

IFEフォーラム

レーザー核融合技術振興会

2019.11.25

No. 99

FORUM FLASH



2019年7月10日 第28回レーザー核融合技術振興会総会

IFE
FORUM

IFEフォーラム

第28回 レーザー核融合技術振興会 総会報告

大阪大学レーザー科学研究所 教授 山本 和久

令和元年7月10日(水)千里ライフサイエンスセンターにおいて、第28回レーザー核融合技術振興会総会が開催されました。小路泰弘幹事長(関西電力株式会社)から、定足数が満たされ総会が成立することが報告され、開会宣言がなされました。

川嶋利幸会長(浜松ホトニクス株式会社)より、地球温暖化ガスを発生せず、燃料が実質的に無尽蔵であるレーザー核融合への期待が述べられました。また、レーザー核融合エネルギーの優れた特徴を活かし将来のエネルギー源とするため、本振興会活動に会員の支援と協力をいただきたい旨が述べられました。

平成30年度事業報告・収支決算、および令和元年度事業計画・予算について資料により、白神宏之副幹事長(大阪大学レーザー科学研究所)から説明があり、全会一致で承認されました。

平成30年度事業報告の主な活動報告として、レーザー核融合によるエネルギー開発に向けた有識者会議(以下有識者会議)において、我が国のハイパワーレーザーと高エネルギー密度科学研究ネットワーク拠点の在り方について審議されたこと、これまでの議論を踏まえて次期有識者会議の設立が議論されたことなどが報告されました。またFIREXプロジェクト計画委員会においては、レーザー核融合戦略会議を設置し、第1回会議を開催したこと、および会議内に4つのワーキングを設置し活動を始めたことが報告されました。

レーザー中性子源利用専門委員会を支援、2年半の活動を報告書に取りまとめ、今後の研究開発展望を行ったこと、レーザー学会の特集号として委員会の

活動状況を公表したことが紹介されました。また国際交流・調査活動、講演会、見学会を含めた情報・広報活動についても報告がなされました。会議協賛では日本学術会議日米シンポジウム(平成31年1月23～



川嶋会長の挨拶

24日に米国ワシントンDCで開催)を支援し、レーザー核融合を中心とした今後の日米協力の展開にとって非常に有意義であったことが述べられました。

令和元年度事業計画の主な活動として以下について説明がなされました。

- ・パワーレーザーと高エネルギー密度科学技術に関する有識者会議を開催する
- ・レーザー核融合戦略会議開催と4つのワーキング活動を推進する
- ・レーザー中性子源利用専門委員会の成果報告書を発行する

また、9月22～27日に大阪市中央公会堂で開催される国際会議第11回IFSA(11th Inertial Fusion Science and Application)を支援し情報収集を行うとともに、若手優秀発表に対するYamanaka Award表彰を支援することが述べられました。加えて、第3回アジアパシフィック物理学会プラズマ会議およびパワーレーザーフォーラムシンポジウムの支援なども行うことが報告されました。国際交流・調査活動、国際シンポジウム、講演会を含めた情報・広報活動についても説

明がありました。

次に関連報告および計画として、兒玉了祐所長(大阪大学レーザー科学研究所)より「次世代大型パワーレーザー開発によるコ・クリエーション戦略」とした講演がありました。

最初に2019年上半期の主な活動について以下の紹介がなされました。国際連携としては、「レーザーによる高エネルギー密度科学」日米政府連携、ヨーロッパ(ルーマニア)ELI-NPでのパーマネントな阪大連携オフィスの設置、上海交通大学との交流などが大変有意義でした。また、大阪大学では2019年度内に高速点火加熱物理を理解し、点火(FIREX II)へ向けたスケージングを明らかにします。レーザー核融合推進のため2つの委員会が動いており、1つはオールジャパンによるレーザー核融合戦略会議、もう1つは国際的・俯瞰的な見地からFIREXの進め方、結果などについて評価、アドバイスをを行うFIREX国際アドバイザリーボードです。レーザー核融合エネルギー開発のロードマップについて、レーザー核融合戦略会議で検討



総会 会場風景

中です。

次に、レーザー核融合に対し特に重要となる、ハイパワーレーザーの状況について以下の話がなされました。世界における大型パワーレーザーの位置付けは、先進国としての象徴的



兒玉了祐教授

存在であり、最先端の高度な技術の集約と新技術の実用化加速、更には新たな技術を生み出す牽引役であり、継続性ある基盤技術開発として、国際戦略上必要不可欠な事業として進められています。従来の欧米に加え中国でも1000億円規模の予算で、大型レーザー施設の計画が進んでいます。日本でも長期的なスパンでの大型装置開発が必要と考えます。我が国の強みを活かした世界一のパワーレーザーシステムとしてJ-EPoCH計画を構想されており、2029年に高平均出力としてメガワット・100Hzを目指します。多種多様なユーザーに対応できる、IoT・AI技術を取り入れた新しいタイプの大型スマートパワーレーザーシステムになります。加えてプラズマフォトリックデバイスによる多種量子ビーム生成が可能となり、新学術創成、学術開拓の加速、イノベーション創出をもたらします。大型パワーレーザー施設は従来のビッグサイエンスからダイバーシティサイエンスへとパラダイムシフトを起こすこととなります。

第28回 レーザー核融合技術振興会 特別講演会報告

大阪大学レーザー科学研究所 教授 重森 啓介

振興会総会に引き続き、令和元年度の第1回講演会が行われました。今回の講演会の内容に関しては、レーザー核融合技術振興会の活動内容に深く関係している項目として、委員会関連活動として実施されたレーザー中性子源利用委員会、そして国際交流・調査事業に関わる2件の講演が行われました。

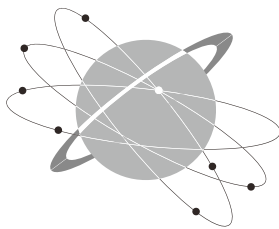
第一講 第28回
レーザー核融合技術振興会
特別講演会報告

**レーザー駆動中性子源による
ラジオグラフの開発**

 大阪大学レーザー科学研究所
講師 有川 安信氏


講演する有川安信氏

中性子はX線よりも物質中の平均自由行程が長いので、厚い建築物（高速道路や橋梁など）の欠陥探査の新しいツールとして注目されています。レーザー駆動中性子は、線源を小さくできる（高画質が得られる）、短パルスで発生可能（散乱中性子のバックグラウンドノイズが除去できる）という利点があるため、その応用が期待されています。このレーザー中性子源を実現するため、中性子源の改良とその検出器の開発がすすめられています。レーザー駆動中性子源の実現のためには、レーザー照射によって発生するX線などのノイズを除去することが不可欠であり、そのためには時間分離を行う（時間分解能を向上させる）ことが重要な開発要素となります。講演では、これまでの研究開発に関する詳細に関して、高速中性子を高時間分解能・高感度で画像化する新しいデバイスの開発の詳細、そしてシングルショットベースのラジオグラフ（中性子による影絵）を撮像する試みが紹介されました。これに加えて、高繰り返しレーザーによる基礎研究に関する内容も示され、中性子源の実用化にあたっては繰り返し性が大きな鍵を握ることが示唆されました。講演後の質疑応答においては、将来のインフラ測定を念頭においた装置の小型化などに関する議論が行われました。


第二講 第28回
レーザー核融合技術振興会
特別講演会報告

**IAEA核融合エネルギー会議に
観る核融合研究開発の動向
（工学的な観点から）**

 核融合科学研究所
准教授 岩本 晃史氏


講演する岩本晃史氏

IAEA核融合エネルギー会議は2年に1回開催される核融合に関する最大の国際会議のひとつであり、昨年10月にインドで第27回目が開催されました。本会議に出席された岩本先生より、会議中での報告内容や議論に関する報告が行われました。慣性核融合に関しては、NIF（米国、National Ignition Facility）の研究に関する進展が中心に報告され、ターゲット設計や製作に関する改良が功を奏し、燃料圧縮の性能向上を示す結果が示されていることが紹介されました。また、核融合燃料ターゲットに関しても、液体低温ターゲット開発の進展や、コイルガンを用いた燃料出射の実証実験（ロシア）、0.5Hzでのシェルの射出実験（日本、光産業創成大学院大学）などの報告がなされました。核融合エネルギー開発の研究は、全体としてITER（国際熱核融合実験炉）を中心にすすめられており、建設中の装置の要素・モジュールに関する状況を中心に、幅広い内容の進展が参加国各極より紹介されました。ITERとともに進められている中性子源試験装置IFMIFや、その装置の重要な構成要素である液体リチウムループ試験など、核融合炉材料に関する内容の発表も多く行われました。会議報告に引き続き、関連するトピックスとしてJ-EPoCH（とそれによる中性子源）を活用しエネルギー高繰り返しレーザーの実現により、レーザー核融合炉工学の分野が大きく進展することが予想され、講演後の質疑応答においてもこの計画に関する大きな期待が寄せられました。

レーザー中性子源利用 委員会報告

光産業創成大学院大学 特任教授 三間 罔興

平成22年2月、IFEフォーラムが中心となり報告書「レーザー中性子源による新産業創成調査委員会－新産業を目指すレーザー中性子源開発計画－」がまとめられた。その後、レーザー核融合、高エネルギー密度科学やパワーレーザー技術の発展が基盤となり、レーザー中性子源の発生・利用技術が進んだ。この状況を踏まえて、今回の委員会では、高出力レーザー駆動による中性子源とその学術・産業・医療への利用技術開発の動向につき、コンパクト加速器駆動中性子源研究開発の現状を参照しながら、平成28年度から平成31年3月まで調査した。

委員会では、1)中性子駆動レーザー、2)中性子発生、3)照射・計測、4)学術・産業・医療利用の4つのワーキンググループで、現状、課題と展望を調査・検討を行なった。成果は、レビュー論文としてまとめ、レーザー学会誌10月号と11月号の特集として出版されるとともに、報告書として出版された。「レーザー中性子源利用委員会報告書」(令和元年6月出版)の概要は以下のとおりである。

はじめに

2011年3月11日の福島第一原子力発電所の事故により、研究用原子炉JRR-3が稼働を停止し、京大炉も一時停止を余儀なくされ、中性子の利用環境が変化した。それにより、加速器、プラズマやレーザー中性子源が注目されるようになった。その後、実験用原子炉の再稼働や大型のSpallation neutron sourceの稼働により中性子の利用環境は改善されたが、利用分野が急速に広がっており安全かつコンパクトな中性子源とその利用技術開発が求められている。

レーザー中性子源は加速器中性子源に比べ、開発途上であるが、以下の様に中性子源として際立った特徴を有するため、その実用化が待望される。すなわち、レーザー中性子源は加速器中性子源に比べ、短パルスかつ、ソースサイズが小さく、高輝度、すなわちピークフラックスが極めて高いのが特徴である。一方、高繰り返しパワーレーザー技術の開発は目覚ましく、現状のパルスレーザーの平均出力は加速器のビーム出力に近づきつつある。しかし、現状では、レーザープラズマ生成による中性子源の時間平均強度は3桁以上コンパクト加速器中性子源に比べて小さい。このことから、当面、レーザー中性子源の特長を生かした利用方法の探索が必要である。

レーザー中性子源

高強度レーザーをターゲットに集光する事で高エネルギー電子やイオンを発生し、様々な原子核過程を通して中性子が発生する。レーザー核融合では、1億度の高温DTプラズマを爆縮により発生する。この方式では、多方向よりレーザーを照射し、大規模プラズマを発生させる必要があり、多ビーム、球対称照射できる大型レーザー装置が必要である。この方式は将来的には、J-PARCレベルの大強度中性子装置として期待される。一方、コンパクトなレーザー中性子源としては、レーザー加速イオンによる中性子発生が適している。

いろいろなイオン加速方法が考えられているが、もっとも典型的でよく調べられているのは、シース場加速: Target Normal Sheath Acceleration (以後TNSA)である。第1ターゲット(ピッチャー)のTNSA

で陽子や重陽子を加速して、軽金属の第2ターゲット(キャッチャー)に入射して中性子を発生する(図1参照)。

TNSAによるピッチャー・キャッチャー方式では、レーザー集光強度、パルス形状とエネルギー、及びキャッチャー材料と構造につき、多様な選択肢がある。その選択により、レーザー性能やターゲット供給方式の仕様が決まる。現在有望とされているのは、加速した重水素イオンをBeターゲットに入射して中性子を発生する方法である。委員会では、この方式を中心に検討を進めた。とくに、第3章で検討されるレーザー仕様は、イオン加速方法に密接に関係している。現在、中性子発生のためのTNSAイオン加速の最適化では、以下の2つの方法が考えられている。

レーザー中性子源システムの要素技術は、1.レーザードライバ、2.レーザー伝送/集光、3.レーザー粒子加速ターゲットの製作・供給、4.中性子発生とモデレータ、5.中性子光学・計測の5つである。レーザー中性子源は、加速器駆動とくらべ、短パルス(パルス幅1ns以下)、点光源(光源サイズcm以下)の特徴を有する。その結果、他の方式では得られない高輝度の中性子源になる可能性があり、瞬間的なピークフラックス(すなわちピーク輝度)は、ドライバ入力エネルギーあたり、加速器駆動の3桁以上高い(10^{17} n/m²/s/sr/J)。一方、平均発生率は3桁以上低く、 10^7 n/sr/secに留まり、レーザードライバ開発により、高ピーク出力レーザーの高平均出力化が今後の課題となる。近年、国内外で開発が活性化している高出力パルス半導体励起レーザー技術の研究開発に期待したい。

レーザー中性子源の利用

中性子ビームは光、電子、イオンと並び“第4の量子ビーム”と考えられる。その高い透過性と低エネルギーで原子核と強く相互作用するのが特徴である。軽元素との相互作用と重元素との相互作用が同程度であり、金属内軽元素物質の検出やイメージングに有効であることで、荷電粒子線やX線の利用にくらべ、ユニークな応用が可能である。

従来、原子炉中性子源の利用が中心であったが、そ

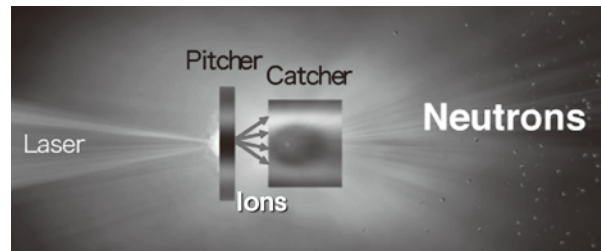


図1 TNSAイオン加速(ピッチャー)と中性子発生ターゲット(キャッチャー)の動作イメージ(余語覚文(阪大レーザー研)提供)

の後、J-PARC等大型の加速器中性子源が世界各国で稼働し、中性子科学が進歩し、学術、科学技術、医療、産業利用分野が広がった。学術分野では物性研究、生体物質科学、生命科学、電磁材料、原子核工学等へ利用が広がり、医療応用ではBNCT癌治療、産業・社会利用では、橋梁等の社会インフラの健全性チェック、鉄鋼材料開発、自動車産業、リチウムイオン電池診断、等への利用が進んでいる。

レーザー中性子源は小さいソースサイズで短パルスが特徴である。さらに、レーザー装置本体が放射線管理の対象外であることより、中性子発生のため的高エネルギー粒子ビームを加速する空間が極めて小さい。すなわち、放射線シールドのための構造物を極めて小さくできる可能性があるのも利点である。これらの特長を生かしたレーザー駆動中性子源利用の可能性を探るのが、この委員会活動の目的である。

例えば、橋梁やトンネル等の野外での社会インフラの健全性チェック、自動車等の製造現場での中性子利用も可能になると期待される。また、短パルス化が可能というレーザー中性子源の特長を生かした中性子計測手法として、原子核と中性子の共鳴反応を利用して特定の元素分布を選択的に可視化する共鳴吸収イメージング技術が注目されている。図2には、イメージングに利用可能な共鳴反応のエネルギーを核種毎に示した。広いエネルギー範囲で高い分解能を得る必要があり、レーザー中性子源の短パルス性を有効に活用できる手法として注目される。

報告書では、中性子計測技術開発とその基盤技術、レーザー中性子減速用モデレータの設計と中性子オプティクス、中性子利用技術—学術分野への中性子利用、インフラ中性子診断を目指したコンパクト中性

子源開発の動向、コンパクト中性子源の産業・医療への利用、並びに、英国におけるLaser driven neutron source development for industrial applications により、レーザー中性子源の利用とその関連分野の技術開発につき、現状と発展可能性を展望している。

おわりに

これまでのレーザー中性子源とその利用に関する研究開発では、コンパクト加速器駆動中性子源の研究開発の成果をもとに、中性子発生、計測器や中性子源利用の挑戦的な研究開発が進められている。一方、レーザー中性子発生研究は、今後、レーザー科学と中性子科学の融合、ユーザーである材料分野、エネルギー分野、国土交通分野、医療分野等との連携により、対象を絞った利用研究開発が望まれる。本格的なレーザー中性子源の利用を進めるため、10キロワット級の高平均出力高強度レーザー開発が進められることを期待する。

委員会は、加速器駆動等他の中性子源とレーザー中性子源を比較し、その特徴を明らかにし、それを生かした利用方法を検討した。すなわち、レーザー中性子源は、加速器駆動と比べ、短パルス・点光源(高速中性子のパルス幅1ns以下、光源サイズ cm^3 以下)となる事が特徴である。このことより、他の中性子源では得られない高輝度中性子源となり、ピークフラックスはドライバー入力エネルギーあたり、加速器駆動の3桁以上高い($10^{17}\text{n/cm}^2/\text{s/sr/J}$)。

今後の喫緊の課題は、高いピークフラックスと同時に理化学研究所の小型中性子源RANS程度の平均中性子発生率を実現することになる。この課題解決には、高効率コンパクト中性子源の開発を目指し、短パルス高強度レーザーの高平均出力化開発を含むレーザー中性子源システム開発が求められる。

以上の検討により、委員会は、要素技術開発の目標となる駆動用レーザーと中性子発生システムの開発課題を以下の様に定めた。

1. 中性子源駆動レーザー

パルスエネルギー100J級半導体励起レーザー(薄膜ディスクもしくは、アクティブミラー方式)、高繰り返し

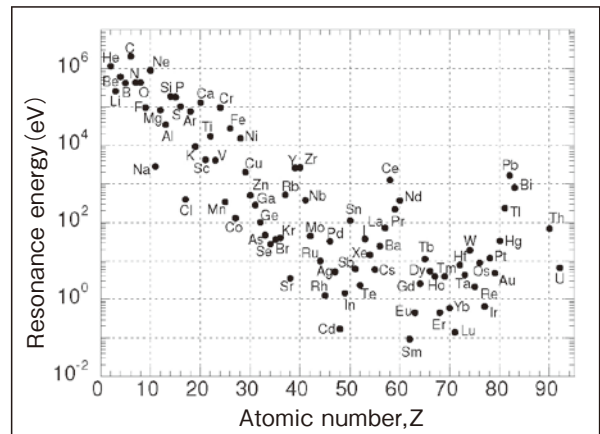


図2. 原子核共鳴散乱による物質イメージング等計測に利用可能な中性子—原子核共鳴の中性子エネルギー。甲斐哲也, “共鳴中性子イメージングの現状”, Isotope News, 727, pp.16-19, (2014), https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201411_TENBO_KAI.pdfより。

返しOPCPA増幅、100Hz繰り返し動作フェムト秒パルス圧縮(高耐力回折格子)

2. レーザー伝送・集光

F値が1程度の短焦点集光光学系、光学系保護: デブリシールド導入(EUV光源開発の成果を活用)

3. レーザー粒子加速ターゲット製作・供給

100Hzの連続供給とデブリフリーを実現: 例えば、クライオ液体水素薄膜ジェットターゲット(注: SLAC(スタンフォード大学)、ダルムシュタット工科大学等で開発)

4. 中性子発生ターゲット、モデレータとチャンバー

中性子発生とモデレータ体の数cmスケールのソース、(エピサーマル中性子で100ns以下、高速中性子で10ns以下のパルス幅)、コンパクトな放射線シールド

5. 中性子光学・計測

高速中性子の高速計測、コンパクトな中高エネルギーの中性子光学系

最後に、上記技術開発課題に取り組む研究開発プロジェクトが産官学で早い時期に早急に開始されることを期待するとともに、委員会ならびに報告書作成に協力いただいた、IFEフォーラム、レーザー学会、ならびに、参画いただいた委員の方々に深厚なる感謝を表したい。

編集後記

10月の台風15号、19号、そしてその直後に続いた豪雨で、東日本を中心に大災害となりました。被災された方々、地域の日も早い復旧をお祈り申し上げます。自然災害の度に、自然現象の威力の大きさを思い知らされます。地球温暖化もまた地球規模の現象となり、まさにその対策に人智が問われています。

IFEフォーラムでは今年度に新たな有識者会議を設立し、第1回会議を10月18日に開催しパワーレーザーと高エネルギー密度科学技術に関する議論を開始しました。その詳細は次号にて報告予定ですが、前回の有識者会議の結果をふまえ、さらに議論を深めてゆくことが期待されます。

編集委員 小路 泰弘(関西電力)、白神 宏之(大阪大学)
重森 啓介(大阪大学)、山本 和久(大阪大学)

連絡先

公益財団法人 レーザー技術総合研究所
IFEフォーラム/レーザー核融合技術振興会事務局

〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4
大阪科学技術センタービル4F
TEL (06) 6443-6311
FAX (06) 6443-6313

URL:<http://www.ilt.or.jp/forum/index.html>