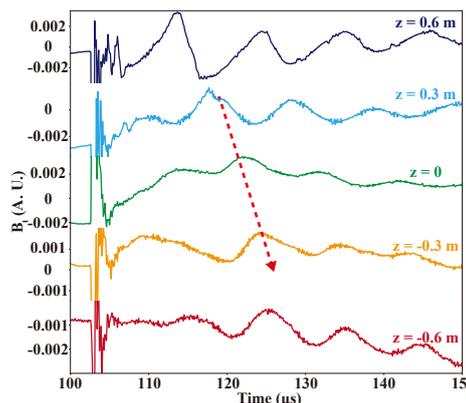


図 4 セパトトリックス内部における低周波波動の伝播の様子

- Frequency Wave”, Plasma and Fusion Research , 査読有, Vol. 14, 2403022 (2019)
- ⑤ A. Hosozawa, J. Sekiguchi, T. Asai, T. Takahashi, Application of a Hall sensor for pulsed magnetic field measurement in the FAT-CM FRC experiments“ Review of Scientific Instruments , 査読有, Vol. 89, 10J120 (2019)
- ⑥ H. Gota, J. Ishiwata, F. Tanaka, A. Hosozawa, T. Asai, Ts. Takahashi, J. Sekiguchi, T. Roche, T. Matsumoto, S. Dettrick, Y. Mok, M. W. Binderbauer, and T. Tajima, “Internal magnetic field measurements of translated and merged field-reversed configuration plasmas in the FAT-CM device, Review of Scientific Instruments , 査読有, Vol. 89, 10J114 (2019)
- ⑦ Fumiyuki Tanaka, Tomohiko Asai, Junichi Sekiguchi, Tsutomu Takahashi, Junpei Ishiwata, Takahiro Edo, Naoto Ono, Keisuke Matsui, Shintarou Watanabe, Daiki Hishida, Daichi Kobayashi, Yousuke Hirose, Akiyoshi Hosozawa, Yung Mok, Sean Dettrick, Thomas Roche, Hiroshi Gota, Michl W. Binderbauer and Toshiki Tajima, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 13 (2018)

〔学会発表〕 (計5件)

- ① 細澤明好, 浅井朋彦, 高橋努, 関口純一, 小林大樹, 飯嶋祐佳, 巽ありさ, 岡田成文, 郷田博司, Thomas Roche, 井通暁, 高橋俊樹, 低周波振動磁場への FRC プラズマの応答, 第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会 (2018)
- ② 廣橋光始, 長田昌之, 関口純一, 浅井朋彦, 高橋努, 分割型 Sin-Cos プローブによる磁場反転配位プラズマのトロイダルモード解析, 第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会 (2018)
- ③ 廣瀬陽介, 年木健, 関口純一, 浅井朋彦, 高橋努, 衝突合体 FRC 生成における衝突速度の制御, 第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会 (2018)
- ④ T. Asai, J. Sekiguchi, T. Takahashi, Y. Nagayama, S. Okada, H. Gota, T. Roche, S. Dettrick, M.W.Binderbauer, T. Tajima, M. Inomoto, T. Takahashi, Collisional Merging Formation of A Field-Reversed Configuration in the FAT-CM Device, US-Japan Workshop on Compact Tori (2018)
- ⑤ T. Asai, J. Sekiguchi, T. Takahashi, J. Ishiwata, N. Ono, F. Tanaka, A. Hosozawa, D. Kobayashi, S. Okada, H. Gota, T. Roche, S. Dettrick, Y. Mok, M. W. Binderbauer, T. Tajima, M. Inomoto, and T. Takahashi, Collisional Merging of a Field-Reversed Configuration in the FAT-CM Device, 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2018) (2018)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：井 通暁

ローマ字氏名：(INOMOTO, Michiaki)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院新領域創成科学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：00324799

研究分担者氏名：高橋 俊樹

ローマ字氏名：(TAKAHASHI, Toshiki)

所属研究機関名：群馬大学

部局名：大学院理工学府

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：10302457

研究分担者氏名：関口 純一

ローマ字氏名：(SEKIGUCHI, Junichi)

所属研究機関名：日本大学

部局名：理工学部

職名：助手

研究者番号 (8 桁)：40755419

研究分担者氏名：高橋 努

ローマ字氏名：TAKAHASHI, Tsutomu

所属研究機関名：日本大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50179496

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。