

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03785

研究課題名(和文) 磁気ヘリシティ入射で発現するプラズモイド磁気リコネクションと高速イオン加熱

研究課題名(英文) Fast ion heating and plasmoid reconnection driven by magnetic helicity injection

研究代表者

永田 正義 (Nagata, Masayoshi)

兵庫県立大学・工学研究科・特任教授(名誉教授)

研究者番号：00192237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： 兵庫県立大の球状トーラス(ST)型 HIST装置では、電流駆動法の一つである同軸ヘリシティ入射(CHI: Coaxial Helicity Injection)法によってST配位プラズマを生成している。本事業で実施したCHI実験において、2次元内部磁場計測によってマルチプラズモイド生成現象が観測された。本研究によって、1)プラズモイドが駆動する高速磁気リコネクションがSTプラズマ磁場配位形成過程に重要な役割を果たしている。2)プラズモイドリコネクションと間欠的なイオン加熱との相関性、の2点について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近、フュージョンエネルギー開発が注目されており、核融合炉の早期実現に向けて世界中で多くのスタートアップ企業が起業している。本研究はこれらのスタートアップ企業の中で革新的核融合方式で用いられている磁化同軸プラズマガンによるスフェロマック生成に軸電流を流すことで球状トカマク(ST)生成に発展させた研究である。本方式により大電流のプラズマを効率よく生成できれば、中心導体内のOHコイルが不要になり、低アスペクト比ST炉の早期実現に貢献できる。プラズモイド型磁気リコネクションがイオン温度の上昇につながる機構の発見の意義は大きい。さらに、太陽フレア の高速リコネクションの機構の解明にも貢献する。

研究成果の概要(英文)： We have performed current drive experiments of spherical torus (ST) plasmas by using the coaxial helicity injection (CHI) method in the HIST device of University of Hyogo. It notes that phenomena of multiple plasmoid formation have been observed by 2D internal magnetic field measurements in the CHI experiments. We have revealed that the plasmoid-driven magnetic reconnection plays an important role in formation process of closed flux of ST configurations. Also, we have found that the behavior of plasmoid oscillation is correlated with the intermitted ion heating.

研究分野：プラズマ核融合

キーワード：スフェロマック 球状トカマク 同軸ヘリシティ入射 プラズモイド 磁気リコネクション イオン加熱 磁化同軸プラズマガン

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

球状トラス(ST)磁場配位をもつ高ベータ核融合トラスプラズマはその低アスペクト比の特徴から炉構造の簡素化が期待できる。しかし、その中心ソレノイドコイルを不要とするためには無誘導な電流立ち上げが必要とされる。そのため、磁気ヘリシティ入射(同軸型と局所型)等の様々なプラズマ立ち上げ実験が実施されている。同軸型の磁化プラズマガンを利用した磁気ヘリシティ(磁束管の絡み)をもつ磁化プラズモイド入射研究はプラズマの自己組織化構造形成の宝庫でもある。その実験研究において、磁気リコネクション、ダイナモ、流れと渦構造、2流体緩和、電場と回転など多彩な非線形プラズマ現象が発現するため、革新的なコンパクト核融合炉に向けたプラズマ生成法としてだけでなく、プラズマ物理探究として多くの研究が実施されて来ている。

2. 研究の目的

本研究は、高ベータなST型トラスプラズマ実験装置を使ったプラズマ科学への展開として、我々の独自技術である同軸ヘリシティ入射(Coaxial Helicity Injection: CHI)を用いたプラズモイド型磁気リコネクション過程の解明とその爆発的なエネルギー解放機構を利用したプラズマ加熱を検証することを目的にしている。

理論・シミュレーション研究で予測されている電流シート内に形成する複数のプラズマモードが駆動する磁気リコネクションは高い磁気レイノズル数領域においても効率的なイオン加熱が期待できる。本研究のCHI方式によるプラズモイドリコネクションの実験的検証は世界で初めてである。また、CHIのリコネクション加熱機能を活かし、将来の革新的な核融合炉において、数Mワット級のプラズマ加熱ツールとしてこの技術の可能性の検証は意義が大きい。

3. 研究の方法

本研究方法の特色は、高性能な2次元イオンドップラー分光計測システムと2次元内部磁場計測によって、磁場構造とイオン温度の高速な変化を空間的かつ時間的に同時に調べることができる点である。イオンについては、フローとイオン温度の空間分布計測によって、リコネクションによるアウトフローからのイオン加速と熱化を調べる。また、電流シートの電界による電子加速とジュール加熱による電子加熱は静電プローブの空間計測で検証を行う。

4. 研究成果

兵庫県立大学の球状トラスHIST装置では、トランジェント同軸ヘリシティ入射(T-CHI)法によってST配位プラズマ生成を実施している。CHI過程では、伸長された電流シートがティアリング不安定性を起こすことで電流シートが分裂して小スケールのマルチプラズモイドが生成され、そのシート内の乱流的状態が磁気リコネクションを加速する機構について探求した。

1) プラズモイド鎖生成による磁場配位形成

図1は2次元磁気プローブアレイを用いて計測したポロイダル磁束コンターの時間発展である。磁化同軸プラズマガン(左側)から噴出した磁化プラズマ流がプル型磁気リコネクションを介してマルチプラズモイドを形成していく過程(a-e)を示した。同図でトラスプラズマが抵抗減衰する過程(f-h)になると、これらの3~4個のプラズモイドは合体して行き、最終的には大きな一つのプラズモイド(h)に緩和形成していることがわかる。磁気ヘリシティ入射によって生成されるプラズモイド鎖が抵抗減衰過程で互いに合体することで、1つの大きなプラズモイドに成長し、最終的に閉じた磁束配位が緩和形成されることを明らかにした。

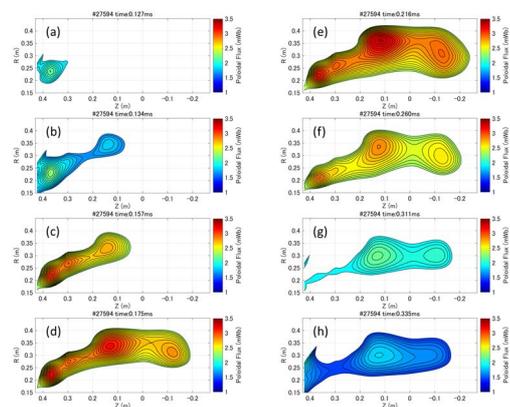


図1 細長く伸びた電流シート内に形成されるマルチプラズモイド鎖の形成と合体過程

2) プラズモイド振動の発見

図2から、ヘリシティ電流駆動と抵抗減衰がバランスするポロイダル磁束が最大になる時間帯において、磁場強度と電子密度の信号に周期的な(~180 kHz)振動波形を観測していることがわかる。このプラズモイドの挙動を示す振動(プラズモイド振動と名付けた)は、隣り合ったプラズモイドが合体と分裂を繰り返す挙動を示していることがわかった。この時、リコネクション電場 E_{\parallel} は各リコネクションポイントで正負極性の振動を繰り返す。また、このようなプラズ

マ振動が観測されるショットにおいてドップラーイオン温度が約 80 eV まで上昇することが明らかとなった。

3) プラズモイド振動と同期するイオン加熱

図3に示すように、ヘリシティ駆動によるポロイダル磁束増幅が終結し最大となる付近で小スケールのプラズモイド群の合体・分裂の活動(プラズモイド振動)が発現する。この時、ポロイダル磁束の振動と同期してイオン温度が急激に上昇することが明らかにした。プラズモイドのアクティビティの停止後、イオン温度は電子温度とほぼ同じ値まで急低下する。以上のことから、磁束増幅と同時にプラズモイド振動を間欠的に繰り返し発生させることができれば、CHI方式は有用なイオン加熱ツールになることが期待できる。

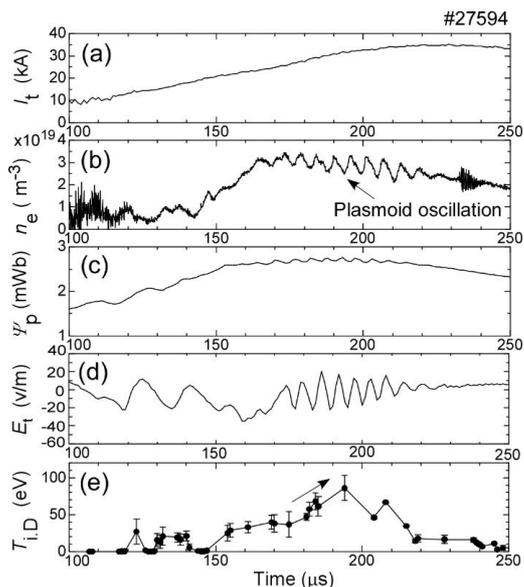


図2 電流立ち上げ過程における(a)プラズマ電流、(b)電子密度、(c)ポロイダル磁束、(d)リコネクション電場、(e)ドップラーイオン温度

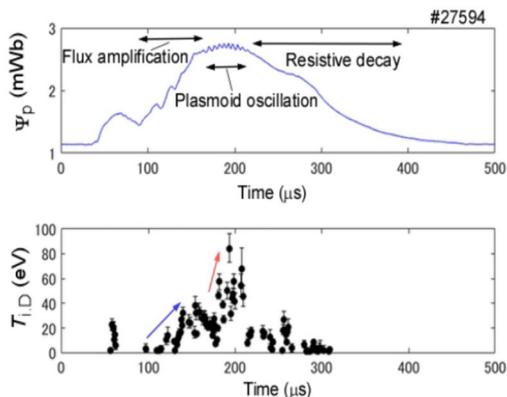


図3 プラズモイド振動に同期したイオン加熱

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kuroda K., Raman R., Hasegawa M., Onchi T., Hanada K., Ono M., Nelson B. A., Rogers J., Ikezoe R., Idei H., Ido T., Mitarai O., Nagata M., Kawasaki S., Nagata T., Higashijima A., Shimabukuro S., Niiya I., Sekiya I., Kojima S., Nakamura K., Takase Y., Murakami S.	4. 巻 41
2. 論文標題 Improvements to the High-Field-Side Transient CHI System on QUEST	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fusion Energy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10894-022-00338-4	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 該当する

1. 著者名 Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, T. Onchi, Y. Ono, H. Tanaka, N. Tsujii, M. Uchida, K. Yasuda, H. Kasahara, S. Murakami, Y. Takeiri, Y. Todo, S. Tsuji-Iio and Y. Kamada	4. 巻 62
2. 論文標題 Overview of coordinated spherical tokamak research in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 042011 (15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Kuroda, R. Raman, T. Onchi, ...M. Nagata (12番目 / 27人中)...	4. 巻 64
2. 論文標題 Demonstration of transient CHI startup using a floating biased electrode configuration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 014002 (7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 M. Nagata, H. Miyamoto, N. Fukumoto and T. Kanki
2. 発表標題 Review of plasmoid reconnection and ion heating in the CHI experiments on Helicity Injected Spherical Torus
3. 学会等名 64th APS-DPP, TP11.00005, October 20, 2022, Spokane, WA, USA (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kanki and M. Nagata
2. 発表標題 Comparative study between flowing two-fluid and single-fluid equilibria of spherical torus plasmas
3. 学会等名 64th APS-DPP, UP.00048, October 20, 2022, Spokane, WA, USA (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永田正義
2. 発表標題 兵庫県立大HIST実験のレビューと革新的核融合への貢献
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会年会 23Pp19, 富山国際会議場、2022.11.23
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. NAGATA, H. MIYAMOTO, Y. IBARAKI and N. FUKUMOTO
2. 発表標題 EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PLASMROID RECONNECTION AND ION HEATING DURING TRANSIENT CHI START-UP ON HIST
3. 学会等名 Proc. 28th IAEA Fusion Energy Conf. 2020 (10-15 May 2021) IAEA-CN-754/EX (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田正義、宮本秀明、福本直之、神吉隆司
2. 発表標題 HIST装置におけるヘリシティ入射が創るマルチプラズモイドとイオン加熱
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	黒田賢剛, Roger RAMAN, 長谷川真, 恩地拓己, 花田和明, 小野雅之, 西野信博, 永田正義, 池添竜也, 武田康佑, Brian A. NELSON, Thomas JARBOE, John ROGERS, 出射浩, 井戸毅, 御手洗修, 川崎昌二, 永田貴大, 東島亜紀, 島袋瞬, 新谷一朗, 関谷泉, 中村一男, 江尻晶, 高瀬雄一, 村上定義
2. 発表標題	QUESTにおけるT-CHI プラズマの発展磁束の解析
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	永田正義、宮本秀明、茨木雄平、福本直之
2. 発表標題	球状トーラスにおけるCHI過程で発現するマルチプラズモイド 駆動イオン加熱
3. 学会等名	第37回プラズマ核融合学会2020.12.3 03P40
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	神吉隆司、永田正義
2. 発表標題	球状トーラスにおける2流体と1流体の平衡モデル間の比較
3. 学会等名	第37回プラズマ核融合学会2020.12.3 1P46
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	M. Nagata, Y. Ibaraki, H. Miyamoto, A. Fujita, Y. Kikuchi and N. Fukumoto
2. 発表標題	Magnetic reconnection driven by plasmoid instability in coaxial helicity injection current drive on HIST
3. 学会等名	46th EPS conference on Plasma Physics, Milan, Italy, P4-1042, July 8-12 (2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Nagata, H. Miyamoto, Y. Ibaragi, T. Kanki, Y. Kikuchi and N. Fukumoto
2. 発表標題	Propagation of magnetic fluctuation driven by plasmoid reconnection in HIST-CHI experiments
3. 学会等名	61th APS-DPP, Fort Lauderdale, Florida, USA, GP10.00164, October 22 (2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	宮本秀明、茨木雄平、永田正義、福本直之
2. 発表標題	HIST-CHI実験における伸長する電流シート内のプラズモイド形成に関する磁場揺動解析
3. 学会等名	第36回プラズマ核融合学会、令和元年11月29日-12月2日、中部大学、29P22 (2019)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Nagata, H. Miyamoto, N. Fukumoto and T. Kanki
2. 発表標題	Review of plasmoid reconnection and two-fluid dynamo studies in the CHI experiments on Helicity Injected Spherical Torus (HIST)
3. 学会等名	49th EPS Conference on Plasma Physics, MCF94, July 3-7, 2023, Bordeaux, France (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	永田正義 神吉隆司
2. 発表標題	循環液体金属中軸電流によるシアフロー安定化ピンチプラズマ圧縮のアイデア
3. 学会等名	第40回プラズマ核融合学会年会2023.11.28 28P21
4. 発表年	2023年

1. 発表者名 神吉隆司、永田正義
2. 発表標題 同軸ヘリシティ入射によって形成される炉心ブラズマパラメータでの球状トカマクの2流体平衡
3. 学会等名 第40回ブラズマ核融合学会年会2023.11.29 29P02
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Kuroda, R. Raman, T. Onchi,...M. Nagata (12番目 / 27人中)...
2. 発表標題 Experimental Demonstration of Transient CHI Startup Using a New Electrode Configuration on QUEST
3. 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-CN-316/1678, October 16-21, 2023, London, UK, (国際学会)
4. 発表年 2023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	菊池 祐介 (Kikuchi Yusuke) (00433326)	兵庫県立大学・工学研究科・教授 (24506)	
研究分担者	神吉 隆司 (Kanki Takashi) (40524468)	海上保安大学校(海上保安国際研究センター)・海上保安国際研究センター・教授 (85406)	
研究分担者	福本 直之 (Fukumoto Noyuki) (90275305)	兵庫県立大学・工学研究科・准教授 (24506)	

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
---------	---------