

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 10 月 2 日現在

機関番号：74417

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540545

研究課題名(和文) 高速点火レーザー核融合における高速電子の発生と輸送の物理的制御

研究課題名(英文) Control of generation and transport of fast electrons in the fast ignition inertial confinement fusion

研究代表者

砂原 淳 (SUNAHARA, ATUSHI)

公益財団法人レーザー技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00370213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：高速点火における加熱率向上の鍵を握るプレプラズマ抑制を探求するため、気・液混合領域を考慮した高密度プラズマの状態方程式を計算し、放射流体シミュレーションに組み込み、気液混合領域の音速の低下を利用したプレプラズマの時間発展を従来の状態方程式と比較しながら示した。これにより、気・液混合領域を考慮することがプレプラズマの時間発展に重要であることを示した。この結果は高速点火のみならず、レーザー加速など薄い金属ターゲットを用いる場合にも大きな影響を与え得ることが解った。開発したコードを核融合実験に適用し、プリプラズマのスケール長を見積り、高速電子の低温化の指針を与えた。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the pre-formed plasma which is the key issue for the lowering of fast electrons in the fast ignition inertial confinement fusion, I have investigated the high dense equation of state considering the liquid - gas mix phase. Liquid - gas mix phases have low sound velocity and give small scale of plasma expansion in comparison with usual plasma equation of state. I simulated the radiation hydrodynamic simulation to show the importance of the liquid - gas mix phase in equation of state. I applied this equation of state to the fusion experiment and estimated the scale length of the pre-formed plasma and optimized the plasma conditions.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高速点火レーザー核融合 高速電子 コーンターゲット 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

世界のレーザー核融合研究は核融合点火に向かって飛躍的に進展しており、米国では2009年に国立点火実験施設(National Ignition Facility: NIF)が完成し、核融合点火実現を目指して実験が進んでいる。また、フランスにおいても同様の核融合点火を目指すLaser Mega Joule (LMJ)をボルドーに建設中である。このように、レーザー核融合研究は「核融合点火」を目前とした状況にあり、研究のフェーズが点火達成から効率的な核融合燃焼を目指した研究へと大きくシフトしつつある。これに対応し、我が国では独自の方式である「高速点火」方式により、NIFに比べて一桁低いエネルギーでの核融合点火を実現するコンパクトなレーザー核融合炉を目指し、原理実証を進めている。この高速点火方式は従来のTWクラスのレーザーを用いた爆縮により核融合燃料を固体密度の数千倍に圧縮した上で、ペタワット(PW)クラスの超高強度短パルスレーザーを照射して発生する高速電子流で爆縮コアを加熱し、核融合点火・燃焼を実現するものである。既に大阪大学でペタワットレーザーにより爆縮プラズマ追加熱(コア温度 0.8keV)の原理実証がなされ、欧州では大阪大学の高速点火実験成果に基づき、発電も視野に入れた次期レーザー核融合研究 HiPER 計画が立案され、現在、英国やフランス・スペインを中心に詳細設計が進められている。また、米国ロチェスター大学でも超高強度レーザー OMEGA-EP による高速点火実験が始まっている。

2. 研究の目的

本研究は高速点火レーザー核融合における加熱効率の向上を目指し、現在の実験で加熱効率低下の原因とされるプレプラズマの発生と挙動の解明と抑制手法の確立を行う。研究成果は大阪大学で推進している高速点火原理実証実験に活かすと共に、高強度レーザーと物質の相互作用の学術発展に寄与することを目的とする。3年間で高密度プラズマの状態方程式、レーザー吸収過程モデルの高精度化とこれを用いた流体及び粒子シミュレーションを行い、高速電子の発生と輸送の制御による加熱率向上を図る。

3. 研究の方法

高速点火における加熱率向上の鍵を握るプレプラズマ抑制を探索するため、国内外の共同研究者と協力しながら研究を進め、3年間研究の最初の一年で気・液混合領域を考慮した高密度プラズマの状態方程式並びに導電率を計算し、放射流体シミュレーションにより気・液混合領域の音速の低下を利用したプレプラズマ抑制条件を明らかにする。本研究の成果を大阪大学で実施中の高速点火実験に導入し、超高強度レーザーによる爆縮プラズマの加熱率の向上を実験的に確認する。また、点火・燃焼を伴う将来の核融合炉級の

条件において使用可能な高速点火コーンターゲットの設計を行う。

4. 研究成果

高速点火における加熱率向上の鍵を握るプレプラズマ抑制を探索するため、気・液混合領域を考慮した高密度プラズマの状態方程式を計算し、放射流体シミュレーションに組み込み、気・液混合領域の音速の低下を利用したプレプラズマの時間発展を従来の状態方程式と比較しながら示した。これにより、気・液混合領域を考慮することがプレプラズマの時間発展に重要であることを示した。この結果は高速点火のみならず、レーザー加速など、薄いターゲットを用いる場合にも大きな影響を与え得ることが解った。この結果は高速点火のみならず、レーザー加速など薄い金属ターゲットを用いる場合にも大きな影響を与え得ることが解った。開発したコードを核融合実験に適用し、プリプラズマのスケール長を見積り、高速電子の低温化の指針を与えた。

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)

- S. Fujioka, et al., "Heating Efficiency Evaluation with Mimicking Plasma Conditions of Integrated Fast-Ignition Experiment", *Phys. Rev. E* 91 (2015) 063102.
- Y. Kitagawa et al., "Direct Heating of a Laser-Imploded Core by Ultra-Intense Laser-Driven Ions", *Physical Review Letters* 114 (2015) 195002.
- T. Johzaki, et al., "Control of Electron Beam Using Strong Magnetic Field for Efficient Core Heating in Fast ignition", *Nuclear Fusion Nucl. Fusion* 55 (2015) 053022 (7pp).
- T. Yanagawa, H. Sakagami, A. Sunahara and H. Nagatomo, "Asymmetric implosion of a cone-guided target irradiation by GekkoXII laser", *Laser particle and beams* 34 (2015) 1-12.
- K. Takaki, K. Kageyama, A. Sunahara, T. Yabuuchi, and K. A. Tanaka, "Simulation of the Ablation by Charged Particles for Laser Fusion Reactor Wall", *Journal of nuclear materials* 459 (2015) 77-80.
- T. Ozaki, A. Sunahara, H. Shiraga, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Sakagami, Z. Zhang, H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Namimoto, M. Taga, S. Kojima, Y. Abe, K. Ishihara, T. Nagai, S. Sakata, S. Hattori, Y. Sakawa, H. Nishimura, H. Azechi, "Hot electron spectra in hole-cone shell target and a new proposal of the target for fast ignition in laser fusion", *Physica Scripta* T161 (2014) 014025.
- A. Sunahara, "Laser irradiation on the inner surface of the shell in order to obtain the highly ionized high-Z atoms", Report of the study group "Beyond EUV light source by laser beam and pulse power technology" of Laser society of Japan (2014)

- A. Casner, et al., "Progress in indirect and direct-drive planar experiments on hydrodynamic instability", *Phys. Plasmas* 21 (2014) 122702.
- [A. Sunahara](#) "Numerical Simulation for Laser-processing", *Journal of the Japan Society for Precision Engineering* 80 (2014) 824-830 in Japanese.
- [A. Sunahara](#) "Radiation Hydrodynamic Simulation of the Efficient Extreme Ultraviolet Light Plasma", *OYO BUTSURI* 83 (2014) 741-746 in Japanese.
- K. Yoshida et al., "Efficient extreme ultraviolet emission from multiple laser-produced one-dimensional spherical plasmas", *Appl. Phys. Exp.*, 7 (2014) 086202.
- K. Nishimura, R. Shibata, T. Yabuuchi, [A. Sunahara](#), and K. A. Tanaka, "Laser Scattered Images Observed from Carbon Plasma Stagnation", *Appl. Phys. Lett.*, 104 (2014) 244105.
- Y. Mori et al., "Repetitive 1Hz Fast-Heating Fusion Driver HAMA Pumped by Diode Pumped Solid State Laser", *The review of laser engineering* 42 (2014) 154-159 in Japanese.
- T. Zh. Esirkepov et al., "Prepulse and amplified spontaneous emission effects on the interaction of a petawatt class laser with thin solid targets", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 754 (2014) pp.150-163.
- T. Shiroto, N. Ohnishi, [A. Sunahara](#) and S. Fujioka, "Radiation hydrodynamics simulation of high-Z doped ICF target", *Journal of Physics: Conference Series* 454 (2013) 012008.
- H. Nagatomo, et al., "Optimum design of imploded core plasma for effective fast ignition at GXIF", *EPJ Web of Conferences* 59 (2013) 03007.
- [T. Johzaki](#), [A. Sunahara](#), [S. Fujioka](#), [H. Nagatomo](#), [H. Sakagami](#) and [K. Mima](#), "Fast electron beam guiding for effective core heating", *EPJ Web of Conferences* 59 (2013) 03010.
- N. Ohnishi and [A. Sunahara](#), "Development of laser ablation plasma by anisotropic self-radiation", *EPJ Web of Conferences* 59 (2013) 06005.
- Z. Zhang, et al., "Efficient multi-keV X-ray generation from high-contrast laser plasma interaction", *EPJ Web of Conferences* 59 (2013) 18003.
- [A. Sunahara](#), [T. Johzaki](#), H. Nagatomo, [K. Mima](#) and FIREX project team, "Design of a cone target for fast ignition", *EPJ Web of Conferences* 59 (2013) 03009.
- [H. Shiraga](#), et al., "Implosion and heating experiments of fast ignition targets by Gekko-XII and LFEX lasers", *EPJ Web of Conferences* 59 (2013) 01008.
- H. Azechi et al., "Present status of fast ignition realization experiment and inertial fusion energy development", *Nuclear Fusion* 53, (2013) 104021-1-6.
- [T. Johzaki](#), [A. Sunahara](#), H. Nagatomo, [H. Sakagami](#), S. Fujioka, [H. Shiraga](#) and [K. Mima](#), "Enhancement of Energy Coupling Efficiency in Fast-Ignition Laser Fusion by Electron Beam Guiding with Self-Generated Magnetic Field", *J. Plasma Fusion Res.* Vol.89, No.7 (2013) 456-461 in Japanese.
- O. Komeda, et al., "First demonstration of laser engagement of 1-Hz-injected flying pellets and neutron generation", *Scientific reports* 3 (2013) 2561.
- M. Olazabal-Loumé, Ph. Nicolai, G. Riazuelo, M. Grech, J. Breil, S. Fujioka, [A. Sunahara](#), N. Borisenko and V. T. Tikhonchuk, "Simulations of laser imprint reduction using underdense foams and its consequence on the hydrodynamic instability growth", *New J. Phys.* 15 (2013) 085033.
- [A. Sunahara](#) "Initial Process of Laser-Plasma Interaction in the Extreme Ultra-Violet Light Source and the Inertial Confinement Fusion Plasmas", *J. Plasma Fusion Res.* Vol.89, No.6 (2013) 416-422 in Japanese.
- Z. Zhang et al., "Quantitative measurement of hard X-ray spectra from laser-driven fast ignition plasma. Quantitative measurement of hard X-ray spectra from laser-driven fast ignition plasma", *High Energy Density Physics* 9 (2013) 435-438.
- H. Nagatomo, [T. Johzaki](#), [A. Sunahara](#), [H. Sakagami](#), [K. Mima](#), [H. Shiraga](#) and [H. Azechi](#), "Computational study of the strong magnetic field generation in non-spherical cone-guided implosion", *Nuclear Fusion*, 53 (2013) 063018-1-4.
- Y. Kitagawa, et al., "Hi-rep. Counter-Illumination Fast Ignition Scheme Fusion", *Plasma Fusion Res.* 8, 3404047 (2013).
- Y. Mori et al., "1-Hz fast-heating fusion driver HAMA pumped by a 10-J green diode-pumped solid-state laser", *Nuclear Fusion*, 53 (2013) 073011-1-8.
- K. Shigemori, Y. Hironaka, H. Nagatomo, S. Fujioka, [A. Sunahara](#), T. Kadono, H. Azechi, and K. Shimizu, "Extremely high-pressure generation and compression with laser implosion", *Applied Physics Letters* 102 (2013) 183501-1-3.
- O. Komeda, et al., "Target Injection and Engagement for Neutron Generation at 1Hz", *Plasma and Fusion Research: Rapid Communications* 8, 1205020-1-2 (2013).
- S. Fujioka, et al., "Kilotesla Magnetic field due to a Capacitor-Coil Target Driven by

- High Power Laser*”, Scientific Reports, 3 (2013) 1170-1-7.
- H. Shiraga, et al., “*Integrated experiments of fast ignition targets by Gekko-XII and LFEX lasers*”, High Energy Density Physics 8 (2012) 227-230.
 - Ph. Nicolai, M. Olazabal-Loume, S. Fujioka, A. Sunahara, N. Borisenko, S. Gus’kov, A. Orekov, M. Grech, G. Riazuelo, C. Labaune, J. Velechowski, and V. Tikhonchuk, “*Experimental evidence of foam homogenization*”, Phys. Plasmas 19 (2012) 113105-1-5.
 - S. Fujioka et al., “*High energy density plasmas generation on GEKKO-LFEX laser facility for fast-ignition laser fusion studies and laboratory astrophysics*”, Plasma Phys. Control. Fusion 54 (2012) 124042 (8pp).
 - H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara and H. Nagatomo, “*Effects of multi laser beams for fast electron generation*”, 39th EPS Conference on Plasma Physics 2012, EPS 2012 and the 16th International Congress on Plasma Physics (2012) pp. 978-981.
 - T. Kono, A. Ishikawa, S. Misaki, A. Sunahara, S. Tanaka, T. Yabuuchi, Y. Hirooka, K. A. Tanaka, “*Material dependence on plasma shielding induced by laser ablation*”, plasma and fusion research 7 (2012) 2405065-1-4.
 - M. Hata, H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki, and H. Nagatomo, “*Effects of CH foam preplasma on fast ignition*”, Laser and Particle Beams (2012), 30, 189-197.
 - Y. Kitagawa et al., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 155001-1-5.
 - A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo and K. Mima, “*Generation of Pre-plasma and Its reduction for Fast Ignition*”, Laser and Particle Beams (2012), 30, 95-102.
 - H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki and H. Nagatomo, “*Effects of long rarefied plasma on fast electron generation for FIREX-I targets*”, Laser and Particle Beams (2012), 30, 103-109.

〔雑誌論文〕(計 42 件)

砂原淳、城崎知至、長友英夫、他 FIREX プロジェクト「高速点火レーザー核融合におけるターゲットの流体力学的特性」第9回核融合エネルギー連合講演会、2012年6月28-29日、神戸国際会議場

砂原淳、城崎知至、長友英夫、他 FIREX プロジェクト「高速点火ターゲット先端部の流体力学的特性 II」日本物理学会 2012 秋季大会、2012年9月18-21日、横浜国立大学常磐キャンパス

砂原淳、北川米喜 他、光産業創成大学院大学研究チーム「超高強度レーザーによる爆縮プラズマの直接加熱」プラズマ核融合学会第29回年会、2012年11月27-30日、クロバークラザ福岡
砂原淳、「高速点火レーザー核融合における直接加熱」レーザー学会第33回年次大会、2013年1月28-30日、イーグレ姫路、

砂原淳、城崎知至、長友英夫、他 FIREX プロジェクト「高速点火における直接加熱」日本物理学会 2012 年次大会、2013年3月26-29日、広島大学

A. Sunahara, T. Johzaki, “*Heating of the imploded plasma by fast ions in the fast ignition scheme*” 12th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets、年月日、Napa, Marriot Hotel, “*Direct heating of imploded plasma in the fast ignition*”, IFSA2013、2013年9月8-13日、奈良県新公会堂

A. Sunahara, T. Johzaki, H. Sakagami, H. Nagatomo, et al., “*Heating of the imploded plasma by fast ions in the fast ignition scheme*”, 54th American Physics Society DPP meeting、2013年10月29-11月2日、Providence, Rhode Island, USA.

砂原 淳、森芳孝、中山師生、花山良平、石井勝弘、沖原伸一朗、藤田和久、北川米喜、関根尊史、栗田隆史、佐藤伸弘、川嶋利幸、菅博文、米田修、中村直樹、近藤拓也、藤根学、掛布光孝、東博純、日置辰視、元廣友美、西村靖彦、千徳靖彦、三浦永祐、[高繰返し対向照射高速点火方式小型レーザー核融合の研究 - 炉心プラズマシミュレーションの現状 -] 日本物理学会 2013 年秋季大会、2013年9月25-28日、徳島大学

砂原淳、[高繰返し対向照射高速点火方式小型レーザー核融合の研究 - テーラードパルスによる高密度爆縮 -], レーザー学会学術講演会第34回年次大会、2014年1月20-22日、北九州国際会議場

砂原淳、城崎知至、長友英夫、坂上仁志、三間 園興、有川安信、藤岡慎介、白神宏之、疇地宏 [**直接照射型高速点火**] 第10回核融合エネルギー連合講演会、2014年6月19日、つくば国際会議場

A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, K. Mima, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Shiraga, H. Azechi, and FIREX project, “*Direct heating of imploded plasma by ultra-intense laser in the fast ignition scheme*”, IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE (IAEA FEC 2014)、2014年10月13-18日、Park Inn hotel, St. Petersburg, Russia

A. Sunahara, T. Nagati, Y. Abe, S. Ho Lee, Y. Arikawa, S. Fujioka, T. Johzaki, K. Mima, H. Shiraga, H. Azechi, and FIREX project “*Irradiation of intense laser on the inner surface of CD shell to generate the hot spark in the fast ignition*”, 56th Annual Meeting of the APS DPP, 2014年10月27-31日、New Orleans, USA.

砂原淳、城崎知至、柳川琢省、坂上仁志、安部勇輝、長井隆浩、李昇浩、Zhang Zhe、池之内孝仁、小島完興、坂田匠平、有川安信、藤岡慎介、中井光男、白神宏之、栗松孝好、疇地宏、FIREX プロジェクトチーム “**燃料球内面照射型高速点火核融合の理論と点火デザイン**”, 物理学会第70回年次大会、2014年3月21-24日、早稲田大学

〔学会発表〕(計 12 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0件）

取得状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ilt.or.jp/>

6．研究組織

(1) 研究代表者

砂原 淳（Sunahara Atsushi）

公益財団法人レーザー技術総合研究所・研究

員

研究者番号 00370213