

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400539

研究課題名(和文) 高速点火レーザー核融合におけるドライバ粒子の伝播制御

研究課題名(英文) Transport optimization of driver particles for fast ignition in laser fusion

研究代表者

坂上 仁志 (Sakagami, Hitoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：30254452

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)：コーン付きターゲットを用いた高速点火レーザー核融合では、生成される高速電子が大きな発散角を持ち、かつスロープ温度が高すぎるため燃料コア加熱効率の著しい低下が懸念されている。

そこで、加熱効率を改善するため、高エネルギーイオンを用いて追加加熱を行う手法、加熱用レーザーを短波長化して高速電子のスロープ温度を下げる手法および外部印加磁場により高速電子を燃料コアまでガイディングする手法が考えられている。これらの手法によるコア加熱の効果をそれぞれ統合シミュレーションにより評価し、効率良く燃料コアを加熱できる条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the fast ignition scheme using cone-guided targets for the laser fusion, the divergence angle of generated fast electrons is too large and their slope temperature is too high. Thus it results in lower heating efficiency from fast electrons to the compressed fuel core.

To mitigate this critical issue, energetic ions which are also generated by the heating laser are expected to additionally heat the fuel core. On the other hand, using a shorter wavelength but same intensity laser can reduce the slope temperature of fast electrons without decreasing laser energy, and it is expected to enhance the core heating. Finally, externally-applied longitudinal magnetic fields is expected to guide fast electrons to the core. So the core heating properties are estimated by integrated simulations for each idea, and conditions for better heating are obtained.

研究分野：計算プラズマ物理

キーワード：レーザー核融合 高速点火 統合シミュレーション 高速電子 イオン加速 短波長化 外部磁場

1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合における世界的レベルの研究は、米国ローレンスリバモア国立研究所の National Ignition Facility(NIF)と呼ばれる大型実験装置を用いて行われているが、核融合点火・燃焼のためには、メガジュールクラスのエネルギーを持つ巨大なレーザー装置が必要になる。一方、我が国においては、爆縮と点火をまったく別のステップで実現する高速点火の概念が考案され、点火に必要なレーザーエネルギーの大幅な低減が期待されており、爆縮コアの点火温度までの加熱を実験的に実証する Fast Ignition Realization EXperiment 第一期(FIREX-I)プロジェクトが、進行している。そして、FIREX-Iにおける加熱用レーザーである LFEX レーザーの1ビームを用いた高速点火の統合実験が2009年6月に、2ビームを用いた実験が2010年10月に実施された。2012年7月には、Au(金)および DLC(ダイヤモンド様炭素)コーン、外部磁場生成用キャパシターコイルターゲットによる基礎物理実験および高速点火の統合実験が開始された。

2. 研究の目的

FIREX-I では、加熱用レーザーで生成されるドライバ粒子として高速電子を使っているが、その高速電子は燃料コアを加熱するには高すぎるスロープ温度であること、および生成地点から既に大きな発散角を持つことが指摘されており、効率の良い燃料コア加熱を妨げる大きな要因となっている。

そこで、まず、補助ドライバ粒子として高速電子と同時に生成される発散角が小さくかつ飛程も短い高エネルギーイオンによる燃料コアの追加加熱を考え、ターゲットをイオン補助加熱に向くように再設計して、その実現可能性を明らかにする。

次に、加熱用レーザーを短波長化すると高速電子のスロープ温度が下がることは、スケールリング則から導かれているので、その効果を統合シミュレーションにより定量的に評価する。

最後に、外部印加磁場を爆縮により圧縮して得られる高強度磁場を用いて高速電子を燃料コアまで導くことが考えられているので、統合シミュレーションにより燃料コア加熱に対する効果を検証する。

3. 研究の方法

高速点火レーザー核融合における加熱過程は、様々な物理現象が複雑に絡み合っているため、それを(1)加熱用レーザーから高速電子への変換効率、(2)その高速電子がコーンチップを伝播・透過する効率、(3)コーンチップを抜けた高速電子の発散角とコアの立体角に起因する効率、(4)高速電子のエネルギーが実際にコア内に付与される効率の4つに分解したモデルを考える。現在までの解析では、それぞれの効率は、50%、60%、60%、40%と見

積もられており、それらの積である総合的効率は、わずか7%である。このため、それぞれの効率を引き上げる工夫が必要である。

まず、高速電子と同時に生成される高エネルギーイオンによる追加加熱を考える。イオンビームは、発散角が小さく飛程が短いため前述の(3)および(4)の高効率化が期待できるが、(1)および(2)は小さい。ターゲット裏面に生成されるシース電場および照射面のポンドラモーティブ力により加速されるイオンビーム生成の解析を進め、最終的なコアの加熱を高速電子と合わせて統合シミュレーションし、イオンを補助ドライバ粒子とした場合の高速点火の加熱効率を評価する。

一方、超高強度レーザーによって生成される高速電子のスロープ温度は、物理的に(レーザー強度×波長の自乗)でスケールされるため、同じ強度でも波長を短くするとスロープ温度は低くなる。このため、加熱用レーザーを短波長化することにより、生成される高速電子のエネルギーを抑制することは、(4)の向上に大きく寄与すると考えられる。しかし、短波長レーザーと物質の相互作用は、(1)にも影響を与えるが、まだ定量的には調べられていない。そこで、この効果を粒子シミュレーションにより詳細に解析する。

さて、キャパシターコイルターゲットを用いることで kT 程度の磁場が生成できることは実験で示されており、この磁場を爆縮によって圧縮すれば、10kT 程度の強度が得られ、この強磁場により高速電子をコアまで導き(3)を向上させることが期待できる。ただし、圧縮された磁場の分布によってはミラー効果により高速電子は跳ね返され、加熱効率が向上しない可能性もある。そこで、2次元輻射・流体コードにより爆縮磁場の形状を解析し、統合シミュレーションによりコア加熱に対する効果を検証する。

4. 研究成果

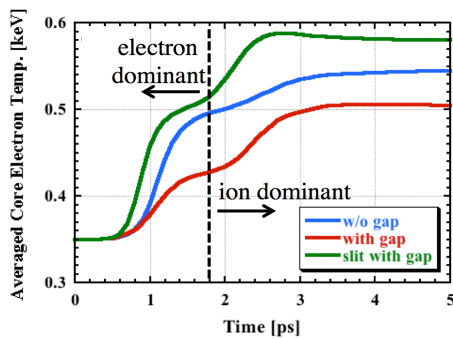
(1)イオンを超高強度短パルスレーザーで加速する機構として、先行する高速電子によって生成されるターゲット裏面に垂直なシース電場を用いるために、コーンチップの前方にプラスチックである CH の薄膜ターゲットを置きイオン源とするが、イオンエネルギーの違いによるコア到達時刻の差を小さくし、できるだけ広範囲のエネルギーのイオンを加熱に用いるため、そのイオン源ターゲットをコーン内のできるだけコア近傍に設置することを考えた。そこで、Au コーンチップの5 μ m 手前に4.5 μ m の CH 薄膜を置いた。つまり、コーンチップと CH 薄膜の間に5 μ m の真空領域があり、ここにシース電場が生成される。そして、加熱用レーザーとして強度10²⁰W/cm²、波長1.06 μ m、半値全幅10 μ m のスーパーガウシアンビームを照射した。この結果、加熱用レーザーからイオンビームへの変換効率は、1%以下と低いことがわかった。

この原因を調べると、Au コーンと CH 薄膜

が接地しているため、シース電場が生成されると Au コーンから CH 薄膜に背景電子が流れ込み、シース電場を弱めるためであることがわかった。そこで、Au コーンと CH 薄膜の間に $0.5\mu\text{m}$ の真空ギャップを設けて、同様のシミュレーションを行った。この結果、イオンエネルギーには大きな差はないが、 C^{6+} イオンの最大ビーム強度は 2 倍となり、変換効率も 2% になることがわかった。

しかし、イオンを加速するシース電場は高速電子流を阻害するため、真空ギャップがある場合には加熱を主に担う高速電子ビーム強度は低下し、全体的なコア加熱効率は向上しない。これを改善するために、イオン加速が終了したときにはイオン源である薄膜ターゲットが破壊され、加熱用レーザーがコーンチップと直接相互作用できて、効率よく高速電子を生成できるようになるシナリオを考えた。このためには、平均的な薄膜ターゲットの密度を下げる必要があるが、薄膜全体を低密度にすると加熱用レーザーによる高速電子の生成量が減り、電場強度の大きいシース電場を生成／維持することが困難になる。そこで、薄膜ターゲットにレーザーが透過しないよう波長以下である $0.5\mu\text{m}$ のスリットを多数設けた。

ここで述べた三つのターゲットについて、統合シミュレーションを行い、得られた平均コア電子温度の時間発展を下図に示す。青線が通常の薄膜ターゲット、赤線が真空ギャップを設けたターゲット、緑線がスリットを設けたターゲットである。



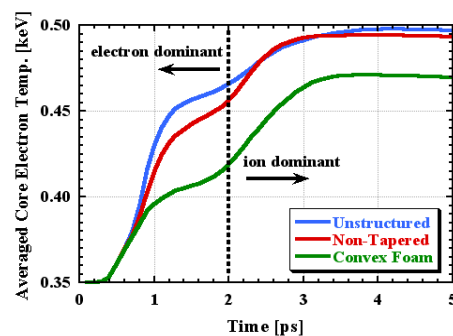
コアに到達する時間差により、2ps までは高速電子による加熱が支配的であり、2ps 以降は高速電子による加熱が終了し、高エネルギーイオンによる加熱が支配的である。通常のターゲットでは、イオン加熱によるコア電子温度の上昇は 0.04keV であるが、真空ギャップターゲットでは 0.08keV であり、イオンによる加熱の寄与は、おおよそ 2 倍になっている。一方、電子加熱によるコア電子温度の上昇は、 0.15keV から 0.08keV に低下しており、総合的なコア加熱は、通常のターゲットの方が良い。しかし、スリットターゲットでは、イオン加熱によるコア電子温度の上昇は 0.07keV であり、真空ギャップターゲットと同等であるにもかかわらず、電子加熱によるコア電子温度の上昇も 0.16keV と通常のター

ゲットと同等である。このため、当初の目論み通り、総合的に良好なコア加熱が実現できている。

次に、イオンを加速する別の機構として、ポンドラモーティブ力を用いる。この機構でも、シース電場による加速機構と同様にイオン源のターゲット材を CH とし、Au コーンチップを低密度 CH フォームで $8\mu\text{m}$ コーティングした。ポンドラモーティブ力による最大イオンエネルギーは、フォームの電子密度を相対論的な臨界密度としたときに得られるため、加熱レーザーの強度を $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ とし、そのときの相対論的臨界密度、つまり $8.60n_{\text{cr}}$ になるようフォームの H^+ と C^{6+} の密度を決定し、同様に加熱用レーザーを照射した。CH フォームが加熱用レーザーのポンドラモーティブ力により押され、その結果、フォーム中央部のイオンが加速されているが、コーン壁に沿ってイオンビームを発散させる静電場が誘起されることがわかった。

そこで、コーン壁面に沿った静電場の誘起を抑止するため、ターゲット構造をテーパなしとした。この結果、コーン壁面に沿う静電場は抑制され、非構造ターゲットで観測されたイオンビームの分離も抑制されることはわかったが、イオン速度の角度分布は、ややフラットであり発散角を持つ。

この原因は、CH フォームが凹面型に変形するためと考えられるので、その凹面変形を補償するため、CH フォームを凸面にするのを考えた。この凸面補償により、時間が経っても CH フォーム表面の平面性が維持され、イオンビームの発散角が大きく改善されたことがわかった。以上述べた三つのターゲットについて、同様に統合シミュレーションを行い、得られた平均コア電子温度の時間発展を下図に示す。青線が非構造ターゲット、赤線がテーパなしターゲット、緑線が凸面ターゲットである。



非構造ターゲットでは、イオン加熱によるコア電子温度の上昇は 0.03keV であるが、テーパなしのターゲットでは 0.04keV であり、イオンによる加熱の寄与が大きくなっている。しかし、電子加熱によるコア電子温度の上昇は、テーパなしのターゲットで、やや低下しており、総合的なコア加熱は、同等である。一方、凸面ターゲットでは、イオン加熱によるコア電子温度の上昇は 0.05keV と改

善されている。しかし、電子加熱によるコア電子温度の上昇は、おおよそ半分まで減少しており、総合的なコア加熱は、三つの中で一番悪い。

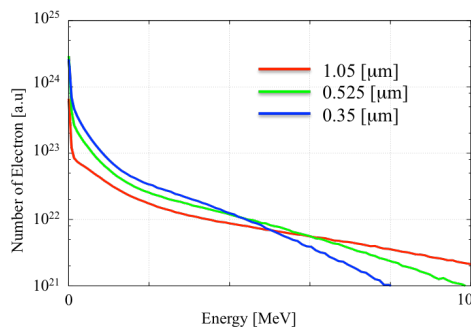
この原因を調べると、前者の二つのターゲットでは、加熱用レーザーの照射後半には、完全に CH フォームの中央部が失われ、加熱用レーザーが Au コーンチップと直接相互作用するため、新たに高速電子が生成され、加熱に寄与していることがわかった。凸面ターゲットでは、CH フォーム表面の平面性が加熱用レーザー照射後も保たれているため、Au コーンチップとの相互作用による高速電子の生成は見られない。このため、高速電子と高エネルギーイオンの両方を効率よく利用できるようにするため、ターゲット構造の最適設計が必要である。

(2) 超高強度レーザーによって生成される高速電子のスロープ温度 T は、レーザー強度 I 、波長 λ を用いて $T \propto (I\lambda^2)^{(1/2)}$ とスケールされることが物理モデルから示されている。加熱用レーザーの波長は $1.05\mu\text{m}$ であるので、 2ω 化すれば $0.525\mu\text{m}$ 、 3ω 化すれば $0.35\mu\text{m}$ になる。レーザーの波長を短くした場合、全レーザーエネルギーとスポット半径は変わらないと仮定するとレーザー強度も変わらないため、高速電子のスロープ温度は、波長に比例して下がることになる。

この効果を定量的に評価するため、レーザー波長 λ 、プラズマの最大密度 n_{max} 、プリプラズマのスケール長 L を以下に示す条件とし、2次元相対論的粒子コードを用いてシミュレーションした。ただし、加熱用レーザーは、強度を $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ に固定し、半値全幅 $5\mu\text{m}$ のガウシアンパルスとした。また、プラズマの最大密度は、それぞれの波長における臨界密度で規格化している。

λ [μm]	n_{max}	L [μm]
1.05	15	2
0.525	10	1
0.35	5	0.66667

シミュレーションで得られた高速電子のエネルギースペクトルを下図に示す。この結果より、比較的低エネルギー領域におけるスロープ温度は、 $\lambda=1.05, 0.525, 0.35\mu\text{m}$ のとき、それぞれ $0.65, 0.39, 0.32\text{MeV}$ となった。

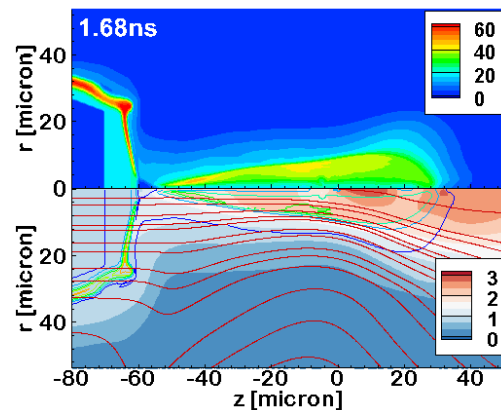


このスロープ温度の低下率は、前述のスケールリング則から得られる低下率より小さく、実験で得られているスケールリング則 $T \propto (I\lambda^2)^{(1/3)}$ とほぼ一致していることがわかった。

また、このエネルギースペクトルのうち、コア加熱に好ましいと思われる 0.5 から 2MeV までのエネルギーを持つ高速電子が運ぶ総エネルギーを考え、それぞれのエネルギー毎の発散角を考慮して、簡易的にコア加熱効率を見積もったところ、 2ω 化の場合には 1.6 倍、 3ω 化の場合には 2.1 倍程度の向上を期待できることがわかった。

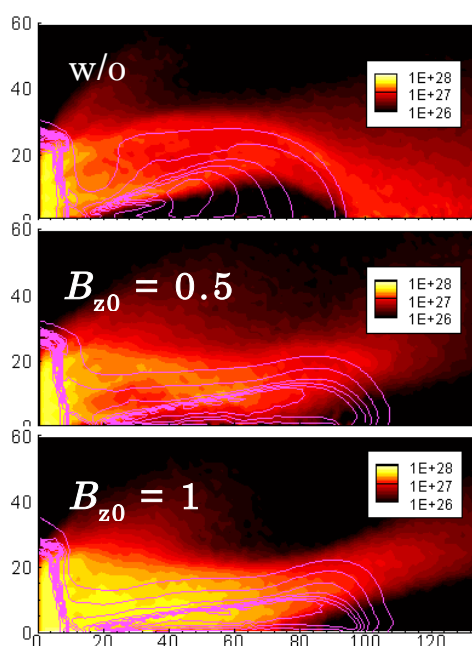
(3) 高速点火で加熱効率を向上させる手法として、外部磁場を与えることによってドライバとなる荷電粒子を制御する方法が検討されている。加熱プロセスでは外部磁場は有効な手法である反面、高密度コアを形成する爆縮過程への影響についても検討する必要がある。2次元輻射流体シミュレーションによって外部磁場を与えた状況での爆縮について調べた。その結果、爆縮の初期に磁場による熱伝導の非等方性に起因するレイリー・テイラー不安定性によってシェルが破れ、高密度達成が困難であることが明らかになった。さらに、圧縮された磁場は金コーン先端に強い磁気ミラーを形成し、加熱粒子の伝播を阻止する可能性が高いことも示された。

この結果を受け、シェル爆縮の代わりに中実球爆縮について検討を行った。中実球を用いた爆縮は安定で、実験に十分な高密度コアを形成可能であることがわかった。磁場を印加した場合は、磁場に垂直方向の爆縮速度が速いため、爆縮コアの形状は葉巻状となり、磁場を印加しない場合の形状とは異なる。また、 kT 程度の磁場を印加した場合でも、燃料圧縮率が小さい点と常温固体での CD の磁場拡散係数が大きいことから、磁場圧縮率は小さく、ミラー比は 3 程度に抑えられ、高速電子の制御に適した圧縮磁場が形成されることが明らかになった。この様子を下図に示す。



縦磁場を印加した 2次元相対論的粒子コードのシミュレーションにより、FIREX クラスの実験においては、生成時点にて kT 程度の磁場が必要であること、また爆縮で形成され

る磁場配位としては、ミラー反射効果を抑えるためにミラー比を 20 以下に抑える必要があり、ミラー比としては 5 程度が望ましいことが示された。また、中実球ターゲットに外部磁場を印加した状態を仮定した爆縮・加熱の統合シミュレーションでは、kT 程度の初期磁場を印加した場合、最大圧縮時のミラー比は 3 程度であり、ガイディングに適した磁場配位が得られることが示された。さらに、外部磁場の強度をパラメータとして、中実球の爆縮で得られた爆縮コアおよび磁場構造を用いて、コア加熱のシミュレーションを行った。初期磁場強度が 0, 0.5, 1T のときの $t=3\text{ps}$ における高速電子のエネルギー密度分布を下図に示す。外部磁場の増加と共に、高速電子がより燃料コアに到達していることがわかる。このとき、コア加熱効率が 1.6 倍程度向上することが示された。



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 23 件)

- ① 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, J. Phys.: Conf. Series, 717, 012025 (2016). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/717/1/012025
- ② An optimum design of implosion with external magnetic field for electron beam guiding in fast ignition, H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina, K. Matsuo, A. Sunahara, H. Sakagami, T. Sano, K. Mima, A. Morace, Z. Zhang, S. Fujioka, K. Shigemori, H. Shiraga and

FIREX project group, J. Phys.: Conf. Series, 717, 012041 (2016). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/717/1/012041

- ③ Simulation analysis for ion assisted fast ignition using structured targets, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, J. Phys.: Conf. Series, 717, 012046 (2016). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/717/1/012046
 - ④ Direct heating of compressed core by ultra-intense laser, A. Sunahara, T. Johzaki, H. Sakagami, H. Nagatomo, K. Mima, Y. Abe, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Shiraga, H. Azechi, Y. Mori, Y. Sentoku and Y. Kitagawa, J. Phys.: Conf. Series, 717, 012055 (2016). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/717/1/012055
 - ⑤ Integrated simulations for ion beam assisted fast ignition, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, J. Phys.: Conf. Series, 688, 012096 (2016). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/688/1/012096
 - ⑥ Electron beam guiding by strong longitudinal magnetic fields, T. Johzaki, K. Mima, S. Fujioka, H. Sakagami, A. Sunahara, H. Nagatomo, and H. Shiraga, J. Phys.: Conf. Series, 688, 012041 (2016). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/688/1/012041
 - ⑦ Control of an 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 and H. Shiraga, Nucl. Fusion 55, 053022 (2015). 査読有
DOI:10.1088/0029-5515/55/5/053022
 - ⑧ Suppression effects of Weibel instability for fast electron divergence, H. Sakagami, T. Johzaki, T. Taguchi and K. Mima, EPJ Web of Conferences, 59, 17016 (2013). 査読有
DOI:10.1051/epjconf/20135917016
 - ⑨ Fast electron beam guiding for effective core heating, T. Johzaki, A. Sunahara, S. Fujioka, H. Nagatomo, H. Sakagami, and K. Mima, EPJ Web of Conferences, 59, 03010 (2013). 査読有
DOI:10.1051/epjconf/20135903010
- [学会発表] (計 51 件)
- ① Ion Assisted Fast Ignition by Ponderomotive Force Ion Acceleration with Structured Targets, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara and H. Nagatomo, ASHULA Grand Seminar/Symposium 2016, Osaka University, Osaka, Japan, January 5-7 (2016). 招待講演

- ② 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, November 16-20, Y06.5 (2015)
- ③ Simulation Analysis for Ion Assisted Fast Ignition Using Structured Targets, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, 9th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Seattle, WA, September 20-25, Th.Po.70 (2015).
- ④ 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, and FIREX project group, 9th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Seattle, WA, September 20-25, Fr.0.3.4 (2015).
- ⑤ Simulation Analysis for Ion Assisted Fast Ignition Using Two Different Types of Targets, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, 7th International Conference on The Frontiers of Plasma Physics and Technology, Kochi, India, April 13-17 (2015). 招待講演
- ⑥ Evaluation of Ion Beam Properties for Core Heating in Ion Assisted Fast Ignition Scheme, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, ASHULA Workshop - 2015, Lonavala, India, January 20-21 (2015).
- ⑦ Fast Ignition by Photon-Pressure Accelerated Ion Beam, T. Johzaki, Y. Sentoku, A. Sunahara, T. Morikawa, and T. Endo, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, New Orleans, LA, October 27-31 (2014).
- ⑧ 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, Saint Petersburg, Russia, October 13-18 (2014).
- ⑨ Target design for energetic ion assisted fast ignition, H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, 41st EPS Conf. on Plasma Physics, Berlin, Germany, June 23-27, P1.102 (2014).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂上 仁志 (SAKAGAMI HITOSHI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：30254452

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

砂原 淳 (SUNAHARA ATSUSHI)

(財) レーザー技術総合研究所・理論シミュレーショングループ・研究員

研究者番号：00370213

長友 英夫 (NAGATOMO HIDEO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号：10283813

三間 圀興 (MIMA KUNIOKI)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・特任教授

研究者番号：30033921

田口 俊弘 (TAGUCHI TOSHIHIRO)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：90171595