

ICFにおける核融合燃焼プラズマ計測

Nuclear fusion burning plasma diagnostics in inertial confinement fusion

有川安信
YASUNOBU Arikawa

大阪大学レーザー科学研究所
Institute of Laser Engineering, Osaka University

ICFにおける核融合燃焼プラズマ計測

米国のNational Ignition Facilityのレーザー核融合実験において、2021年8月8日に人類史上初めて核融合燃焼反応を実現したとの報告があり世界を驚かせている。同シンポジウムS9-1で詳細が講演される。ローソン条件に到達し、核融合プラズマに外部熱入力をやめても核融合反応が持続するという臨界現象が起こっている。現状では時間積分計測した中性子発生数が10倍近く増加したという計測結果と、X線の発光パターンが大きくなったという計測がある。著者の講演では、まず現状のICFにおける核燃焼プラズマ計測についてオーバビューをしたい。しかしながら、未だ肝心の核反応率の時間変化の計測詳細な計測はなされていない。なぜなら、慣性核融合（以下、レーザー核融合限定する）における核燃焼は極めて短時間に起こるため、その超高速変化を時間分解して計測することが不可能であったからである。図1はNIFのレーザー核融合を想定したシミュレーション計算による核反応率時間変化（中性子発生数）、DTイオン温度、DTイオン密度半径積（ ρR ）を示したものである[1]。(a)は点火条件に至らない計算結果であり、16.2ns（爆縮終点時刻）以降、イオン温度と中性子数は下がっている。(b)は点火条件に差し掛かる場合であり、核融合燃焼はすでに始まっているためイオン温度の低下が抑えられており、中性子発生が上昇し発生持続時間も伸びている。(c)は点火条件に到達した結果であり、イオン温度は上昇しっぱなしになり、中性子発生は大きく上昇するが、16.4nsの自国では ρR の低下（プラズマが高温になったため自然膨張で密度が低下）に従って低下している。(d)に中性子発生数時間波形を比べると、核融合燃焼の様子がよく分かる。これを実験で捉えなければ燃焼反応の理解は進まない。現在、このような時間分解中性子計測の開発が求められている。求められる性能は、感度：中性子発生

数 10^{16} において、時間分解能：1psで、観測時間幅：1ns程度、ダイナミックレンジ2桁程度の領域を捉えられることである。このスペックは極めて困難であり、これまでのいかなる計測器でも達成されていない。

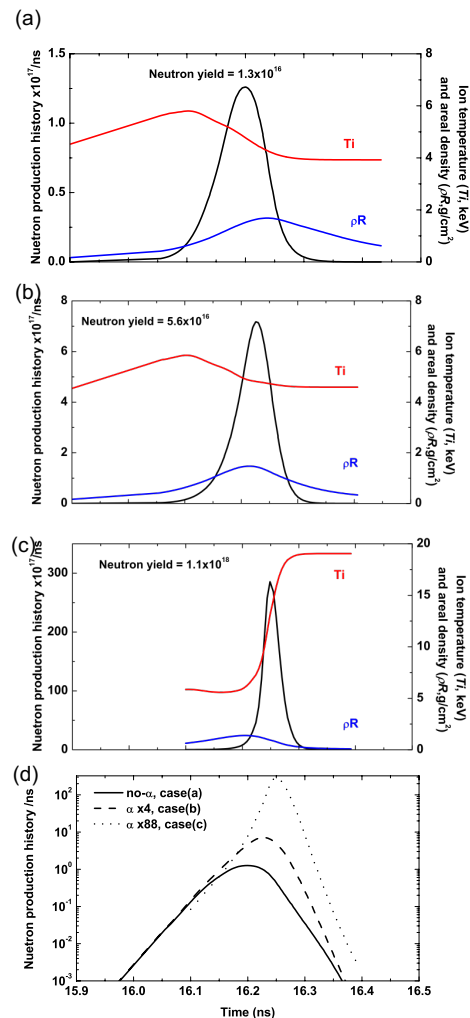


図1 シミュレーション計算における、核融合燃料の中性子発生数、イオン温度、燃料密度半径の時間変化。(a)点火しない条件、点火直前の条件、(c)点火する条件、(d)a,b,cの中性子発生時間変化の比較

高速時間分解能中性子計測器の開発

核融合中性子は0エネルギーでDTが反応した場合は14.1MeVの単一エネルギーであるが、DTプラズマのイオン温度によりスペクトルがドップラー広がりを持つ。このエネルギー広がりから中性子の飛行速度が異なるため、中性子発生数の時間分解計測をしようとする場合に、スペクトルドップラー広がりには分解能を制限する要因となる。イオン温度Ti(keV)から発生する中性子を、距離d(mm)に中性子計測器を設置して計測した場合、イオン温度のドップラー広がりによる広がり時間(ps)は、

$$\Delta t = 0.122\sqrt{Ti} d$$

で与えられる。図1の(b)の条件を計測すると仮定して、Tiを5keVに仮定すると、 Δt を1psにしたい場合、 $d=5\text{ mm}$ にしなければならない。すなわち、この計測を実現するためには中性子計測器は核融合プラズマ5mm以下(=ほとんど近接)させなければならない。このような計測はこれまで存在しなかった。

我々は、中性子計測器のセンサーとして小さい電気光学ポリマーを用い、それをレーザー核融合燃料の5mmに近づけて計測し、レーザーショット1ショットでプラズマ爆風によって吹き飛ぶが、毎回ショット交換する全く新しコンセプトの計測器を開発している。

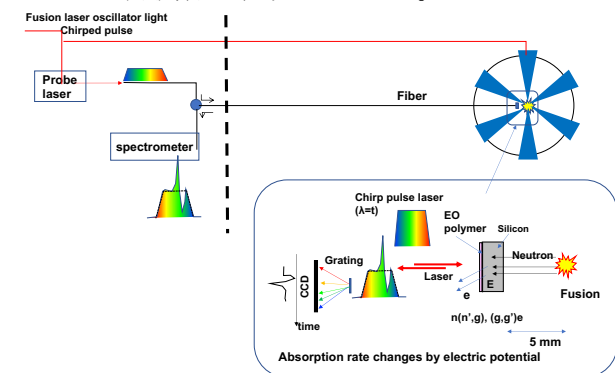


図2 超高速中性子計測器の構成図と、原理図

本研究ではEOポリマーと呼ばれる、電気光学特性を持つ材料で、外部の電界に応じてレーザーの透過率が高速(fsオーダー)で変化するポリマー材料を、シリコンの小さなブロックにコーティングしたものを用いる。レーザー核融合で発生した中性子がシリコンにあたることで $n(n', \gamma)$ 反応と $\gamma(\gamma', e)$ によって電子が飛び出して、EOポリマーに帯電が起こりレーザー光の吸収率が変化する。その吸収率変化をチャープパルスで読み取って、分光によって分析する。THz計測で頻りに用いられるシングルショット波

長スキャンニング技術の応用である。偏波保持型シングルモード光ファイバーで遮蔽室からレーザー核融合チャンバー内までつないでおり、EOポリマー部分はレーザー核融合プラズマに近接させている。

この手法によってNIFにおいてどの程度の時間分解能と信号が得られるかについて計算を行なったところ、以下のような性能が得られると予想された[2]。

インパルス応答時間幅(半値全幅) : 1.4 ps

感度範囲 : 中性子発生数にして

$$10^{15} (\text{S/N} \sim 1) \sim 10^{17} (\text{saturation level})$$

このように要求仕様を満たす計測が実現できることがわかった。現在大阪大学において、計測器の試作機の開発が進んでおり、性能評価データが出始めている。大阪大学の装置では核融合中性子を 10^{16} 発生させることはできないが、代わりに超短パルスレーザーLFEXレーザーを用いて発生する、瞬間輝度の高いX線や電子を用いて実験を行なっている。講演では計測器の開発状況と、米国との共同研究の計画について議論する。

終わりに

核燃焼プラズマ研究は、米国の実験成功を皮切りに、近年スタートしたばかりの全く新しい研究課題である。レーザー核融合は短い閉じ込め時間のため計測が困難であるという状況になっている。現在は計測器開発が研究課題となっているが、数年のうちには実験データが出て、プラズマ物理研究テーマも誕生するであろう。一方、磁場核融合では、もともと定常燃焼炉であるため、爆発的な核反応は起こらず、計測の手法や目的も大きく異なる。しかしながら、DT核燃焼の核反応粒子計測であるという点は同じであり、計測技術においては共通点も多い。また、宇宙核燃焼ではレーザー核融合と同じ爆発的反応ではあるが、スケールが大きい反反応持続時間は十分に長く、すでに多くの現象が計測されている。今回のシンポジウムを通して、核融合燃焼プラズマを題材として、レーザー核融合・磁場核融合・宇宙核燃焼で、共通課題や将来可能な新しい核燃焼プラズマ研究対象の模索を目的として議論を行う予定である。

参考文献

- [1] J.Frenje, et al., Rev. Sci. Instrum. 87, 11D806 (2016).
- [2] Y. Arikawa, et al. Rev. Sci. Instrum 91, 063304-9