

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (S)

研究期間：2006～2010

課題番号：18106016

研究課題名 (和文) 衝撃点火レーザー核融合の概念実証

研究課題名 (英文) Concept Exploration of Impact Fast Ignition

研究代表者

疇地 宏 (AZECHI HIROSHI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：90135666

研究成果の概要 (和文)：本研究の目的は衝撃点火方式によるレーザー核融合の原理実証を行うものである。この原理を実証するためにはレーザー核融合用の燃料の一部を $5\text{g}/\text{cm}^3$ まで圧縮しながら $1000\text{km}/\text{s}$ までの高速に加速できなければならない。第一に、米国海軍研究所のNIKEレーザーを用いて、燃料片を $1000\text{km}/\text{s}$ まで加速するという目標を達成した。また圧縮しながら加速するという実験にも成功し、大阪大学激光XII号で $0.5\text{-}0.7\text{g}/\text{cm}^3$ で、 $370\text{km}/\text{s}$ までの加速に成功した。

研究成果の概要 (英文)：

The final goal of this study is to demonstrate the concept of the impact ignition. This scheme requires the fast accelerated fusion fuel with the velocity of large than 1000 km/s and the density of larger than g/cm^3 . Firstly the accelerated fuel with the over 1000km/s was experimentally succeeded by using NIKE laser facility in U.S. Secondly the acceleration and compression were simultaneously examined and archived to be the velocity of 370 km/s and the density of $0.5\text{-}0.75\text{ g}/\text{cm}^3$ by using GEKKO XII laser facility in Osaka university Japan.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	18,200,000	5,460,000	23,660,000
2007年度	18,000,000	5,400,000	23,400,000
2008年度	18,700,000	5,610,000	24,310,000
2009年度	16,900,000	5,070,000	21,970,000
2010年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
総計	86,900,000	26,070,000	112,970,000

研究分野：理工系 工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：慣性核融合 衝撃点火 レーザー不安定性

1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合は、重水素に強力なレーザーを照射することによって、固体密度の1000倍以上の高密度に圧縮する。この高密度プラズマの一部を高温に加熱することによって、高温点火部を形成させると、高温点火部から放出されるアルファ粒子

と電子の熱伝導によって、周囲の燃料を順次加熱し、結果、投入レーザーエネルギーの100倍以上のエネルギー利得を実現しようとするものである。点火方式には、球状の重水素ターゲットに球対称爆縮を施し、圧縮により、中心部に高温点火部を形成する、中心点火方式と、高密度圧縮コアを外

部から別のレーザーで追加熱する高速点火方式が存在する。高速点火方式は、点火に必要な燃料中心部の圧力上昇を伴わないことから、中心点火方式に比べてはるかに小さなエネルギーで高いエネルギー利得を得られると期待されている。しかし、高速点火方式は、未解明の現象を伴うため、定量的な条件設定や予測を行うことが困難である。

この問題を解決する方策として、分担者（村上）は「衝撃点火」と呼ばれる、第3の点火方式を提案した。衝撃点火用ターゲットは、図1に示すように、コーン状の物質内外に燃料ターゲットを装着した構成になっている。コーン外側のターゲットをレーザーにより爆縮し、コーン内部のターゲットを別のレーザーで加速し、爆縮したコアに衝突させることによって、高温点火部を作り出すものである。この衝撃点火方式は、中心点火方式同様の高い予測性を持ちながら、高速点火方式同様の大幅な小規模化を図ることができる。

衝撃点火に必要な衝突速度は、5千万度から1億度の点火温度を運動エネルギーに置き換えることによって求めることができ、その衝突速度はおよそ1000km/sである。このような超高速領域まで物質を加速しようとする、流体不安定性により燃料層が破壊され、加速過程で飛翔体が崩壊してしまう。したがって、このような超高速領域までの加速を必要とする衝撃点火方式

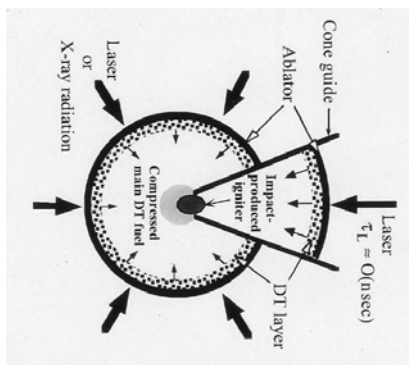
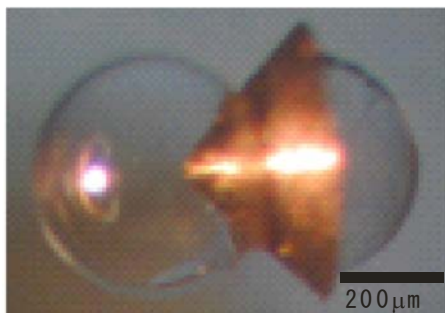


図1. 衝撃点火ターゲットの写真とその模式図

は不可能であると考えられてきた。

しかし、申請者（疇地）および分担者（藤岡）は、この流体不安定性の成長率が、電子の非局所的なエネルギー輸送により、著しく低下することを発見し、さらに、エネルギー輸送を制御することにより流体不安定性を抑制する方法を確立した。図2にシミュレーション計算による流体不安定性抑制効果の検証結果を示す。従来の燃料材料のCD（左）に比べて少量のBrを加えることによって、細かなパターンの抑制効果が働き、燃料の破断が防がれている事がわかる。

申請者が確立した、この流体不安定性の制御法は不可避と考えられていた衝撃点火方式の最大の問題であった燃料層の崩壊の問題を解決し、第3の方式として、十分にその可能性が期待できると考えられる。

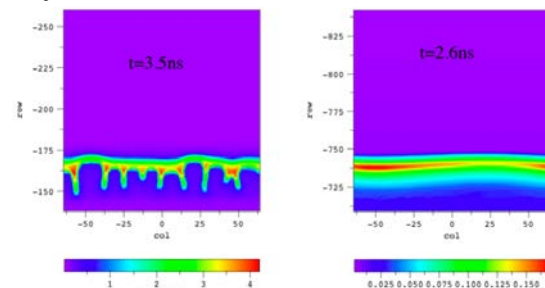


図2. 流体不安定性の成長（左）と Br ドープによる不安定性の抑制効果（右）

2. 研究の目的

一般に、レーザー核融合の新しい概念を成熟させるためには、概念実証段階→原理実証段階→実証段階といった、段階的な検証方法をたどる。先に挙げた、中心点火は実証段階、高速点火は原理実証段階にある。本研究提案である衝撃点火は、概念実証段階にある。

本研究の目的は、衝撃点火が可能であるか否かを判断するための十分な物理的、工学的理解を得ることであり、次にあげる3つのマイルストーンを実現することである。

[1] 衝撃点火最大のクリティカルパスである1000km/sの高速飛翔流体を実現する。

[2] レーザー波形の整形と球集束効果により高速飛翔体を圧縮し、動圧力を増加させる。

[3] 前2つの成果に基づいて、爆縮コアを加熱する統合実験を行い、核融合中性子発生数を2桁以上増大させる。

3. 研究の方法

本研究は主に4つの研究課題があった。

一つ目は理論シミュレーション計算により衝撃点火実現のために必要なレーザー波形、燃料シエルの厚さ、材料を決定する。実験的に得られたデータが意味する物理現象を明らかにするためにもシミュレーションによる実験の再現も重要な課題となる。

二つ目はレーザー波形制御技術を開発する事である。高速飛翔体生成に不可欠な波面の整った高強度のレーザーパルスを作り出す必要がある。30cm直径という大口径のレーザーの波面を平滑化できるランダム移送版の開発が必要であった。また米国の下記軍研究所との共同研究を行い、先方が長年かけて開発をしてきたNIKEレーザーを用いた実験を行った。NIKEレーザーはKrFレーザーであり波長が248nmと紫外域にあり、527nmである激光XIIレーザーよりも優れた加速が期待できる。さらにNIKEレーザーは世界有数の平滑な強度分布を誇るレーザーであり、個のレーザーであれば1000km/sの加速が実現出来ると考えられた。

三つ目は計測技術の開発である。衝撃点火原理を実証するためには最終的に主燃料部がどれだけ加熱されたか、その加熱された領域にどれだけの燃料面密度があったかという物理量を計測する必要がある。そのために加速飛翔体を観測するためのx線画像時間分解計測技術、イオン温度や燃料面密度を計測するための中性子計測技術の開発が不可欠であった。

四つ目はターゲット製作技術の開発である。プラスチックシエルを半分に切断し、開口角の大きな金製のコーンに接続するという細かな加工技術、重水素プラスチックに臭素を3wt%といったごく微量均一にドーピングする技術開発が必要であった。

4. 研究成果

ここに本研究課題の研究成果の特に優れた成果を2つまとめる。一つ目は平成22年度に米国で行われた1000km/s達成の成果であり、二つ目は新素材シンチレーターの特許化に関するものである。

平成22年度年度末に共同研究グループである米国海軍研究所NIKEレーザー施設において、衝撃点火原理実証のための高速飛翔体生成に関する実験が行われた。分担者である疇地グループが実験に参加した。NIKEレーザーは波長248nmで、1-4nsのパルス幅を持ち、スポット径500 μ m、スポット径内の強度分布の分布は5%以下と、高速飛翔体加速には最適のレーザーである。この装置を用いて、CDプラスチックフィルム、さらに流体不安定性を抑

えるための臭素をドーピングしたCDBrが加速された。CDBrを用いた実験で最高速度は1000km/sを超えるという世界記録を達成した。図2に加速軌跡を捉えた計測画像を示す。またそのCDBrはグラファイト製の板に衝突させる実験を行ったところ、CDBrが熱化し、核融合中性子を 10^6 個以上発生した。イオン温度2.7keVを達成し、点火温度である5keVにもう一息で届きそうな、優れた実験結果となった。

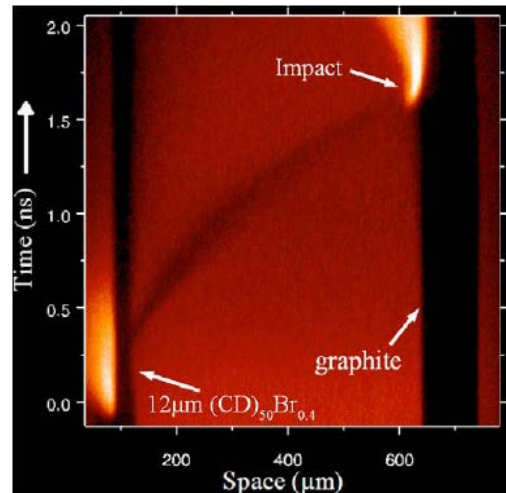


図2 単色結晶結像型バックライトX線ストリークカメラによる高速加速飛翔燃料の加速軌跡。横軸は空間縦軸に時間を取っている。左の黒い影がターゲットで、薄い黒い影が右上に伸びているものが飛翔体の加速軌跡を示し、影の濃さが密度を表している。右端に置かれたグラファイトターゲットに衝突し熱化して発光している様子が分かる。

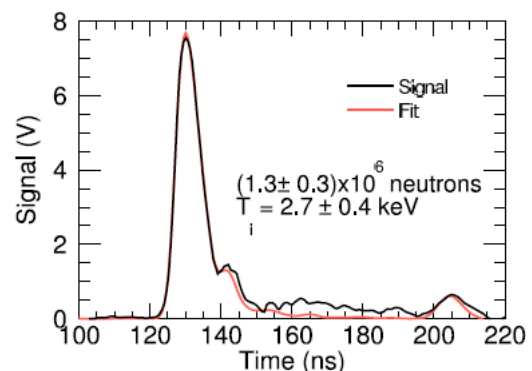


図3 図2の実験で発生した中性子の飛行時間分解計測結果。エネルギー拡がり観測されそこからイオン温度は2.7keVが達成されている事が分かる。

この成果に関する論文がAlan Berman Award 2011, Naval Research Laboratory賞に選ばれ、共同研究者らが連名で受賞した。

もう一つの大きな成果は、衝撃点火が起こった周辺燃料の面密度を測定するために散乱中性子法が提案された。この計測法は古くから提案はされていた物の、計測が難しく実現できなかった。低エネルギー中性子に感度を持ち、高速で時間分解をし、高いダイナミックレンジ計測が求められるからである。この目的のために、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレーター材料の開発が行われた。 ${}^6\text{Li}$ シンチレーターは散乱中性子計測に適切な感度特性を持つことが研究代表者疇地より提案されたが、従来の ${}^6\text{Li}$ シンチレーターでは時間分解能が100倍程度不足した。研究代表者疇地らのグループは熊本大などと共同で、APLF80+3Prという材料を開発した。ピークから1/100まで下がる時間で比較すると従来品の100倍程度の高速化を実現した。本材料は特許出願を行った。

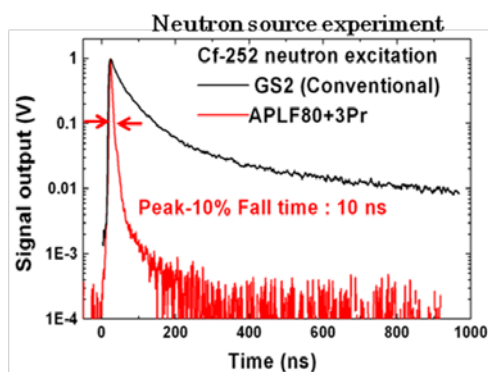
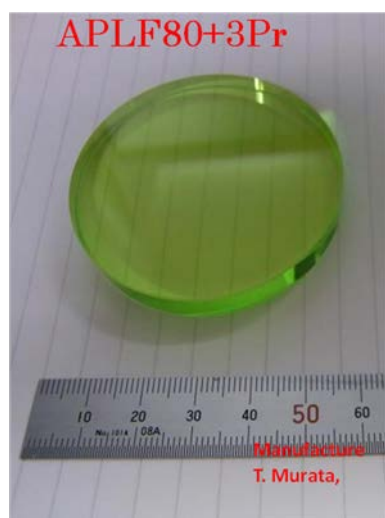


図4 上 開発したAPLF80+3Pr (写真) および、APLF80+3Pr (赤) と従来品 (黒) のシンチレーション発光減衰時定数の比較

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 32 件)

① “Experimental Evidence of Impact Ignition: 100-Fold Increase of Neutron

Yield by Impactor Collision” H. Azechi, T. Sakaiya, T. Watari, M. Karasik, H. Saito, K. Ohtani, K. Takeda, H. Hosoda, H. Shiraga, M. Nakai, K. Shigemori, S. Fujioka, M. Murakami, H. Nagatomo, T. Johzaki, J. Gardner, D. G. Colombant, J.W. Bates, A. L. Velikovich, Y. Aglitskiy, J. Weaver, S. Obenschain, S. Eliezer, R. Kodama, T. Norimatsu, H. Fujita, K. Mima, and H. Kan, Phys. Rev. Lett. 102, 235002 (2009)

② “Comprehensive Diagnosis of Growth Rates of the Ablative Rayleigh-Taylor Instability” H. Azechi, T. Sakaiya, S. Fujioka, Y. Tamari, K. Otani, K. Shigemori, M. Nakai, H. Shiraga, N. Miyanaga, and K. Mima, Phys. Rev. Lett. **98**, 045002-1-4, 2007 (査読有)

③ “From physics understanding of the ablative Rayleigh-Taylor instability to impact fast ignition”, M. Murakami et al., Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications 2007 (査読有)

④ “Neutron generation from Impact Fast Ignition” T. Watari, T. Sakaiya, H. Azechi, M. Nakai, H. Shiraga, K. Shigemori, H. Hosoda, H. Saito, Y. Arikawa, Y. Sakawa, S. Fujioka, Y. Hironaka, M. Murakami, M. Karasik, J. Gardner, J. Bates, D. Colombant, J. Weber, S. Obenschain, Y. Aglitskiy, P. A. Norreys, S. Eliezer, and K. Mima, J. Phys.: Conf. Ser. *112*, 022065, 2008 (査読有)

⑤ “Acceleration to high velocities and heating by impact using Nike KrF laser”, Max Karasik, J. L. Weaver, Y. Aglitskiy, T. Watari, Y. Arikawa, T. Sakaiya, J. Oh, A. L. Velikovich, S. T. Zalesak, J. W. Bates, S. P. Obenschain, A. J. Schmitt, M. Murakami, and H. Azechi, PHYSICS OF PLASMAS, Vol. 17, pp 056317, (2010)

[学会発表] (計 30 件)

① “Present status of fast ignition realization experiment (FIREX) and Inertial Fusion Energy development” 国際学会「inertial fusion science and applications 2011」, Bordeaux, H. Azechi, (招待講演)

② “Self-similar ablative flow of non-stationary accelerating foil due to nonlinear heat conduction”, 国際学会「inertial fusion science and applications 2011」, Bordeaux, M. Murakami,

③ “Multi channel down-scattered neutron detector for areal density measurement” Y. Arikawa, H. Hosoda, T. Nagai, K. Watanabe, K. Yamanoi, M. Cadatal-Raduban,

T. Shimizu, N. Sarukura, M. Nakai, T. Norimatsu, H. Azechi, N. Izumi, T. Murata, T. Suyama, A. Yoshikawa, K. Kamada, Y. Usuki, N. Satoh, H. Kan, 国際学会「inertial fusion science and applications 2011」, Bordeaux, H. Azechi, (招待講演)

④「衝撃点火方式における飛翔体加速実験」, 渡利威士、中井光男、疇地宏、弘中陽一郎、境家達弘、武田和夫、大谷一人、中村浩隆、細田裕計、有川安信、村上匡且、三間園興, 第25回プラズマ・核融合学会年会

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

①

名称: 中性子検出用シンチレータ及び中性子測定装置

発明者: 疇地宏、猿倉信彦、有川安信、中井光男、菅博文、村田貴広、須山敏尚、藤野茂、薄善行、吉田英樹、吉川彰、

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/57499

出願年月日: 平成22年4月27日

国内外の別: 国外

○取得状況 (計1件)

①

名称: 核融合ターゲット及び核融合点火方法

発明者: 村上匡且、菅博文

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 特許第4081029号

取得年月日: 平成20年2月1日

国内外の別: 国内

[その他]

プレスリリース

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/zone1/public/pressrelease/index.html>

ホームページに新聞発表記事と、衝撃点火に関する情報を公開

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畦地 博 (AZECHI HIROSHI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号: 90135666

(2) 研究分担者

藤岡 慎介 (FUJIOK SHINSUKE)

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: 40372635

重森 啓介 (SHIGEMORI KEISUKE)

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: 50335395

村上 匡克 (MURAKAMI MASAKATSU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号: 80192772

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

中井 光男 (NAKAI MITSUO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号: 70201663

(H19 から分担者として参画)

白神 宏之 (SHIRAGA HIROYUKI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号: 90183839

(H20 から分担者として参画)

乗松 孝好 (NORIMATSU TAKAYOSHI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号: 50135753

(H19 まで分担者として参画, H21 から分担者として参画)

門野 敏彦 (KADONO TOSHIHIKO)

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: 60359198

(H19 分担者として参画, H21 から分担者として参画)

藤田 尚徳 (FUJITA HISANORI)

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: 70135755

(H19 まで分担者として参画)

長井 圭治(NAGAI KEIJI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教
研究者番号：30280803
(H20 分担者として参画)

萩行 正憲(HANGYO MASANORI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授
研究者番号：10144429
(H20 分担者として参画)