

(案)

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）〇月〇日

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 囿興	(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	(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

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月の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)をまとめた。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。

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産業科学にも関係する。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中核的先進技術である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の技術開発が挙げられる。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、超高圧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、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、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

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、小型のパワーレーザーを研究室レベルで運用することで、いろいろな分野の研究者が独自の展開を行えるようになってきている。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見せている。さらに、海外では大型パワーレーザー施設の整備が急速に進み、優秀な人材が大型パワーレーザー研究施設を有する中核拠点に集まり、世界の研究をリードするべく最先端の科学技術の開拓を進めている。

このような状況に対応し我が国では、高エネルギー密度科学コミュニティだけでなく、関連する他の分野や海外のコミュニティからの意見を取り入れて、我が国の次期大型パワーレーザー施設が検討されている。この検討案は、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次世代の繰り返し・高出力の大型パワーレーザー装置により達成するものである。そこでは人工知能・情報工学の技術を取り入れて、レーザーの精緻な時空間制御と安定動作を可能にして、高品質データの大量生成という先鋭的な目的を実現するのみならず、多くの他分野からのユーザーを加えた新たなコミュニティの多様な要望に応えるとしている。この結果、次世代大型パワーレーザーを運用する中核拠点に知の結集が起こり、多様性と一体性を備えた知の環境が実現でき、新たな知と高いレベルの価値の創造や、質の高いイノベーションの創出が期待できる。

すなわち、大学、国立研究所等のパワーレーザー技術を新たな中核拠点に集約して一体性を強めることで、我が国の科学技術の国際競争力を飛躍的に高めることができ、世界の研究開発をリードすることが期待できる。さらに大学共同利用・共同研究拠点やその他の連携事業で培われたコミュニティを飛躍的に発展させ、世界に通じる人材育成や産業創成が可能になる。本小委員会は、このような環境を実現できる研究者コミュニティによる提案「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」を今後の取り組みとして高く評価した。

4 提言

我が国は、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成し遂げ、新たな学術の開拓と、産業創成に繋がる価値創造・人材育成を行うべきである。その実現には、大学・国立研究所・企業が知と技術を集約し世界最高峰の繰り返し・高出力の大型パワーレーザー施設を建設するとともに、産官学が一体となって高エネルギー密度科学推進の中核拠点を世界に先駆けて構築するべきである。

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	超高圧物質材料科学	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	16
①	産学連携によるキャリアパスの構築	16
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	17
3	目指すべき今後の取組	18
(1)	高エネルギー密度科学の量子的飛躍とそれを実現する環境の整備	18
①	パワーレーザーと高エネルギー密度科学の量子的飛躍とは	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	19
(2)	まとめ	20
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)をまとめた[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産業科学にも関係する。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的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。

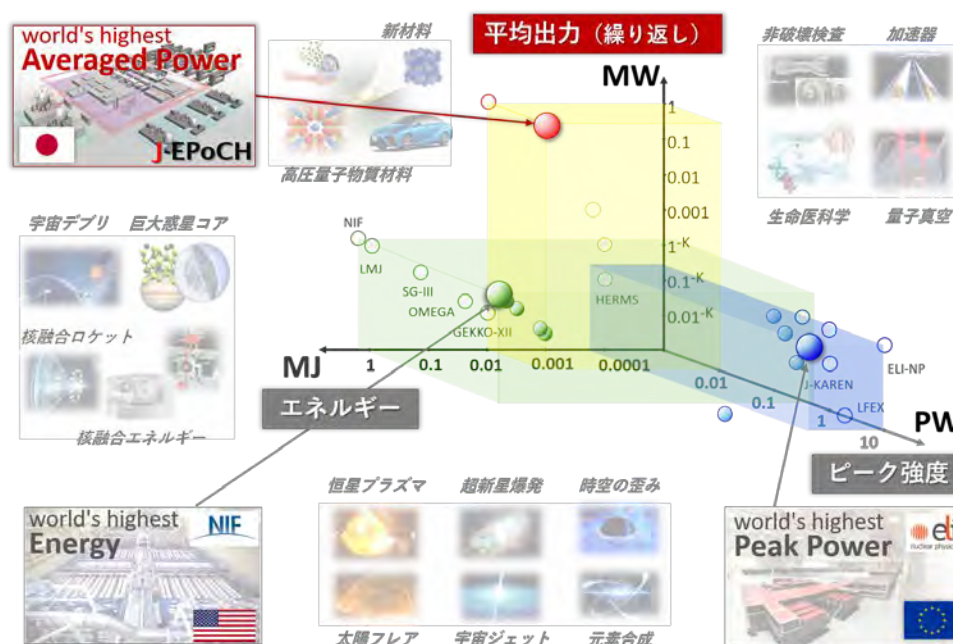


図1 ハイパワーレーザーの3つの特性（平均出力、ピーク出力、パルスエネルギー）と多様な関連科学技術分野（出典）ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会で作成

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)など的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、超高压物性、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、運用し、新しい科学研究を展開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

³ パルスエネルギー10J以上のパワーレーザー

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、プラズマフォトンニクス提案と実証、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。

今こそ、飛躍を目指す世界のパワーレーザー技術に対応するため、明確な目標とビジョンを示し、技術を継承・発展させる国家的研究拠点を構築することが必要である。

(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⁴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度[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

⁴ kHz 以上で繰り返すパワーレーザー

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、様々な拡がりがある。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、新たなに核融合に関するベンチャー企業が 20 社以上 [22]、世界で生まれている。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様な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⁵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、高繰り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}W/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]。

⁵ 毎分数パルス以上の繰り返し動作するパワーレーザー

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が増え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 超高压物質材料科学

ア 超高压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 つが超高压状態である。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压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、超高压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次元性と超高压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、従来の高压相転移に比べ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、超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、超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”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に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))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 Fe^{25+} 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(パワーフォトニクス、プラズマフォトニクス、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ニ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 $10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$ 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/1ps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。

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することで切断の効率を向上させる手法の開発を進めることで、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。

(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量産技術を確立し、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

日本では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、高出力レーザー開発は現在一部の企業に限られている。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

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ると、我が国ではレーザー関連産業へのこの分野のポテンシャルの波及が乏しいことを示している。

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 目指すべき今後の取組

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) 高エネルギー密度科学の量子的飛躍とそれを実現する環境の整備

① パワーレーザーと高エネルギー密度科学の量子的飛躍とは

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) 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

現在のネットワーク社会においては、学术界と産業界の連携・異分野の連携・国際連携により、多様性と一体性を実現し、よりイノベーションを生みやすい環境を創造することが期待されている。高エネルギー密度科学は、多様性の高い分野であり、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。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。

こうした世界の趨勢の中で、我が国においても、多様性の中から生まれる革新的な技術が世界最先端の研究インフラに集積し一体性を高める、多様性を活かした新たな環境（分散、集中と多様性の共存）を作り出すことが、早急に必要と考えられる。シリコンバレーに見られるように、技術が集積し知の結集が起こり、新たなディシプリンが生み出され飛躍的にセレンディピティを起きやすくすることが発展のカギとなる。

我が国においては多様な公的競争資金により学際連携が進み、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いる。その成果を集積する中核拠点の実現を目指した構想「高出力の次期大型パワーレーザー施設（図2）による高エネルギー密度科学の推進」が、参考資料2で示したように研究者コミュニティにより提案されている。この提案を高く評価し、国際競争の中で我が国が築き上げてきた知と技術の流出を抑え、これまで蓄積された高エネルギー密度科学の知見を集積し、国際的人材の育成を進めるため、世界に先駆けて繰り返し・高出力大型パワーレーザーを運用する中核拠点を設置することが重要と考える。繰り返しショット数の桁違いの増加と共に多種多様なレーザー駆動量子ビームや100を超えるレーザービーム数からなる次期大型パワーレーザー施設ができれば、高エネルギー密度状態の探究を目指す研究環境が桁違いに充実し、セレンディピティが飛躍的に起きやすくなり、高エネルギー密度科学の量子的飛躍が期待できる。さらに、図2に示したように、この次期レーザーは現在の世界一のレーザー施設（米NIF、欧ELI）とは別次元で世界一となり、国際連携による相乗効果も期待できる。

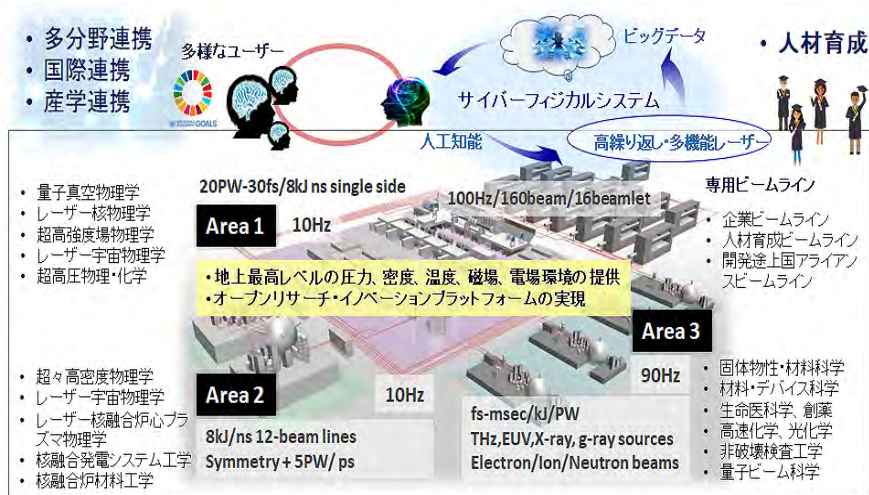


図2 多様な要望に応える次期大型パワーレーザー施設
(出典) パワーレーザーコミュニティ会議 (2018年11月28日) 資料

(2) まとめ

現在、高エネルギー密度科学コミュニティだけでなく、関連する他の分野や海外のコミュニティからの意見を取り入れ、図2に示したような我が国の次期大型パワーレーザー施設が検討されている。これはパワーレーザーとプラズマ技術を用いてテラヘルツからX線・ガンマ線・中性子源など多様な量子ビームを発生し、研究開発や産業に利用することを次世代の繰り返し・高出力の大型パワーレーザー装置により可能とするものである。さらに人工知能・情報工学の技術を取り入れることで、レーザーの精緻な時空間制御と安定動作が可能となり、高品質データの大量生成という先鋭的な目的実現だけでなく、従来のユーザーだけでなく多くの他分野からのユーザーを加えた新たなコミュニティの多様な要望に応えることができる。そして、次世代大型パワーレーザーを運用する中核拠点に知の結集が起り、多様性と一体性を備えた環境が実現でき、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創出が期待できる。

すなわち、大学、国立研究所等の技術を新たな中核拠点に集約し、一体性を強めることで、我が国の科学技術の国際競争力を飛躍的に高めることができ、世界の研究開発をリードすることが期待できる。さらに大学共同利用・共同研究拠点やその他の連携事業(参考資料5)で培われたコミュニティも飛躍的に発展させ、世界に通じる人材育成や産業創成に繋げることとなる。このような環境を実現できる提案「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」を高く評価する。

4 提言

我が国は、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成し遂げ、新たな学術の開拓と、産業創成に繋がる価値創造・人材育成を行うべきである。その実現には、大学・国立研究所・企業が知と技術を集約し世界最高峰の繰り返し・高出力の大型パワーレーザー施設を建設するとともに、産官学が一体となって高エネルギー密度科学推進の中核拠点を世界に先駆けて構築するべきである。

<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/siryoul.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）
役員を選出、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
- 月○日 日本学術会議幹事会（第○回）
提言「○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○」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

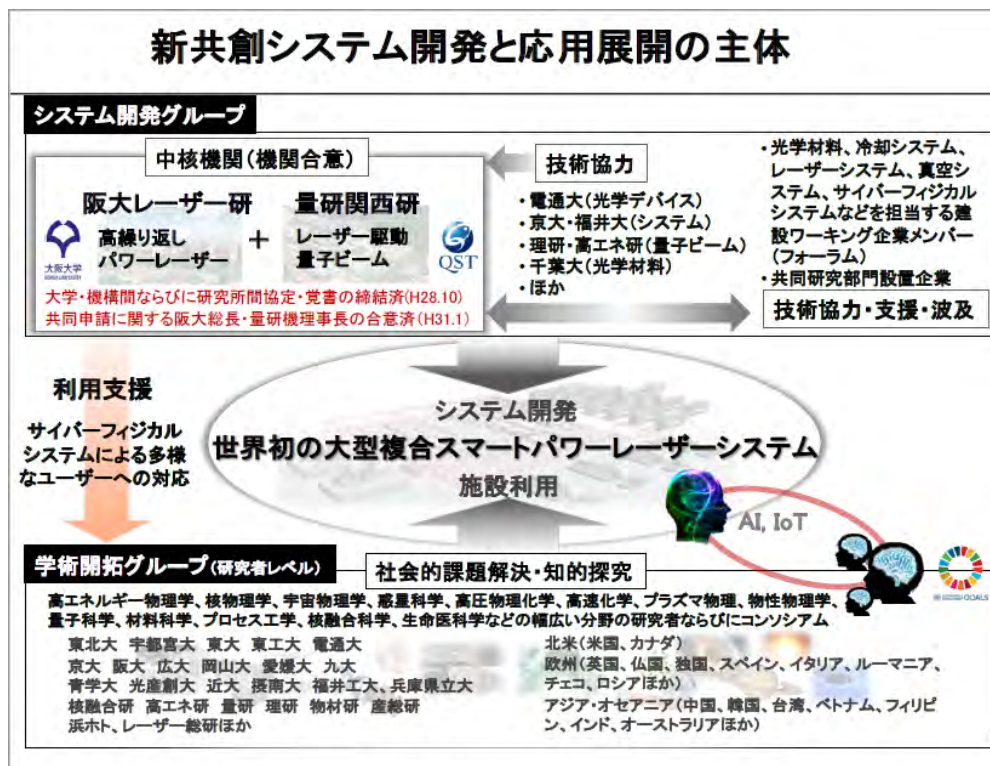


図2 提案された高出力の次期大型パワーレーザーシステムの開発・利用体制
(出典) パワーレーザーコミュニティ会議 (2018年11月28日) 資料

- **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

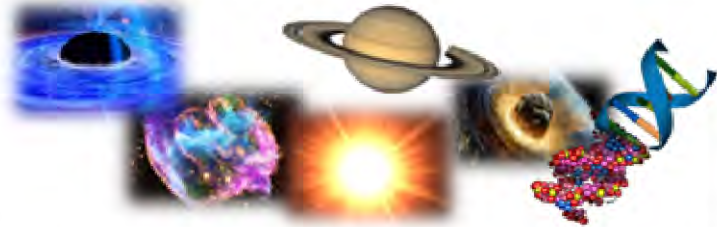
図3 提案された高出力の次期大型パワーレーザー施設の学術的意義

(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

超高圧新物質材料
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()	351nm	1ns	glass
			1kJ (2x500J)	1053nm	1ps	glass
Rutherford A. L.	DiPOLE	100J	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
China	SIOM	SG-II upgrade	24kJ (8x3kJ)	355nm	3ns	Nd:glass
		9th beamline	1kJ	1052nm	1ps	Nd:glass
	SIOM	SULF	250J	800nm	25fs	TiSapphire
	CAEP/Myanyang	SG-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
		LFEX	10kJ	1053nm	1ps	Nd:glass
	KPRI/QST	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、カステリーヤ・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)



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

＜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)

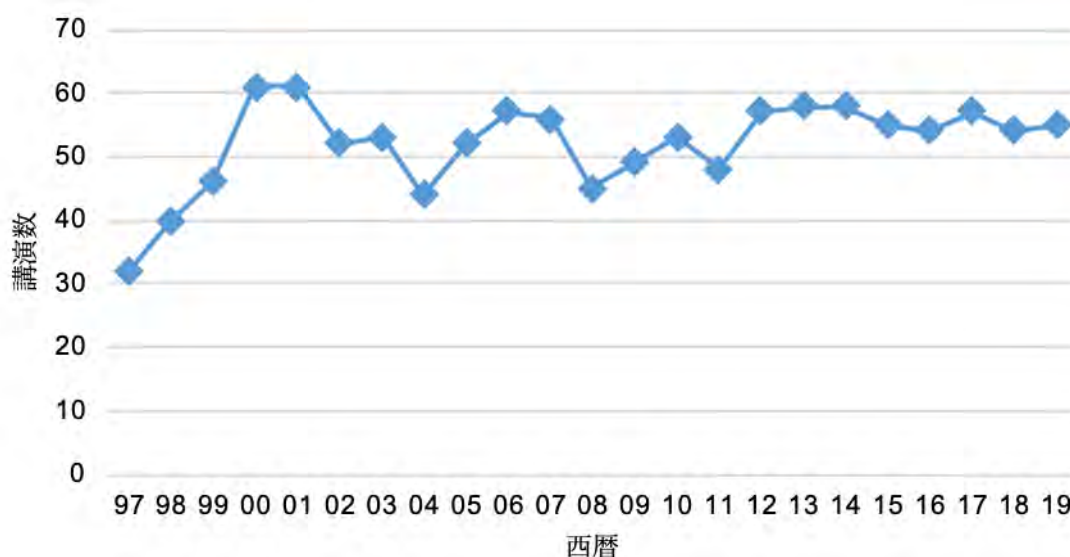


図1 「レーザー装置」関連講演件数

(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

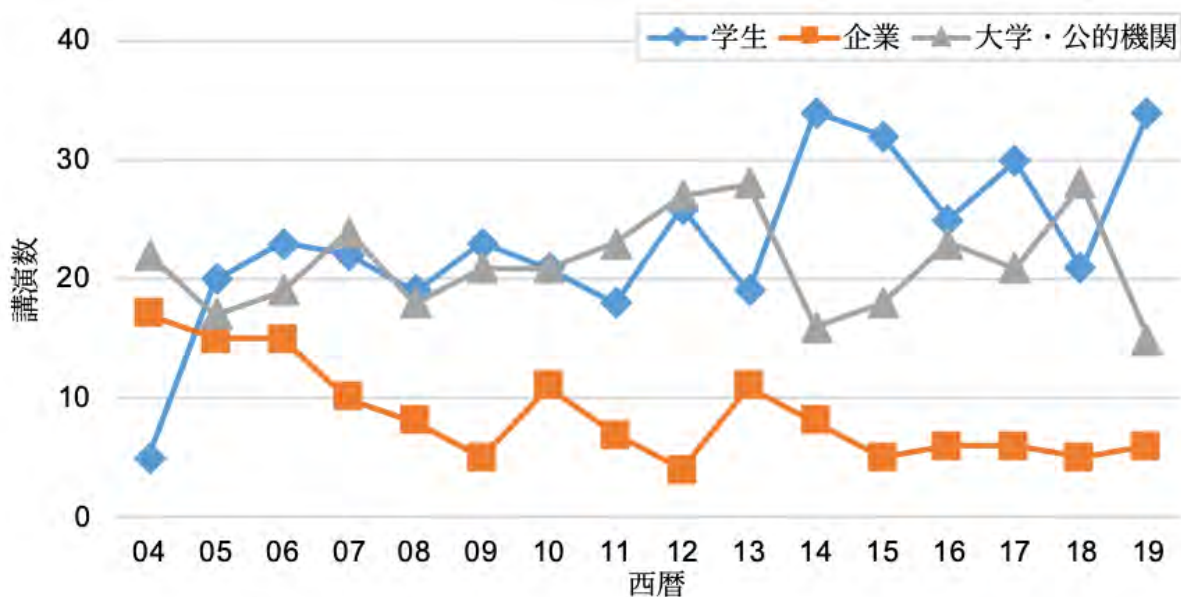


図2 所属別「レーザー装置」関連講演件数

(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

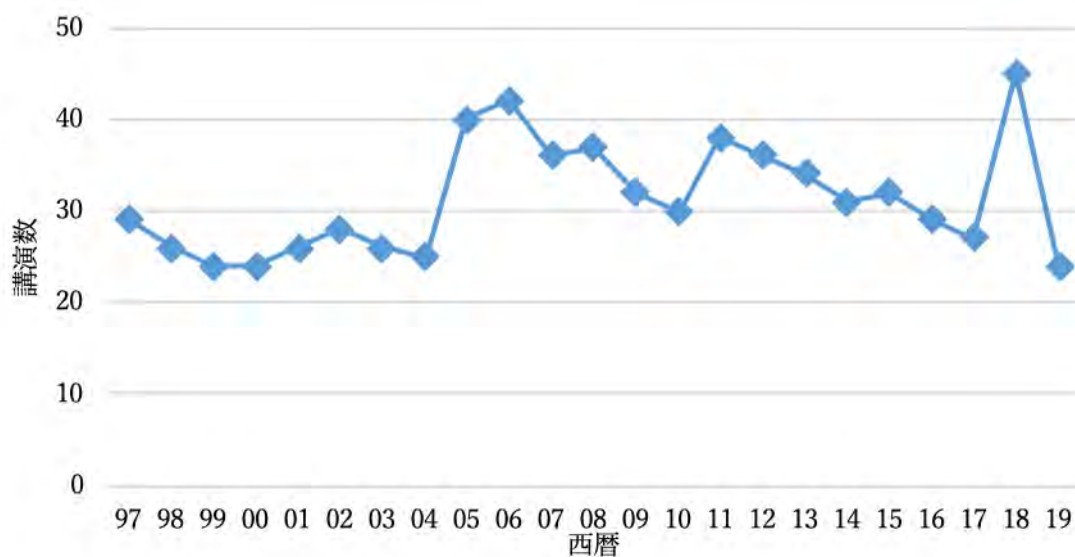


図3 「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数
 (出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

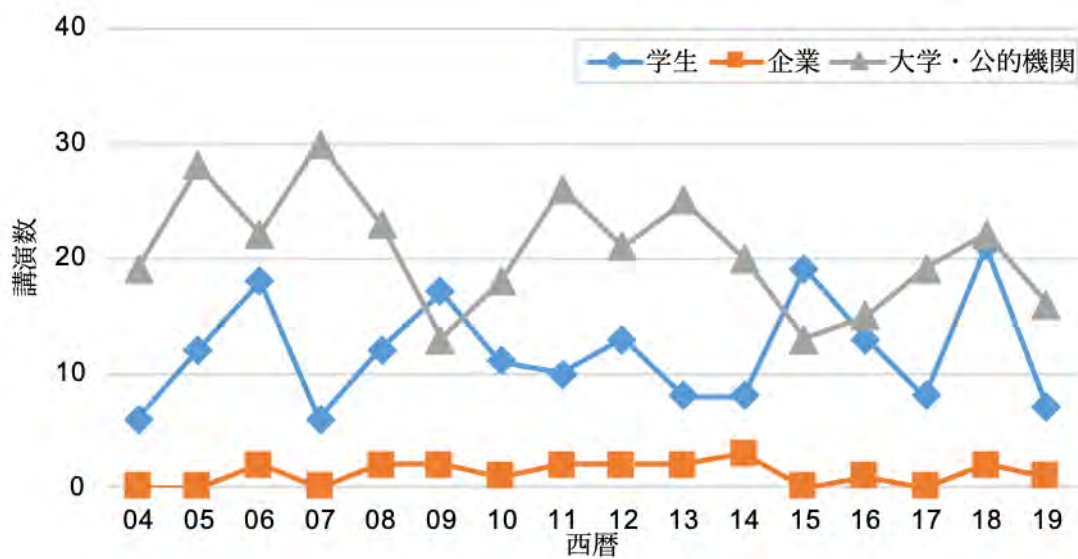


図4 所属別「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数
 (出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

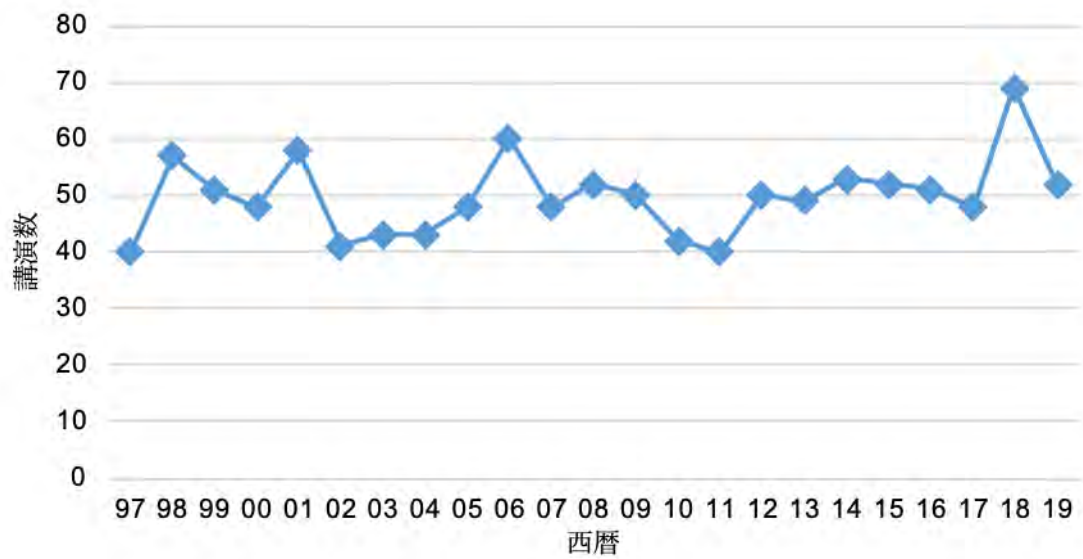


図5 「レーザープロセッシング」関連講演件数
 (出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

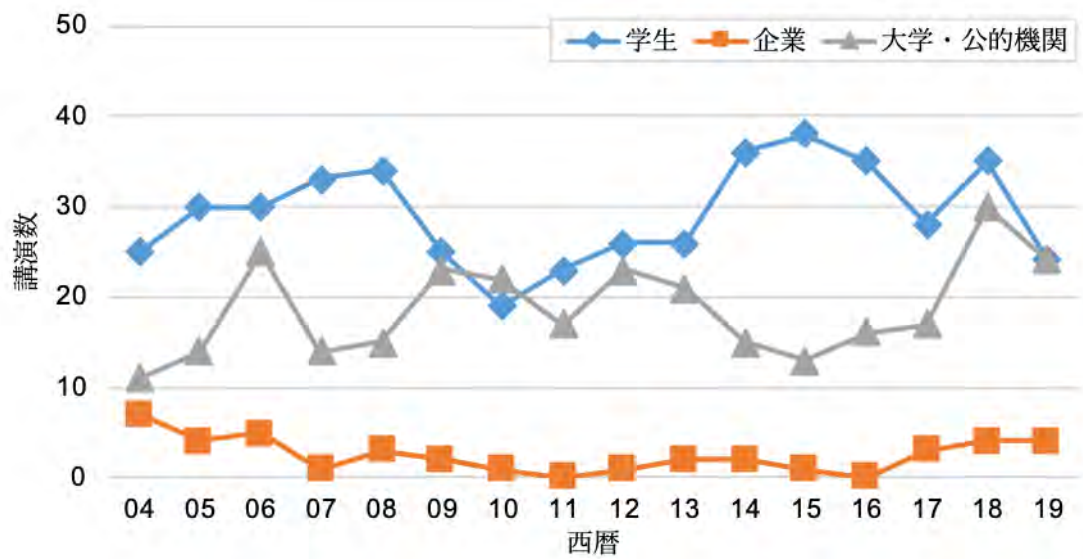


図6 所属別「レーザープロセッシング」関連講演件数
 (出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

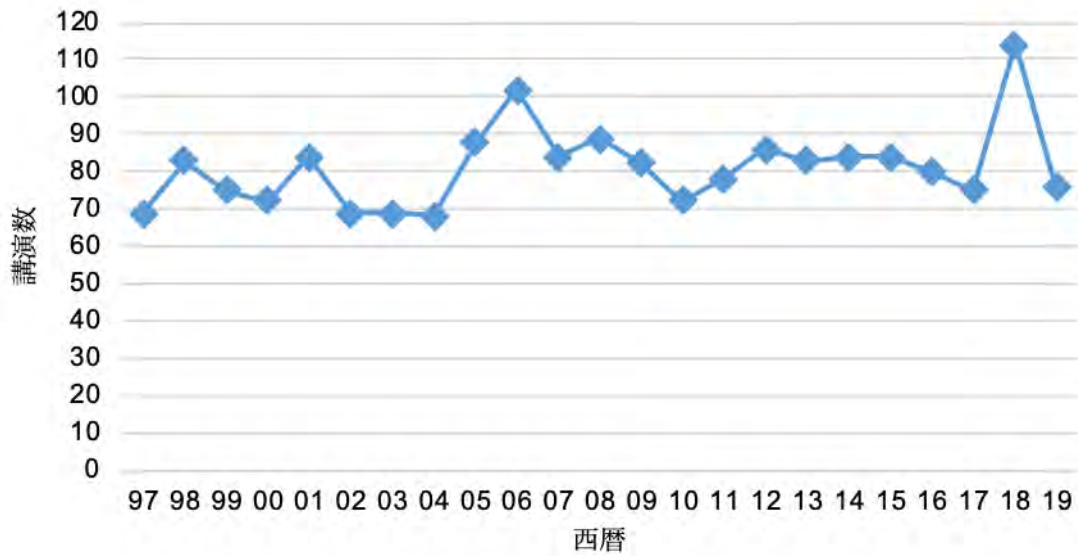


図7 「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数と「レーザープロセッシング」関連講演件数の合計
(出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

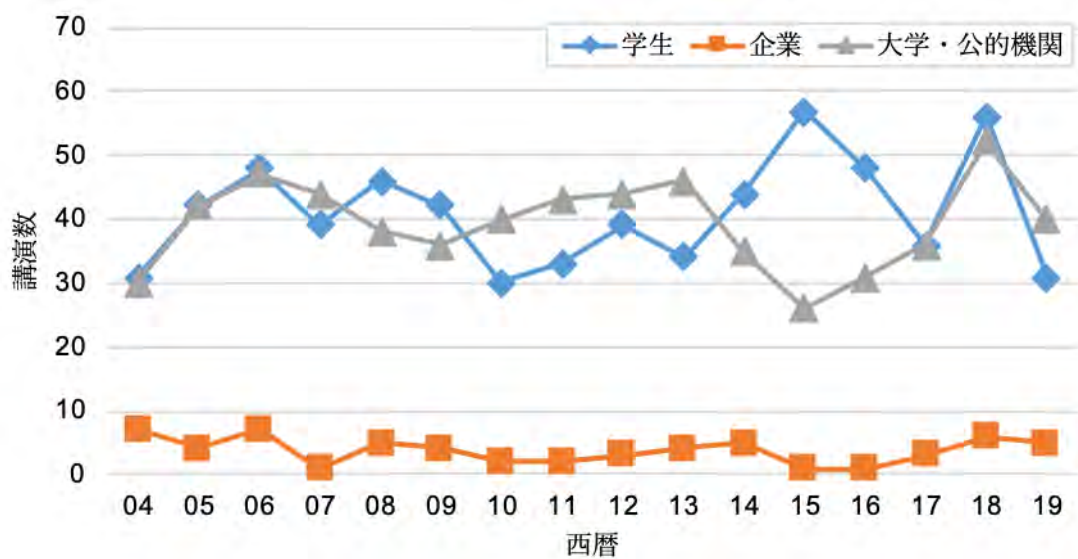


図8 所属別「高強度・高エネルギーレーザー応用」関連講演件数と所属別「レーザープロセッシング」関連講演件数の合計
(出典) 2019年レーザー学会事務局調査結果より小委員会で作成

提言等の提出チェックシート

このチェックシートは、日本学術会議において意思の表出（提言・報告・回答、以下「提言等」という）の査読を円滑に行い、提言等（案）の作成者、査読者、事務局等の労力を最終的に軽減するためのものです¹。

提言等（案）の作成者は提出の際に以下の項目を1～11をチェックし、さらに英文タイトル（必須）、英文アブストラクト（任意）、SDGs との関連の有無（任意）を記載し、提言等（案）に添えて査読時に提出してください。

記入者（委員会等名・氏名）：総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会・三間 圀興

和文タイトル 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

英文タイトル（ネイティブ・チェックを受けてください）

Quantum Jump of High Energy Density Science with Powerful Laser Technology and Creation of New Industries

	項目	チェック
1. 表題	表題と内容は一致している。	① はい 2. いいえ
2. 論理展開 1	どのような現状があり、何が問題であるかが十分に記述されている。	① はい 2. いいえ
3. 論理展開 2	特に提言については、政策等への実現に向けて、具体的な行政等の担当部局を想定していますか（例：文部科学省研究振興局等）。	① 部局名：文部科学省研究開発局、科学技術・学術政策局、研究振興局 2. いいえ
4. 読みやすさ 1	本文は 20 ページ（A4、フォント 12P、40 字×38 行）以内である。※図表を含む	① はい 2. いいえ
5. 読みやすさ 2	専門家でなくとも、十分理解できる内容であり、文章としてよく練られている。	① はい

¹ 参考：日本学術会議会長メッセージ、「提言等の円滑な審議のために」（2014 年 5 月 30 日）。
<http://www.scj.go.jp/ja/head/pdf/1>

		2. いいえ
6. 要旨	要旨は、要旨のみでも独立した文章として読めるものであり 2 ページ (A4、フォント 12P、40 字×38 行) 以内である。	① はい 2. いいえ
7. エビデンス	記述・主張を裏付けるデータ、出典、参考文献をすべて掲載した。	① はい 2. いいえ
8. 適切な引用	いわゆる「コピペ」(出典を示さないで引用を行うこと) や、内容をゆがめた引用等を行わず、適切な引用を行った。	① はい 2. いいえ
9. 既出の提言等との関係	日本学術会議の既出の関連提言等を踏まえ、議論を展開している。	① はい 2. いいえ
10. 利益誘導	利益誘導と誤解されることのない内容である。	① はい 2. いいえ
11. 委員会等の趣旨整合	委員会・分科会の設置趣旨と整合している。	① はい 2. いいえ

※9で「はい」を記入した場合、その提言等のタイトルと発出委員会・年月日、既出の提言等との関係、相違点等について概要をお書きください

[1] 「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.sc.j.go.jp > info > kohyo > pdf > kohyo-23-h160824](http://www.sc.j.go.jp/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h160824)

本提言は、上記報告の結果を受けるとともに、その後の関連分野の動向を踏まえたものである。上記報告作成時には、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)が進行中であり、その成果を確認するため提言とはせず報告にとどめた。今回は、その後の内外の当該分野の動向と文部科学省のネットワーク研究拠点の活動を総括し、提言を出すことになった。

※チェック欄で「いいえ」を選択した場合、その理由があればお書きください

◎ SDGs (持続可能な開発目標) との関係 (任意)

以下の 17 の目標のうち、提出する提言等(案)が関連するものに○をつけてください(複数可)。提言等公表後、学術会議 HP 上「SDGs と学術会議」コーナーで紹介します。

1. () 貧困をなくそう
2. () 飢餓をゼロに
3. (○) すべての人に保健と福祉を
4. (○) 質の高い教育をみんなに
5. () ジェンダー平等を実現しよう
6. () 安全な水とトイレを世界中に

7. エネルギーをみんなに、そしてクリーンに
8. 働きがいも経済成長も
9. 産業と技術革新の基盤をつくろう
10. 人や国の不平等をなくそう
11. 住み続けられるまちづくりを
12. つくる責任つかう責任
13. 気候変動に具体的な対策を
14. 海の豊かさを守ろう
15. 陸の豊かさも守ろう
16. 平和と公正をすべての人に
17. パートナリーシップで目標を達成しよう

※「持続可能な開発目標（SDGs）」とは

2015年9月に国連総会が決議した「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」が掲げた目標。

詳細は国連広報センターHPをご覧ください。

http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/

提言等公表時のSDGs説明

この説明は、日本学術会議の意思の表出（提言・報告・回答、以下「提言等」という）を日本学術会議ホームページのSDGsコーナーで紹介し、多くの関係者の閲読を促進するためのものです。

提言提出時のチェックシートにおいてSDGsとの関連に記述した場合は、日本語紹介文と英文アブストラクトを記載し、提出してください。

記入者（委員会等名・氏名）：総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会・三間罔興

和文タイトル 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

◎ SDGs（持続可能な開発目標）との関連

チェックシートで選択した項目に○をつけてください。

1. () 貧困 2. () 飢餓 3. (○) 健康 4. (○) 教育 5. () ジェンダー平等
6. () 安全な水 7. (○) エネルギー 8. (○) 経済成長 9. (○) 産業と技術革新
10. () 不平等 11. (○) まちづくり 12. () つくるつかう責任 13. () 気候変動
14. () 海の豊かさ 15. () 陸の豊かさ 16. () 平和と公正 17. () パートナリシップ

◎ 和文紹介文 200字以内

エネルギーと環境問題等の多種多様な社会的・学術的問題の解決に向け、パワーレーザーが広く利用されている。最近、高出力パワーレーザーの技術革新により高エネルギー密度科学が急速に進み、新産業が創成されつつある。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世界の学術の先端を切り開くとともに、関連科学技術を推進し新産業を創成する国際的人材を育成するため、我が国の研究開発環境の整備を提言する。

◎ 英文アブストラクト 150 words 以内

Powerful lasers have been playing important roles in solving various public and academic issues including energy and environmental issues. Recently, the powerful laser technology is jumping up to a new state of the art, so that the high energy density sciences progress rapidly and new industries using powerful lasers are widely coming up in the world. Therefore, we propose to build and operate a new central research infrastructure that realizes quantum jump in powerful laser technology and high energy density sciences and activates the research network for powerful laser technology and high energy density sciences and inspires and train young scientists and engineers who will be international players in the science and technology. They will contribute to opening up the academic frontier of the world and the creation of new industries.

◎ キャッチフレーズ 20字以内

パワーレーザーが開く科学技術の量子的飛躍

◎ キーワード 5つ程度

パワーレーザー、高エネルギー密度科学、量子的飛躍、レーザー核融合、超高压量子物質科学