

## レーザーフュージョンエネルギー開発



研究室紹介

重森啓介\*

Developments on laser fusion energy

Key Words : Power laser, high energy density, power plant technology

## はじめに

大出力レーザーを用いた核融合（レーザー核融合）については、2022年に米国ローレンスリバモア国立研究所のNational Ignition Facility (NIF)における核融合点火・燃焼の実証をうけ、次のフェーズに入りつつあります。すなわちこれまでの核融合のメカニズム（物理）に関わる学術的な基礎研究から、その実用化に向けた技術開発（産業化）へとシフトしようとしています。このような状況の下、今年の5月に内閣府より「フュージョンイノベーション戦略」が策定され、核融合エネルギー開発が国家戦略として位置付けられることになり、官民一体となった研究開発がすすめられようとしています<sup>1)</sup>。

当研究室では、レーザー方式の核融合研究（フュージョンエネルギー開発）に関して、核融合反応に至る基礎的なプロセス（高エネルギー密度状態の物理）から、フュージョンエネルギーの社会実装に向けた工学的な課題を解決するための研究を進めています。そして、これらの研究を共同研究・共同研究部門等の枠組みを通して民間企業とともに展開しています。

## 衝撃波点火方式による高効率核融合点火

レーザー核融合では、燃料をカプセルに閉じ込めて、高強度レーザーを照射することにより、高速に

圧縮・加熱し核融合反応を起こし点火を引き起こします。これまでの研究において、この圧縮過程で流体不安定性などにより燃料カプセルの均一な圧縮が困難であることが明らかになり、この問題の解決を目指して様々な点火方式が考案されてきました。

当研究室では衝撃波点火と呼ばれる点火方式の研究に取り組んでいます。衝撃波点火方式では、まず比較的強度なレーザーの照射により燃料カプセルをゆっくり圧縮し、その後高強度なスパイクパルスの照射により発生する衝撃波により点火を引き起こします（図1）。圧縮と点火を分離することで、点火に必要なレーザーエネルギーを下げ、より高効率で点火燃焼が可能となるシナリオを描いています。

ここで、レーザー核融合においては高い強度のレーザーとプラズマとの相互作用（LPI: Laser Plasma Interactions）が起こります。LPIによってエネルギーの高い高速電子と呼ばれる電子が発生し、カプセルを通り越して内部の燃料を点火前に加熱してしまい圧縮効率を下げるという点で問題視されてきました。しかし近年、カプセルの密度を高く設計する衝撃波点火方式において、この高速電子を、効率的な圧縮に利用できる可能性が示唆されました。当研究室では、高速電子が圧縮に与える影響を調べ

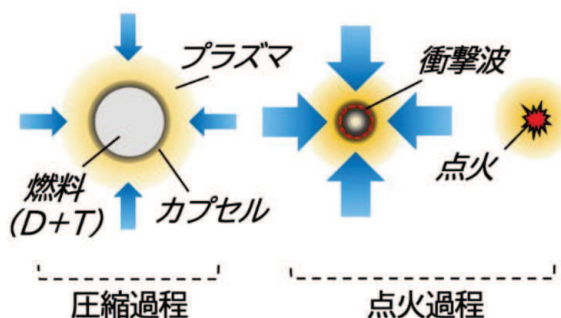


図1 衝撃波点火方式の概念図



\* Keisuke SHIGEMORI

1971年1月生まれ  
大阪大学大学院 工学研究科博士後期課程 (1998年)  
現在、大阪大学レーザー科学研究所  
教授 博士(工学)  
専門/レーザー核融合工学, プラズマ理  
工学  
TEL : 06-6879-8776  
FAX : 06-6877-4799  
E-mail : shige@ile.osaka-u.ac.jp

るため、GEKKO XII号を用いた衝撃波点火方式において、高速電子に関する様々なパラメーターを計測できる実験系を開発し<sup>2)</sup>実験において計測されたデータから、高速電子の発生から吸収に至るまでのメカニズムを明らかにする研究を行っています。

### ナノワイヤーによる超高エネルギー密度状態生成

レーザー核融合の炉心プラズマなどは超高エネルギー密度状態と呼ばれる極限状態になっています。従来では超大型レーザー設備による超高強度レーザーをターゲットへ照射することによって研究されてきました。しかしこのような大型レーザーは日に数回のショットしかできず、さらに生成される炉心プラズマはごく小さいといった理由から研究へのアクセスが難しいという問題がありました。このような中で近年ナノワイヤーアレイを照射ターゲットとして採用することで効率的に超高エネルギー密度状態が生成できることが発見されました。ナノワイヤーアレイは直径が数百 nm、長さ約 10  $\mu\text{m}$  の金属ナノワイヤーが基盤に対して垂直に正立しているナノ構造体を指します。このナノワイヤーにはすき間が存在しており、そこにレーザー光が進入できるため、効率的な加熱及び大きな体積の超高エネルギー密度状態が生成できます (図 2)。しかし、いまだそのエネルギー吸収や輸送機構は詳しく分かっていません。当研究室ではエネルギー輸送機構の解明などを目的としたレーザー照射実験などを行っています<sup>3)</sup>。またこれら実験用のナノワイヤーアレイの開発・作成も並行して行っています。

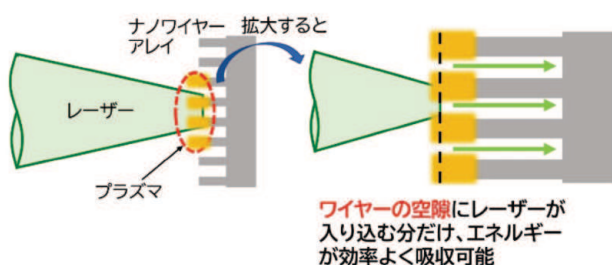


図2 ナノワイヤーによるプラズマ生成の模式図

### レーザー核融合炉工学の研究

重森研究室では、核融合で実際に発電を行うことを見据えて研究を行っています。核融合発電炉の中の環境は温度、レーザー光、放射線などの条件が特

殊で、場合によっては材料にとって過酷な環境となります。核融合発電を実現するためには、このような環境下でも適切に炉をコントロールするための機器開発が必要です。1秒間に数回照射される強いレーザーや発生する中性子等に耐えられるミラー、炉内へ正確に燃料ターゲットを投入する装置、核融合反応により発生した熱を外部に伝える熱交換器などを開発していく必要があります。現在は液体金属ミラー、ターゲットインジェクション装置、熱交換器などを個別に開発しています。しかし、将来的にはこれらの装置を組み合わせ、核融合発電プラントの設計を行っていきます。ここにあげたような機器が核融合発電プラント実現のためのハードルを解決することになるのです。核融合発電の実現には高いハードルがたくさん残っていますが、装置開発などは共同研究部門などの枠組みを活用し、産業界との連携で開発を進めています。

### ○ターゲット開発

レーザー核融合では、圧縮された燃料(ターゲット)の核への高速電子のエネルギー移動のメカニズムを理解することは、より効率的な核融合燃料の加熱にとって重要です。これらの実験では、トレーサー原子として原子番号(Z)の大きい原子を添加したターゲットを使用してレーザー加速された高速電子によって生成された特性X線を利用する事で、高密度プラズマにおける電子伝達の根本的なメカニズムを理解します。また、トレーサー原子として重水素を添加したターゲットを使用すると核融合反応中のターゲットからは中性子が生成されます。これにより圧縮されたプラズマの温度を調べることができ、これらの実験を通じて得られた情報は、レーザー核融合実験における高密度圧縮の物理現象を理解するためには不可欠なものです。

当研究室では、トレーサー原子として高Z原子としてCuと重水素が両方ドーパされた新規の計測用ターゲットの開発に取り組んでいます(図3)。Cu化合物と重水素化された有機化合物を高分子合成する事でターゲット材料を作成し、エマルジョン法と呼ばれる方法で球状に加工します。レーザー核融合実験に使用されるターゲットには高い表面均一性と真球形、トレーサー原子が均一に分散している事が求められるため、これら要求を満たすターゲットの

開発に取り組んでいます<sup>4)</sup>。

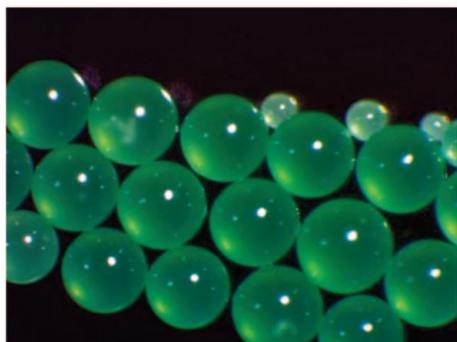


図3 Cuドーピング重水素化プラスチックカプセル

レーザー核融合においては、レーザー照射の非一様性に起因するカプセル表面の初期擾乱（インプリント擾乱）が高速な圧縮の際に増幅され、均一な圧縮を阻害することが問題です。インプリント擾乱を低減するためには、硬いダイヤモンドが有効であることが当研究室における先行研究で実証されました<sup>5)</sup>。現在、当研究室では、産業技術総合研究所の共同研究としてダイヤモンドを用いた燃料カプセルの開発に取り組んでいます。ダイヤモンドは熱フィラメント気相成長法と呼ばれる方法で人工的に製膜できます。この方法を応用し、球状の燃料カプセルを開発しています（図4）。レーザー核融合の燃料カプセルにおいては、高い表面平滑性や膜厚一様性が要求されるので、ダイヤモンド燃料カプセルの高品質化に現在取り組んでいます<sup>6)</sup>。

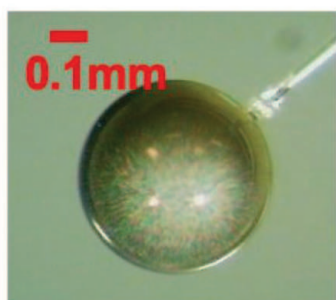


図4 ダイヤモンドカプセル

### ○固体 DT 燃料の開発・評価

核融合炉では固体の重水素 (D)-トリチウム (T) 燃料が使われます。慣性核融合では、この燃料ペレットの高い真球性や均一性が求められます。また、磁場核融合でも D と T の均一性が重要な課題となり

ます。当研究室では、磁場核融合、慣性核融合双方の原型炉における高品質な固体 DT 燃料ペレットの作成技術を確認するために、固体 DT 燃料の特性を高精度で評価する手法を開発しています。我々は屈折率分布測定法を使用し、固体 DT の詳細な屈折率データを得ることで、固体 DT 燃料ペレットの均一性、D と T の分布、燃料の投入量などの特性が光学的に実測することが可能になりました（図5）<sup>7)</sup>。今後は水素の同位体効果及びトリチウムの $\beta$ 崩壊により、固体 DT 燃料の品質に与える影響を明らかにしたうえで、慣性核融合炉と磁場核融合炉における設計指針の確立を目指しています。

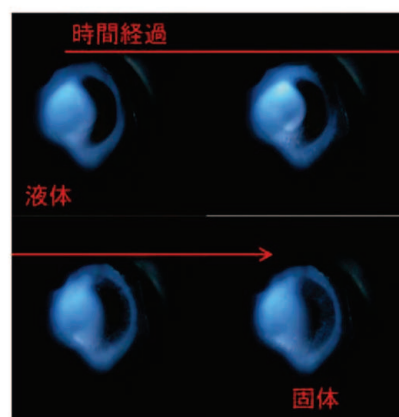


図5 固体水素同位体の物性値測定

### おわりに

フュージョンエネルギー開発に関しては、冒頭に紹介した国家戦略を踏まえ、今年度からムーンショット型研究開発事業の目標の一つとして追加されるなど、研究動向が非常に速くなっています。フュージョンエネルギーに関わるスタートアップ企業が存在感を増し、ひとつの産業として開花しようとしているなか、当研究室でもこの新しいイノベーションの枠に沿って、そしてその枠を超えた研究開発を大学独自の視点ですすめていくことを目指しています。

### 参考文献

- 1) [https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion\\_senryaku.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_senryaku.pdf)
- 2) T. Tamagawa et al., “Development of an experimental platform for the investigation of laser-plasma interaction in conditions relevant

- to shock ignition regime”, Rev. Sci. Instrum. 93, 063505 (2022).
- 3) D. Tanaka et al., “Ultra-high-energy density state in nanowire arrays irradiated with picosecond kilojoule-class ultra-intense laser”, AIP Advances 13, 125118 (2023).
  - 4) T. Ikeda et al., “Fabrication of high-concentration Cu-doped deuterated targets for fast ignition experiments”, Nuclear Fusion 63, 016010 (2023).
  - 5) H. Kato et al., “Effect of equation of state on laser imprinting by comparing diamond and polystyrene foils”, Phys. Plasmas 25, 032706 (2018); H. Kato et al., “Surface structure on diamond foils generated by spatially nonuniform laser irradiation”, Scientific Reports 10, 9017 (2020).
  - 6) K. Kawasaki et al., “Fabrication of nanocrystalline diamond capsules by hot-filament chemical vapor deposition for direct-drive inertial confinement fusion experiments”, Diamond and Related Materials 135, 109896 (2023).
  - 7) K. Iwano et al., “Refractive index measurements of solid deuterium–tritium”, Scientific Reports 12, 2223 (2022).
  - 8) J. Zhang et al., “Refractive index measurement of hydrogen isotopologue mixture and applicability for homogeneity of hydrogen solid at cryogenic temperature in fusion fuel system”, Nuclear Fusion 63, 076020 (2023).

