

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21868

研究課題名(和文)磁場中に高速生成されたプラズモイドの自己組織化的配位形成の観測

研究課題名(英文)Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：2つの磁化プラズモイドを超音速・超アルヴェン速度で衝突合体させた後、自己組織的にFRC様配位が形成される様子が観測された。この実験では、2つのプラズモイドを生成後、外部磁気圧により加速・移送され、閉じ込め領域の中央で衝突させる。衝突の際、プラズモイドは破壊的な擾乱を受け、FRCの特徴である高速トロイダル流と反転磁場構造を失い、秩序的構造を持たない磁化プラズマとなる。しかし、数十μ秒以内にトロイダル方向にスピニングアップし、極限的にベータの高いFRCが形成される様子が観測された。この結果は、磁気ヘリシティや一般化ヘリシティの保存という枠組みに収まらない「FRCの自己組織化的生成」を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型で効率が高い核融合炉心や中性子排出のない先進燃料核融合の実現には、高ベータ化が必須であり、これを極限まで突き詰めると、プラズマ電流と閉じ込め磁場が完全に直交し、トーラス中心に穴が開いていないFRCとなる。その特異な磁場配位のため、局所はその大部分で1を超え、したがってイオンは磁化していないなど、多くの点で他の磁場配位と異なる性質を示し、同時にその緩和のメカニズムには未解明な点も多い。本研究成果は、このFRCの堅固な安定性を示す結果であり、米国の民間企業などでも開発が開始されたFRCによる超高ベータ核融合炉心の実現に貢献する結果である。

研究成果の概要(英文)：Self-organized field-reversed configuration-like (FRC) formation was observed after the super-sonic/Alfvénic collisional merging of two FRCs. In this experiment, two FRCs were generated initially in two separate field-reversed theta-pinch (FRTP) type formation regions. Those two formation regions are coaxially connected to opposite ends of a cylindrical confinement chamber. The formed FRCs are oppositely-translated and collide in the middle of the confinement chamber at super-sonic/Alfvénic velocity. During the collision, the merged plasmoid experiences destructive disturbance and loses its fast toroidal flow and characteristic FRC property of having a field-reversed magnetic configuration to become a magnetized plasma without ordered structure. After this dynamic collision, a magnetic configuration of FRC with fast toroidal rotation is self-organized within a few tens of microseconds. This observation indicates robustness of the extremely high-beta, simple magnetic configuration.

研究分野：核融合学，プラズマ物理学

キーワード：磁場閉じ込めプラズマ 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマを含む磁場閉じ込めプラズマは、磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics: MHD) によりその巨視的振る舞いが検証され、理想的には安定性や緩和機構などの検証が可能であるとされてきた。理想 MHD においては、磁化プラズマは、磁気ヘリシティが保存された状態のもとで磁気エネルギーを最小にする配位に緩和するとされ、 $\mathbf{J} \times \mathbf{B} = 0$ となる無力配位への緩和が実験によっても確認されている。

しかし、FRTP 法で生成される FRC は、その生成過程においてアルヴェン時間オーダーの激しい圧縮・収縮、衝撃波加熱などを受け、また、生成時に生じる電子電流のシアによりトロイダル磁場が形成されるが、最終的にゼロヘリシティでベータ値 $\sim 100\%$ の FRC へと緩和する。近年、日本大学などで開始された FRC 衝突合体生成では、アルヴェン速度や音速を超える秒速 100 $\sim 250\text{km}$ で衝突した磁化プラズモイドが、磁気リコネクションなどの過程を経て合体、サイズやパラメータの大きく異なる FRC へ再緩和する過程が観測されている。この結果は、MHD 緩和理論の範囲外にある FRC が、スフェロマックと同様の極めてロバストな安定性を持つことを示している。最近では、一様な強磁場を持った水素プラズマ中に配置された固体ペレットに高強度レーザーを照射することで、動的過程を経て FRC 様の配位への緩和が起こるというシミュレーション結果も報告されており、これらの結果から、FRC の自己組織化的形成過程の理解が既存の MHD の拡張につながるとの着想に至った。

2. 研究の目的

磁場中に急峻なプラズマの圧力勾配 ∇p を形成すると、反磁性電流 \mathbf{J} が駆動され、 ∇p と磁気圧が釣り合う ($\nabla p = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$)。これは流れのない流体 MHD (磁気流体力学) の圧力バランスであり、 \mathbf{J} と \mathbf{B} が完全に直交する極限では、全磁気圧がプラズマの熱圧力と釣り合い、その比 (ベータ値と呼ばれる) は 100% となる。核融合炉心プラズマを目指したトーラス状の磁場閉じ込め方式において、このような極限的な圧力バランスを持つ磁場配位が存在することが古くから知られている。この磁場構造は磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) と呼ばれ、その配位は閉じた磁力線 (ポロイダル磁場) と、それと直交する反磁性方向のプラズマ電流のみで形成される (図 1)。

この磁場配位は磁気ヘリシティ ($K = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \, dv$) がゼロであり、 K が保存する

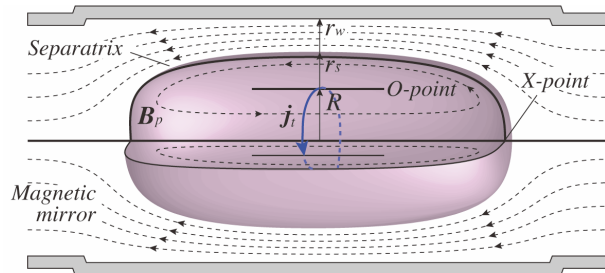


図1 FRC の磁気配置の模式図。FRC は、イオン反磁性方向 (トロイダル電流方向) に強いイオンフローを持ち、その速度はアルヴェン速度に達する。

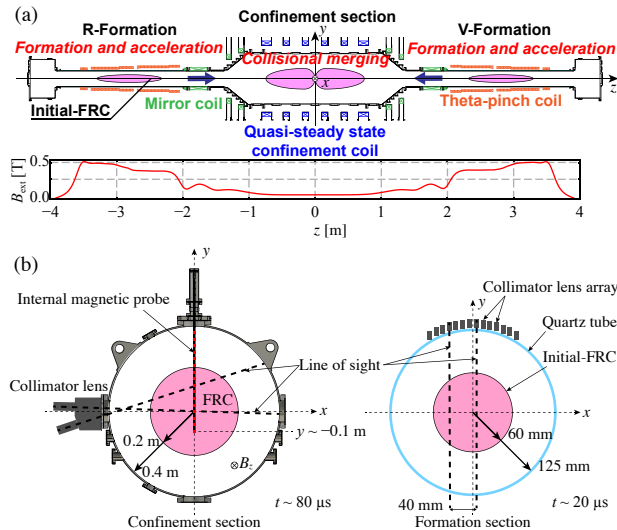


図2 (a) FAT-CM 装置と外部ガイド磁場の軸方向プロファイルの模式図、(b) IDS と内部プローブアレイが設置された面の断面図。

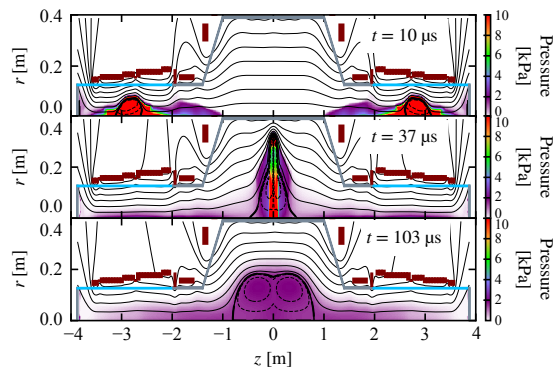


図3 FRC の衝突合体過程を示す 2 次元 MHD シミュレーションの結果。2 つの FRC は閉じ込め領域に加速され、装置の中間断面で衝突する。

下で磁気エネルギー最小の状態に緩和する、いわゆる MHD 緩和理論では FRC への緩和は記述できない。一方で、実験で生成される FRC は、MHD 不安定性の成長の特性時間であるアルヴェン時間の数十～数百倍にわたり、制御なく安定に存在することがわかっている。

MHD では、磁力線の凍りつきを前提に磁化プラズマの様々な振る舞いを記述するが、上記の現象はイオンのサイクロトロン周期より高速な動的過程により生じているものと考えられる。本研究では、定常磁場中にサイクロトロン周期やアルヴェン時間といったスケールよりも速くプラズマ圧力の勾配を形成し、その緩和過程を観測することで、MHD で記述できない極限的な平衡配位への緩和過程を実験的に検証することを目的とする。

3. 研究の方法

研究代表者のグループにおいて開発した磁化プラズモイド衝突合体実験装置 FAT-CM (図2) では、2つの FRTP 生成部において FRC を形成、ガイド磁場の勾配によりアルヴェン速度 (100km/s 程度) より速い秒速 100-300km に加速し閉じ込め領域へ移送・衝突させることが可能である。本研究では、高速な圧力勾配の形成などを経た磁化プラズマの緩和のメカニズムを観測するため、内部磁気プローブアレイ、可視光トモグラフィシステム、多チャンネルイオンドップラー分光システムなどを開発、これらを用いて衝突合体後の磁場構造の再形成過程を観測した。

特に FRC では、他のトロイダル系プラズマと異なり、アルヴェン速度に達する極めて強い反磁性方向のトロイダルフローが自発的に形成されることが知られている。衝突合体実験における磁場構造の自己組織化的形成過程では、理想 MHD では考慮されないフローが大きな役割を担っていることが考えられ、本研究では、生成後のフローの時間発展に着目、その精密な計測を試みた。また、実験結果と比較、検証するため、MHD シミュレーションによりその緩和過程を予測した。

4. 研究成果

図3は、今回の実験条件に合わせて計算された、FRC の大域的な挙動を示す典型的なシミュレーション結果である。生成領域で形成された2つの磁化プラズモイドは、生成直後から外部磁気圧により加速される。生成部から射出された FRC は閉じ込め部に入ると、体積が 10 倍以上に膨張し、FRC は閉じ込め部の中間面 ($z=0$) 付近で衝突、その後、動的/破壊的な合体過程を経て静的な平衡状態に到達する。

図4は、この衝突合体されたプラズモイドの内部磁場プロファイルを示したものである。図4(a)にはポロイダルおよびトロイダル磁場の時間発展を示す等高線図を、図4(b)には $t=40\mu\text{s}$ と $80\mu\text{s}$ における径方向プロファイルを示す。それぞれ、2つのプラズモイド

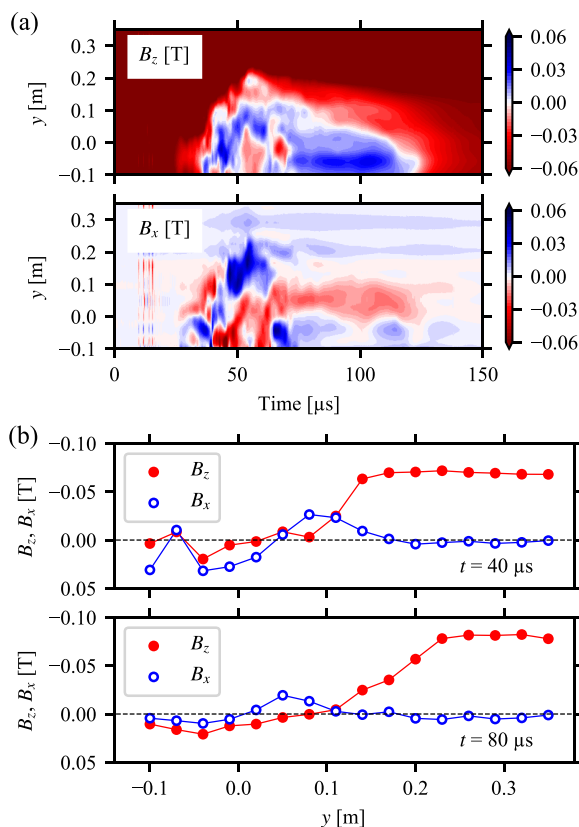


図4 (a) FAT-CM の中央面に設置した内部磁場プローブアレイで測定された衝突・合体 FRC プラズマの磁場 (B_z と B_x) の径方向分布の等高線図、(b) $t=40$ と $80\mu\text{s}$ (それぞれプラズモイドの衝突前後と静止期)における径方向磁場分布。

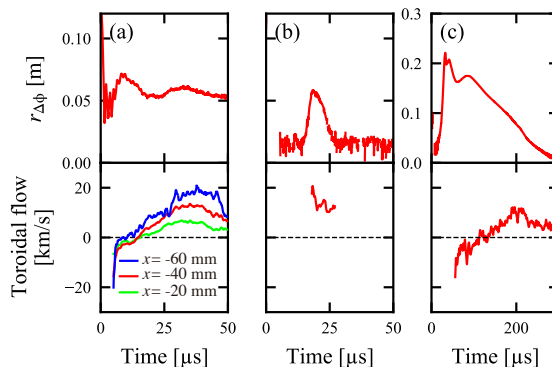


図5 トロイダル流とセパトトリックス半径の時間発展。(a) 生成領域内に閉じ込められた FRC。(b) 衝突合体時の生成部出口付近と(c) 閉じ込め領域での様子。

が衝突した時刻と、合体後に形成される FRC の平衡状態に相当する。

衝突合体 FRC では、図 4 に示すように、衝突時に強い B_x が観測されたことから、2 つのプラズモイドが持つヘリシティが完全にはキャンセルされていないことがわかる。この段階では、超音速・アルヴェン速度衝突による破壊的な擾乱により、合体したプラズモイドの磁場構造は維持されていない。衝突・合体後、十数マイクロ秒の緩和過程を経て、図 4 (b) に示すように、 B_z プロファイルにはっきりとした磁場反転構造が確認できる。

図 5 は、イオンドップラー分光法 (IDS) で測定したトロイダル流速の時間変化である。IDS のコリメータは生成部の出口 ($z=2$ m) と中央断面近傍 ($z=0.3$ m) に設置された。生成領域の FRC は、生成直後にトロイダル方向にスピニアップする。図 5 (b) に示すように、磁化プラズモイドが形成部の出口付近を通過するとき、トロイダル流は既に $v_t = 15$ km/s (角速度 $\omega \sim 4 \times 10^5$ rad/s) に達している。しかし、このトロイダル角運動量は超音速衝突・合体過程では保存されない。FRC の「再構築」直後 (約 80 μ s), FRC は生成部内に閉じ込められた FRC と同様の「常磁性」トロイダル流を持つ (図 5 (a)). しかし、その後、図 5(c)に示すように、FRC は再びイオン反磁性方向へスピニアップする。流速は衝突後約 200 μ s で 10km/s 以上に達する。

これらの観測結果は、超音速／アルヴェン速度衝突により、一度 FRC の特性を失った磁化プラズモイドが、自己組織的に配位を再形成すること、また、FRC の特徴の一つである強いトロイダルフローは、FRC の特有の反転磁場構造と強く関係していることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Tomohiko Asai, Daichi Kobayashi, Taichi Seki, Yasuaki Tamura, Tatsuhiro Watanabe, Naoto Sahara, Tsutomu Takahashi, Jordan Morelli, Hiroshi Gota, Thomas Roche, Richard Magee, Michl Binderbauer, Toshiki Tajima, Michiaki Inomoto and Toshiki Takahashi	4. 巻 61
2. 論文標題 Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096032 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac189c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Daichi KOBAYASHI, Tomohiko ASAI, Tsutomu TAKAHASHI, Junichi SEKIGUCHI, Hiroshi GOTA, Sean DETTRICK, Yung MOK, Michl BINDERBAUER, Toshiki TAJIMA and Toshiki TAJIMA	4. 巻 15
2. 論文標題 Evaluation of Translation Velocity Control by Auxiliary Coils for the Collisional Merging Formation of FRCs by 2-D Resistive MHD Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402020 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2402020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Taichi SEKI, Daichi KOBAYASHI, Rika SASAKI, Asuna MINAMIGI, Tomohiko ASAI, Hiroshi GOTA, Thomas ROCHE, Tadafumi MATSUMOTO, Toshiki TAKAHASHI, Naoki TAMURA, Yoshiro NARUSHIMA	4. 巻 15
2. 論文標題 Behavior of a Tracer-Containing Compact Toroid in a Transverse Magnetic Field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402069 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2402069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Daichi Kobayashi and Tomohiko Asai	4. 巻 28
2. 論文標題 Experimental evidence for super-Alfvenic acceleration of the field-reversed configuration due to a magnetic pressure gradient	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022101 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0026146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taichi SEKI, Tomohiko ASAI, Daichi KOBAYASHI, Ryotaro YANAGI, Hiroshi GOTA, Thomas ROCHE and Tadafumi MATSUMOTO	4. 巻 16
2. 論文標題 Acceleration of Magnetized Plasmoid by Pulsed Magnetic Coil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401020 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2401020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Daichi KOBAYASHI, Tomohiko ASAI, Tsutomu TAKAHASHI, Arisa TATSUMI, Naoto SAHARA, Tatsuhiro WATANABE, Daisuke HARASHIMA, Hiroshi GOTA and Thomas ROCHE	4. 巻 16
2. 論文標題 Energy Flow in the Super Alfvénic/Sonic Collisional Merging Process of Field-Reversed Configurations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402050 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2402050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Daichi KOBAYASHI, Tomohiko ASAI, Tsutomu TAKAHASHI, Junichi SEKIGUCHI, Hiroshi GOTA, Sean DETTRICK, Yung MOK, Michi BINDERBAUER	4. 巻 15
2. 論文標題 Evaluation of Translation Velocity Control by Auxiliary Coils for the Collisional Merging Formation of FRCs by 2-D Resistive MHD Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402020 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2402020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 浅井朋彦, 関太一, 小林大地, 高橋努, 稲垣滋, 井通暁, 高橋俊樹, 岸本泰明
2. 発表標題 超音速プラズモイド衝突過程における構造遷移
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井朋彦
2. 発表標題 FRC の超音速衝突衝突と自己組織化的配位形成
3. 学会等名 令和3年度 核融合科学研究所共同研究研究会「自己組織化過程を用いた高ベータトールスプラズマの性能改善」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井朋彦, 小林大地, 関太一, 田村康明, 高橋努, 高橋俊樹, 井通暁, 稲垣滋, 岸本泰明
2. 発表標題 衝突合体実験におけるFRCの自己組織化的形成
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林大地, 浅井朋彦, 高橋 努, 渡邊達大, 原島大輔, 巽 ありさ, 佐原直人, 三浦圭介, 飯嶋祐佳, 山中拓人, 明石和久, 田村康明, 染谷 紘希, 郷田博司, Thomas ROCHE
2. 発表標題 極限的高ベータプラズモイドの超音速・超アルヴェン速度衝突による衝撃波励起
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関 太一, 浅井朋彦, 小林大地, 柳 凌太郎
2. 発表標題 パルス磁場印加による磁化プラズモイドの加速実験
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐原直人, 渡邊達大, 小林大地, 小川 洋, 高橋 努, 浅井朋彦, Richard Magee
2. 発表標題 高ベータプラズモイドの超音速衝突時の中性子の観測
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daichi Kobayashi, Tomohiko Asai, Tsutomu Takahashi, Junichi Sekiguchi, Masaya Watanabe, Tomoya Yoshino, Sean Dettrick, Yung Mok, and Hiroshi Gota
2. 発表標題 MHD Simulation of Supersonic FRC Merging Compensated by Non-Invasive Magnetic Measurements
3. 学会等名 23rd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuhiko Watanabe, Tomohiko Asai, Tsutomu Takahashi, Daichi Kobayashi, and Daisuke Harashima
2. 発表標題 Internal Magnetic Measurement in Collisional Merging Process of a Field-Reversed Configuration
3. 学会等名 23rd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhisa Akashi, Yuka Iijima, Daichi Kobayashi, Tomohiko Asai, Jordan Morelli, and Thomas Roche
2. 発表標題 Development of Langmuir Probe Array for Radial Potential Profile Measurement in a Collisional Merging Formation FRC
3. 学会等名 23rd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水口直紀, 小林大地, 徐 旻昊, 浅井朋彦
2. 発表標題 FRCの移送・合体過程の3次元MHDシミュレーション
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daichi KOBAYASHI, Tomohiko ASAI, Tsutomu TAKAHASHI, Junichi SEKIGUCHI, Hiroshi GOTA, Sean DETTRICK, Yung MOK, Michl BINDERBAUER, Toshiki TAJIMA
2. 発表標題 Evaluation of Translation Velocity Control by Auxiliary Coils for Collisional Merging Formation of FRCs by 2-D Resistive MHD Simulation
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Kobayashi, T. Asai, Ts. Takahashi, J. Sekiguchi, H. Gota, S. Dettrick, Y. Mok, M. Binderbauer, and T. Tajima
2. 発表標題 MHD simulation of FRCs for velocity control in the collisional merging process
3. 学会等名 US-Japan Workshop on Compact Tori 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長山 好夫 (NAGAYAMA Yoshio) (10126138)	日本大学・理工学部・客員研究員 (32665)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 俊樹 (TAKAHASHI Toshiki) (10302457)	群馬大学・大学院理工学府・准教授 (12301)	
研究分担者	比村 治彦 (HIMURA Haruhiko) (30311632)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授 (14303)	
研究分担者	高橋 努 (TAKAHASHI Tsuomu) (50179496)	日本大学・理工学部・教授 (32665)	
研究分担者	水口 直紀 (MIZUGUCHI Naoki) (70332187)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関