

提言

パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の 量子的飛躍と産業創成



令和2年（2020年）6月16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

この提言は、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ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学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電気学科電気工学専攻教授
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(RITE) 副理事長
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)	大阪大学名誉教授
	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)	中部大学総合工学研究所特任教授、自然科学研究機構核融合科学研究所名誉教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
	岩城 智香子	(連携会員)	エネルギーシステム技術開発センター 原子炉システム・量子応用技術開発部主幹
	大久保 泰邦	(連携会員)	宇宙システム開発利用推進機構技術参与
	北川 尚美	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科教授
	小長井 誠	(連携会員)	東京都市大学総合研究所特任教授
	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
	斎藤 公児	(連携会員)	日本製鉄株式会社フェロー
	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
	柘植 綾夫	(連携会員)	公益社団法人日本工学会顧問・元会長
	日高 邦彦	(連携会員)	東京電機大学大学院工学研究科特別専任教授、東京大学名誉教授
	藤田 修	(連携会員)	北海道大学大学院工学研究院教授
	三間 圀興	(連携会員)	大阪大学名誉教授、国立研究開発法人原子力研究開発機構敦賀事業本部レーザー共同研究所客員研究員
	宮崎 久美子	(連携会員)	東京工業大学環境・社会理工学院イノベーション科学系教授、放送大学客員 教授
	門出 政則	(連携会員)	佐賀大学名誉教授
	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

和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学部教授
藤岡 恵子	(特任連携会員)	株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役

ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会

委員長	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
副委員長	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
幹事	三間 囃興	(連携会員)	大阪大学名誉教授、国立研究開発法人原子力研究開発機構敦賀事業本部レーザー共同研究所客員研究員
	松尾 由賀利	(第三部会員)	法政大学理工学部教授
	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学名誉教授
	上坂 充	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	植田 憲一	(連携会員)	電気通信大学名誉教授、大阪大学レーザー科学研究所特任教授
	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
	石川 哲也		独立行政法人理化学研究所放射光科学研究センターセンター長
	加藤 義章		大阪大学名誉教授、国立研究開発法人原子力研究開発機構敦賀事業本部レーザー共同研究所客員研究員
	河内 哲哉		国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所所長
	兒玉 了祐		大阪大学レーザー科学研究所所長
	米田 仁紀		電気通信大学レーザー新世代研究センター教授

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務局	犬塚 隆志	参事官（審議第二担当）
	五十嵐 久留美	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

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発展してきた。現在、レーザーは学術のみならず産業でも広く活用され、先端的科学技術の中心的な存在になっている。日本学術会議総合工学委員会は、2015 年 9 月に日本学術会議主催国際シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」を開催し、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会は、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」(2016 年 8 月 24 日)を公表した。2019 年 1 月には、日本学術会議主催国際シンポジウム「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学技術の展望」を開催した。その際、日米両政府により「高エネルギー密度科学に関する日米協力事業取り決め」が調印され、日米の新たな研究協力事業が立ち上がることになった。

パワーレーザー技術による高エネルギー密度科学は、1960 年代後半にレーザープラズマ物理や核融合研究が始まったことに端を発するもので、レーザー加工などの先端産業技術にも関係している。近年、パルスエネルギーやピーク強度を高める研究開発により、パワーレーザーによる高エネルギー密度科学の可能性は著しく多様化している。これに対応して、パワーレーザーと高エネルギー密度科学の研究者コミュニティより、「高出力の次期大型パワーレーザー施設による高エネルギー密度科学の推進」が提案された。このような状況を踏まえ、エネルギーと科学技術に関する分科会は小委員会を設置し、我が国におけるハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学の在り方を評価・検討することにした。

2 現状及び問題点

過去 30 年のレーザー技術の進歩は大きく、高出力化に加え、高繰り返し化（高平均出力化）、小型化、高信頼化が進み、パワーレーザーの技術革新の新時代が到来しつつある。我が国は、早い時期からパワーレーザーとそれを利用する科学技術の重要性に着目し、世界に先駆けて研究を推進してきた。特に、我が国が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、大型高耐力回折格子などはこの分野の中核的先進技術である。また、レーザー核融合、レーザー粒子加速、プラズマフォトンクス、超高压物性や実験室宇宙物理等の高エネルギー密度科学に関して我が国が新しい研究潮流を生み出すのに大きな役割を果たした事は、世界から高く評価されている。

海外では、米国国立点火実験施設 NIF, ヨーロッパの極限光科学研究施設 ELI や中国上海の超高強度レーザー施設 SULF 等の中核拠点を中心にして、ハード・ソフト両面でパワーレーザー技術の新時代が到来しつつある。その結果、高出力パワーレーザーにより新しい科学技術が生まれ、多くの若い研究者を惹きつけ、人材育成が進むと共に、高エネルギー加速器開発で見られたように、こうした極限性能を追求する大型装置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つつある。

我が国のパワーレーザー研究は、これまで大学附置研究所が大きな牽引力となり、独立行政法人の研究機関や大学共同利用・共同研究拠点等、様々な研究拠点で推進されてきた。

しかし、こうした分散した研究拠点で開発研究を進める現状のままでは、研究開発において諸外国をリードし、若者を引きつけ夢のある幅広い人材育成の場を提供することが困難である。

3 目指すべき今後の取組

我が国において多様な公的競争資金による産学官の研究開発により、高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関して多くのコア・コンピタンスを築いてきた高エネルギー密度科学とパワーレーザーコミュニティは、これまでの成果を集積して組織化し、他分野や海外からの意見も取り入れて、繰り返し大型パワーレーザー研究施設を整備し、テラヘルツからX線・ガンマ線・中性子源など多様な量子ビームを発生し、機械学習技術も活用してその高度利用を図ることで、パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の研究開発と人材育成並びに産業創成において量子的飛躍を目指すことを提案している。そこでは、人工知能・情報工学の技術(AI 技術)を取り入れることで、繰り返し大型パワーレーザーの精緻な制御と安定動作及び高品質の実験データを大量に生成・解析することを可能にして、広範な分野の多くのユーザーの要望に応えるとしている。

我が国が築いてきた高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する多くのコア・コンピタンスを生かしてこの科学技術の飛躍的發展を追求することは、国際競争力のある産業創成のために極めて重要である。このためには、これまで高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術の研究開発を先導してきた大学と国立研究機関が組織を再編し、産業界とも協力して繰り返し高出力大型パワーレーザー施設を整備してパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学において引き続き革新に挑戦する次代を担う人材育成のための中核拠点とし、そこを切磋琢磨する知を結集させる組織として、パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の研究開発と人材育成並びに産業創成において量子的飛躍を目指すべきである。

4 提言

我が国において、大学と国立研究機関は、高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を産業界とも連携協力して推進し、多くの人材を育成し、先導的技術を生み出し、この分野におけるコア・コンピタンスを築いてきた。こうした人材育成と先導的技術開発への挑戦の取り組みを産業界の協力も得て一層強化してこの科学技術の更なる飛躍的發展を追求することは、我が国における次の時代を担う国際競争力のある産業創成に極めて有効であり、今求められていることである。

よって、これまで高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を先導してきた大学と国立研究機関は、産業界と連携して知と技術を集約し、組織改編で世界最高レベルの繰り返し・高出力の大型パワーレーザー施設を高エネルギー密度科学推進の中核拠点として世界に先駆けて設置し、機械学習技術も活用して大型パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍を実現し、新たな学術の開拓や産業創成に繋がる価値創造・人材育成を行うべきである。

目 次

1 はじめに.....	1
(1) 小委員会設置経緯.....	1
(2) 提言作成の背景と趣旨.....	1
2 現状と課題.....	2
(1) 高出力のパワーレーザー科学技術.....	3
① 世界を主導する日本発のレーザー基盤技術.....	3
② 今後の課題：国家的研究開発拠点の立ち上げ.....	3
(2) 高エネルギー密度科学技術.....	5
① レーザー核融合エネルギー科学.....	5
② 高エネルギー密度物質科学.....	7
③ 超高压物質材料科学.....	8
④ 量子真空光科学.....	9
⑤ レーザー量子ビーム科学.....	10
⑥ 原子力及び宇宙分野への応用.....	12
(3) ハイパワーレーザーの産業応用.....	14
① 国外における学術と産業創成の循環例.....	14
② 我が国のレーザー開発における学術の進展と産業の創成.....	15
③ 今後の課題：学術・産業・人材育成のスパイラル的発展.....	16
(4) 人材育成と産学官連携.....	17
① 産学連携によるキャリアパスの構築.....	17
② 今後の課題：中核拠点の構築とそれに連携した人材交流の活性化.....	18
3 目指すべき今後の課題.....	18
(1) 高繰り返し化によるパワーレーザーと高エネルギー密度科学の量子的飛躍.....	18
(2) 高エネルギー密度科学の量子的飛躍を実現する環境整備.....	19
4 提言.....	20
＜参考文献＞.....	21
＜参考資料1＞審議経過.....	25
＜参考資料2＞コミュニティによる次期大型高出力パワーレーザー施設の提案.....	26
＜参考資料3＞高エネルギー密度科学.....	28
＜参考資料4＞世界の主要な高出力パワーレーザー 施設.....	29
＜参考資料5＞我が国のパワーレーザー研究・高エネルギー密度科学研究の関連事業と関係機関.....	30
＜参考資料6＞米国科学アカデミー報告「短パルス超高強度レーザーとその関連科学技術」.....	33
＜参考資料7＞超短パルス・パワーレーザー施設の広がり.....	34
＜参考資料8＞レーザー学会におけるハイパワーレーザー関連講演数の動き.....	35

1 はじめに

(1) 小委員会設置経緯

2015 年 9 月、日本学術会議主催国際シンポジウム「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」が、米国との研究協力の在り方を主題としてローレンスリバモア国立研究所／SLAC 高エネルギー加速器研究所において開催され、高エネルギー密度科学分野の日米協力事業の在り方が検討された。シンポジウムの議論の結果を受けて、同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は、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」（2016 年 8 月 24 日）を公表した[1]。2019 年 1 月には、日本学術会議主催国際シンポジウム「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学技術の展望」が米国ワシントンで開催され、日米両政府による「高エネルギー密度科学に関する日米協力事業取り決め」が調印され、日米の新たな研究協力事業が立ち上がることになった。一方、パワーレーザー¹と高エネルギー密度科学に関連するコミュニティ（大学、研究機関、レーザー学会、プラズマ核融合学会等）より「高出力の次期大型パワーレーザー施設による高エネルギー密度科学の推進」（参考資料 2）が提案された。

このような状況を踏まえ、2019 年 4 月、第 24 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は「ハイパワーレーザー²による高エネルギー密度科学小委員会」を設置し、我が国におけるハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学の在り方を検討し、コミュニティの提案を評価した。小委員会の審議の経緯を参考資料 1 に示す。

(2) 提言作成の背景と趣旨

1960年代に登場したレーザーは、その後半世紀余の歳月を経て多くの科学技術と結びついて発展してきた。現在、レーザーは学術のみならず産業技術として広く活用されている。本提言の主題であるパワー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やブラックホール近傍の超高強度場を実現できることである。この高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術は、1960年代後半にレーザープラズマ物理や核融合研究が始まったことに端を発するもので、レーザー加工などの先端産業技術にも関係している。近年、パルスエネルギーやピーク強度を高める研究開発により、図 1 および参考資料 3 で示すようにパワーレーザーによる高エネルギー密度科学の可能性は著しく多様化している。また、パワーレーザーの繰り返し化技術の進歩により生まれるビッグデータとIoT・AIを結びつけることで可能となるシステムのスマート化は、多様なステークホルダーの間で効率的・効果的な共創を生み出している。また、産業界ではスマートレーザー加工などの技術基盤として、高エネルギー密度科学における知の重要性が注目されている。

¹ パルスエネルギーが数 mJ 以上のパルスレーザー

² ピーク出力がギガワットを超える光パルスを発生するパワーレーザー

現在、参考資料4のように、多くの大型パワーレーザー関連研究施設が世界的に設置され、活発に研究が進められている。我が国では、20世紀末から現在まで文部科学省をはじめ政府の支援を受けて、参考資料5に示すように、パワーレーザーと高エネルギー密度科学の研究開発に多くの機関が関わってきた。海外では、ヨーロッパのLaserlab EUROPE[2]や、米国科学アカデミーの報告書「短パルス超高強度レーザーとその関連科学技術」[3]（参考資料6）に基づく新たなパワーレーザーのネットワーク“LaserNet US”が立ち上がっている。

平成28年1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画（平成28年-令和3年）では、「我が国が世界の研究ネットワークの主要な一角に位置付けられ、国内に国際頭脳循環の中核となる研究拠点を形成することが重要である。また、二国間、多国間協力を強化する。」としている。パワーレーザーと高エネルギー密度科学技術の分野においても、国内における国際的フロンティア研究拠点の充実とそれを担う人材育成が課題である。

以上のことから、パワーレーザーと高エネルギー密度科学技術の分野において、これまで培われてきた我が国の科学技術を結集し、産学官界に活動を広げ、持続的な研究開発と人材育成を可能にすることが重要であると認識し、関係する研究者コミュニティの提案「高出力の次期大型パワーレーザー施設による高エネルギー密度科学の推進」（参考資料2）を評価して提言を作成することになった。

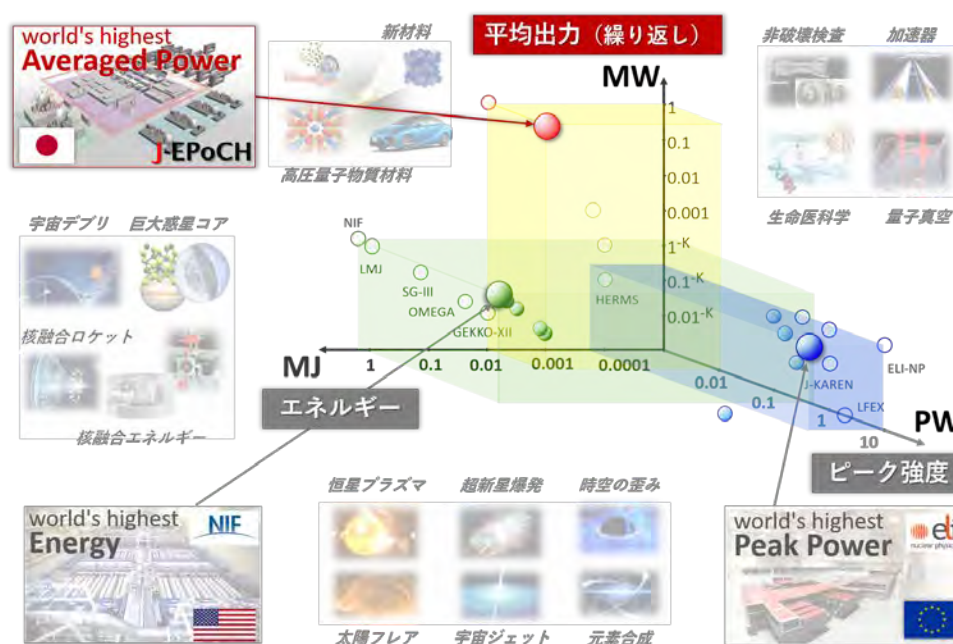


図1 ハイパワーレーザーの3つの特性（平均出力、ピーク出力、パルスエネルギー）と多様な関連科学技術分野（出典）ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会で作成

2 現状と課題

本章では、国内外のパワーレーザー技術、高エネルギー密度科学とその関連分野の研究開発の現状をレビューし、今後我が国が取り組むべき課題を抽出する。

(1) 高出力のパワーレーザー科学技術

① 世界を主導する日本発のレーザー基盤技術

20世紀3大発明の一つと位置づけられたレーザー技術は21世紀に入り、科学技術、産業応用の両面で、社会への影響力をますます拡大しつつある。なかでも、世界の高出力のパワーレーザーは新しい質的変革の時代を迎えつつある。米国、フランスに続き、ロシア、中国が開発しつつあるナノ秒メガジュールレーザー、日本のLFEX (Laser for Fusion Experiment) やフランスのPETAL (Peta Watt Laser) などの高出力のピコ秒ペタワットレーザー、さらに欧州ELIや韓国、中国、ロシアなどが開発しているフェムト秒10PWから200PWを目指す超高強度のパワーレーザーなど、様々なパルス幅、出力エネルギー、ピークパワーの高出力レーザー³があり（参考資料 4）、各々の施設において、レーザー核融合、実験室宇宙物理、超高圧物性、レーザープラズマ粒子加速、真空の非線形物理から物質生成に至る光による高エネルギー物理学まで、他の方法では実現できない実に様々な研究課題が提案されている。2018年にノーベル物理学賞に輝いたCPA (Chirped Pulse Amplification) を利用した極短パルス超高強度レーザー技術[4]によって、ELI-BLや中国SULF (Super-intense Ultrafast Laser Facility) の10PWレーザー、さらに韓国CoReLS (Center for Relativistic Laser Science) の4PW+1PWレーザー等では、新しい科学への入口を開くとされるレーザー強度である $10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$ に手が届きそうなところに来ている。世界各国はそのレーザー強度を100PWレーザーでさらに高いレーザー強度を実現しようと、新しい装置建設段階に入っている。

このように集光レーザー強度は急速な増加を見せているが、この進歩は地道な技術開発により支えられている。特に励起用光源はパワーレーザーシステムの能力、効率、予算を決定する技術であり、この部分の技術競争力が重要である。今後の学術・産業・人材育成においては繰り返し化固体レーザーが求められるが、現状のランプ励起方式による固体レーザーは1ショット／分が限界で、繰り返しを上げるには半導体レーザー (LD) 励起方式へのシフトが必須である。高出力LD励起固体レーザーを制するものは、科学研究用のみならず、産業用の高出力レーザー技術も制すると言える。

② 今後の課題：国家的研究開発拠点の立ち上げ

高平均出力固体レーザーを高繰り返し動作させるには、結晶の持つ高い熱伝導性とガラスのようにレーザー媒質の大型化を両立できるセラミックレーザーが最有力候補である。レーザーセラミックは我が国が開発し、現在も独占的に世界に供給しているレーザー媒質である。実際、英国のDiPOLE (Diode Pumped Optical Laser for Experiment) や日本の浜松ホトニクスが開発した口径10cmx10cmのLD励起Yb:YAGセラミックレーザーTERUが比較的高出力高繰り返しである100J／10Hzを実現している。現状、LD励起セラミックレーザーの最大サイズが定まり、最適設計が可能になった段階であり、次はその設計をもとに高出力レーザーシステムを開発し、新しい科学研究を展開

³ パルスエネルギー10J 以上のパワーレーザー

することが期待されている。現在我が国では、10cmx10cm口径のYb:YAGセラミックレーザーによる現実的な出力100J程度の基本ユニットを多数組み合わせることによる次世代大型高出力レーザーシステムが検討されている。そのためには、これまでに蓄積された技術を集約した信頼性の高い大型レーザー装置の開発・運用が不可欠となる。

信頼性の高い大型レーザー運転システムの技術革新例としては、人類初のメガジュールレーザーシステムの米国NIFでの達成例があげられる。NIFでは、サブミクロンの微小な光ダメージを計測し、ビッグデータとして蓄積・解析し、光学素子の維持管理を格段に高度化することで、光学素子の長寿命化と高出力運転の維持に成功している。また、光学素子の診断と補修にロボット技術を活用し、無塵環境下の作業の効率化が図られている。これは1日2～3ショットという低繰り返しとはいえ、192本の大型レーザーを常に動かし続ける必要性から生まれた革新的レーザー技術である。

参考資料2で提案の高出力の次期大型パワーレーザーでは、多数のユニットを並行的に高繰り返しで稼働させ続ける必要があることから、より進んだレーザー、光学素子の維持管理が必要である。さらに高出力固体レーザーユニットを多数結合して、必要な大型レーザーシステムとして動作させるためのコヒーレントビーム結合技術は、次世代高出力レーザーシステムの基礎的技術である。欧州のELIではファイバーレーザーによる1mJ以下のビームを10万本以上も結合させる意欲的な提案もなされているが、現在提案されている100Jの固体レーザー出力を100本程度結合する計画（参考資料2）はより現実的であり、科学研究、産業応用の両面で成果を上げると期待できる。また、パルス圧縮用の大型回折格子など、現在の必要技術の多くは、レーザー強度 $10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$ を実現する際のボトルネックを突破するために開発されてきたものであるが、今後は通年稼働が可能な長寿命な技術を開発する必要がある。コントラスト比（パルスのピークとプレパルスの強度比）はピークパワーに比例して要求は今後も高まるため、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)やOPA(Optical Parametric Amplification)に用いる非線形結晶、なかでも損傷強度の高いLBO結晶の大型化で対応する必要がある。そのためには、従来技術の応用では不十分で、多数の大口径ビームのコヒーレントビーム結合や高繰り返し照射で発生する蓄積的光学損傷、さらに100年の歴史を誇るチョコラルスキー法を超える革新的結晶育成法の開発など、革新的な技術開発が重要となる。NIFやELIのように明確な目標を持った大型計画がこれらの画期的技術開発を生み出す母体となったことを考えても、次世代の高出力大型レーザーの開発推進が、イノベーションの源泉となることは明確である。

さいわい我が国には、その中核となる半導体レーザー、レーザーセラミック、非線形光学結晶、高耐力光学薄膜、空間位相変調器、ファイバーレーザー、超平滑研磨、無塵ロボット、光学波面計測・制御などで優れた技術が存在しており、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提案と実証、複数ビームのコヒーレント結合技術を持った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て世界をリードしてきた実績を持っている。これら次世代高出力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ものであり、これらを結集することで競争力ある我が国固有の大型システムを組み上げることができる。

(2) 高エネルギー密度科学技術

① レーザー核融合エネルギー科学

ア 世界の動向

世界のレーザー核融合研究は、核融合発電に必要な炉心プラズマの点火燃焼を単一ショットでまず実現し、その後、繰り返し動作させて電力を生み出す、という戦略で進められてきた。近年、高繰り返しパワーレーザー技術のめざましい発展により繰り返し実験が可能となりつつある。新しい研究戦略として繰り返し実験のビッグデータを AI で解析し、点火予測や未臨界核融合炉実験により核融合開発を加速することが考えられている。

我が国のレーザー核融合に必要な高温[8]、高密度[9]プラズマの発生成功や、米国のホットスパークの形成の実証[10][11]などが学術的基盤となり、核融合点火を目指す米国国立点火施設 NIF の建設が開始された。引き続いてフランス、中国、ロシアで核融合点火計画が次々と進められ、フランスのメガジュールレーザーLMJは2017年に一部の運転を開始した。NIFでは、点火へ至る核融合出力のレーザーエネルギーに対する高精度の比例則が構築され、核融合反応で発生するアルファ粒子が燃料プラズマを加熱する「アルファ加熱」により、核融合出力が高温燃料プラズマのもつエネルギーの10倍にまで達した[12]。現在、NIFでは光学素子の損傷をロボティクスとビッグデータ解析により制御することでレーザーエネルギーの1.5倍の増大を図り、ペレットの擾乱の除去やホーラム形状の最適化と合わせて核融合点火を達成しようとしている[13]。中国はさらにビーム数を（192から298ビームへ）飛躍的に増大させることによりNIFの2倍のエネルギーのレーザーを建設し、現状のターゲット性能のままでも点火を達成しようとしている[14]。

我が国は、世界の核融合点火計画の発足に大きな影響を与えながらも、大学の研究の特質を活かしてコンパクトな高速点火に研究の中心を移し、その基本概念の実証[15]を経て、点火温度への加熱を目指す原理実証段階 FIREX-I を実施し、現時点で点火温度 4.3keV（5千万度）に対して 2keV（2.2千万度）の加熱温度を達成した[16][17]。中国は我が国の成果を発展させて、高速点火の実証そのもの（FIREX-II 相当）を行う計画を発表した[18]。

核融合は総合学術であり、様々な広がりがある。核融合研究は後述する高エネルギー密度科学に関する多くの分野と共に発展してきた。また直接、レーザー爆縮プ

ラズマを利用した超高圧物質科学や高密度核反応物理学[19]など新たな学術応用の動きも出てきている。さらに産業界でも、米国で KMS Fusion 社や General Atomics 社が、また我が国で浜松ホトニクスがレーザー核融合研究を進めてきた[20][21]のに加え、新たに核融合に関するベンチャー企業が 20 社以上[22]、世界で産まれている。コンパクトな核融合発電を早期に実現するという目標の一方で、総合技術である核融合関連要素技術をもとにした現実的なビジネスプランを掲げている企業もある。またドイツやオーストラリアでは、中性子を出さないプロトン-ボロン核融合発電といった究極的な目標を掲げているレーザー核融合ベンチャー企業も出てきている[21][22]。

イ 今後の課題：我が国の“高速点火”方式への期待

これまでは、単一ショットによる研究が中心であり、40 年前に確立したレーザー技術に依存してきた。少数の実験データで検証されたシミュレーションで点火などのクリティカルパスを予測し、次の新施設でそれを検証するという研究サイクルは、必要以上の大型施設を求めざるを得なくなるなどの大きなリスクをもつ。前述の通り、大出力で高繰り返し動作のレーザーが実現可能になったことにより、少数のショットにより制限されていたレーザー核融合研究に以下の質的転換が考えられる。

第一に、炉心プラズマ研究の進展である。高速点火方式をはじめとする先進レーザー核融合の実現には、極めて多数の実験データや知見とシミュレーションモデルとの厳密な比較を通して、学術的に高い成熟度と精度で、高速点火の炉心プラズマ条件の予測を行うことである（ビッグデータと機械学習による点火予測）。既に、シングルショットで時間をかけて蓄積された実験結果の統計的解析などにより核融合点火の最適解を探索する手法により、専門家の予想を超えたレーザー波形により核融合出力が格段に改善されることが実証されている[23]。今後、高繰り返しパワーレーザーシステムを用いた実験で得られる多量のデータや日米政府間協力事業の下での超大型レーザー実験で得られる物理データなどを取り込んだ機械学習（AI）やデータマイニングによる解析と数値実験により、炉心プラズマの点火・燃焼に必要な最適条件を見出し、効率的・経済的なレーザー核融合実験炉を早期に実現することが期待できる。

第二に、レーザー核融合炉工学に関する実験的研究により核融合炉開発のファーストトラックが期待できる。未臨界の核融合反応を高繰り返しで動作させることにより、核融合点火の実証を待つことなく、人類初の核融合発電システムを実現できる（未臨界レーザー核融合炉実験）。すなわち、レーザー核融合は炉心技術と炉工学技術開発を分離、並行して進めることができる特徴を生かし、非常に強力な中性子源となる未臨界レーザー核融合炉を、核融合燃料のトリチウムの増殖を実証することや核融合炉材料開発に活用することが可能である。さらに、核融合炉の第一壁は固体とプラズマの境界の高エネルギー密度物質状態であり、繰り返しパワーレーザーの活用により研究開発が飛躍的に進むと期待できる。

第三に、繰り返し可能な実験施設は、人材育成への飛躍的な貢献と、産学競争の場を提供することができる。学術の他分野との連携や産業界との連携などを目的とした実験の機会も増え、一層拡がりある様々な共創が期待できる。

② 高エネルギー密度物質科学

ア Warm Dense Matter (WDM) 研究と関連する XFEL 施設整備の動向

固体物理学とプラズマ物理学の遷移領域にある物質状態を科学する Warm Dense Matter (WDM) 科学はこれまで、固体の持つ秩序構造からランダム系に移ることでの導電率、圧力などのけた違いに変化する物性を対象としたものが中心であった。

最近、X線自由電子レーザー (XFEL) を用いた定積加熱によるより大きなサイズの WDM の生成が可能になっている。また、XFEL をプローブ光源として用い、高い空間、時間分解能で、それまでのインコヒーレント X 線プローブとはけた違いに高い S/N を持った X 線回折や Thomson 散乱を使った計測が可能になってきている。

新しい光源である XFEL は、2000 年ころからアメリカ、ドイツ、日本で建設計画が始まった。アメリカは、SLAC 線形加速器を再利用して LCLS を建設し[24][25]、2009 年からユーザー利用を開始している。ドイツではリニアコライダー計画の付帯設備として提案された XFEL 部分のみが EU の施設として建設され 2018 年にユーザー利用が開始された[26]。我が国では、コンパクト光源が提案され、SACLA 建設に繋がり、2012 年にユーザー利用が開始された[27]。日本のコンセプトを踏襲して、スイスでの光源建設が始まり、2017 年からユーザー利用が開始され、韓国もアメリカと日本のコンセプトに基づく光源建設を始め、2017 年からユーザー利用が開始されている。また、中国上海でも日本のコンセプトを引き継いだ軟 X 線 XFEL の建設を開始している。現在、SLAC の LCLS では、高繰返し化を目的に改造工事（超伝導化：LCLS-II）が進められると共に、高エネルギー化改造計画 LCLS-HE が提案されている。中国上海でも、硬 X 線超伝導 XFEL 計画が進行中である。

光学レーザーとは異種な高エネルギー密度物質状態の生成や、高出力光学レーザーを用いて生成された高エネルギー密度状態の XFEL による計測により、新たな基礎物理的な研究が各国で始まっている。我が国の XFEL：SACLA 施設では nm 集光光学系を利用して $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ を超える集光強度が実現され[28]、遷移金属の固体であっても 20% 程度の原子が 1 s 内殻電子励起化されるほどの高エネルギー密度の非平衡状態を生成できるようになり、高 X 線場を利用して、新たな X 線量子光学研究も開始されている[29]。

これら高エネルギー密度状態を理解する上では、実験データに裏付けされた詳細理論モデルが必要となる。第一原理的なモデルとしては、量子力学的分子動力学モデルが米国、フランス、ドイツ、中国で開発されているが、その計算量が膨大なため、計算できるシステムサイズが数 10 個の原子系に限られてしまう。この計算容量の限界を避けるため、従来のモデルの改良や新たなモデル化手法の開発が進められている。

イ 今後の課題:大型施設のマシンタイム不足と理論研究者の育成

高エネルギー密度状態の生成や計測に NIF や XFEL などの世界有数の大型施設が使われ始め、これまでとはけた違いの大きさ、極限的な物質パラメータ、計測精度の研究が実現できるようになってきたが、その反面、研究の発展がこれら最先端の大型施設による実験に依存する様になってきている。これら施設のマシンタイムは非常に制限され、高エネルギー密度科学分野以外にも多くの利用者がいることから、さらなる国際的利用施設の充実が期待されている。

一方、理論研究では、海外に比べ我が国の研究者人口が圧倒的に少なく、海外の理論研究者に大きく依存している。この分野の基礎的な理論モデルである密度汎関数理論は、結晶構造の変化に伴い基底関数に変化するために固体物理学で使用されているものよりモデル化が困難である。しかし、我が国には、密度汎関数法に関わる多くの物性物理学の理論研究者がいることより、国内での分野間の研究交流を一層高め、新しい学際領域の理論コミュニティを作ることが期待される。

③ 超高圧物質材料科学

ア 超高圧状態の物性探査から新物質材料創生[30]

レーザーによる極限状態の1つが超高圧状態である。レーザーアブレーションにより比較的容易に 10GPa (10 万気圧)以上の圧力状態を生成でき、学術の開拓のみならず産業にも利用されている。さらにレーザー爆縮(核融合)では、高温状態であるが数 Peta Pa 以上が実現している。ここでは特に固体もしくは液体状態の超高圧物質について紹介する。およそ 10GPa 程度のレーザー衝撃波は、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。またこの圧力領域は、一般的に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可能性があるとも言われている[31]。

圧力が数 100GPa 以上になると地球の内核状態や太陽系内の惑星内と同じような圧力領域になる。また一般的に化学結合以上のエネルギー密度に相当し、これまでのような大気圧で起こる化学反応とは全く異なる新しい反応場として注目されている[32]。さらに、500GPa 以上の領域は、一般的には静圧縮技術では困難[33]でレーザーによる動的圧縮が実験室では唯一のアプローチ方法であり、超高圧状態の相転移や状態方程式がこの方法で世界的に調べられている。水素・重水素、水、ダイヤモンドなどにつき、固相から“導電性のある流体”相(液体金属)への転移、プラズマへの相転移などが対象となっている[34]。また近年相次いで存在が確認されている系外地球型巨大惑星(スーパーアース)の内核を実験室に作り出せる唯一の手段としても注目を集めている。さらに最近、レーザー衝撃波の1次元性と超高圧動的圧縮による異常弾性波による無拡散相転移が発見され、従来の高圧相転移に比べ1/5以下の圧力で六方晶ダイヤモンドの生成に成功している[35]。また、レーザーで生成された衝撃波中のみで生じる過渡的な状態の研究だけでなく、その高

エネルギー密度状態が凍結された形で回収される研究もあり[36]、新しい物質材料科学への展開が進んでいる。さらにレーザーパルス波形制御や超高压波形制御により低エントロピーの動的圧縮により TPa を超える超高压状態下でありながら、固相を維持した状態で構造相転移を実現できるようになってきている。BC8 構造のダイヤモンド（スーパーダイヤモンド）など、これまで地上に存在しなかった超高硬度の新しい物質材料探査が進められている。

イ 今後の課題：超高压量子材料科学への展開

高精度に制御された 10kJ 級の繰り返しパワーレーザーを中心とする共同利用研究施設が実現すれば、低エントロピー圧縮で 3-10TPa (3000 万 - 1 億気圧) 以上の固体状態を実現することが期待できる。このような条件下ではアルミニウムのような基本的なものでも複雑な格子構造を示すといわれている[37]。さらに 10TPa (1 億気圧) 以上の圧力下になると、そのエネルギー密度は内部コア電子結合エネルギーに匹敵する。内部コア電子が結合に関与するような新たな材料を創成できる可能性がある。この状況では価電子だけでなく、内殻電子が材料特性を決定し、固体における新しい構造的複雑性を生じる可能性がある。さらに原子間の間隔がボーア半径より小さくなるだけでなく、ドブロイ波長より短く非常に縮退した物質状態を形成すると考えられる。これは、極限的に小さな世界、極限的に温度の低い世界でしかなかった量子現象が支配的な新しい状態となる。もしこのような状態を大気圧状態で実現できれば、全く新しい量子材料となる可能性につながる。米国では 2019 年度より新たに予算措置で、高压量子材料探査に向けた取組が開始されている。我が国でも、パワーレーザーと高エネルギー密度科学技術の中核拠点を整備し、高压量子材料関連の研究開発を推進することが必要である。

④ 量子真空光科学

ア レーザーと量子真空物理学

現在の物質宇宙（時間の空間）は、“真空の量子ゆらぎ”⁴から対称性が崩れた結果として創り出されていると考えられている。そのため真空の物理は、全ての物質を理解する上で基本となる課題である。不確定性原理に基づく“量子ゆらぎ”は、真空状態の基本である。このような真空中に、強い電場や磁場をかけることで、仮想の真空分極が生じ、強い光と真空が相互作用すると考えられる。さらに“真空ゆらぎ”から、ブラックホールなど超重力場における時空の歪み（「事象の水平線」付近）により粒子が生成され、ホーキング放射が起こると考えられている。

真空と光の相互作用における現象は、物質と光の相互作用と良く似ている一方で、物質中で通常起きる分極と真空分極は大きく異なる。電磁波の電場と磁場が絡み合うように分極を形成するため、平面波の光では幾ら強い光でも真空との相互作用は

⁴ 「真空の量子ゆらぎ」は、場の量子力学の用語である。真空の最低エネルギー状態は粒子が存在しない状態ではなく、粒子数が不定で粒子と反粒子が揺らいだ状態であることを意味する。

期待できない。そのためレーザーの集光角度に対して非線形に真空分極が起こりやすくなる[38]。このため繰り返しの数 PW - 10PW 程度で真空からの散乱光が観測可能である[39]。また直線偏光の入射光に対して散乱光の偏光は、電場と磁場が絡み合った渦構造である。真空からの散乱光の偏光を選別することで、効率的に真空分極による散乱光の信号を検出できることにつながる。

一方、ブラックホールなど超重力場における時空の歪みと“量子ゆらぎ”で粒子が生成されホーキング放射が起こる効果に似た現象としてウンルー効果の検証が提案されている。相対論で示されるように重力場と加速度場の等価性がなり立つと仮定すると、一定の加速度場において「事象の水平線」と同様に見かけ上エントロピーの増加が起こり、加速度場からの放射や散乱光に影響する可能性がある。これをレーザーとプラズマの航跡場を利用して観測する手法も提案されている[40]。

イ 今後の課題：超高強度レーザーによる量子真空へのアプローチ

世界初の 10PW を実現したルーマニアの ELI-NP や、まもなく稼働を開始するプラハの ELI-Beam Line や中国上海の SULF(Shanghai Ultra-Intense Laser Facility) は、集光強度は $10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$ 超に達する。このような超高強度場では、光と真空の相互作用の非線形性が顕在化し、コヒーレント状態の量子電磁気学を開拓する可能性を秘めている[41]。現在、多くの理論予測が進んでおり、真空中の高調波発生や 4 波混合、宇宙の開闢に関係する真空の“量子ゆらぎ”を実験室において検証することが可能性である。そのため、単に従来の高出力レーザーに加え、プラズマ・フォトリックデバイス[42]や高エネルギー電子ビームや X 線自由電子レーザーとの相互作用も視野に入れた取組が始まろうとしている。我が国には、これらの基盤技術がすでに開発されており、中核拠点構築による国際競争力のある展開が期待される。

⑤ レーザー量子ビーム科学

ア レーザー駆動型の電子・イオン・中性子ビームの現状

レーザープラズマ航跡場による電子加速 (LWFA (Laser Wake Field Acceleration))⁵ 研究においては、米国、仏国、韓国において GeV 級の電子線発生技術が確立しつつある[43][44][45]。一方、我が国では、文科省光拠点事業や内閣府 ImPACT 事業など(参考資料 4)により、使える電子ビームを目標に世界で最も安定なレーザープラズマ電子加速ビームを実現している。更なる高エネルギー電子線発生やビーム品質の高度化のために、加速の多段化が進められている。レーザー電子加速研究の長期的な目標は、従来の加速手法では困難と思われる超高エネルギー領域の電子線発生であり、中期的にはレーザー加速電子による X 線自由電子レーザーの実現が挙げられる。既にレーザー加速電子をアンジュレータに入射する試みが各国で進められてお

⁵ 「レーザープラズマ航跡場による電子加速」とは、超高強度超短パルスレーザーとプラズマとの相互作用によりレーザーパルスの背後にできる大振幅の電子プラズマ波の電場(航跡場)で電子を加速することである。

り、我が国においても、文科省の未来社会創造事業（参考資料4）において軟X線領域のアンジュレータ光発生の研究が進められている。

また、LWFAとは異なる手法として、パワーレーザーで誘電体光共振定在波加速管を作成し、加速強度：数GV/mで電子を加速するレーザー誘電体加速(LDA)の研究も進められている。リニアコライダーの小型化を目指して、スタンフォード大学などを中心に研究開発の輪が広がっている。現状数10 MeV電子を入射し、数10 keVのエネルギーゲインが得られている。またDESYなど10機関が研究コンソーシアムを形成して、共同研究・Workshop活動を世界レベルで展開している。ビームサイズが1 μ m程度のマイクロ電子・X線源も可能であり我が国で関連する研究が行われている。

レーザーイオン加速の研究については、レーザーを薄膜に照射した際の標的裏面に発生するシース電場によりイオンを加速する方法を用いて、数 μ mの加速長で90 MeVを超える陽子線や15 MeV/NucleonのFe²⁵⁺イオン線等が得られている。そのほか、輻射圧加速法や、標的にクラスターを用いる新しい手法の提案もなされており、基礎研究が続けられている。電子加速と同様に既存の手法では困難な超高エネルギー領域のイオン発生という長期的な目標に加えて、中期的な目標として医療用がん治療装置の小型化を目指す研究が各国で行われている。我が国においても、レーザー加速技術を用いた小型重粒子線がん治療装置（量子メス）の提案がなされており、文科省の未来社会創造事業の中で、レーザー加速入射器の研究開発が行なわれている。また、多段マイクロイオン加速システムも検討されており、1 MeV/1 μ mの卓上システムを設計中で、細胞DNAの放射線損傷修復の時間分解分析及び遺伝子分析への応用研究が検討されている。

新しい中性子源として、レーザープラズマ加速イオンやレーザー駆動ガンマ線による中性子ビーム発生に関する研究が世界で進められている。従来の中性子源に比べ、短パルス(nsec以下)でかつ小さな線源(数mm以下)という特徴を持つため、新たな非破壊検査などの産業応用から恒星内中性子環境における元素生成の再現という原子核物理学などの学術にわたる広い応用の可能性が期待されている。我が国では、レーザーイオン加速による世界最高の中性子発生(10^{11} n/pulse)に成功している。さらにレーザー駆動冷中性子発生の実証で世界を先導している。このような実績とレーザー駆動中性子源の発展途上国への貢献の可能性から、2019年に日・米・独・英・イスラエルの5か国により国際原子力機構（IAEA）においてSDGsへ向け諮問委員会「レーザー駆動中性子・X線源」が設置された。また、関連する様々な分野（パワーフォトンクス、プラズマフォトンクス、核物理学、素粒子物理学、宇宙物理学、加速器科学など）が横断的に協働しようという国際的な機運が生まれ、ニュークリアフォトンクスという新しい学術領域が誕生しつつある。

イ 今後の課題：レーザーによるコンパクト加速器への展開

レーザー加速により非常にコンパクトな電子加速器やイオン加速器が実現すれば、大型の加速器を必要とする放射光利用研究、素粒子研究、そして放射線影響学などの学術研究や、重粒子線がん治療装置の小型化、新材料創出に資するイオン注

入装置、そして可搬型レーザー中性子源等、医療・産業分野において広い用途が期待できる。特に学術研究においては、物質科学や生命科学の分野からX線と中性子を同時に同じ場所で活用できる全く新しい複合的な放射線源には大きな期待が寄せられている。これらの実現に向けた重要な技術的課題は、ハイパワーレーザーの高平均出力化と、パルスコントラストや集光技術の改善、そして安定性の向上である。特に高平均出力化についてはkWを超える励起光源の開発が必要である。これらを踏まえた上で、中核拠点においては技術的なハードルが比較的低い性能領域でのレーザー加速器を実証し、応用展開できるシステムに実装することが期待される。

⑥ 原子力及び宇宙分野への応用

ア 原子力分野及び宇宙分野におけるパワーレーザー応用の現状

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同位体分離が可能である。例としてセシウム (Cs) については、長寿命核分裂生成物として ^{135}Cs があり、その中性子核変換による消滅処理が検討されているが、その前段階として ^{135}Cs と ^{133}Cs の分離が必須となる。この同位体分離を効率的に行うために、CsI 分子の回転準位の同位体シフトに着目してレーザー駆動の高輝度テラヘルツ光源により一方の同位体の回転準位を選択的に励起・電離する提案がなされており、基礎研究のレベルで従来法に比べて 100 倍以上の選択性が示されている。また、核医学用放射線同位元素（脳医学やがん検診の PET (Positron Emission Tomography) に用いられる短寿命放射性元素）は、すべて日本以外の研究用原子炉で生成され、現状ではすべて輸入に頼っている。カナダ・アメリカ・日本では 40 MeV 40 kW クラスの電子ライナックを医学利用する研究開発が開始されている。レーザー電子加速によっても 40 MeV の電子ビームは発生可能であるが、強度と収率の向上が課題となる。

レーザーを 10^{23} W/cm^2 以上の集光強度で固体薄膜に集光すると、30 %程度という非常に高い変換効率でレーザーのエネルギーが MeV 領域の電磁波に変換されることが理論的に予測されている[46]。この高輝度パルスガンマ線（ガンマフラッシュと呼ぶ）の発生技術が実現すれば、原子炉等の大型構造物の内部の透視技術への応用や、現状で大量のコバルト線源の保管及び遮蔽を必要とする大規模ガンマ線照射施設をレーザーで置き換えることが可能になる。

さらに原子炉の廃炉作業における高出力レーザー切断技術は、解体時の放射性微粒子の放出・拡散を従来法に比べて低減できる技術として世界的に注目されており、厚さ 30 cm 程度の鋼材の切断はすでに実証されている。また、解体時の作業員の被ばく量を低減するためにロボット技術との融合も進んでいる。我が国においても、文科省の地域科学技術実証拠点整備事業等により切断対象物の溶断状況に応じてレーザー照射条件を自動制御するロボット協調・レーザー溶断適応制御システムの研究開発が進められている[47]。

深刻な宇宙環境問題として 1950 年代に始まった宇宙開発競争の結果による宇宙の廃棄物(デブリ)問題があり、このデブリの検出・除去手法の開発が重要な課題となっている。現在、事故や故障で制御不能になった人工衛星やロケットやそれらの部品、さらにデブリ同士の衝突で生まれた微細なものまで、約 3000 トンのデブリが漂っており、それらが異なる方向の軌道を相対速度 10km/秒超で飛び交っている。実際、2009 年に、機能停止中のロシアの軍事通信衛星と、米国イリジウム社の低軌道通信衛星が衝突し、多量のスペースデブリが発生した。近年、中国やインドによる軍事標的衛星をミサイルで撃破する実験や、デブリとデブリや衛星との衝突による急激なデブリの自己増殖が懸念されている。

活動中の人工衛星や宇宙ステーション等とデブリの衝突は人命にも関わるため、効率的で実現可能なデブリ除去技術の開発が求められている。10cm 以上の大型のデブリ(3 万個余)の除去には、減速専用の衛星を打ち上げる方法や導電性テザー法、プラズマ推進機を利用する方法などが提案されている。[48][49][50]。一方、1～10 センチメートル (cm) サイズの微少なスペースデブリは 75 万個以上、0.1cm サイズまで含めると 1 億個以上存在すると推定されているが、小さいため地上からの観測と検出が困難である。これら 1cm-10cm サイズのデブリ除去のため、未実証ではあるがハイパワーレーザーを利用する方法等が提案されている[51]。

もう一つの宇宙環境問題として、地球衝突小天体がある。2019 年 7 月 25 日、直径 130 メートルほどの小惑星「2017OK」が秒速 25km で地球一月の距離の 1/5 のわずか 7 万キロの近傍を通過した。地球に向かってきたために光学観測により発見が難しく、驚くべきことに通過の 2 時間前にその存在が分かった。1km 以下の地球衝突小天体は 10%程度しか発見されていない。実際 4 年前にロシアで 17m の小惑星がシベリア中部のチェリャビンスク近郊に落下し、1,500 人以上がけがをし、7,400 棟の建物が被害を受けた。地球衝突小天体の観測と軌道変更等の対策が求められている[52]。

イ 今後の課題：パワーレーザーの原子力分野及び宇宙分野への展開

高出力レーザー励起テラヘルツ光源によるセシウムの同位体分離については、実用化に向けたテラヘルツ波の高平均出力化と波形制御技術を進めることで、原理実証を早急に行うことが重要である。実証試験には 10mJ/10Hz 程度の波形制御をしたテラヘルツ源が必要であり、それには 10J/10Hz/ 1 ps 程度の励起光源が求められる。

核医学用放射線同位元素 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の 40MeV40kW クラス電子ライナックによる生産システムについては、日本の主要供給 1 社によって建設中である。一方、同様のシステムで、 γ 線 ^{226}Ra ターゲット照射で、 ^{225}Ac (α エミッタ：がん治療薬) を生成できる。この医薬品としての市場規模は $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ (γ エミッタ：診断薬) の約 10 倍の予測されている。このシステムも、レーザー電子加速で達成可能であり、強度・収率の向上が課題となる。

高出力パワーレーザーによるガンマ線フラッシュ発生については、従来のペタワット級レーザーでの予備的実験の結果を踏まえて、将来の 10 ペタワット級レーザ

ーを利用する際のレーザー照射条件を最適化することが重要である。この技術が実現すれば、原子炉のような大型構造物の透視技術への応用が期待される。また、原子炉の廃炉作業に資する高出力レーザーによる切断技術については、切断対象物の溶断状況に応じてレーザー照射条件を自動制御し切断の効率を向上させる手法の開発し、レーザー切断制御装置の実証試験に進むことが重要である。

最近、経済界としても、持続的・安定的な宇宙空間利用を妨げる宇宙空間の混雑化や宇宙ゴミ増加を大きなリスクとして取り上げ、防止対策を促している[53]。衛星の残骸などの宇宙ゴミ除去を目指した初の民間企業も立ち上げられ、2020 年中に模擬衛星の除去試験が予定されている[54]。一方、安全な宇宙環境を維持するには、圧倒的に多数の 10cm 以下のデブリ除去も喫緊の課題である。そのためには本提案にある「高繰り返しパワーレーザー」が有力な手段となる。さらに、軌道上の宇宙ゴミ除去のみならず、地球衝突小天体の軌道変更の手段としても期待される。

なお、宇宙応用で用いられるパワーレーザー技術は軍事転用の可能性もあり、日本学術会議の 2017 年 4 月 13 日の報告「軍事安全保障研究について」にある行動規範を遵守することが求められる。

(3) ハイパワーレーザーの産業応用

我々の社会において、先端的な学術と産業が緊密に連携し、正のフィードバックをかけつつ双方が同時に発展することが極めて重要であり、この過程で育成される人材はその後の科学技術及び産業創成の原動力となる。この循環がうまく回ると、学術及び産業の発展と人材育成をスパイラル的に展開することができる。

① 国外における学術と産業創成の循環例

ハイパワーレーザー開発に関する、外国におけるこのような循環の例を以下に示す。

ア レーザー核融合研究

米国を中核とするレーザー核融合研究において MJ 級高エネルギーレーザーシステムが開発され、この過程でレーザー及び各種光学素子の高度化、レーザー自動運転システムなど、多くの革新的技術が開発された。開発された多くの技術はベンチャー企業により事業化され、米国の産業に国際競争力を生み出している。

イ 高強度光科学の普及と拡大（参考資料 7）

CPA の発明により小型・高強度 T-cube レーザーが実現され、世界中の多くの小～中規模の研究機関が超高速・高強度光科学研究への取組を開始した。更に近年、PW 級レーザーによる超高強度光科学が本格化し、研究に参画する研究機関及び研究者数が大幅に増加しており、中国では 100PW 級レーザーの開発が開始されている。研究の進展に伴い、超短パルス・高出力レーザーの市場が大きく拡大し、特にフランス企業が急速に事業を拡大している。

ウ レーザー加工による産業の革新

ドイツでは、同国の基幹産業である製造技術の革新を目指し、フラウンホーファー研究機構等が中核となって高平均出力レーザー及びレーザー加工技術の開発を国

家プロジェクトとして 1980 年代から継続的に推進してきた。その結果同国企業による加工用レーザー及びレーザー加工システムが世界市場を牽引し、更に IoT とレーザー加工が融合した Industry 4.0 の構想のもとで産業革新を実現しつつある。

エ 高出力半導体レーザーの実用化

高出力半導体レーザー(LD)の量産による低価格化が進められ、高効率・高出力全固体レーザーが実用段階に入った。加工用レーザーが先導し、研究用レーザーも LD 励起に置き換わりつつあり、レーザー核融合やレーザー駆動量子ビームの実用化が視野に入ってきた。レーザーが生産、医療等の広範囲の分野で主要な役割を果たす時代に入っている。

オ 迅速な研究展開と人材育成

欧州では、新たな研究分野を積極的に開拓するため、国、研究分野、研究機関の壁を超えて研究者が緊密に連携し、共同研究と人材育成が実施されている。これを支える仕組み(Laserlab Europe)が効果的に機能し、レーザー研究者・技術者への需要が供給を大幅に上回るなど、学術及び産業の発展と人材育成がスパイラル的に発展している。

② 我が国のレーザー開発における学術の進展と産業の創成

我が国では、大阪大学レーザー核融合研究センター（現レーザー科学研究所）が中核となり、ハイパワーレーザーによる核融合研究が進められている。リン酸レーザーガラスが我が国で開発され、これを用いた激光レーザーシステムによりその優れた性能が実証された。レーザー核融合研究により、我が国の大型光学素子の加工・検査技術が飛躍的に進歩し、飛躍的発展期を迎えた大規模集積回路製造の基盤技術として我が国の電子産業を支えた。また、ハワイ島マウナケア山に設置されたすばる望遠鏡や現在建設中の大型光学望遠鏡 TMT でもこの光学技術が用いられるなど、我が国の基礎科学を支えている。日本の光学企業が我が国の研究を支える共に、高性能大型光学素子を外国の企業や研究所に供給するに至っている。

核融合用新型レーザーとしてエキシマーレーザー開発も進められ、この開発から生まれた高出力エキシマレーザーが投影露光用短波長光源として事業化され、大きな世界シェアを占めるに至っている。次世代リソグラフィ用 EUV 光源開発において、レーザー核融合研究者により初めて示された高い EUV 変換効率を実現する方法が我が国で実用化され、外国企業と激しい競争状態に入っている。

また、我が国で開発されたセラミックレーザーが事業化され、大口径・高出力レーザー材料として英国ラザフォード研の 100J, 10Hz レーザー DiPOLE に採用されるなど、新レーザー材料として世界の多くの研究所、企業で使用されつつある。

一方高強度レーザーに関し、阪大レーザー研で核融合用ガラスレーザーの CPA 化が世界に先駆けて 1991 年に実現され、高速点火レーザー核融合を我が国が先導する原動力となった。高強度光科学研究に本格的に取り組むため、原子力研究所関西研究所（当時）が京阪奈学研都市に新設され、100TW レーザーを中核とする研究が 2000 年に開始された。同研究所の提案により、T-cube レーザーが科学研究にもたらすインパクトを

検討するワーキンググループが OECD Global Science Forum に 2000 年に設置され、これを基に超高強度レーザー委員会(ICUIL)が IUPAP に 2004 年に設立され、超高強度レーザーが世界の多数の研究機関で建設される大きな推進力になった。

産業用高平均出力レーザー開発は、経産省大型プロジェクトとして 1980 年代に開始されたが 20 世紀末に終了し、日本とほぼ同時期に開発を開始したドイツに大きな後れを取るようになった。幸い、高出力 LD 励起全固体レーザー開発が大阪大学と浜松ホトニクス(株)の共同研究として 1980 年代に開始され、開発されたレーザーの長期間運転により高出力 LD の性能と信頼性が実証された。同社では、高出力 LD 量産技術確立し、更に LD 励起・低温ヘリウム流冷却ディスクによる 100 J, 10 Hz 高出力レーザーを開発中であり、我が国でもレーザー核融合やレーザー駆動量子ビームの実用化が可能な段階に入ってきた。

③ 今後の課題：学術・産業・人材育成のスパイラル的發展

上記のように、我が国でも高出力レーザーに関し多くの優れた研究と技術開発が行われ、高度な技術基盤を有している。産業に対しても多くの貢献が行われてきた。しかしながら、外国と比べ特に人材育成に関し我が国は大きく遅れている。そこで、今後我が国として取るべき取組を以下に提言する。

ア レーザー産業の強化

我が国では、1970 年代から 90 年代に多くの企業でレーザーの事業化が推進されたが、パワーレーザー開発は現在一部の企業に限られている。これは、大型の国家プロジェクトがなかったことで産学官の連携が要素技術開発にとどまり、優れた要素技術を保有しているにも関わらず知識集約型のパワーレーザー産業が伸び悩んだことによると言える。このような状況ではあるが、これら企業は極めて意欲的であるので、国際競争力のあるレーザー開発を実施することは可能である。レーザー・光産業を強化し、Industry 4.0、Society 5.0 に象徴される新しい時代に対応できる産業の創成と社会基盤の構築が極めて重要であり、パワーレーザー科学技術の中核拠点と研究ネットワークの充実が期待される。

イ レーザー研究拠点の構築

欧米では、高出力レーザーを中核とする研究機関が多数存在し、それらが連携して多様な新分野開拓を推進している。我が国では、阪大レーザー研、量研機構関西研、電通大、理研、東大物性研などが相補的に異なる分野の研究を推進しているので、これら研究機関が連携し、高出力レーザーに重点を置いたレーザー研究拠点構築の重要性をアピールし、この分野の総合的發展を目指すことが必要である。

ウ 研究分野、研究機関の協調による研究展開と人材育成

新分野を開拓するには、多様な研究分野、研究機関が協調し、大規模な連携体を構築してプロジェクトを推進することが必要である。このため、研究拠点の構築に加え、大学、産業界を含めた多くの研究者・技術者が広く参画できる仕組みを迅速に構築し、学術・産業・人材育成のスパイラル的發展を目指すべきである。

(4) 人材育成と産学官連携

① 産学連携によるキャリアパスの構築

我が国では、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」等の枠組みにより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）（参考資料8 図1、図2）と「高強度・高エネルギーレーザー応用」（参考資料8 図3、図4）と「レーザープロセッシング」（参考資料8 図5、図6）の講演件数の推移から見てみる。高エネルギー密度、レーザープロセッシング関連の講演数は1997～2004 の平均が75件に対し、2005～2019 の平均は85件でこの間15年で約14%増加している（参考資料8 図7、図8）。レーザー装置についてはこの間約25%増加し、最近はおおよそ55件前後で推移している。一方、近年我が国の研究力の低下がさまざまな統計データにより示されている。例えば物理学分野の発表論文数は2003年をピークとして減少の傾向が明らかであり、2003年を1とすると2015年には0.75にまでに低下している[55]。このことは、研究力低下の傾向の中でもレーザー学会の活動が維持され、この分野のポテンシャルの高さを示している。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件と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。

一方欧米では、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としてとらえられており、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。EU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、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。この

ことは、基礎研究としての大型高強度レーザー開発がレーザー関連産業の研究開発力を牽引していることを示している。

② 今後の課題：中核拠点の構築とそれに連携した人材交流の活性化

先に述べたように、我が国のこの分野の研究及び学会活動のポテンシャルは理工系全体の研究力低下の傾向の中でも高く維持されている。一方で、高出力レーザー技術を活用する情報学とものづくりという認識のもと、高強度高出力レーザー開発とその研究拠点形成が進行中である欧米各国と比べ、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。人材育成にあつ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、民間企業との共同及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。

将来、産業への貢献が期待される大型パワー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、繰り返しパワーレーザー開発と高エネルギー密度科学研究の中核拠点の構築と、それに連携した産学官の人材交流の活性化が喫緊の課題である。

3 目指すべき今後の課題

第2章では、パワーレーザーによる高エネルギー密度科学の現状、動向と我が国の課題をまとめた。これまで、高出力レーザー開発、レーザー核融合、レーザー粒子加速、高エネルギー密度の物質科学、地球惑星科学と宇宙デブリ除去への応用、真空破壊などの超高強度場の物理、並びにレーザー加工などのパワーレーザーと高エネルギー密度科学の産業利用の分野において我が国の取組が世界をリードしてきたと言える。一方、大型パワーレーザー施設の整備が海外で急速に進み、この分野の学術と産業利用が急速に進展している。パワーレーザーによる高エネルギー密度科学は、基礎科学に加えレーザー核融合などのエネルギー開発や医療・インフラ・材料分野も含んだ革新的な価値の創造やイノベーション創出を実現する多様性ある科学であり、世界の先進国で精力的に研究開発が行われている。本小委員会はこの状況においては、今後以下の取組が重要であると認識した。

(1) 高繰り返し化によるパワーレーザーと高エネルギー密度科学の量子的飛躍

高エネルギー密度科学は社会課題解決と価値創造の源泉となる科学である。産業界も加わることで発展した繰り返し化という新たなパワーレーザー技術の出現により、シングルショットベースの装置で開拓されてきた高エネルギー密度科学研究開発において量子的飛躍が予想される。従来、パルスエネルギー出力 10kJ 程度の出力のパルスレーザーでは、2 時間に 1 ショット (0.0001Hz) 程度の繰り返しであるが、これを 1 秒間に 100 ショット (100Hz) の繰り返し動作になること（基盤技術の量子的飛躍）で、高エネ

ルギー密度科学に変革をもたらす。特に、高エネルギー密度科学の量子的飛躍として、これまで不可能であったことが可能となる事例を以下に示す。

- ・従来の材料開発に比べ2桁高い圧力状態での材料開発（スーパーダイヤモンド等）や1桁以上大きな大面積レーザープロセスの開発が可能となる。
- ・1-10Hz 繰り返しレーザー核融合反応（未臨界状態）によるレーザー核融合発電のデモと発電システム開発が可能となる。
- ・理想的には、従来の10万倍(100Hz)のビッグデータ、現実的なショット対応でも100-1000倍(0.1-0.01Hz)の飛躍的なデータ数増加によるデータ駆動解析や高精度データ解析（従来の10倍以上）が可能となる。これにより太陽フレアや乱流状態の宇宙プラズマの予測、さらにレーザー核融合点火燃焼のための最適化など多方面で機械学習（AI）やデータマイニングによる解析と数値実験が現実的となる。
- ・10-100Hz 動作のレーザー駆動量子ビーム（中性子や荷電粒子）ならびに2次放射線（テラヘルツ波—X線・ガンマ線）を利用した物性・材料研究、創薬や生命医科学研究への展開など、飛躍的な研究分野の拡がり期待できる。

(2) 高エネルギー密度科学の量子的飛躍を実現する環境整備

これまで、我が国の取り組みが世界をリードしてきたパワーレーザーと高エネルギー密度科学は多様性に富む分野であり、いろいろな公的競争資金により学際連携が進み、小型のパワーレーザー装置を研究室レベルで運用することで多様な分野の研究者が独自の研究を展開できるようになっている。これによりパワーレーザーならびに高エネルギー密度科学の多様性は一層広がりを示している。しかし、新たな知と高いレベルの価値を創造し、質の高いイノベーションを創出するには、多様性が実空間で散在するネットワーク型研究拠点だけでは、国際競争力に限界がある。多様性だけでなく、実空間における一体的な状態を目指すことが必要不可欠である。海外では高エネルギー密度科学の中核拠点として大型レーザー装置を擁する施設の整備や新設が継続的に進められている。それらの拠点では、関連する幅広い競争力ある技術が多方面から集積され一体性を高めることで、新たな技術が次々に産み出されている。

このような状況に対応し、大阪大学と量子科学技術研究開発機構を中核とする我が国の研究者コミュニティは、関連する他の分野や海外からの意見も取り入れて、繰り返し大型パワーレーザー施設（図2、施設整備費約350億円）を整備し、テラヘルツからX線・ガンマ線・中性子源など多様な量子ビームを発生し、機械学習技術も活用してその高度利用を図ることで、パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の研究開発と人材育成並びに産業創成において量子的飛躍を目指すこと（参考資料2）を提案している。そこでは、人工知能・情報工学の技術（AI技術）を取り入れることで、繰り返しパワーレーザーの精緻な制御と安定動作及び高品質の実験データを大量に生成・解析することも可能にして、広範な分野の多くのユーザーの要望に応えるとしている。

我が国が多様な公的競争資金による産学官の研究開発により築いてきた高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する多くのコア・コンピタンスを生かしてこの科

学技術の飛躍的發展を追求することは、国際競争力のある産業創成のために極めて重要である。このためには、これまで高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術の研究開発を先導してきた大学と国立研究機関が組織を再編し、産業界とも協力して繰り返し大型パワーレーザー施設(図2)を整備してパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学において引き続き革新に挑戦する次代を担う人材育成のための中核拠点とし、そこを切磋琢磨する知の結集する組織として、パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の研究開発と人材育成並びに産業創成において量子的飛躍を目指すべきである。

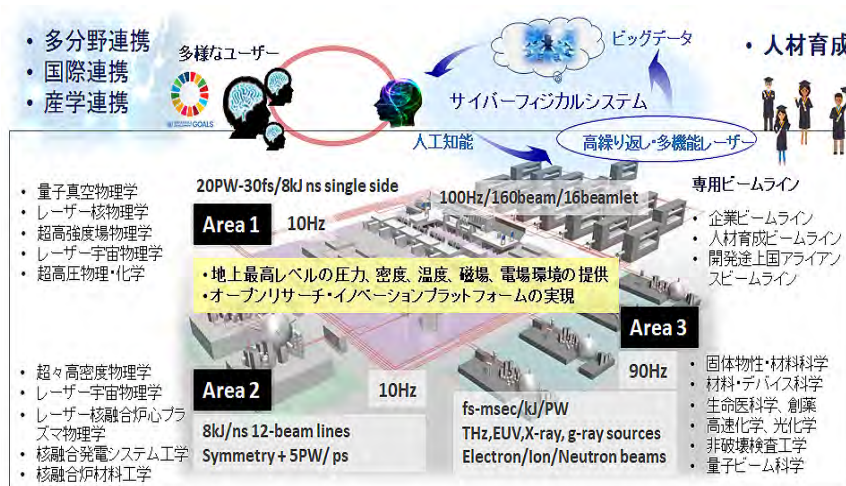


図2 多様な要望に応える次期大型パワーレーザー施設

(出典) パワーレーザーコミュニティ会議 (2018 年 11 月 28 日) 資料

4 提言

我が国において、大学と国立研究機関は、高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を産業界とも連携協力して推進し、多くの人材を育成し、先導的技術を生み出し、この分野におけるコア・コンピタンスを築いてきた。こうした人材育成と先導的技術開発への挑戦の取り組みを産業界の協力も得て一層強化してこの科学技術の更なる飛躍的發展を追求することは、我が国における次の時代を担う国際競争力のある産業創成に極めて有効であり、鮮烈な国際競争の動向に鑑みれば急務である。

よって、これまで高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を先導してきた大学と国立研究機関は、産業界と連携して知と技術を集約し、組織改編で世界最高レベルの繰り返し・高出力の大型パワーレーザー施設を高エネルギー密度科学推進の中核拠点として世界に先駆けて設置し、機械学習技術も活用して大型パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍を実現し、新たな学術の開拓や産業創成に繋がる価値創造・人材育成を行う切磋琢磨・共創の道場とするべきである。

<参考文献>

1 はじめに

- [1] 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、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」(2016年8月24日)
[www.scj.go.jp > info > kohyo > pdf > kohyo-23-h160824](http://www.scj.go.jp/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h160824)
- [2] Laserlab EUROPE: <https://www.laserlab-europe.eu>
- [3] A Consensus Study Report of the National Academies of Science・Engineering・Medicine, “Opportunities in Intense Ultrafast lasers”, <http://nap.edu/24939> (2018)

2 現状と課題

(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*, 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*, 71, 469-474 (2000).
- [7] Yusuke Mori, et al.; New nonlinear optical crystal: Cesium lithium borate, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 1818 (1995)

(2) 高エネルギー密度科学技術

① レーザー核融合エネルギー科学

- [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. D. Cable, S. P. Hatchett, J. A. Caird, J. D. Kilkenny, H. N. Kornblum, S. M. Lane, C. Laumann, R. A. Lerche, T. J. Murphy, J. Murray, M. B. Nelson, D. W. Phillion, H. Powell, and D. B. Ress, Indirectly Driven, High Convergence Inertial Confinement Fusion Implosions, *Phys. Rev. Lett.* 73, 2316 (1994).
- [11] R. L. McCrory, J. M. Soures, C. P. Verdon, F. J. Marshall, S. A. Letzring, S. Skupsky, T. J. Kessler, R. L. Kremens, J. P. Knauer, H. Kim, J. Delettrez, R. L. Keck & D. K. Bradley, Laser-driven implosion of thermonuclear fuel to 20 to 40 g cm⁻³, *Nature* 335, 225-229 (1988).
- [12] O. A. Hurricane et al.; Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion, *Nature* 506, 343 (2014); S. Le Pape *et al.*, *Fusion Energy*

- Output Greater than the Kinetic Energy of an Imploding Shell at the National Ignition Facility, Phys. Rev. Lett. 120, 245003 (2018).
- [13] M. Herrmann, Status and Progress on the National Ignition Facility, Fusion Power Associates Annual Meeting, December 7, 2017.
- [14] X. He., to be published in IFSA2019 Proceedings.
- [15] R. Kodama et al., Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition, Nature 412, 798 (2001); Fast heating scalable to laser fusion ignition, *ibid* 418, 933 (2002).
- [16] S. Sakata et.al., Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states, Nat. Comm. 9, 3937 (2018).
- [17] K. Matsuo., Peta-Pascal Pressure Driven by Fast Isochoric Heating with Multi-Picosecond Intense Laser Pulse, to be published in Phys. Rev. Lett.
- [18] J. Zhang., to be published in IFSA2019 Proceedings.
- [19] H Sio, et al., Observations of Multiple Nuclear Reaction Histories and Fuel-Ion Species Dynamics in Shock-Driven Inertial Confinement Fusion Implosions, Phys. Rev. Lett. 122, 035001 (2019).
- [20] 浅井朋彦 J. Plasma Fusion Res. Vol.93, No.1 (2017)18 - 20
- [21] 「変わりゆく国主導プロジェクト〜核融合研究にみる官から民への潮流」放射線ホライズン：<https://rad-horizon.net/nuclearpower-energy/1695-2018-01-19-06-36-11>
- [22] Stephen Hawking, Fusion Industry Association, <https://www.fusionindustryassociation.org/members>
- [23] V. Gopalaswamy et. al., Tripled yield in direct-drive laser fusion through statistical modeling, Nature 565, 581 (2019).

② 高エネルギー密度物質科学

- [24] Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), 2003, LCLS: The First Experiments, <http://slac.stanford.edu/pubs/slacreports/reports03/slac-r-611.pdf>.
- [25] P. Emma et al., Nature Photon. 4, 641 (2010).
- [26] Sinn, Harald APS Colloquium, Argonne, 2018-09-05 (2019)
- [27] T. Ishikawa, et al., Nature Photon. 6, 540 (2012).
- [28] S. Matsuyama, et al., Scientific Reports 8, 17440 (2018)
- [29] H. Yoneda et al., Nature 524, 446 (2015)

③ 超高压物質材料科学

- [30] 兒玉 了祐, 尾崎 典雅, 応用物理 88, 110 (2019)
- [31] R. P. Dias and I. F. Silvera: Science 355, 715 (2017).
- [32] T. Sekine et al.: Science Adv. 2, e1600157(2016).

- [33] L. Dubrovinsky, et al., : Nature 525, 226 (2015).
- [34] N. Ozaki et al.: Scientific Rep. 6, 26000 (2016).
- [35] K. Katagiri et al., Rev. Laser Eng. 47, 47(2018).
- [36] M. Tsujino, et al., Rev. Laser Eng. 36 1218(2008).
- [37] C. J. Pickard and R. J. Needs, Nature Material 9, 624(2010).

④ 量子真空光科学

- [38] Y. Mondenn and R. Kodama, Phys. Rev. Lett. 107, 073602(2011) ;
- [39] Y. Mondenn and R. Kodama, Phys. Rev. A 86, 033810 (2012).
- [40] M. Yano, et al.,, Phys Plasmas 25, 103104 (2018); M. Yano, A. Zhidkov and R. Kodama, High Energy Density Phys.30, 21 (2019).
- [41] E. Lundstroöm, G. Brodin, J. Lundin, M. Marklund, R. Bingham, J. Collier, J.T. Mendonça, and P. Norreys, 2006, Using high-power lasers for detection of elastic photon-photon scattering, Phys. Rev. Lett. 96: 083602.
- [42] R Kodama et al., Nature 432, 1005 (2004)

⑤ レーザー量子ビーム科学

- [43] W.P.Leemans et al.; GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator, Nature Physics 418, 696 (2006)
- [44] X.Wang et al.; Quasi-monoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV, Nature Communications 4,1988 (2013)
- [45] A. J. Gosalves et al., Phys. Rev. Lett. 122, 084801 (2019).

⑥ 原子力・宇宙分野への応用

- [46] T. Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. 108, 195001 (2011).
- [47] ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点(スマデコ)
<http://fsd.jaea.go.jp>
- [48] K.Kuriki, “Logical Steps to Moon, Mars and Beyond”, IAA.3.1 -93-686; Invited Talk of 44th Congress of International Astronautical Federation, Graz, Austria (1993).
- [49] 内閣府宇宙開発戦略室, 「スペースデブリ対策の取組について」(H30.11.13);
<https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kiban/kiban-dai43/pdf/siryou1.pdf>
- [50] Kazunori Takahashi, et al., Scientific Reports Vol.8, 14417 (2018). IEPC-2019, A852-1-A852-6 (Sep. 2019)
- [51] 佐宗章弘/内田成明/藤田和久/戎崎俊一/他 ; 「パワーレーザーの宇宙航空応用」特集号, レーザー研究 43, 9 (2015)
- [52] National Geographic Documentary, “Asteroid ! The Doomsday Rock” ;
<https://www.youtube.com/watch?v=G9zkFSGFBxU>

- [53] 経団連提言,「経済成長と安全・安心に向けた主体的・戦略的な宇宙開発利用の推進」
(2019.12.17); <http://www.keidanren.or.jp/policy/2019/112.html>
- [54] Astroscale Holdings Inc., “スペースデブリ The Threat Hanging Over Our Heads“;
<https://astroscale.com/space-debris/>

(4) 人材育成と産学官連携

- [55] 山口栄一京都大学教授資料（第2回国立研究開発法人イノベーション戦略会議）

＜参考資料１＞審議経過

令和元年

- 1月23日、24日 日本学術会議主催、国際シンポジウム「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学技術の展望」
在アメリカ合衆国日本国大使館と Carnegie Endowment for International Peace にて開催。併せて、日米科学協力事業「高エネルギー密度科学事業取り決め」調印式
- 5月22日 エネルギーと科学技術に関する分科会
ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会（第1回）
役員の選出、今後の進め方について
平成28年日本学術会議報告「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
- 7月19日 エネルギーと科学技術に関する分科会
ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会（第2回）
提言の趣旨について
ハイパワーレーザーと高エネルギー密度科学の現状について
- 8月16日 エネルギーと科学技術に関する分科会
ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会（第3回）
提言の構成について、執筆分担について
- 10月12日 エネルギーと科学技術に関する分科会
ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会（第4回）
提言骨子案について、今後のスケジュールについて
- 12月27日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第3回）
提言案「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成」について承認
- 5月28日 日本学術会議幹事会（第291回）
提言「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成」について承認

＜参考資料２＞コミュニティによる次期大型高出力パワーレーザー施設の提案

パワーレーザーコミュニティ会議：1000名規模のメーリングリストをもとにしたコミュニティの会議

2015年12月24日	高エネルギー密度科学新展開の重要性議論	
2016年 3月29日	高エネルギー密度科学推進体制議論	
2016年11月24日	推進体制キックオフ（阪大-QST協定）	
	2016年7月～2019年3月 レーザー学会専門委員会 物理系のコミュニティの意見を取り入れたJ-EPoCH概念設計	
2017年 5月 9日	レーザー学会専門委員会報告 建設ワーキングの必要性、産学連携・国際連携の重要性議論	
	2018年1月25日 レーザー学会年次大会シンポジウム 高エネルギー密度科学の進展	
2018年 5月 8日	概念設計議論（各分野からの要求仕様）	
	2018年11月1日 パワーレーザーフォーラム設置 （産学協奏の場）	
2018年11月28日	概念設計最終案合意	
	2019年1月23日 日米政府間科学技術協定新たな枠組み （高エネルギー密度科学）	
	2019年1月28日 革新的パワーレーザー建設ワーキング設置 （産学共創）	
	2019年4月 レーザー学会専門委員会 スマート大型施設（サイバー空間概念設計）	
2019年 6月12日	建設ワーキング、基本設計体制	

図1 高出力の次期大型パワーレーザー施設の提案の母体となるコミュニティ

（出典）パワーレーザーコミュニティ会議（2018年11月28日）資料

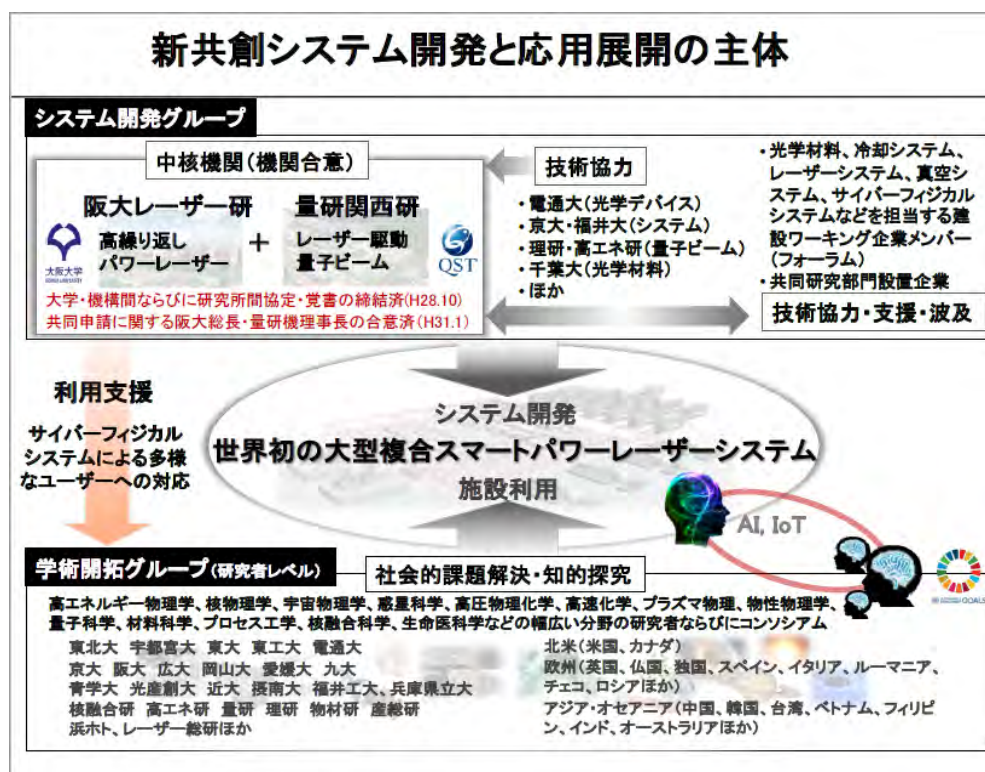


図2 提案された高出力の次期大型パワーレーザーシステムの開発・利用体制

（出典）パワーレーザーコミュニティ会議（2018年11月28日）資料

■ 大型レーザー施設のゲームチェンジ(パワーから機能性・多様性へ)

- ・ 世界初の多目的高繰り返し大型レーザー施設(MW高平均出力、100Hz、多種ビームで多様性へ)
ref. 世界一の出力(MJ): 米国2009年、世界一のピーク強度: 欧州10PW(2019)、中国100PW(建設中)

■ 他の施設ではできない学術フロンティア開拓

【極小のスケール】

➢ 宇宙の創世に関わる“真空の謎”に迫る。

- ・ 電場の物理極限に挑戦:

10Hz/10PW高繰り返し超高強度レーザーと独自のマイクロバブル爆縮(プラズマデバイス)により、世界初のシュウィンガー極限電場実現に挑戦

【身近なスケール】

➢ 地上に存在していない“新たな量子物質”を創生。

- ・ 超高压量子材料の探索:

100beams/8kJ超多ビーム高出力レーザーによる超高精度パルス波形成形パルスで、1億気圧以上の固体状態(極低温、極小に次ぐ新たな量子状態)を実現し、世界に先駆けて新量子物質材料を創成。

【大きいスケール】

➢ “レーザー核融合”でエネルギー創成を目指す。

- ・ 未臨界核融合発電炉の実現:

10Hz/8kJ高繰り返し高出力レーザーにより、世界初のレーザー未臨界核融合発電炉(数ワット発電)を実現するとともにトリチウム燃料増殖の実証や核融合炉材料を開発。



フロンティア開拓・学術深化・イノベーション創出

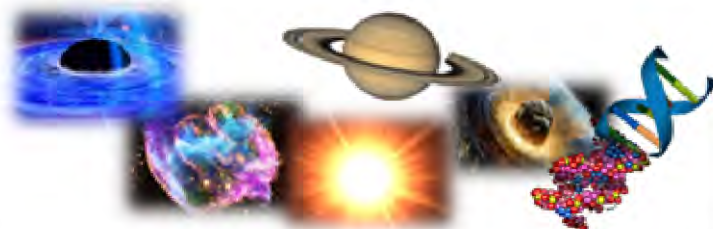
図3 提案された高出力の次期大型パワーレーザー施設の学術的意義

(出典) パワーレーザーコミュニティ会議(2018年11月28日)資料

＜参考資料 3＞高エネルギー密度科学

知の源泉:パワーレーザーで極限的な状態を実現し、自然界の謎に迫る

真空の謎、
宇宙とその誕生の謎、
星や太陽の謎、
地球や惑星の謎
プラズマの謎
物質の謎
地球生命誕生の謎
...



高エネルギー密度状態を活用したイノベーションの源泉

社会基盤

超小型レーザー加速器
宇宙デブリ除去
核融合エネルギー



ライフサイエンス

医療診断装置
創薬・バイオ診断装置



ものづくり

レーザー加工・プロセス
次世代非破壊検査装置



ナノ・材料

超高压新物質材料
超複雑構造機能性材料



様々な分野でイノベーションを生み出す可能性のある高エネルギー密度科学

(出典) ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会で作成

＜参考資料４＞世界の主要な高出力パワーレーザー 施設

国	研究機関	装置名	パルスエネルギー	波長	パルス幅	材料
USA	LLNL	NIF	1.7MJ (192beams)	355nm	3ns	Nd:glass
		ARC	10kJ	1053nm	5ps	Nd:glass
	U. Rochester	OMEGA	40kJ (60 beams)	355nm	1ns	Nd:glass
		OMEGA EP	1kJ	1053nm	1ps	Nd:glass
	Texas	Texas PW	130J	1053nm	130fs	OPCPA+Mixed glass (NOVA)
UK	LBL	BELLA	40J	1057nm	30fs	TiSapphire
	AWE	ORION	5kJ() 1kJ (2x500J)	351nm 1053nm	1ns 1ps	glass glass
		Rutherford A.L.	DiPOLE	1053nm	1ns	DPSSL
France	CEA	LMJ	1.5MJ	355nm	10 ns	Nd:glass
		PETAL	3.5kJ	1053nm	500fs	glass
	LULI	APOLLON	210J	800nm	21fs	TiSapphire
Germany	HZDR	PENELOPE	130J	1050nm	130fs	Yb:CaF ₂
Czec	ELI-BL	10 PW	250J	800nm	25fs	TiSapphire
Russia	IAP	XCELS	12x400J	910nm	25fs	OPCPA
	VNIIEV	UFL-2M	2MJ	533nm	3ns	Nd:glass
China	SIOM	SG-II upgrade	24kJ (8x3kJ)	355nm	3ns	Nd:glass
	SIOM	9th beamline	1kJ	1052nm	1ps	Nd:glass
	SIOM	SULF	250J	800nm	25fs	TiSapphire
	CAEP/Myanyang	XG-III	500J/3ns	355nm	fs+ps+ns	Nd:glass
		SG-III	250kJ (48 beam)	355nm	3ns	Nd:glass
		SG-IV	1.5MJ (288 beam)	355nm	3ns	Nd:glass
		SG test line	8.4kJ	355nm	3ns	Nd:glass
		SG test line	18kJ	1053nm	3ns	Nd:glass
	CAS/Shanghai	SG-IV Ignition Facility	1.5MJ	355nm	3ns	Nd:glass
Korea	KAERI		1kJ	1053nm	1ns	Nd:glass
	GIST		100J	800nm	25fs	TiSapphire
Japan	ILE/Osaka	G-XII	24kJ	1053nm	4ns	Nd:glass
	KPRI/QST	LFEX	10kJ	1053nm	1ps	Nd:glass
		J-KAREN	30 J	800nm	30fs	TiSapphire

(出典) 2019 年独自調査により小委員会で作成

＜参考資料５＞我が国のパワーレーザー研究・高エネルギー密度科学研究の関連事業と関係機関

①我が国のパワーレーザー研究に関わる連携事業

- 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
- 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（H20-H29）
 - ・先端光量子科学アライアンス：国内５機関
 - ・融合光新創成ネットワーク：国内４機関
- 内閣府革新的研究開発推進プログラム（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」：国内１０機関
- 科学技術振興機構未来社会創造事業(MIRAI) (H29-)
 - 「粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術」
- 日本学術振興会先端拠点事業（H19-H23）
 - 「高いエネルギー密度状態の科学」
 - ：国内１８機関＋国外２９機関（英米仏）
- 日本学術振興会アジア研究教育拠点事業（H23-H27）
 - 「高強度フォトンを使う高エネルギー密度状態の科学」
 - ：国内１機関＋国外３機関（中韓印）
- 日本学術振興会先端拠点事業（H25-H29）
 - 「X線自由電子レーザーとパワーレーザーによる極限物質科学国際アライアンス」
 - ：国内２１機関＋国外２４機関（英米独仏）
- 日本学術振興会研究拠点形成事業アジア・アフリカ学術基盤形成型（H31-）
 - 「アジアにおけるレーザー宇宙物理学国際研究教育拠点」
 - ：国内１４機関＋国外１５機関（中台印）

②我が国のパワーレーザーによる高エネルギー密度科学の発展に寄与した主要な機関（順不同）

【国内】

大阪大学、愛媛大学、茨城工業高等専門学校、茨城大学、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、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、愛知教育大学、海洋研究開発機構、埼玉大学、津山工業高等専門学校、長岡工業高等専門学校、三重大学、山形大学、量子科学技術研究開発機構（日本原子力研究開発機構）、若狭湾エネルギー研究センター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、中国科学技術大学、上海光機研究所（中国）、国立中央大学（台湾）、光州科学院（韓国）、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、応用光学研究所（LOA）、ソルボンヌ大学（フランス）、ジェネラル・アトムクス社、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、パデュー大学（アメリカ）、オックスフォード大学、ヨーク大学、クィーンズ大学ベルファスト（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、サラマンカ大学、カスティーリャ・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）フィリピン大学（フィリピン）ELI-Beamlines, チェコ科学アカデミー（チェコ）

マッセー大学（ニュージーランド）
ナコンパトム・ラチャパット大学（タイ）
ロシア科学アカデミー応用物理学研究所（ニジニ・ノヴゴロド）、
ロシア国立原子力研究大学（ロシア）
バンドン工科大学（インドネシア）
ベトナム科学技術アカデミー（ベトナム）
マプア大学（フィリピン）

＜参考資料6＞米国科学アカデミー報告「短パルス超高強度レーザーとその関連科学技術」

The National
Academies of

SCIENCES
ENGINEERING
MEDICINE

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS

This PDF is available at <http://nap.edu/24939>

SHARE



Opportunities in Intense Ultrafast Lasers: Reaching for the Brightest Light

DETAILS

346 pages | 7 x 10 | PAPERBACK
ISBN 978-0-309-46769-8 | DOI 10.17226/24939

CONTRIBUTORS

Committee on Opportunities in the Science, Applications, and Technology of Intense Ultrafast Lasers; Board on Physics and Astronomy; Division on Engineering and Physical Sciences; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine

GET THIS BOOK

FIND RELATED TITLES

OPPORTUNITIES IN INTENSE ULTRAFAST LASERS

Reaching for the Brightest Light

Committee on Opportunities in the Science, Applications, and
Technology of Intense Ultrafast Lasers

Board on Physics and Astronomy

Division on Engineering and Physical Sciences

A Consensus Study Report of

The National Academies of
SCIENCES • ENGINEERING • MEDICINE

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS

Washington, DC

www.nap.edu

(出典) ICUIL (International Committee on Ultra-Intense Laser) World Map 2019



＜参考資料 8＞レーザー学会におけるハイパワーレーザー関連講演数の動き

レーザー装置についてはこの 15 年間で約 25%増加し、最近はおおよそ 55 件前後で推移している。高エネルギー密度、レーザー加工関連講演数は 1997 年～2004 年の平均が 75 件に対し、2005 年～2019 年の平均は 85 件でこの 15 年間で約 14%増加している。

（レーザー学会事務局の取りまとめによる）

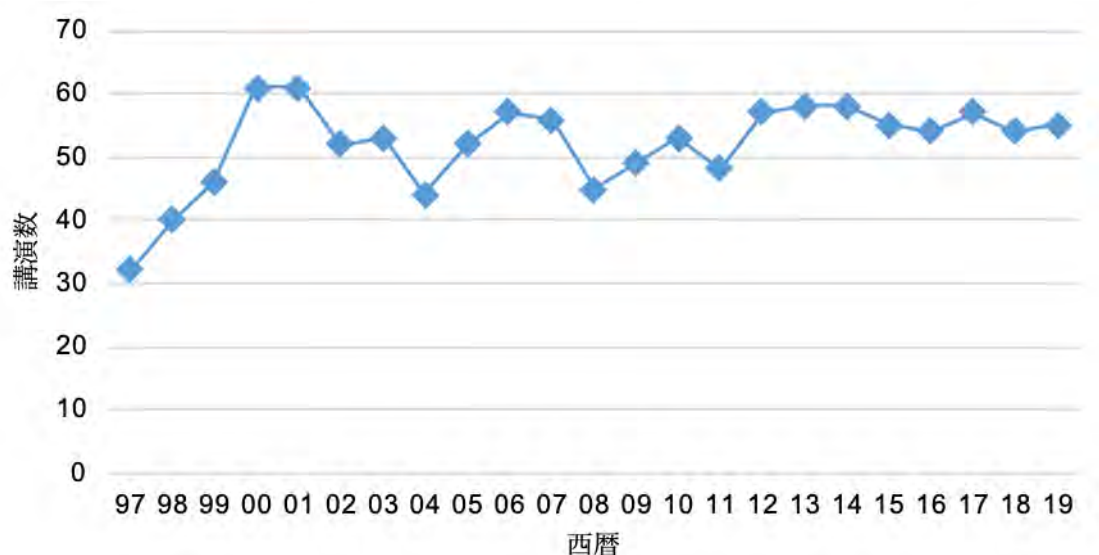


図 1 「レーザー装置」関連講演件数

（出典）2019 年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

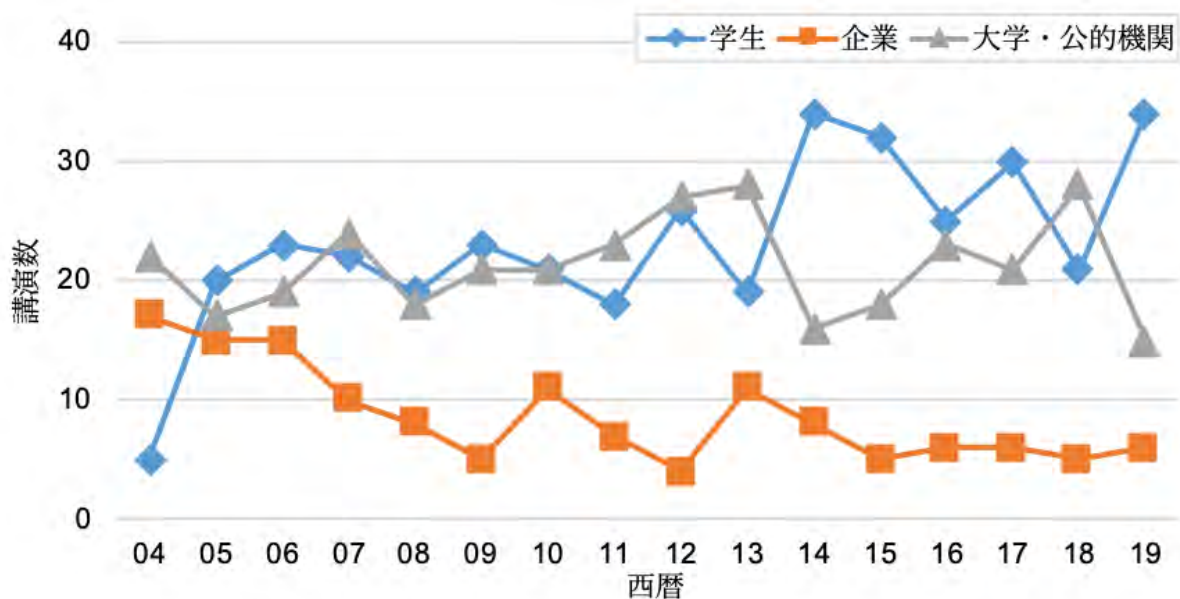


図 2 所属別「レーザー装置」関連講演件数

（出典）2019 年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

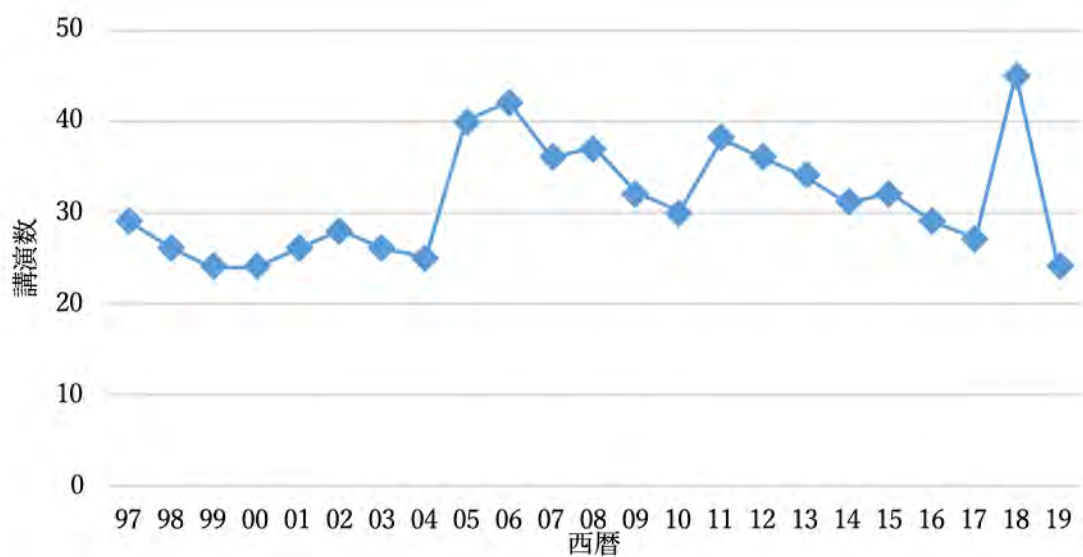


図3 「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数

(出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

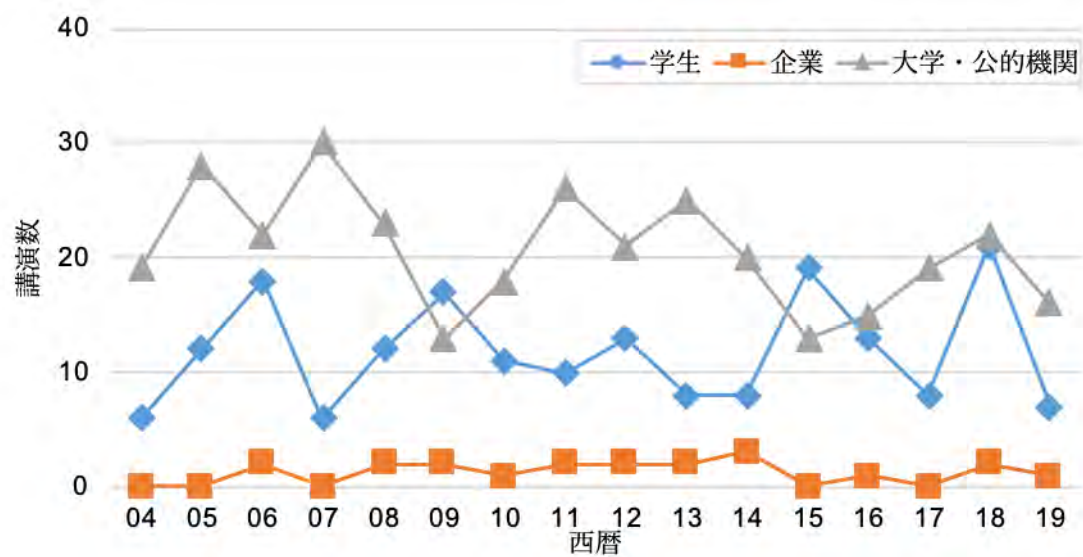


図4 所屬別「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数

(出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

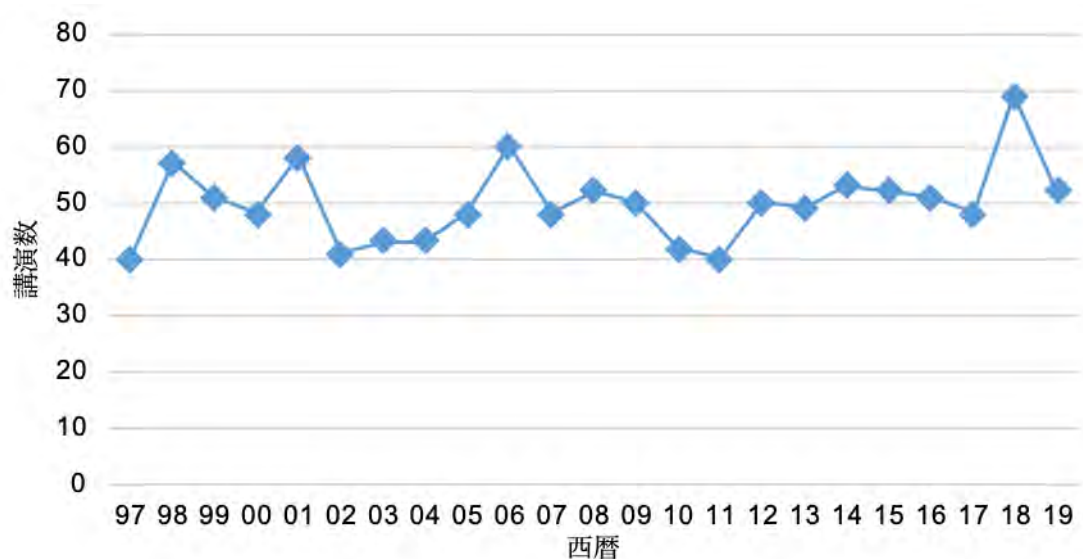


図5 「レーザープロセッシング」関連講演件数
 (出典) 2019 年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

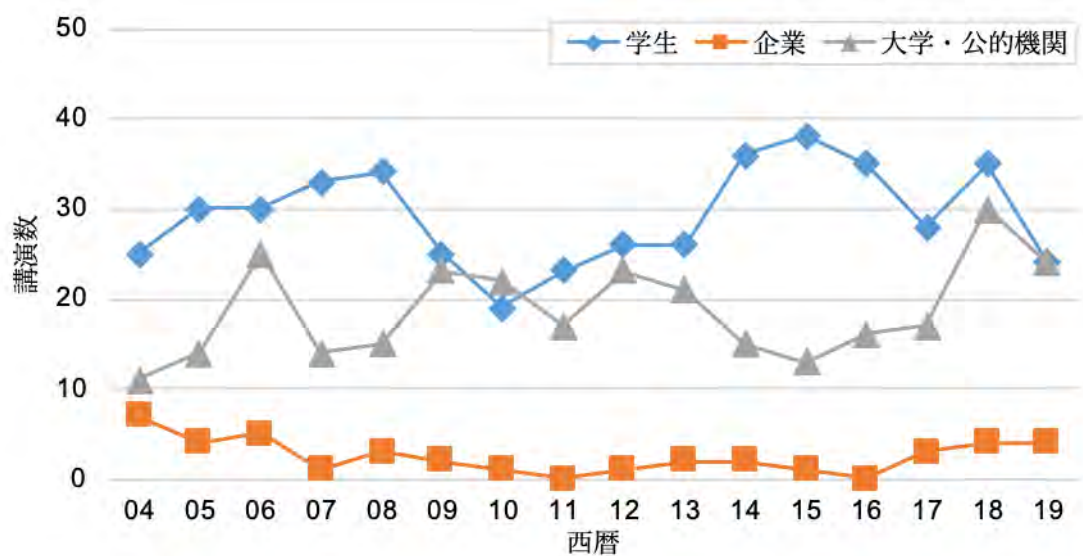


図6 所属別「レーザープロセッシング」関連講演件数
 (出典) 2019 年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

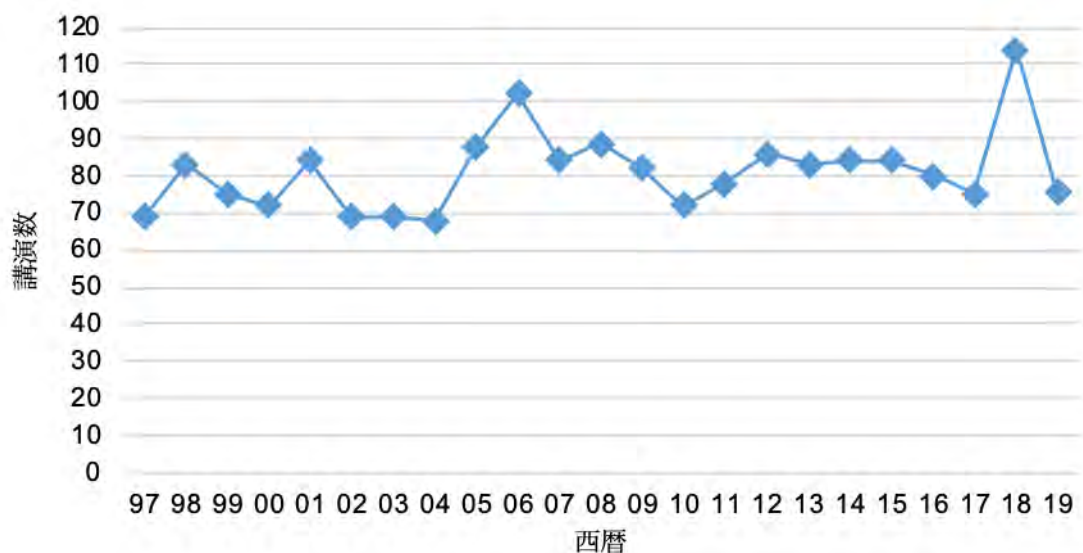


図7 「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数と
「レーザープロセッシング」関連講演件数の合計

(出典) 2019 年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

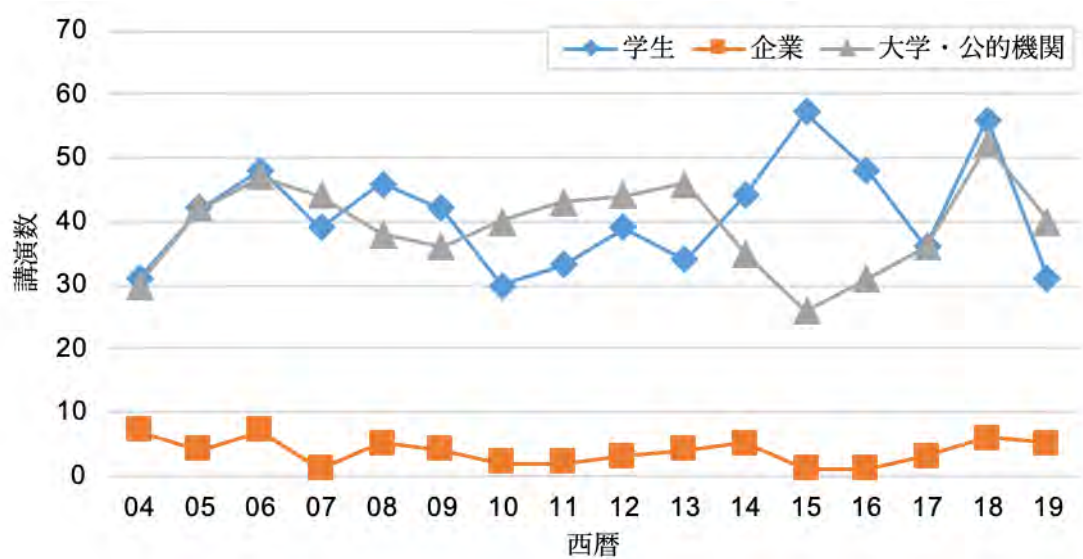


図8 所属別「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数と
所属別「レーザープロセッシング」関連講演件数の合計

(出典) 2019 年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成