

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K07003

研究課題名（和文）高性能強負磁気シアプラズマの不安定性の研究

研究課題名（英文）Study on the instability of the high-performance plasma with strong reversed shear

研究代表者

武智 学（Takechi, Manabu）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂研究所 トカマクシステム技術開発部・上席研究員

研究者番号：40370423

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：強負磁気シアプラズマは世界最高性能を達成するほどの非常に高い閉じ込め性能を持ち、その高い自発電流割合により、プラズマ電流の定常化にも大きなアドバンテージを持つ上に、核融合炉の実現化に向けて非常に重要な、装置の小型化にも大きく貢献する非常に魅力的なプラズマである。しかしながら、プラズマの小崩壊や崩壊が頻発するため、将来の実証炉や核融合炉における有効な運転シナリオとは考えられていない。これらの崩壊は通常起こり得ない低圧力時にも頻発していたが、本研究によってこれらの発生原因の説明が可能とする領域が拡大された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、負磁気シアプラズマの多くの崩壊の原因となる不安定性の同定が可能となった。強負磁気シアプラズマが将来の炉において適用可能となることは炉設計に対して大きなインパクトを与える。喫緊ではHモードのELMによるダイバータへの過大な熱負荷が最大の問題となっているが、負磁気シアプラズマによる運転が可能であれば、ELMの無いLモードで炉が成立する可能性がある。また、自発電流が多い自己加熱プラズマが安定解をどこで持つのかは自明ではなく、電流ホールを持つような強負磁気シアプラズマになる可能性も否定できないが、この場合においても安定な放電が可能となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The high-performance plasma with strong reversed shear has a very high confinement and achieved a world record value of equivalent fusion multiplication factor. It also has large advantage to steady-state plasma operation because it has large self-generated current fraction. It contributes to the size reduction of the device and can accel the realization of a fusion power plant. However it isn't consider as the main scenario of the future fusion DEMO and the plant because, even in the low beta regime, it has a frequent small disruption and finally terminated by major disruption. In this research, the cause of these low-beta disruptions were studied and some of them were identified.

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：核融合プラズマ 磁気流体不安定性 負磁気シアプラズマ ディスラプション 内部輸送障壁 トカマク

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

負磁気シアプラズマは内部輸送障壁 (Internal Transport Barrier; ITB) を持つことにより、良い閉じ込め性能を持つが、特にプラズマ中心に電流をほとんど持たない、プラズマ中心の安全係数の高い、いわゆる強負磁気シア放電ではさらに良い閉じ込めを持ち、世界最高のエネルギー増倍率  $Q_{DT}=1.25$  を得ている [1]。ITB による閉じ込め改善は H モードによる閉じ込め改善と違い、ELM のような間歇的なプラズマの吐き出しを伴わないため、プラズマ対向壁への負荷において非常に有利である。また、トカマクプラズマではプラズマ電流の維持が必須であるが、強負磁気シアプラズマでは強い ITB による大きな圧力勾配によって発生する自発電流、いわゆるブートストラップ電流が多く流れ、自発電流割合が 80% を超える、非誘導電流による定常プラズマの生成に成功している [2]。センターソレノイドコイル (CS コイル) をコンパクトにすることによってトカマク全体の重量を低減することが可能となるが、特に高コストなトロイダルコイルの重量を大幅に低減することが可能である [3]。一方で、プラズマ電流立ち上げには主に CS コイルの磁束変化が用いられるため、CS コイルを小さくすることによって CS コイルの供給磁束が減少した場合、供給磁束のみに寄らない電流駆動が別途必要となる。ブートストラップ電流は効率的に非常に優れるが、この割合を増すには強負磁気シアとなる電流分布が有効であることがわかっている [4]。

以上のように強負磁気シアプラズマは大きなアドバンテージを持つが、コラプスやディスラプションが頻出することが問題となっている。通常、ディスラプションに至る不安定性としては圧力限界における理想型不安定性のキンクバルーニングモードが挙げられる。通常規格化ベータ値  $\beta_N = 3$  程度以上が閾値であるが、強負磁気シアプラズマでは  $\beta_N = 1$  以下においてもディスラプションに至ることが少なくない。このため、強負磁気シアプラズマのディスラプションの原因は不明とされ、不安定なプラズマとの印象を強く抱かせている。しかしながら、強負磁気シアプラズマの生成にはプラズマ電流のランプアップ中にプラズマの加熱を行い、電流のプラズマ内部への染み込みを遅らせることにより、周辺に多くの電流が流れるが、この場合、理想型安定性においても、表面の安全係数が整数を切った領域で  $\beta_N = 1$  以下にまで閾値が下がりうることが報告者らによる MHD 安定性解析コードによる計算によって確認されている [5]。

一方、理想型安定性以外の負磁気シアプラズマの MHD 不安定性としてはまず、抵抗性不安定性の抵抗性インターチェンジモードがプラズマ中心の負磁気シア部においては不安定となるため最初の候補とされた [6]。これはのちに周辺のテアリングモードと結合することにより低ベータでもディスラプションに至ることが示された [7]。次に、負磁気シア部、正磁気シア部に同じ安全係数を持つ位置にそれぞれ同じヘリシティの 2 つの磁気島が成長し、リコネクションで結合することによりプラズマの大域で崩壊が起こる、いわゆる抵抗性不安定性のダブルテアリングモードが提唱された [8]。さらに、申請者らはディスラプションに至る時点での、プラズマの表面の安全係数 ( $q_{\text{eff}}$ ) と安全係数の極小値 ( $q_{\text{min}}$ ) を調べたところ、ディスラプションにはダブルテアリングモードに関係する極小値よりも表面の安全係数に強く依存し、表面のモードと共鳴する内部モードを観測した [9]。この実験解析結果をもとに、石井らはプラズマ周辺の摂動が磁気島の成長に影響を与えることをシミュレーションによって示し、プラズマの回転の違いによって磁気島の成長の特徴が大きく変わることを示した [10]。

このように負磁気シアプラズマにおける低ベータ領域での MHD 不安定性の研究は進展してきたが、いまだに多くのディスラプションの原因を同定することができず、これらを回避することができないことが問題となっている。

## 2. 研究の目的

強負磁気シアプラズマは世界最高性能を達成するほどの非常に高い閉じ込め性能を持ち、その高い自発電流割合により、プラズマ電流の定常化にも大きなアドバンテージを持つ上に、さらに核融合炉の実現化に向けて非常に重要な、装置の小型化にも大きく貢献する非常に魅力的なプラズマである。しかしながら、コラプスやディスラプションが頻発するため、将来の DEMO 炉や核融合炉における有効な運転シナリオとは考えられていない。このコラプスやディスラプションは低ベータ領域においても発生し、その発生機構が未だに明らかでないため、これらを回避する術を持たないことが最大の理由である。本研究によってこれらの発生機構を明らかにし、将来の炉への適用性を判断することを可能とする。得られた知見は、将来の炉設計に大きく影響する。

## 3. 研究の方法

強負磁気シアプラズマにおける低ベータ領域での不安定性を調べるため、理想型不安定性と抵抗型不安定性の両極から研究を進める。これらの研究は同時進行が可能である。

- (1) JT-60U で得られた強負磁気シアプラズマでの特に低ベータ時、ベーター定時のディスラプション時に対し、圧力限界における理想型不安定性のキンクバルーニングモードの安定性の確認を行う。

- (2) 多彩な内部の不安定性を測定する計測器を持つ DIII-D において、強負磁気シアプラズマ放電を行い、周辺に励起される MHD 不安定性が負磁気シア部の抵抗性不安定性に与える影響を、プラズマ回転等を変化させて調べる。また、DIII-D の制御コイルを用いて摂動磁場を発生させ、負磁気シア部の不安定性に与える影響を調べ、これをシミュレーションによって調べ、コードの適用性を調べる。

#### 4. 研究成果

- (1) JT-60U の強負磁気シアプラズマにおける低ベータ時、ベータ一定時のディスラプション時における圧力限界における理想型不安定性のキンクバルーニングモードの安定性の確認。

これまでに、強負磁気シアプラズマにおいては、理想型不安定性においても、 $N = 1$  以下にまで閾値が下がりうることを、報告者は実験で得られたプラズマ電流を用いた平衡をベースとして、圧力やプラズマ電流値を変化させ、MHD 不安定性解析コード ERATO-J で解析することによって確認し、2005 年に報告している[5]。これは、強負磁気シアプラズマの生成過程における、プラズマ電流のランブアップ中に、周辺に多くの電流が流れることが原因となる。即ち、キンクバルーニングモードの不安定性において、電流寄与のキンク不安定性の寄与が大きくなり、バルーニング不安定性の寄与の低い低ベータ時においても不安定となってしまう。これらの計算は高エネルギー増倍率を目指す電流ホールのあるような放電に対して解析を行ったが、本研究において、JT-60U の最後期（2008 年）において行われた完全非誘導電流駆動の長時間化を目指す実験の強負磁気シアプラズマに対して同様に MHD 不安定性解析を行った。これらのプラズマは 2005 年に報告した強負磁気シアプラズマと比較して比較的穏やかな（電流ホールを持たない）強負磁気シアプラズマであるにも関わらず、同様に非常に低い規格化ベータ値にてプラズマ崩壊が観測されていた。これらのプラズマ平衡を MHD 安定性解析コード MARG2D にて解析を行うことによって、崩壊時に、キンクバルーニングモードの数  $\mu s$  のモードの成長率が真空容器壁によって数 ms 程度に遅くなるいわゆる抵抗性壁モードが不安定であることが確認された[12]。崩壊時の磁気センサーの信号より、モードの成長率は抵抗性壁モード成長率程度であり、また、MARG2D で得られる固有関数が電子サイクロトロン計測で観測された揺動の空間分布で説明できることが示され、抵抗性壁モードと同定された。これは負磁気シアプラズマの低ベータの崩壊が理想型不安定性が原因であることを直接的に示した初めての報告であり、非常に重要である。このことは、低ベータでの崩壊のさらに多くが理想型不安定性で説明できることを示唆している。完全非誘導電流駆動の長時間化を目指す実験は、プラズマ電流値もベータ値もほぼ一定にもかかわらず異なる時間に崩壊が観測される。このプラズマの不安定性解析を行い、非常に不安定と安定の境界で運転していることが判明した。電流ランブアップから電流拡散時間より長い数秒が経ったのちのプラズマ電流が一定の場合でも、広い輸送障壁により、プラズマ半径の 6 割より外の部分に電流が流れることで周辺の電流は多く、これによりキンクバルーニングが元となる抵抗性壁モードの安定性が低くなることが確認された。プラズマ周辺部の電流の染み込みは実験の履歴に左右される壁の状態に非常に影響を受けることが、崩壊時間の再現性が良くない理由であると考えられる。今後さらに多くの放電について安定性解析を行うことにより、これまでより多くの崩壊が理想型不安定性で説明できると期待される。

- (2) 多彩な内部の不安定性を測定する計測器を持つ DIII-D において、強負磁気シアプラズマ放電を行い、周辺に励起される MHD 不安定性が負磁気シア部の抵抗性不安定性に与える影響を、プラズマ回転等を変化させて調べる。また、DIII-D の制御コイルを用いて摂動磁場を発生させ、負磁気シア部の不安定性に与える影響を調べ、これをシミュレーションによって調べ、コードの適用性を調べる。

これまでに、ディスラプション時に、表面のモードと共鳴する内部モードが観測されることを確認しているが、シミュレーションによってプラズマ周辺の摂動が磁気島の成長に影響を与えること、さらにプラズマの回転の違いによって磁気島の成長の特徴が大きく変わることが示唆された。DIII-D にて負磁気シアプラズマにおける磁気島に対する外部摂動磁場の影響を調べる実験を行う前に、負磁気シアプラズマはディスラプションやミニコラプスが発生しやすく、歩留まりが悪いため、その先行実験として正磁気シアプラズマを用いて、DIII-D にて磁気島に対する外部摂動磁場の影響を調べる実験を行なった。抵抗性 MHD シミュレーションコード AEOLUS-IT を用いて得られた、磁気島と外部磁場との関係における外部磁場のプラズマによる遮蔽効果の外部磁場の強度に対する影響について、DIII-D の実験結果との比較を行ったが、磁場の染み込みの空間分布など定量的に非常に良い一致を示した[13]。共鳴の位置については、コードで予想される  $m/n=2/1$  のテアリングモードの磁気島が存在する  $q=2$  面ではなく、実験的には  $q=3$  面にてプラズマの応答が見られた。これは、AEOLUS-IT でのシミュレーションが円柱状の円形断面プラズマに対し、単ヘリシティのモードについて計算を行ったことが原因の一つであることが考えられるため、トロイダル性を有するプラズマに対し、トロイダルカップリングを考慮した複ヘリシティのモードに対して計算が可能ないようにコードの改良を行った。また、実際の実験ではコ

イルによって励起される磁場と、コイルの設置誤差などを起因とする誤差磁場と磁気島の共鳴が起こるため、これらを含んだ解析を推し進めた。その結果、回転する磁気島による安定化、不安定化の物理機構を得ることに成功した[14]。

引き続き、DIII-Dにて負磁気シア実験を行う予定であったが、COVID-19の影響により、不可能となったため、JT-60Uのデータ解析を中心に行なった。

#### <引用文献>

- [1] T. Fujita et al 1999 Nucl. Fusion 39 1627
- [2] T. Fujita et al 2002 Nucl. Fusion 42 180
- [3] K. Tobita et al. Fusion Engineering and Design 81 (2006) 1151-1158
- [4] T. Wakatsuki et al. Plasma Phys. Control. Fusion 57, 065005 (2015).
- [5] M. Takechi et al 2005, Proc. 32th Eur. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics
- [6] M.S. Chu et al 1996 Phys. Rev. Lett. 77 2710
- [7] S. Takeji et al 2002 Nucl. Fusion 425
- [8] Z. Chang et al 1996 Phys. Rev. Lett. 77 3553
- [9] M. Takechi et al 2005 Nucl. Fusion 45 1694
- [10] Y. Ishii et al 2009 Nucl. Fusion 49 085006
- [11] N. Aiba *et al.*, Comput. Phys. Commun. **175**, 269 (2006).
- [12] T. Bando, M. Takechi, et al PFR 2021
- [13] S. Inoue, M. Okabayashi, Z. Taylor, E.J. Strait, J. Shiraishi, G. Matsunaga, M. Takechi, A. Isayama, N. Hayashi, S. Ide, "The physics of locked tearing mode stabilization by rotating 3D fields in the presence of static error fields", 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, FL, USA, Oct. (2019).
- [14] S. Inoue, M. Okabayashi, Z. Taylor, E.J. Strait, J. Shiraishi, G. Matsunaga, M. Takechi, A. Isayama, N. Hayashi, S. Ide, "NONLINEAR DYNAMICS OF TEARING MODE DRIVEN BY STATIC AND ROTATING EXTERNAL 3D FIELDS", 27th IAEA Fusion Energy Conference.

## 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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 BANDO Takahiro, TOJO Hiroshi, TAKECHI Manabu, AIBA Nobuyuki, WAKATSUKI Takuma, YOSHIDA Maiko, INOUE Shizuo, MATSUNAGA Go	4. 巻 16
2. 論文標題 On Collapses in Strong Reversed Shear Plasmas During or Just After Plasma Current Ramp-Up in JT-60U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1402089 ~ 1402089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1402089	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 M. Takechi, S. Sakurai, K. Masaki, G. Matsunaga, A. Sakasai	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Disruption simulations for JT-60SA design and construction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 M. Takechi, G. Matsunaga, S. Sakurai, T. Sasajima, J. Yagyū, Y. Kawamata, K. Kurihara, K. Nakamura,	4. 巻 123
2. 論文標題 Progress of the magnetic sensor development for JT-60SA	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 965-968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.03.010.	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 S. Inoue, M. Okabayashi, Z. Taylor, E.J. Strait, J. Shiraishi, G. Matsunaga, M. Takechi, A. Isayama, N. Hayashi, S. Ide
2. 発表標題 The physics of locked tearing mode stabilization by rotating 3D fields in the presence of static error fields
3. 学会等名 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, FL, USA, Oct. (2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Okabayashi, 井上 静雄, E. Strait, Z. Taylor, C. Paz-Soldan, J. de Grassie, N. Ferraro, J. Hanson, S. Jardin, R. La Haye, N. Logan
2. 発表標題 Critical Physical Process of Locked-Tearing Mode Control by 3D Magnetic Field Entrainment with Static Error Fields
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 静雄, Michio Okabayashi, Zane Taylor, Edward J. Strait, 白石 淳也, 武智 学, 松永 剛, 諫山 明彦, 林 伸彦, 井手 俊
2. 発表標題 NONLINEAR DYNAMICS OF TEARING MODE DRIVEN BY STATIC AND ROTATING EXTERNAL 3D FIELDS
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 静雄, 白石 淳也, 武智 学, 松永 剛, 諫山 明彦, 林 伸彦, 井手 俊介
2. 発表標題 共鳴磁場摂動によるロケットモード安定化の物理過程
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 静雄, 白石 淳也, 武智 学, 松永 剛, 諫山 明彦, 林 伸彦, 井手 俊介
2. 発表標題 外部共鳴磁場摂動による磁気島振動の能動制御とその磁気島成長に対する安定化効果
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Okabayashi, S. Inoue, T. Strait, Z. Taylor, N. Ferraro, N. Logan, S. Jardin
2. 発表標題 Tearing Mode Locking Avoidance by Applying Rotating External 3D Field
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Manabu Takechi, Mitsuhiro Suzuki, Yoshiaki Miyata, Kenichi Kurihara, Takahiro Suzuki, Shunsuke Ide
2. 発表標題 Optimization of Magnetic Sensor Configuration for JT-60SA Plasma Control
3. 学会等名 The joint meeting of the 26th International Toki Conference (ITC-26) and The 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上 静雄、白石 淳也、武智 学、松永 剛、諫山 明彦、林 伸彦、井手 俊介、岡林 典男、Edward J. Strait、Nicholas Zane Taylor
2. 発表標題 三次元回転磁場によるロックモード解放の物理過程
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018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	井上 静雄  (Inoue Shizuo)  (80757956)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂研究所 先進プラズマ研究部・主任研究員   (82502)	

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