



インフォメーション

■会議報告

66th Annual Meeting of Division of Plasma Physics, American Physical Society

藤岡慎介（大阪大学レーザー科学研究所）

2024年10月7日から10月11日まで、米国ジョージア州アトランタで開催された66th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (APS-DPP)に参加した。別用務のため、私は初日から10月10日(木)午前中までの参加であった。また、私の専門がパワーレーザーを用いた核融合および高エネルギー密度科学であることから、APS-DPPの広範な研究発表のうち、極めて一部しか紹介できないことを予めご了承ください。

私がAPS-DPPに参加したのは、2017年のミルウォーキー以来であり、会議運営やプログラム編成が大きくアップデートされていたことに驚かされた。Virtual Meetingオプションが定常的に運用されている点が、会議運営面の重要なアップデートの一つである。対面での参加が推奨されているが、特別セッションを除きオンラインでも聴講・発表が可能であり、リモートの参加者はチャットを通じて質問ができる。このシステムは、移動が困難な研究者や、出張が難しい研究者にとって非常に便利であり、我が国の会議運営にも大いに参考になる仕組みである。

もう一つ印象に残った点は、Mini-conferenceと呼ばれる、特定の注目話題に特化した提案型のセッションが組まれていたことである。プラズマ・核融合学会や日本物理学会ではシンポジウムや企画セッションが既に存在しており、この点で日本のコミュニティの方が先行している。しかし、Mini-conferenceは提案者が一件当たりの発表時間を自由に設定できるだけでなく、パネルディスカッションを通じて講演者と聴講者が活発に議論を交わせる場が設けられるなど、運営の自由度が非常に高い。このような柔軟な企画運営は、我が国の会議においても取り入れるべきだと感じた。さらに、毎朝のプレナリーセッション前には、APS-DPPとしてのcode-of-conductが必ずアナウンスされ、参加者が互いのバックグラウンドや知識の違いを尊重し、建設的な議論を行うことの重要性が強調されていた。休憩室等の配置などLGBTQ+に対する配慮が随所に見られ、多様性と包摂に対するアメリカの学術界の姿勢を見ることができた。また、学生や若手研究者に対して、積極的に質問や議論を促すアナウンスが行われる場面も多く見られ、これは万国共通の課題であると感じた。

初日最初のプレナリー講演は、ローレンスリバモア国立研究所のF. AlbertによるLaserNetUSに関するレビューであった。LaserNetUSは、米国エネルギー省(DOE)が支援する高強度レーザー科学研究ネットワークで、2018年に設立された。このネットワークは、アメリカ国内の9

つの主要なレーザー施設を結びつけ、研究者たちに最先端の高強度レーザーシステムを利用できる機会を提供することを目的としている。各レーザー施設は異なる技術的特性を持っており、極超短パルスレーザーや繰り返しハイパワーレーザーなどが含まれている。施設連携より、幅広い種類の実験に対応可能で、例えば、高エネルギー密度物理学、レーザー駆動の粒子加速、さらには核融合エネルギー研究など、さまざまな科学分野での利用が進んでいる。LaserNetUSの設立は、レーザー科学における米国の競争力を高め、国際的な科学コミュニティと連携するための重要なステップであり、この成功はMagNETUSというMagnetized Plasmaの装置に関する新たなネットワークの立ち上げにつながっている。日本においても文部科学省先端施設供用促進事業プラットフォーム事業として、国内の先端施設のネットワーク化や共用が進められている。LaserNetUSは施設のネットワーク化がコミュニティの活発化に繋がっている好事例である。

折しも2024年度のノーベル物理学賞及び化学賞は人工知能や機械学習に関する研究に授与された。機械学習はプラズマ物理の研究にも積極的に取り入れられている。例えば、米国ロチェスター大学のOMEGAレーザー施設では、低温で固化した重水素-三重水素層を使用した爆縮実験のデータベースが構築されており、レーザー条件や燃料サイズなどの設定を基に、ベイズ推定によって中性子発生量とのスケールリングが発見されている。さらに、ベイズ最適化を用いて、中性子発生量を最大化するための最適なレーザーショットが決定されている。興味深い点は、ガウス過程帰帰型ベイズ最適化が試行回数を少なくしつつも効率的に確からしい解に導ける点である。本研究にて最適化されたレーザー波形にはメインパルスにディップがあり、イギリスのグループが発表したshock argument ignition方式に類似しているとの言及があった。

現在のロチェスター大学の実験では、重水素化ポリスチレンにSiをドーブした材料が使用されている。レーザー照射によって励起された電子プラズマ波をイオンとの衝突減衰させることで、Two-Plasmon Decay (TPD) とその後のLandau Dampingによって加速される高エネルギー電子の抑制が試みられている。また、今後の実験ではGeをドーブした重水素化ポリスチレンの使用が予定されており、これによりレーザーからプラズマへのエネルギー結合効率の向上が予測されている。さらに、Geドーブによって、大阪大学のグループが実証したダブルアブレーション構造が形成されると予測されることから、流体力学的不安定性の抑制効果も私としては期待している。

一方で、燃料の中心と爆縮プラズマの位置ずれ(モード1)が問題となっており、その原因として燃料の設置位置のずれやレーザーのパワーバランスの不均衡に加えて、Cross Beam Energy Transfer (CBET) の影響が明らかになってきた。CBETは、交差するレーザー光線が共鳴条件を満たすと、一方の光線から他方の光線にエネルギーが移動する現象である。OMEGAレーザーの実験では、この現象が入射光線と反射光線の間で発生し、その結果として燃

料に吸収されるエネルギーが減少する。OMEGA レーザー装置における偏光分布に基づく計算結果によると、CBET が吸収パワーの分布に偏りを生じさせ、その結果としてモード1が発生することが確認された。この問題に対処するため、燃料の設置位置を意図的にずらすことで、モード1のコントロールが可能となったと報告された。

さらに、重水素-三重水素を三重点以下に過冷却し燃料の高密度化を図り、かつ燃料層の厚みを増加させ、加えてアブレターの厚みを可能な限り薄くすることが試みられているとの報告があった。アブレターの厚みが薄すぎると、燃料層がアブレーション面に到達し、TPDによる燃料の先行加熱が生じ、厚すぎると爆縮速度が低下する。一連の取組により、一般化ローソン条件（又は点火パラメーター）で0.86が達成された。これは流体力学的相似則に基づく、2.1 MJのレーザーで1.7 MJの核融合出力に相当するとのことである。この相似則ではLaser Plasma Interaction (LPI)が考慮されていないため、LPIのスケール依存性については別途研究が必要と会場からコメントがあった。

ベイズ推定を用いて過去の実験データから新しいスケールリングを構築する研究は他にも見られ、例えば、相対論的強度のレーザーによる高エネルギー電子の加速において、勾配温度とレーザー強度のスケールリングに新たにレーザーのパルス幅を考慮した研究成果が発表されていた。また、生成AIであるLarge Language Model (LLM) を用いて、LPIによって発生する高エネルギー電子のエネルギー分布を予測する試みも紹介された。現状、LLMで完全なスケールリングを得るのは難しいが、最適化の初期推定には有用とされている。しかし、LLMでどのようにスケールリングが生成されるかは著者にとって不明瞭であり、詳しい方は是非ご教授いただきたい。加えて、イメージングプレートを用いた高エネルギーX線分光器の信号再構成や、多方向からの2次元中性子画像のトモグラフィー再構成など、計測における逆問題に機械学習を応用した研究も報告された。これらの手法は、将来的にレーザー核融合や高エネルギー密度科学においてデータ解析や最適化に大きな役割を果たすと期待される。

さらに進んで、Digital Twinに関するMini-conferenceも開催された。Digital Twinでは、実験やシミュレーションを基に物理モデルを更新し、モデルと実際のシステムが相互に作用する。残念ながら私が聞いた範囲では、慣性閉じ込め核融合エネルギー (IFE) に関するDigital Twinの具体例は報告されていなかった。個人的には、米国のCommonwealth Fusion Systems (CFS) 社の活動が特に興味深かった。CFSはMITと協力してSPARCというトカマク型核融合炉を開発しており、超電導磁石を用いた高磁場トカマクで商業用核融合エネルギーの早期実現をめざしている。CFS社の講演を聴く中で、SpaceXのようなシステム統合における革新性を感じられた。デジタルツイン技術の開発に同社が積極的であることが示された。特に、開発したツールを一般公開し、多くの研究者と共に改良を行いながら研究を加速している点は注目に値する。

間接照射型の間接照射慣性核融合の分野では、米国National Ignition Facility (NIF) が点火を達成したことで、研究活動に落ち着きが見られ、未解決の物理現象を詳細に調べ、様々なアプローチを試す余裕が出てきたように感じた。現在でも間接照射においては、実験との整合を取るために、シミュレーションでのX線輝度を意図的に調整する必要がある。この調整の物理的原因は長らく不明であったが、最近の実験により、金プラズマからのMバンド発光（約1.8 keV）の強度がシミュレーションで過大評価されることが判明し、非局所熱平衡状態にある金のオパシティーを修正し、更に自己生成磁場による熱伝導におけるNernst効果を考慮することで、実験とシミュレーションのbang timeの差を110 psまで縮小できることが報告された。

また、レーザー吸収におけるLangdon効果を見直す研究も発表された。レーザー吸収領域では、レーザー電場からエネルギーを直接受け取るのは低速電子であり、その結果、電子エネルギー分布がマックスウェル分布からスーパーガウス分布に変化する。この効果により、低エネルギー電子が減少し、レーザー吸収率が低下する一方で、高速電子が増加して非局所的な熱輸送が強調される。また、高エネルギー側に偏った電子エネルギー分布により、電子-イオン衝突電離が増加し、平均電離度が上昇することが報告された。

NIFの次の目標は、2.6 MJのエネルギーで核融合利得10の達成であるが、これに向けたシミュレーションが行われている。2.6 MJでは、誘導ラマン散乱によるエネルギー散逸が懸念されている。加えて、これまでに最も小さいレーザーエネルギー1.9 MJで点火が達成されたことも報告された。燃料内部での第一・第二衝撃波を同時に裏面に到達させる調整により、圧縮率が約1.1倍に向上し、核融合出力が4.4倍増加した。講演者によると、これまで衝撃波のタイミングが意図的に崩されていたとのことであり、燃料内面で希薄波を発生させて α （プラズマ圧力とフェルミ圧力の比）の値を大きくし、減速段階での流体不安定性を抑制する意図があったと推測される。また、更に小さなエネルギーでの点火をめざす試みとして、ホーラム内の放射温度を上昇させる試みも報告された。放射温度が高くなると、燃料の爆縮速度が大きくなると同時に、アブレーション安定化による流体不安定性の成長率の抑制も期待される。エネルギー投入を減らしながら放射温度を上げるためには、ホーラムのサイズを小さくする必要があるが、ホーラムが小さくなると赤道面に届くレーザーエネルギーが減少し、一様性が損なわれる。これを補うため、波長チューニングを行い、CBETを利用して赤道面に届くエネルギーを増加させている。

Inertial Fusion Energy (IFE) のMini-conferenceでは、STARFIRE Hubの活動が報告された。STARFIRE Hubは、米国エネルギー省が資金提供する4年間のプロジェクトであり、IFEの商業化を加速することをめざしている。ローレンス・リバモア国立研究所が主導し、国家研究機関、学術界、産業界が協力してレーザー核融合技術、高利

得ターゲット設計、統合プラントモデルの開発を進めている。さらに、人材育成やサプライチェーンの構築にも重点が置かれている。

ロチェスター大学は、直接照射による IFE の実現に向けて、主に LPI の研究を行っている。LPI が直接照射方式における最大の課題であり、上述のように特に CBET はエネルギー結合率を低下させる要因と認識されている。この問題を解決するため、ロチェスター大学の Laboratory for Laser Energetics にて、Fourth generation Laser for Ultra-broadband eXperiments (FLUX) が構築され、2025 年 1 月の運転開始が予定されている。Colinear の Optical Parametric Amplifier を用いて広帯域の光を発生させ、それを効率良く UV 光に変換する技術が開発されたことで、FLUX は中心波長 355 nm、帯域幅 15 THz と広帯域の特徴を持つ。彼らの評価によると、0.53 μm のレーザーによる直接照射レーザー核融合を実現するには、8% のバンド幅が必要であることが示唆されている。今回の一連の発表を聴講し、直接照射において α の値がやや高いことに懸念を持った。これは、CBET を避けるために、レーザービーム径と燃料径の比が 1 に近づき、低次から中次モードの非一様性が増加した結果として、流体不安定性の成長を抑制するために α を大きくせざるを得ない状況にあると理解できる。教科書的なガイドラインとしては α が 3 以下であることを考えると、 α が 5 程度に設定される現状は、私にとっては奇異に感じられる。 α が高いため、間接照射に対する直接照射の優位性が見えてこないことが残念である。

コロラド州立大学は、IFE に必要な微細構造を持つ燃料と高強度レーザーの開発に取り組んでいる。核融合スタートアップである Marvel Fusion と協力して、繰り返し周波

数が 10 Hz、2 倍高調波、パルス幅 100 フェムト秒の PW レーザーシステムを構築中である。このシステム開発は民間資金によるが、利用者に公開される予定である。

高速点火レーザー核融合に関して、レーザー加速プロトンを用いた研究が複数報告された。コーン内面に球面湾曲させたプラスチックフォイルを設置し、レーザー照射により Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) で加速されたプロトンを使ってコーン先端の高密度プラズマを加熱する手法が集中的に研究されている。核融合スタートアップである Focused Energy は、このプロトン高速点火を用いた IFE の実現をめざしており、カリフォルニア大学サンディエゴ校、プリンストンプラズマ研究所などが協力している。まずは OMEGA および OMEGA-EP を用いた原理実証実験を目標としており、そのための燃料設計が報告された。また、TNSA はフォイルのプレヒートに非常に敏感であり、将来的な困難が予測されている。

APS-DPP に参加して、民間企業とアカデミアの連携が進展しており、研究開発エコシステムが滑らかに循環していると強く感じた。巨額な民間投資によって開発された技術や装置をアカデミアが共同利用することで、アカデミアで育った研究者が産業界で活躍する姿が散見されるなど、コミュニティの加速的な成長が促進されている。またオープンサイエンスはエコシステムの潤滑油であるという効用の理解が進んでいる。日本においては内閣府が主導でオープンサイエンスを推進しているが一步出遅れている感がある。研究開発におけるオープンマインドの重要性とオープンマインドに対するインセンティブの付与（単に論文や特許等の数ではなく、コミュニティへの貢献等も考慮する多様な評価軸）の必要性を改めて認識した。

(原稿受付：2024 年 10 月 30 日)



アトランタの観光といえばコカコーラ・ミュージアム。どこのコカコーラが一番美味しいか？が話題になりました。Wikipedia によると、本物の砂糖を使っているメキシコものが一番らしいです。