

藤岡 慎介  
FUJIOKA Shinsuke

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

高出力レーザーを物体に集光照射すると、物体表面が急激に加熱されプラズマになる。このプラズマは高温かつ高密度で、単位体積当たりのエネルギー密度が大きいことから、高エネルギー密度プラズマと呼ばれる。この高エネルギー密度プラズマを炉心として用いるのがレーザー核融合 [1]である。

レーザー核融合で一般的な燃料は、アブレーターと呼ばれるカプセルの内面に、重水素 (D) と三重水素 (T) を混合した固体層を形成され、その中空部は飽和蒸気圧の DT 気体で満たしたものである。アブレターの直径は 2 mm、DT 固体層の厚みは 100  $\mu\text{m}$  程度である。アブレターの表面を加熱してプラズマ化し、外向きに噴出するプラズマの反作用によって、内面の DT 固体層を中心に向けて圧縮するのが爆縮であり、レーザー核融合において最も重要な過程である。外向きのプラズマの噴出をアブレーションと呼び、アブレーションの反作用によって生じる圧力をアブレーション圧力と呼ぶ。

アブレーターにレーザーを直接照射して爆縮を行うのが直接照射方式 [2]である。直接照射では、レーザーの干渉性の高さ起因する強度の空間的な非一様性がアブレーション圧力を非一様にするため、球対称爆縮が阻害されるのが最大の障壁である。この障壁を緩和するために研究されているのが間接照射方式 [3]である。間接照射方式では、円筒内面をレーザー加熱し、温度 300 eV のオーブンを作り、オーブンの中を満たす熱放射 X 線でアブレーターを加熱する。レーザーを熱放射に変換する筒をホーラム (houlraum) と呼ぶ。

球殻状の核融合燃料を多段衝撃波で圧縮すると、DT 固体層は高密度になり主燃料部を形成する。それと同時に、DT 気体は断熱圧縮で高温になり点火部となる。点火部で核融合反応が始まり、核融合反応で生じた  $\alpha$  粒子が周囲

の主燃料部を加熱することで、核融合反応領域が広がり、膨大なエネルギーが放出される。この方式では、燃料球殻の中心に点火部が形成されるため中心点火方式と呼ばれる。中心点火の最大の障壁は、高温低密度の点火部とそれを取り囲む低温高密度の主燃料部が流体力学的不安定性によって混合し、点火部の温度が十分に上がらないことである。

干渉性のない熱放射でアブレーターを加熱することで流体不安定性の種を除去し、かつ流体不安定性の成長率を低減させることができる。米国ローレンスリバモア研究所では、世界最大のレーザー装置である National Ignition Facility (NIF) が稼働しており、間接照射型の中心点火方式による慣性核融合点火の実証を目指し研究が行われている。NIF においては、2017 年 8 月に 53 kJ の核融合出力を得た後 [4]、2021 年 2 月 7 日に 170 kJ の核融合出力を得た [5]。核融合出力の上昇は、レーザーから X 線への変換率の上昇による。ホーラムの赤道面付近に照射されるレーザーの一部は、ホーラムの上部及び下部で膨脹するプラズマによって遮蔽される。HYBRID-E [6] というアプローチは、ホーラムの入口付近でレーザーとプラズマの相互作用を利用し、ホーラムの上部及び下部を照射するレーザー光からホーラムの赤道面を狙うレーザー光にエネルギーを移行することで、X 線照射の均一性を向上させている。ホーラムの入口付近にポケットと呼ばれる溝を設け、上・下部のプラズマがレーザーを遮蔽する面積を減らしたのが、I-Raum というアプローチである。1.3 MJ の成果は HYBRID-E 及び I-Raum による照射均一性の改善に加えて、使用したアブレターの品質が大きく影響していると考えられている。アブレーター内に僅かな欠陥 (ゴミや空隙) が存在していると、流体力学的不安定性の原因となる。高品質なアブレーターを用意することが、重要である。

日本においては、大阪大学レーザー科学研究

所を中心として、自然科学研究機構核融合科学研究所との双方向型共同研究の下、複数の大学及び研究所と協力し、高速点火方式によるプラズマ加熱の実証を目指した研究を進めている。この研究では、ナノ秒パルスのキロジュールの激光 XII 号レーザーで核融合燃料を圧縮し、ピコ秒パルスのキロジュールの LFEX レーザーで加熱を行う。中心点火方式では使用不可能な中実球を核融合燃料に用い、安定して高密度プラズマを生成することに成功した [7]。また、レーザー駆動磁場 [8] や自己生成磁場を用いることで、レーザー加速電子ビームを燃料に向けてガイディングすることにも成功している [9]。これらを組み合わせることで、プラズマの一部を 2 keV まで加熱することに成功している [11]。これらの成果は、一般化されたローソン条件（核融合におけるエネルギーバランスをパワーバランスに拡張した指標）で比較され、他のレーザー核融合方式よりも高い効率を示している [12]。

高エネルギー密度科学は、恒星・惑星科学や天文学、宇宙物理、粒子加速、レーザー加工など、幅広い科学の基盤である。高速点火レーザー核融合で得られた技術や知見は、日本における高エネルギー密度科学の広がりへの駆動力になっている。

最後に、レーザー核融合の点火の定義を整理する。米国エネルギー省が現時点で唯一認めている、レーザー核融合における「点火」の定義は、入力レーザーエネルギーと核融合で発生したエネルギーが等しい状態である。レーザー核融合の炉心プラズマは、燃焼、点火、燃焼波伝播を経て、高利得に至る。

エネルギー省の定義は、エネルギー源としてレーザー核融合の到達点を判断する上では役に立つ。しかしながら、これは核燃焼反応の物理に基づいた定義ではないため、燃焼波伝播の始点である「点火」とは一致しない。レーザー核融合において、 $\alpha$ 粒子による点火部の加熱率が、点火部からのエネルギー損失率（具体的には輻射損失率、熱伝導損失率、膨脹損失率の和）を上回る状態を燃焼と定義している。つまり、燃焼とは炉心プラズマの温度が自発的に上昇している状態である。燃焼波伝播とは、点火部を取り囲む冷たく高密度な主燃料部が $\alpha$ 粒子で加熱されることで、新たな領域が点火部となる状態である。他方、点火は燃焼と燃焼波伝播の間である。Bettiらはこれまでの点火の定義を整理しなおし、核融合反応エネルギーの増幅率に基づいて点火を再定義した [13]。彼らの定義は、プラズマの状態に依存するため、詳細

な数値計算が必要であるが、NIFで点火に相当する核融合エネルギーは1.2 MJと結論している。2021年8月16日以降、NIFにおいて核融合点火が達成されたとの噂が全世界を駆け巡ったのは、前日のショットで1.3 MJの核融合出力が観測されたためである。しかし、ローレンスリバモア国立研究所からの正式なニュースリリースに「点火」という単語が見当たらない。これは、米国エネルギー省の認める定義では、核融合出力が1.9 MJを達しないと点火ではないためである。今回の混乱は、レーザー核融合においては、炉心プラズマの状態が非定常かつ過渡的であるため、点火を直接実験で観測することが困難なことに起因する。レーザー核融合における炉心プラズマの非定常性及び過渡性は、その後の再現実験にも影響しており、2021年8月以後の再現実験では500 kJが最大である。NIFで生成されている炉心プラズマが、まだ点火の入口付近であることを示している。

#### 参考文献

- [1] R. Betti and O. A. Hurricane, *Nat. Phys.* **12**, 435 (2016).
- [2] R. S. Craxton *et al.*, *Phys. Plasmas* **22**, (2015).
- [3] J. D. Lindl *et al.*, *Phys. Plasmas* **21**, (2014).
- [4] S. Le Pape *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 245003 (2018).
- [5] A. B. Zylstra *et al.*, *Nature* **601**, 542 (2022).
- [6] A. B. Zylstra *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 25001 (2021).
- [7] H. Sawada *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 254101 (2016).
- [9] S. Fujioka *et al.*, *Sci. Rep.* **3**, 1170 (2013).
- [10] S. Sakata *et al.*, *Nat. Commun.* **9**, 3937 (2018).
- [11] K. Matsuo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 035001 (2020).
- [12] S. E. Wurzel and S. C. Hsu, *Phys. Plasmas* **29**, 062103 (2022).
- [13] A. R. Christopherson, R. Betti, and J. D. Lindl, *Phys. Rev. E* **99**, 021201 (2019).

