

レーザーエネルギー研究所、 慣性閉じ込め核融合を目指す

サリー・コール・ジョンソン

ロチェスター大のレーザーエネルギー研究所は、国家核安全保障局の核備蓄管理計画の一環として、また、クリーンエネルギー源の探究を目的として、レーザー駆動の慣性閉じ込め核融合の研究に取り組んでいる。

レーザーエネルギー研究所 (Laboratory for Laser Energetics : LLE) には、「OMEGA」と「OMEGA EP」という2つの非常に強力なレーザーがあり、研究者らはこれらを使用して、レーザー駆動の慣性閉じ込め核融合 (Inertial Confinement Fusion : ICF) の研究を行っている。

ICFでは、水素同位体、重水素(D)、トリチウム(T)からなる少量の燃料を圧縮し、星の中心部を超える温度に加熱することが必要である。

「それらの条件が満たされると、燃

料は核融合反応を起こし、莫大なエネルギーを放出する。そのエネルギーは、国家核安全保障局 (National Nuclear Security Administration : NNSA) の核備蓄管理計画 (Stockpile Stewardship Program : SSP) に関連する研究や、カーボンフリーの発電所を駆動するために使用できる」と、著名な科学者でLLEのTheory Divisionのディレクターを務めるバレリ・ゴンチャロフ氏 (Valeri Goncharov) は説明した。

1970年に米ロチェスター大 (University of Rochester) に設立された

右下に示されているのが「Conesus」スーパーコンピュータ。上部には「OMEGA EP Laser System」、左下にはターゲットチャンバ内部のターゲットショットの画像が表示されている (写真コラージュ作成 : LLEのJacob Deats氏)

LLEは、米エネルギー省 (DOE) の大学を拠点とする研究プログラムとして全米最大規模を誇り、SSPの一環としてNNSAの支援を受けている。

「強い放射と物質の相互作用の研究拠点として、LLEは科学と技術の研究と教育のための比類ない国家リソースである。われわれの現在の研究としては、SSPと未来のエネルギー源を目的とした核融合の探究、新しいレーザーおよび材料技術の開発、高エネルギー密度現象に関する理解の深化などがある」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

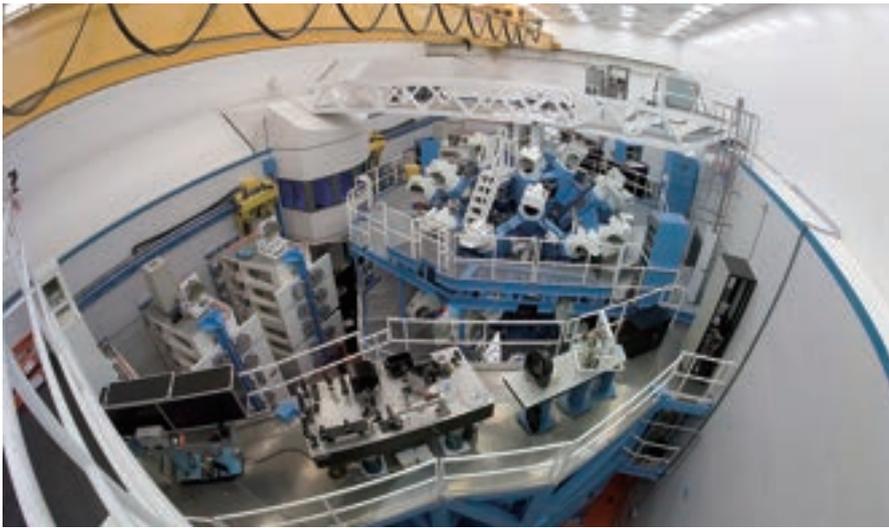


図1 OMEGA Laser System(写真提供:LLEのEugene Kowaluk氏)



図2 OMEGA EP Laser System(写真提供:LLEのEugene Kowaluk氏)

レーザー駆動の 慣性閉じ込め核融合

ICFの実験は、LLEにおける主要な取り組みの1つで、OMEGA(図1と図2)は、1日あたり約10回の実験を行う。ちなみに、ローレンスリバモア国立研究所(Lawrence Livermore National Lab: LLNL)の国立点火施設(National Ignition Facility: NIF)では、1日あたり1~2回しか実行できない。

1回の実験でレーザーが供給するエネルギー量は膨大ではなく、OMEGAで30kJ、NIFで2MJである。「30kJのエネルギーでは、3オンス(約90mL)の水を室温から沸点まで加熱することしかできない。しかしICFでは、空間と時間がかかなり圧縮されるため、その

わずかな量のエネルギーでも特異な物質状態が作り出される」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

ICF爆縮の継続時間はわずか数ナノ秒で、点火実験を成功させるには、プラズマの点火状態を10分の1ナノ秒間維持する必要がある。それがどのくらいの時間であるかを表す情報として、光は1ナノ秒の間にわずか1フィート(約30cm)しか移動しない。

また、レーザーエネルギーは微小空間に供給される。OMEGAのターゲットのサイズは1mmよりも小さい(図3)。「レーザーエネルギーは非常に短い時間に非常に小さな体積に供給され、物質を非常に高エネルギー密度(High Energy Density: HED)の状態にする

(質量を非常に小さな体積に圧縮すると、質量密度が高くなるのと同様である)。HED状態の下で、100万気圧(atm)を超える圧力を生成する。ちなみに、地球内部の圧力は300万atmで、ダイヤモンドは50万atmで形成される。HED状態の物質は惑星科学に関係しており、その状態は星の内部で達成される」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

レーザーがターゲット材料に作用するICF爆縮の間に数百万atmの圧力が、ロケットの中で推力を生成する燃焼燃料の流れと同じメカニズムによって生成される。すなわち、ターゲット材料の薄い層がレーザーによって加熱されてアブレーションを起こし、その噴出フローがターゲットの残りの部分を中心に向かって加速する圧力を生成する。ターゲットが爆縮すると、球状収束によってターゲット圧力が数千億atmに増幅されて、数億度の温度と数千億atmの圧力の核融合状態が生成される。

点火を目指す取り組み

NIFは2022年12月5日、実験施設における初めての点火に成功し、DT燃料の圧縮のために実験時に使われるレーザーエネルギー(2.05MJ)を上回る核融合エネルギー(3.15MJ)を生成した。

「このマイルストーンは、HED状態における物質の振る舞いに関するわれわれの理解を実証しており、完全ではないものの、このような複雑な実験を設計して、モデリング、レーザーエネルギー供給、ターゲット製造、データ収集と解析における高い精度と正確度を必要とする、核融合状態を達成できる段階に前進するものである」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

ゴンチャロフ氏によると、同氏の見解では、「ICF爆縮に関するわれわれの知識が、レーザーを使用してDT燃料を圧縮(その体積を1万分の1に減少)するための1億atmの圧力を生成し、圧縮過程において球対称から過度に逸脱することなく(有効に燃料を圧縮す



図3 ターゲットショット時のOMEGA ターゲットチャンバ内の画像(写真提供: LLEのEugene Kowaluk氏)

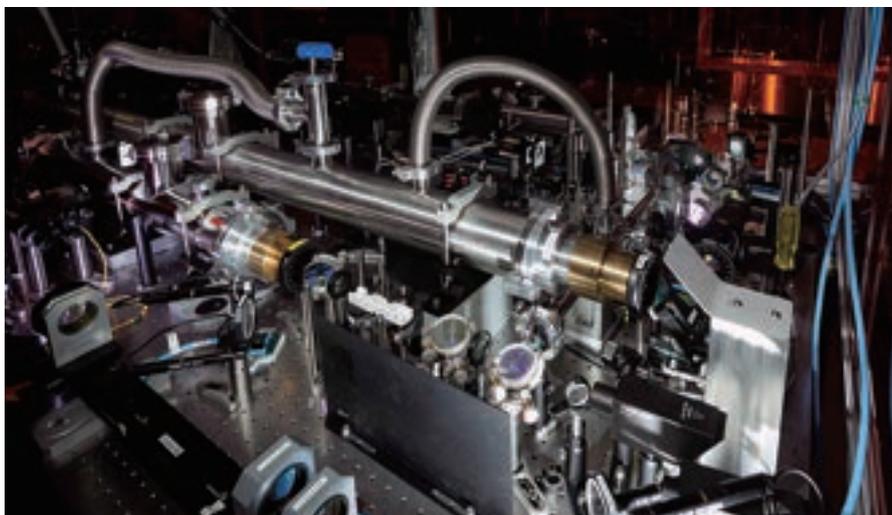


図4 MTWとOMEGA EPレーザーの光パラメトリックチャープパルス増幅段を励起するために開発されたアーキテクチャに基づく、ダイオード励起の水晶大口径リング増幅システムは、5Hzで1.5Jのパルスを供給することにより、FLUX(Fourth-generation Laser for Ultra-broadband eXperiments)の最初の2つの広帯域増幅器を励起する(写真提供: LLEのJacob Deats氏)

るには、爆縮が高度に球対称でなければならない)、燃料を十分に低温に保ってその密度を最大化するために、十分に完全なのかどうかという疑問が常にある」という。

NIFが点火達成に苦戦していたのは周知の事実で、HED/ICFの分野に携わる多くの人々が、実験施設における点火がそもそも可能なかどうかという点に、疑問を抱き始めていた。

「われわれは懸命に答えを探し、現在のモデリングには含まれていない物理学によって、点火失敗の理由がどの

ように説明できるかを調べていた。データに基づき、1つのことが明らかになった。つまり、これまでの爆縮で燃料に結合されるエネルギーは、ターゲットの中心に『核融合スパーク』を生成して、残りの燃料を点火するのに、十分ではなかったということである。LLNLの科学者らの懸命な努力と創意工夫が、HEDコミュニティ全体からの多くの貢献に支えられて、設計変更につながり、それがより高い燃料エネルギー、そして最終的には点火につながった」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

LLEとNIFは、プラスチック層に封入された冷凍DT層という類似のターゲットを使用するが、レーザーエネルギーをターゲットに供給する方法が異なる。

「NIFの爆縮では、ホーラム(hohlraum)と呼ばれる高Z(金)の容器の中にターゲットが配置される。レーザーを当てることで、内壁が加熱してX線を放射する。それは、かまどの中で、かまどの壁から放射される熱で鍋料理を焼く仕組みに似ている。それと同じ方法で、ホーラムの中でX線によってターゲット表面が加熱される」と、ゴンチャロフ氏は説明した。

表面の材料が噴出するときに、残りのターゲットを中心にに向かって駆動するロケット効果が生成される。「レーザーエネルギーは間接的にターゲットに届くため、これは『間接駆動』と呼ばれる。LLEでは、レーザーを使用してターゲット表面を直接加熱する、直接駆動方式を採用している。これは、かまどではなく、ガスコンロの上に鍋を置く状態に似ている。レーザーがターゲット表面を加熱し、その後の駆動過程は間接駆動と同じように進行する」と、同氏は述べた。

間接駆動と直接駆動

間接駆動と直接駆動の両方に利点と欠点がある。間接駆動のほうが効率は低い(燃料に到達するレーザーエネルギーが少ない)が、ターゲット圧縮の対称性は高くなる。LLEは、レーザービームによる不均等な加熱を克服するための複数の手法を開発しており、直接駆動の初期の欠点はほぼ解消されている。

「直接駆動にはまだ、大きな欠点がある。噴出したプラズマを通してレーザーがターゲットに到達するときに、高いレベルの電子波とイオン波が励起される。これらの波によってレーザー光が、ターゲット領域に到達して効率的に吸収される

前に散乱される。これは、OMEGAで目から鱗が落ちた瞬間の1つだった。われわれは、ロケット効果による直接駆動爆縮で生成されるアブレーション圧力が、モデル予測に基づく予想値を下回る理由の解明に苦しんでいたためだと、ゴンチャロフ氏は述べた。

この問題を理解するために、研究者らはターゲットから散乱されるレーザー光の色(周波数)を測定した。「レーザー光はほぼ単色だった。虹色に見える多くの異なる波長を含む日常的な白色光とは逆に、波長が1つしかない。しかし、その他のすべての波がそうであるように、光は動く表面で反射すると、その波長がドップラー効果によってずれる。それは、緊急車両が近づいてくるか遠ざかっていくかによって、サイレンの音の高さが異なって聞こえることに似ている。レーザー波長も、光源から離れていく爆縮ターゲット表面で反射すると、少し長くなる」と、同氏は述べた。

反射したレーザー光の波長を測定することにより、動くターゲットからのずれが予想よりも小さいことが判明した。「レーザー光が十分に深く浸透せず、ターゲット表面に到達する前に早めに反射している以外に、説明が見つからない。それは、レーザーそのものによってプラズマに放射されたイオン波から反射している。反射波パターンを生成するには、交差する2つのビームが必要であるため、この現象は、クロスビームエネルギー移動(Cross-Beam Energy Transfer: CBET)である。これは、ターゲットからの光反射の30~40%を占めており、ロケット効果とアブレーション圧力を著しく低下させる要因である」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

この発見には、良い点と悪い点がある。良い点は、爆縮の効率が低い原因が見ついに判明したことである。悪い点

は、効率の低さの原因が、直接駆動(ターゲットプラズマに対するレーザー光の直接的な相互作用)の性質にあったことである。この発見のさらに悪い点は、結合損失のレベルがターゲットの大きさに比例することだった。

NIFのようなより大きなレーザー施設で直接駆動爆縮を行うと、CBET損失はさらに大きくなり、DT燃料に対する効率的なレーザーエネルギー結合が妨げられて、直接駆動方式による点火は非常に難しくなる。

「解決策は、些細なことのように思われた。すなわち、大きなイオン波をそれよりも小さな一連の波に分割することである。石を一定の間隔で水に投げ入れる場合の水面の波のように、光源が時間的に規則的であれば、波は規則的な構造を持つことになる」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

単色(単一波長)のレーザー光がプラズマを通ると、プラズマの一部の領域(共鳴領域)に、励起された規則的なパターンのイオン波が生じる可能性がある。「波長がわずかに異なる2つの波長を持つレーザーを使用したらどうなるだろうか。それぞれ振幅が小さく、位置が異なる、周波数がわずかに異なる2つの異なる波が生成される」と、同氏は指摘した。

そして、さらに多くのレーザー波長を追加するプロセスを繰り返して、レーザービームを周波数の異なる複数のより小さなビームに分割したらどうなるだろうか。「屈折イオン波パターンを完全に破壊し、波の振幅を非常に小さくして空間に拡散させることにより、これらの波がレーザー光をもう散乱できないようにする」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

これがCBETに対処するための主要なアイデアであり、ゴンチャロフ氏と同僚らが直接駆動の未来に大いに希望を見出した、目から鱗が落ちたもうひ

とつの最近の瞬間だった。

広帯域レーザー(存在する少数の周波数によって分割された複数の周波数で構成されるレーザー光)を使用することによってCBETが打ち消されることを実証できれば、「レーザー駆動方式の利点は非常に大きくなり、レーザー光のほぼ100%をターゲットに結合して、アブレーション圧力を数億atmまで高めることが可能になる。それだけ高効率のレーザーがあれば、同じレーザーエネルギーを使用するNIFの間接駆動で現在可能なレベルよりも50~100倍高い核融合収率が、直接駆動によって達成されると予測される」と、ゴンチャロフ氏は説明した。

広帯域レーザービームの試作

次の課題は、OMEGAで使用する広帯域レーザービームのプロトタイプをLLEで構築して、CBETの緩和を実証することである(図4)。「われわれはこのレーザービームを、Fourth-Generation Laser for Ultra-Broadband Experiments(超広帯域実験のための第4世代レーザー)の頭文字をとって『FLUX』と呼んでいる」と、同氏は述べた。

これらの実験は2024年に行われる予定で、成功すれば、「次世代広帯域爆縮施設の提案書をまとめるつもりだ」と、ゴンチャロフ氏は付け加えた。

NIFよりもはるかに規模は小さいものの、同施設の主な目標は、レーザーとプラズマの相互作用に起因するオール直接駆動の欠点を、球状爆縮によって取り除くことが可能であることと、核備蓄のニーズと将来の慣性核融合エネルギー発電所に対応する高い核融合収率(>100MJ)を最終的に実現するためのアトスケールの爆縮施設に向けて、レーザー技術の準備が整った状態にあることを、実証することである。

ICF 実験で大きな役割を果たすコンピューティング

HED 状態下において物質が、日常経験に基づく私たちの予測とは全く異なる振る舞いをすることは容易に想像できる。ICF 実験をモデル化するために、研究者らは異なる種類の演算ツールや数値コードを使用している。

「1セットのコードで、圧縮率(100万atmの圧力の印加によって物質の体積がどれだけ変化するか)、熱伝導率(一方の温度が他方の温度よりも高い場合に、温度はどれだけ速くで平衡化するか)、粘度などの材料特性をモデル化する」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

LLEは、レーザー光とプラズマの相互作用をモデル化するためのコードも保有している。「HED状態と数百万度の温度の下で、原子の中で電子はイオンから分離して、プラズマという新しい物質状態を形成するため、これは複雑なプロセスである。電子もイオンも荷電粒子であるため、地球の磁場が宇宙から流れ込む荷電粒子を偏向させるように、電磁場に反応する」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

レーザー光は電磁波であるため、この波によって伝播される電磁場の振幅は時間とともに振動する。電子はこのような電磁場振動に2つの方法で反応する。まず、光エネルギーの一部を吸収する。2つめに、振動してプラズマ波を生成する。イオンも同様に振動し、波を形成する場合がある。

電子によるレーザー光の吸収は、ICFに好都合である。それは、レーザー光がそのエネルギーをプラズマに結合する、主要メカニズムだからである。

「2つめのプロセスである電子波とイオン波の形成は、ICFに不都合である。それらの波は、ターゲットから光を散乱させて、プラズマ電子を非常に大きなエネルギーに加速する可能性があるためだ。高いエネルギーを持つこれらの電子(ホットエレクトロン)は、メインターゲットまで移動して、重水素-トリチウム(DT)燃料を予熱する可能性があり、それによって、燃料を圧縮して点火状態に到達することが非常に難しくなる」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

レーザーとプラズマの相互作用のそうした複雑な細部をモデル化するためにLLEは、関連するプラズマ物理学を含む特殊なコードを保有している。「材料特性やレーザーとプラズマの相互作用のための物理学に特化したこれらのコードは、爆縮プロセス全体をシミュレーションするには複雑で演算量が多すぎる。マイクロスケール(原子)レベルで物理学を記述するコードを使用して、フルスケールのターゲット進化をシミュレーションできるだけの演算リソースは、この世界に存在しない。世界最先端のエクサスケールコンピュータでさえも、現時点ではそれを実行できないし、近い将来にできるようになる見通しもない」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

そこでLLEの研究者らは、プラズマを電子とイオンの流体として近似している。それらの温度やその他の材料特性が異なるためである。その上で流体力学コードを使用して、レオンハルト・オイラー(Leonhard Euler)の1750年代の研究に基づく流

体の連続の式(continuity equation)を解いている。

「これらの方程式は数百年前から存在するため、大規模コンピュータを使用してこれを解くための数多くの手法がこれまでに開発されている。しかし、長年にわたって努力を重ねてきたが、すべての流体力学問題を解く完璧なアルゴリズムが完成したとはまだ主張できない。問題ごとに、それ独自のコードと手法が必要である」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

なぜこのような古い方程式が、このような極端な条件に対しても有効なのか。それは、それらの式が、質量、運動量、エネルギーは保存されるという、物質の基本原則に基づくためである。

複雑なプラズマ物理現象や特異な材料特性に関する現代の知識と、100年前の方程式はどのようにかみ合うのだろうか。「流体力学方程式の1つの問題点は、それらが完全集合ではないことである。方程式の数よりも未知なものの方が多い」と、ゴンチャロフ氏は説明した。「オイラーの時代には、1atmの圧力や、室温から沸騰水の温度までといった、日常的な条件において、それは大きな問題ではなかった。質量と体積を測ることによって、材料密度を計算することができた。ほぼすべての材料を圧縮不可能(密度は圧力に依存しない)として扱うことができた」(ゴンチャロフ氏)。

しかし、航空機や高圧プレスが構築されるようになって、人々は材料密度が一定ではないことに気づいた。航空機が達する非常に高い流速や、大気圧をはるかに超える圧力を印加すると、密度は変化する可能性がある。材料密度、温度、圧力の間のこの関係は、状態方程式(Equation Of State:EOS)であり、流体力学方程式を使用して導くことはできない。これは、原子レベルにおける材料特性の知識に基づいている。

今日の高エネルギー密度物理学の世界に時を進めて、「複雑な材料特性のモデルと、OMEGAやNIFでの実験を使用して、これらの特異な状態に対するEOSを導き出すことができる。われわれは、ICF爆縮のようなHED現象を正確に記述するために、最新のモデルをハイドロコードに使用している。EOSだけでなく、熱伝導、粘度、放射特性、輸送などの他の材料特性にも、プラズマ物理学や原子物理学に基づく最新のモデリングツールが必要である」と、ゴンチャロフ氏は述べた。

このような最新のモデリングツールを使用するには、米デル・テクノロジー社(Dell Technologies)によって構築され、ニューヨーク州北部のフィンガーレイクスに1つにちなんで名づけられた、「Conesus」のような最新のスーパーコンピュータが必要である。LLEが最近導入したこの4万3008コアのマシンは、2.59ペタフロップスの性能を備え、2023年6月のスパコン性能ランキングTOP500で311位にランクインした。Conesusは、最もエネルギー効率の高いマシンを評価する2023年6月のGreen 500においても、77位にランクインしている。