

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246119

研究課題名(和文)急速合体加熱と定常中性粒子ビーム加熱を駆使した球状トーラスの限界ベータ検証実験

研究課題名(英文)Maximum-Beta Experimental Study of Spherical Tokamak by Use of Merging/Reconnection Heating and Neutral Beam Heating

研究代表者

小野 靖(Ono, Yasushi)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30214191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円

研究成果の概要(和文)：合体・リコネクションの加熱が磁場の2乗に比例する巨大加熱であることを実証し、一部磁場反転配位を経由して、合体加熱によって40%を超える超高ベータ球状トカマクの生成に成功した。不安定成長より短時間で生成した配位に後から現れる高ベータ不安定の抑制を試み、危険な不安定はトロイダルモード数20-100の圧力駆動型バルーニングキンク不安定で、成長はプラズマ排出につながることで、電流・圧力分布がホローに保ち、深い磁気井戸を有する絶対極小磁場に近い分布ほど同不安定は成長せず、さらに中性粒子ビームでトロイダルシア流を駆動すれば同不安定を人為的に抑制でき、導体壁も不安定のロックを避ければ有用とわかった。

研究成果の概要(英文)：We found significant reconnection heating energy that scales with square of reconnecting (poloidal) magnetic field and used it to form an ultra-high beta (~40%) spherical tokamak (ST) partly through the field-reversed configuration. The high-beta STs produced within short reconnection time suffer from high-beta ballooning kink instabilities with toroidal mode numbers 20-100, causing plasma ejections as well as significant decrease in plasma density and thermal energy. However, we successfully suppress them when the merging and/or a neutral beam (NB) injection form hollow current and thermal pressure profiles close to the absolute minimum-B configuration. The toroidal shear flow controlled by NB and the conductive shells on the separatrix are also found to suppress those high-n mode, though we should avoid the mode lock to the conductive wall which is dangerous to the high beta STs.

研究分野：プラズマ核融合工学

キーワード：ベータ限界 プラズマ合体 中性粒子ビーム 球状トカマク 磁場反転配位 磁気リコネクション プラズマ加熱 圧力駆動型不安定

1. 研究開始当初の背景

球状トカマク (ST) の最大の利点は、アスペクト比の低下によりベータ限界が 40%以上と大きく、ベータ値を上げるほど磁気井戸が深くなることであるが、壁、流れを取り込んだ各種理論予測や[1,2]、低ベータ ST を徐々に加熱して 30%後半のトロイダルベータに一時的に達する実験[1,2]は存在しても、超高ベータ平衡を初めに成立させ、その安定限界を直接テストする実験はまだ存在しない。

磁気リコネクションは Sweet-Parker 時間の 1/10 以下で磁気エネルギーの一部を熱エネルギーに変換する。合体の場合は (不安定成長によるリコネクションと異なり) つなぎかわった磁力線が X 点を厚く取り囲むため、熱エネルギーが閉じこめられ、ベータを急上昇させるため、高ベータ不安定が成長する前に高ベータ平衡配位を一時的に作る事が出来る。同手法は我々が小型実験 TS-3 で実証し、2000 年 Physics of Plasmas の招待論文[3]や米国物理学会年会の招待講演[[5]等 3 回となり評価されている。

反面、当時同手法で ST の限界ベータを検証するには

(a) 小型 ST 実験装置 TS-3 の閉じこめ時間が 50 μ sec と短かく、(b) 合体・リコネクション後は加熱パワーが低下し、高ベータ不安定が成長する間に急速にベータ値が低下してしまうため、実現が困難であった。

しかし、最近の大型設備拡充等により TS-3 装置は、(a) ST 合体に適した UTST 装置[6,7]、(b) ST 合体とスフェロマック合体に適した TS-4 装置にアップグレードされて大半は 0.5m に、閉じこめ時間も数百 μ sec \sim 2 ミリ sec に向上した。UTST には産業技術総合研究所の協力により実測で 0.75MW(25kV,30A) の NBI 装置[8]を設置、TS-4 には日本大学や大阪大学との共同開発により 0.3MW (15kV,20A) のパルス NBI[6]を設置し、超高ベータの限界を探る実験をはじめ環境が整った。

[1]例えば小野：小特集「ベータ値限界とMHD」第4章「第二安定化に向かう高ベータ球状トカマク研究」、プラズマ・核融合学会誌(解説論文)、79, 2003年, 144-151.

[2] 小野：小特集「球状トカマクの実用炉への展望 2. STはどこまで高ベータ化できるか?」、プラズマ・核融合学会誌, 第80巻, 第11号, 2004年11月, pp.921-923.

[3] Y. Ono and M. Inomoto: "Ultra-High Beta Spherical Tokamak Formation by Use of Oblate Field-Reversed Configuration", Physics of Plasmas (invited paper), 7, pp. 1863-1869, (2000).

[4] Y. Ono, T. Kikura (他7名) "First and Second-Stable Spherical Tokamaks in Reconnection Heating Experiments", Nuclear Fusion, 43, (2003), pp. 789-794

[5] Y. Ono, "Impulsive Magnetic Reconnection in TS-3 and TS-4 Merging Experiments", DPP09 Meeting of American Phy. Soc., Atlanta GA, Nov. 2009 (invited).

[6] Y. Ono, R. Imazawa, H. Imanaka, (他14名), "Ion and Electron Heating Characteristics of Magnetic Reconnection in TS-3 and UTST Merging Startup Experiments", Fusion

Energy 2008, EX/P9-4, 1-8, (2008).

[7] Y. Ono R. Imazawa, H. Imanaka, (他8名), "Transient and Intermittent Magnetic Reconnection in TS-3 / UTST Merging Startup Experiments", Fusion Energy 2006, EX/P7-12-6, 1-8, (2007)

[8] H. Sakakita, S. Kiyama, H. Koguchi (他6名), "Evaluation of 25 keV Helium Hydrogen Ion Beam for the Alpha Particle Measurement in ITER", Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.8 (2009), 674-679.

2. 研究の目的

東京大学で開発した 1) 合体を用いた超高ベータ球状トカマク (ST) と磁場反転配位 (FRC) の生成に、産業技術総合研究所と自主開発の 2) 中性粒子ビーム入射(NBI)装置 1MW と 0.3MW を組み合わせて、40%を超える超高ベータ状態を (安定ならば) 50 アルヴェン時間以上維持して第 2 安定状態の ST の限界ベータと ST-FRC 境界領域の安定性を解明する。不安定の成長時間より速い Sweet-Parker 時間の 1/10 以下で急速合体形成する超高ベータの圧力・電流分布を NBI で維持してその安定性を検証するユニークな実験を行う。ベータ限界を決める a) バルーン (キンク)、電流駆動型キンク等の不安定と b) 磁気井戸とプラズマ流、壁による安定化効果との釣り合いを検証する。リコネクションによる圧力・電流分布の幅広い制御に加え、複数の NBI でプラズマ流の制御を試み、限界ベータが人為制御できるかを実験的に明らかにする。

(A) ST を合体させてリコネクション加熱で高ベータ化する手法、

(B) 互いに逆向きのトロイダル磁場を有するスフェロマック 2 個を合体させて FRC を生成し、トロイダル磁場を急速に印加して高ベータ ST を得る手法の 2 つを駆使して、

(1) 球状トカマク (ST) のベータ値が 20% から 100% の高ベータにわたる初期平衡を不安定の成長時間よりも早く生成し、

(2) 設置済みの 0.75MW 中性粒子ビーム入射(NBI)装置[業績 6]]と自主開発の NBI0.3MW を増設して用い[業績 9]]、40%を超える超高ベータ状態を 100Alfven 時間維持することを初めて試みる。これにより、本研究では

(I) ST の限界ベータと平衡配位の関係、即ち電流・圧力分布が如何にベータ限界を決めるのかを明らかにし、その中で端的な問題として第 2 安定状態の ST が生成・維持できるかを検証する。

(II) 高ベータ ST を安定に保つ要素として注目するのは(a) 中性粒子ビームで制御するプラズマ流による安定化、(b) 2 種類の合体・NBI が形成する電流分や圧力分布の制御、(c) 導体壁位置によって変化する安定化効果の 3 つであり、これらを人為的制御で安定限

界がどこまで拡張できるかを探る。小型実験 TS-3 の結果によれば(B)の合体でトロイダルベータ $\beta_T=30-90\%$ 、(A)の合体で 20-60%の超高ベータ平衡を一時的に形成できる [3,4]。これを初期条件として NBI で高ベータ状態を維持して(a) 高ベータ状態でいかなる不安定が発生するかを特定し、さらに

(b) 例えば q_w (磁気シア)- p_w (圧力勾配)ダイヤグラムで ST がバルーニング不安定等を回避して第2安定化を達成するといった高ベータ安定化を達成するシナリオを見出すことを最終目標とする。

3. 研究の方法

合体加熱と NBI 加熱を用いて球状トカマク ST から磁場反転配位 FRC へ至る超高ベータ状態の限界を検証するため、まず、センターコイルと EF コイルを改修して、磁気軸で 0.4T、プラズマ電流 200kA の高磁場合体を実現し、同時に既存の 0.75MW NBI に加え、開発済の安価な 0.6MW パルス NBI を新たに付加して増力する。次に 2 種類の合体を駆使して 20-80%の超高ベータの ST(FRC)平衡を形成し、2 台の NBI で(安定ならば)50Alfven 時間以上保持し、限界を決める不安定は何か、果たして抑制できるかを明らかにする。既存のトムソン散乱とイオンドップラー計測を 2 次元電子温度・密度・イオン温度計測として整備し、磁場・電場揺動計測と共に、高ベータ ST (FRC) の温度・密度分布と高ベータ不安定の関連を明らかにする。不安定抑制の 3 手法：(A) 合体で制御する電流・熱圧力分布や (B) NBI で制御するプラズマ流分布、(C) 導体壁の位置調整、以上により、高ベータ不安定を回避して 40%を超える安定な高ベータ ST 平衡を維持するシナリオを実験的に検証する。

4. 研究成果

平成 22 年度は、限界ベータ検証のための設備・計測拡充とリコネクション加熱実験に期待以上の進展があった。特に中性粒子ビーム入射設備 NBI は (A) 産業技術総合研究所から移設の NBI 0.75MW(25kV)に加え、(B) 自主開発 NBI (15kV) は 0.3MW から 0.5MW へ出力引き上げに成功し、(C) (D) 大阪大学から NBI (15kV) 0.3MW を 2 台、(E) 0.4MW を 1 台移設し、計画を 1.2MW 上回る出力確保に成功した。産総研から約 2MJ の電源移設と合わせて、UTST 装置はセンターコイルと平衡磁場コイルの容量・機械強度を増加させ、最終的に従来のプラズマ電流は 120kA を 300kA に引き上げることに成功した。過去 8 年間開発してきた 2 つの 2 次元計測を拡充し、(a) 視線積分されたライン光スペクトルを逆変換するドップラートモグラフィ計測開発では、105 チャンネルの 2 次元イオン温度計測を完成した。(b) レーザの往復反射と飛行時間差を利用した 2 次元トムソン散乱開発では、3×3 点のシステムを完成させ、高精細化も

進展した。磁場・電場の 2 次元計測も 2 次元磁気プローブ・静電プローブ列によって実現された。これらのシステムを用いて、合体によるリコネクション加熱機構の 2 次元検証を行なった結果、再結合した磁力線にリコネクションのアウトフローが衝突してファーストショックを形成してイオンが急速加熱されること、電子はシート内の X 点でオーム加熱されることが明らかとなった。これらの成果は Y. Ono et al., Physical Review Letters (2011)をはじめとする論文として公表した他、実験・理論・観測の研究者が一体となった MR2010 国際会議 (2010 年 12 月 6-9 日) を主催し、90 名を超す国内外出席者とともに磁気リコネクションの物理解明から宇宙観測、球状トカマク加熱応用までの最新成果をレビューできた。

平成 23 年度は、UTST のトーラス・ソレノイドコイルの容量・機械強度をアップし、EF コイルも大容量化を完了し、2 台の NBI と運用を開始し、TS-4 でも超高ベータ球状トカマク実験用に短パルスワッシャーガン型 NBI の高出力・短パルス化を進め、0.7MW、15kV、100 μ sec の高出力を実現し、NBI 実験を本格化させた。際だった効果は、低エネルギー・大出力 NBI の TS-4 で大きく現れ、合体加熱後の高ベータ球状トカマク ST および磁場反転配位 FRC で 10%~30%の磁気・熱エネルギー増加と配位維持効果が認められた。NBI の有無のデータを比較すると磁気・熱エネルギー上昇は NBI のビームパワーを大きく上回っており、加熱だけでなく、NBI 由来の高エネルギーイオンが高ベータ平衡の安定性を向上させることがわかってきた。合体・リコネクション加熱の最適化により、ST を容易に絶対極小磁場配位に変換できるようになったことも大きな進展である。この配位はバルーニングモードに対する安定解析を行うと第2安定状態にあることがわかってきた。以上の高ベータ ST の合体加熱と絶対極小磁場配位の形成、FRC の NBI 実験の成果はそれぞれ Fusion Energy Conference 2012 の日本側論文に選ばれている。また、目玉であるイオン温度、電子温度、磁場の 2 次元計測も開発を終了して運用を始め、ST の合体・リコネクション加熱を画像計測した結果、リコネクション下流でアウトフローがファーストショックを形成してイオンを加熱し、電流シートのオーム加熱が電子を加熱することが明らかになった。この成果は前述 Physical Review Letters 誌に掲載された他、超高ベータ ST の合体生成の成果と共に European Physical Society の 2012 年会の基調講演 (Y. Ono) に選ばれている。

平成 24 年度は、合体加熱と 3 台の自主開発パルス NBI を駆使して超高ベータ状態を生成・維持し、3 種類の開発済 2 次元計測を駆使して高ベータ状態を維持した。TS-4 は A) ST 同士を合体する手法と B) 異極性合体で生成した FRC にトロイダル磁場を印加する手

法を最適化して 0.3-0.9 に達する超高(トロイダル) ベータ状態を作り出し、合計 0.6MW の NBI でトロイダルベータ>40%を数十マイクロ秒維持することができた。UTST は、A) 手法を最適化し、加熱パワーを最大化した。ポロイダル磁場が小さいために到達ベータ値が TS-4 に及ばなかったが、0.75MW の NBI の入射を行っている。明らかになった点は、1) 合体による高ベータ化が高ベータ不安定の成長よりも速いため、合体生成直後の高ベータ ST は安定、不安定のどちらもなること、2) B) 手法に続き、A) 手法でも交換型不安定が抑制される絶対極小磁場配位の生成に成功したこと、3) 合体 ST は q 値の上昇と共に合体加熱エネルギーの閉じ込めが向上して、ある q 値以上で磁場揺動が急増して不安定化されること、4) 高ベータ状態で発生する不安定はトロイダルモード数が 8 を大きく越え、5) 恐らく本来不安定な超高ベータ状態が NBI の高速イオンによって安定化されるため、ベータ値が上がるほど NBI の配位維持効果が大きく現れることである。

超高ベータ FRC や ST が NBI による安定性向上は 2 編の Nuclear Fusion 誌、合体加熱と NBI を組み合わせた超高ベータ実験は IAEA Fusion Energy 2012 の日本側代表論文(Y. Ono 等)に選ばれた。また、合体による ST の急速加熱はヨーロッパ物理学学会の基調講演と 2012 年 Plasma Physics and Controlled Fusion (Y. Ono 等)の招待論文に選ばれ、一般科学雑誌「パリティ」の「物理学、この 1 年」のプラズマ物理分野の進展「プラズマ中の磁力線再結合と巨大加熱(小野靖)」として取り上げられるに至っている。

平成 25 年度の大きな進展は、10 メガワットを越えるリコネクション加熱を駆使した A) ST の同極性合体、B) 異極性合体生成 FRC へのトロイダル磁場印加の 2 手法によって、それぞれ適度、極端に Hollow な電流密度・熱圧力分布を形成し、超高ベータ ST に危険な圧力駆動型・電流駆動型不安定を検証したこと、さらに一定範囲で能動制御に成功したことである。セパトロクス付近に設置した高精細磁気プローブ列によって、合体加熱終了直後、バルーニングキックと考えられる $n=25$ 程度とモード数が特定された高次モードをクリアカットに捉えることに成功した。同モードの成長によって熱圧力が漏れて、低下し、最終的に高次モード自体も低下する様子も明らかになった。熱圧力勾配が限界を超えると磁場揺動が急激に増加する実験事実、絶対極小磁場配位が広範囲に形成されるとモードの成長が抑制される実験事実を捉え、安定性解析との対応を進めた。高ベータ不安定の能動制御は、1) 合体による圧力・電流分布制御、2) 開発済みの CO-NBI (中性粒子ビーム) の安定化効果によって、一定範囲では目処がたった。結果的には、B) 手法に CO-NBI を組み合わせれば、40%の高ベータ配位の

維持時間も 0.04-0.1msec (100Alfven 時間) 程度確保できるようになった。合体加熱もベータ値も大きな TS-4 実験に開発済みのパルス NBI を 3 基を集中配置し、流速注入と追加加熱によって超高ベータ状態の ST の安定領域をある程度広げることができた。これらの成果は IAEA Fusion Energy Conference 2014 の 3 編の日本代表論文 (Inoue, Inomoto, Ono 等) に選定されたほか、IPELS 国際会議等の招待論文、電気学会学術奨励賞などで評価されている。さらに再結合磁場の二乗に比例する巨大なリコネクション加熱も、誘導電場と静電場の相乗効果で加熱が進むといったメカニズム解明が進み、以上の成果をプラズマ核融合学会誌の 2 つのリコネクション小特集に取りまとめ、内外より注目を浴びた。

最終年度は、(A) ST の同極性合体と(B) 異極性合体生成 FRC へのトロイダル磁場印加の 2 手法と中性粒子ビーム入射 NBI による高ベータ ST の安定化を広範囲で進め、限界ベータの拡大を検証した。

ベータを高めるとトロイダルモード数が 25 程度の圧力駆動型の高次不安定が発生して、配位内のプラズマ・熱エネルギーを配位外へ排出する現象が高精細の磁気計測と電子密度計測によって見出された。ST の限界ベータ値の拡大の可否はこの高次圧力駆動型不安定を抑制できるか否かであることがはっきりしてきた。同不安定はコヒーレントでトロイダル方向に回転しており、これが導体壁によってロックされると局所的に成長して密度排出・ベータ低下を招く。導体壁の設置は効果があっても、誘導電流の見積が不可欠であることがわかった。

高次不安定の回転を NBI 等の要因で増力すると、回転速度に速度シアが発生して、高次圧力駆動型不安定が抑制されることが明らかになった。高ベータを維持できる場合はこうした場合であり、その特徴として合体形成される超高ベータ ST の電流密度・熱圧力分布はかなりホローであり、第 2 安定状態の中でもバルーニングキック不安定をはじめ交換不安定が抑制される絶対極小磁場配位に近い分布であることがわかってきた。

成果公表は、まず、5 月に磁気リコネクション MR 国際会議を東京大学で主催して、合体・リコネクション加熱に関する実験・理論の研究成果を集約し、ST 合体による巨大リコネクション加熱は中心議題となった。8 月の COSPAR 会議、10 月の米国物理学学会プラズマ物理部門大会では招待講演(Y. Ono)を行い、3 編の IAEA Fusion Energy Conference 2014 の日本代表論文 (Inomoto, Inoue, Ono) で ST の合体・リコネクション加熱の桁違いに大きい加熱の物理と有用性を紹介した。一般科学雑誌日経エレクトロニクスからも取材があり、2015 年 2 月号で合体・リコネクション加熱炉

の有用性が紹介された。Physics of Plasmas 誌の依頼により、同誌の磁気リコネクション論文特集を進めており、最終的な成果公表に用いる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 48 件)

- 1) S. Inoue, Y. Ono, R. Horiuchi and C. Z. Cheng, "Numerical study of energy conversion mechanism of magnetic reconnection in the presence of high guide field", to be published in Nuclear Fusion.
- 2) Y. Ono, H. Tanabe, T. Yamada, etc., "High Power Heating of Magnetic Reconnection in Merging Tokamak (Invited)", Physics of Plasmas Experiments 22, 055708 (2015).
- 3) Keii Gi, Yasushi Ono, Makoto Nakamura, Youji Someya, Hiroyasu Utoh, Kenji Tobita, Masayuki Ono, "Conceptual design of the moderate-size superconducting spherical tokamak power plant", Nuclear Fusion 55, 063036, (2015).
- 4) M. Inomoto, T. G. Watanabe, K. Gi, K. Yamasaki, etc., "Centre-solenoid-free merging start-up of spherical tokamak plasmas in UTST", Nuclear Fusion, 55, 033013 (2015).
- 5) Y. Ono, S. Inoue, Y. Hayashi, R. Horiuchi, "Plasmoid Ejection Mechanism in Dynamic Divertor Experiment and Simulations", Fusion Energy 2014, PD/P5-5 (8pp), (2014).
- 6) M. Inomoto, T.G. Watanabe, K. Yamasaki, Y. Ono etc., "Generation of Energetic Electrons by Magnetic Reconnection with Presence of High Guide Field", Fusion Energy 2014, EX/P1-51 (8pp), (2014).
- 7) K. Gi, Y. Ono, M. Nakamura, Y. Someya, N. Aiba, H. Utoh, K. Tobita, "Conceptual Design Study of the Large Size and Low Magnetic Field Superconducting Spherical Tokamak Power Plant", Fusion Energy 2014, FIP/P7-15 (8pp), (2014).
- 8) S. Inoue, Y. Ono, H. Tanabe, B. Guo, Y. Kaminou, R. Horiuchi and C. Z. Cheng, "Numerical study of energy transfer mechanism of magnetic reconnection /torus plasma merging under high toroidal magnetic field", Fusion Energy 2014, ICC/P4-48 (8pp), (2014).
- 9) T. Ii, M. Inomoto, K. Gi, T. Umezawa, T. Ito, K. Kadowaki, Y. Kaminou and Y. Ono, "Stability and confinement improvement of an oblate field-reversed configuration by using neutral beam injection", Nuclear Fusion 53, 073002 (5pp), (2013).
- 10) T. Ii, Y. Ono, "Spontaneous three-dimensional magnetic reconnection in merging toroidal plasma experiment", Physics of Plasmas 20, 012106, (2013).
- 11) 小野靖, "物理科学この1年 プラズマ中の磁力線再結合と巨大加熱", パリティ 28, 14-15 (2013).
- 12) H. Tanabe, A. Kuwahata, H. Oka, M. Annoura, H. Koike, K. Nishida, S. You, Y. Narushima, A. Balandin, M. Inomoto, Y. Ono, "Two-dimensional ion temperature measurement by application of tomographic reconstruction to Doppler spectroscopy", Nuclear Fusion 53, 093027 (6pp), (2013).

13) M. Inomoto, A. Kuwahata, H. Tanabe, Y. Ono, "Excitation and propagation of electromagnetic fluctuations with ion-cyclotron range of frequency in magnetic reconnection laboratory experiment", Physics of Plasmas 20, 061209 (2013).

14) Y. Ono, H. Tanabe, T. Yamada, M. Inomoto, T. Ii, S. Inoue, K. Gi, T. Watanabe, M. Gryaznevich, R. Scannell, C. Michael, C. Z. Cheng, "Ion and electron heating characteristics of magnetic reconnection in tokamak plasma merging Experiments (Invited)", Plasma Physics and Controlled Fusion 54, 124039-124049, (2012).

15) N. Nishizuka, Y. Hayashi, H. Tanabe, A. Kuwahata, Y. Kaminou, Y. Ono, M. Inomoto, T. Shimizu, "A Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection: Outflows, Heating, and Waves in Chromospheric Jets", Astrophysical Journal 756, 152 – 161, (2012).

16) T. Ii, K. Gi, T. Umezawa, T. Asai, M. Inomoto, Y. Ono, "Development of a low-energy and high-current pulsed neutral beam injector with a washer-gun plasma source for high-beta plasma experiments", Review of Scientific Instruments 83, 083504-083509, (2012).

17) 小野靖, "小特集:球状トカマク研究の進展 2.4 球状トカマク合体の応用", プラズマ核融合学会誌 88, 733-739, (2012).

18) T. Yamada, R. Imazawa, S. Kamio, R. Hihara, Y. Ono 等, "Double Null Merging Start-up Experiments in the University of Tokyo Spherical Tokamak", Fusion Energy 2010, (2011).

19) S. You, H. Tanabe, Y. Ono, A. L. Balandin, "Vector and scalar tomography of compact toroid plasmas", Journal of Fusion Energy 29, 592-595, (2011).

20) Y. Ono, H. Tanabe, Y. Hayashi, T. Ii, Y. Narushima, T. Yamada, M. Inomoto, C. Z. Cheng. "Ion and Electron Heating Characteristics of Magnetic Reconnection in a Two Flux Loop Merging Experiment", Physical Review Letters 107, 185001-185005, (2011).

21) Y. Ono, Y. Hayashi, T. Ii, H. Tanabe, S. Ito, A. Kuwahata, T. Ito, Y. Kamino, T. Yamada, M. Inomoto, TS-Group, "Intermittent magnetic reconnection in TS-3 merging experiment", Physics of Plasmas 18, 185001-185005, (2011).

22) 田辺博士, Setthivoine You, 桑波田晃弘, 伊藤慎吾, 井通暁, 小野靖, "多数の視線積分された分光スペクトルを用いた 2 次元局所イオン温度分布計測システム", 電気学会論文誌 A 130A, 772-773, (2010).

その他 26 編

[学会発表] (計 207 件)

1) Yasushi Ono, "Ion end Electron Heating Characteristics of Field-Reversed Configuration (FRC) in TS-3 and TS-4 Merging Startup Experiments (Invited)", Workshop on Exploratory Topics in Plasma and Fusion Research (EPR) and US-Japan Compact Torus (CT) Workshop, Madison, (USA), Aug. 7, 2014.

2) Yasushi Ono, "Laboratory Reconnection

Experiments -Heating and particle acceleration” , 42nd Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR 2014), Moscow (Russia), Aug. 2-10, 2014.

3) Yasushi Ono, “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Tokamak Merging Experiments (Invited)” , Bulletin of the American Physical Society (56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics), 59, NI2.00003, New Orleans (USA), Oct. 27-31, 2014.

4) Y. Ono, “Physics of Reconnection Heating in Tokamak Plasma Merging Experiments (Invited)” , The 12th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and Space (IPELS2013), Hakuba Tokyu Hotel, (Nagano, Hakuba), July 1- 5, 2013.

5) Y. Ono, “Review of Reconnection Experiments (Invited)” , The Third East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas, National Olympics Memorial Youth Center, (Yoyogi, Tokyo), July 8- 12, 2013.

6) Y. Ono, M. Inomoto, T. Yamada, H. Tanabe, T. Ii, S. Inoue, K. Gi, T. Watanabe, M. Gryaznevich, R. Scannell, C. Mihchael, B. Lloid, C. Z. Cheng “Ion and Electron Heating Characteristics of Magnetic Reconnection in Tokamak Plasma Merging Experiments (invited)”, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics and 16th International Congress on Plasma Physics, Stockholm (Sweden), 2-6 July 2012

7) Y. Ono, “Laboratory experiments of magnetic reconnection in TS-3, TS-4, UTST and MAST (invited)” , POSTECH Colloquium, Pohang, (Korea), Oct 17, 2012.

8) Y. Ono, “Physics and Application of Magnetic Reconnection in Toroidal Plasmas (Invited)”, 22nd International Toki Conference "Cross-Validation of Experiment and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas", Ceratopia Toki, (Gifu, Toki), Nov. 19-22, 2012

9) Y. Ono, “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Tokamak Plasma Merging Experiments (Invited)” , MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas (LSAP2011) Workshop, Beijing (China), May 30, 2011.

10) Y. Ono, “High Power Heating of Magnetic Reconnection in Laboratory Merging Experiments (Invited)” , 11th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS), p. 63, Whistler, (Canada), Jul. 10-15, 2011.

11) M. Inomoto, Y. Hayashi, S. Ito, P. Copinger, etc., “Wave and Plasmoid Mediated Reconnection in Laboratory Experiments (invited)” , 11th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS), p. 6, Whistler (Canada), p. 66, Jul. 10-15, 2011.

12) Y. Ono, H. Tanabe, T. Ii, Y. Hayashi, etc., “High Power Heating of Magnetic Reconnection in TS-3,

TS-4 and UTST Merging Experiments (Invited)”, The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011) and 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, National Institute for Fusion Science, Ceratopia Toki, (Gifu, Toki), Sep. 27-30, 2011.

13) Y. Ono, M. Inomoto, T. Yamada, “High Power Reconnection Heating of FRCs and STs in TS-3 and TS-4 Merging Experiment (invited)” , Innovative Confinement Concepts (ICC), Seattle (USA), Aug. 16-19, 2011.

14) Y. Ono, H. Tanabe, T. Ii, Y. Hayashi, S. Ito, P. Copinger, S. Inoue, S. Gi, T. Watanabe, A. Matsuda, T. Sakamoto, K. Kadowaki, T. Ito, T. Umezawa, Y. Oka, R. Kotani, S. Kamio, Q. H. Cao, N. Suzuki, T. Itagaki, K. Takemura, K. Yamasaki, T. Yamada, M. Inomoto, “High Power Heating of Magnetic Reconnection in TS-3, TS-4 and UTST Merging Experiments (Invited)”, 2011 Northeastern Asian Symposium on Plasma Fusion, Deajon (Korea), Sept. 25-28,

15) 小野靖, 「シンポジウム R2 実験・観測・シミュレーションの連携で解くプラズモイド・リコネクションの謎：1. 趣旨説明, 実験で探るプラズモイドによるリコネクションの高速化(招待)」, Plasma Conference 2011, 石川音楽堂(石川県,金沢市), 2011年11月22日.

16) Y. Ono, “Laboratory Magnetic Reconnection Experiments (招待)”, 38th Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR 2010), Bremen (Germany), Jul. 17, 2010.

17) Y. Ono, “Laboratory Magnetic Reconnection Experiments (招待)”, The 11th Asian Pacific Physics Conference (APPC11), Shanghai, (China), Nov. 16, 2010.

18) Y. Ono, “High Power Heating of Magnetic Reconnection in TS-3, TS-4, UTST and MAST Merging Experiments (招待)”, US-JAPAN Workshop on Magnetic Reconnection 2010 (MR2010), 日航ホテル奈良(奈良県奈良市), 2010年12月8日.

19) 小野, 林, 伊井, 田辺, 井, “TS-3, 4 合体実験におけるインパルス型磁気リコネクション(招待)”, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ(千葉県幕張市), 2010年5月24日.

その他 189 編

6. 研究組織

(1)研究代表者

小野 靖 (ONO Yasushi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 30214191

(2)研究分担者

榊田 創 (SAKAKITA Hajime)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー
技術研究部門・主任研究員, 研究者番号: 90357088
井 通暁 (INOMOTO Michiaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号: 00324799

清水 敏文 (SHIMIZU Toshifumi)

独立行政法人宇宙科学研究機構・宇宙科学研究
本部・准教授, 研究者番号: 60311180