

令和元年6月25日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2014～2018

課題番号：26249144

研究課題名（和文）プラズマの外部摂動磁場に対する応答のモデル化と可視化技術をつかったその実験的検証

研究課題名（英文）Modeling of the plasma response by the externally applied magnetic field and the validation using imaging diagnostics

研究代表者

大館 暁（Ohdachi, Satoshi）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00270489

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 29,700,000円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込めプラズマにおいて閉じ込め磁場の構造の変化、特に静的な磁気島の形成を、トロイダル方向に離れた二地点からの接線X線カメラの観測によってDIII-Dトカマク装置においてはじめて直接観測に成功した。このような、計測する情報量の非常に限られた状況下でのトモグラフィ再構成のためのアルゴリズムを開発し、解析に用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉を実現するためには、プラズマを閉じ込めている磁場のトポロジカルな変化を検出し閉じ込め性能に対する影響を詳しく調べる必要がある。これまで、プラズマ内部の静的な構造、例えば磁気島の生成について直接計測する手段がなかったが、本研究により直接的な計測が可能となった。

研究成果の概要（英文）：Change of the topology of the magnetic field which confines the plasma is directly observed on the DIII-D tokamak. Two tangentially viewing soft X-ray camera system located at two toroidal location make it possible to observe such change for the first time. The algorithm for the reconstruction of the local emission where the quite limited amount of the information can be used.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：磁気島 共鳴摂動磁場 スパースモデリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

外部摂動磁場と核融合プラズマとの相互作用を理解することは核融合プラズマの性能向上のために不可欠である。外部摂動磁場の印加はプラズマを制御する「ノブ」として極めて有効な手段となっている。たとえば、トカマク型の装置で高い閉じ込め性能を持つ H-mode と呼ばれるプラズマにおいて、周辺局在化モード (ELM) が不安定化すると、急速かつ大規模な熱の吐き出しが生じる。ELM を制御するために外部から摂動磁場をかける方法は現在最も有力な制御法である。しかしその制御のメカニズムはいまだ完全には明らかにはなっていない。外部摂動磁場によってプラズマの磁場構造がどのように変化するかを正確に調べる計測手法の開発が必要であると考え本研究を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、外部摂動磁場が磁場閉じ込めプラズマに及ぼす影響を実験的に検証できる計測技術の開発にある。摂動磁場印加はプラズマ制御のための極めて有効な手段となっているが、外部摂動磁場が良導体である核融合プラズマへどのように浸み込み、どのような物理メカニズムでプラズマを制御しているかについては良くわかっていない。研究の進展が遅れている理由は、プラズマ中の磁場の高精度な測定が難しいことにあり、外部摂動磁場に対するプラズマ応答のモデルを検証することができていないことにある。

3. 研究の方法

本研究では磁場構造の変化をもたらす輸送の変化を活用し、2次元可視化技術を使って放射強度分布の変化からプラズマ内部の磁場構造の変化を反映する情報を取得する。磁場閉じ込めプラズマ、特にトカマクタイプのプラズマはトロイダル対称性を持っているため、放射強度はトロイダル方向に一定となる。すなわちプラズマを同じ角度から観察する2つ(以上)のカメラのイメージは基本的に同一となる。しかしプラズマ中にトロイダルに非均一な摂動が加わると、2台のカメラのイメージは同一でなくなり、トロイダル方向の均一性が破れていることを検知することができる。プラズマの磁場に共鳴する外部の摂動磁場を加えた場合には、プラズマの磁場のピッチに同期した摂動は平均化されにくく、ねじれた磁力線に沿った構造を形成されるが、これを検知するわけである。

4. 研究成果

トカマクプラズマに $n=3$ の外部共鳴摂動磁場を印加した場合のシミュレーション例を図1に示す。外部磁場は ≈ 0.95 付近の $q=3$ の有理面までは侵入し、そこでほとんど遮蔽される。一方遮蔽のために有理面に流れる電流によってプラズマは変形する。このときトロイダル方向に離れた2台のカメライメージは異なったものとなり、その差分イメージから変化が起きている領域を推定することが可能で、プラズマの変形すなわち外部磁場の浸透の様子を見積もることができる(図2の右図)。

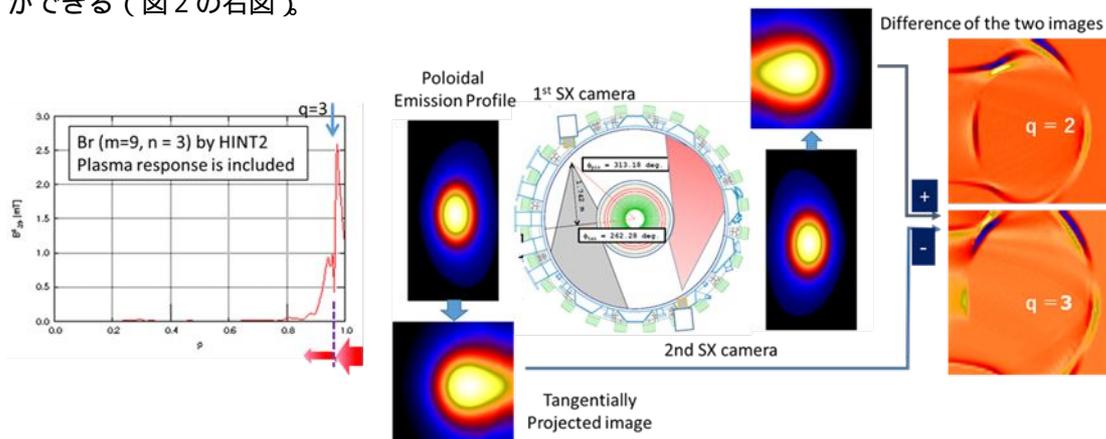


図1 外部摂動磁場の浸透

図2 180度離れた位置においた接線カメラ計測の概念図

この原理に基づき米国 GA 社の DIII-D トカマクに2台のカメラを実装した。180度の間隔で設置するのが理想的だが、他の装置との干渉があり120度間隔での設置となった。DIII-Dのディスラプション直前のプラズマの変形の測定を行った結果を図3に示す。ディスラプション直前の0.5s間を10Hzのフレームレートで撮影している。図a1-a5は二つのカメラのイメージの差分を示し、最初のフレームa1ではほとんど二つのイメージに差がないが、ディスラプションに近づくにつれ差が大きくなっていることがわかる。差分データを説明するために、プラズマ中に磁気島が形成されていることを仮定したときの差分イメージを「モデリング」として示すが、 $m/n = 2/1$ の磁気島だけでなく、 $3/1$ 、 $4/1$ の磁気島が同時に成長していることがはっきり見て取れる(図1 a4と図1dの比較)。磁気島のオーバーラップによる輸送の急速な増加がディスラプションを引き起こしていることを初めて直接的な計測で示すことができた(論文[2])。また、ディスラプション後に $m/n = 1/1$ の磁気島が残り、ディスラプションによるプラズマの完全な崩

壊現象を遅らせる効果があることを発見した (NF 誌に投稿中)。これはトカマクのディスラプション防止手法として新しい手法であり、将来の核融合炉に近いパラメータを持つトカマクにも適用可能な有望な制御手法の一つと考えられる。

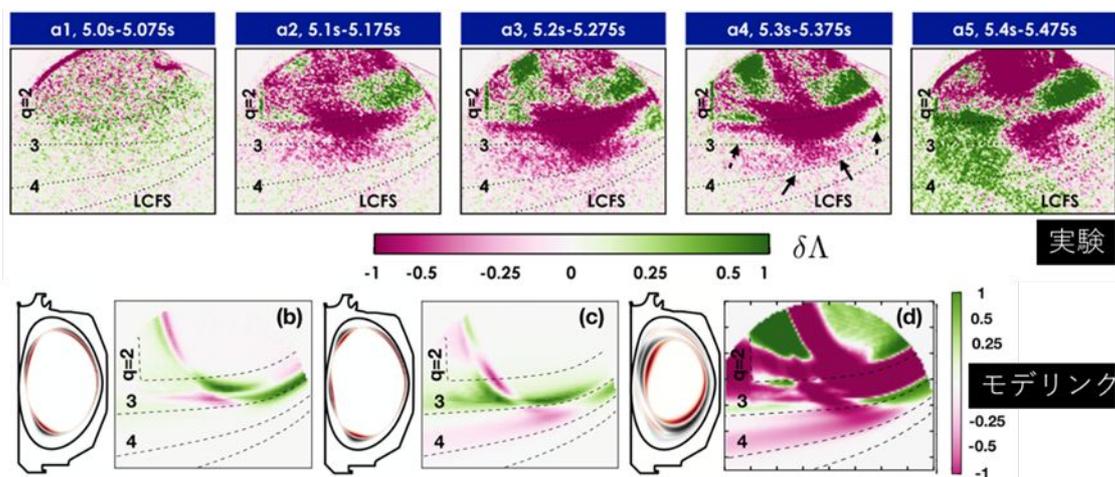


図3 2台のカメラの差分データを測定値を a1-a5 に示す。b(m/n = 2/1, 3/1 を仮定) c(m/n=2/1, 4/1) -d(m/n = 2/1, 3/1, 4/1) はプラズマ中の構造を仮定して作成した差分データのシンセティック画像を示す。

このようなプラズマ中の構造を仮定し、測定データと比較するやり方をフォワードモデリングというが、上に示したような予測可能な変形に対しては有効ではあるものの、計測データから直接プラズマ中の構造の推定 (トモグラフィー再構成または逆変換と呼ぶ) ができればさらに幅広い現象に対して本計測手法を応用することができる。トモグラフィー再構成は、本質的に数学的に不良設定の問題であって推定が困難であることが知られているが、それだけではなく、核融合プラズマの再構成問題においては、計測器設置の制約によってプラズマの一部しか観測できないという問題がある。例えば上記の DIII-D 装置での計測ではプラズマの下部のみしか観測できておらず、再構成のための情報がかなり不足している。このよう状況で再構成を行うために新しいタイプの再構成技法の開発を行った。

それは、プラズマの放射強度を互いに直交したパターンで展開し、その線形和として放射強度を表す手法である。円形断面トカマクに対しては同様の手法は 1980 年代より使われ最小二乗フィットで展開係数が求められていた。この方法は計測条件が悪くなるとノイズに対して非常に敏感で、常に安定な解を求めることは難しかった。この問題に対して、近年データサイエンスで広く使われるようになったスパースモデリングの考え方を適用し、展開の各項の係数の小さいものを零にするという条件で解くとかなり安定な解が得られることが分かった (論文 [1])。この時、図 4 に示すようなグローバルなパターンを展開パターンに使うことで、一部しか観測できない場合でもそれなりに安定した解が得られることがわかった。プラズマの変形は、閉じ込め磁場によって強く制約されるため、本質的にグローバルな構造を持つ。

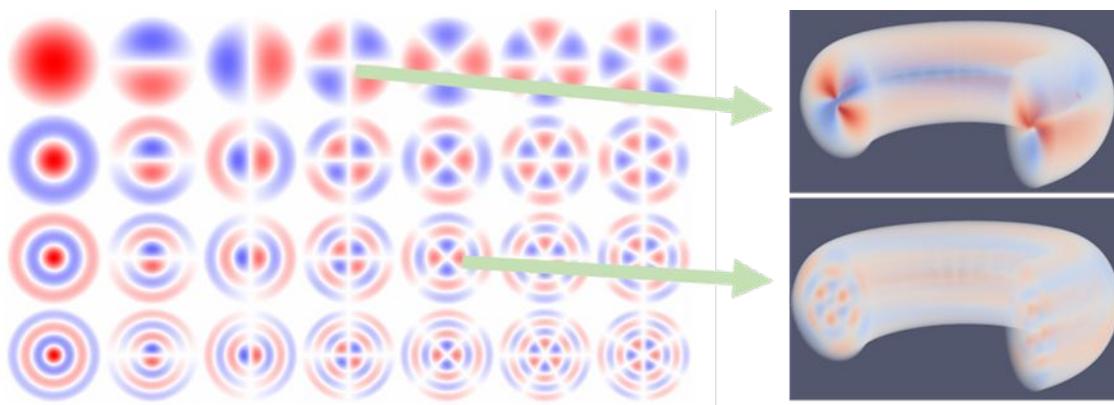


図4 ポロイダル断面におけるフーリエ・ベッセル展開のイメージと、それをトロイダル方向に拡張した 3 次元のパターンの例を示す。

そのためこのような展開を行うことには根拠がある。この手法を使い、ポロイダル方向にはフーリエ・ベッセル展開を行い、トロイダル方向には $n=0$ (トロイダル対称)、 $n=1$ (トロイダル方向に一周したときに同一の位相に戻る摂動) の構造をもつ展開パターンを使い、プラズマの放射

パターンを展開し、逆変換を試みた。

この新しい展開法を使った逆変換の手法を2台のカメラを使ったトモグラフィ再構成問題に適用した数値テストの結果を図5に示す。ポロイダル断面で中心ピークした分布(a1)と、 $m/n = 2/1$ の磁気島の構造を持つ放射強度分布(a2)を足し合わせたものから予想される接線イメージは(b)のようになる。この画像をスパースモデリングの技法(L1正則化)を使ってポロイダル断面像を再構成したものが(c1)、(c2)であり、(c2)に示すように磁気島の構造をかなり良く再構成できることがわかる。カメラが一台の場合にはこのような逆変換を行うことはできず、2台のカメラを使ってトロイダルモードの情報を得るといふ本科学研究で開発した手法の優位点であるといえる。またスパースモデリングを使わない場合には(c3)のような不十分な結果となり、スパース性を使うことがこの種の再構成問題において極めて重要である。これは図5(d)に示すように、非ゼロの項数がL1正則化の場合には1/3程度の項数であり、 $m=2$, $n=1$ 以外の重要な解が自動的に使われなくなることで再構成がうまくいったものと考えられる。

この数値テストは円形断面のトカマク的な配位で行ったものだが、DIII-Dの縦長変形した平衡配位に対してもうまく機能することは確認できている。実験データの再構成の問題は試行中であり、2台のカメラの高精度の位置合わせやゲインの校正を向上させることで可能になるものと考えている。本研究の拡張として、2台のカメラではなく、1台のカメラの入射部を工夫し視差情報をも取り込むことを検討している。これにより磁気島などのトロイダルモードを持つ構造の情報を1台のカメラで得ることができることから、プラズマの対称性の破れをより容易に検知できるシステムを構成できると考えている。

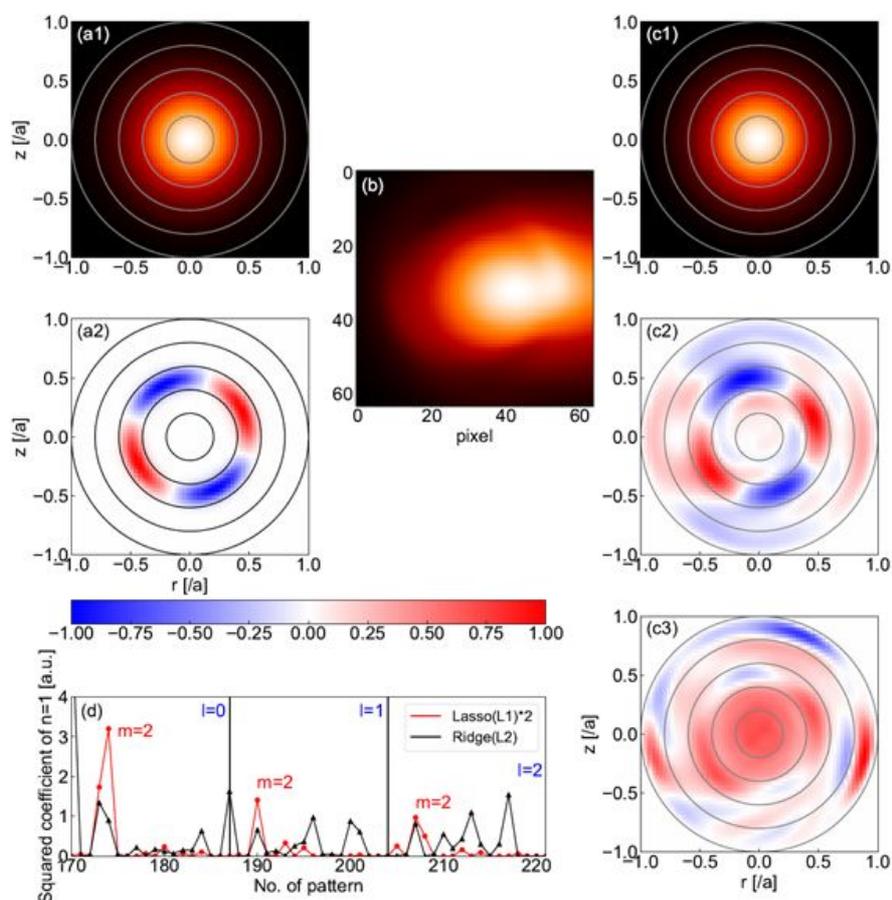


図5 仮定した放射強度のポロイダル断面の分布を、(a1)、(a2)に示す。これらによる接線像を(b)にしめす。再構成像は(c1)、(c2)である。(c3)はスパースモデリングを使わない再構成像。(e)には展開係数の大きさを(c2)の場合(L1正則化)、(c3)の場合(L2正則化)の時に対して示す。

ここで報告した固有関数展開の手法は論文[3]で初めて採用した。また、磁気島が生成された状態、磁場がストキャスティック領域になった時のプラズマに対する影響については、論文[3, 5, 8, 9, 10]などで詳しく調べた。また、外部摂動磁場存在下の平衡については論文[7]他で研究成果を公表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12件)

1. Satoshi OHDACHI, Satoshi YAMAMOTO, Yasuhiro SUZUKI, Shishir PUROHIT, Tomographic Inversion Technique Using Orthogonal Basis Patterns, Plasma Fusion Res. 14(2019)3402087. (査読有) doi: 10.1585/pfr.14.3402087
2. X. D. Du, M. W. Shafer, Q. M. Hu, T. E. Evans, E. J. Strait, S. Ohdachi, and Y. Suzuki, Direct measurements of internal structures of born-locked modes and the key role in triggering tokamak disruptions, Phys Plasmas, 26(2019) 042505. (査読有) doi: 10.1063/1.5085329
3. G Kawamura, H Tanaka, K Mukai, B Peterson, S Y Dai, S Masuzaki, M Kobayashi, Y Suzuki, Y Feng and LHD Experiment Group, Three-dimensional impurity transport modeling of neon-seeded and nitrogen-seeded LHD plasmas, Plasma Phys. Contr. Fusion 60(2018) 084005. (査読有) doi: 10.1088/1361-6587/aac9ea
4. S. Ohdachi, S. Inagaki, T. Kobayashi, M. Goto, 2D turbulence structure observed by a fast framing camera system in linear magnetized device PANTA, in: Journal of Physics:Conference Series, IOP Publishing, 2017: p. 012009. (査読有) doi:10.1088/1742-6596/823/1/012009
5. Y. Narushima, S. Sakakibara, Y. Suzuki, K. Watanabe, S. Ohdachi, Y. Takemura, M. Yoshinuma, K. Ida, F. Castejon, D. Lopez-Bruna, et. al., Observations of sustained phase shifted magnetic islands from externally imposed m/n= 1/1 RMP in LHD, Nucl. Fusion. **57** (2017) 076024.(査読有) doi: 10.1088/1741-4326/aa6dce
5. 岩間尚文, 大館暁, 画像再構成の数理的基礎, プラズマ・核融合学会誌. **92** (2016) 743.(査読無し)
6. Z. J. Wang, T.F. Ming, X. Gao, X.D. Du, S. Ohdachi, Upgrade of the tangentially viewing vacuum ultraviolet (VUV) telescope system for 2D fluctuation measurement in the large helical device, Review of Scientific Instruments. **87** (2016) 11E307.(査読有) doi: 10.1063/1.4959951
7. Y. Suzuki, K. Ida, K. Kamiya, M. Yoshinuma, H. Tsuchiya, M. Kobayashi, G. Kawamura, S. Ohdachi, S. Sakakibara, K.Y. Watanabe, Impact of magnetic topology on radial electric field profile in the scrape-off layer of the Large Helical Device, Nuclear Fusion. **56** (2016) 092002.(査読有) doi: 10.1088/0029-5515/56/9/092002
8. Y. Liang, K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, Y. Suzuki, Y. Narushima, T.E. Evans, S. Ohdachi, H. Tsuchiya, S. Inagaki, Stochasticity in fusion plasmas, Nuclear Fusion. **56** (2016) 90201-90202.(査読有) doi: 10.1088/0029-5515/56/9/092021
9. K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, Y. Suzuki, Y. Narushima, T.E. Evans, S. Ohdachi, H. Tsuchiya, S. Inagaki, K. Itoh, Bifurcation physics of magnetic islands and stochasticity explored by heat pulse propagation studies in toroidal plasmas, Nuclear Fusion. **56** (2016) 092001.(査読有) doi: 10.1088/0029-5515/56/9/092001
10. S. Ohdachi, Y. Suzuki, H. Tsuchiya, K.Y. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima, X.D. Du, T.F. Ming, M. Furukawa, K. Toi, Pressure driven MHD instabilities in the intrinsic and externally enhanced magnetic stochastic region of LHD, Nuclear Fusion. **55** (2015) 093006.(査読有) doi: 10.1088/0029-5515/55/9/093006
11. Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Suzuki, K.Y. Watanabe, S. Nishimura, S. Satake, B. Huang, M. Furukawa, Y. Takemura, Experimental observation of response to resonant magnetic perturbation and its hysteresis in LHD, Nuclear Fusion. **55** (2015) 073004.(査読有) doi: 10.1088/0029-5515/55/7/073004
12. S. Ohdachi, T.F. Ming, K. Watanabe, K. Toi, Spatial Mode Structure of Magnetohydrodynamic Instabilities Observed by a Tangentially Viewing Soft X-Ray Camera in LHD, IEEE Transactions on Plasma Science. **42** (2014) 2732-2733.(査読有) doi: 10.1109/TPS.2014.2327239

[学会発表](計 7 件)

1. S. Ohdachi et. al., "Application of the Sparse Modelling to the Fusion Plasma Diagnostics", 3rd IAEA TM meeting Fusion Data Processing Validation and Analysis, 27-31 May, 2019, Vienna, Austria
2. S. Ohdachi et. al., "Tomographic inversion technique using orthogonal basis patterns", 27th International Toki conference, Nov. 19-22, 2018, Toki, Japan
3. S. Ohdachi et. al., "Magnetic Island detection using dual tangential soft X-ray imaging system on magnetically confined devices", 61th APSDPP meeting, Nov. 5-9, 2018, Portland, USA
4. X. D. Du et.al., "Direct Measurements of Internal Structures of Born-locked Modes and the Key Role in Triggering Tokamak Disruption", 61th APSDPP meeting, Nov. 5-9, 2018, Portland, USA
5. M. Shafer et.al., "Observation of Multiple Helicity Mode-Resonant Locking Leading

- to a Disruption on DIII-D”, 27th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 22-27, 2018, Gandhinagar, India.
6. S. Ohdachi, et. al., “Inverse problem in the estimate of the internal current density of the interchange mode from the magnetic probe measurement in LHD”, 1st International Conference on Data-Driven Plasma Science. July 11 - 13, 2018, York, UK.
 7. S. Ohdachi et. al., “Plasma response to the RMP application in LHD and Tokamaks”, 12th A3 Foresight Program Workshop Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment High-Performance Plasmas, Dec. 12 - 15, 2017, Chongqing, China.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：鈴木 康浩
ローマ字氏名：Yasuhiro Suzuki
所属研究機関名：核融合科学研究所
部局名：ヘリカル研究部
職名：准教授
研究者番号(8桁)：20397558

研究分担者氏名：榊原 悟

ローマ字氏名：Satoru Sakakibara

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：教授

研究者番号(8桁)：90280594

研究分担者氏名：河村 学思

ローマ字氏名：Kawamura Gakushi

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：助教

研究者番号(8桁)：70509520

研究分担者氏名：山本 聡

ローマ字氏名：Satoshi Yamamoto

所属研究機関名：京都大学

部局名：エネルギー理工学研究所

職名：助教

研究者番号(8桁)：70397529

(2)研究協力者

研究協力者氏名：X. D. Du

ローマ字氏名：X. D. Du

所属研究機関：General Atomics 社

研究協力者氏名：T. E. Evans

ローマ字氏名：T. E. Evans

所属研究機関：General Atomics 社

研究協力者氏名：M. Shafer

ローマ字氏名：M. Shafer

所属研究機関：General Atomics 社

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。