

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月30日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22540511

研究課題名（和文） レーザー核融合における高速点火用ドライバ粒子の最適化

研究課題名（英文） Optimization of Driver Particle for Fast Ignition

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

研究成果の概要（和文）：高速点火レーザー核融合の統合実験は、大阪大学において2009年6月より開始されたため、圧縮された燃料コアを加熱するドライバ粒子の特性を最適化し、効率良くコアを加熱できるようにすることが急務である。そこで、ドライバ粒子として高エネルギー電子を考えた場合、外部印加磁場や自己生成磁場を用いて、電子をコアまでガイディングする最適化を行った。また、代替のドライバ粒子として水素イオンと炭素イオンを考え、統合シミュレーションにより追加熱の特性を評価した。

研究成果の概要（英文）：As incorporated fast ignition experiments for laser fusion started at ILE, Osaka University from 2009, it is urgently necessary to optimize characteristics of driver particles which can efficiently heat up the compressed high density core. If fast electrons are used as the driver particle, compressed external and/or self-generated magnetic fields are expected to guide fast electrons to the core. Ion beam characteristics are also investigated and core heating properties are evaluated by integrated simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

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

1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合の世界的レベルでの研究は、米国ローレンスリバモア国立研究所で建設中であった大型実験装置 National Ignition Facility(NIF)が2009年5月末に完成し、新たな時代を迎えようとしている。NIFにおいては、同年8月より本格的な実験が開始され、

数年のうちに、人類史上初の制御された核融合点火・燃焼が達成できる見込みである。

我が国においても、Au コーンを付加したターゲットにより高速点火のための加熱が実証された実験結果を踏まえ、加熱用レーザーのエネルギーを増強して点火温度までの加熱を実験実証する FIREX-I プロジェクトが、

大阪大学において開始された。そして、新しい加熱用レーザーが、2009年3月に完成し、各種調整作業の後、同年6月より高速点火の統合実験が開始された。

2. 研究の目的

高速点火レーザー核融合において、圧縮された燃料コアを加熱するドライバ粒子の特性を最適化することは、高速点火統合実験が始まった今、急務である。

そこで、レーザー光線追跡流体コード、相対論的粒子コード、輻射・流体コードおよびフォッカープランクコードから構成される統合シミュレーションにより高速点火の物理を総合的に解析し、まず、ドライバ粒子として高エネルギー電子（高速電子）を考えた場合の最適化を目指す。一方で、高速電子は、発生時に大きな発散角を持ち、高密度プラズマ中を伝播する場合、フィラメント化および各種不安定性が発生するため、爆縮コアを効率良く加熱できない可能性が指摘されている。このため、代替のドライバ粒子としてイオンを考えた場合についても、統合シミュレーションを行い、コア加熱特性を評価し、イオンによる高速点火の実現可能性を探る。

3. 研究の方法

高速点火用のドライバ粒子である高速電子の特性は、加熱用レーザーのプレパルスによってコーン内面に生成されるプリプラズマにより、大きく影響される。そこで、まず、光線追跡法によりレーザーのプラズマ中での伝播とその光線軌跡上での吸収を計算し、状態方程式からイオン化率を評価し、併せて流体運動を計算することにより、プレパルスによって生成されるプリプラズマの特性を詳細に解析する。

次に、上記プリプラズマと加熱用レーザーの相互作用を相対論的粒子コードにより計算し、生成される高速電子の発散角、強度、エネルギースペクトル等の特性とプリプラズマの関係を明らかにする。

また、コア加熱特性は、爆縮したコアのプロファイルによっても影響を受けるが、コーンを付加したことにより、爆縮は本質的に非対称となる。そこで、コーンを付加した非対称爆縮について、輻射・流体コードによりシミュレーションを行い、爆縮コアのプロファイルを得る。

そして、高速電子の輸送に着目し、フォッカープランクコードを用いたシミュレーションにより、コーン先端の材料による衝突効果の差および厚さによる影響を調べる。

一方、イオンについても、報告されているレーザーによる二種類の加速機構を検証し、統合シミュレーションにより、イオン高速点火の可能性および実現性を調べる。

4. 研究成果

(1) 高速点火実験で用いられているターゲットのコーンは、加熱用レーザーを噴出したプラズマから隔離し、クリーンな環境下で爆縮コア近くまで導入する目的で付けられている。これにより、コーン先端部内面に加熱用レーザーが照射され、発生する高速電子により爆縮コアが加熱される。しかし、超高強度レーザーは少なからずプレパルス/ペDESTAL成分を持ち、メインパルスよりも1~3ns程度前の時刻にピーク強度から6~8桁低い強度のパルスがコーンに照射される。その結果、コーン内部にはプリプラズマが生成されるため、メインパルスはプリプラズマの影響を避けられない。このため、プリプラズマの評価、制御は重要な課題であり、レーザー光線追跡流体コードにより、コーン内部のプリプラズマ生成を評価した。

プレパルス強度は実測されていないが、平板に加熱用レーザーを照射する実験の結果から $10^{12} \sim 10^{13} \text{W/cm}^2$ と評価される。そこで、 10^{13}W/cm^2 のプレパルス強度で45度コーンの内部をスポット径 $90 \mu\text{m}$ で照射した結果、臨界密度(n_{cr})近傍で $45 \mu\text{m}$ 程度のスケール長を持つプラズマが生成されると見積もられた。

次に、コーン壁材の材料に対する依存性(原子番号依存性)を調べた。コーンの壁材として高Z物質を用いると、輻射の効果が大きく、ダブルアブレーションが形成されるが、プレパルスより高強度のペDESTAL成分を考慮するとスケール長の増大が抑制されることが明らかになった。また、低ZのCHは輻射輸送の効果は少ないものの、音速が速いため、形成されるプリプラズマのスケール長が長くなってしまふ。以上のことから、コーン壁材を高速電子輸送に適した低Z物質としながらも、プレパルス/ペDESTALによるプリプラズマのスケール長の増大を抑制するため、高Z物質をコーティングすることが最適であることがわかった。

(2) 高速電子生成に対するプリプラズマの影響を評価するため、Auコーンは、 $Z=40$ (固定)、電子密度 $100n_{cr}$ 、開き角 30 度、チップ内面幅 $12 \mu\text{m}$ とし、密度スケール長 $1 \mu\text{m}$ の内面(レーザー照射面)に、 $5n_{cr}$ の場所から低密度側にスケール長 3 または $10 \mu\text{m}$ のプリプラズマを付け、加熱用レーザーは、波長 $1 \mu\text{m}$ 、強度 $3 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ 、 1ps のフラットパルスで、空間プロファイルは半値全幅 $16.5 \mu\text{m}$ のガウシアンとして、2次元粒子シミュレーションを行った。

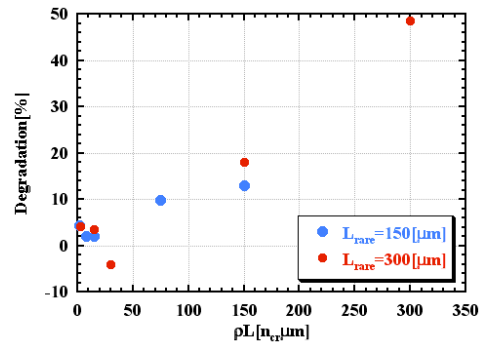
その結果、プリプラズマの存在により、高速電子の発生点がコーン先端から遠ざかるため、コア領域に到達する高速電子が少なくなり、加熱用レーザーから高速電子へのエネルギー変換効率はスケール長の増大とともに

に低下することがわかった。しかし、長尺の低密度プリプラズマ中ではレーザープラズマ相互作用により、加熱に直接寄与しない高エネルギーの高速電子が大量に発生する一方で、加熱に寄与する低エネルギー成分の高速電子数は大きく減少するため、加熱に最も寄与する高速電子への変換効率の低下の方がそれより顕著であった。そして、加熱用レーザーからコアへのエネルギー結合効率は、プリプラズマの存在により 80%近くも低下することが示された。この結果、効率のよい加熱のためには、プリプラズマ、つまりプレパルスレベルを可能な限り低くすることが重要であることが示唆される。

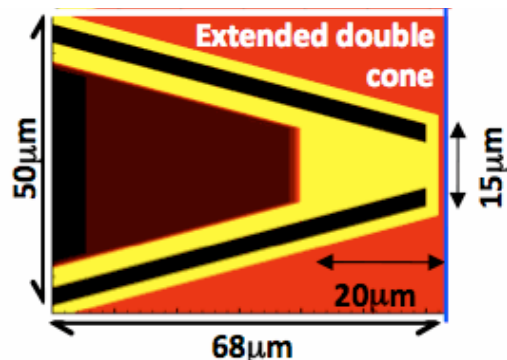
(3) 加熱用レーザーのプレパルスが、コア加熱効率に深刻な影響を与えることが明らかになったが、プレパルスそのものはレーザー装置のハードウェアに依存するものであり、容易には除去できない。そこで、コーン入口に薄膜 ($0.1\mu\text{m}$) を置きプレパルスの進入を妨げる方法が検討されている。薄膜はプレパルスを吸収してプラズマ化・膨張し、コーン内に非常に密度の低いプラズマとして充満する。その結果、プレパルスはコーン先端部内面には到達できず、スケール長の大きなプリプラズマは生成されない。2次元光線追跡流体コードにより、プレパルスと薄膜の相互作用をシミュレーションした結果、プレパルス照射から 1.8ns 後には薄膜に由来するプラズマは $800\mu\text{m}$ 程度に広がり、 n_{cr} の 3%以下となることがわかった。この結果、加熱用レーザーのメインパルスは、非常に長尺な希薄プラズマ中を伝播することになる。そこで、このような加熱用レーザーの伝播が、生成される高速電子のビーム強度およびスペクトルにどのような影響を与えるのかを調べた。

コーンプラズマは $Z=30$, $A=197$, $500n_{\text{cr}}$, $10\mu\text{m}$ の Au プラズマとして扱い、その前面に高速電子を生成させるため $Z=3.5$, $A=6.5$, $10n_{\text{cr}}$, $50\mu\text{m}$ の CH フォームプラズマ、背面に $Z=3.5$, $A=7$, $500n_{\text{cr}}$, $20\mu\text{m}$ の CD プラズマを置いた。そして、希薄プラズマとして $Z=1$, $A=1$, $0.01 \sim 1n_{\text{cr}}$, $150/300\mu\text{m}$ の H プラズマを CH フォームの前に置き、強度 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 、半値全幅 1ps のガウシアンパルスを加熱用レーザーとして、統合シミュレーションを行ってコア加熱を評価した。希薄プラズマなしの場合と比べたコア電子温度の低下率を希薄プラズマの面密度を横軸として下図に示す。

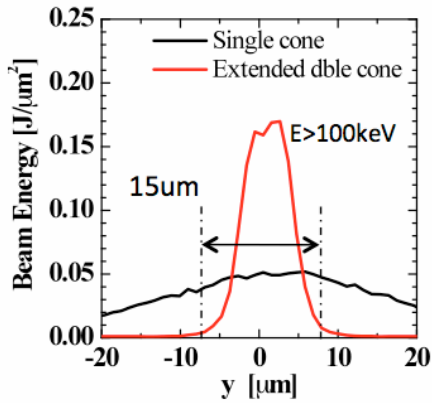
低下率を 10%以下に抑えたい場合には、希薄プラズマの面密度を $50n_{\text{cr}}\mu\text{m}$ 以下にしなければならないことがわかった。前述の薄膜とプレパルスの相互作用の結果生成される希薄プラズマの面密度は $24n_{\text{cr}}\mu\text{m}$ であり、プリプラズマを抑制するこの方法の有効性が期待できる。



(4) 高速点火による核燃焼実現には 15kJ 程度のコア加熱エネルギーが必要だと見積もられており、加熱用レーザーのエネルギーが 100kJ の場合、加熱用レーザーからコアへのエネルギー結合効率は 15%以上が要求される。しかし、プリプラズマがない場合でさえ、その結合効率は 7.5%程度であり、更なる加熱効率の改善が望まれるため、下図に示す延伸二重コーンを提案した。これは、コーン側壁を二重にしてその間を真空ギャップとし、高速電子の流れにより生成されるシース電場および準静的磁場を利用して高速電子を閉じ込め、加熱効率を高めようとする二重コーンを発展させたもので、真空ギャップとともに先端を長くすることで、高速電子の発生点からコア近くまで高速電子をガイドすることを目的としている。



プリプラズマなしのコーンを仮定し、延伸二重コーンの先端部 (チップ内面から $20\mu\text{m}$ 前方) にて観測した高速電子ビームのエネルギー横方向分布を単純なシングルコーンの場合と比較して下図に示す。通常の単純コーンの場合、高速電子は 60 度の角度広がりを持って発生点から伝搬するため、横方向に広く拡散している。一方の延伸二重コーンの場合、ギャップに生成する自己生成磁場 ($\sim 30\text{kT}$) 等によって高速電子が閉じ込められ、フォーカスされていることがわかる。この電子ビームプロファイルを用いた統合シミュレーションによるコア加熱計算を行った結果、延伸二重コーンでは、エネルギー結合効率は 19%と単純シングルコーンに比べ 2.5 倍も大きくなり、前述した 15%以上の結合効率という要請を満たす結果となった。



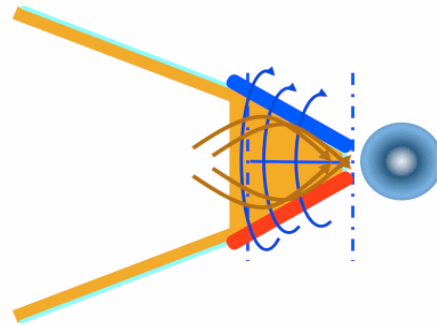
(5) 加熱用レーザーにより生成される高速電子が大きな発散角を持つ原因の一つとして、高速電子電流とそれを打ち消すために流れる背景電子電流に起因するワイベル不安定性により誘起される準静的磁場の存在が考えられている。そこで、Au コーンプラズマ ($Z=30$, $A=197$) を厚さ $10\mu\text{m}$ 、幅 $6\mu\text{m}$ 、電子密度 $20n_{cr}$ 、電子温度 1keV の一様プラズマとし、その前面に密度スケール長 $0.5\mu\text{m}$ のプラズマをプリプラズマとして置き、加熱用レーザーは、波長 $1\mu\text{m}$ 、強度 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 、立ち上がり 5fs のフラット平面パルスとし、2次元粒子シミュレーションを行い、ワイベル不安定性により誘起される準静的磁場を観測した。その結果、 50fs 程度の短い時間で $\pm 10\text{kT}$ に達する準静的磁場が、レーザー照射面近傍に誘起されることが確認された。この磁場強度では、 3MeV 程度のエネルギーを持つ高速電子のラーマー半径は、レーザー波長程度となり、大きな発散角に繋がる。

まず、ワイベル不安定の性質を調べるため、線形成長率を解析した。その結果、背景電子温度が高くなると、成長率は急激に小さくなり、最大成長を与える波長は長くなることがわかった。このため、何らかの理由により背景電子温度が上昇すると、ワイベル不安定性が抑制されて磁場が成長せず、高速電子の発散角が小さくなることを期待できる。

高速電子が伝播するプラズマの密度が低い場合、高速電子電流を中性化するために流れる背景電子の速度は速くなり、流体力学的な不安定性を引き起こすことが知られている。背景電子は、この不安定性によって加熱され、背景電子温度が上昇する。そこで、ターゲットに低密度のくぼみ (幅 $0.5\mu\text{m}$ 、電子密度 $10n_{cr}$) を設けて、流体力学的不安定性により背景電子を加熱することを試みた。この結果、 50fs において背景電子温度は 100keV 以上に達したが、背景電子の速い流れにより、ワイベル磁場はより大きい強度まで成長し、高速電子の発散はかえって悪化した。このワイベル磁場の特性に着目すると、同じ場所で定常的に成長してはならず、非定常的であること

がわかった。この非定常性は、高速電子の発散を強めると考えられるため、磁場が誘起される場所を固定することが、発散の抑制に寄与すると考えられる。また、単純に散乱するのではなく、ジグザグ運動により高速電子をガイディングする効果も期待できるため、穴あきターゲットを考案した。その結果、 3MeV 以下のエネルギーの高速電子については、発散角を改善できることがわかった。しかし、穴の存在により高速電子の流れそのものは抑制されるため、高速電子ビーム強度は低下しており、最終的な加熱効率の評価は今後の課題である。

(6) 高密度プラズマ中における磁場は、抵抗率の空間勾配に起因する項により時間発展することが知られており、高速電子を抵抗率の高い領域に閉じ込めるような磁場が自己生成される。この特性を利用して、高速電子をコアまでガイディングすることを目的とし、下図に示すとんがりチップカウンターゲットを提案した。



とんがりチップ部の材料として、周辺の爆縮プラズマよりも高Zな物質を用いると、物質境界に高速電子をチップ内に閉じ込める磁場が誘起される。加熱に寄与する数 MeV 程度の高速電子を閉じ込めるには、数 kT の磁場が必要である。抵抗率の勾配が大きいほど、つまりチップ材のZが大きいほど誘起される磁場は強くなる。しかし、その一方で高速電子がチップ中を伝搬する際の衝突効果によるエネルギー損失や散乱が大きくなる負の影響も懸念される。そこで、様々な材質のチップ材 (Au, Cu, Al, ダイヤモンド用炭素 (DLC)) を仮定し、統合シミュレーションにより、ガイディング特性および加熱効率について、誘起された最大磁場強度と高密度コア領域 (密度 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上) における付与エネルギーを評価した。そして、従来の先端部がフラットトップで厚み $7\mu\text{m}$ の Au コーンの結果と比較した。

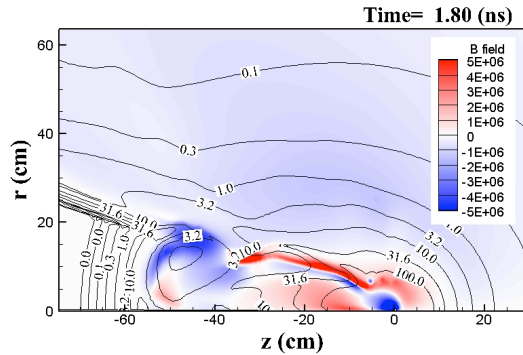
その結果、とんがりチップコーンでは、チップ表面近傍に高速電子ビームを閉じ込める磁場が誘起され、強度は $800\sim 1.5\text{kT}$ にも達することが観測された。この磁場により、

比較的低エネルギーの高速電子がチップ内に閉じ込められてコアへとガイディングされ、コア領域での高速電子密度が高くなることがわかった。そして、誘起された磁場強度は、 Z が大きいほど大きくなることが確認できた。Au フラットトップコーンに比べると、とんがりチップコーンではチップ内での伝播距離が長くなる ($\sim 30\mu\text{m}$) ため、衝突効果の影響が大きくなる。このため、高 Z 材では閉じ込め効果は期待できるものの、チップ内での衝突効果による負の影響の方が大きく、コアへのエネルギー付与が低下することがわかった。そして、統合シミュレーションの結果、磁場強度、すなわち閉じ込め効果は小さいものの、チップ内での衝突効果の小さい中程度の Z を持つ DLC や Al が、とんがりチップコーンの材料として適していることがわかった。

(7) 高強度レーザーを平板ターゲットに照射した場合、ターゲット近傍ではレーザー照射によりアブレーション構造が形成され、電子の温度勾配と密度勾配の方向が一致しない部分ができるため、これに起因する $\nabla T_e \times \nabla n_e$ 項 (熱電効果) により磁場が生成されることが知られている。この磁場を爆縮過程で燃料と同時に圧縮すると最大圧縮時には、数 kT にまで達するとされている。このような強磁場が制御できれば、高速電子ビームの収束による加熱効率の向上が期待できる。これまでの解析では、2次元輻射・流体シミュレーションで得られた電子の密度と温度分布から、ポストプロセスによって磁場の輸送を計算し、予想通りの磁場が生成・圧縮されることを確認した。しかし、実際には熱伝導係数は磁場に影響されることが知られているように、輻射流体と磁場輸送は同時に解くことが求められている。そこで、既存の2次元輻射・流体コードを拡張して、磁場の時間発展方程式を導入した。

金コーンが付いたプラスチックシェル (半径 $250\mu\text{m}$, シェル厚 $7\mu\text{m}$) に、エネルギー 3.3kJ , レーザー波長 $0.53\mu\text{m}$, 12 ビームのレーザーを照射した場合の爆縮過程において、金コーンとシェルの境界面で発生する磁場の時間発展を評価した。シェル内側の電子密度分布の勾配と中心からの反射衝撃波による温度上昇の結果発生する温度勾配の非平行性が顕著に現れており、磁場が自己生成され、爆縮とともに圧縮されることにより大きな磁場になることが確認できた。下図に最大圧縮時の磁場の強度分布と電子密度分布 (等高線) を示す。磁場は、最大 6kT まで圧縮されていることがわかった。この結果、ホール係数の比較的大きな領域が存在することが明らかになり、磁場を考慮した Braginskii の熱伝導係数を考えると流体運動にも無視で

きない可能性があると考えられる。



(8) 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つため、コア加熱効率の著しい低下が懸念されている。このため、外部磁場によるガイディング効果や自己生成磁場によるピンチ効果を用いるターゲット設計が検討されている。一方、超高強度レーザーにより、生成効率は悪いものの発散角が小さいイオンビームが生成できるため、それを高速点火に利用することが考えられている。

多くの水素イオンビーム生成実験では、水素イオンは不純物に由来しており、その量等の特性を制御することは難しい。そこで、イオンビームを生成するターゲット材は CH とし、水素イオンだけではなく、炭素イオンの利用も考慮する。そして、電子および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するために、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して、2次元相対論的電磁粒子コードにより生成されるイオンビームの特性を調べ、高速点火に応用できるかを検討した。その結果、加熱用レーザーからイオンへのエネルギー変換効率は、1%程度であることがわかった。更に、統合シミュレーションの結果より、イオンは、66~82%のエネルギーをコアに付与し、加熱に対して 17~32%の寄与があり、コア電子温度は 6~10%上昇することが明らかになった。

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 15 件)

- ① H. Sakagami, K. Okada, Y. Kaseda, T. Taguchi and T. Johzaki, Collisional effects on fast electron generation and transport in fast ignition, Laser Part. Beams, 30, 243-248, 2012. 査読有 DOI:10.1017/S0263034611000887
- ② H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki and H. Nagatomo, Effects of Long Rarefied Plasma on Fast Electron Generation for

- FIREX-I Targets, Laser Part. Beams, 30, 103-109, 2012. 査読有
DOI:10.1017/S0263034611000735
- ③ A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo and K. Mima, Generation of Pre-plasma and Its reduction for Fast Ignition, Laser Part. Beams, 30, 103-109, 2012. 査読有
DOI:10.1017/S0263034611000723
- ④ T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. -B. Cai, H. Sakagami, Y. Nakao, and K. Mima, Pre-Plasma effects on core heating and enhancing heating efficiency by extended double cone for FIREX, Nucl. Fusion, 51, 073022-9, 2011. 査読有
DOI:10.1088/0029-5515/51/7/073022
- ⑤ A. Sunahara and K. A. Tanaka, Atomic number Z dependence of dynamics of laser-ablated materials, Fusion Engineering and Design, 85, 935-939, 2011. 査読有
DOI:10.1016/j.fusengdes.2010.09.017
- ⑥ H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Shiraga, H. Sakagami, et al., Controlling dynamics of imploded core plasma for fast ignition, J. Phys.: Conf. Series, 244, 022050-4, 2010. 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/244/2/022050
- ⑦ T. Johzaki, H. Nagatomo, A. Sunahara, H. -B. Cai, H. Sakagami and K. Mima, Integrated simulations of core heating in cone-guiding fast ignition FIREX-I, J. Phys.: Conf. Series, 244, 022040-4, 2010. 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/244/2/022040

[学会発表] (計 71 件)

- ① H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, Integrated Simulations for Fast Ignition with Ion Beams, 6th International Conference on The Frontiers of Plasma Physics and Technology, 2013年3月4日, Gaborone, Botswana. 招待講演
- ② H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Nagatomo, and K. Mima, Integrated Simulations for Fast Ignition with Ion Beams, 12th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, 2012年11月4日, Napa Valley, CA, USA.
- ③ H. Sakagami, T. Ogata, M. Hashida, and S. Sakabe, Formation Mechanism of Periodic Nano-grating Structure on Metal Surface Induced by Short Pulse Laser, 2nd International Symposium on Laser Interaction with Matter, 2012年9月9日, Xian, China.
- ④ H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, Effects of Multi Laser Beams for Fast Electron Generation, 39th EPS Conf. on Plasma Physics, 2012年7月2日, Stockholm, Sweden.
- ⑤ H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, Interference Effects of Laser Beams for Fast Electron Generation, Plasma Conference 2011, 2011年11月24日, 石川県立音楽堂.
- ⑥ H. Sakagami, T. Johzaki, T. Taguchi and K. Mima, Suppression effects of Weibel instability for fast electron divergence, 7th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2011年9月13日, Bordeaux, France.
- ⑦ H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, Integrated Simulations for FIREX-I Fast Ignition Experiments, 5th International Conference on The Frontiers of Plasma Physics and Technology, 2011年4月2日, Singapore. 招待講演
- ⑧ H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, Effects of Large Rarefied Plasmas inside Cone on Fast Electron Generation for FIREX-I Targets, 11th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, 2010年10月19日, Shanghai, China.
- ⑨ H. Sakagami, T. Johzaki, A. Sunahara, and H. Nagatomo, Effects of Long Rarefied Plasmas on Fast Electron Generation for FIREX-I Targets, 37th EPS Conference on Plasma Physics, 2010年6月25日, Dublin, Ireland.

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) 連携研究

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
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