

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540482

研究課題名（和文）

詳細シミュレーションによる高密度爆縮プラズマ中での核燃焼波伝搬機構の解明

研究課題名（英文）

Simulation study on fusion burn wave propagation in dense plasmas

研究代表者

城崎 知至 (JOHZAKI TOMOYUKI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号：10397680

研究成果の概要（和文）：レーザー核融合では、固体の数千倍に爆縮した高密度プラズマの一部を点火温度まで加熱し、そこから生じる核融合燃焼波が残りの低温高密度燃料へと伝搬することで爆発的な燃焼が行われる。本科学研究においては、核燃焼シミュレーションにおいて重要な高エネルギー粒子によるエネルギー輸送を精密に解く輸送—流体結合コードを開発し、これを用いて点火・燃焼過程の詳細解析を行った。

研究成果の概要（英文）：In the laser fusion, a part of imploded dense fuel plasma is heated up to ignition temperature, and then the fusion burn wave propagates from heated ignition region to the other cold main fuel region, which results in the explosive fusion burning. In the present study, we developed the simulation code for fusion burning, where the transports of energetic particles (ions, neutrons and electrons) playing important roles in fusion burning are precisely treated, and evaluated the ignition and burn properties of laser fusion fuel.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000円	300,000円	1,300,000円
2009年度	1,600,000円	480,000円	2,080,000円
2010年度	700,000円	210,000円	910,000円
総計	3,300,000円	990,000円	4,290,000円

研究分野：数物系科学

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：高密度プラズマ、核燃焼、中性子輸送、高速電子輸送、高速点火、衝突過程

### 1. 研究開始当初の背景

燃焼波の研究は化学反応系を対象に 1900 年代初頭から行われている。デフラグレーションからデトネーションへの移行を経て爆発的に燃焼するレーザー核融合の核燃焼波の物理機構は、化学反応系の燃焼と類似しており同様の解釈がなされている。しかし、燃焼に関する論文や研究者との議論を通じ、レーザー核融合の核燃焼波は、化学反応系とは異なる特徴を有することがわかってきた。ひとつはデトネーション波面構造の違いである。シミュレーションで示されたレーザー核融合燃焼波では前面衝撃波面に乱れがな

く、ほぼ球面波に近い。一方、化学反応系では前面衝撃波上を横方向に伝搬する衝撃波が生じ、これらが作る衝撃波三重点での小爆発の干渉が強い爆発を誘起し、波面に微細な多頭構造が形成されることが実験・シミュレーションの両方で確認されており、デトネーション波が伝播する上で、この横波の存在が必須であるとされている。燃焼領域のサイズや燃焼率にも違いがある。化学反応系では燃焼領域が衝撃波面後方の極薄い領域に限定されており燃焼率はほぼ 100%であるのに対し、レーザー核融合の場合、燃焼領域は燃焼波面後方の点火領域全体におよび、燃焼率は

30%程度にとどまる。この燃焼波面構造や燃焼率の違いが、何に起因しているのかは、明らかではない。

また、近年のレーザー技術の急速な進展によるレーザー強度の超高強度化に伴い、レーザー核融合の新たな点火方式として高速点火方式が提案され、研究が進められてきている。この点火燃焼過程においても同様な燃焼波伝播の物理課題がある。その一方で、高強度レーザー照射により発生する相対論的高エネルギー電子による爆縮コア加熱過程は、相対論的高エネルギー電子の発生から輸送過程を通じて、衝突や自己生成電磁場の影響が重要となり、爆縮コア加熱物理機構の解明、加熱効率の定量的評価、さらには加熱効率の向上が、燃焼波伝播機構の解明とともに、高速点火核融合による核燃焼実現・高効率核融合炉設計において不可欠な物理課題となっている。

## 2. 研究の目的

レーザー核融合では、爆縮により中心部に低密度高温の点火部とその周辺に高密度低温の主燃料部を形成し、中心点火部からの核燃焼波で核燃焼を実現する中心点火方式と、爆縮で高密度プラズマを形成し、最大圧縮時に超高強度レーザーを照射して爆縮コア端の一部を点火温度まで瞬時に加熱し核燃焼を実現する高速点火方式とがある。いずれの方法においても、核燃焼波の伝播においては核融合反応から生成する高エネルギー粒子（イオン・中性子）による自己加熱が重要な役割を担う。また、高速点火方式では、コア端加熱（点火部形成）において相対論的高速電子によるエネルギー輸送が本質的に重要である。そこで、本研究においては、核燃焼点火・燃焼において重要な高エネルギー粒子によるエネルギー輸送過程を精密に取り扱う核燃焼コードを開発し、レーザー核融合における点火・燃焼機構の解明を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、(1)コード開発と、開発したコードを用いた(2)点火・燃焼機構解析の2段階からなる。

(1) **コード開発**：ベースとなる核燃焼コードは、これまでの研究活動にて実空間1次元、2次元のものを開発済みである。この核燃焼コードには、核反応生成 $\alpha$ 粒子、ならびに相対論高速電子の輸送コードを組み込み済みである。さらに、高燃焼率を達成するようなサイズの大きな燃料の場合、核反応生成中性子によるコア加熱が無視できない。中性子はプラズマ中でバルクイオンと男性衝突し、高エネルギーの反跳イオンを生成する。この反跳イオンが熱化することでプラズマにエネ

ルギーを付与する。したがって、核反応生成イオンに比べ、中性子による加熱は、より広範に及ぶ。中性子加熱を精密に扱うために、中性子輸送と反跳イオン輸送を連立して解く、中性子・反跳イオン連立輸送コードを作成し、燃焼コードに組み込む。

(2) **解析**：上記核燃焼解析コードを用いて、本科学研究において行った解析は、下記4点である。

- ① 中性子加熱効果を考慮したレーザー核融合先進D-<sup>3</sup>He燃料の点火・燃焼特性解析
- ② コーンガイド高速点火レーザー核融合の加熱特性に対するコーンの影響
- ③ コーンガイド高速点火レーザー核融合におけるプレプラズマの影響
- ④ コーンガイド高速点火レーザー核融合における拡張二重コーンによる電子ビームガイディング法の提案

## 4. 研究成果

### (1) 中性子加熱効果を考慮したレーザー核融合先進D-<sup>3</sup>He燃料の点火・燃焼特性解析

D-<sup>3</sup>He燃料はD-T燃料に比べ点火条件が厳しく、一反応あたりのエネルギー出力が小さいが、中性子出力が格段に小さいことから、直接発電への適用が可能等の利点があり、長期的視点では魅力的な燃料である。本研究では、点火・燃焼過程で最も重要となる核反応生成粒子（イオン・中性子）によるプラズマ自己加熱過程を輸送・流体結合モデルにより厳密に取扱い、高速点火レーザー核融合方式におけるD-<sup>3</sup>He燃料の点火・燃焼特性解析を行った。シミュレーションの初期状態として、液体密度の2000~4000倍に一樣爆縮したD<sup>3</sup>Heの燃料端に点火材としてDT燃料を配置したDT/D<sup>3</sup>He球プラズマ燃料を仮定した。点火部で生成される14.1MeV中性子による反跳イオンを介したプラズマ加熱を無視すると、点火条件は厳しくなり、燃焼率を過小評価することが示され(Fig.1)、D<sup>3</sup>He燃料の点火・燃焼においては中性子による加熱が極めて重要であることがわかった。

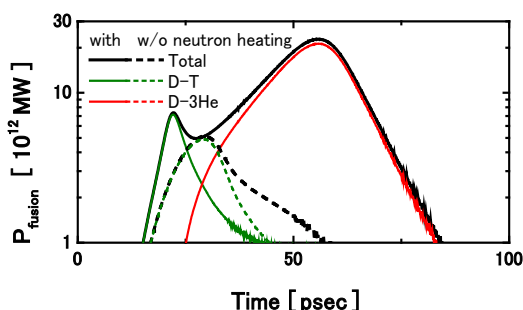


Fig.1 核融合出力の時間発展（実線は中性子加熱考慮、点線は無視）.4000倍圧縮、 $\rho R_{DT} = 3.5\text{g/cm}^2$ ,  $\rho R_{\text{total}} = 10\text{g/cm}^2$ .

また、核融合出力に占める中性子割合を 10% に抑え、且つ燃料利得 80 以上を得るためには、圧縮率 4000 倍で、面密度 10g/cm<sup>2</sup> 程度、爆縮レーザーエネルギーで 7.5MJ 程度が必要であることが示された (Fig.2)。

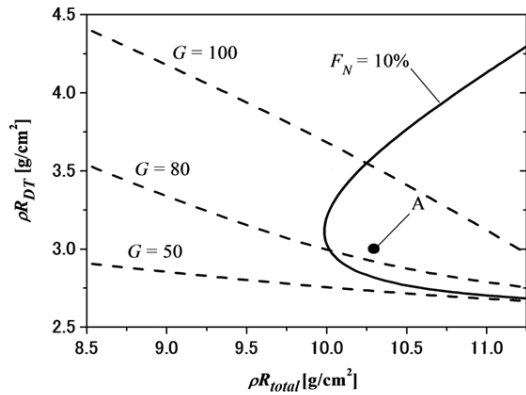


Fig.2 燃料利得  $G$  と中性子による核融合出力割合  $F_N$  の燃料サイズおよび DT 点火剤サイズ依存性

### (2) コーンガイド高速点火レーザー核融合の加熱特性に対するコーンの影響

レーザー導波路確保用に中空のコーンを用いた場合、加熱レーザーとの相互作用により発生した高速電子は、コーンチップを外岡氏、爆縮コアに到達する。コーン材に高  $Z$  物質を用いた場合、爆縮に対してはその密度が大きいことから堅牢となるが、一方で、高速電子の伝播に対しては、散乱効果が大きくなり、加熱効率を低減させることを PIC-FP 結合解析により明らかにした。高速電子によるコア加熱特性のコーン材依存性を Fig. 3 に示す。

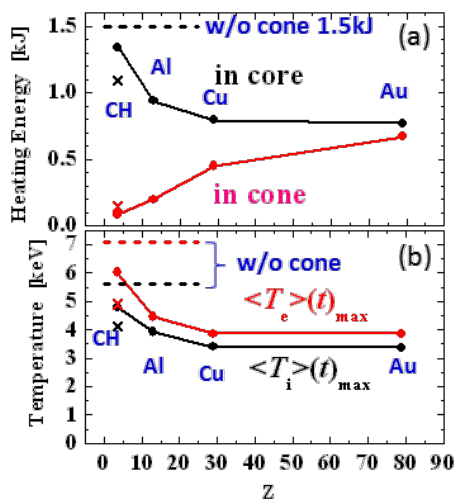


Fig.3 コア加熱特性のコーン材依存性. (a) コーン内ならびにコア内での高速電子の付与エネルギー、(b)高速電子により加熱されたコア温度。

コーン材の  $Z$  が大きくなるにつれ、高速電子がコーン内で失うエネルギー割合が大きくなり、その分、コアでのエネルギー付与率が小さくなる。結果として、加熱コア温度は低  $Z$  ほど高くなることが示された。

### (3) コーンガイド高速点火レーザー核融合におけるプレプラズマの影響

高速点火において効率よくコアを加熱するためには、加熱レーザー照射により比較的低エネルギー ( $E \sim 1\text{MeV}$ ) の電子を多く発生させる必要がある。しかし、超高強度レーザーには主パルスの前にナノ秒オーダーの低強度プレパルスが存在し、これによりコーン内面がアブレートし、主パルス到達前にコーン内に低密度プラズマ (プレプラズマ) を形成する。このような低密度プラズマが存在すると、レーザープラズマ相互作用により発生する高速電子のエネルギーが高くなることが知られており、加熱効率を低下させることが懸念される。コーンガイド高速点火を対象に、プレプラズマの影響を PIC-FP 結合計算により評価した。PIC シミュレーションにより評価した高速電子ビームの角度広がり、プレプラズマの有無によらず半角で約  $60^\circ$  であった。照射レーザーから高速電子ビームへのエネルギー変換効率  $\eta_{L \rightarrow fe}$  [%]、加熱に最も寄与する  $1\text{MeV} \sim 10\text{MeV}$  領域の高速電子への変換効率  $\eta_{L \rightarrow fe1-10\text{MeV}}$  [%] とし、FP シミュレーションによる高速電子からコアへの結合効率  $\eta_{fe \rightarrow core}$  [%]、 $\eta_{L \rightarrow fe}$  [%] と  $\eta_{fe \rightarrow core}$  [%] を掛け合わせたレーザーからコアへの結合効率  $\eta_{L \rightarrow core}$  [%] を Table I にまとめる。

Table I コア加熱特性に対するプレプラズマの影響

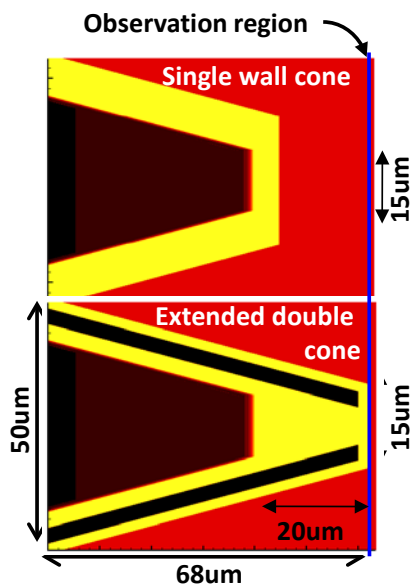
プレプラズマスケール長	w/o	3 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
$\eta_{L \rightarrow fe}$ [%]	48	42 (-13%)	36 (-24%)
$\eta_{L \rightarrow fe1-10\text{MeV}}$ [%]	31	21 (-32%)	8.8 (-72%)
$\eta_{fe \rightarrow core}$ [%]	16	11 (-31%)	4.7 (-71%)
$\eta_{L \rightarrow core}$ [%]	7.5	4.7 (-37%)	1.7 (-78%)

プレプラズマの存在により、高速電子の発生点がチップから遠ざかるため、コーン側壁からの高速電子の漏れが多くなるため、 $\eta_{L \rightarrow fe}$  はスケール長の増大とともに低下する。しかし、これ以上に加熱に寄与する高速電子への変換効率  $\eta_{L \rightarrow fe1-10\text{MeV}}$  の低下のほうが顕著である。長尺の低密度プレプラズマ中ではレーザープラズマ相互作用長が長くなるため、加熱

に直接寄与しない高エネルギー高速電子が多量に発生し、一方で加熱に寄与する低エネルギー成分が大きく減少する。プレプラズマスケール長の増大に伴う高速電子からコアへの結合効率 $\eta_{e \rightarrow core}$ の低下率は、 $\eta_{L \rightarrow Fe1-10MeV}$ と同程度であり、1~10MeV電子が加熱に対して支配的であることがわかる。結果として、レーザーからコアへのエネルギー結合効率 $\eta_{L \rightarrow core}$ は、プレプラズマの存在により大きく低下することが示された。効率よい加熱のためには、プレプラズマ、つまりはプレパルスレベルを可能な限り低くすることが必要であることがわかった。

#### (4) コーンガイド高速点火レーザー核融合における拡張二重コーンによる電子ビームガイドディング法の提案

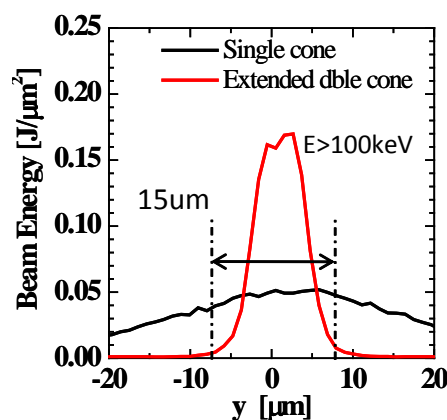
高速点火で核燃焼の実現には15kJ程度のコア加熱エネルギーが要求される。これを100kJ程度のレーザーにて実現するためには $\eta_{L \rightarrow core} > 15\%$ が要求される。しかし、上記③の解析においてプレプラズマがない場合でも結合効率 $\eta_{L \rightarrow core}$ は7.5%であり、さらなる効率の改善が望まれる。そこで、本研究において拡張二重コーン (Fig.4)を提案した。



**Fig.4** 単一壁コーンと拡張二重コーンの模式図。黄色の領域が Au コーンで、周辺の赤い領域は CD プラズマ

これは、コーン側壁を二重にし、その間を真空ギャップとして、高速電子流によりギャップに生成される磁場を利用して高速電子を閉じ込め、効率を高めようとする二重コーンを発展させたもので、ギャップとともにチップを長くすることで、ギャップに生成する磁場による閉じ込めを利用して高速電子を

高速電子発生点からコア近くまでガイドすることを目的とする。プレプラズマなしのコーンを仮定し、PICシミュレーションを行い、拡張二重コーンのチップ先端部にて観測した高速電子ビームエネルギーの横方向分布を Fig.5 に示す。通常の単一壁のコーンの場合、発生点から高速電子は60°の角度広がりを持って伝搬するために横方向に広く拡散している。一方、拡張二重コーンの場合、ギャップに生成する自己生成磁場(~300MG)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てコア加熱計算(FPシミュレーション)を行った結果、拡張二重コーンでは $\eta_{L \rightarrow core} = 19\%$ となり、単一壁のコーンに比べ2.5倍大きくなり、冒頭に示した $\eta_{L \rightarrow core} > 15\%$ の要請を満たす結果となった。



**Fig.5** チップ内壁から 20 $\mu\text{m}$  前方で観測した高速電子ビームエネルギーの横方向分布

#### 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 11 件)

- ① T. Johzaki, et al., "Pre-plasma effects on core heating and enhancing heating efficiency by extended double cone for FIREX", Nucl. Fusion. 査読有(掲載決定).
- ② T. Johzaki, et al., "Scaling of Core Heating Performance for FIREX-I", European Physical Society, 37th EPS conf. on Plasma Phys. vol.34 A, O5.219 – 1-4 (2010). 査読無
- ③ H. B. Cai et al. (4th Author), "Prepulse effects on the generation of high energy electrons in fast ignition scheme", Physics of Plasmas vol.17, 023106- 1-8 (2010). 査読有
- ④ K. Mima et al. (7th Author), "FIREX project and effects of self-generated electric and magnetic fields on electron-driven fast ignition", Plasma Physics and Controlled

- Fusion vol.52, 124047 - 1-6 (2010). 査読有
- ⑤ T. Johzaki, et al., "Integrated simulations of core heating in cone-guiding fast ignition, FIREX-I", Journal of Physics: Conference Series Vol.244 022040-1-4 (2010). 査読有
  - ⑥ T. Johzaki, et al., "Core Heating Scaling for Fast Ignition Experiment FIREX-I", Proc. of 23rd IAEA Fusion Energy Conference, IFE/P6-01-1-8 (2010). 査読無
  - ⑦ Y. Nakao, et al. (5th Author), "Ignition and burn properties of DT/ DHe<sup>3</sup> fuel for fast-ignition inertial confinement fusion", Fusion Science and Technology vol.56, 401 - 404 (2009). 査読有
  - ⑧ Y. Nakao, et al. (5th Author), "On the possibility of electron degeneracy diagnostics in laser- imploded DT fuel for fast ignition", Fusion Science and Technology vol.56, 391 - 394 (2009). 査読有
  - ⑨ T. Johzaki, M. Murakami, H. Azechi, K. Mima, "Ignition and Burn Dynamics of DT Fuels in Impact Fast Ignition", J. Plasma Fusion Res. SERIES vol.8, 1204-1209 (2009). 査読有
  - ⑩ T. Johzaki, et al., "Core heating properties in FIREX-I - influence of cone tip", Plasma Phys. Control. Fusion vol.54, 014002 1-15 (2009). 査読有
  - ⑪ T. Johzaki, Y. Nakao, K. Mima, "Fokker-Planck simulations for core heating in subignition cone-guiding fast ignition targets", Phys. Plasmas vol.16, 062706 1-9 (2009). 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ① 城崎知至、他, "自己生成磁場による高速電子ビームガイドイング", 日本物理学会第 65 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学.
- ② T. Johzaki, et al., "Fokker-Planck simulations for relativistic fast electron in dense matters", 2nd UK Japan Winter School in High Energy Density Science, 2011 年 1 月 7 日, Royal Observatory, Edinburgh, UK.
- ③ 城崎知至、他, "高速点火実験 FIREX-I のコア加熱解析", プラズマ・核融合学会 第 27 回年会, 2010 年 12 月 2 日, 北海道大学学術交流会館.
- ④ T. Johzaki, et al., "Simulation Study of Pre-Plasma Effects on Core Heating in FIREX-I", 2010 US-Japan Workshop on Theory and Simulation on Short-pulse Laser-Plasma, 2010 年 11 月 17 日, LLNL, Livermore, CA, USA.
- ⑤ T. Johzaki, et al., "Simulation Study of Pre-Plasma Effects on Core Heating in

- FIREX-I", 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2010 年 11 月 8 日, Hyatt Regency Chicago, Chicago, IL, USA.
- ⑥ T. Johzaki, et al., "Fast electron guiding by extended double cone", 日米高速点火ワークショップ 2010, 2010 年 10 月 23 日, Wakayama Tokyu-inn, Wakayama, Japan.
  - ⑦ T. Johzaki, et al., "Advanced Concept of High-Energy Coupling Cone for FIREX-I", 11th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, 2010 年 10 月 19 日, Jiao Tong University, Shanghai, China.
  - ⑧ T. Johzaki, et al., "Core Heating Scaling for Fast Ignition Experiment FIREX-I", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010 年 10 月 14 日, Daejeon Convention Center, Daejeon, Republic of Korea.
  - ⑨ 城崎知至、他, "FIREX-I における加熱スケーリング II", 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 25 日, 大阪府立大学・中百舌鳥キャンパス.
  - ⑩ T. Johzaki, et al., "Scaling of Core Heating Performance for FIREX-I", 37th EPS Conference on Plasma Physics, 2010 年 6 月 25 日, Dublin City University, Dublin, Ireland.
  - ⑪ 城崎知至、他, "コーンガイド高速点火のコア加熱におけるプレプラズマの影響", 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 2010 年 6 月 10 日, 高山市民文化会館.
  - ⑫ 城崎知至、他, "高速点火の爆縮コア加熱の統合シミュレーション", プラズマ核融合学会 第 26 回年会, 2009 年 12 月 3 日, 京都市国際交流会館.
  - ⑬ T. Johzaki, et al., "Dependence of core heating properties on heating pulse duration and intensity", 51st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2009 年 11 月 2 日, Atlanta, GA, USA.
  - ⑭ 城崎知至、他, "高速点火のコア加熱シミュレーション～パルス長依存性～", 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 27 日, 熊本大学黒髪キャンパス.
  - ⑮ T. Johzaki, et al., Integrated Simulations of Core Heating in Cone-Guiding Fast Ignition, FIREX-I, 6th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2009 年 9 月 11 日, San Francisco, CA, USA.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

城崎 知至 (JOHZAKI TOMOYUKI)  
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
 研究者番号: 10397680