

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400534

研究課題名(和文) 高密度プラズマ中での核燃焼デトネーション波の伝播機構の解明とその応用

研究課題名(英文) Study on propagation of nuclear reaction driven detonation in dense plasma and its application

研究代表者

城崎 知至 (Johzaki, Tomoyuki)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10397680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高密度プラズマ中を伝播するレーザー核融合(以下LF)の燃焼波に代表させるような、超高温デトネーション核燃焼波では、化学反応系のデトネーション波とは異なる、非局所熱輸送過程(電子熱伝導・輻射輸送・核反応生成粒子輸送)が重要となる。本研究では、いまだ実験室においては実現されていない核燃焼の代わりに、レーザーによりガス中に駆動されるレーザー駆動デトネーションに対する数値シミュレーションを行い、その伝播特性を明らかにするとともに、高速点火方式レーザー核融合における核燃焼点火・燃焼特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Compared with the conventional detonation driven by chemical reactions, for the case of the super-high temperature detonation, such as a nuclear reaction driven detonation, the non-local energy transports (e.g., electron thermal conduction, radiation transport and transport of fusion products) play the important roles in the propagation mechanism. In the present research, I carried out the numerical simulations for the laser-driven detonation, which is one of the super-high-temperature detonation and has been experimentally and theoretically studied, and evaluated the propagation properties. Also, the initiation and propagation of the nuclear reaction driven detonation has been studied for the fast ignition laser fusion.

研究分野：レーザープラズマ物理

キーワード：レーザー核融合、核燃焼デトネーション、レーザー駆動デトネーション、数値シミュレーション、非局所エネルギー輸送

1. 研究開始当初の背景

高密度プラズマ中を伝播するレーザー核融合(以下 LF)核燃焼波は、衝撃波を伴い超音速で伝播するデトネーション波として認識されている。デトネーション波の研究は、化学反応系を対象に 1900 年代初頭から行われている。また、核燃焼によるデトネーションとしては、Ia 型の超新星爆発において研究が進んでいる。LF の核燃焼波の物理機構は、デフラグレーションからデトネーションへの移行を経て爆発的に燃焼する化学反応系や超新星爆発の燃焼と類似しており同様の解釈がなされている。申請者はこれまでにプラズマ流体と輻射や高エネルギー粒子輸送を連立して解く核燃焼解析コードを開発し、LF の核燃焼波伝播過程における核反応生成高エネルギー粒子(荷電粒子、中性子)による非局所熱輸送の重要性を明らかにし、点火条件・核融合利得特性を調べてきた。近年、デトネーション波に関する論文や研究者との議論を通じ、LF の核燃焼波は、化学反応系や超新星爆発とは異なる、以下の特徴を有することが明らかとなった。

	レーザー核融合(LF)	化学反応系	Ia 型超新星爆発
反応	DT 核融合	化学反応	C(炭素)系核融合
燃焼波の特性長(厚さ)と系全体のサイズ	特性長 ≤ 系のサイズ 1 ~ 10 μm ~ 100 μm	特性長 ≪ 系のサイズ ~ 0.1 mm 数 ~ 数百 cm	特性長 ≪ 系のサイズ ~ 10 cm ~ 10 ⁷ cm
状態	~ 10 ³ g/cm ³ の部分縮退プラズマ	気体	密度 ~ 10 ⁷ g/cm ³ の強縮退プラズマ
燃焼温度と燃焼率の温度依存性	燃焼温度は 100 keV (~ 10 ⁹ K) を超える。反応率は低温では指数関数的に温度とともに上昇し、70 keV 以上では減少。	燃焼温度は数千 K。反応率は低温から燃焼温度以上の領域において温度とともに指数関数的に上昇	燃焼温度は数百 keV (~ 5 × 10 ⁹ K)。反応率は低温から燃焼温度以上の領域まで温度とともに指数関数的に上昇
衝撃波前方へ	重要(核反応生成粒子・電子熱)	効かない	効かない(?)

の非局所エネルギー輸送	伝導・輻射)		
基本構造	衝撃波面と燃焼波面はほぼ一致	衝撃波面と燃焼波面間に誘導領域が存在。	衝撃波面と燃焼波面はほぼ一致
多元面構造	乱れはなく、ほぼ球面波	波面に沿った横方向伝播衝撃波が存在し、多頭構造を有する。	波面に沿った横方向伝播衝撃波が存在し、多頭構造を有する。
燃焼率	~ 30%	100%	~ 100%

更に、重力下での Ia 型超新星爆発に対する多次元シミュレーションでは、横波による微細な多頭構造の存在とともに、燃焼波面に擾乱が加わると流体不安定性により大きく歪み巨視的構造が形成され、これにより球面波に比べて実効的な燃焼波面の面積が増加し、燃焼率が增大することが示されている。

LF の燃焼シミュレーションにおいてこのような現象が見られないのは、LF での核燃焼波伝播における物理的特徴なのか、それともシミュレーション精度の問題で、燃焼波の詳細構造を十分に解像できていないのかははまだ明らかでない。仮に、LF においても多頭構造が生じ、また流体不安定性による波面の巨視的な歪みが生じるならば、従来のシミュレーションで予測された値よりも高い燃焼率が期待でき、より高効率な核融合炉の設計が可能となる。

また、LF では、爆縮中に生成する自発磁場が存在し、また点火・燃焼制御のために外部より磁場を印加することが考えられている。これらの磁場は 10 kT クラスにおよび、磁場垂直方向の非局所熱輸送(熱伝導や核反応生成荷電粒子輸送等)の抑制を通して、核燃焼波伝播に影響する可能性がある。

以上の認識の下、申請者は一次元詳細核燃焼コードを開発し、核燃焼波伝播解析をおこない、非局所熱輸送や燃焼率温度依存性が燃焼に及ぼす影響を評価した(科研)。更に簡易モデルによる二次元コードを開発し、予備的解析において熱伝導や核反応生成粒子による非局所熱輸送が微小擾乱の平滑化に寄与することを明らかにした(連合講演会)。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、核燃焼デトネーション波伝播における非局所エネルギー輸送がLFでの高密度プラズマ中を伝播する核燃焼デトネーション波伝播に及ぼす影響を、数値シミュレーションに基づき明らかにすることを目的とする。ただし、LFでは核燃焼はいまだ実証されてなく、解析結果を検証する手法が確立されていない。これに対して、同様の超高温デトネーションとしてレーザー駆動デトネーションがある。本研究では、実験結果と比較が可能なレーザーデトネーションを対象に、非局所輸送が伝播に及ぼす影響を評価し、実験との比較によりその妥当性を確認する。この結果を踏まえ、核燃焼を含むレーザー核融合における核燃焼デトネーションの伝播特性を評価する。

3. 研究の方法

超高温デトネーションの一例として、実験結果も存在するレーザー駆動デトネーションを対象とし、輻射流体シミュレーションにより解析を行う。これまでレーザー核融合や極端紫外光生成過程の解析に用いられてきたコードを常温気体からプラズマまでの公判領域に適用できるように整備し、解析に用いた。また、レーザー核融合での核燃焼デトネーションの点火・伝播特性評価においては、高速点火方式における相対論的高エネルギー電子ビームによる爆縮コア加熱過程を評価するために、相対論的電子輸送とそれに伴う電磁場の時間発展を解けるようにコードの改良を行った。以下の成果では、レーザーデトネーションの伝播特性と、高速点火レーザー核融合の点火・燃焼解析の結果についてまとめる。

4. 研究成果

4.1 レーザー駆動デトネーションに対する解析

本解析では、遠藤らに行われたレーザーデトネーション実験(T. Endo, et al., J. Plasma Fusion Res. 86, 598 (2010).)を対象とした。シミュレーション体系は、1次元平板系とし、領域左端に初期ショック生成用のAl平板(10 μ m厚)を置き、その右側にN₂ガス(常温で圧力10, 30, 100kPa)を2000 μ m配置した。照射レーザーは波長1.06 μ mで、実験条件に合わせてピーク強度8x10⁹W/cm²、パルス波形はスーパーガウシアンで半値全幅17.5ns(中心時刻15ns)とし、領域右端より左向きに窒素ガス中を伝播してAl表面に向かうように入射した。

(i) 実験結果との比較

(a) 伝播速度

実験で得られた $t = 11.9$ nsと15.9nsのシュリーレン像におけるショック面の位置から伝播距離を評価し、時間で除することで求めたシ

ョック伝播平均速度 D_{shock} (白抜き黒枠記号)とストリークカメラで取得した自発光像における発光面の傾きから求めた加熱領域伝播速度 D_{heat} (白抜き赤枠記号)、ならびに理論値(C-Jデトネーション速度; 線)を図1に示す。またシミュレーションにおける対応時刻の平均伝播速度を求め、同時にプロットした(白抜き青枠記号)。シミュレーションで得られた伝播速度のガス圧依存性は、実験結果と同様の傾向を示し、速度は比較的良く一致しており、本シミュレーションの妥当性が示された。

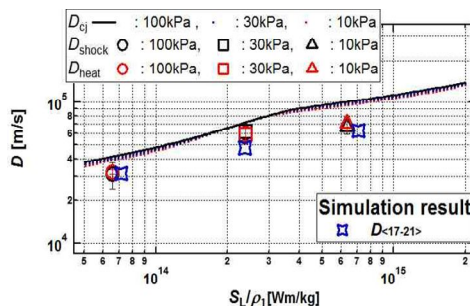


図1 デトネーション波の伝播速度 D の I_L/ρ (I_L :レーザー強度、 ρ :ガス密度)依存性の実験とシミュレーションの比較。

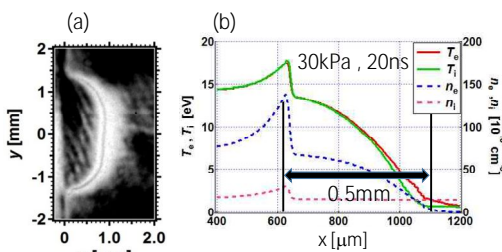


図2 N₂ 30 kPa 時の(a) $t = 11.9$ ns におけるシュリーレン像と、(b)同圧力条件でのシミュレーションで得られた温度・密度の空間プロファイル ($t = 20$ ns)。

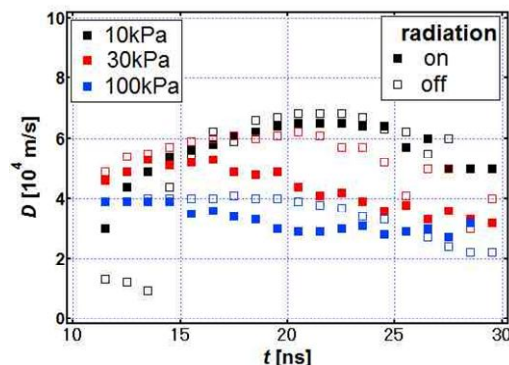


図3 シミュレーションで得られた N₂ 10, 30, 100 kPa 時のデトネーション波の伝播速度の時間発展。輻射輸送を on/off した場合の結果。

(b) 先行電離領域幅

30 kPa 実験において観測されたシュリーレ

ン像(時刻 11.9ns)を**図 2**(a)に示す。図中の白い領域内の暗線が衝撃波面を示し、その前方(右側)の白くなっている領域が先行電離領域を示す。デトネーション波の中心部($y = 0\text{mm}$)近傍での先行電離領域は、ショック前方に 0.5mm 程度広がっていることが実験において確認された。**図 2**(b)はシミュレーションにおける時刻 20 ns での衝撃波近傍の温度・密度の空間プロファイルである。この場合の先行電離領域の幅も約 0.5mm であり、実験結果とよく一致している。この先行電離領域は、衝撃波後方の高温領域で放出された熱放射が輸送され、衝撃波前方を加熱することで、初期電離を誘起し、更に照射レーザーがその電離領域で吸収されることで発達し、衝撃波前方へと広がっていくことが、シミュレーションにより確認された。

(ii) デトネーション伝播速度の時間発展並びにエネルギー輸送が及ぼす影響

レーザー駆動デトネーションが、通常の化学デトネーションと異なる点は、衝撃波後方の加熱源の違いのほかに、高温プラズマであるレーザー駆動デトネーションでは熱伝導や放射輸送による衝撃波面前方へのエネルギー輸送が存在する点にある。本シミュレーションにより熱伝導効果については、ほとんど無視できることがわかった。一方、放射については、(A)放射輸送を考慮、(B)放射輸送を無視(放出・吸収・輸送のすべてを無視)した、2 ケースについてシミュレーションを行った。**図 3**には、 N_2 10, 30, 100 kPa に対して、上記 2 条件で行ったシミュレーションより得られたデトネーション波伝播速度の時間発展を示す。低圧の場合の方が、レーザー加熱による温度上昇が大きいので、伝播速度は早くなっている。また、30, 100 kPa の場合は、ピーク強度近傍($t = 15$ ns)で伝播速度がほとんどフラットになって定常伝播に達しているのに対し、10 kPa の場合は、ピーク強度到達以降も速度は増加し続けており、本計算におけるパルス長(17.5 ns)では、定常伝播に達していないことが分かった。エネルギー輸送の影響については、放射輸送を考慮した場合()に比べ、無視した場合()は伝播速度が遅くなっている。これは、衝撃波後面における加熱領域から放射によりエネルギーが失われることが一因である。また、放射により衝撃波前方が先行加熱され電離が進み、この先行電離領域においてレーザー吸収が生じる。この結果、衝撃波後面における正味のエネルギー吸収が低下し、衝撃波駆動力が減少し、伝播速度が低下することが明らかとなった。

4.2 高速点火レーザー核融合における点火・燃焼特性

高速点火レーザー核融合では、あらかじめ

高密度に爆縮した燃料コアに、超短パルス高強度レーザーを照射し、爆縮燃料コア端をごく短時間に点火温度まで加熱し、核燃焼を実現する方法である。従来の燃料圧縮と点火部形成を爆縮過程を通じて行う中心点火方式に比べ、爆縮の球対称性への要請が緩和されるとともに、低レーザーエネルギーにより点火燃焼が可能な高効率方式として期待され、研究が進められている。しかしながら、点火・燃焼には高効率コア加熱が必要である。

高速点火におけるコア加熱は、超短パルス高強度レーザーを照射し、相対論臨界密度近傍において、高エネルギー電子を生成し、この高エネルギー電子がコアまで輸送されエネルギーを付与することで行われる。これまでの研究より、高効率加熱を阻害するいくつかの要因が明らかになった。一つは生成する高速電子のエネルギーが高すぎる点にある。レーザー導波路確保用に用いるコーン内に、加熱レーザー主パルス前の低強度プレパルスによりコーン内にプラズマが生成され、そこに主パルスが入射すると、相対論臨界密度近傍の長尺のプラズマとの相互作用により、生成する電子のエネルギーが高くなることわかった。このため、加熱パルスの高コントラスト化が進められ、生成電子エネルギーの低エネルギー化が行われた。もう一つの課題は生成電子ビームの発散角が大きく、多くの高速電子がコアに当たらないことが加熱効率を下げる要因となっている。これを解決する手法として、kT クラスの縦磁場を外部から印加し、高速電子を磁場により捕捉しコアまでガイドする手法を提案し、PIC ならびに Hybrid シミュレーションによりガイディングには kT クラスの磁場が必要であること、また、爆縮を通じて形成されるミラー配位において、ガイディングを有効にするには、ミラー比を 20 以下に抑えることが必要であることが示された。

さらに、点火・燃焼クラスのターゲットに対する加熱・核燃焼シミュレーションにおいて、生成電子のスペクトルに対し、理論及び実験によって評価されているスケーリング則(レーザー強度と波長の 2 乗の積と、生成電子の傾斜温度の関係)を用い、2 倍高調波のレーザーを用いた場合に点火・燃焼に要するレーザーエネルギーを評価した。以下の議論は、Tanimoto らにより実験的に評価されたスケーリング(Tanimoto, et al., Phys. Plasmas **16**, 062703 (2009))を用い、レーザーから電子ビームへのエネルギー変換効率を 40%とし、ビームスポット径 $40\mu\text{m}$ 、パルス長 20ps を仮定した解析結果である。ビームエネルギー 60kJ について、電子ビーム入射から 18 ps 経った時点での高速電子のエネルギー密度分布(eV/cm^3)を**図 4**に示す。また、ビームエネルギーをパラメータとしたシミュレーションより得られた核融合出力のビームエネルギー依存性を**図 5**に示す。

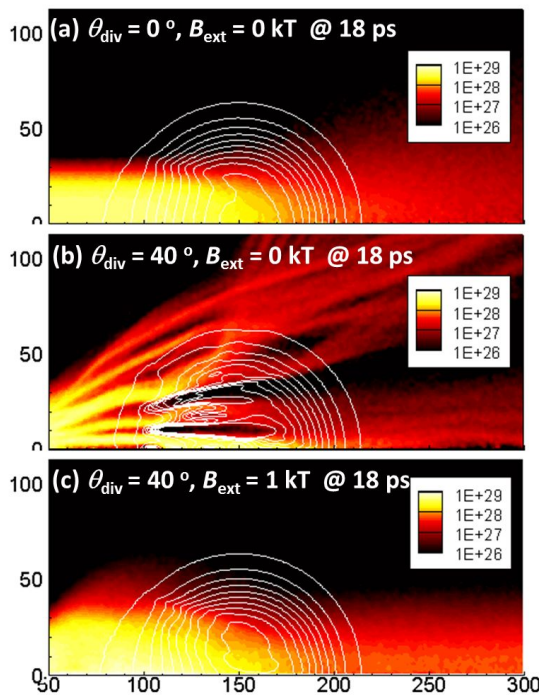


図4 高速電子のエネルギー密度分布．図中の白線が爆縮高密度燃料コア領域を示す．

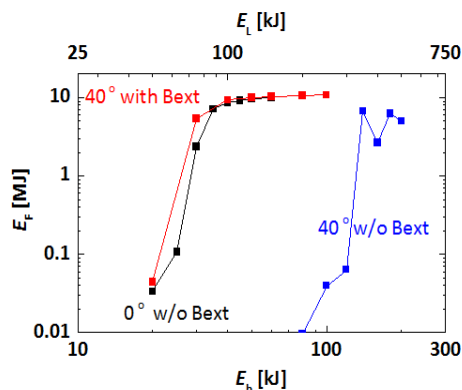


図5 ビームエネルギー (E_b) に対する核融合出力依存性．上軸には 40%結合効率を仮定し、レーザーエネルギー (E_l) を示す．

ビーム広がりをゼロとした場合(自発磁場を無視している)、電子ビームは高密度コア中での衝突により若干散乱されるものの、ほぼ直線上の軌跡を描き、コア端を効率よく加熱する。この場合、点火に要するレーザーエネルギーは 75 kJ(ビームエネルギーは 30 kJ) となった。これは最も理想的な条件の場合である。より現実的な解析として、ビーム発散角 40° (半角) を仮定した場合(自発磁場を考慮)、電子ビームは伝播に伴いフィラメント化し、発散している。この場合、点火に要するレーザーエネルギーは 350 kJ(ビームエネルギー 140 kJ) にまで増加した。これは上述したように、生成電子の多くがコアに当たらないためである。 40° の発散角を有する電子ビームに対し、1 kT の平行縦磁場を印加すると、電子ビームはほぼ平行に伝播するように

なり、点火に要するレーザーエネルギーは発散角ゼロの場合と同じ 75 kJ(ビームエネルギー 30 kJ) にまで低下した。これらの解析により、現在行われている kJ クラスの PW レーザーを用いた原理実証実験で用いられる外部磁場と同程度の強磁場が、点火・燃焼実証実験や高利得商用炉クラスのコア加熱にも有効であることが示された。

また、燃焼過程においては、先のレーザー駆動デトネーションの場合と同様に、衝撃波前方への先行加熱領域が確認された。核燃焼の場合は、輻射による先行加熱に加え、核反応生成粒子による先行加熱が生じる。これらの加熱により、波面擾乱が平滑化されることが示された。

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)

(雑誌論文) (計 18 件)

No.1 Fujioka, S., Johzaki, T., Arikawa, (他 31 名)

Heating efficiency evaluation with mimicking plasma conditions of integrated fast-ignition experiment

(2015) Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 91 (6), 063102, DOI: 10.1103/PhysRevE.91.063102

査読有

No.2 Johzaki, T., Taguchi, T., Sentoku, Y., Sunahara, A., Nagatomo, H., Sakagami, H., Mima, K., Fujioka, S., Shiraga, H.

Control of an electron beam using strong magnetic field for efficient core heating in fast ignition

(2015) Nuclear Fusion, 55 (5), 053022, . DOI: 10.1088/0029-5515/55/5/053022

査読有

No.3 Robinson, A.P.L., Strozzi, D.J., Davies, J.R., Gremillet, L., Honrubia, J.J., Johzaki, T., Kingham, R.J., Sherlock, M., Solodov, A.A.

Theory of fast electron transport for fast ignition

(2014) Nuclear Fusion, 54 (5), 054003, . DOI: 10.1088/0029-5515/54/5/054003

査読有

No.4 Kemp, A.J., Fiuza, F., Debayle, A., Johzaki, T., Mori, W.B., Patel, P.K., Sentoku, Y., Silva, L.O.

Laser-plasma interactions for fast ignition

(2014) Nuclear Fusion, 54 (5), 054002, . DOI: 10.1088/0029-5515/54/5/054002

査読有

No.5 Johzaki, T., Sunahara, A., Fujioka, S., Nagatomo, H., Sakagami, H., Mima, K.

Fast electron beam guiding for effective core heating

(2013) EPJ Web of Conferences, 59, 03010, . DOI: 10.1051/epjconf/20135903010

査読有

No.6 Nagatomo, H., Johzaki, T., Sunahara, A.,

Sakagami, H., Mima, K., Shiraga, H., Azechi, H.
Computational study of strong magnetic field generation in a nonspherical, cone-guided implosion
(2013) Nuclear Fusion, 53 (6), 063018, .
DOI: 10.1088/0029-5515/53/6/063018
査読有

[学会発表] (計 28 件)

2015 年度 (9 件 / 招待講演 1 件)

No.1 "Magnetic Guiding of Electron Beam in Imploded Spherical Solid Targets"

T. Johzaki, Y. Sentoku, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. Sakagami, S. Fujioka, H. Shiraga, T. Endo and FIREX project group
57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics
Savannah (GA, USA) on Nov. 16-20, 2015
発表年月日 2015.11.20

No.2 "Electron Beam Guiding by External Magnetic Fields in Imploded Fuel Plasma"

T. Johzaki, Y. Sentoku, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. Sakagami, S. Fujioka, H. Shiraga, T. Endo and FIREX project group
Ninth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, IFSA2015
Seattle (WA, USA) on Sep. 20-25, 2015
発表年月日 2015.09.25

(招待講演)

No.3 "Electron Beam Guiding by kT-class Magnetic Fields in Fast Ignition"

T. Johzaki
US-Japan Workshop on High Energy Density Physics
San Diego(CA, USA) on Aug. 31-Sep.01, 2015
発表年月日 2015.09.01

2014 年度 (12 件 / 招待講演 1 件、シンポジウム講演 1 件)

No.4 "kT-class Magnetic Fields in Laser Fusion Research"

T. Johzaki
Plasma Conference 2014, シンポジウム講演
朱鷺メッセ(新潟県・新潟市) on Nov. 28-21, 2015
発表年月日 2014.11.19

No.5 "Fast Ignition by Photon-Pressure Accelerated Ion Beam"

T. Johzaki, Y. Sentoku, R. Mancini, R. Rolye, I. Paraschiv, S. Sunahara
56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics
New Orleans (LA USA) on Oct.27-31, 2014
発表年月日 2014.10.29

No.6 "Control of Electron Beam Using Strong Magnetic Field for Efficient Core Heating in Fast Ignition"

T. Johzaki, T. Taguchi, Y. Sentoku, A. Sunahara, H. Nagatomo, H. Sakagami, K. Mima, S. Fujioka, H. Shiraga, and FIREX project group

25th Fusion Energy Conference (FEC 2014)
Saint Petersburg (Russia) on Oct. 13-18, 2014
発表年月日 2014.10.16

No.7 "Electron beam generation and transport in kT-class longitudinal magnetic fields"

T. Johzaki, Y. Sentoku, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. Sakagami, K. Mima, S. Fujioka, H. Shiraga and FIREX project group
13th International Workshop on the Fast Ignition of Fusion Targets
Oxford (UK) on Sep. 14-18, 2014
発表年月日 2014.09.18

No.8 "Recent Topics on ICF Theory & Simulation"

T. Johzaki
Workshop on Status and Prospects of High Energy Density Science by Giant Laser
学士会館(東京都・千代田区) on Jun. 03, 2014
発表年月日 2014.06.03

2013 年度 (7 件 / 招待講演 1 件)

No.9 "Contribution of Ponderomotively-accelerated fast ions to core heating in FIREX-I"

T. Johzaki
2013 US-Japan JIFT workshop on "Alternative Ignition Scheme for Inertial Fusion Energy" and "Theory and Simulation on Fast Ignition Target Design"
紀州南部ロイヤルホテル (和歌山県・日高郡みなべ町) on Sep. 16-18, 2013
発表年月日 2013.09.17

No.10 "Electron Beam Guiding by Strong Longitudinal Magnetic Field"

T. Johzaki, K. Mima, S. Fujioka, H. Sakagami, A. Sunahara, H. Nagatomo, H. Shiraga and FIREX-project
8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2013), 招待講演
奈良県新公会堂 (奈良県・奈良市) on Sep. 08-13, 2013
発表年月日 2013.09.12

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/rgdlab/> 内にて発表論文・学会発表についてリスト表示するとともに、研究成果の一部を紹介。

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

城崎 知至 (JOHZAKI Tomoyuki)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：10397680