

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03910

研究課題名（和文）圧力非等方度が交換型MHD不安定性の安定化に与える影響の実験的研究

研究課題名（英文）Experiment study of Interchange MHD instability under the anisotropic pressure distribution

研究代表者

渡辺 清政（WATANABE, KIYOMASA）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00249963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：圧力非等方度がMHD不安定性に与える影響を調べるため、ほぼ無電流状態の大型ヘリカル装置実験で、加熱手段や運転密度などの放電条件を変え、ベータ値や圧力非等方度を変えたプラズマに対して、抵抗性交換型不安定性に起因する磁場揺動強度を調べた。その結果、磁力線方向の圧力比率が高いほど、観測される低次の磁場揺動強度が低くなる多くの事例を得た。この結果は、3次元非等方理想MHD不安定性解析コードTerpsichorのKruskal-Obermanモデルによる理論予測結果と一致することもわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テストLHD実験で達成された経済的な核融合炉心と同等のベータ値を持つプラズマは、主として接線NBIにより加熱されることによる圧力非等方性により、抵抗性交換型不安定性が安定化された結果、高いベータ値が実現された可能性が高いことがわかり、LHDの高ベータ放電のMHD安定特性はそのまま炉心プラズマへの外挿が難しいことがわかった。一方、核融合炉では磁気レイノルズ数がLHDの高ベータ放電より10倍から100倍高い領域で運転することになるので、この場合は依然として、交換型不安定性はベータ値の運転領域を制限しない可能性も高く、この効果の検証が今後の課題であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the effects of the pressure anisotropy on the MHD instability in the helical plasmas, we analyze the pressure anisotropy dependence of magnetic fluctuation amplitude in the discharges with anisotropic pressure heated by the various heating source in the LHD experiments. As the results, we obtain the following results. The more anisotropic in the dominantly tangential pressure, the larger the magnetic fluctuation amplitude due to the resistive interchange instabilities becomes large. The results are consistent with a theoretical prediction based on Kruskal-Oberman model in terpsichore code, which is a MHD instability analysis code based on the three dimensional MHD equilibrium with anisotropic pressure, and it is developed by W.A.Cooper.

研究分野：熱化プラズマ核融合

キーワード：MHD平衡 非等方圧力 MHD安定性 ビーム圧力 磁気計測

## 1. 研究開始当初の背景

大型ヘリカル実験装置(LHD、核融合科学研究所)は世界最大級のヘリカル方式の核融合実験装置であり、経済的な核融合炉心に匹敵する体積平均5%の高ベータ放電をコラプスなどを起こさずに安定的に達成している[1]。一方、理論的には、LHD設計時から、高ベータ放電が達成された磁場配位では周辺領域に交換型MHD不安定性が発現することが予測[2]され、これにより高ベータ放電が妨げられるのではないかと危惧されていた。また、3次元フルMHD方程式に基づく圧力駆動型不安定性の非線形飽和計算結果でも、LHDで最高ベータ値を達成した放電とほぼ同じ磁気レイノルズ数領域( $S \sim 10^6$ )で、時間的にはゆっくりであるがコラプスの発生が予測されていた[3](同計算では、磁気レイノルズ数がより小さい領域( $S \sim 10^5$ )では、周辺付近で高 $n$ のバルーニングモードが現れ、その後中心部の圧力勾配のコラプスが引き起こされることが予測されていた。ここで $n$ は不安定性のトロイダル方向のモード数)。以上のことから、LHD実験で達成された5%近辺の高ベータ放電は何故安定に維持できているのか、ということが課題となってきた。

最近、MHDモデルに熱化イオンの運動論効果(ヘリカル捕捉軌道効果)を取り入れると、イオン圧力勾配による不安定性駆動効果が抑制され、特に高 $S$ (磁気レイノルズ)領域では、衝突頻度の低下によりヘリカル捕捉軌道効果が助長され、抵抗性交換型やバルーニングモードの線形成長率が減少することが示され[4]、この効果がLHDの高ベータ放電では重要である可能性が指摘されている。しかしながら、この効果の他に上記の課題を説明する候補の一つがプラズマ圧力の非等方性である。LHDの高ベータプラズマは、低磁場、比較的低密度で接線NBIにより加熱されている。この条件では、接線NBIに起因する高エネルギー粒子の閉じ込め性能が熱化プラズマのそれと比較して相対的に高く、総蓄積エネルギーに対するビームエネルギーの割合は30%を超えると見積もられている[5]。さらに、接線NBI起因のビーム圧力成分はその多くが接線方向の成分を持っていると考えられているため、高ベータLHDプラズマは非等方圧力を持つと考えられている。一方、圧力が非等方な場合、圧力駆動型不安定性の線形成長率が減少することが予測されている[6,7]。

## 2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究の目的は、LHD実験において、圧力非等方度の異なるプラズマ放電の不安定性の発生の有無や揺動振幅の計測結果の実験解析と理論予測と比較から、圧力非等方度による交換型不安定性の発現条件、飽和状態への影響の違いを調べ、その結果を基にLHDの高ベータ放電のMHD安定特性の炉心プラズマへの外挿精度を検証することである。併せて、LHDの非等方プラズマで圧力非等方度を精度よく同定する手法を開発し、磁力線に平行、垂直方向の加熱特性の違うLHDプラズマで、その手法の妥当性を検証する。

## 3. 研究の方法

LHDにおける圧力非等方度のMHD安定性への影響を評価する手法として以下の2つを想定している。第一は、非等方圧力に対応したMHD安定解析コードを用い、圧力非等方時の安定特性を理論的に解析する方法であり、第二は、圧力非等方度の異なる実験プラズマに対して、不安定特性の違い(磁場揺動強度の違い)を比較する方法である。

まず理論的に解析する方法について説明する。本研究では、非等方圧力に対応した3次元MHD安定解析コードとして、Terpsichoreコード[7]を使う。ただし、MHD安定性解析コードを適用するためには、非等方圧力時のMHD平衡配位を同定する必要がある。本研究では、非等方圧力に対応した3次元MHD平衡解析コードとして、ANIMECコード[7]を使う。非等方圧力時のMHD平衡配位を評価する際ビーム成分の分布関数を仮定する必要があるが、ここでは、2温度成分を持つバイマクスウェル分布を仮定する。Terpsichoreコードでは、不安定性に対する圧力非等方度の効果のモデルとして、Kruskal-Oberman(KO)モデルとnon-interacting hot particle(NI)モデルの2つを採用している。前者は、流体の効果だけを考慮したモデルで安定化の程度は低く、後者は、高エネ粒子の圧力や電流を不安定の駆動機構として付与させないモデルで、安定化効果が高い。高エネ粒子の圧力や電流を無視する理由は、高エネ粒子の反磁性ドリフトが支配的な不安定性の成長率より十分大きいからである。但し、NIモデルはビーム圧力の交換型分訂正への寄与を全く考えないので非常に仮想的なモデルと言える。

次に、実験的手法について説明する。LHD は加熱方法として、ECH、接線 NBI、垂直 NBI を持っており、加熱方法の違いにより圧力非等方度の異なるプラズマを生成でき、その安定特性を不安定性に起因すると予測される磁場揺動強度の飽和強度の変化を調べることで評価できる。図 1 に LHD のある真空磁場配位において、加熱手法や運転密度を変えて圧力非等方度を変化させた実験結果を示す。図 1 は、体積平均ベータ値に対して圧力非等方度の指標である磁気軸上部に近い位置にあるサドルループで観測した磁束と反磁性磁束の比を示している。また、ここで、体積平均ベータ値は反磁性磁束から評価している。サドルループ磁束は Pfirsh-Schlueter 電流 (平衡電流) に比例し、反磁性磁束は反磁性電流に比例すること、Pfirsh-Schlueter 電流はプラズマの全圧力に強く依存し、反磁性電流は磁力線に垂直方向のプラズマ圧力に強く依存することから、その比  $\Phi_{SL}/\Phi_{dia}$  が大きいほど磁力線方向の圧力非等方度が高く、その比が小さいほど、磁力線に垂直方向のプラズマ圧力の比率が高まることが知られている。図 1 のシンボルの違いは加熱手法や運転磁場、加熱入力パワーの違いを示しており、同じシンボルでは運転密度を変えることにより、体積平均ベータ値が変化している。これは、LHD の閉じ込め特性として、閉じ込め時間が運転密度の強い正の相関を持つことに起因している ( $\tau_E \propto n_e^{0.54}$ ) [8]。接線 NBI に比べて垂直 NBI や ECH による加熱法では運転密度の変域が大きく取れないので、体積平均ベータ値の変域が狭い。これは、ECH にはカットオフ密度が存在し、垂直 NBI では密度を上げると急速に加熱効率が減少するためである。垂直 NBI や ECH による加熱法では、この運転密度変域が狭い影響もあり、運転密度を変えても、大きく圧力非等方度が変化しない。一方、接線 NBI による加熱では幅広い密度で放電が可能で、体積平均ベータ値が増加するにつれて大きく圧力非等方度の指標が変化するが、これは運転密度が増加するにつれて、ビームの減速時間が増加することにより、全プラズマ圧力中のビーム圧力の寄与が減少し、ビーム成分の寄与が高く磁力線方向の圧力が高い状態から熱化成分が支配的な等方圧力状態へ変化しているためと推測される。図 1 のデータ群に対して磁場揺動解析を通じて不安定性特性を解析したところ、破線に囲まれた低ベータ領域以外の放電で MHD 不安定性に起因する磁場揺動が観測された。この磁場揺動強度の圧力非等方度依存性について解析した。なお、図 1 と同じ磁場配位かつ圧力等方が予測される実験条件下で幅広いベータ値や磁気レイノルズ数を持つ放電に対して観測された磁場揺動強度のベータ値や磁気レイノルズ数依存性から、図 1 で観測された運転両機の磁場揺動は抵抗性交換型 MHD 不安定性に起因すると推定される。また、図 1 中接線 NBI、1 ユニット加熱実験ではプラズマ電流が誘起される可能性がある。LHD において、プラズマ電流は主に平衡への影響を通じて MHD 安定特性に影響を及ぼすことが予想されるが、図 1 の接線 NBI、1 ユニット加熱実験ではプラズマ電流が小さい放電のみを解析対象とすることにより、すべて放電がほぼ無電流の実験条件となっている。また、ECH や垂直 NBI のみで加熱した放電では、交換型不安定性に起因した磁場揺動が観測されなかったため、本研究は、主として接線 NBI に起因した圧力非等方プラズマに対する研究となっていることに注意。

#### 4. 研究成果

まず、ビームの圧力非等方度による MHD 不安定性への影響についての理論予測結果について説明する。図 2 は、LHD で、体積平均ベータ値として総ベータ値 1.6%、熱化ベータ値 0.8%、ビームベータ値 0.8% を仮定し、圧力非等方度

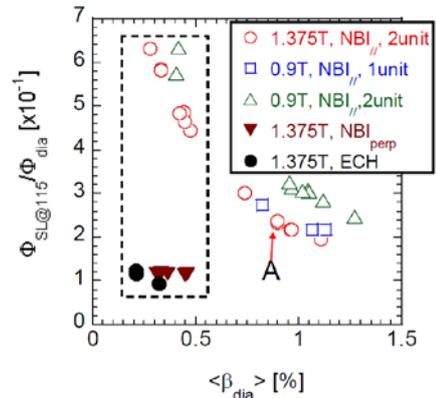


図 1 LHD の磁気軸位置 3.75m 配位における加熱条件を変えた時の圧力非等方度の変化。

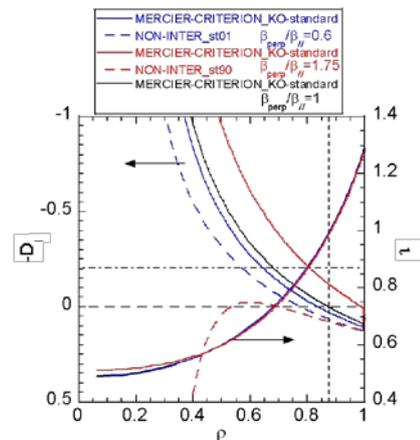


図 2 MHD 安定特性の圧力非等方度依存性の理論予測例。<β> = 1.6%, <β\_th> = <β\_beam> = 0.8%。

を変化させた場合(ここでは、 $\beta_{\perp}/\beta_{\parallel}$ が、1.75, 1, 0.6の3通りの場合)のメルシエパラメータ(理想交換型 MHD 不安定性の不安定度の指標)と回転変換の小半径方向依存性を示している。ここで、添え字  $\perp$ ,  $\parallel$  はそれぞれ、磁力線に垂直方向、接点方向の成分を示す。また、圧力分布は熱化圧力、ビーム圧力とも放物型を仮定しており、計算は3次元 MHD 平衡コード ANIMEC[7]と安定性解析コード terpsichore[7]を使って実行されている。ここでは、圧力非等方度による MHD 平衡特性の違いを回転変換の変化で示している。図 2 からわかるように、圧力非等方度は磁気軸付近を除き、回転変換に大きな影響を与えず、磁気軸付近でも回転変換の変化量は非常に小さい。図 2 で  $D_{\perp}=0$  の実線が小半径方向に非常に局在化した理想交換型不安定性が不安定になる指標で、 $D_{\perp}=0.2$  の一点鎖線は、LHD 実験で準定常的に圧力勾配が維持される安定限界の指標である[9]。高ベータ放電でも不安定性が観測される典型的な周辺の共鳴有理面は  $t=1$  であり、この計算条件では、圧力等方時にこの共鳴有理面で交換型不安定性はわずかに不安定領域にあると予測される。流体の非等方圧力の効果を考慮したモデル KO モデルでは、磁力線に垂直方向のベータ値が高い場合は等方圧力時に比べて、交換型不安定性がより不安定化され、磁力線に平行方向のベータ値が高い場合は、交換型不安定性がより安定化されると予測される。一方、高エネルギー粒子の圧力や電流を不安定の駆動機構として付与させない NI モデルでは、圧力非等方な場合は、いずれの場合も等方圧力時に比べて、交換型不安定性がより安定化される。これは、圧力非等方度の原因がビーム成分の場合、ビーム成分の圧力勾配を不安定性駆動項と考えないモデルの性質を反映している。また、磁力線に垂直方向のベータ値が高い場合が磁力線に平行方向のベータ値が高い場合に比べて、その安定化度は大きいことがわかる。

次に、LHD 実験で圧力非等方度を変えた場合の抵抗性交換型 MHD 不安定性の特性を調べた結果を示す。図 3 は、図 1 の A で示した放電の放電波形を示している。図 3(a) は体積平均ベータ値と加熱源毎の加熱入力パワー、図 3(b) は線平均密度、ガスパフのピエゾバルブの開度、図 3(c) は運転磁場で規格化した  $m/n=1/1$  の磁場揺動強度 ( $b_{11}/B_t$ )、圧力非等方度の指標である  $\Phi_{SL}/\Phi_{dia}$ 、図 3(d) は熱化プラズマのプラズマパラメータから評価した磁気レイノルズ数  $S$  の時間変化を示している。ここで、 $m$  は磁場揺動構造のポロイダルモード数を示す。この放電では放電開始から  $t=4.3s$  までは接線 NBI のみでプラズマが加熱され、 $t=4.3s$  から放電終了までは接線 NBI と垂直 NBI でプラズマ加熱されている。プラズマ生成は主として ECH によるが、その入射パワーと入射時間は NBI のそれに比べて小さく、圧力非等方度にはほとんど寄与しない。したがって、 $t=4.3s$  までは、磁力線方向の圧力非等方度が高く、 $t=4.3s$  後は圧力非等方度が低くなっていると推定される。実際、 $\Phi_{SL}/\Phi_{dia}$  も  $t=4.3s$  以前で大きく、 $t=4.3s$  以降は小さくなっている。また、ベータ値や密度は、 $t=4.3s$  以後少し高くなっているが、放電を通じてほぼ一定であり、磁気レイノルズ数の変化も小さい。一方、抵抗性交換型不安定性の指標に関して、 $t=4.3s$  以前の  $b_{11}/B_t$  値は  $t=4.3s$  以後に比べて小さい。つまり、磁力線方向の圧力非等方度が高いほど、磁場揺動強度の飽和値は小さくなっている。この定性的傾向は、上記に示した KO モデルによる非等方圧力の理想交換型不安定性に与える影響の理論予測と一致している。図 4 に図 1 の破線枠外のすべて放電に対して、圧力非等方度が

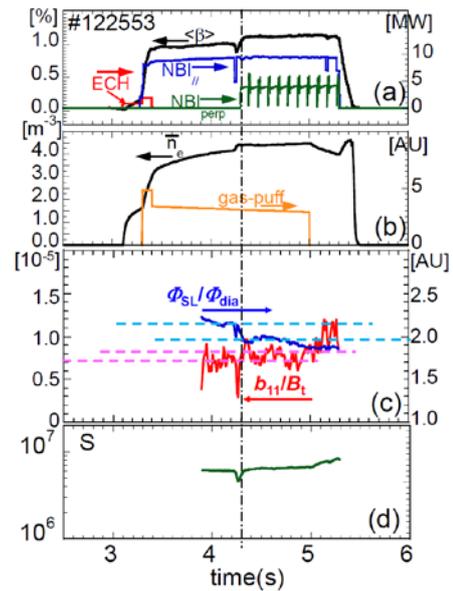


図 3 圧力非等方が予測される放電の放電波形。LHD の磁気軸位置 3.75m 配位における加熱条件を変えた時の圧力非等方度の変化。

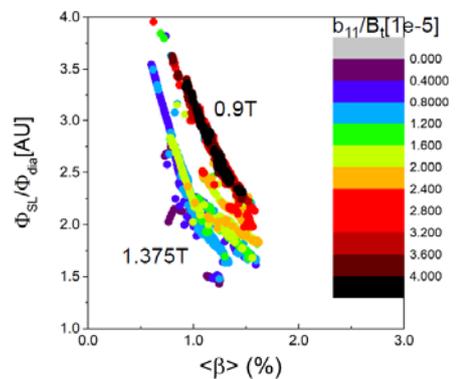


図 4 図 1 の破線枠外の放電における磁場揺動強度の圧力非等方度、体積ベータ値依存性。

変化した時の磁場揺動強度依存性を示す。交換型不安定性はベータ値にも強く依存するので、圧力非等方度の指標-体積平均ベータ値空間で、磁場揺動強度がどのような依存性を持つかを図4は示している。運転磁場が1.375Tの場合は、ほぼ同じベータ値でも磁力線方向の圧力非等方度が高まるほど、磁場揺動強度が小さくなる傾向があることが分かる。一方、運転磁場が0.9Tの場合は、その傾向は明確には見られない。

以上をまとめる。圧力非等方度がMHD不安定性に与える影響を調べるため、ほぼ無電流状態の大型ヘリカル装置(LHD、核融合研)実験で、加熱手段や運転密度などの放電条件を変え、ベータ値や圧力非等方度を変えたプラズマに対して、MHD不安定性に起因する磁場揺動強度を調べた。同じMHD不安定性特性を持つ磁場配位における等方圧力が推定される幅広いベータ値や磁気レイノルズ数を持つプラズマでの不安定性の特性(ベータ値が高いほど、磁気レイノルズ数が低いほど、揺動強度が大きくなる)から、上記の不安定性は、抵抗性交換型不安定性であると推定される。一方、圧力非等方度が高いプラズマ群では等方プラズマで観測された磁場揺動強度のベータ値や磁気レイノルズ数の依存性が明確でなくなり、磁力線方向の圧力比率が高いほど、観測される低次の磁場揺動強度の飽和値が低い結果を得た。後者の結果は、3次元非等方理想MHD不安定性解析コードTerpsichorenのKOモデルによる理論予測結果と一致することがわかった。この結果は、ビームの圧力非等方度効果の無い核融合炉心では、高ベータ運転時に交換型不安定性による圧力勾配の制限により、ある値以上の高ベータ運転が難しくなる可能性を示唆している。ただ、核融合炉では磁気レイノルズ数がLHDの高ベータ放電より10倍から100倍高い領域で運転することになる[9]ので、この場合は依然として、交換型不安定性はベータ値の運転領域を制限しない可能性も高い。

更に、図4で示した圧力非等方度が高い場合は、ベータ値が低く、圧力駆動型の不安定性が発生し辛いことや圧力非等方度が高い場合(特に、磁力線方向圧力比大)は磁気レイノルズ数が多い場合が多いことから、不安定性の変化の原因が圧力非等方度であることの切り分けが難しく、系統的な解析で圧力非等方時の不安定性の抑制効果の検証には、更なるデータ整理・収集と圧力非等方度、圧力分布の同定精度の向上が必要である。我々は、非等方圧力に対応した3次元MHD平衡解析コードの数値解析結果から、反磁性計測、サドル磁束ループ計測に電子温度分布計測等に基づく磁気軸位置計測を組み合わせることにより、ベータ値、圧力分布、非等方度を同時に評価する方法を既に発見[10]しており、LHDの実験結果を用いて本手法の妥当性や適用範囲を検証すれば、圧力非等方度、圧力分布の同定精度の大幅な向上が期待される。しかしながら、実験におけるビーム圧力の大きさや分布を推定する際、等方圧力の磁場配位データベースに基づくNBIに起因するビーム圧力の分布の数値計算による評価から、大きな磁気面上の流速の駆動無しに磁気面上の平衡条件が満たされていないことが判明した。一方、プラズマ流速の計測からは、圧力非等方が予想される放電の流速が、圧力等方が予測される場合に比べて、顕著に大きくなっているわけではないので、この場合、NBIに起因した非等方ビーム圧力分布の評価手法が妥当でない可能性が高い。この矛盾を解決するモデルとして、NBIに起因した圧力非等方ビーム圧力はその分布が磁気面上で一定でないため、大きな径電場を形成し、これによるビーム圧力分布の変形が起こっており、この効果により磁気面上の平衡条件が満たされていない可能性がある。本効果を検証するために、本研究期間内に径電場の効果を考慮した高エネルギー粒子軌道計算とビーム圧力分布評価が可能なコードを製作したが、本研究期間中にそのコードの検証を実験データを使って行うことができなかった。これは今後解決すべき課題である。

- [1] A.Komori et al., 2009 Nucl. Fusion 49 104015.
- [2] K.Y.Watanabe et al., 2005 Nucl. Fusion 45 1247.
- [3] M.Sato et al., 2017 Nucl. Fusion 57 126023.
- [4] M.Sato and Y.Todo, 2020 J. Plasma Phys. 815860305.
- [5] K.Y.Watanabe et al., in Proc. of Joint Conf. of 17th ITC and 16th ISHWS, Toki, 2007, 15-19 Oct. 2007, I-13.
- [6] J. Todoroki, 2002 J. Plasma Fusion Res. 78, 287.
- [7] W.A.Cooper et al., 2006 Fusion Sci. Technol. 50, 245.
- [8] H.Yamada et al., 2005 Nucl. Fusion 45 1684.
- [9] K.Y.Watanabe et al., 2011 Phys. Plasmas 18 056119.
- [10] Y.Asahi, Doctor thesis, 2012 SOUKENDAI.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡辺清政
2. 発表標題 LHDの高ベータ放電の安定特性に対する圧力非等方度の影響
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 森涼雅
2. 発表標題 ヘリカル型核融合における 粒子の閉じ込め性能の研究
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 渡辺清政
2. 発表標題 LHDにおける非等方圧力放電の圧力非等方度の評価と安定特性評価に関する考察
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 渡辺清政
2. 発表標題 LHDにおける非等方圧力放電の圧力非等方度の評価と安定特性評価に関する考察(II)
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会・年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田健聖
2. 発表標題 LHDプラズマにおける低次磁場揺動強度のプラズマパラメータ依存性の研究
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会・年会
4. 発表年 2022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	關 良輔  (SEKI RYOUSUKE)  (80581066)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教   (63902)	
研究分担者	武村 勇輝  (TAKEMURA YUKI)  (60705606)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教   (63902)	

	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
研究協力者	伊藤 秀  (Ito Shu)		
研究協力者	森 涼雅  (Mori Ryoga)		

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
研究協力者	山田 健聖  (Yamada Kensei)		

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