

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16082204

研究課題名（和文） 縮退プラズマ中の核反応計測

研究課題名（英文） Fusion reaction diagnostics in degenerated plasmas

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：プラズマ診断技術およびターゲット技術の開発・改良と理論シミュレーションによる解析・設計に基づき、爆縮用の激光 XII 号レーザーと加熱用の PW/LFEX レーザーを用いて爆縮加熱統合実験を行い、縮退状態にある高密度燃料プラズマの核反応計測に成功し、加熱過程における高密度燃料プラズマ特性の計測・解析を行った。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------|------------|
| 2004年度 | 23,500,000 | 0 | 23,500,000 |
| 2005年度 | 19,000,000 | 0 | 19,000,000 |
| 2006年度 | 17,500,000 | 0 | 17,500,000 |
| 2007年度 | 14,700,000 | 0 | 14,700,000 |
| 2008年度 | 22,100,000 | 0 | 22,100,000 |
| 総計 | 96,800,000 | 0 | 96,800,000 |

研究分野：レーザー核融合

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：レーザー核融合、高速点火、フェルミ縮退、荷電粒子阻止能、二次核融合反応

1. 研究開始当初の背景

1989年に大阪大学にて個体密度の600倍の超高密度爆縮が達成された。このときの温度・密度からはプラズマが縮退度（=温度/フェルミエネルギー）=0.5程度の部分縮退状態にあることが予測された。燃料プラズマが縮退状態にあると、核融合反応で発生した α 粒子の阻止能が低下するため、自己加熱による点火の設計に影響を与える。これを実験的に評価するために必要な、以下の研究・技術開発・装置整備が準備されつつあった。

- (1) 流体不安定性制御による超高密度爆縮
- (2) 燃料となる固体重水素ペレット技術
- (3) 爆縮プラズマを正確に計測するための

X線ストリークカメラ等を用いた超高速X線画像計測技術

(4) 核融合反応状態を診断する中性子スペクトロメータ、粒子トラック検出器

(5) 2次元流体コード、2次元PICコード、フォッカープランクコードなどの計算機シミュレーション

(6) 高速点火核融合の爆縮加熱統合実験を行うための爆縮用激光XII号レーザーおよび加熱用PW、さらにLFEXレーザー

これらを総合的に用いて、縮退状態の実現と、縮退プラズマにおける核反応の研究を行うことが待たれている状態であった。

2. 研究の目的

レーザー核融合は、超高密度に爆縮した燃料の一部を加熱して核融合点火を起こし、そこから放出される α 粒子により周りの燃料を燃焼させるものである。核燃焼で主要な役割を果たす α 粒子は、主に電子との衝突によりプラズマにエネルギーを付与するが、超高密度に圧縮された電子はフェルミ縮退しているために、電子の遷移がパウリの原理により制限され、 α 粒子に対する阻止能が低下して輸送が非局所的になり、 α 粒子によって加熱される領域が空間的に広がる。

このため一方においては、 α 粒子の飛程より短い燃焼波の擾乱は安定化され、予測性の高い燃焼が期待できるとともに、他方では燃焼に必要な臨界質量が増加するために、点火・燃焼がクエンチされてしまう可能性がある。このようにフェルミ縮退が核燃焼に与える効果は、レーザー核融合の本質に関わる重要な物理であるにもかかわらず、現在までほとんど調べられて来なかった。これはフェルミ縮退するほどの高密度プラズマを生成することができなかったからであり、また超高密度プラズマ中での荷電粒子の阻止能を測定する方法がなかったためである。本研究の目的は、これらの困難を解決することにより、フェルミ縮退プラズマ中の核反応を調べ、核燃焼のフェルミ縮退効果を予測できるだけの物理的理解を得ることである。

3. 研究の方法

大阪大学レーザーエネルギー学研究室に既存の激光 XII 号レーザーおよび PW/LFEX レーザーにて縮退した爆縮プラズマの加熱実験を行う。具体的には以下のとおり。

(1) 高密度爆縮により核融合燃料の縮退プラズマを発生するため、ペレット製作装置、冷却装置、照射モニター装置を備え、重水素クライオペレットを製作する。

(2) 加熱された爆縮コアの動的挙動を観測するため、超高速時間空間分解 X 線画像計測法として、5-10 keV 領域での位相型フレネルゾーンプレートと 2 次元画像サンプリング X 線ストリークカメラ法を開発し、時間分解能 1 ps、空間分解能 $3\mu\text{m}$ の計測を実現する。

(3) 核融合反応による中性子スペクトルを精度良く計測するため、既存の中性子スペクトロメータを高速応答型に改造する。また、加熱ビーム照射時のノイズを避けるため γ 線遮蔽を強化する。縮退効果を検出するため、粒子トラックディテクタを用いた核反応粒子スペクトル計測を行う。

(4) これらと平行して、爆縮流体コードを構築、X 線輻射輸送を整備し、フォッカープランクコード (粒子輸送) と統合する。計算は分散処理型プログラムにより行い、核燃焼波の伝搬の物理を明らかにすると共に実験

結果を解析する。

以上を統合的爆縮実験に導入し、高密度クライオ燃料爆縮コアを発生しこれを総合的に診断し、実験結果と理論・シミュレーションとを比較しつつ、核融合反応の縮退プラズマ効果を実証する。

4. 研究成果

プラズマ診断技術およびターゲット技術の開発・改良と理論シミュレーションによる解析・設計に基づき、爆縮用の激光 XII 号レーザーと加熱用の PW/LFEX レーザーを用いて爆縮加熱統合実験を行い、縮退状態にある高密度燃料プラズマの核反応計測に成功し、加熱過程における高密度燃料プラズマ特性の計測・解析を行った。

(1) クライオターゲットの開発 :

クライオターゲットの爆縮に先立って、まず平面状のターゲットの流体力学が予測通りであるかどうかを検証する必要があるとの観点から、クライオ平面ターゲット製作装置を製造、その後順次、冷却装置を加え、さらに照射モニター装置を開発し、平面状のクライオターゲットの製作に成功した。これを用いて、レーザー照射した重水素ターゲットの先行加熱は主として X 線によるものであり、「許容レベル」以下であることを明らかにした。

球殻状のフォームシェルターゲットを開発、液体重水素の充填を行ない、充填の均一性を評価した。爆縮に必要な球状のクライオターゲットは、フォーム球殻に液体重水素を含浸させることにより形成される。しかし所要の形状 (直径 500 ミクロン、厚さ 50 ミクロン) をもつフォームを製造することが非常に困難であった。この原因は重合過程で球殻層とその周りの部分の密度整合が崩れてしまうことと、早期のゲル化が原因であった。これに対し「相関移動触媒」と呼ばれる新触媒と「直鎖型フェノール樹脂合成」と呼ばれる合成法を考案することによりこの問題を解決する見通しを得た。クライオターゲットの部品となる、構造サイズが 30nm しかない低密度カプセルの製造に成功した。これらにより、液体重水素層の均一化を行った。

新たに最近提案された CDBr アブレータの高真球、無欠陥、高均一膜厚なカプセル化に成功した。

(2) 高速 X 線画像計測 :

加熱された爆縮コアの動的挙動を観測するために、超高速時間空間分解 X 線画像計測法として、5-10 keV 領域での位相型フレネルゾーンプレートと 2 次元画像サンプリング X 線ストリークカメラ法 (2D-SIXS 法) を開発し、時間分解能 2 ps、空間分解能 $3\mu\text{m}$ の計測の原理を提案した。

位相型フレネルゾーンプレートが必要とされる空間分解能をもつことを検証した。問

題となる背景光をX線干渉により抑制する3段階の位相型ゾンプレートを新たに考案し、設計、開発した。

SIXS法の原理実証に基づきコーン付きターゲットの爆縮の観測に成功した。また、大口径X線ストリーク管を製作し、画像計測の大面積化を行い、サンプリング画像計測の観測領域を拡大した。このストリーク管の動作特性を詳細に解析し、サンプリング設計をおこない、実機を開発、実験に導入した。

一次元画像サンプリングを応用したX線ストリークカメラを多チャンネル化し、電子温度の二次元空間分布の時間変化を十分な時間空間分解能で直接計測する手法を確立した。

(3) 中性子スペクトロメータ：

核融合反応による中性子スペクトル計測には高エネルギー分解能の中性子スペクトロメータが必要である。これまでに既設の842チャンネル中性子スペクトロメータMANDALAを用いて、2次反応中性子の観測に成功した。しかし本実験で使用するためには2つの問題を解決する必要があった。第一は加熱用レーザーの一部との空間的干渉のため、中性子スペクトロメータを移設する必要があること。第二は加熱用レーザーの注入により発生する多量の γ 線対策を行う必要があることである。第一の問題に対処するために、半数チャンネルの移設を行った。また加熱用レーザーの注入により発生する多量の γ 線対策として必要な鉛厚さとその設置場所の最適設計を行った。

MANDALAの高次の γ 線対策としてターゲットチャンバー付近での鉛設置を行った。これにより中性子検出時のS/Nが改善された。また、ガンマ線遮蔽材の最適化を実施した。ターゲットから、検出機に向かう中性子ビーム経路を確認し、遮蔽体の使用ポートに対応した最適化を行った。

プラスチックシンチレーターを用いた高感度の高速応答中性子検出機を開発を行った。

2次反応とは独立した燃料密度計測のため、燃料粒子による散乱中性子を利用する方法を検討し予備試験を行なった。

高速点火のエネルギー担体である高速電子の特性を測定するため、チャンバー内部に装着できる小型のスペクトロメータを設計開発し、エネルギー較正実験を行った。これにより、加熱レーザー注入時に発生した高速電子を測定し、2-3 MeVのエネルギーであることを確認することに成功した。

(4) 理論・シミュレーション：

二次元流体コードにより高密度爆縮時の燃料のダイナミクスを評価し、実験での測定結果を解析した。

2次元輻射流体コードを用いて、コーン付

爆縮シミュレーションを実施した結果、時間波形、および空間照射分布の制御を工夫することによってコーン先端が破壊されるタイミングを遅らせることができることを明らかにした。新たに提案された二重コーンについて、さらに大規模なシミュレーション研究をすすめ、高速電子によって生成されるシース場、および磁場の高速電子への影響の詳細なメカニズムを明らかにした。これらの成果を考慮した高速点火の先進ターゲット設計を行った。

縮退プラズマ中の荷電粒子の伝搬解析について、動的局所場補正を用いた計算を行った。

(5) 統合実験実施：

以上の成果のもとで爆縮実験を行い、高密度爆縮燃料プラズマの特性を詳細に計測・解析することに成功した。

MANDALAにより、爆縮プラズマにおける2次反応中性子の観測に成功し、縮退度(温度/フェルミエネルギー) = 1程度のプラズマが形成されていることを検証した。

高密度爆縮プラズマに関する縮退計測に成功しているのは世界でも本研究グループのみであり、成果は注目を集めている。本研究で得られた成果をベースとして今後は、核融合点火燃焼実現に向けた研究展開を図る計画である。

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62件) 全て査読有り

① Keiji Nagai, Han Yang, Takayoshi Norimatsu, Hiroshi Azechi, Fadila Belkade, Yasushi Fujimoto, Takeshi Fujimura, Kana Fujioka, Shinsuke Fujioka, Hirofumi Homma, Fuyumi Ito, Akifumi Iwamoto, Takahisa Jitsuno, Yumi Kaneyasu, Mitsuo Nakai, Nobukatsu Nemoto, Hiroshi Saika, Yumiko Suzuki, Kentaro Yamanaka, Kunioki Mima, “Target Fabrication of Aerogel Capsule, Bromine-Doped Capsule, and Modified Gold Cone for Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) Project”, Nuclear Fusion, inpress.

② Hiroyuki Shiraga, Myongdok Lee, Norimitsu Mahigashi, Shinsuke Fujioka, and Hiroshi Azechi, “Observation of Asymmetrically Imploded Core Plasmas with a Two-Dimensional Sampling Image X-Ray Streak Camera”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 79, 10E920, (2008).

③ Jiayong Zhong, Hiroyuki Shiraga, and Hiroshi Azechi, “One-dimensional and

multichannels multi-imaging x-ray streak camera for imploded core plasma of shell-cone target”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 79, 10E920.

④ A. Iwamoto, T. Fujimura, M. Nakai, K. Nagai, T. Norimatsu, R. Maekawa, T. Mito, H. Sakagami, O. Motojima, H. Azechi and K. Mima, “Study on a fuel layering sequence of the foam target for the FIREX project” Journal of Physics, vol. 112, 032067 (2008).

⑤ K. Otani, K. Shigemori, D. Ichinose, T. Sakaiya, A. Sunahara, Y. Sakawa, M. Nakai, H. Shiraga, H. Azechi and K. Mima, “Temperature Measurement of Preheated Planar-Cryogenic Targets”, Journal of Physics, vol. 112, 012012 (2008).

⑥ H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, T. Nakamura, H. Sakagami, K. Mima, “Target design for high-density non-spherical implosion in fast ignition”, Journal of Physics, vol. 112, 022053 (2008).

⑦ T. Johzaki, H. Nagatomo, T. Nakamura, H. Sakagami, A. Sunahara, K. Mima, Y. Nakao, “Simulation Studies for Core Heating Properties in FIREX-I”, Journal of Physics, vol. 112, 022054 (2008).

⑧ H. Hosoda, M. Nakai, H. Furukawa, T. Watari, H. Azechi, N. Izumi, Y. Arikawa, Y. Sakawa, S. Dono, T. Fujiwara and K. Mima, “Development of TOF Neutron Spectrometer for the measurement of degenerated plasma in Fast Ignition experiment”, Journal of Physics, vol. 112, 032068 (2008).

⑨ Y. Arikawa, M. Nakai, T. Watari, H. Hosoda, K. Takeda, T. Fujiwara, Y. Furukawa, T. Norimatsu, H. Shiraga, N. Sarukura, H. Azechi, “Fast response neutron scintillation detector for FIREX” Journal of Physics, vol. 112, 032082 (2008).

⑩ H. Azechi, T. Sakaiya, S. Fujioka, Y. Tamari, K. Otani, K. Shigemori, M. Nakai, H. Shiraga, N. Miyanaga, and K. Mima, “Comprehensive Diagnosis of Growth Rates of the Ablative Rayleigh-Taylor Instability”, Phys. Rev. Lett. Vol. 98, 045002-1-4 (2007).

⑪ H. Shiraga, S. Fujioka, P. A. Jaanimagi, C. Stoeckl, R. B. Stephens, H. Nagatomo, K. A. Tanaka, R. Kodama, and H. Azechi, “Multi-imaging x-ray streak camera for ultrahigh-speed two-dimensional x-ray imaging of imploded core plasmas” Rev. Sci. Instrum. Vol. 75, pp. 3921-3925 (2004).

⑫ Yohei Tamari and Hiroshi Azechi, “Development of background reduced

Fresnel phase zone plate”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 75, pp. 4023-4025 (2004).

⑬ T. Watari, M. Nakai, H. Azechi, T. Sakaiya, H. Shiraga, K. Shigemori, S. Fujioka, K. Otani, K. Nagai, A. Sunahara, H. Nagatomo, and K. Mima,

“Rayleigh-Taylor instability growth on low-density foam targets” Phys. Plasmas 15, 092109-1-6 (2008).

⑭ K. Otani, K. Shigemori, T. Sakaiya, S. Fujioka, A. Sunahara, M. Nakai, H. Shiraga, H. Azechi, and K. Mima,

“Reduction of the Rayleigh-Taylor instability growth with cocktail color irradiation” Phys. Plasmas 14, 122702-122708 (2007).

⑮ Keiji Nagai, H. Azechi, F. Ito, A. Iwamoto, Y. Izawa, T. Johzaki, R. Kodama, K. Mima, T. Mito, M. Nakai, N. Nemoto, T. Norimatsu, Y. Ono, K. Shigemori, H. Shiraga and K. A. Tanaka

“Foam materials for cryogenic targets of fast ignition realization experiment (FIREX)” Nucl. Fusion Vol. 45, pp. 1277-1283 (2005).

⑯ Shinsuke Fujioka, Hiroyuki Shiraga, Hiroshi Azechi, Hiroaki Nishimura, Yasukazu Izawa, Shinya Nozaki, and Yen-wei Chen

“Temporal resolved x-ray penumbral imaging technique using heuristic image reconstruction procedure and wide dynamic range x-ray streak camera” Review of Scientific Instruments Vol. 75, pp. 4010-4012 (2004).

⑰ S. Fujioka, A. Sunahara, N. Ohnishi, Y. Tamari, K. Nishihara, H. Azechi, H. Shiraga, M. Nakai, K. Shigemori, T. Sakaiya, M. Tanaka, K. Ohtani, K. Okuno, T. Watari, T. Yamada, K. Murakami, K. Nagai, T. Norimatsu, Y. Izawa, S. Nozaki, Y. Chen.

“Suppression of Rayleigh-Taylor instability due to radiative ablation in brominated plastic target” Physics of Plasmas Vol. 11, pp. 2814 - 2822 (2004).

⑱ S. Fujioka, A. Sunahara, K. Nishihara, N. Ohnishi, T. Johzaki, H. Shiraga, K. Shigemori, M. Nakai, T. Ikegawa, K. Murakami, K. Nagai, T. Norimatsu, H. Azechi, and T. Yamanaka

“Suppression of the Rayleigh-Taylor Instability Due to Self-Radiation in a Multi-Ablation Target” Physical Review Letters Vol. 92, pp. 195001-1-4 (2004).

⑱T. X. Huang, M. Nakai, H. Shiraga, and H. Azechi, Y. K. Ding, and Z. J. Zheng “Ultrafast x-ray imaging with sliced sampling streak cameras” Rev. Sci. Instrum. Vol. 77, pp. 026105 (2006).

〔学会発表〕(計44件)

①H. Azechi, “Plasma Physics Study and Laser Development for the Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) Project (Overview)”, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月14日, Geneva, Switzerland.

②H. Shiraga, J. Zhong, M. Koga, H. Nishimura, S. Fujioka, M. Tanabe, H. Azechi, T. Watari, H. Hosoda, K. Takeda, K. Otani, M. Nakai, K. Nagai, T. Norimatsu, N. Miyanaga, H. Nagatomo, T. Johzaki, and K. Mima, A. Iwamoto, T. Mito, M. Isobe, and T. Ozaki, “Implosion and Heating Experiments of Fast Ignition Targets for FIREX-1 Project (Invited)”, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008年10月16日, Geneva, Switzerland.

③Keiji NAGAI, Takayoshi NORIMATSU, Mitsuo NAKAI, Hang YANG, Kentaro YAMANAKA, Takeshi FUJIMURA, Liqin GE, Nobukatsu NEMOTO, Tomonori SHIMOYAMA, Akifumi IWAMOTO, Toshiyuki MITO, Hiroyuki SHIRAGA, Hiroshi AZECHI, Kunioki MIMA, “Low density aerogel capsule for FIREX(Fast Ignition Realization EXperiments) project control of nanostructure”, 15th Target Fabrication Specialists Meeting, 2008年5月13日, Lake Tahoe, California, USA.

④H. Azechi, “The FIREX Program on the Way to Inertial Fusion Energy (Plenary)”, 5th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, 2007年9月10日, Kobe, Japan

⑤SHIRAGA Hiroyuki, NAKAI Mitsuo, AZECHI Hiroshi, SHIGEMORI Keisuke, SAKAIYA Tatsuhiro, JHONG Jiayong, OHTANI Kazuto, WATARI Takeshi, LEE Myongdok, TAKEDA Kazuo, SAITO Hiroshi, HOSODA Hirokazu, ARIKAWA Yasunobu, TANABE Minoru, INUBUSHI Yuichi, FJIOKA Shinsuke, NISHIMURA Hiroaki, SAKAWA Yoichi, KOGA Mayuko, ISOBE Mitsuyaka, NAGATOMO Hideo, SUNAHARA Atsushi, JOHZAKI Tomoyuki, NAKAMURA Tatsufumi, NAGAI Keiji, NORIMATSU Takayoshi, IWAMOTO Akifumi, MITO Toshiyuki, FUJITA Hisanori, SARUKURA Nobuhiko, and MIMA Kunioki, “Implosion

and heating experiment of shell target with cone for Fast Ignition at ILE, Osaka (Invited)”, 5th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, 2007年9月10日, Kobe, Japan

⑥日本物理学会 2007年春季大会 領域2 シンポジウム「レーザー核融合における燃焼診断法の開発」2007年3月19日, 鹿児島大学.

1. 笹尾真実子, “磁場核融合における燃焼プラズマ計測 -レーザー核融合に期待するもの”
2. 疇地宏, “レーザー核融合における燃焼プラズマの特徴”
3. 西村博明, “高速点火実証計画 FIREXに向けた計測器開発”
4. 泉信彦, “Development for the National Ignition Facility”
5. 兒玉了祐, “核反応計測の新展開”
6. 米田仁紀, “縮退プラズマの計測”
7. 岩本晃史, “FIREXクライオ重水素ターゲットの開発”

⑦H. Azechi
Fast Ignition Realization Experiment (Invited)

AAAS Annual Meeting
14-18 February 2008
Boston, USA

⑧H. Azechi
FIREX Project-Its Goal and Current Status IFE Science and Technology Strategic Planning Workshop (Invited)

24-27 April 2007
San Ramon, USA

⑨H. Azechi
Compression and Fast Heating of Liquid Deuterium Targets in FIREX Program (Oral)
21th IAEA Fusion Energy Conference
16-21 October 2006

成都, 中国

⑩H. Azechi
Present Status of FIREX Program for Demonstration of Ignition and Burn (Plenary)

33rd European Physical Society Conference on Plasma Physics
19-23 June 2006
Rome, Italy.

6. 研究組織

(1) 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所
ター・教授

研究者番号: 90135666

(2)研究分担者

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

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

乗松 孝好 (NORIMATSU TAKAYOSI)
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

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・准教授
研究者番号：70201663

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

三戸 利行 (MITO TOSHIYUKI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
研究者番号：10166069

岩本 晃史 (IWAMOTO AKIFUMI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00260050

三間 罔興 (MIMA KUNIOKI)
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：30033921

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

古賀 麻由子 (KOGA MAYUKO)
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：40403969

居田 克巳 (IDA KATSUMI)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・

教授

研究者番号：00184599
(2004)

磯部 光孝 (ISOBE MITSUTAKA)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00300731
(2004～2007)

(3)連携研究者

米田 仁紀 (YONEDA HITOKI)
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授
研究者番号：00210790