

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287144

研究課題名(和文) イオン流体と電子流体を用いた2流体プラズマ生成の試行と基礎的枠組みの統合的提示

研究課題名(英文) Experimental studies on two-fluid plasmas by using lithium ion and electron plasmas

研究代表者

比村 治彦 (Himura, Haruhiko)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：30311632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：2流体プラズマ状態を明らかにするために、本研究ではイオンだけから成るイオンプラズマと電子だけからなる電子プラズマをBX-U装置内で重畳させた。そして、この重畳後に各プラズマが独立運動を維持するか、あるいは1流体プラズマに緩和するかを観察した。実験の結果、イオンプラズマも電子プラズマもその巨視的形狀を変化させるが、かなり長い時間経過しても1流体プラズマには緩和しないように見える。

研究成果の概要(英文)：To explore the physics of two-fluid plasmas, we superimpose pure ion plasmas with pure electron plasmas in the BX-U linear trap. Although the two-dimensional density profiles of the both plasmas are changed after the superimposition, it appears that they are not relaxed to one-fluid plasma. This result suggests that the produced two-fluid plasma is so robust that their macroscopic structure can be maintained for a while.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：2流体プラズマ 非中性プラズマ 2流体効果 プラズマ閉じ込め ペニングトラップ プラズマ回転
平衡 2次元画像計測 誘導電荷計測

1. 研究開始当初の背景

様々な領域に広がるプラズマには、その学理が、実験、理論、計算の協奏により確立されているという共通性がある。近年、理論計算の進歩に伴い、プラズマに対する素朴な定義の枠外へ出る「2 流体プラズマ」が、多くのプラズマ関連分野で取り上げられている。一方、実験からも 2 流体の存在を示唆する間接データが出されつつあるものの、実験の難易度が高く、その詳細は不明である。2 流体プラズマとは、第一義的には、プラズマを構成するイオン流体と電子流体がそれぞれ独立に運動するプラズマである。したがって、1 流体(MHD)という考え方に比べて 2 流体プラズマの自由度は大きい。数学的には方程式の型が双曲型に変わるため、MHD にはない運動形態の解が現れる。物理的共通認識からも考えてみると、例えば、MHD 成立条件の対偶を取れば、「電子-イオン間の衝突が少なく、ラーマー周期の数十倍程度までの比較的速い現象のすべては 2 流体プラズマにより支配される」となるが、これは理論計算が予測する流体の運動方向やスケール長などについて何も言わない。観測事実があまりに不足している。そのため、2 流体プラズマとは、出発点である根本の所をどう捉えたらいいのかさえ不明なパズルの様相を呈している。

2. 研究の目的

そこで本研究では、非中性プラズマと呼ばれるイオンだけから成るイオンプラズマと電子だけからなる電子プラズマを別々に生成する。これらのプラズマを共通の閉じ込め磁場を持ちながらも、ポテンシャル井戸の極性が互いに反対となっている 2 つのペニングトラップ内に閉じ込めると、イオンプラズマと電子プラズマは、磁力線周りの回転方向が互いに逆となっている回転平衡状態になる。さらに、これらのプラズマは熱的にも熱平衡状態に緩和している。したがって、熱運動に起因する不確定さを流体運動から完全に取り除くことができる。

これらのイオンプラズマと電子プラズマをネスト型トラップ中で互いにマーキングする。このときのイオン表皮厚の長さが装置サイズ以上になるように、イオン密度を調整しておく。もし、理論計算が言う所の理想的な 2 流体プラズマ状態が生じる場合、このマーキングされているプラズマの中のイオンと電子のダイナミクスが 2 流体プラズマ物理にしたがうものになるはずであり、この状態のイオンプラズマと電子プラズマから生じるプラズマ現象が 2 流体効果を反映するものになる。実験では、イオンプラズマと電子プラズマの巨視的ダイナミクスを観察することを第一目的として、そのダイナミクスを理論計算と比較する。この研究方法により、2 流体プラズマに対する基本的な考え方の枠組みを提示し、様々なプラズマ関連分野における開発研究の発展に貢献する。

3. 研究の方法

図 1 は、本研究で開発した実験装置 BX-U の鳥瞰図である。円筒の軸方向に一定の磁場を印加するために、装置にはソレノイドコイルが付けら

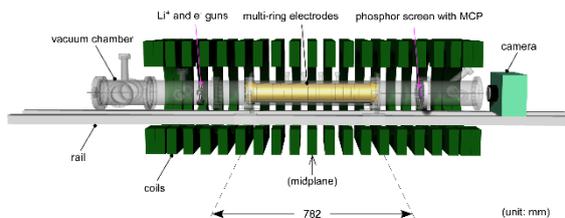


図 1 本研究で開発した実験装置の鳥瞰図。

れている(緑色)。なお、ソレノイドコイルの内側の様子を分かりやすく示すために、このソレノイドコイルだけは断面図で表示している。このソレノイドコイルに約 1 kA の定常電流を本科学研究費で措置して頂いた低リップル大直流発生電源(YAMABISHI 製)から流すことで、約 0.1 T の磁場を円筒容器内(灰色)に印可できる。円筒容器は 2 台のロータリーポンプと 2 台のターボ分子ポンプで 10^{-9} - 10^{-10} Torr の超高真空状態に引かれている。

円筒容器の内部には、中空型の円筒リング群(金色)が設置されている。この円筒リング一つ一つに、図 2 の点線(青色)で示されている電圧を印加することで、円筒リングの中心軸上には、図 2 に実線(赤色)で表されているハーモニック電位井戸を 2 つ作成することができる。以下では、便宜上、左側の電位井戸を正の井戸、右側の電位井戸を負の井戸と呼ぶことにする。

負の井戸には電子だけからなる電子プラズマを生成する。この生成には、4 本の電子ビームを用いている。それらビームはマイクロ型フィラメントから熱電子を放出する型のものであり、図 2 の正の井戸の位置($z = -0.2$ m)からさらに左側の装置上流の位置の真空内に置かれている。この電子ビーム源の特徴は、それらが円筒容器の中心軸から約 23 mm の距離だけ離れた同心円上に、90 度間隔で置かれていることである。負の井戸の左側(上流側)の電位障壁の電圧を 0 V に下げること、4 本のビーム束は負の井戸内に入る。この負の井戸内で、これら 4 本のビームは自発的にマーキングし、中心軸上で回転平衡する 1 つの電子プラズマになる。このマーキングを介した

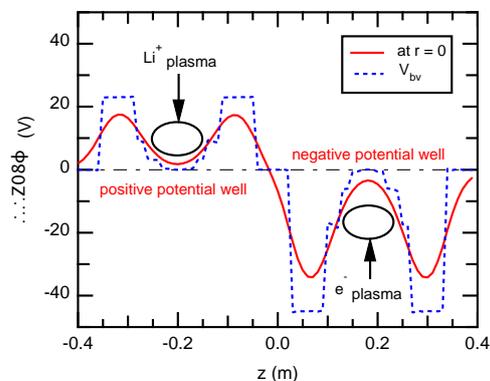


図 2 実験装置内に作られる正負電位井戸。それらの井戸内に、z 軸の周りに互いに反方向の回転運動を行う熱平衡状態のイオンプラズマと電子プラズマを別々に作り出し、かつ、同時に閉じ込める。

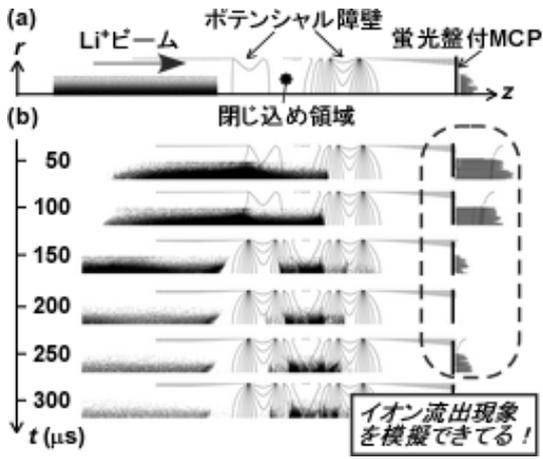


図 3 リチウムイオンビームが正の井戸に入射し、正の井戸の左側電位障壁が閉められた後、徐々に平衡状態に緩和していく様子を表している PIC シミュレーション計算の例。このシミュレーションは、電位障壁が閉じられる間にリチウムイオンが加速されて正の井戸から漏出する観測結果も再現している(投稿中)。

電子プラズマ生成法の詳細については、発表論文⑦を参照されたい。

イオンからだけから成る純イオンプラズマの生成については、本研究ではベータユークリプタイト源(ソース)を 1 つ用いている。このソースからリチウムイオンを低速ビームとして引き出すことができる。電子プラズマ生成の場合とは異なり、この 1 つのソースは装置軸上に設置されている。リチウムイオンビームを引き出すと同時に、正の井戸の左側(上流側)電位障壁の電圧を 0 V に下げること、リチウムイオンビームを正の井戸内に閉じ込める。磁場強度が 0.1 T と弱い、リチウムイオンプラズマの閉じ込め時間は約 10 s に達しており、これはイオン同士間の衝突時間と同程度である。図 3 は、リチウムイオンプラズマの平衡配位を計算したものであり、この密度分布は測定結果と合っている。したがって、このリチウムイオンプラズマも概ね熱緩和していると考えられる。一方、イオン温度については、エネルギー分析によると 1 eV 程度はある。上述のような方法で電子プラズマとイオンプラズマを生成する方法は、他に例を見ない BX-U 装置独自の手法である。

本研究では、当初計画通り、実験の他にシミュレーションコードの開発も行ってきた。図 3 に示している時系列データは、リチウムイオンビームが正の井戸に入射して閉じ込められ、平衡状態に

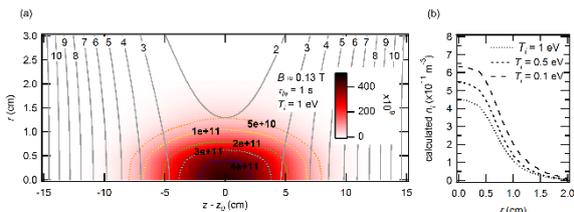


図 3 リチウムイオンプラズマが熱平衡かつ回転平衡状態に緩和している場合の空間分布の計算例。観測結果はこの密度分布と合っており、イオンプラズマが概ね熱平衡状態に達していることを示してある。

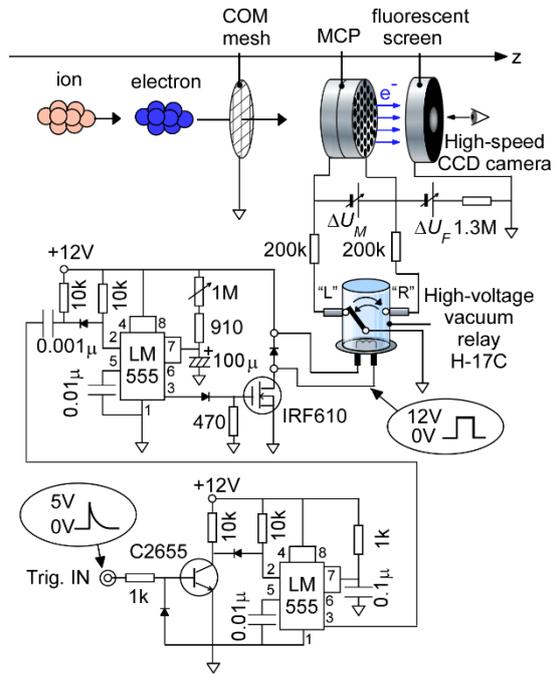


図 4 MCP で電荷極性の異なるイオンと電子を連続的に測定するためのリレー回路。この回路は、真空リレーを用いて、MCP に印可する DC 電圧の低圧側接地ポインタを高速で切り替える。

緩和していく過程の PIC シミュレーション結果である。このシミュレーションコードを併用することで、非中性プラズマトラップのトラップ効率を左右している未解明現象の物理メカニズムも明らかになってきており、現在、それらの研究結果を論文にまとめている。PIC シミュレーションコードの開発に成功したことで、実験結果を説明する幾つかの物理的根拠を明確に示すことができている。本研究で目指した事の一つに、実験と計算を併用することによる研究の加速を掲げていた。それを達成しただけでなく、基礎研究では、このような併用方法が適切であることを実証している。計算と実験のコラボレーションは、投稿論文の舞台裏で行われることであり目の目を見ないが、本研究が示した重要な成果の一つであり、研究代表者の今後の研究活動に指針を与えてくれた。

プラズマの測定方法に関しても、全く新しい手法を開発した。一般的に、BX-U 装置のような直線型の真空装置内で閉じ込められている電子プラズマとイオンプラズマの測定は、電子プラズマとイオンプラズマを閉じ込めている電位障壁を 0 V に下げて、それぞれのプラズマを磁力線に沿って z 軸方向に排出することで行う。装置下流端のその磁力線上に、マイクロチャンネルプレート(MCP)を置いておくと、磁力線に沿って流れ出てきたプラズマが MCP に入射するので、MCP の出力信号の 2 次元断面分布からプラズマの 2 次元分布を測定することができる。

これまでに、MCP を電子プラズマ測定に適用した例は多くある一方で、MCP をイオンプラズマ測定に適用した例は少なく、リチウムイオンに用いた例はない。また、アルゴンイオンに用いた報告では、MCP に入射したアルゴンイオン数から期

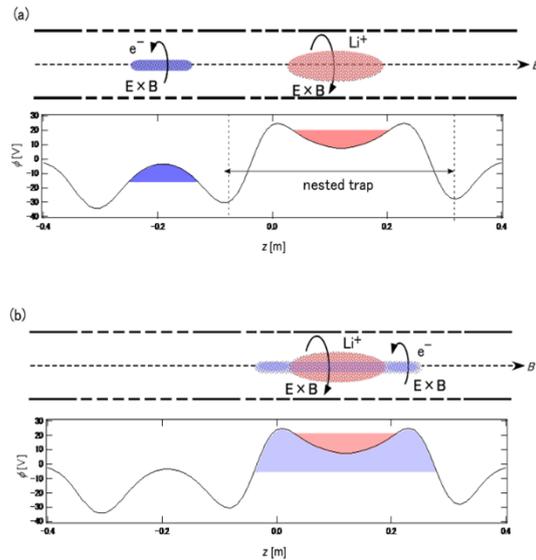


図5 (a) 磁力線の周りを互いに反平行方向に回転しながら熱緩和しているリチウムイオンプラズマと電子プラズマが独立にかつ同時に閉じ込められている様子. (b) その後、電子プラズマを閉じ込めている負の井戸の右側電位障壁を値を 0 V にすることで、電子プラズマをリチウムイオンプラズマに重畳している様子. この系の特性長は、いわゆる2流体効果が働くと理論予測されているイオンスキン長オーダーより短い. つまり、プラズマ全域で2流体効果が働くことになる.

待される出力信号値よりはるかに小さな出力しか得られていない. 本研究では、リチウムイオンを用いて、まずこの疑問を実験的かつ解析的に解決した(論文④参照). 次に、一般にMCPを荷電粒子の測定に用いる場合、測定対象の荷電粒子は正の電荷のみ、あるいは、負の電荷のみに限られてきた. これは、MCPに印可する電源電圧がDCであることによっている. 本研究では、この使用上の制約を外す方法を着想し、そのための回路系を構築して実際に実証した(論文⑤参照). 図4はその回路系を示している. この方法を使うことで、イオンプラズマと電子プラズマを一つのMCPで連続的に測定することができる.

4. 研究成果

このように、独自のアイデアで設計製作した実験装置、制御系、計測器を用いて、異なる流体運動を独立に行っているリチウムイオンプラズマと電子プラズマのマーキングを図5に示している手順で行った. このマーキングは、プラズマ物理の教科書に書かれている2流体方程式から1流体MHD方程式を導出する手順を実験的に模擬している. この実験のパラメーターはイオン密度であり、イオン密度を変えることでイオンの表皮厚の長さを変化させることができる. BX-Uの典型的なイオン密度の値から得られるイオン表皮厚は、BX-U実験装置の装置サイズより長い. したがって、このマーキング実験で観測されるリチウムイオンプラズマと電子プラズマの巨視的流体運動は、イオン表皮厚のスケール内で生じるものということになる.

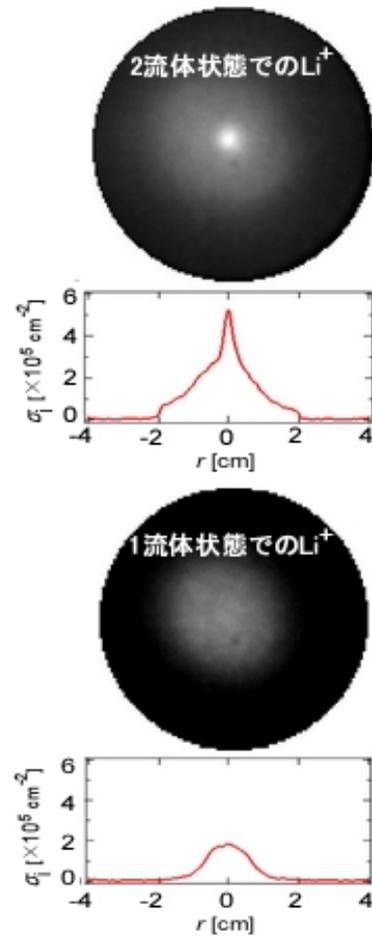


図6 リチウムイオンプラズマと電子プラズマを一定時間マーキング(重畳)させる前後のリチウムイオンプラズマの2次元断面イメージと径方向密度分布の例.

図6は、リチウムイオンプラズマと電子プラズマを数msの間、マーキングさせる前後のリチウムイオンプラズマの2次元断面イメージとその径方向分布の一例である. 下のイメージを基準として見てみよう. マーキング前、つまり、リチウムイオンプラズマと電子プラズマを重畳する前は、リチウムイオンプラズマは装置中心におり、かつ、その密度分布はガウス分布のような滑らかな分布になっていることが分かる. 一方、電子プラズマと重畳させた後に撮影された上のイメージ図と分布を見てみると、中心部が鋭いピークを持つ分布に変化していることが分かる. また、巨視的に見て、プラズマ構造の大きな乱れも確認されず、巨視的な不安定性は何も現れていないように見える. これ等の結果として、イオンの径方向輸送係数が小さくなる、言い換えると、イオンの閉じ込めが良くなったことを示唆しているように見える. この結果は電子プラズマとの重畳を介して得られており、その重畳中に、リチウムイオンプラズマと電子プラズマの間に2流体効果が働き、イオンの径方向輸送係数が変化した可能性がある.

上記の結果を詳細に調べるために、現在もイオンビーム密度と重畳時間の2つの実験パラメーターを変化させながら、リチウムイオンプラズマと電子プラズマの巨視的構造に現れる変化との

対応を実験的に調べている。この結果がまとめ次第、投稿論文として発表する予定である。

最後に、この重畳実験で新たに判明した実験上の注意点を記しておく。MCP で得られるイメージ図には、イメージ図を撮る直前のショットの履歴が含まれるケースがある。この履歴には、リチウムイオン、あるいは、バックグラウンド中性粒子の電離によるイオンも含まれており、実験データのいわゆる誤差となる。これも実験を進めるうえでの非常に重要な発見であり、現在、投稿論文にまとめている。本研究手法による 2 流体プラズマ系の実験的開拓は端緒に就いたが、この履歴をうまく排除しながら実験を進めることが肝要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① H. Himura, S. Kawai, K. Akaike, S. Okada, J. Aoki, S. Masamune, ‘Intermittent ion leakage from a Penning trap during potential barrier closure’, *submitted to Phys. Rev. Lett.* (2017). 査読有
- ② A. Sanpei, K. Nishimura, Y. Aoki, S. Masamune, H. Himura, S. Ohdachi, N. Mizuguchi, ‘Features of the Electron-temperature Distribution in a Low-Aspect-Ratio Reversed Field Pinch Plasmas’, *J. Phys. Soc. Jpn* **86**, 063501-1 – 063501-4 (2017). (4 pages) (doi: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.063501>) 査読有
- ③ T. Onchi, A. Fujisawa, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, ‘Permutation entropy and statistical complexity in characterizing low-aspect-ratio reversed-field pinch plasma’, *Physica Scripta* **92** (5), 055601-1 – 000601-8 (2017). (8 pages) (doi: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa6689>) 査読有
- ④ H. Himura, S. Nakata, A. Sanpei, ‘Applicability of micro-channel plate followed by phosphor screen to charged particles’, *Rev. Sci. Instrum.* **87** (6), 063306-1 – 063306-7 (2016). (7 pages) (doi: [10.1063/1.4954406](https://doi.org/10.1063/1.4954406)) 査読有
- ⑤ S. Yamada, H. Himura, ‘Note: Consecutive capture of images of ions and electrons using high-voltage vacuum relay’, *Rev. Sci. Instrum.* **87** (3), 036109-1 – 036109-3 (2016). (3 pages) (doi: [10.1063/1.4944861](https://doi.org/10.1063/1.4944861)) 査読有
- ⑥ S. Kawai, H. Himura, S. Masamune, J. Aoki, ‘Initial results of confinement of weakly magnetized lithium ion plasmas in a harmonic potential well of the beam experiment upgrade linear trap’, *Phys. Plasmas* **23** (2), 022113-1 – 022113-7 (2016). (7 pages) (doi: <https://dx.doi.org/10.1063/1.4942227>) 査読有
- ⑦ H. Himura, ‘BX-U linear trap for one-way production and confinement of Li⁺ and e⁻ plasmas’, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A 811** (3), 100 – 107 (2016). (8 pages) (doi: [10.1016/j.nima.2015.12.024](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.024)) 査読有
- ⑧ S. Masamune, A. Sanpei, Y. Aoki, T. Nagano, M. Higuchi, S. Nakanobo, R. Tsuboi, H. Himura, N. Mizuguchi, T. Akiyama, T. Mizuuchi, K. McCollam, D. Den Hartog, D. Paccagnella, ‘Improved Low-Aspect-Ratio RFP Performance with Active MHD Control and Associated Change in Magnetic Topology in RELAX’, 26th IAEA Fusion Energy Conference, (Kyoto, Japan, Oct.17-22, 2016) EX/P5-22, p.316 (1 page). 査読有
- ⑨ H. Himura, T. Noichi, S. Nakata, S. Kawai, A. Sanpei, ‘Improvement of confinement times of lithium ion and electron plasmas in BX-U’, *Non-neutral Plasma Physics IX (AIP Conf. Proc. 1668)*, 050004-1 – 05004-4 (2015). (4 pages) (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4923123>) 査読有
- ⑩ A. Sanpei, Y. Soga, K. Ito, H. Himura, ‘Phase space analysis for dynamics of three vortices of pure electron plasma trapped with Penning trap’, *Non-neutral Plasma Physics IX (AIP Conf. Proc. 1668)*, 030002-1 – 030002-6 (2015). (6 pages) (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4923111>) 査読有
- ⑪ H. Himura, M. Yamamoto, N. Mizuike, A. Kiyohara, ‘Development of prototype apparatus for creating ZnO at low temperature by DEZn and O⁻ plasmas’, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 01AA05-1 – 01AA05-4 (2015). (4 pages) (doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.01AA05>) 査読有
- ⑫ H. Tanaka, S. Masamune, S. Nakaki, A. Sanpei, K. Nishimura, R. Kodera, G. Ishii, R. Ueba, H. Himura, R. Paccagnella, ‘Effect on plasma performance of a single MHD mode feedback control in low-aspect-ratio RFP RELAX’, *Plasma and Fusion Research* **9**, 1302057-1 – 1302057-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑬ S. Masamune, A. Sanpei, H. Tanaka, K. Nishimura, R. Ueba, G. Ishii, R. Kodera, H. Himura, N. Mizuguchi, K. Ichiguchi, T. Akiyama, K. Kawahata, D.J. Den Hartog, D. Paccagnella, H. Koguchi, ‘Attainment of high electron poloidal b in axisymmetric state and two routes to self-organized helical state in low-aspect-ratio RFP’, 25th IAEA Fusion Energy Conference, (St. Petersburg, Russia, Oct.13-18, 2014) EX/P3-52, 245-1 – 245-7 (7 pages). 査読有

- ⑭ H. Himura, A. Sanpei, Y. Nishioka, S. Masamune, 'Feasibility of growth of ZnO cluster in penning trap', JPS Conf. Proc. **1**, 015067-1 – 015067-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑮ H. Shimomura, H. Himura, A. Sanpei, S. Masamune, 'Effects of rotating electric field on simultaneous confinement of lithium and electron plasmas', JPS Conf. Proc. **1**, 015040-1 – 015040-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑯ S. Nishioka, H. Himura, A. Sanpei, S. Masamune, 'Analysis of orbital E x B rotation of non-neutral plasmas formed in BX-U', JPS Conf. Proc. **1**, 015041-1 – 015041-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑰ A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, 'Formation process of non-neutral plasmas by multiple electron beams on BX-U', JPS Conf. Proc. **1**, 015039-1 – 015039-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑱ A. Sanpei, K. Nishimura, S. Masamune, H. Tanaka, H. Himura, S. Ohdachi, N. Mizuguchi, T. Akiyama, 'Measurement and evaluation of 3-D structure in low-aspect-ratio RFP RELAX with dual SXR imaging system', JPS Conf. Proc. **1**, 015027-1 – 015027-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑲ K. Nishimura, A. Sanpei, H. Tanaka, G. Ishi, R. Kodera, R. Ueba, H. Himura, S. Masamune, S. Ohdachi, N. Mizuguchi, '2-D electron temperature diagnostic using soft-x ray imaging technique', Rev. Sci. Instrum. **85**, 033502-1 – 033502-4 (2014). (4 pages) 査読有
- ⑳ R. Ueba, S. Masamune, A. Sanpei, K. Uchiyama, H. Tanaka, K. Nishimura, G. Ishi, R. Kodera, H. Himura, D. J. Den Hartog, H. Koguchi, 'Electron temperature measurement by Thomson scattering in a low-aspect-ratio RFP RELAX', Plasma and Fusion Research **9**, 1302009-1 – 1302009-4 (2014). (4 pages) 査読有

[学会発表] (計 3 5 件)

- ① 比村治彦, 河合祥吾, 岡田成文, 青木順, 政宗貞男, 伊藤淳, 三浦英昭, 'Li⁺プラズマとe⁻プラズマを用いた2流体プラズマ実験用シミュレーションコードの開発', 日本物理学会, 2017年3月18日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
- ② 古川耕佑, 比村治彦, 山田祥平, 河合祥吾, 岡田成文, 政宗貞男, 'ブリルアン密度に近いリチウムイオンプラズマの弱磁場中における巨視的安定性の観察', 日本物理学会, 2017年3月18日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
- ③ 比村治彦, 河合祥吾, 山田祥平, 古川耕佑, 赤池聖公, 岡田成文, 政宗貞男, 'リチウムイオンプラズマと純電子プラズマを用い

た2流体プラズマ生成実験', プラズマ・核融合学会, 2016年11月29日, 東北大学(宮城県・仙台市)

- ④ H. Himura et al., 'The BX-U linear trap applied to test two-fluid plasma effect by using lithium and electron plasmas', 米国物理学会プラズマ物理分科会, 2016年11月2日, カリフォルニア州サンノゼ(アメリカ)

他 31 件

[図書] (計 1 件)

- ① NON-NEUTRAL PLASMA PHYSICS IX: 11th International Workshop on Non-Neutral Plasmas, edited by Haruhiko Himura, Akio Sanpei and Yukihiro Soga (2015 AIP Publishing LLC, Volume 1668, 2015年6月発行, Melville, New York, USA, ISBN: 978-0-7354-1315-3) 全 174 頁

[その他]

研究代表者が主宰する研究室ホームページの URL <http://nuclear.es.kit.ac.jp/new/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比村 治彦 (HIMURA HARUHIKO)
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授
研究者番号: 30311632

(2) 研究分担者

政宗 貞男 (MASAMUNE SADAŌ)
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授
研究者番号: 00157182

三瓶 明希夫 (SANPEI AKIO)
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・講師
研究者番号: 90379066

(3) 連携研究者

三浦 英昭 (MIURA HIDEAKI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 40280599

伊藤 淳 (ITO ATSUSHI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 70413987

神吉 隆司 (KANKI TAKASHI)
海上保安大学校・教授
研究者番号: 40524468

岡田 成文 (OKADA SHIGEFUMI)
大阪大学・名誉教授
研究者番号: 40135661