

令和 2 年 9 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02245

研究課題名(和文) Magnetized Fast Ignitionの原理実証

研究課題名(英文) Proof-of-principle of Magnetized Fast Ignition

研究代表者

藤岡 慎介 (Fujioka, Shinsuke)

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：40372635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我が国独自のレーザー核融合の点火方式である高速点火の加熱効率の向上を目指した。非常に強い磁場を用いて、レーザー加速電子ビームを核融合燃料に向けて誘導する磁化高速点火法を提案し、その原理実証を行った。世界最大級のパワーを誇る大阪大学レーザー科学研究所のLFEXレーザーをもち、世界一の効率で太陽中心の1/10に匹敵する超高圧力状態(200億気圧)のプラズマの生成に成功した。成果の実現には、1キロテスラ(一般的な磁石の1000倍の強さ)という地上最大級の磁石の発明と、大型レーザーで生成できない加熱レーザーで駆動される熱波が寄与した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽は核融合によるエネルギーで輝いており、核融合エネルギーは地球上の全ての生命の源と言える。僅か1gの燃料で石油8トンに相当するエネルギーを二酸化炭素を排出せずに生み出せることから、究極のエネルギー源と目されている。効率的なプラズマ加熱は、経済的な核融合発電の実現にとって必須であり、核融合発電の実現に向けた大きな前進である。また高温度かつ高密度なプラズマは高エネルギー密度プラズマと呼ばれ、その特性は星の内部と同等である。望遠鏡で観測するしかない遠くの星と同じ状態を実験室で作り出すことで、宇宙及び天体と関連する物理現象を実験室内で研究する学術的プラットフォームとしても発展も期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aimed at improving the heating efficiency of the fast ignition, which is an ignition method of laser fusion unique to Japan, we demonstrated a magnetization fast ignition scheme using a very strong magnetic field. With the LFEX laser at the Institute of Laser Engineering, Osaka University, which boasts the world's largest power, we succeeded in producing plasma having the ultrahigh-pressure state (20 billion atmospheric pressure), which is 1/10 of that at the sun center, with the highest efficiency in the world. This achievement is contributed by the inventions of one of the largest 1 kilo-tesla magnet on the ground (1000 times stronger than usual magnets) and the heatwave driven by a long-pulse heating laser that could be generated only by a large laser system.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：レーザー核融合 高速点火 強磁場 高強度レーザー 相対論的電子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高速点火方式のレーザー核融合とは、加熱レーザーである短パルス高強度レーザーで加速した相対論的電子ビームで、予め高密度に圧縮した核融合燃料を加熱し、核融合点火を実現しようとする手法である。ところが、加熱レーザーで加速された相対論的電子ビームは、全角で 100 deg. 程度の大きな角度をもって広がりながら伝播するため、電子ビームの発生点と核融合燃料が離れるにつれて、電子ビームから核融合燃料にエネルギーが付与される割合(加熱効率)が急激に減少するという障壁があった。実際、我々の先行研究で得られた加熱効率は僅か 0.3% であった。

2. 研究の目的

この電子ビームの広がりを抑制することが加熱効率の改善に必須であった。相対論的電子ビームの伝播領域に縦方向の磁場を外部から印加することが有効であることが数値シミュレーション等で示された。本研究の目的は、強磁場と高速点火方式を組み合わせた Magnetized Fast Ignition(MFI)法によって、プラズマの加熱効率の向上を実証し、その上で、MFI 法の核融合点火への外挿性を示すことである。

3. 研究の方法

速点火方式でも用いる電子ビームの平均エネルギーは数 MeV であり、かつ核融合燃料の直径は数十 μm である。数 MeV の電子を数十 μm の空間に閉じ込めるためには、キロテスラ級の磁場が必要になる。本研究では、本研究グループが過去に開発したレーザー駆動キャパシター・コイル法を用いて、700 テスラの磁場を発生させた。

電子ビームの空間分布を計測するために、電子ビームが物質と真空の境界を通過する時に放射されるコヒーレント遷移放射光 (Coherent Transition Radiation CTR) 及び、高速電子が原子と衝突する事で発光する $K\alpha$ 線の単色イメージングを用いた。電子ビームのエネルギー分布の計測には、磁石によって電子の軌道を偏向することでエネルギー分布を取得する電子エネルギー分析器及び電子を X 線に変換し X 線のスペクトル分布から電子のエネルギー分布を得る硬 X 線分光法を用いた。

実験は、フランスのエコールポリテクニクの LULI2000 及び大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザー及び LFEX レーザーを主に用いて実施した。シミュレーションは、大阪大学レーザー科学研究所の SX-ACE 及び大阪大学サイバーメディアセンターの大型計算機を用いて実施した。

4. 研究成果

(1) レーザー駆動磁場の核融合燃料への拡散のモデル化

レーザー駆動方式で生成する磁場はパルスであるため、誘導電流による核融合燃料の加熱が危惧される。固体とプラズマの境界領域である Warm Dense Matter 領域の電気伝導率をモデル化し、外部から印加された磁場が核融合燃料中に拡散して行く様子を解析する為の 2 次元シミュレーション・コードを開発し、外部磁場が急速に核融合燃料に浸透することを明らかにした [1]。

(2) レーザー駆動磁場による相対論的電子ビームの伝播制御の実証

外部磁場が印加されたプラズマ中での相対論的電子ビームの伝播を、フランスのエコールポリテクニクにある LULI2000 レーザーを用いて観測した。外部磁場を印加していない場合と比べて、外部磁場を印加した場合は、電子ビームの直径は半分になり、その強度は 4 倍に達することを確認した。この伝播の様子は 3 次元のハイブリッドコード(電子は粒子として扱い、イオンは流体として近似するシミュレーション法)で再現できることも確認した [2]。

(3) レーザー駆動磁場によるプラズマ加熱効率の改善の実証

圧縮した核融合燃料に対して外部磁場を印加し、電子ビームが磁力線に沿って集束されることで、加熱効率が最大で 8% に達することを示した [3]。これは、上述の先行研究と比べると約 25 倍の加熱効率の改善である。この値は、大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーという、世界のレーザー核融合研究施設としては小型のレーザー装置で生成された、面密度の小さな核融合燃料 [4] に対する効率である。今回の実験結果に基づいて加熱効率を評価するモデルを構築し、核融合点火級の高密度プラズマに対する加熱効率を計算した結果、その値は 20% に達することを明らかにした [5]。これは主流の中心点火方式と比べて 3 倍以上高い効率となる。

(4) 拡散加熱による超高压力プラズマの生成の実証

更に実験で観測された加熱後のプラズマの温度を解析した結果、外部磁場によって誘導された相対論的電子ビームが核融合プラズマ粒子と衝突することでエネルギーを付与する「ドラッグ加熱」に加えて、相対論的電子ビームが外部磁場によって集束されることで強度が高まり、帰還電流を誘起し、帰還電流によるオーム加熱で核融合燃料が加熱(抵抗性加熱)され、更にその熱が拡散的に周囲に広がる拡散加熱が起こっていることが明らかになった [6]。加熱の様子を新しく開発した位相型フレネルゾーン・プレートを使った準単色イメージング [7] で可視化することにも成功し、我々の理解が正しいことが確認できた。

(5) 相対論的電子ビームのエネルギー分布のパルス幅依存性の発見

高速点火方式による核融合点火には 10^{20} W/cm² を越える強度で 10 kJ のエネルギーを有する電子ビームを実現しなくてはならない。レーザーの強度が一定値 (10^{20} W/cm²) を越えると、加熱に直接寄与しない高エネルギー電子が大量に生成されるため、レーザー強度を一定値以下に保ちながら、電子ビームのエネルギーを増やす必要がある。この一つの方法は、加熱レーザーのパルス幅を伸ばすことである。加熱レーザーのパルス幅が伸びるにしたがって、加熱レーザーと相互作用するプラズマの流体運動が無視できなくなり、これは従来の研究では十分に理解されていなかった、新しいレーザープラズマ相互作用の領域になってくる。本研究では、大阪大学レーザー科学研究所の LFEX レーザーを用い、パルス幅を 2.0, 4.0, 6.0 ps と変えることで、加速される電子のエネルギー及び数を測定した。加熱されたプラズマの圧力が、入射するレーザーのエネルギー密度を超えると、プラズマが膨張を始め、プラズマの膨張と共に、レーザーとプラズマの相互作用領域に強い磁場が生じることを明らかにした [8]。この磁場によって、レーザーから電子へのエネルギー変換効率が上昇することを示した。

(6) レーザー光の重ね合わせによる相対論的電子ビームの発生効率の改善の発見

加えて、レーザーエネルギーを増加させる方法として、複数ビームの結合が考えられる。我々は単一のビームと比べて、複数のビームを重ねることによって、干渉による微細構造が集光面に現れ、この構造がレーザーから電子へのエネルギー変換効率を高めることも示した [9]。これらの結果は、核融合点火の実証に向けて、レーザーを増力する方式を決定する上での重要な指針となる。

(7) 自己生成磁場による相対論的電子ビームの誘導の実証

更に、外部磁場に加えて、自発的に生成される磁場による相対論的電子ビームのガイディングについても研究を行った。抵抗率の空間勾配によって、相対論電子ビームの伝播に伴って強い磁場が生成される。この磁場を用いることで、発生した相対論的電子ビームの約 70% 以上を、誘導することに成功した [10]。今後は自己生成磁場と外部磁場の結合によって、相対論的電子ビームを効率的に集束できることを実証していく。

(8) 外部磁場がプラズマ流体運動に与える影響の検証

最後に外部磁場が核融合燃料の圧縮に与える影響の成果について述べる。強磁場中では電子熱伝導が非等方になることが知られている。磁力線に沿った方向には熱電子は移動しやすく、磁力線を跨ぐ方向には熱電子が動き難いためである。この熱伝導の非等方性が構造形成に繋がる可能性がある。本研究では、代表的な流体不安定性であるレイリー・テイラー不安定性によるプラズマの変形が、外部磁場によって引き起こされる熱伝導の非等方性によって、増大することを実験的に明らかにした [11]。不安定性による非一様なプラズマ流によって、プラズマ中で磁場の非一様な圧縮が起こり、これが熱伝導を非一様にするすることで、レイリー・テイラー不安定性による変形が更に増加するという機構があることが明らかになった。この結果は、MFI において、印加可能な磁場強度の上限を決定する。

(9) まとめ

以上のように、MFI 法に関わる重要な物理を包括的・総合的に調べ、MFI 法の核融合点火への外挿性を示すのに不可欠な知見を得ることができた。下記のようにインパクトのある研究成果も多数得ることができた。今後は、核融合点火に必要な 10^{20} W/cm² の電子ビーム強度の実現と、加熱効率が高い高密度核融合燃料の実現に向けた研究を行い、レーザー核融合によるエネルギー発生の実現を加速させていく。

< 引用文献 > 本研究の成果として発表された学術論文 (一部)

- [1] H. Morita, A. Sunahara, Y. Arikawa, H. Azechi, and S. Fujioka, *Phys. Plasmas* **25**, 094505 (2018).
- [2] M. Bailly-Grandvaux, J. J. Santos, C. Bellei, P. Forestier-Colleoni, S. Fujioka, L. Giuffrida, J. J. Honrubia, D. Batani, R. Bouillaud, M. Chevrot, J. E. Cross, R. Crowston, S. Dorard, J.-L. Dubois, M. Ehret, G. Gregori, S. Hulin, S. Kojima, E. Loyez, J.-R. Marquès, A. Morace, P. Nicolai, M. Roth, S. Sakata, G. Schaumann, F. Serres, J. Serval, V. T. Tikhonchuk, N. Woolsey, and Z. Zhang, *Nat. Commun.* **9**, 102 (2018).
- [3] S. Sakata, S. Lee, H. Morita, T. Johzaki, H. Sawada, Y. Iwasa, K. Matsuo, K. F. F. Law, A. Yao, M. Hata, A. Sunahara, S. Kojima, Y. Abe, H. Kishimoto, A. Syuhada, T. Shirotto, A. Morace, A. Yogo, N. Iwata, M. Nakai, H. Sakagami, T. Ozaki, K. Yamanoi, T. Norimatsu, Y. Nakata, S. Tokita, N. Miyanaga, J. Kawanaka, H. Shiraga, K. Mima, H. Nishimura, M. Bailly-Grandvaux, J. J. Santos, H. Nagatomo, H. Azechi, R. Kodama, Y. Arikawa, Y. Sentoku, and S. Fujioka, *Nat. Commun.* **9**, 3937 (2018).
- [4] H. Sawada, S. Lee, T. Shirotto, H. Nagatomo, Y. Arikawa, H. Nishimura, T. Ueda, K. Shigemori, A. Sunahara, N. Ohnishi, F. N. Beg, W. Theobald, F. Piérez, P. K. Patel, and S. Fujioka, *Appl. Phys. Lett.* **108**, (2016).

- [5] S. SAKATA, T. JOHZAKI, S. LEE, H. MORITA, K. MATSUO, R. KODAMA, Y. ARIKAWA, Y. SENTOKU, and S. FUJIOKA, *Plasma Fusion Res.* **14**, 3404138 (2019).
- [6] K. Matsuo, N. Higashi, N. Iwata, S. Sakata, S. Lee, T. Johzaki, H. Sawada, Y. Iwasa, K. F. F. Law, H. Morita, Y. Ochiai, S. Kojima, Y. Abe, M. Hata, T. Sano, H. Nagatomo, A. Sunahara, A. Morace, A. Yogo, M. Nakai, H. Sakagami, T. Ozaki, K. Yamanoi, T. Norimatsu, Y. Nakata, S. Tokita, J. Kawanaka, H. Shiraga, K. Mima, H. Azechi, R. Kodama, Y. Arikawa, Y. Sentoku, and S. Fujioka, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 035001 (2020).
- [7] K. Matsuo, T. Sano, K. Ishigure, H. Kato, N. Nagamatsu, Z. Baojun, G. Shuwang, H. Nagatomo, N. Philippe, Y. Sakawa, Y. Arikawa, S. Sakata, S. Lee, K. F. Farley Law, H. Morita, C. Liu, H. Li, J. Nishibata, R. Takizawa, H. Azechi, and S. Fujioka, *High Energy Density Phys.* **36**, 100837 (2020).
- [8] S. Kojima, M. Hata, N. Iwata, Y. Arikawa, A. Morace, S. Sakata, S. Lee, K. Matsuo, K. F. F. Law, H. Morita, Y. Ochiai, A. Yogo, H. Nagatomo, T. Ozaki, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Sakagami, Z. Zhang, S. Tosaki, Y. Abe, J. Kawanaka, S. Tokita, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, H. Azechi, Y. Sentoku, and S. Fujioka, *Commun. Phys.* **2**, 99 (2019).
- [9] A. Morace, N. Iwata, Y. Sentoku, K. Mima, Y. Arikawa, A. Yogo, A. Andreev, S. Tosaki, X. Vaisseau, Y. Abe, S. Kojima, S. Sakata, M. Hata, S. Lee, K. Matsuo, N. Kamitsukasa, T. Norimatsu, J. Kawanaka, S. Tokita, N. Miyanaga, H. Shiraga, Y. Sakawa, M. Nakai, H. Nishimura, H. Azechi, S. Fujioka, and R. Kodama, *Nat. Commun.* **10**, 2995 (2019).
- [10] H. Li, S. Sakata, T. Johzaki, X. Tang, K. Matsuo, S. Lee, K. F. Farley Law, Y. Arikawa, Y. Ochiai, C. Liu, J. Nishibata, R. Takizawa, H. Morita, H. Azechi, Y. Sentoku, and S. Fujioka, *High Energy Density Phys.* **36**, 100773 (2020).
- [11] K. Matsuo, H. Nagatomo, Z. Zhang, P. Nicolai, T. Sano, S. Sakata, S. Kojima, S. H. Lee, K. F. F. Law, Y. Arikawa, Y. Sakawa, T. Morita, Y. Kuramitsu, S. Fujioka, and H. Azechi, *Phys. Rev. E* **95**, 053204 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Sakata, S. Lee, H. Morita et al.,	4. 巻 9
2. 論文標題 Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-06173-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Morita, A. Sunahara, Y. Arikawa et al.,	4. 巻 25
2. 論文標題 Numerical analysis of pulsed magnetic field diffusion dynamics in gold cone target	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 94505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5050845	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 該当する
1. 著者名 J. J. Santos, M. Bailly-Grandvaux, M. Ehret et al.,	4. 巻 25
2. 論文標題 Laser-driven strong magnetostatic fields with applications to charged beam transport and magnetized high energy-density physics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 56705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5018735	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 該当する
1. 著者名 M. Edamoto, T. Morita, N. Saito et al.,	4. 巻 89
2. 論文標題 Portable and noise-tolerant magnetic field generation system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 94706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5049217	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 T. Asahina, H. Nagatomo, A. Sunahara et al.,	4. 巻 30
2. 論文標題 Enhanced heat transport in ablation plasma under transverse magnetic field by upper hybrid resonance heating	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2018.12.003	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 該当する

1. 著者名 Arikawa Y., Kojima S., Morace A., Hata M., Sakata S., Fujioka S. et al.,	4. 巻 57
2. 論文標題 Improvement in the heating efficiency of fast ignition inertial confinement fusion through suppression of the preformed plasma	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066022 ~ 066022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa6781	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuo Kazuki, Nagatomo Hideo, Zhang Zhe, Nicolai Philippe, Sano Takayoshi, Sakata Shohei, Kojima Sadaoki, Lee Seung Ho, Law King Fai Farley, Arikawa Yasunobu, Sakawa Youichi, Morita Taichi, Kuramitsu Yasuhiro, Fujioka Shinsuke, Azechi Hiroshi	4. 巻 95
2. 論文標題 Magnetohydrodynamics of laser-produced high-energy-density plasma in a strong external magnetic field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 53204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.053204	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 該当する

1. 著者名 Vaisseau X., Morace A., Touati M., Nakatsutsumi M., Baton S.?D., Hulin S., Nicola? Ph., Nuter R., Batani D., Beg F.?N., Breil J., Fedosejevs R., Feugeas J.-L., Forestier-Colleoni P., Fourment C., Fujioka S., Giuffrida L., Kerr S., McLean H.?S., Sawada H., Tikhonchuk V.?T., Santos J.?J.	4. 巻 118
2. 論文標題 Collimated Propagation of Fast Electron Beams Accelerated by High-Contrast Laser Pulses in Highly Resistive Shocked Carbon	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 205001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.205001	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 該当する

1. 著者名 Nagatomo H., Johzaki T., Asahina T., Hata M., Matsuo K., Lee S., Sunahara A., Sakagami H., Mima K., Iwano K., Fujioka S., Shiraga H., Azechi H.	4. 巻 57
2. 論文標題 Compression and electron beam heating of solid target under the external magnetic field for fast ignition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086009 ~ 086009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa74f0	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 Morace A., Kojima S., Arikawa Y., Fujioka S., Yogo A., Tosaki S., Sakata S., Abe Y., Lee S.H., Matsuo K., Sagisaka A., Kondo K., Pirozhkov A.S., Norimatsu T., Jitsuno T., Miyanaga N., Shiraga H., Nakai M., Nishimura H., Azechi H.	4. 巻 57
2. 論文標題 Plasma mirror implementation on LFEX laser for ion and fast electron fast ignition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126018 ~ 126018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa74ec	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 Tosaki S., Yogo A., Koga K., Okamoto K., Shokita S., Morace A., Arikawa Y., Fujioka S., Nakai M., Shiraga H., Azechi H., Nishimura H.	4. 巻 2017
2. 論文標題 Evaluation of laser-driven ion energies for fusion fast-ignition research	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103J01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx136	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 Gong T., Habara H., Uematsu Y., Hayashi Y., Kawazu S., Kubota Y., Matsumoto T., Nakaguchi S., Noma S., Otsuki T., Tsujii A., Yahata K., Yoshida Y., Arikawa Y., Fujioka S., Nagatomo H., Shiraga H., McGuffey C., Krauland C. M., Wei M. S., Tanaka K. A.	4. 巻 24
2. 論文標題 Confirmation of hot electron preheat with a Cu foam sphere on GEKKO-LFEX laser facility	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112709 ~ 112709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4999975	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 該当する

1. 著者名 Iwasa Yuki, Yamanoi Kohei, Fujioka Kana, Lee Seungho, Sakata Shohei, Yao Akira, Sawada Hiroshi, Yogo Akifumi, Nagatomo Hideo, Fujioka Shinsuke, Norimatsu Takayoshi	4. 巻 125
2. 論文標題 Cu-oleate microspheres fabricated by emulsion method as novel targets for fast ignition laser fusion experiments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 89 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.11.009	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 Abe Y., Sunahara A., Lee S., Yanagawa T., Zhang Z., Arikawa Y., Morace A., Nagai T., Ikenouchi T., Tosaki S., Kojima S., Sakata S., Satoh N., Watari T., Nishihara K., Kawashima T., Yogo A., Sakagami H., Shiraga H., Nishimura H., Mima K., Azechi H., Norimatsu T., Nakai M., Fujioka S.	4. 巻 111
2. 論文標題 Production of intense, pulsed, and point-like neutron source from deuterated plastic cavity by mono-directional kilo-joule laser irradiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 233506 ~ 233506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5016531	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 Bailly-Grandvaux M., Santos J. J., Bellei C., Forestier-Colleoni P., Fujioka S et al.,	4. 巻 9
2. 論文標題 Guiding of relativistic electron beams in dense matter by laser-driven magnetostatic fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-017-02641-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Schillaci F., De Marco M., Giuffrida L., Fujioka S., Zhang Z., Korn G., Margarone D.	4. 巻 8
2. 論文標題 Numerical simulations to model laser-driven coil-capacitor targets for generation of kilo-Tesla magnetic fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025103 ~ 025103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5019219	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 該当する

1. 著者名 T Johzaki, H Nagatomo, A Sunahara, Y Sentoku, H Sakagami, M Hata, T Taguchi, K Mima, Y Kai, D Ajimi, T Isoda, T Endo, A Yogo, Y Arikawa, S Fujioka, H Shiraga, H Azechi	4. 巻 59
2. 論文標題 Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 14045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/0741-3335/59/1/014045	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 C. Goyon, B. B. Pollock, D. P. Turnbull, A. Hazi, L. Divol, W. A. Farmer, D. Haberberger, J. Javedani, A. J. Johnson, A. Kemp, M. C. Levy, B. Grant Logan, D. A. Mariscal, O. L. Landen, S. Patankar, J. S. Ross, A. M. Rubenchik, G. F. Swadling, G. J. Williams, S. Fujioka, K. F. F. Law, and J. D. Moody	4. 巻 95
2. 論文標題 Ultrafast probing of magnetic field growth inside a laser-driven solenoid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 33208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.033208	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 該当する

1. 著者名 A Yogo, K Mima, N Iwata, S Tosaki, A Morace, Y Arikawa, S Fujioka, T Johzaki, Y Sentoku, H Nishimura, A Sagisaka, K Matsuo, N Kamitsukasa, S Kojima, H Nagatomo, M Nakai, H Shiraga, M Murakami, S Tokita, J Kawanaka, N Miyana, K Yamanoi, T Norimatsu, H Sakagami, SV Bulanov, K Kondo, H Azechi	4. 巻 7
2. 論文標題 Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Report	6. 最初と最後の頁 42451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep42451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yasunobu Arikawa, et al.,	4. 巻 55
2. 論文標題 Ultra-high-contrast kilojoule-class petawatt LFEX laser using a plasma mirror	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 6850 - 6857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.55.006850	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 H Sawada, S Lee, T Shiroto, H Nagatomo, Y Arikawa, H Nishimura, T Ueda, K Shigemori, A Sunahara, N Ohnishi, FN Beg, W Theobald, F Perez, PK Patel, S Fujioka	4. 巻 108
2. 論文標題 Flash K radiography of laser-driven solid sphere compression for fast ignition	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 254101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4954383	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 該当する

1. 著者名 Shinsuke Fujioka, Yasunobu Arikawa, et al.,	4. 巻 23
2. 論文標題 Fast ignition realization experiment with high-contrast kilo-joule peta-watt LFEX laser and strong external magnetic field	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 56308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4948278	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 該当する

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 "Enhancement of Laser-Driven Particle Beam Intensity using Laser-Produced Kilo-Tesla Magnetic Field"
3. 学会等名 2nd QST International Symposium, Frontier of Quantum Beam Science with High Power Laser (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 "Magnetized Fast Isochoric Heating via Multi-Picosecond Relativistic Laser as a Scalable Approach to Laser Inertial Confinement Fusion Ignition"
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 “Fast Ignition Realization EXperiment project in Japan”
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 “Magnetized Fast Ignition Research toward Laser Fusion Energy “,
3. 学会等名 International Symposium of Fuel and Energy, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 “Magnetized Fast Isochoric Heating as an Alternative Way to the Ignition”
3. 学会等名 19th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Johzaki et al.,
2. 発表標題 Demonstration of Efficient Core Heating of Magnetized Fast Ignition in FIREX project
3. 学会等名 59th Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Sentoku et al.,
2. 発表標題 Demonstration of REB Drive Fast Ignition with Assistance of External Magnetic Field in FIREX Project
3. 学会等名 10th Inertial Fusion Sciences and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 Experimental Demonstration of Magnetically-Assisted Fast Ignition on GEKKO-LFEX Laser Facility
3. 学会等名 10th Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. H. Lee et al.,
2. 発表標題 Stability of solid fusion fuel compression using tailored laser pulse
3. 学会等名 Stability of solid fusion fuel compression using tailored laser pulse (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Fujioka et al.,
2. 発表標題 Two-colors-laser-plasma interaction for enhancing hot electron generation to drive strong shock in a dense matter
3. 学会等名 59th Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fujioka et al.,
2. 発表標題 FIREX Project Team, Progress of FIREX Project in Japan
3. 学会等名 OPIC/CLES2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Fujioka et al.,
2. 発表標題 Integrated Study of Magnetized Fast Ignition (MFI)
3. 学会等名 European Conference on Laser Interaction with Matters (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Fujioka et al.,
2. 発表標題 First experimental demonstration of magnetic-field assisted fast heating of a dense plasma core
3. 学会等名 58th Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤岡慎介
2. 発表標題 高強度レーザーとキロテスラ磁場を用いた超臨界・遮断密度プラズマの加熱
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T Johzaki, H Nagatomo, A Sunahara, Y Sentoku, H Sakagami, M Hata, T Taguchi, K Mima, Y Kai, D Ajimi, T Isoda, T Endo, A Yogo, Y Arikawa, S Fujioka, H Shiraga, H Azechi
2. 発表標題 Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion
3. 学会等名 43rd EPS Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪大学 レーザー科学研究所 超高強度場科学グループ http://lf-lab.net 我が国独自の手法でレーザー核融合点火が射程内に 世界一の効率で太陽内部200億気圧の極限状態を地上に実現 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20191223_1 レーザー装置への負荷を低減しつつレーザー加速を効率化 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20191002_1 弱いレーザー光の重ねあわせで加速効率を四倍以上に改善 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20190716_1 強磁場を導入しレーザー核融合プラズマの効率的加熱に成功 http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20180926_1 レーザーで創る核融合 中性子星の再現も http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/feature/2018/26yxzf 地上最大級の強磁場を使い光速電子の誘導に成功 http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20180111_1 プラズマ・核融合学会第22回技術進歩賞を受賞 http://www.ile.osaka-u.ac.jp/jp/information/information/2017/170927.html 強磁場によるレーザープラズマの閉じ込めに成功 http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2017/20170512_1</p>
--

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	長友 英夫 (Nagatomo Hideo) (10283813)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	
研究分担者	城崎 知至 (Johzaki Tomoyuki) (10397680)	広島大学・工学研究科・准教授 (15401)	
研究分担者	山ノ井 航平 (Yamanoi Kohei) (30722813)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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	Morace Alessio (Morace Alessio) (70724326)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教 (14401)	
研究分担者	佐野 孝好 (Sano Takayoshi) (80362606)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教 (14401)	
研究分担者	有川 安信 (Arikawa Yasunobu) (90624255)	大阪大学・レーザー科学研究所・講師 (14401)	
研究分担者	砂原 淳 (Sunahara Atsushi) (00370213)	公益財団法人レーザー技術総合研究所・理論・シミュレーションチーム・副主任研究員 (74417)	