

報告

大型レーザーによる
高エネルギー密度科学の新展開



平成28年（2016年）8月24日

日本学術会議

総合工学委員会

エネルギーと科学技術に関する分科会

この報告は、日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開小委員会での審議結果を踏まえ、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会

委員長	鈴置 保雄	(第三部会員)	愛知工業大学工学部教授、名古屋大学名誉教授
副委員長	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構理事・研究所長、 東京大学名誉教授
幹事	秋元 圭吾	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループグループリーダー・主席研究員
幹事	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学レーザーエネルギー学研究センターセンター長・ 教授
	小長井 誠	(第三部会員)	東京都市大学総合研究所特任教授
	朝倉 薫	(連携会員)	日本電信電話株式会社情報ネットワーク総合研究所担当部 長
	伊藤 公孝	(連携会員)	自然科学研究機構核融合科学研究所フェロー教授
	伊藤 早苗	(連携会員)	九州大学応用力学研究所教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授、一般財団法人高度情報科学技術研究機 構理事
	岩城 智香子	(連携会員)	東芝電力システム社電力・社会システム技術開発センター 機械システム開発部熱流体機器開発担当グループ長
	大久保 泰邦	(連携会員)	国立研究開発法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部 門テクニカルスタッフ
	笠木 伸英	(連携会員)	国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 上席フェロー (平成 27 年 7 月まで)
	北川 尚美	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科准教授
	近藤 駿介	(連携会員)	原子力発電環境整備機構理事長、東京大学名誉教授
	笹尾 真実子	(連携会員)	東北大学大学院名誉教授、同志社大学研究開発推進機構嘱 託研究員
	高田 保之	(連携会員)	九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授
	田島 道夫	(連携会員)	明治大学研究・知財戦略機構特任教授、宇宙航空研究開発 機構宇宙科学研究所名誉教授
	柘植 綾夫	(連携会員)	社団法人科学技術国際交流センター会長
	二ノ方 壽	(連携会員)	東京工業大学名誉教授
	日高 邦彦	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻教授

藤岡 恵子	(連携会員)	株式会社ファンクショナル・フルイド代表取締役
藤田 修	(連携会員)	北海道大学大学院工学研究院教授
三間 囃興	(連携会員)	大阪大学名誉教授、学校法人光産業創成大学院大学特任教授
本島 修	(連携会員)	未来エネルギー研究協会会長・国際機関 ITER 名誉機構長
門出 政則	(連携会員)	九州大学水素材料先端科学研究センター特任教授
矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長、東京大学名誉教授
山本 一良	(連携会員)	名古屋学芸大学教養教育機構長、名古屋大学参与・名誉教授
渡辺 政廣	(連携会員)	山梨大学社会連携・研究支援機構社会連携・知財管理センター特任教授

大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開小委員会

委員長	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授、一般財団法人高度情報科学技術研究機構理事
副委員長	三間 囃興	(連携会員)	大阪大学名誉教授、学校法人光産業創成大学院大学特任教授
	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学レーザーエネルギー学研究中心センター長・教授
	植田 憲一	(連携会員)	電気通信大学レーザー新世代研究中心センター特任教授
	近藤 駿介	(連携会員)	原子力発電環境整備機構理事長、東京大学名誉教授
	笹尾 真実子	(連携会員)	東北大学大学院名誉教授、同志社大学研究開発推進機構嘱託研究員
	兒玉 了祐		大阪大学工学研究科教授
	近藤 公伯		量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所量子ビーム応用研究部門先進ビーム技術ユニット長
	緑川 克美		国立研究開発法人理化学研究所光量子工学研究領域長

本提言の作成に当たっては、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	盛田 謙二	参事官 (審議第二担当) (平成 27 年 8 月まで)
	石井 康彦	参事官 (審議第二担当) (平成 27 年 8 月から)
	松宮 志麻	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐
	柳原 情子	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職

要 旨

1 作成の背景

1960年代に登場したレーザーは50年余の歳月を経て、多くの科学技術に結びつき大きく発展してきた。現在、レーザーは学術研究分野のみならず産業分野でも広く活用され、先端的科学技術の中心的存在になっている。1970年代よりレーザープラズマ物理や核融合の研究が世界中で進められるようになった。研究の進展に伴い、レーザー爆縮核融合や超高密度・超高温・超高压の恒星内部（ホット・デンス・マター）・惑星内部（ウォーム・デンス・マター）のような“高エネルギー密度状態の物質科学の最先端研究を推進するためには一研究室を超えた大規模レーザー施設が必要であり、世界各国に続々と建設されるようになった。

近年、大型レーザーによる研究は更なる新展開を見せており、近い将来、高エネルギー密度科学や核融合研究に大きな変革があると予想される。このような状況を踏まえ、我が国における大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の在り方を検討するため、日本学術会議総合工学委員会「エネルギーと科学・技術に関する分科会」に小委員会を設置することになった。

2 現状及び問題点

我が国は、早い時期から大型レーザーとそれを利用する高エネルギー密度科学研究の重要性に着目し、その研究拠点を大学や国立研究機関に設置することにより、世界に先駆けた研究を推進してきた歴史をもつ。レーザー爆縮核融合、プラズマフォトンクス、高エネルギー密度科学に関して、新しい研究潮流を生み出す大きな役割は世界から高く評価されている。独自開発した非線形光学結晶やセラミックレーザー材料、さらに大型高耐力回折格子など次世代の大型レーザーに必須な光学素子技術においても、先進的中核技術を生み出してきた。

過去30年のレーザー技術の進歩は大きく、特に、高出力化に加え、高繰り返し化（高平均出力化）、小型化、高信頼化が不可欠となり、レーザー技術のパラダイムシフトが起こっている。高エネルギー加速器技術と同様に、極限性能を追求する大型レーザー開発で生み出された技術が一般の産業技術に広く展開される時代に変化しつつある。実際、欧州では、科学研究用の超高出力ペタワットレーザーの建設自身が産業創成と人材育成に直結している。また、我が国では、高強度レーザーを用いたプラズマフォトンクス、レーザー粒子加速、実験室宇宙物理から超高压力下新物質生成など、新しい科学コンセプトの提案と実証などを通じて、ポストペタワットやアト秒科学などの最先端研究が多くの若い研究者を惹きつけ、東西の研究拠点を中心に人材育成が進んでいる。

我が国では、いままで生み出してきた数多くのレーザー基幹技術に加え、近年は半導体レーザー励起セラミックレーザーを基盤とした技術革新が進行している。また、米国では、国立点火装置NIFを通じて、信頼性の高い大型レーザー運転システムの技術革新が達成されてきた。このようなハード・ソフト両面での大型レーザーの技術革新は産業用レー

ザー技術を一変させる新時代の到来を予期させる。

我が国のレーザー研究は、これまで、大学附置研究所が大きな牽引力となり、加えて独立法人の研究機関や各大学等の研究拠点で個別に推進されてきた。しかし、それぞれの拠点で開発研究を独自に進める現状の研究開発体制のままでは、最近のハード・ソフト両面における大型レーザーの革新的技術を活用し発展させることは難しく、また、産官学連携の新時代を切り開くための環境整備も不足している。

3 展望と結語

21世紀は“光の時代”といわれる中、大型レーザー利用による高エネルギー密度科学を基盤とするレーザー核融合・中性子源やレーザー加速器等は実現に一步近づき、宇宙論・素粒子物理・物質科学への高出力レーザー利用が国際的に新たな展開を見せつつある。パラダイムシフトの時代こそ次世代の人材を生み出す好機である。超高強度・高繰り返し・高平均出力の先端レーザー開発と高エネルギー密度科学の発展は、さまざまな産業技術イノベーションおよび学術イノベーションを生み出し、若手研究者を引きつけ優秀な人材を輩出し、研究機関、民間企業の研究開発力を充実させ、将来のエネルギー技術や革新的産業技術の創成に貢献することが期待される。

このような問題意識と展望を受けて、以下の指摘が小委員会においてなされた。1)大阪大学、東京大学、電気通信大学、光産業創成大学院大学、理化学研究所、量子科学技術研究開発機構等の研究者集団による光科学や高エネルギー密度科学の戦略的連携研究を推進することが急務である。2)次世代高平均出力レーザー技術に取り組むと同時に、先端大型レーザーと高エネルギー密度科学の国家的研究開発拠点を立ち上げ、高エネルギー密度科学の研究開発を推進することによって、今後10数年を目処に量子ビームやレーザープロセスの科学技術基盤を確立し、産学連携を発展させることが大切である。3)今後の大型レーザー研究拠点形成にあたっては、現在進行中の国際共同研究を発展させ、海外の大型プロジェクトとの差別化と連携を軸とした“国際協創”の推進も必要である。4)これにより、長期的には、大型レーザーをベースとする核融合エネルギーや医療用粒子線、ガンマ線源等の新産業が展開され、先端的科学技術分野における若手研究者の育成と共に、産官学間の人材交流が好循環するキャリアパスの形成が期待される。

目 次

1	はじめに	1
(1)	小委員会設置経緯	1
(2)	報告書作成の背景と趣旨	1
2	現状のレビューと評価	3
(1)	高出力レーザー科学技術	3
(2)	エネルギー分野	4
①	レーザー核融合	4
②	原子力分野への応用	5
③	レーザー加速の産業・医療応用	6
(3)	基礎科学分野	7
①	極限量子ビームの発生と応用	7
②	固体・プラズマ・真空における高エネルギー密度科学の新展開	8
③	宇宙・惑星・地球物理分野での応用	8
(4)	産業基盤分野：高出力レーザーとプラズマ技術の融合	9
3	今後の展望	11
(1)	高出力レーザー科学技術	11
(2)	エネルギー分野	12
①	レーザー核融合	12
②	原子力分野への応用	13
③	レーザー加速の産業・医療応用	13
(3)	基礎科学分野	14
①	極限量子ビームの発生と応用	14
②	固体・プラズマ・真空における高エネルギー密度科学の新展開	15
③	宇宙・惑星・地球物理分野での応用	15
(4)	産業基盤分野：学術と産業のデュアルイノベーション融合への挑戦	16
4	若手人材育成と産学連携	16
(1)	現状：産学間の人材交流の活性化が課題	17
(2)	展望：EUにおける人材養成と高出力レーザー市場独占に学ぶ	17
5	結語	19
	<参考文献>	20
	<参考資料1>シンポジウム開催	25
	<参考資料2>我が国の研究拠点	26
	<参考資料3>審議経過	28
	<参考資料4>世界の大出力レーザー(◇ kJ出力)	29
	<参考資料5>日米におけるレーザー核融合開発	30
	<参考資料6>レーザー学会における講演件数の動向	31

1 はじめに

(1) 小委員会設置経緯

2011年2月14日、日本学術会議総合工学委員会主催公開シンポジウム「超大型レーザーによる高エネルギー密度科学の展開」が開催され、2014年6月2日には、国際シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の新展開」が総合工学委員会「エネルギーと科学技術に関する分科会」と物理学委員会「物性物理学・一般物理学分科会」が共催して、約200名の参加者と欧米から6名の講師とパネリストの参加を得て開催された（参考資料1）。国内外のパネリストによる討論では、研究開発の在り方、産学連携、国際協力と競争力維持にむけた我が国の取り組み方を緊急に検討することが求められた。

欧米において、大型レーザーとその利用による高エネルギー密度の科学技術と産業技術の研究開発が活発化している。これまで我が国は、大阪大学の大型レーザー研究拠点や東西の大学を中心とする2つの光科学研究拠点を設置する等（参考資料2）、この分野を国際的にリードしてきたが、今後は米中欧口に後れを取ることが懸念される。

以上の認識から、2014年8月に第22期日本学術会議 総合工学委員会「エネルギーと科学技術に関する分科会」に「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」小委員会を設置し、第23期でも同小委員会が継続され、大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の在り方について検討を行った（参考資料3）。

(2) 報告書作成の背景と趣旨

1960年代に登場したレーザーは、その後50年余の歳月を経て、多くの科学技術に結びつき大きく発展してきた。現在、レーザーは研究手段のみならず産業技術として広く活用され、科学技術の中心的な存在になっている。レーザーの特徴の一つは短時間に大量のエネルギーを局所に投入し、恒星内部（ホット・デンス・マター）や惑星内部（ウォーム・デンス・マター）のような高温高密度状態を実現できることである。この高温高密度状態の研究として1970年代よりレーザープラズマ物理や核融合の研究が世界中で進められるようになった。

米国の超大型レーザー国立点火実験施設NIF（National Ignition Facility）[1]による核融合研究[2]やその他多くの大型レーザー施設によるレーザー粒子加速研究[3]の進展、我が国の世界最高エネルギーの短パルスレーザーLFEX（Laser for Fusion Experiment：大阪大学）や繰り返し超短パルス超高強度レーザーJ-KAREN（日本原子力研究開発機構）等の施設による研究の進展、欧州のLMJ（Laser Mega Joule）やELI（Extreme Light Infrastructure）の建設による高エネルギー密度科学の推進など、一研究室を超えた大型レーザー研究施設が世界各国につくられた。近い将来、これらの分野に大きな変革があると予想される。

以上のように、海外では多くの国家プロジェクトが継続的に進められ、産業界の活

動が維持・拡大され、その波及効果として高度なレーザー機器の研究開発と生産体制が整備され、大学の研究機関等で育った若手研究者の受け皿になりつつある。一方、我が国においては、LFEX や J-KAREN 等のプロジェクトが大型レーザーレーザーの技術や人材を維持する上で有効であったが、継続的でなく、研究体制の整備が不十分であったため、産業界を巻き込んだ技術革新を誘導し、人材を産官学で循環するには至らなかった。また、平成 23 年 8 月に閣議決定された第 4 期科学技術基本計画で光・量子科学技術としてレーザーの重要性が指摘されているが、欧米の様な大規模プロジェクトが実施されなかった。したがって、次期科学技術基本計画においては、我が国でも大型レーザーとその関連分野の学術・科学技術が産業技術を牽引し、研究機関で育った優秀な博士研究員が民間企業の戦力として活躍し、様々なイノベーションを開花する“正のスパイラル”が形成されることが望まれる。

上記の状況を踏まえ、これら大型レーザー関連研究の現状を総括し将来の展望を議論した。そして、大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究開発の現状を概観し、関連する科学技術の研究開発の展望と将来性、産学連携と人材育成、及び国際協力の在り方を報告書として取りまとめた。

2 現状のレビューと評価

大型レーザー開発と関連研究に関して我が国がおかれている状況を把握するため、高出力レーザー科学技術とそれを利用したエネルギー分野および基礎科学分野（高エネルギー密度科学と呼ぶ）につき、現状のレビューと評価を行った。なお本報告書では、一研究室では維持が困難な大規模レーザーを総称して「大型レーザー」装置と呼び、特に、レーザーエネルギー（=出力（パワー）×パルス時間）が大きいもの（パルス時間ナノ秒で0.1テラ(10^{12})ワット以上）を「高出力レーザー」、パルス時間が極めて短くピーク出力が大きい（電場強度が非常に大きい）ものを「超高強度レーザー」、また、数 Hz 以上の繰り返しで動作するレーザーを「繰り返しレーザー」と呼ぶ。

(1) 高出力レーザー科学技術：日本発のレーザー基盤技術が世界を主導

現在、世界の高出力レーザー開発は激烈な競争の中にある。人類史上初のメガジュール(MJ)出力レーザーである米国NIF (National Ignition Facility)に続いて、フランスではLMJ (Laser Mega Joule)が完成に近づいており、ロシアのUFL-2Mはすでに建屋が建設中で、中国もメガ(10^6)ジュールレーザー建設に向けSGIII レーザー実験に成功している。核融合研究をも可能とする10キロジュール級の激光XII号やNOVAレーザーが日本と米国で建設されて以来、世界中で一貫して追求されてきた大型レーザー技術開発は今や成熟し、世界各国にメガジュール級レーザーを誕生させつつある。これらの施設には、我が国が先鞭をつけたLFEXレーザーと同じ高速点火核融合や高エネルギー密度科学の科学実験のためのピコ秒・ペタ(10^{15})ワットレーザーが建設されており、大型レーザーによる高エネルギー密度科学は大きな飛躍の時を迎えている。

過去30年のレーザー技術の進歩は大きく、1本のビームで激光XII号に相当する出力(10キロジュール級)を発生するなどの高出力化に加え、レーザーそのもののコンパクト化・高信頼化・メンテナンス技術が確立されるまでになった。また、従来は数時間に1回のレーザーショットであったが、技術革新により1Hz~10Hzの繰り返し動作が可能になっている。現在、レーザー核融合や高エネルギー密度科学研究のため、メガジュールレーザー開発の成果を利用して、繰り返し実験可能な高出力レーザー研究施設が続々と建設されている。(参考資料4)。一方、チャープ・パルス増幅(CPA: Chirped Pulse Amplification)[4]を利用したチタンサファイアレーザー技術と革新的レーザー材料を組み合わせることによって、レーザー媒質の破壊を起こすことなくピーク出力を極限まで高めることができるようになった。エネルギー的にははるかに小さいものの、フェムト秒パルス出力の新たな超高強度レーザーを生み出した(参考資料4)。

超短パルス・超高強度レーザーによる新たな科学の開拓はとどまるところを知らず、高強度場に対する真空の非線形屈折率、真空からの物質生成などの極限物理研究に進んでいる。中でも欧州はELI (Extreme Light Infrastructure), IZEST (International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology)などを中核として、超高強度レーザーによる新しい先端科学を先導している。光強度が高まるとともに、レーザーとプラ

ズマの相互作用によって全く新しい粒子加速、パルス圧縮、波長変換も可能となる。このような研究は、コヒーレント技術の飛躍的進展、損傷フリーのパルス圧縮技術や光変換技術の高度化を生み出すと期待される。まさに現代レーザー技術は質的変換を迎え、パラダイムシフトの時代に差し掛かっている。

我が国のレーザー科学技術は、ガラスと結晶の利点を併せ持ったセラミックレーザー材料の発明と開発、レーザー航跡場加速による単色粒子加速原理の提案と実証、プラズマ・フォトニクス of 提案と実証、複数ビームのコヒーレント重畳機能を持った OPCPA (Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification の頭文字で超短パルスレーザーを増幅する技術) など、数々のアイデアと技術開発によって世界のレーザー科学技術に寄与している [5][6]。また、我が国は紫外線 (355 ナノメートル) に波長変換する非線形光学結晶分野 [7] や、超平滑光学面の研磨、高耐力光学薄膜生成技術でも世界トップの技術を有しており、革新的技術を創出し世界をリードしてきた実績を持っている。これらは、今までにないレーザーを開発する大型プロジェクトの中で初めて開発されたものである。損傷強度を数倍向上させることができれば、大型レーザーは劇的にコンパクト化および高効率化される。従って、新しい時代の大型レーザーは、単なるパワーマシンではなく、高出力かつ高品質ビームを発生するものでなければならない。3次元の波である光の技術開発にあって、空間位相すなわち波面の制御は古くて新しい問題であり、永遠の課題とされてきた。しかし、近年の波動光学と光技術の進歩によって、計算機を用いずに光学の式演算により光学収差を解析する手法などが提案され、実験的に実証できるようになった。このように、大型レーザー開発のための基礎技術、基幹技術の多くは過去の大型レーザー開発プロジェクトの過程で生み出されたもので、我が国がすでに保有している。しかしながら、過去 20 年間にわたり国家プロジェクトがなく、大型レーザー研究の停滞で、我が国の高出力レーザー科学技術の国際的優位性は急速に失われつつあり、エレクトロニクス産業で起こった空洞化が、高出力レーザーの分野でも進行している。

(2) エネルギー分野

① レーザー核融合

将来の燃料資源の枯渇と地球温暖化の危機が懸念される中、核融合は燃料資源が無尽蔵で温暖化ガスも高レベルの放射性廃棄物も排出しないことから、人類と地球を救う究極のエネルギー源として期待される。核融合方式は、国際熱核融合実験炉 ITER に代表される磁場核融合と大型レーザーを用いたレーザー核融合の 2 つの方式に分かれる。レーザー核融合では、米国の国立点火施設 NIF において、人類初の制御された核融合点火を目指す実験が行われている (参考資料 5 の図 1)。

レーザー核融合は、小規模の炉が可能であることおよび負荷変動に対する出力調整が容易であることから、磁場核融合と異なる電力市場に対応できる相補的な核融合エネルギー供給の可能性を拓くものである。また磁場核融合と質的に異なる原理

に基づいているため、一方の困難が他方の隘路とならず、研究開発戦略の重要なオプションの役割を担っていることが特徴である。そこで、我が国の核融合研究は、ITER を中心とする磁場方式に加えて、多様な選択肢を確保する意味からもレーザー方式を組み込み、相補的で強靱な開発戦略を持つ必要がある。

我が国は、レーザー核融合研究の黎明期に高強度レーザーの異常吸収の発見で本格的なレーザー核融合研究の世界的端緒を開き、激光 XII 号による実験を中心に、様々なレーザー技術や照射技術の向上を図りながら、核融合点火に必要な 1 億度の温度[8]および固体密度の 600 倍の圧縮による高密度コア[9]を達成した。これらのレーザー核融合の基本原理の実証に基づき、今や世界のレーザー核融合研究は点火・燃焼を目指す段階に到達した。米国では、1.8 メガ(10^6) ジュールのエネルギーを出力する世界最大のレーザーNIF[10]により点火実験が進められている。当初は核融合出力がなかなか向上しなかったが、レーザーの照射方法を変えることにより出力が急増し、2014 年 3 月には“アルファ加熱”（重水素と三重水素の核融合で発生する高速のアルファ粒子によるプラズマの加熱）も加わり、加熱前の燃料の持つエネルギーの 2 倍を超える核融合出力が達成された[11]。今後数年の間に「点火・燃焼」の実現が見込まれる。さらに前節で述べたように、フランス・ロシア・中国でも核融合へ向けた大型レーザーの稼働・建設・計画が続々と進められている。

一方、1980 年代後半に発見された極短パルスの超高強度レーザー技術の進展を背景に、我が国では高利得を目指した“高速点火”方式の研究が実験・理論の両面から開始され、その概念が実証されたことから、次のマイルストーンは核融合点火・燃焼の実現を目指した「高速点火実証計画 FIREX (Fast Ignition Realization Experiment)」となった。FIREX 計画の第 1 期では加熱用のレーザーを建設し、これにより燃料を 5 千万度の核融合点火温度へ加熱することが目的である。第 2 期では圧縮用レーザーと加熱用レーザーを増力し、レーザー核融合炉で必要となる高いエネルギー利得の実現の見通しを得ることが目的である（参考資料 5 図 2）。

この提案に対し、科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会は[12]、FIR 第 1 期計画を我が国の核融合研究の重点化の柱の一つとすることを答申し、引き続き原子力委員会核融合専門部会は[13]、FIREX 第 1 期計画の成果により、点火・燃焼の実現を目指す第 2 期計画に発展させるか否かの判断を行うこととした。現在は、加熱用レーザー完成と超強磁場[14]による加熱効率向上により第 1 期計画目的達成の見通しが立った段階である。

② 原子力分野への応用：放射性物質の分離・核変換や構造物の透視

原子力エネルギー技術に関連する研究も進められている。高出力レーザー励起による強力なテラヘルツ光源により、放射性廃棄物に含まれる半減期の長いセシウムの分離が可能になる。セシウム同位体分離では、CsI 分子の回転準位の同位体シフトに着目して選択的に励起・電離し、分離することが可能であることが示されている[15]。

また、電子とレーザー光の衝突による逆コンプトン散乱過程によって発生させた高輝度の準単色ガンマ線により、核物質含有の有無を検認することもできる[16]。この技術は、核物質の同定による廃棄物の減容化に利用されるだけでなく、空港や港湾における核セキュリティチェックへの利用も期待される。さらに、高輝度のガンマ線フラッシュを発生する技術[17]が開発できれば、例えば、原子炉のような大型構造物の透視技術に応用されることが期待できる。

また、後述するレーザー加速の技術進展により、高エネルギー荷電粒子による高レベル廃棄物処理の開発研究が大きく進展する可能性がある。この核変換処理では、レーザー加速器を用いて高エネルギーまで加速した粒子やその2次粒子を利用して核変換を起こさせる。例えば、レーザー駆動未臨界炉で中性子を発生し、廃棄物に照射して核分裂させ半減期の短い物質に変換する処理方法が提案されている。

③ レーザー加速の産業・医療応用 : 4 ギガ (10⁹) 電子ボルトの電子加速を 0.1m で実現

レーザー加速に関連する研究としては航跡場電子加速とイオン加速が挙げられる。電子加速については、1979年に田島・Dawsonがレーザー航跡場による電子加速の原理を提案したことがきっかけとなった[18]。2000年代に入って、その研究は急速に展開し、現在、ペタワットのレーザー装置を使って、準単色[19]の4ギガ電子ボルト電子群(バンチ)の加速が実現できる[20]までになった。ギガ電子ボルト級の電子加速には、従来技術ならば100メートル級の加速距離が必要になるが、レーザー加速では0.1メートルに満たない長さで可能になっている。例えば、同じ原理で多段加速が可能になれば、従来技術では不可能だった高エネルギー領域にまで荷電粒子を加速することも不可能ではなくなり、素粒子科学や高エネルギー物理学等への貢献は極めて大きい。

一方、超高強度レーザーにより陽子や重イオンを加速する技術も注目されている。イオンを加速する場合には、最も質量が小さい陽子でも電子の2000倍近くの質量を有するため、電子加速と同じ航跡場加速法をそのまま適用することはできず、現在も加速法そのものが研究対象となっている。標準的とされている加速法では高い集光強度による照射が重要なこともあり、超高強度レーザー技術の進歩と深く関係しながら研究が進められてきた。比較的小型でありながら、ピーク出力がマルチテラワットや数10、数100テラワットのレーザーが利用可能になっている。我が国は、世界に先駆けて卓上型ペタワットレーザーの開発に成功し[21]、レーザー駆動高エネルギー重イオンを用いる粒子線がん治療用加速器のコンパクト化を目指す国家プロジェクトを世界に先駆けて進めた。

海外でも、イオン加速の医療応用が進んでおり、ドイツのヘルムホルツ研究所とミュンヘン工科大学の2カ所でレーザー加速方式を含んだプロジェクトが進められている。また、EUの大型プロジェクトの中の一つELIでも、医療応用サブプロジェクト

ELI-Medicine が進められている[22]。

(3) 基礎科学分野

① 極限量子ビームの発生と応用 : アト秒レーザーと超高速分光の誕生

物質の超高速の動きを実時間で捉える研究は自然科学の最も重要な分野の一つである。その挑戦はレーザーの発明によって飛躍的に進展し、現在電子の動きを捉えつつある所まで来ている。我々が利用している電子デバイスや化学反応、そして生体機能の多くは、電子がその機能の中心的な役割を果たしている。この電子の動きを捉え制御することは、超高速光化学分野が誕生して以来約 50 年間の目標である。

2001 年にはじめて 1 フェムト(10^{-15})秒を切る極超短パルスの発生が実現して以来[23]、レーザーパルス幅は、この 10 年で約一桁短縮し 67 アト(10^{-18})秒が得られるまでになった[24]。アト秒パルスの発生が、これまでの超短パルスレーザー技術と大きく異なる点は、その波長域が極端紫外から軟 X 線にわたることである。1985 年のチャープ・パルス増幅の出現[25]による超高強度超短パルスレーザーの開発が進み、非線形光学は強い非線形領域にまで拡張され、それにより高次高調波を発生させ、アト秒パルスを得ることが可能になった。さらに、これまでの非線形光学が光の電場として、そのパルス波形の包絡線電場を扱ってきたのに対し、強い非線形光学においては瞬時電場、すなわちパルスを構成する搬送波の電場に対する物質系の応答を取り扱うまでになった。このため、搬送波の位相制御技術も急速に進展することとなった[26]。例えば、アト秒パルスの出現により、これまで内殻電子の電離時間、固体表面における電子離脱時間、異なる準位間での光電離時間遅延等の測定において目覚ましい成果が得られ[27]、この測定手法はさらに発展しつつある。この分野における重要課題は、アト秒パルスを高強度化して、アト秒のポンプ・プローブ測定を実現することである。超高速分光は、本質的に非線形光学現象を利用しているため、アト秒計測においてもパルス幅のみならずその強度が重要である[28]。

一方、中性子や超短パルスガンマ線、超低速ミュオンなどの“極限量子”ビーム発生の研究も行われている。中性子は金属に対する高い透過能に加えて水素やリチウムといった軽元素に対する高い感度など、X 線や電子線等とは異なる特徴を有しているため、近年、学術研究のみならず鉄鋼、自動車、航空宇宙等、様々な産業分野に利用が拡大している。しかし、中性子発生装置は J-PARC や原子炉のような大型施設に限られており利用時間等も制限されるため、必要な時に近くで使えるコンパクトな装置の開発が望まれている。また、橋梁等の大型構造物の非破壊診断も注目されており、移動可能な小型中性子源の開発が期待されている。

従来の加速器に代えてレーザー加速を用いる利点は、粒子ビーム径が小さく短パルスであるために、マイクロビーム化、短パルス化、および遮蔽等の小型化ができることである。レーザー生成ガンマ線は、X 線に比べて透過力が大きいことに加えて、特に高い指向性と完全な偏光を有するという特徴がある。我が国では産業利用を目的と

したレーザー生成ガンマ線生成の基礎研究が進められるとともに、SPring-8やニュースバルといった大型放射光施設を利用したガンマ線生成の基礎研究も進められている。産業利用においては、金属構造体の内部観測および大型機械の非破壊検査に加えて、核物質や放射性同位体の検出等の原子力関連施設での利用も期待されている。一方、基礎科学分野では、光核反応による元素合成過程の解明や原子核構造の研究等において重要な役割を果たすものと期待されている。

超低速ミュオンは固体試料の局所的な磁場分布をナノメートルの精度で計測できるため、高温超伝導体の研究や固体表面近傍の水素原子の電子状態を調べる強力なツールとして期待されている[29]。この超低速ミュオンビームは加速器から得られる低速ミュオニウム（束縛電子+ミュオン）を真空紫外レーザーで共鳴的にイオン化することにより生成されている。

② 固体・プラズマ・真空における高エネルギー密度科学の新展開：国際競争力ある日本

高出力レーザー技術の進歩により、これまでにない高いエネルギー密度の極限状態の生成が実験室で可能となってきた。その結果、比較的小さなエネルギーで地上に星の内部を実現したり、何も無いと思われている真空に分極を起こしたりすることも夢でなくなろうとしている。エネルギーの密度を上げることで、人類にとって未踏と思われた極限の世界を地上で実現することができる。例えば、レーザーアブレーションで発生する圧力領域は地上における隕石衝突で発生する衝撃波と同レベルであり、これによる物質合成に関する研究も進んでいる。生命のもとになるタンパク質合成が隕石に起因するという説もあり、このような研究にも利用され始めている[30]。

高出力レーザーで開拓できる高エネルギー密度状態は物質科学分野に限定されない。光と真空の相互作用は、宇宙の開闢に関係する真空の量子ゆらぎを観測できる可能性がある[31]。またレーザーで実現する加速度は、一般相対性理論の等価原理の検証やブラックホール近辺で予測されている事象の地平線を実験室で実現できる可能性がある。これらを実現するには単に従来の高出力レーザーだけに頼るのではなく、プラズマ・フォトリックデバイス[32]やX線自由電子レーザーなど、我が国の強みを生かすことで国際競争力のある展開[33]が可能となる。

③ 宇宙・惑星・地球物理分野での応用：小惑星衝突時の模擬実験で新成果

日本、欧州、米国、中国の大型レーザーで、天体や地球・惑星の高エネルギー密度状態のシミュレーション実験が進みつつあり、国内外の大型レーザー研究施設間のネットワークにより、この分野の飛躍的な発展が期待されている。

例えば、宇宙では、超新星の爆発などによって非常に強い衝撃波が発生し、超高エネルギー宇宙線が発生すると理論的に予測されている。大型のレーザーシステムにより超高速でプラズマを衝突させて強い衝撃波を発生させることが可能である。超強衝

撃波に伴う磁場の発生や粒子加速等の現象を地上で再現し、理論予測を実験的に検証出来る。これまで、我が国や米国・ロチェスター大学での実験に続き、2014年7月に、NIFを用いた初めての無衝突衝撃波実験が行われ、様々な計測により、無衝突衝撃波の生成を示唆するデータが得られた。NIF利用者委員会で2010年に採択された基礎科学の実験が2015年度に終了予定であり、引き続き2016-2017年度の実験公募により、無衝突衝撃波の国際共同実験が引き続き進められる。天文物理学にとって磁場生成・増幅メカニズムが長年の課題であり、レーザー生成プラズマ衝撃波による磁場の生成・増幅の実証への期待も高い[34]。

また、大型レーザーによりテラパスカルを超える超高压を多様な材料に加えることが可能であり、地球や木星等の内部状態や惑星形成過程での小惑星の衝突現象を解明する研究が今後ますます重要になる。最近、我が国の大型レーザー実験により、小惑星の衝突による恐竜絶滅の原因がユカタン半島に小惑星が衝突することにより発生した高温高密度状態の化学反応による硫酸合成であることが証明され、従来の科学的知識を塗り替えた[35], [36]。天体・地球惑星物理の発展に大型レーザーによる実証実験、実験室宇宙物理は重要な要素となりつつある。

(4) 産業基盤分野：高出力レーザーとプラズマ技術の融合

レーザープロセスや、テラヘルツからX線に至る超広帯域高輝度パルス電磁波源、コンパクトコヒーレントX線源などの医療・製造産業への応用分野において、世界中で高エネルギー密度状態のイノベーションをめざした精力的な研究開発がおこなわれている。国際競争力を持ってこれらをさらに発展させるには、高出力レーザー技術だけでなく、それにより生成される極限状態である高エネルギー密度プラズマを理解し、制御・利用することを一体で行う戦略が必要である。我が国が優位性を持っているレーザー技術やプラズマ技術の利用だけでなく、それらの融合による圧倒的な競争力で新たなイノベーションを起こすことが今後重要になる。それに関連する事例を以下に示す[37]。

その一例はレーザー超高压発生制御技術による新物質材料創製である。高出力レーザーパルス光を固体表面の小さな領域に集光するとその表面は高温高密度のプラズマが生成されアブレーションを起こし固体内部に衝撃波が伝搬する。およそ10万気圧程度の衝撃波は、材料の疲労強度を向上させたり表面硬化させたりするなど省エネルギー材料技術に利用されている。しかし、その物理過程の詳細は必ずしも理解されておらず、新たな知見と基礎的研究展開により「モノづくり工程革命」につながる。さらに高出力レーザー技術の進展により超高压の発生やその制御技術が高度化し、炭素で1000万気圧を超える固体状態も実現できている。これは通常のダイヤモンドより遥かに硬い物質といわれている。我が国ではこれをスーパーダイヤモンドと命名し新たな省エネルギー加工材料につながる新物質創製開発としていち早く取り組んでいる。

さらにレーザーで生成される高密度プラズマを機能性デバイスとして利用することで、固体デバイスより3桁以上高いエネルギーフラックスの光や荷電粒子ビームを直

接制御できるプラズマ・フォトリックデバイス[38]という新たな概念が我が国で提唱され開発されている。例えば、我が国では電子加速用のプラズマ・フォトリックデバイスの開発により世界でも最も安定なレーザー加速電子ビームを実現している[39]。その結果、世界に先駆けて現実的な超小型レーザー電子加速器ならびにそれによるXFELなどへの応用が国家プロジェクト (ImPACT) [40]として進められている。また超高強度レーザーとプラズマミラーを非線形な応答領域で利用することで、キロ電子ボルトエネルギー領域の高次高調波発生が既実証されている[41]。これはパルス幅に換算するとzeptosecondに相当するものであり、様々な可能性と展開がなされつつあるattosecondをさらに進めた未踏の時間領域開拓に発展できる手段の1つである。

3 今後の展望

高出力レーザー科学技術、それを利用したエネルギー分野・基礎科学分野につき、それぞれの今後の動向を展望する。

(1) 高出力レーザー科学技術：国家的研究開発拠点の立ち上げが必要

高出力レーザー科学技術の分野では、新世代のレーザー技術において、国際的にパラダイムシフトが起ころつつある。すなわち、第2章で述べたように我が国は高出力レーザーの基幹技術や光学素子等に関して、独自に研究開発を行う能力を持った世界でも数少ない国の一つである。例えば、高出力レーザー用のレーザーガラス、レーザーセラミックス、非線形光学結晶、励起用高出力レーザーダイオード(LD)、超高純度石英ガラス、高精度大型光学素子の研磨技術、高耐力光学薄膜、2次元イメージセンサー、空間的位相変調器など、次世代レーザーの基幹技術のほとんどで世界最高水準の技術を有している。これらの専門技術を磨いてきたのは中小企業であり、世界の最先端の研究者と対等に技術内容の吟味と検討を行ってきた。国防技術と関係して民間企業を育成してきた米国ですら、次世代プロジェクトでは日本の民間企業との協力ネットワークを切望するほどである。しかるに、これらの技術のほとんどは過去の研究開発で生まれ磨かれてきたものであり、過去20年にわたる大型レーザー研究の停滞で、我が国の高出力レーザー科学技術の国際的優位性は急速に失われつつある。かつてエレクトロニクス産業で起こった空洞化が、高出力レーザーの分野でも技術および人材の両面で進行しつつある。

大型レーザー技術がパラダイムシフトを迎えている一つの理由は、単なる高ピークパワーではなく、高ピークパワーと高平均パワーを有するレーザー技術により、高繰り返しで安定なデータ蓄積が必要な分野が増えたことである。従来、純粋科学研究と産業技術開発は別個に扱われ、大型加速器が必要な高エネルギー物理分野では、技術開発はもっぱら高エネルギー物理(素粒子原子核物理)分野で行われ、その成果が小型の加速器開発や産業・医療応用分野に広がった。大型レーザー開発も、まさに加速器開発と同様に、大型レーザー技術が一般技術分野に広がる時代になると予想される。欧米では、大型レーザーの建設自体が産業開発と直結するスケールに拡大している。現在建設中のすべての高出力レーザーがLD化されるとすれば、LDの市場規模は、産業用レーザーの主力となっている高出力ファイバーレーザーの市場規模の250倍の巨大なマーケットになる。21世紀光の時代において、産業の米である高出力LDのマーケットはすでに存在しており、ここで生み出される大量生産と低コスト化の技術が世界マーケットを支配するものと予想される。

単一パルスから高平均パワーで繰り返しパルスが可能なレーザーへの転換を可能にするものは冷却技術であり、レーザー材料自体の熱伝導に依存している。レーザーガラスをセラミック製の媒質に置き換えるだけで、冷却効率は1桁向上する。レーザー用セラミックの「基礎研究」は日本で実現したが[42]、高平均パワーで繰り返し可能なパルスレーザーの「応用研究」は欧米の研究機関を中心に進められている。高い品質のセラ

ミックは、中国でも製造できるようになってきており、米国等も宇宙開発用巨大真空炉を利用して製造に成功すると予想される。我が国の優位性を保ち続けられるかどうかは、我が国における今後の国家的研究開発拠点の立案に依存しているとの指摘が小委員会 でなされた。

欧米が NIF や LMJ に続く計画として進めている LIFE 等の高出力レーザー技術開発に含まれる様々な技術は、NIF や LMJ などの開発・建設・運転の遂行中に、現実的な課題に 応えるために開発された技術が数多くある[43]。すなわち、我が国における今後の技術 開発を進めるに当たって、「革新的技術は最先端研究課題に挑戦することから生まれる」 ということを肝に銘じる必要がある。同時に、海外における超高強度レーザーや大 出力レーザーを用いた科学研究では、大型加速器建設と同様に国際共同研究が基本とな っている。したがって、我が国にとって、米国および欧州という巨大な研究共同体と競 争していくためには海外との差別化とともに、国際連携に適切な研究体制を構築してい く戦略が非常に重要である。

(2) エネルギー分野

① レーザー核融合：我が国の“高速点火”方式への期待

我が国の研究開発戦略の中で、レーザー核融合計画をどのように位置づけるべきか について述べる。我が国の FIREX による「高速点火」の実証と、米国の国立点火施設 NIF による「中心点火」の実証はともに炉心プラズマの生成手法を確立することを 目的としている。これら両計画が終了した段階で、炉心生成方式の優劣を判断すると ともに、繰り返しレーザー技術と燃料の繰り返し投入技術の開発を進め、しかるべき時 期に核融合炉への適切な評価を行う必要がある。またレーザー核融合炉における爆縮 燃料プラズマで発生する中性子は、点源であると同時に加速器駆動より高いフラック スの中性子源となる可能性があることから、核融合材料開発に不可欠な強力中性子源 としての役割も期待される。

さらに、レーザー核融合研究はこれまで述べた高エネルギー密度科学や極限物質科 学を中心とした次世代の学術研究を創造すると共に、科学立国の中核となる先端科学 技術を振興する新しいスタイルのエネルギー開発と位置付けられ、国際競争力のある 幅広い学術・技術・産業分野の進展に大いに貢献できる。特に高速点火に基づく核融 合研究では、対象とする電磁場の強度は飛躍的に増大し、電磁場と物質との相互作用 はこれまでの科学的知見を越えた新しい領域に突入する。このプラズマのもつエネル ギー密度は、宇宙・天体や物質内部における極限状態に匹敵し、実験室宇宙物理学や レーザー核物理に代表される高エネルギー密度科学と呼ぶべき新しい学術領域を創出 している。さらに、高速点火用の極短パルスレーザー研究開発は、現象の時間・空間 スケールがこれまでと大きく異なることから、X線、原子核との相互作用によるガン マ線発生等の新光源開発や、それらを用いた幅広い学術分野・産業分野への応用研究 の可能性を切り開くことが期待される。

なお、米国等はレーザー核融合を国家安全保障のプロジェクトとして推進してきたことから、我が国の原子力平和利用三原則への抵触を危惧する声がある。しかし、米国はNIFにおける民生研究（エネルギー開発と基礎科学）と安全保障関連研究を明確に切り分ける情報公開基準を設け、「核融合点火・燃焼」に関する研究は全面的に公開されることになった[44]。この公開基準に照らした場合、我が国のレーザー核融合エネルギー開発が米国の核不拡散政策に抵触することはない。したがって、我が国はレーザー核融合がエネルギー開発・基礎科学・産業応用にとって有益であるかどうかを独自に判断し、レーザー核融合計画の将来展望を描くことができる。また、海外の大型プロジェクトとの国際連携研究も可能である。

以上のことより、大型レーザー技術とレーザー核融合エネルギー開発は次期「科学技術基本計画」や次期「エネルギー基本計画」において重点基幹技術と位置づけられるべきものであるとの指摘が小委員会においてなされた。

② 原子力分野への応用：同位体分離、核廃棄物処理、核セキュリティへの貢献

原子力エネルギー技術に関連する分野では、高出力レーザー励起による強力なテラヘルツ光源により、放射性廃棄物に含まれる半減期の長いセシウムの分離が可能になる。また、レーザー加速の技術進展により、加速器による高レベル廃棄物の核変換処理研究が大きく進展する可能性がある。さらに、高輝度のガンマ線フラッシュを発生する技術[45]が開発されれば、例えば、原子炉のような大型構造物の透視技術に応用されることが期待できる。

また、電子とレーザーの衝突による逆コンプトン散乱過程の利用により、核物質含有の有無の検認や、空港や港湾における核セキュリティチェックへの利用も期待される。

③ レーザー加速の産業・医療応用：実用化に産官学の連携協力が必要

レーザー加速においては、加速エネルギーを高めるだけでなく、ビームの質の向上が求められている。すなわち、医療応用、産業応用、物質科学、原子力分野への応用等では、低から中エネルギービーム、高強度ビーム、超短パルスビーム等、多岐にわたるビーム性能が向上することにより、レーザー加速の長所を活かした応用分野が展開している。

特にレーザー加速イオンの応用については、我が国においては一旦プロジェクトが終了したものの、粒子線がん治療機器のコンパクト化、低価格化の可能性があり、国際的には複数のプロジェクトが新たに開始されたり、継続措置が取られたりしている。一方、従来の癌治療用陽子ビーム加速器の小型化の技術開発は近年進捗が著しい。したがって、陽子の加速にはレーザーを導入する必要性は低いが、重イオンである炭素イオンの加速にはレーザー加速イオンが利用される可能性がある[46]。それは、従来型重イオン加速器の小型化には超伝導磁石の利用が不可欠であり、運転

維持費がかかりすぎるからである。

レーザー加速器の実用化にはプラズマ制御の研究も重要であるが、比較的大きなエネルギーのレーザー装置全体の信頼性・安定性・高繰り返し性などのシステム制御技術のレベルを飛躍的に向上させる必要がある。特に、イオン加速をがん治療に応用するためには、現在のレーザーシステムの飛躍的な高度化や安定化など抜本的技術革新が必須であり、そのためには産官学の連携協力が必要である。これらの技術革新はレーザー核融合のドライバー技術やレーザーの原子力応用に直結しており、関連研究機関や研究者集団による戦略的取り組みが必要である。

また、従来の加速器を利用した核物理・核廃棄物処理にレーザー加速イオン技術を導入する動きも始まっている。レーザー加速による高エネルギーの多価重イオン発生が実験で示されたので、重イオン加速器の入射器や核データ取得への応用が期待される。

(3) 基礎科学分野

① 極限量子ビームの発生と応用 : アト秒レーザーと中性子・X線・ガンマ線源

アト秒パルスの発生には、従来の光科学ではほとんど問題とされなかった励起レーザー光の CEP (Carrier Envelope Phase) の制御や光電場の 1 サイクル内での電子運動の制御などの極限的光波制御技術が開発され、これによりフェムト秒レーザー自体の進化を促してきた。その結果、最近では、この位相制御技術と超広帯域光の発生および増幅技術が大きく進展し、紫外から近赤外 (300~900 ナノメートル) にわたる超広帯域の光波合成が可能になり、1 サイクル以下の高強度パルスが合成され、これを用いたアト秒パルスの発生が報告されている [47]。このような先端的技術は、今後大型レーザーにも導入され、高強度光電場と物質の相互作用の研究に新たな展開をもたらすものと期待される。

一方、超高強度レーザーによって加速されたイオンビームをターゲットに入射し、核反応によって中性子を発生させるレーザー中性子源が注目されている。最近、LANL (ロスアラモス研究所) と GSI (ドイツの重イオン加速器研究所) の共同研究で、パルス幅 600 フェムト秒、エネルギー 80 ジュールのレーザーをプラスチック薄膜に照射して 170 メガ電子ボルトまで加速された重水素イオンを Be ターゲットに打ち込むことにより、高い指向性を有するメガ電子ボルト中性子の発生が報告され注目されている [48]。すでにタングステンブロックの中性子イメージング等の実験も行われており、今後レーザーやターゲットの最適化がなされれば、レーザー駆動小型中性子源として中性子科学への貢献が十分に期待できる。

また、レーザー電子加速の技術が大きく進展し、ギガ電子ボルト級で高品質の電子ビームが得られるようになり、高出力レーザーとレーザー加速電子線によるコンプトン散乱ガンマ線源が注目されている。レーザー加速を用いる利点は装置の簡単化および小型化に加えて、電子ビームとレーザーの同期が容易になるため、より短パルスで

輝度の高いガンマ線が発生できる点にある。特に、最近報告されたレーザー加速とプラズマミラーを組み合わせた方式では、わずか1ジュールのレーザーで数百キロ電子ボルトまでのX線を高効率・高輝度で発生することに成功している[49]。現状のレーザー加速部は単純Heガスジェットを用いており、さらに改良の余地があり、レーザーをさらに大型化することにより高繰り返しでフェムト秒の超短パルスメガ電子ボルトガンマ線の発生も期待される。

② 固体・プラズマ・真空における高エネルギー密度科学の新展開：学術イノベーション

宇宙開闢の謎に関係する真空の物理の探究は、現代物理学における大きな挑戦である。真空中で高エネルギーの粒子を衝突させ、真空を構成する素粒子であり質量のもとになるヒッグス粒子の探索はその1つである。また宇宙背景放射を探ることも宇宙開闢の謎に迫る1つのアプローチである。これらとは異なり、真空と光の相互作用による真空の理解は“真空量子光学”という「学術イノベーション」を引き起こし、宇宙の開闢の謎に迫る第3の手法となりうる可能性がある[50]。

③ 宇宙・惑星・地球物理分野での応用：大型レーザーによる模擬実験の重要性

宇宙での爆発現象、宇宙線の加速、惑星内部の物質状態、惑星・地球の形成と変遷等宇宙・惑星・地球における多様な現象を大型レーザーによる実験で模擬し、計算機シミュレーションや理論モデルを検証することが進んでいる。さらに、レーザーによる模擬実験は予測しなかった物理現象を発見することも考えられ、宇宙・惑星物理のさらなる発展に貢献しつつある。具体的には以下の様な研究領域において大型レーザーによる研究が重要な役割を演じると予想される。

- 1) 宇宙における無衝突衝撃波の生成と高エネルギー宇宙線の加速機構： NIF や GXII 等の大型レーザーにより高温高密度プラズマを衝突させ無衝突衝撃波の発生や衝撃波面での粒子加速の実験により宇宙線の加速機構を検証する試みが進んでいる。
- 2) 星の進化と超新星爆発のダイナミクス： 超新星爆発に伴う高エネルギー密度プラズマの輻射流体力学実験による数値計算モデルの検証が行なわれている。
- 3) 超高エネルギー密度下の宇宙核物理： 爆縮による高温高密度プラズマ中の原子核過程を調べることで、超新星爆発などに伴う元素生成の物理研究が試みられている[51]。
- 4) 宇宙における磁場生成機構： 電磁流体の乱流ダイナモ、プラズマの衝突に伴う電磁流体不安定性などによる磁場の生成と増幅をレーザープラズマ中で再現し、その機構を明らかにする試みが進んでいる[52]。
- 5) 宇宙・恒星ジェットの生成と伝搬の機構： 超高強度レーザーを用いて相対論

的な電子と陽電子ビームを発生させてガンマ線バースト等の現象についての研究が進められている。

6) 惑星形成における天体衝突と大絶滅の物理化学： レーザーアブレーションで加速した数 10 キロメートル毎秒の高速飛翔体の衝突を調べることで、高温高密度状態の物理化学に関する新しい知見が得られている[53]。

7) 系外惑星の大気・海の形成と生命の発生の素過程： レーザー生成超高速飛翔体実験で研究することが考えられている。

8) 地球・惑星内部のウォーム・デンス・マターの研究： レーザーアブレーションで発生する超高压で固体を圧縮することにより、地球惑星内物質の状態方程式に関する研究が成果を上げつつある[54]。

(4) 産業基盤分野： 学術と産業のデュアルイノベーション融合への挑戦

高出力レーザー技術の波及効果である高压による新物質材料の創生やレーザー量子ビームの開発は「産業イノベーション」の源泉となるグランドチャレンジである。このような「グランドチャレンジプロジェクト」が進められることにより、超高強度・高繰り返し・高平均出力の先端的なレーザー開発、光学新材料開発、新たなプラズマデバイス開発など、様々なイノベーションが起こることが期待される。一方、人的・財政的資源に限界がある現状においては、先端的なレーザーなど競争力ある既存装置を最大限に活用するという現実的なアプローチをとることが国際競争力の観点から重要である。例えば、レーザーによる超高压物質研究のために高出力レーザーと XFEL (SACLA) の融合による高出力レーザー施設 (HERMES プロジェクト) [55] や、プラズマ・フォトリックデバイスを有効活用した低出力レーザー加速器の実現を目指した国家プロジェクト (ImPACT) [56] などが進められている。このようなアプローチにおいても、システムの小型化やプラズマ技術による XFEL の超小型化という「ユビキタスパワーレーザーイノベーション」と呼ぶべき技術革新が並行して進められている。

上述の学術イノベーションと産業イノベーションを融合させる上で重要なもう 1 つの視点が、高出力レーザー開発の「イノベーション駆動力」である。従来、学術を目的とした高出力レーザー開発は出力エネルギー・強度・極短パルス性などのレーザー性能の極限を追求することで物理フロンティアを目指してきた。一方、産業イノベーションにつながる高出力レーザー開発は、多様性 (高繰り返し)、多機能性 (多波長、パルス波形整形、複合ビーム)、汎用性 (ユビキタス性、ロバスト性) が重要視されてきた。今後の高出力レーザー開発は、こうした学術と産業の“デュアルイノベーション”を駆動するものとして推進することが重要である。先端的な高出力レーザー技術開発およびそれによる新たな「学術と産業イノベーションの融合」をもたらす取り組みは、幅広い技術基盤・高度な人材基盤・官民が協調する財政基盤の三位一体によりはじめて実現するものである。

4 若手人材育成と産学連携

(1) 現状：産学間の人材交流の活性化が課題

我が国は、文部科学省国立大学共同利用・共同研究拠点「レーザーエネルギー学先端研究拠点」、ならびに文部科学省最先端の光の創成を目指した「ネットワーク研究拠点プログラム」として、大阪大学、東京大学、電気通信大学、光産業創成大学院大学、理化学研究所、量子科学技術研究開発機構等による光科学や高エネルギー密度科学の連携研究が推進され、その中で若手研究者育成、並びにキャリアパスの構築がなされてきた。

ここで、大型レーザー関連研究開発における若手人材育成と産学連携の現状と課題を、レーザー学会の「レーザー装置」(注：大小さまざまなレーザー装置を含む)と「高強度・高エネルギーレーザー応用」の講演件数の推移から見てみる。超高強度・高出力レーザー応用に関する講演件数は、2005年以前は全講演数の約10%で推移し、2005年頃より25件より35件前後に増加し、全講演数の15%前後になっている(参考資料6(A)(B)(C))。超高強度・高出力レーザー応用の講演件数の増加は、共同利用・共同研究拠点や光研究拠点が2006年前後より活動を開始したためと思われる。しかし、2005年以降、国公立研究所、大学の発表件数が20~25件でほぼ横ばいであるのに対し、産業界からの発表が1~2件に留まっており、産業界への波及が乏しいことを示している。(参考資料6(D))。

一方、この10年間、レーザー装置に関する講演件数は50件前後でほぼ一定である。しかし、2005年以降、国公立研究所と大学の発表が増えているのに対し、企業からの発表が激しく減少している(参考資料6(E))。これは、「レーザー装置」の大学院学生数が増加しているにもかかわらず、レーザー関連産業における技術者人口が増えていないことを示しており、この分野の人材育成が産業界にまで及んでいないことを窺わせる。

また、高出力レーザーによる材料加工や物質改変は高エネルギー密度科学の産業利用の例であり、ドイツや米国では高出力レーザー技術も活用する情報学と物づくりの融合を第4次産業革命と位置づけている。長期的には、量子ビームやエネルギー分野での高出力レーザー利用が中核的産業技術に発展すると期待される。将来、産業界への貢献が期待される大型レーザーによる高エネルギー密度科学の分野で、我が国が欧米と対等な研究水準を維持するには産学官の人材交流の活性化が喫緊の課題である。

(2) 展望：EUにおける人材養成と高出力レーザー市場独占に学ぶ

欧米では、さらに未来型の超高強度・高平均出力レーザーの開発が進められている。その発想の原点や計画の出発点においては日本の研究者の寄与が大きく、現在も中核部分を担い続けている。しかし、フランスは基幹技術開発という観点からフランスのテレコム企業を動員して最先端技術の導入を図っている。2000年ごろから始まったこのような構想の下に、科学研究用のテーブルトップ型超高強度レーザー開発のために、フランスのレーザーメーカーを育て上げている。この結果、学術研究用であるにもかかわらずThales及びAmplitudeという2つのフランス企業で世界のペタワット超高強度レーザー市場を独占するまでに至った。今や、米国や中国もフランスメーカーに発注し納品を

待つ状況になっている。10 数年前には、「こんなに大量の博士を生産して大丈夫か」と心配されたが、全くの杞憂となった。実際、フランス国内と欧州の大型レーザープロジェクト推進の状況下で、大量の博士課程学生は見事に育ち、国内外の研究機関や民間企業の中核戦力として活躍している。世界中でレーザーを利用している研究者が大勢いるが、レーザーを自ら開発し創り出す経験をした研究者や技術者は意外と少ないのが現実である。真の人材育成とは知識や技術の単なる伝承ではなく、自ら考え実践することのできる人材の育成である。このような観点からは、我が国においても大型レーザー開発を含め、プランニングから多種多様な技術要素開発に対応することを通して、自ら考える人材を育成することが肝要である。人材育成にあっては大学が挑戦的課題の探求を孤立して行うのではなく、民間企業との共同および競争を通じて若手人材を育成し、活躍させるという視点が重要である。

5 結語

21世紀は“光の時代”といわれる中、大型レーザー利用による高エネルギー密度科学を基盤とするレーザー核融合・中性子源やレーザー加速器等は実現に一歩近づき、宇宙論・素粒子物理・物質科学への高出力レーザー利用が国際的に新たな展開を見せつつある。パラダイムシフトの時代こそ次世代の人材を生み出す好機である。超高強度・高繰り返し・高平均出力の先端レーザー開発と高エネルギー密度科学の発展は、さまざまな産業技術イノベーションおよび学術イノベーションを生み出し、若手研究者を引きつけ優秀な人材を輩出し、研究機関、民間企業の研究開発力を充実させ、将来のエネルギー技術や革新的産業技術の創成に貢献することが期待される。

このような問題意識と展望を受けて、以下の指摘が小委員会においてなされた。1)大阪大学、東京大学、電気通信大学、光産業創成大学院大学、理化学研究所、量子科学技術研究開発機構等の研究者集団による光科学や高エネルギー密度科学の戦略的連携研究を推進することが急務である。2)次世代高平均出力レーザー技術に取り組むと同時に、先端大型レーザーと高エネルギー密度科学の国家的研究開発拠点を立ち上げ、高エネルギー密度科学の研究開発を推進することによって、今後10数年を目処に量子ビームやレーザープロセスの科学技術基盤を確立し、産学連携を発展させることが大切である。3)今後の大型レーザー研究拠点形成にあたっては、現在進行中の国際共同研究を発展させ、海外の大型プロジェクトとの差別化と連携を軸とした“国際協創”の推進も必要である。4)これにより、長期的には、大型レーザーをベースとする核融合エネルギーや医療用粒子線、ガンマ線源等の新産業が展開され、先端的科学技術分野における若手研究者の育成と共に、産官学間の人材交流が好循環するキャリアパスの形成が期待される。

<参考文献>

1 はじめに

- [1] O.A. Harricane et al.; Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion, *Nature* 506, 343 (2014)
- [2] W.P. Leemans et al.; GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator, *Nature Physics* 418, 696 (2006)
- [3] X. Wang et al.; Quasi-monoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV, *Nature Communications* 4, 1988 (2013)

2 現状のレビューと評価

(1) 高出力レーザー科学技術

- [4] A. D. Strickland, and G. Mourou; Compression of amplified chirped optical pulses, *Opt. Commun.*, 56, 212 (1985)
- [5] K. Ueda, A. Liu; Future of high power fiber lasers, *Laser Physics*, vol. 8, 774-781 (1998).
- [6] J. Lu, M. Prabhu, J. Song, Ch. Li, J. Xu, K. Ueda, A. Kaminskii, H. Yagi, T. Yanagitani; Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics, *Appl. Phys. B*, vol. 71, 469-474 (2000).
- [7] Yusuke Mori, et al.; New nonlinear optical crystal: Cesium lithium borate, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 1818 (1995)

(2) エネルギー分野

① レーザー核融合

- [8] C. Ymanaka and S. Nakai; Thermonuclear neutron yield of 10^{12} achieved with Gekko XII green laser, *Nature* 319, 757 (1986).
- [9] H. Azechi et al.; High-density compression experiments at ILE, Osaka, *Laser Part. Beam* 9, 193 (1991).
- [10] M. J. Edwards et al.; Progress towards ignition on the National Ignition Facility. *Phys. Plasmas* 20, 070501 (2013).
- [11] O.A. Harricane et al.; Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion, *Nature* 506, 343 (2014)
- [12] 「今後の我が国の核融合研究の在り方について」(科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会, 平成 15 年 1 月 8 日)
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu0/shiryo/030201e.htm
- [13] 「今後の核融合研究開発の推進方策について」(原子力委員会核融合専門部会, 平成 17 年 10 月 26 日)
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kettei/houkoku051026/>

[index.htm](#)

- [14] S. Fujioka et al.; Kilot Tesla Magnetic Field due to a Capacitor-Coil Target Driven by High Power Laser, Scientific Reports 3, 1170 (2013).

② 原子力分野への応用

- [15] 横山啓一, 松岡雷士; 光周波数コムが拓く長寿命核分裂生成物の精密同位体分離技術: 量子ウォークの数理から放射性廃棄物低減技術へ, ATOMO Σ 56, 525, 2014.
- [16] R. Hajima, et al.; Application of Laser Compton Scattered gamma-ray beams to nondestructive detection and assay of nuclear material, The European Physical Journal Special Topics, 233, 1229 (2014).
- [17] T. Nakamura, et al.; High-Power γ -Ray Flash Generation in Ultraintense Laser-Plasma Interaction, Phys. Rev. Lett., 108, 195001 (2012).

③ レーザー加速の産業・医療応用

- [18] T. Tajima, J. Dawson; Laser Electron Accelerator, Phys. Rev. Lett., 43, 267, 1979.
- [19] C. Geddes, et al.; High-quality electron beams from a laser wakefield acceleration using plasma-channel guiding, Nature, 431, 538, 2004.
- [20] C. Geddes; Laser plasma acceleration of low emittance, high energy bunches, and applications, Program of International Conference on High Energy Density Sciences 2014, HEDS7-2, 2014, Pacifico Yokohama, Japan.
- [21] M. Aoyama, et al.; 0.85 PW, 33-fs Ti:sapphire laser, Opt. Lett., 28, 1594, (2003)
- [22] Nature Editorial; Extreme light, Nature Materials 15, 1 (2016)
doi:10.1038/nmat4533

(3) 基礎科学分野

① 極限量子ビームの発生と応用

- [23] M. Hentschel et al.; Attosecond metrology, Nature 414, 509 (2001).
- [24] K. Zhao et al.; Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch, Opt. Lett. 37, 3891 (2012).
- [25] D. Strickland and G. Mourou; Compression of amplified chirped optical pulses, Opt. Commun. 56, 219 (1985).
- [26] D. J. Jones et al.; Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis, Science 288, 635 (2000).
- [27] F. Krausz and M. Ivanov; Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81, 163 (2009)

- [28] E. J. Takahashi et al.; Attosecond nonlinear optics using gigawatt-scale isolated attosecond pulses, *Nat. Commun.* 4, 2691 (2013).
- [29] P. Bakule et al.; Pulsed source of ultra low energy positive muons for near-surface μ SR studies, *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. B* 266, 335 (2008).

② 固体・プラズマ・真空における高エネルギー密度科学の新展開

- [30] 兒玉了祐「解説：光を使った高エネルギー密度科学の展開」*物理学会誌* 67, 156 (2012); 兒玉了祐「高エネルギー密度プラズマ科学の新展開」*パリテイ* 26, 19 (2011).
- [31] R. Kodama et al.; Plasma devices to guide and collimate a high density of MeV electrons, *Nature* 432, 1005 (2004).
- [32] N. Nakanii, et al.; Transient magnetized plasma as an optical element for high power laser pulses, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18, 021303 (2015)
- [33] 革新的研究開発プログラム (ImPACT) 「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」: <http://www.jst.go.jp/impact/program03.html>

③ 宇宙・惑星・地球物理分野での応用

- [34] J. Meinecke, et al.; Turbulent amplification of magnetic fields in laboratory laser-produced shock waves, *Nature Physics*, 10, 520 (2015)
- [35] T. Ohno, T. Kadono, et al; Production of sulphate-rich vapour during the Chicxulub impact and implications for ocean acidification, *Nature Geoscience*, 9, 279 (2014)
- [36] 尾崎正則, 2015年3月22日 日本物理学会年会 22pAP1 招待講演

(4) 産業基盤：高出力レーザーとプラズマ技術の融合

- [37] Y. Furukawa et al.; Biomolecule formation by oceanic impacts on early Earth, *Nature Geoscience* 2, 62 (2009).
- [38] Y. Mondenn and R. Kodama; Enhancement of Laser Interaction with Vacuum for a Large Angular Aperture, *Phys. Rev. Lett.* 107, 073602(2011);
- [39] Y. Mondenn and R. Kodama; Interaction of two counterpropagating laser beams with vacuum, *Phys. Rev. A* 86, 033810 (2012).
- [40] 兒玉了祐「特集：X線自由電子レーザー - 切り拓かれる極限状態の科学」*パリテイ* 29, 19 (2014).
- [41] M. Nakatsutsumi et al.; Fast focusing of short-pulse lasers by innovative plasma optics toward extreme intensity, *Opt. Lett.* 35, 2314 (2010).

3 今後の展望

(1) 高出力レーザー科学技術

- [42] J. Lu, M. Prabhu, J. Song, Ch. Li, J. Xu, K. Ueda, A. Kaminskii, H. Yagi, T. Yanagitani; Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics, Appl. Phys. B, vol.71, 469-474 (2000)
- [43] A. C. Erlandson, S. M. Aceves, A. J. Bayramian, A. L. Bullington, R. J. Beach, C. D. Boley, J. A. Caird, R. J. Deri, A. M. Dunne, D. L. Flowers, M. A. Henesian, K. R. Manes, E. I. Moses, S. I. Rana, K., I. Schaffer; Comparison of Nd:phosphate glass, Yb:YAG and Yb:S-FAP laser beamlines for laser inertial fusion energy (LIFE) , Optical Materials Express, 1, 1341, 2011.

(2) エネルギー分野

① レーザー核融合

- [44] “The National Ignition Facility and the Issue of Nonproliferation, Final Study” the U. S. Department of Energy, Office of Arms Control and Nonproliferation (NN-40), December 19, 1995. 邦訳はIFEフォーラム／レーザー核融合技術振興会から入手可能。

② 原子力分野への応用

- [45] R. Hajima et al. ; Detection of radioactive isotopes by using laser Compton scattered γ -ray beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 608, S57-S61 (2009).

③ レーザー加速の産業・医療応用

- [46] M. Dunne; Laser Driven particle Accelerators, Science 21 April 2006 Vol.312, M. Borghesi; Laser-driven ion acceleration: Stats of the arts and emerging mechanism, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 740 (2014) 6-9.

(3) 基礎科学分野

① 極限量子ビームの発生と応用

- [47] A. Wirth et al. ; Synthesized Light Transients, Science, 334, 195 (2011).
- [48] M. Roth et al. ; Bright Laser-Driven Neutron Source Based on the Relativistic Transparency of Solids, Phys. Rev. Lett. 110, 044802 (2013).
- [49] K. Ta Phuoc et al. ; All-optical Compton gamma-ray source, Nat. Photo. 6, 308 (2012).

② 固体・プラズマ・真空における高エネルギー密度科学の新展開

- [50] 兒玉了祐「特集：X線自由電子レーザー - 切り拓かれる極限状態の科学」パリティ 29, 19 (2014).

③ 宇宙・惑星・地球物理分野での応用

- [51] H. Utsunomiya, *et al.*, Phys. Rev. C 67, 015807 (2003).
- [52] J. Meinecke, et al.; Turbulent amplification of magnetic fields in laboratory laser-produced shock waves, Nature Physics, 10, 520 (2015)
- [53] T. Ohno, T. Kadono, et al; Production of sulphate-rich vapour during the Chicxulub impact and implications for ocean acidification, Nature Geoscience, 9, 279 (2014)
- [54] 尾崎正則, 2015年3月22日 日本物理学会年会 22pAP1 招待講演

(4) 産業基盤分野：高出力レーザーとプラズマ技術の融合

- [55] 兒玉了祐 「特集：X線自由電子レーザー - 切り拓かれる極限状態の科学」 パリティ 29, 19 (2014).
- [56] 革新的研究開発プログラム (ImPACT) 「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」：<http://www.jst.go.jp/impact/program03.html>

＜参考資料 1＞シンポジウム開催

- ・公開シンポジウム「超大型レーザーによる高エネルギー密度科学の展開」
日時：平成 23 年 2 月 14 日（月） 9:30～17:15
場所：日本学術会議講堂
主催：総合工学委員会
- ・公開シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の新展開」
日時：平成 26 年 6 月 2 日（月） 10:00～17:30
場所：日本学術会議講堂
主催：総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会

<参考資料2> 我が国の研究拠点

文部科学省国立大学共同利用・共同研究拠点

レーザーエネルギー学先端研究拠点

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

標記拠点の共同研究・共同利用に参加している機関

(国内)

大阪大学、愛媛大学、茨城工業高等専門学校、茨城大学、茨城大学大学院、宇都宮大学、岡山県立大学、岡山大学、関西大学、岐阜大学、宮崎大学、京都工芸繊維大学、京都大学、近畿大学、九州工業大学、九州大学、熊本大学、慶應義塾大学、光産業創成大学院大学、広島大学、高エネルギー加速器研究機構、高知工科大学、国立久留米工業高等専門学校、国立極地研究所、佐賀大学、産業医科大学、自然科学研究機構核融合科学研究所、秋田県立大学、神戸大学、青山学院大学、静岡大学、摂南大学、千葉工業大学、千葉大学、大阪工業大学、大阪産業大学、大阪市立大学、大阪大学、中部大学、長岡技術科学大学、筑波大学、鳥取大学、電気通信大学、東海大学、東京工科大学、東京工業大学、東京大学、東北大学、産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、理化学研究所、科学技術振興機構、奈良女子大学、日本女子大学、富山高等専門学校、富山大学、福井工業大学、福井大学、福岡工業大学、兵庫県立大学、北海道大学、北見工業大学、名古屋工業大学、名古屋大学、明石工業高等専門学校、立命館大学、レーザー技術総合研究所、レーザー技術推進センター

有限会社岡本光学加工所、浜松ホトニクス株式会社、株式会社 IHI、株式会社豊田中央研究所、ギガフォトン株式会社、ソニーEMCS 株式会社、株式会社トクヤマ、ネオアーク株式会社、日本電気株式会社、株式会社エバメール化粧品、株式会社パスカル、五鈴精工硝子株式会社、日本真空光学株式会社、東海光学株式会社、三菱重工業株式会社、株式会社福田結晶技術研究所、株式会社大真空、住友化学株式会社、住友電気工業株式会社、ジオマテック株式会社、大日本スクリーン製造株式会社、株式会社東京インスツルメンツ、東京電波株式会社、倉敷紡績株式会社、技術研究組合極端紫外線露光システム技術開発機構、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、株式会社清原光学、ナルックス株式会社、非破壊検査株式会社、新明和工業株式会社、東ソー株式会社

(国外)

蘭州大学、北京師範大学、中国科学院、中国国家天文台、北京応用物理計算数学研究所（中国）、国立中央大学（台湾）、原子力・代替エネルギー庁、ボルドー大学、パリ天文台、パリ第6大学、エコール・ポリテクニク(フランス)、

ジェネラル・アトミクス社、ローレンスバークレイ国立研究所、
ローレンスリバモア国立研究所、マサチューセッツ工科大学、
カリフォルニア大学、ネバダ大学、サウスフロリダ大学、ロチェスター大学、
カーネギー地球物理学研究所（アメリカ）、
AWE 社、オックスフォード大学、ヨーク大学（イギリス）
ドイツ研究センターヘルムホルツ協会、ダルムシュタット工科大学、
ドレスデン工科大学（ドイツ）、オプトエレクトロニクス研究所（ポーランド）、
マドリード工科大学、カステイリャ・ラ・マンチャ大学（スペイン）、
ワイツマン科学研究所（イスラエル）

文部科学省最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム

先端光量子科学アライアンス

東京大学 理学系研究科、工学系研究科、物性研究所
電気通信大学 レーザー新世代研究センター
理化学研究所
慶応大学 理工学部
東京工業大学 応用セラミックス研究所、理工学研究科

融合光新創成ネットワーク

大阪大学 光科学センター
量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所
京都大学 工学研究科
自然科学研究機構 分子科学研究所

<参考資料3>審議経過

<第22期>

平成26年

- 6月2日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第22期第7回）
高エネルギー密度科学の展開に関する小委員会について
- 8月17日 大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開小委員会（第22期第1回）
役員を選出、今後の進め方について検討等
- 9月9日 大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開小委員会（第22期第2回）
報告書案について検討等

<第23期>

平成26年

- 12月24日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第23期第1回）
役員を選出、今後の進め方について、小委員会の設置について等

平成27年

- 4月2日 大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開小委員会（第23期第1回）
役員を選出、報告案について検討等
- 5月29日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第23期第2回）
報告案についての上承等

平成28年

- 1月6日 総合工学委員会（第23期第3回）
報告案の承認等
- 7月29日 日本学術会議幹事会（第232回）
報告「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」について承認

<参考資料 4> 世界の大出力レーザー (>kJ 出力)

国	研究機関	装置名	パルスエネルギー	波長	アルス幅	レーザー材料
USA	LLNL	NIF	1.7MJ (192beams)	355nm	3ns	Nd:glass
		ARC	10kJ		5ps	Nd:glass
	U. Rochester	OMEGA	40kJ (60 beams)		ns	Nd:glass
		OMEGA EP	kJ		ps	Nd:glass
Texas	Texas PW	250J			OPCPA+Mixed glass (NOVA)	
		Plan	120kJ	1057nm	120fs	NIF amp
UK	AWE	ORION	5kJ ()	351nm	1ns	glass
			1kJ (2x500J)	1053nm	1ps	glass
France	CEA	LMJ	1.5MJ	355nm		Nd:glass
		PETAL	3.5kJ	1053nm	500fs	glass
Germany	GSI	IZEST	Helmholtz beamline			
Russia	IAP	XCELS	12x400J	910nm	25fs	OPCPA
		VNIIEV	UFL-2M	2MJ	533nm	3ns
China	SIOM	SG-II upgrade	24kJ (8x3kJ)	355nm	3ns	Nd:glass
		9th beamline	1kJ	1052nm	1ps	Nd:glass
	CAEP/Myanyang	XG-III	500J/3ns	355nm	fs+ps+ns	Nd:glass
		SG-III	15kJ (48 beam)	355nm	3ns	Nd:glass
		SG-IV	250kJ (288 beama)	355nm	3ns	Nd:glass
		SG test line	8.4kJ	355nm	3ns	Nd:glass
	CAEP/Shanghai	SG test line	18kJ	1053nm	3ns	Nd:glass
		SG-IV Ignition Facility	1.5MJ	355nm	3ns	Nd:glass
CAEP/Shanghai		>10kJ	1052nm	3ns	Nd:glass	
Korea	KAERI		1kJ	1053nm	Nd:glass	
Japan	ILE/Osaka	G-XII	24kJ	1053nm	4ns	Nd:glass
		LFEX	10kJ	1053nm	1ps	Nd:glass

<参考資料5> 日米におけるレーザー核融合開発

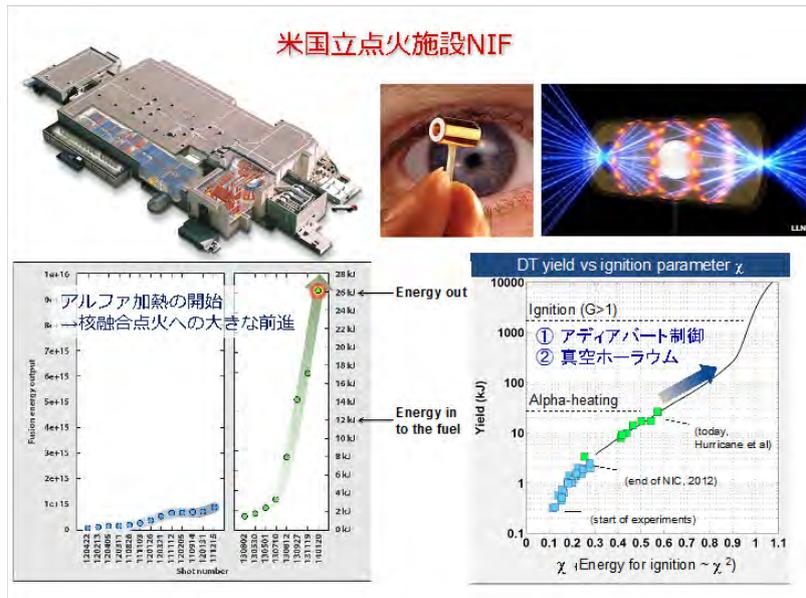


図1 米国立点火施設の点火実験の進展

(左上) 米国立点火施設 (NIF) 鳥瞰図、(右上) レーザー照射配位、(左下) レーザー照射改善による核融合エネルギーの増加、(右下) 点火条件 (横軸) と核融合エネルギー (縦軸) (出典) エネルギーと科学技術に関する分科会主催公開シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の新展開」報告書 (M. Dunne 発表資料) より転載

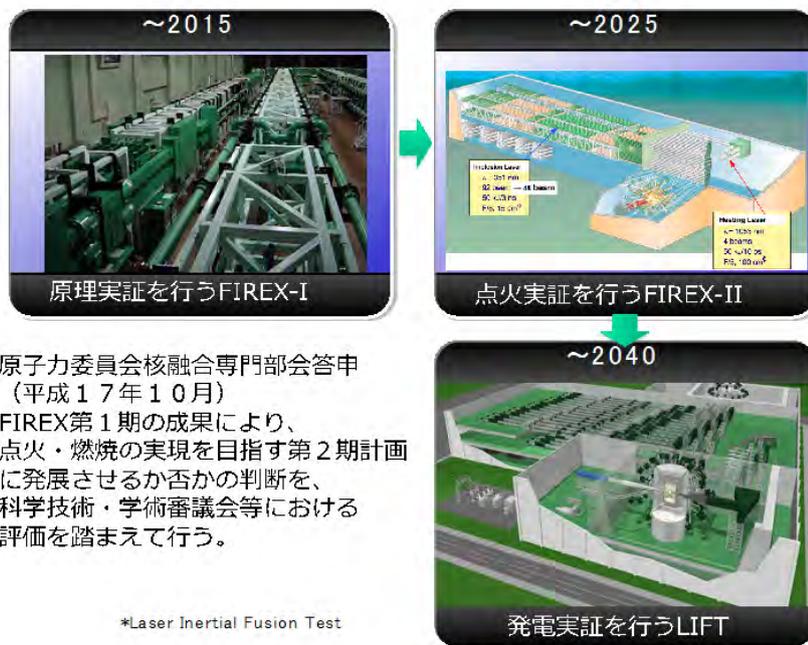
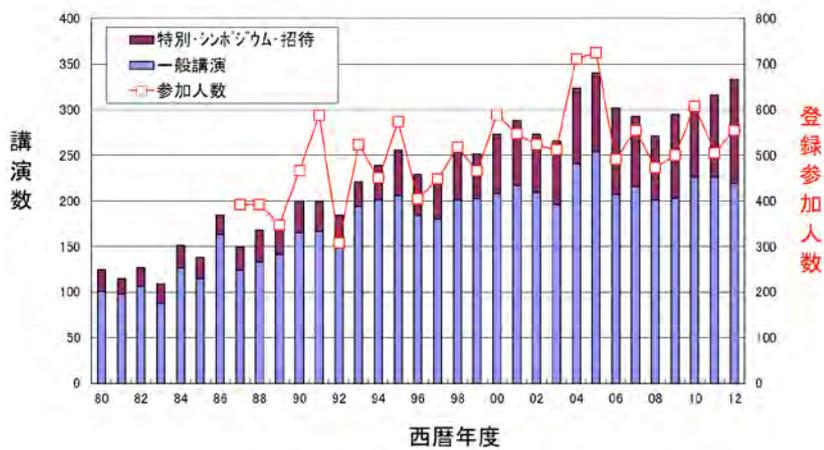


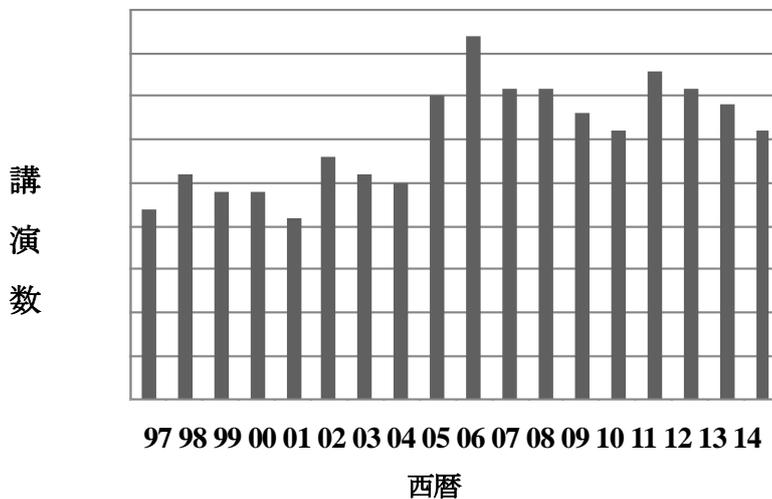
図2 レーザー核融合開発の道程

(左上) 現在の大阪大学の実験装置 (LFEX)、(右上) 点火実証実験装置の概念設計、(右下) 発電実証炉概念設計 (出典) エネルギーと科学技術に関する分科会主催公開シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究の新展開」報告書 (晴地委員発表資料) より転載

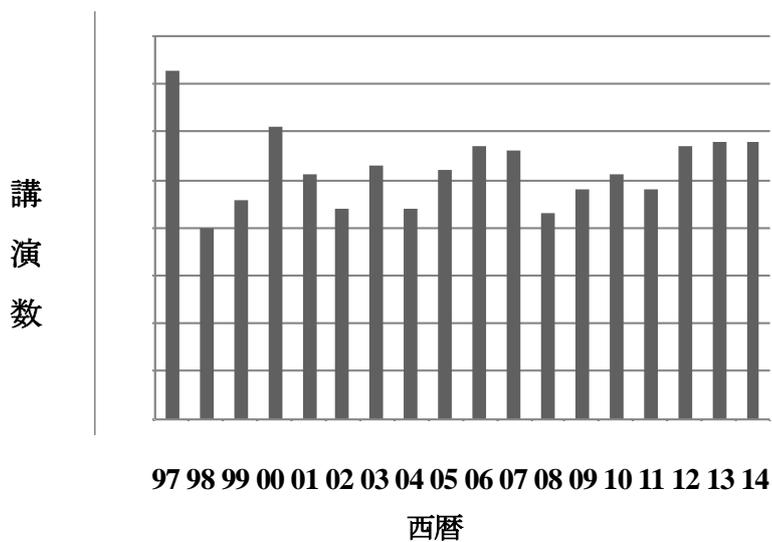
<参考資料6> レーザー学会における講演数の動向



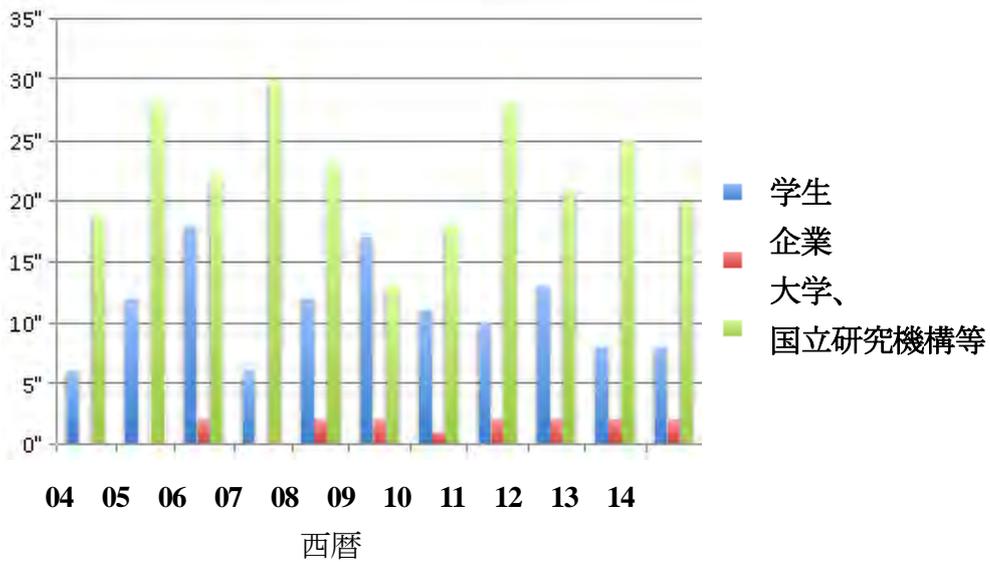
(A) 全講演数と参加者数 (出典) レーザー学会提供



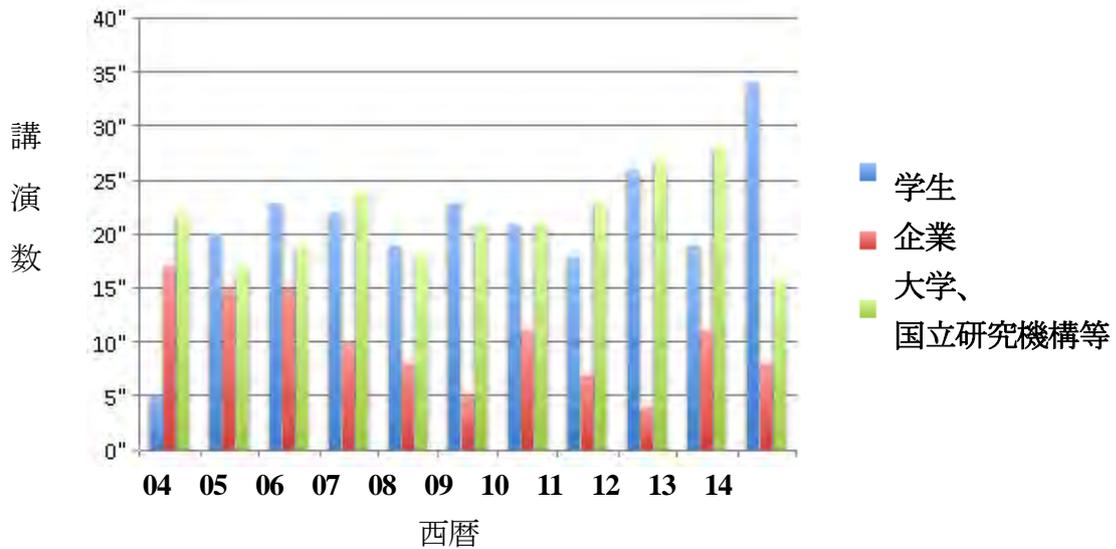
(B) 高強度・高エネルギーレーザー応用関連講演数 (出典) レーザー学会提供



(C) 「レーザー装置」関連講演件数 (出典) レーザー学会提供



(D) 所属別講演件数：高強度・高エネルギーレーザー応用 (学生、企業、大学／国研)
 (出典) レーザー学会提供



(E) 所属別講演件数：レーザー装置 (学生、企業、大学／国研)
 (出典) レーザー学会提供