

パワーレーザーで、新たな核融合燃焼領域へ

1. はじめに

制御核融合は、究極のエネルギー源となる可能性があるものの、その困難さから、1930年代に提案されて以来、エネルギーを増やすことができなかった。そのような状況の中、2022年末、熱核融合研究における大きなマイルストーンが達成された。すなわち、米国にある世界最大のレーザー施設において、入力エネルギーを上回るエネルギー増幅を伴う人類史上初めて制御された熱核融合反応による点火・燃焼が実証されたことである。¹⁾ここでは、制御熱核融合研究の歴史とともに今回の歴史的な成果と今後の展望について紹介する。

2. 制御熱核融合エネルギー実現の必要条件

核融合反応が生じるf(フェムト)m以下の距離では、同反応で解放されるエネルギー(核力)100 MeVは、原子・分子が持つエネルギー(電磁気力)keVに比べ5桁以上大きい。核融合反応の中でも制御熱核融合は、エネルギー源となる可能性の1つとして世界的に研究がなされている。ここで、熱核融合反応に必要な温度は、数億度という超高温で、物質は必然的に完全電離のプラズマの状態にある(温度の条件)。また、核融合エネルギー源の実現には、一定以上の熱核融合反応を継続的に起こす必要があり、核融合燃料の自律的燃焼が不可欠である。このために、核融合反応を起こす頻度(衝突)を増やすことが重要であり粒子の密度が一定以上である必要がある(燃料密度の条件)。さらに、プラズマが冷めない状態を長い間持続し、燃え続ける必要がある(時間の条件)。これら3つの条件(温度・密度・時間)が揃って初めて、エネルギーを取り出せる持続的な熱核融合反応が期待できる。この条件は、1957年に発表されたローソン条件²⁾として、閉じ込め方式に依らず、核融合エネルギーを実現する上で重要な指標となっている。

核融合エネルギー実現に必要なこの3条件(温度・密度・時間)を満たすために、いくつかの方法が提案され研究が進められている。その1つが、磁場の力で高温のプラズマを一定時間以上閉じ込める磁場核融合方式であり、もう1つがプラズマの慣性力により閉じ込める慣性核融合方式である。特に慣性核融合の中で、レーザーによる手法をレーザー核融合という。どちらの手法も温度の条件はほぼ同じであるが、閉じ込め時間が大きく異なるため、必要となる密度が大きく異なる。磁場閉じ込め時間として秒を単位とすると数密度はおよそ 10^{14} cm^{-3} であるのに対して、レーザー核融合の場合は、閉じ込め時間が、およそ 10^{-10} 秒

のオーダーとなり必要とされる密度は 10^{25} cm^{-3} 程度である。

3. レーザー核融合点火・燃焼の実証

レーザー核融合の概念は、レーザー装置が生まれる前に既に出され、1970年代にエネルギー源としての構造が提案された。³⁾1970年代から80年代のオイルショックという社会現象も相まって、1980年代に世界中で核融合研究を目的とした大型レーザーが建設された。この時、我が国では当時世界一の性能を有したレーザーガラスが産学連携で開発され、大阪大学において大型施設が整備された。この施設により、レーザー核融合の点火・燃焼を実現するために必要な温度⁴⁾と密度⁵⁾が、世界に先駆けて個別に実証された。その後、米国ローレンス・リバモア国立研究所では、核融合エネルギーが入力レーザーエネルギーを上回る点火・燃焼を目指した超大型レーザー施設NIF: National Ignition Facilityを2009年に完成させた。レーザーエネルギーは、当時の人類が扱える最大のレーザー出力1.8 MJであった。このエネルギーで点火できるかどうかは、大きなチャレンジであった。保守的な評価ではレーザー出力10 MJが必要ともいわれる中、その差を埋める科学技術開発としてスタートした。残念ながら、最初のキャンペーン(2014年まで)では、点火できなかった。2 MJ程度のエネルギーでは、単純なエネルギー投入では点火・燃焼はできないということが証明された。これを「失敗だ」とも一部で言われたが、これはある意味、想定内であった。重要なことは、それ以降の10年である。2015年以降、NIFでは1日に1ショット程度しか繰り返しができない超大型レーザーを使い、物理パラメーターを1つずつ地道に変え、それらのデータを機械学習に取り入れて来る日に備えていた。

このような状況下で、コロナ禍により世界中の物理系研究所も活動が停滞していた中、2021年8月に世界に大きなニュースが流れた。レーザー核融合出力が、使用したレーザーエネルギー1.9 MJの0.7倍程度(出力エネルギー: 1.35 MJ; 利得0.7)となり、従来の10倍程度まで増加した。これは、核融合燃料に吸収されたエネルギーの5倍程度を上回るエネルギーを放出する核融合燃焼が実現したということである。⁶⁾当時、この結果はNIFの現場でも、予想していない大きな出力であった。通常は、物理パラメーターを1つずつ地道に変え、データを積みかさねていたが、この時は、複数のパラメーターを変更していた。そのため、出力の大幅な増加に対する理解には、しばらく時間がかかった。それまでの蓄積データとともに機械学習を取り入

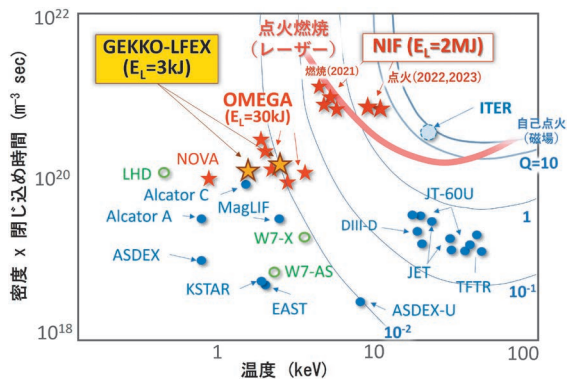


図1 ローソン条件²⁾と世界の核融合施設における成果(およそのもの)⁷⁾。青色細線の曲線は、磁場核融合における利得(Q =核融合エネルギー/加熱エネルギー)であり、自己点火条件は $Q=\infty$ 。赤色太線の曲線は、レーザー核融合における点火・燃焼条件。NIF: 間接照射・中心点火方式, OMEGA: 直接照射・中心点火方式, GEKKO-PW: 直接照射・高速点火方式。⁸⁾

れ1年で、高度な予測モデルを構築した。その結果、翌年の2022年の12月には、レーザーエネルギー(2.05 MJ)を1.5倍上回る核融合出力(3.15 MJ)が観測され、制御熱核融合における人類史上初めての点火・燃焼を実現した。その後、2023年7月には、レーザーエネルギーの2倍の出力を実現した(図1参照)。

ここで、この核融合点火・燃焼に導いたのは、単に世界最大のレーザー技術だけではない。施設が完成した2009年時点で、システムの自動化がいち早く手掛けられていたことである。これにより、コロナ禍で通常の30%以下の人員の中でも、歴史的成果を実現できた。また、先進的な機械学習を開発・導入し、数値シミュレーションも活用しつつ地道に蓄積した実験データを機械学習に取り込み高度な予測モデルを構築したことは大きな勝因の1つである。さらに、NIFの高性能な超大型レーザーガラスの存在も大きい。これは、前述した我が国における産学連携で開発された技術が、米国の子企業にそのまま移管されたものである。いずれにしろ、様々な多くの最先端技術が統合されて、人類史上初めての核融合点火・燃焼が実現した。

今後NIFは、2023~2025年にレーザー出力を現在の2 MJから2.2 MJに増強し、利得4~5を目指している。その後、2025~2027年頃には、レーザー出力2.6 MJに増強し、利得5~8を計画している。さらに、2030年までに3 MJのレーザー出力で30 MJ核融合出力(利得10)を目指している。これに伴い実験環境の安全性向上のため建屋の放射線防護に関する検討も行われている。

4. おわりに: レーザー核融合研究の展望

制御された熱核融合反応による点火・燃焼の初めての実

証は、様々なインパクトを世界に与えている。米国エネルギー省は、2013年の米国科学アカデミーによる評価報告から、今回の成果を機に、2023年よりエネルギー源としてのレーザー核融合研究への予算の投入を始めた。また、レーザー核融合に関する研究予算がなかった独国では、NIFでの核融合点火・燃焼後すぐ、連邦教育研究省(BMBF)において、レーザー核融合に関する有識者会議が組織され、磁場核融合と一緒のレポートが報告された。レーザー技術で強みのある独国がレーザー核融合を推進することは、理にかなっており他国への波及効果も大きく、レーザー核融合への予算化が進んでいる。欧州、中国、韓国においても点火・燃焼の実証は、大きな影響を与えている。また、核融合のスタートアップ企業が増加している中、さらにその動きを加速する形で世界にインパクトを与えている。

今回の実証で、核融合エネルギーが一気に実現する話ではないが、これが、最初の第1歩となる可能性がある。1903年、ライト兄弟がわずか12秒間地上から飛び立った時、誰も500人も乗れる旅客機が実現できるとは想像していなかった。ただ、1つのブレークスルーでこれまでの常識を覆すスピード感で物事が進む場合もある。史上初の旅客機の初飛行は、ライト兄弟が飛び立って、わずか16年後の1919年であった。

エネルギー源の可能性としての核融合に注目が集まる中、もう1つ、核融合点火・燃焼の実証の意義に関して物理学として注視すべきことがある。レーザーによる核融合燃焼²⁾は、爆縮により高温・高密度の核融合燃料プラズマ塊を形成させることで、核融合反応が起こる。ここでは、重水素-三重水素核融合反応により、3.5 MeVのエネルギーを持った α 粒子が大量に生成されることで、新たな非平衡高エネルギー密度状態を形成し、メゾスケールの燃焼波構造を形成したと考えられている。単なる衝突だけでなく集団的なエネルギー散逸構造であり未開拓の領域である。恒星形成や超新星爆発(デトネーション波)など宇宙プラズマにも関係する新たな極限的な非平衡物理学の開拓が期待できることを言い添えて終わりたいと思う。

参考文献

- 1) R. Betti, Nat. Rev. Phys. **5**, 6 (2023).
- 2) J. D. Lawson, Proc. Phys. Soc. B. **70**, 6 (1972).
- 3) J. Nuckolls et al., Nature **239**, 139 (1972).
- 4) C. Yamanaka et al., Phys. Rev. Lett. **56**, 1575 (1986).
- 5) H. Azechi et al., Laser Part. Beams **9**, 193 (1991).
- 6) A. B. Zylstra et al., Nature **601**, 542 (2022).
- 7) S. E. Wurzel and S. C. Hsu, Phys. Plasmas **29**, 062103 (2022).
- 8) R. Kodama et al., Nature **412**, 798 (2001); K. Matsuo et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 035001 (2020).

兒玉了祐(大阪大学レーザー科学研究所 kodama@eei.eng.osaka-u.ac.jp)

(2023年11月4日原稿受付)