

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分  
平成30年3月23日現在

Super-penetration を用いた高速点火の加熱検証

Proof of fast ignition scheme using Super-penetration of laser light

課題番号：15H05751

田中 和夫 (TANAKA KAZUO)

大阪大学・先導的学際研究機構・特任教授（常勤）



研究の概要

本研究課題はレーザー光が相対論効果と光圧力効果を伴い臨界密度を超える高密度プラズマの中を自己集束し、穿孔するスーパーペネトレーション(SP)現象を高速点火に適応し、高密度に爆縮された燃料コア近傍まで加熱用レーザービームを導入させ、点火級の大規模燃料コアへの加熱の可能性を探り、高速点火レーザー核融合の実現を目指す。

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高速点火、レーザー自己集束、高速電子

1. 研究開始当初の背景

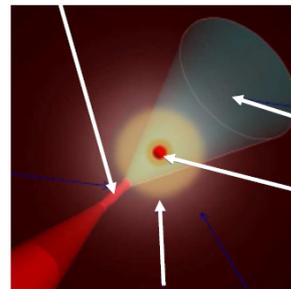
高速点火方式は、従来を中心点火方式で重要課題とされてきた爆縮時の流体不安定性条件を回避でき、数分の1のレーザーエネルギーで核融合点火を達成できると考えられる。我々は、導波路として中空の金コーンを予め差し込んだ球ターゲット用い、高速点火実験において、超高強度レーザーパルス加熱により爆縮コアで1keVのイオン温度を世界で初めて達成した実績がある。

しかし高強度レーザーの大型化に伴って主パルスの前に存在するプリパルスにより発生するプラズマとメインの加熱レーザーパルスの相互作用により、電子への変換効率が抑制され、電子発散角がコアを狙う立体角より大幅に大きくなる課題に直面している。

2. 研究の目的

我々はスーパーペネトレーション(以下SPと略)と呼ぶレーザー自己集束現象を発見し、この10年間基礎実験でこのSP手法を高速点火へ応用し、高密度に爆縮された燃料コア近傍まで加熱用レーザービームが進入し、コアへの加熱が可能である事を示してきた。SPとは、レーザー光が相対論効果と光圧力効果を伴い臨界密度を超える高密度プラズマの中を自己集束し、穿孔する現象である。本研究課題では(1)1ピコ秒もしくは10ピコ秒のレーザーを使い、SPを大規模スケール(=点火プラズマ級)の平面プラズマで実証し、加熱実験に向けた特性評価・最適化を行う。(2)爆縮を伴う点火級大規模スケールのプラズマでSPの有効性実証を行い、燃料コアの加熱を検証する。

コロナプラズマ中をレーザー自己集束で進入する加熱レーザー(強度 $>10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>)



加熱レーザーから発生した高速電子(E=1~10 MeV)  
爆縮された高密度燃料コア(面密度 $>0.3$ g/cm<sup>2</sup>)

コアを取り巻くコロナプラズマ(スケール長~1mm)

3. 研究の方法

SP手法を大規模プラズマであるレーザー核融合の高速点火方式実験に適用して高速点火の有効性を証明することが本研究計画の主眼である。以下を順に実施する

- (1)臨界密度を上回る高密度プラズマでのSPの観測に必要な計測手法を確立する。
- (2)平板ターゲットに作られた大規模プラズマ(1mm級)においてSPモードを実証する。二つのレーザーパルスモード(単パルスもしくはダブルパルス)を使い、加熱実験に向けた最適化を行う。
- (3)球状のプラスチックターゲットを用いた大規模爆縮球対称プラズマにおいて、SPの加熱の有効性を実証する。
- (4)球状の重水素燃料を用い、爆縮したコアへのSPによる加熱の有効性を実証する。

4. これまでの成果

- (1)SPの観測手法の確立
  - a. SPモード時において、高強度レーザーが長スケールプラズマ中にプラズマチャンネルを形成して伝搬する際、チャンネル先端から反射されるレーザーの分光計測を行った所、強

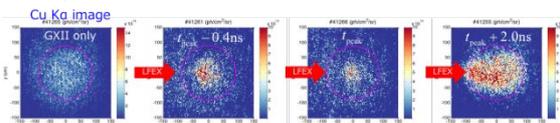
い赤方偏移（ドップラーシフト）が観測された。これは臨界密度以上のプラズマ中を高強度レーザーがある速度で伝搬していることを示しており、つまり SP モードが臨界密度以上のプラズマでも存在し、さらにそのシフト量から伝搬速度を推測することが出来る重要な実験結果を得た。（論文 7）

b. 紫外レーザーをプローブ光として用い、レーザーの屈折率がプラズマ密度に依存することを利用してプローブ光のプラズマ透過後に角度フィルターを挿入し、プローブがどの密度領域から屈折されたかを明示する手法をロチェスター大学の研究者らと共同開発し、その手法を SP モードにおけるプラズマチャンネルの計測に応用した（論文 12）

(2) 平板ターゲットに作られた大規模プラズマにおける SP モードを実証

平板ターゲットに kJ クラスの高エネルギーレーザーを照射して mm 以上の大規模プラズマを生成し、そこに高強度レーザーを照射する実験を米国ロチェスター大学にて行った。SP に伴う高密度領域でのプラズマチャンネル形成の様子は上記紫外レーザーを用いた角度フィルター計測にて行った所、プラズマの温度、レーザー照射位置によってチャンネル形成及び高速電子生成が変化することを見出し、効率的な伝搬のためにはコロナプラズマ温度を高温に保ち、1/10 臨界密度近傍に照射位置すべきことを明らかにした。（Phys. Rev. E 誌に投稿中）

(3) 大規模爆縮球対称プラズマにおける SP の実証



大阪大学レーザー科学研究所にて爆縮プラズマ中での SP における加熱の有効性の実証実験を行った。生成された高速電子によるプラズマの加熱を計測するため、ターゲットに少量の銅イオンを添付し、高速電子が銅イオンと衝突する際に放出する銅特性 X 線のイメージを計測した。上図はことなる高強度レーザー照射タイミングでの実験結果である。爆縮されたプラズマの大きさに依存した X 線の発光領域の増減が見られ、特に最大爆縮時には形成されたと考えられるコア領域の大きさに等しい発光が見られ、本手法にて実際に高速電子がプラズマを加熱している様子を初めて計測することに成功している。（論文 2 及び Nature Phys. 誌に投稿中）

(4) 超並列化大規模シミュレーションコード開発

大型レーザー装置を用いた実験期間は限られているため、実験で用いる大規模爆縮プラズマ（固体密度以上、ミリメートル空間スケール、数10ピコ秒）を取り扱うことが出来る粒子シミュレーションコードの開発を行い、超並列化技法である動的負荷分散手法を導入し、従来手法より最大 10 倍の高速化の実現に成功した。実際にミリメートルサイズで最大密

度が数倍の臨界密度を持つプラズマ中の高強度レーザーの相互作用計算を行い、臨界密度を超えてレーザーが伝搬する SP モードの確認に成功した。

5. 今後の計画

SP モードによる点火級コアプラズマ加熱の検証を進めていく。

1. レーザーチャンネル先端で数 MeV までのプラズマ電子加熱とその前方への伝播が観測されており、加熱が効率よく起こるためのプラズマ及びレーザー条件の探求し、コア領域までの熱伝搬を検証していく。

2. 球状ターゲット内に金属片を挿入することで金属とプラズマとの抵抗境界に強い磁場が発生する。その磁場により生成した高速電子を収束し、コアへ効率的に伝搬させることを試みる。爆縮プラズマ中での金属片の形状と磁場生成を実験とシミュレーション双方によって検証していく。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. L. C. Jarrott, H. Habara, et al., Physics of Plasmas, 24, 102710 (2017).
2. T. Gong, H. Habara, K.A. Tanaka, et al., Physics of Plasmas, 24, 112709 (2017).
3. A.G. Smyth, H. Habara, K.A. Tanaka et al., Physics of Plasmas, 23, 063121 (2016).
4. H. Habara, H. Sakagami, K.A. Tanaka et al., Physics of Plasmas, 23, 063105 (2016).
5. R. Murakami, H. Habara, H. Sakagami, K.A. Tanaka et al., J. Phys. Conf. Ser. 717, 012039 (2016).
6. L. C. Jarrott, H. Habara et al., Nature Physics, 12, 499-504 (2016).
7. H. Habara, K.A. Tanaka et al., J. Phys. Conf. Ser., 717, 012019 (2016).
8. S.N. Chen, H. Habara, K.A. Tanaka et al., Sci. Rep., 6, 21495 (2016).
9. H. Habara, K.A. Tanaka, et al., Plasma Phys. Cont. Fusion, 57, 064005 (2015).
10. T. Iwawaki, H. Habara, A. Tanaka et al., Plasma Fusion Res., 10, 1304005 (2015).
11. T. Iwawaki, H. Habara, H. Sakagami, K.A. Tanaka et al., Phys. Rev. E, 92, 013106 (2015).
12. S. Ivancic, H. Habara, K.A. Tanaka et al., Phys. Rev. E, 91, 051101 (2015).

ホームページ等

<http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/le/en/>