

見 解

多様な知が活躍できる大型パワーレーザー施設
の実現と国際的な中核拠点の構築



令和5年（2023年）9月22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

この見解は、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ーレーザー技術と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	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学名誉教授
副委員長	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構理事長
幹事	岩城智香子	(連携会員)	東芝エネルギーシステムズ株式会社エネルギーシステム技術開発センターシニアフェロー
幹事	齋藤 公児	(連携会員)	日鉄総研株式会社シニアフェロー
	高田 保之	(第三部会員)	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所特任教授・名誉教授、エディンバラ大学名誉教授
	朝倉 薫	(連携会員)	日本電信電話株式会社研究企画部門担当部長
	伊藤 公孝	(連携会員)	中部大学特任教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
	大久保泰邦	(連携会員)	地熱技術開発株式会社探査部研究主幹
	大野 恵美	(連携会員)	Managing director, IHI POWER SYSTEM MALAYSIA SDN BHD
	兒玉 了祐	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所長
	近藤 駿介	(連携会員)	原子力発電環境整備機構理事長
	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
	鈴置 保雄	(連携会員)	愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授、名古屋大学名誉教授
	藤田 修	(連携会員)	北海道大学大学院工学研究院教授
	三間 囿興	(連携会員)	日本原子力研究開発機構敦賀総合研究センター客員研究員、大阪大学レーザー科学研究所招聘教授、大阪大学名誉教授
	宮崎久美子	(連携会員)	立命館アジア太平洋大学国際経営学部特別招聘教授、東京工業大学名誉教授
	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、東洋大学名誉教授
	和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学部教授
	藤岡 恵子	(連携会員(特任))	株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役社長

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技術と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
副委員長	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
幹事	三間 罔興	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所招聘教授、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構敦賀事業本部客員研究員
幹事	岩田 夏弥		大阪大学高等共創研究院准教授
	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学名誉教授
	植田 憲一	(連携会員)	電気通信大学名誉教授
	兒玉 了祐	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所所長
	齋藤 公児	(連携会員)	日鉄総研株式会社シニアフェロー
	笹尾真実子	(連携会員)	同志社大学研究開発推進機構嘱託研究員、東北大学名誉教授
	松尾由賀利	(連携会員)	法政大学理工学部教授
	観山 正見	(連携会員)	岐阜聖徳学園大学学長
	吉田 善章	(連携会員)	自然科学研究機構・核融合科学研究所所長
	和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学研究科教授
	大森 達夫		三菱電機株式会社開発本部主席技監
	加藤 義章		大阪大学名誉教授
	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
	小林 洋平		東京大学物性研究所教授
	阪部 周二		京都大学名誉教授
	野崎 光昭		大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構名誉教授
	宮寺 晴夫		東芝エネルギーシステム株式会社フェロー
	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

本見解の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

事務	佐々木 亨	参事官（審議第二担当）
	高橋 直也	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（令和5年3月まで）
	柳原 情子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（令和5年4月から）
	影山 祥子	参事官（審議第二担当）付審議専門職付
	岡本 摩耶	学術調査員

要 旨

1 作成の背景

高エネルギー密度科学は、パワーレーザー技術の進歩とともに発展し、学術創成及び新技術創出に貢献することが近年特に強く期待されている学際分野である。我が国は、この分野において世界に伍する成果を上げてきたことに鑑みて、引き続きこの分野における牽引者の一翼を担うべきとの考えから、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より提言「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」（2020年6月16日）が公表された。そこでは、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、新たな学術の開拓や産業創成につながる価値創造・人材育成を行うべきであるとされた。

同提言公表後もパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学は著しく進展を続け、大型パワーレーザー施設の開発やネットワーク化が多く先進国で進められている。我が国においては、最近、繰り返し動作が可能な大型パワーレーザーを実現するための技術的ブレークスルーがあった。また、米国においては、2021年に核融合でエネルギーを取り出すために不可欠な自律的な核融合燃焼が実証され、人類史上初めてエネルギー増幅の入口に到達するなどの新展開があった。このような進展を基に、米国における官民によるレーザー核融合エネルギー開発や、欧米中における高エネルギー密度科学推進体制の充実に向けた顕著な動きがある。

このようなパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の飛躍的な進展と急激な変化の中、機を逸することなく我が国の強みをいかした喫緊の取組が、我が国がこの分野で世界を先導していくためには、不可欠な状況にある。

2 現状及び問題・課題

パワーレーザーは、光の力で従来見えなかったものを見えるようにしたり、これまで地上に存在しない極限状態をつくり出したりできる。例えば、パワーレーザー光を髪の毛の半分程度の小さな領域に集めると、瞬間的（ $10^{-9}\sim 10^{-12}$ 秒程度）に10万～1千万気圧の固体や1千万～数億気圧のプラズマ状態を実現できる。パワーレーザーは、このようなエネルギー密度の高い極限状態をつくり出し宇宙や物質の本質探求に関わる新しい学術を創成できるとともに、エネルギー、材料、デバイスなど社会に役立つ多様な新技術を生み出すことができる。そのため、パワーレーザーによる高エネルギー密度科学として世界中で重要性が増し競争が激化している。

我が国は、この学際性豊かな高エネルギー密度科学に関する多くの実績とそれを推進するためのパワーレーザー技術における競争力を有している。

一方で、パワーレーザーを用いた高エネルギー密度科学の国際的な重要性にもかかわらず、我が国では、強みを生かし競争力ある技術を集約した多様な知が活躍できるオールジャパン体制の要となる高エネルギー密度科学の中核拠点が整備されていない。

また、我が国の強みとなる要素技術の活用に関しても、例えば、セラミックレーザー等日本発の技術が海外ではいち早く大型プロジェクトで採用されている一方、日本では強みとなる要素技術を生かしたプロジェクトが少なく、その活用に関しても遅れている。

新しい時代に即し多様な知が活躍できる国際競争力ある高繰り返し大型パワーレーザー施設を有した中核拠点を速やかに実現するため、技術開発の現状と課題、中核拠点で切り拓かれる学術・科学技術の展望、さらには人的資本・技術的資源の広がりをも明確にする必要がある。

これをもとに、多様な「知の創造」と「知の具現化」が実現できる高エネルギー密度科学の分野において世界を先導するとともに、他の学術分野への波及と持続的発展を可能とする社会への貢献を目指した学術研究の構想を明らかにする必要がある。

3 見解の内容

パワーレーザーを用いた高エネルギー密度科学は、多様な「知の創造」と「知の具現化」を実現できる学際分野として、世界的にその重要性が増すとともに飛躍的に発展している。特に最近では、パワーレーザーの技術的ブレークスルーや、レーザー核融合研究のマイルストーン達成、それに続く米国政府の高エネルギー密度科学推進本格化の動きなど、大きな進展があった。このような飛躍的な進展と急激な変化の中、我が国がこの分野で世界を先導していくためには、独自の戦略の下で機を逸することなく我が国の強みを活かした中核拠点を実現するべきである。そのため、多様なステークホルダーの意見を取り入れながら、以下に取り組むべきである。

- ・パワーレーザーに関する我が国の強みである競争力ある様々な要素技術を速やかに統合・集約し、システム構築と実装を加速し、**高繰り返しの大型パワーレーザー施設を世界に先駆けて実現することに挑戦**する。これにより、激しい国際競争において、**多様な知の活躍による様々な共創を実現し競争力あるパワーレーザー施設を有した国際的な中核拠点を構築**する。
- ・加えて、中核拠点で切り拓かれる学術・科学技術の展望及び人的資本・技術的資源の広がりをも明確にし、当分野において**世界を先導するオールジャパン体制**を強化する。

これらの取組により、多様な「知の創造」と「知の具現化」を実現する高エネルギー密度科学という大樹を育み、基礎科学、物質材料科学、生命科学、エネルギー学から通信・プロセス技術など様々な分野・領域に横断的なレーザー科学という浩大な学術・科学技術創成の柱を形成できるとともに、エネルギー学や物質科学などと幅広く連携することで、我が国の学術と社会の持続的発展に貢献できる。

目 次

1	はじめに	1
(1)	世界を先導できる分野実現へのビジョン	1
(2)	背景と趣旨	1
①	背景	1
②	趣旨	2
2	国際競争力ある大型パワーレーザー施設の実現性	3
(1)	世界の大型パワーレーザー施設	3
(2)	変革する大型パワーレーザー施設	4
(3)	国際競争力ある大型パワーレーザー施設実現へ向けた技術的課題	4
①	レーザーシステムと光学素子	4
②	レーザー駆動量子ビーム	6
③	多目的に活用できる高繰り返し大型パワーレーザー施設	6
3	高繰り返しパワーレーザーを有した中核拠点で拓かれる学際的な学術	8
(1)	高エネルギー密度状態の固体物質材料科学	8
①	レーザープロセス工学	8
②	物質材料科学のための診断技術	9
③	原子過程が支配的な高エネルギー密度物質科学	10
④	超高圧状態の物理学と地球・惑星科学	11
⑤	超高圧状態の物質材料科学	12
(2)	高エネルギー密度状態のプラズマサイエンス	13
①	プラズマ物理学	13
②	レーザー宇宙物理学	14
③	レーザー核融合科学	15
④	レーザープラズマ加速物理と加速器科学	16
(3)	高エネルギー密度場の科学	17
①	超高強度場物理学	17
②	量子真空物理学	18
4	人的資本・技術的資源の拡大による社会への貢献	19
(1)	新たな人材育成	19
(2)	施設連携による分野の拡がり	19
(3)	社会が必要とする技術の発展	20
①	将来、実用化が期待される先端技術創出への貢献	20
②	産業や国家の持続的発展の基盤となる重要な技術力維持・強化への貢献	20
③	グリーントランスフォーメーション（GX）への貢献	21
5	おわりに	22
	<用語の説明と注釈>	23
	<参考文献>	27
	<参考資料>審議経過	31
	<付録>	33

1 はじめに

(1) 世界を先導できる分野実現へのビジョン

レーザー科学^(用語26)は基礎科学、物質材料科学、生命科学、エネルギー学、デバイス・センサー・通信・プロセス技術など領域横断的であり、汎用性の高いレーザー技術の飛躍的進展とともに、新しい学術の創成が多く期待でき重要である。中でも、パワーレーザー^(用語16)を用いた高エネルギー密度科学^(用語5)は、固体・プラズマ・真空における極限状態の学術の創成と産業イノベーションにつながる新しい技術の創出が多く期待できる学際分野として、その重要性が世界的に増している。我が国には、この多様な「知の創造」と「知の具現化」を実現する高エネルギー密度科学に関する多くの実績^(注釈1)とそれを推進するためのパワーレーザー技術における競争力^(注釈2)を有している。今、中核的な拠点を中心に研究者コミュニティが連携して我が国の強みを活かすことができれば、世界を先導できる分野の1つとなる。結果として、レーザー科学という汎用性の高いレーザー技術による浩大な学術・科学技術創成の杜の形成への貢献が期待できる(図1)。

(2) 背景と趣旨

① 背景

パワーレーザーによる高エネルギー密度科学の領域は、宇宙物理学、惑星科学、量子物理学、プラズマ物理学などの基礎学術とともにレーザー加工、レーザー加速器やレーザー核融合エネルギー^(用語27)など新たな産業イノベーションにつながる浩大な応用が期待できる。学際性豊かな高エネルギー密度科学の重要性から世界の先進国を中心に精力的な研究開発が進められている[1.1-1.3]。



図1 将来ビジョンと実現へのロードマップ (出典：小委員会で作成)

このような中で、我が国のパワーレーザーに関係する研究者コミュニティにおいては、学会（レーザー学会、プラズマ核融合学会等）や研究者コミュニティネットワーク[1.4]を活用し、高エネルギー密度科学の推進を目的とした次期大型パワーレーザー施設と中核拠点に関する議論が2015年より継続的に行われてきた（付録資料1）。レーザー学会においては、2019年に、中核拠点となる次期大型パワーレーザー施設の具体的な議論が行われ、多様な分野に関係する研究者コミュニティからの意見を取り入れた概念設計[1.5]が行われた（付録資料2）。この概念設計をもとに、「パワーレーザーインテグレーションによる新共創システムの構築」が、日本学術会議第24期「学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020）」に提案され、2020年1月30日に学術大型研究計画として選定され公表された。さらに、2021年から、産業界の意見を取り入れた基本設計、モジュール装置の詳細設計が進められている。

国内のみならず、国際的にもパワーレーザーと高エネルギー密度科学に関する議論が研究者コミュニティを中心に行われるとともに、様々な国際連携事業[1.6]により国際的なネットワークが構築されてきた。さらに、2019年1月、日米政府間で「高エネルギー密度科学に関する日米協力事業取り決め」が調印された。これにより日米の新たな科学技術協力事業が立ち上がり、2021年9月には両国の研究機関により高エネルギー密度科学の学術研究協力に関する覚書が交わされ、国際研究活動が進行している。

このような研究者コミュニティの動きに呼応して、日本学術会議においては、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会から、2016年8月24日、「大型レーザーによる高エネルギー密度科学の新展開」が報告された[1.7]。続いて2020年6月16日、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会より提言「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」が公表された[1.8]。この提言を速やかに具体化することが重要であり、その方策を議論する目的で、2021年5月、第25期日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会に「ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会」が設置された。

このような状況の中で、2021年から2022年までの間、高エネルギー密度科学に関する大きな進展があった。1つは、レーザー核融合エネルギー実用化に不可欠な自律的な核融合燃焼が米国で実証されたことである。これを契機に米国政府は、レーザー核融合エネルギーの実現のための基礎研究を含めた高エネルギー密度科学の推進を本格化する動きが出てきている[1.9]。もう1つの大きな進展は、高エネルギー密度科学の推進に不可欠なパワーレーザーの繰り返し技術が飛躍的に進展し、平均出力1kWの壁を我が国でもクリアしたことである。高エネルギー密度科学におけるこのような飛躍的な進展と急激な変化を考慮し、我が国がこの分野で競争力を維持し世界を先導するための新たな検討と対応が、喫緊の課題となっている。

② 趣旨

以上の動向と認識を踏まえ、学際的なレーザー科学の分野に、パワーレーザーによる競争力ある高エネルギー密度科学の大樹を育み、多様な「知の創造」と「知の具現化」の実現を目指すべきである。これを実現するためには、限られた資源を有効に活

用する観点から、高エネルギー密度科学を開拓する世界の大型のパワーレーザー施設や研究者コミュニティの国際連携が不可欠である。さらに、我が国が、このような国際連携を主導し世界を先導するためには、国際競争力あるパワーレーザー施設の存在とともに国内研究者コミュニティが中核拠点に纏まったオールジャパン体制が必須である。そのため、オールジャパン体制で速やかに我が国の強み^(注釈1,2)を活かした国際競争力ある高繰り返し大型パワーレーザー施設を実現し、世界をリードするとともに、国際的な連携を推進する要となる高エネルギー密度科学の中核拠点を実現すべきである。これにより、我が国の学術の飛躍的発展とともに産業構造の変革やグローバルに活躍できる人材の育成に大きく貢献できる（4参照）。

2 国際競争力ある大型パワーレーザー施設の実現性

(1) 世界の大型パワーレーザー施設

パワーレーザーの進展は、1980年代、レーザー核融合研究が駆動力となり高出力化が進められた。2009年には米国においてメガジュールを超える出力のレーザー施設（National Ignition Facility、以下「NIF」という。）が、核融合点火燃焼の実現を目標に建設された。このシステムは単に人類初のメガジュールというレーザー出力エネルギーで世界をリードしただけではない。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日数ショットの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。また、チャープパルス増幅技術^(用語12)（2018年ノーベル物理学賞受賞対象）の発明により1990年代、レーザーのピーク強度は飛躍的に増大した。2020年には欧州において10ペタワットのピーク強度のレーザーが実現した。さらに、より高いレーザー強度を実現しようという計画も世界で進められている。このように世界の大型パワーレーザー施設においては、より極限的な状態の学術開拓を目的に出力とピーク強度の向上を目指すパワーゲームを続けつつ、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から真空の非線形物理など他の方法では実現できない様々な極限状態の研究が進められている。

一方で、これまで大型レーザー施設において高繰り返し化あるいは高平均出力化は、必ずしも大きな潮流ではなかった。様々な応用で優れたアウトプットを迅速に得るためには、短時間で多くのショット結果を得ることのできるシステムが不可欠である。高繰り返しシステムの構築により、データサイエンスを活用した学術推進が見込まれる[2.1]ほか、ある程度のしきい値が存在する物理現象でも、目標のイベントが起きたか迅速な判定が可能となる。レーザープロセスのスピード化にも資する膨大な実験データの短時間分析の技術開発が期待される。また、高繰り返し化で得られるビッグデータを活用したレーザーの高精度制御はレーザーの産業応用の高度化に資する。今後、大型パ

ワーレーザーを活用した学術・産業・人材育成において、データサイエンスの活用を目指した高繰り返し化技術が必須となり、新たな国際競争の軸になると予想している。

(2) 変革する大型パワーレーザー施設

大型パワーレーザーの新たな国際競争の軸となる繰り返し化技術に関して、我が国は多くの強みとなる技術がある。その1つがセラミックレーザーである。レーザーの大型化を見据えた時、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材料としてレーザーセラミックが最有力候補である。これを単色光源の半導体レーザー照射で光を増幅できる状態に励起することで、従来のガラスレーザーと同様の大出力を出すとともに繰り返しを1万倍以上上げることができる。このような技術を使い、米国、英国、チェコ(100J/10Hz)や我が国(10J/100Hz)で平均出力1kWを超えるレーザーが実現している。さらに、米国・チェコ(1kJ/10Hz)、日本(100J/100Hz)では10kWを超えるレーザーが1～2年以内に実現できる段階にきている。特に、我が国において、独自のアクティブミラー増幅法により初めて100Hzの繰り返しで1kWの平均出力の壁を乗り越えることができたことで、メガワット(以下「MW」という。)クラスの超平均出力の大型レーザーシステム(100J/100Hzx100台)が現実的となってきた。これをもとに、我が国では、国際競争力ある現実的な平均出力がMWクラスの大型高繰り返しレーザーを有した施設が提案されている。これは、多数の高繰り返し高出力レーザーを基本とし、超高強度レーザー^(用語14)、レーザー駆動電子ビームとそれによるX線源やレーザー駆動中性子ビーム(次節(3)②参照)など多様なレーザー・量子ビームを有した施設であり、10年以内に実現できる可能性がある。日本発の要素技術を活用しそれを統合する研究開発体制を我が国で構築することが重要であり、世界に類を見ないパワーレーザー施設の中核拠点では、我が国の要素技術を集約し世界から様々なステークホルダーを集めて多様な共創を生むことができる。さらに、従来のシングルショットベースの大型レーザー施設では困難であった多様な利用方法により、思いがけない発見(セレンディピティ)の可能性を高める。加えて人材育成への機会を飛躍的に増やすことも期待できるなど大型パワーレーザー施設による革新と変革が期待できる(図2)。

(3) 国際競争力ある大型パワーレーザー施設実現へ向けた技術的課題

① レーザーシステムと光学素子

前節で示すような国際競争力ある高繰り返し大型パワーレーザー施設を実現するには、これまでに蓄積された技術を集約・収斂した信頼性の高いレーザー装置の開発・運用が不可欠となる。特にレーザー装置の運用においては、ロボティクスやIoT(Internet of Things)、AI(Artificial Intelligence)技術を取り入れるなどシステムのデジタル化やスマート化が不可欠である。また、多ビームの大型システムでは、多数のユニットを多様なユーザーとも連携した稼働が必要であり、サイバー空間を活用したサイバーフィジカルシステム(CPS)^(用語7)の設計、光学素子の維持管理が必要であり、これらに関し産学連携で検討が進められている。

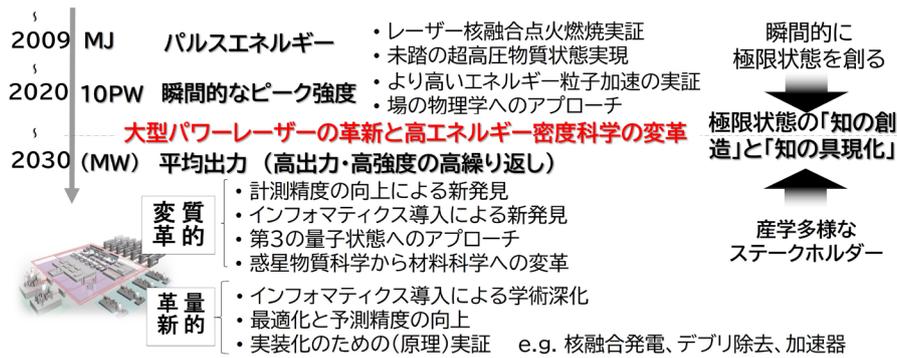


図2 大型パワーレーザー施設の革新と高エネルギー密度科学の変革
(出典：小委員会で作成)

高繰り返し、高平均出力レーザーシステムをデザインする上で、電気-光変換を担う半導体レーザーの高出力化・高効率化・低コスト化は最も重要な課題の1つである。高出力化に関しては、冷却方法の改善、ストライプ型からPCSEL (Photonic Crystal Surface Emitting Laser) やVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) などの面発光型^(用語23)への移行などで進展が見られるが、MW級に励起パワーを上げるためのスケールアップを考えていく必要がある。高効率化に関しては、既に50%を超えるものがある中で抵抗損失や接触損失、電流電源そのものなどの基礎的、原理的な部分での改良を含め総合的な改善が産業界で進められている。低コスト化に関しては、市場原理も関係してくるが、高出力レーザーの多くの産業応用が我が国で立ち上がってくる必要がある。その意味では、次世代レーザー加工、次世代レーザー加速器などのプロジェクトが立ち上がっている現状はまたとない好機と言える。産業界を巻き込んで社会実装を目指しているこれら高繰り返し高出力レーザープログラムとの相補的な技術補間も今後進んでいくことになる。

これまで、レーザー媒質からのエネルギー引き出し効率を確保するために、大型の再生増幅器が選択されてきた。一方、レーザーの高強度化では、パルス伸長と圧縮を行うチャープパルス増幅^(用語12)が主として用いられている。これらに対し、新しい手法としてコヒーレント加算^(用語6)を行い、比較的少ないエネルギーのパルスを増幅後に数多く重ねることも行われてきているが、1000本を超えるようなパルスの加算はいまだ効率よくは行われていない。基本的には広帯域な光の波長ごとに位相を調整し、空間モードも一致させることを行うが、数100~1000本となると技術的な面でまだ厳しい状況にある。空間モードを維持しながら高エネルギーパルスまで増幅可能なフォトニック結晶^(用語17)などの構造も利用したレーザー媒質や超低損失スイッチなど現在基礎研究段階にある光技術に期待するところは大きく、我が国の高出力レーザー技術の特質を發揮できる点にもなる。

また、高耐力大型光学素子(光学薄膜、分散素子、非線形光学材料など)は、これまでほとんど高出力、高ピーク強度のレーザーに対して開発されてきた。一方、レーザーシステムの繰り返しが増え高平均出力化することで、今後、古くて新しい熱の問題の解決や欠陥の蓄積回避などを含むダメージマネジメントをしていく必要がある、

産学連携の取組が開始されている。特に、真空中で利用する超高強度レーザーシステムにおけるパルス圧縮用の大型回折格子に関しては、熱の問題を含め長寿命化の技術開発が必要である。レーザー媒質などの冷却は、現在の水冷、ガス冷却などから、材料の熱伝導性を上げ排熱速度が上がるような新たな材料構造をとるなどの技術を、現在のセラミック結晶生成や拡散ボンディング手法^(用語3)などを利用して発展させる必要がある。これに、従来の熱複屈折率や熱レンズなどの回避手法を合わせて、MW級まで適用可能なレーザー設計が必要になる。加えて、MW級のレーザーシステムでは、大型放射光施設などと同規模の電力を必要とする大型施設や運用ノウハウも取り入れていく必要があり、大型施設や電力会社との意見交換が始まっている。

従来、世界各国で大型レーザー施設の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、競争力のある大型レーザーシステム開発の推進が、イノベーションの源泉となることは明確である。

② レーザー駆動量子ビーム

レーザープラズマの理解とともにその制御技術の研究が進み、プラズマフォトリックデバイス^(用語20)として高エネルギー密度プラズマを利用した電磁波制御や粒子加速などの技術的進展も著しい。特に、レーザー航跡場による電子加速は、準単色の数GeVクラスの電子ビームが比較的安定に実現できるようになってきている。また、このような電子ビームを利用したコヒーレントX線源やγ線源、さらにはイメージング応用やFEL^(用語28)放射も報告されるようになってきている。一方、パワーレーザーによるイオン加速は、数10MeVクラスの陽子線源が実現している。このような加速イオンを利用した中性子発生の研究も進み、コンパクトかつ短パルスな中性子源として独自の中性子ビーム応用の原理実証が行われている。レーザー駆動中性子源は、従来の中性子源に比べ線源の大きさがmmサイズと圧倒的に小さく、パルス幅も100ピコ秒と短い。そのため発生する高速中性子 (keV-MeV) を比較的小さな冷却材 (数cm) で熱中性子 (数10meV) や冷中性子 (1meV以下) を生成できている。従来の加速器中性子源に比べると全線量は低いが、小型でパルス幅が短い線源は、冷却材の大きさも圧倒的に小さいため、応用に必要な試料上での実効的な線量は十分期待できる。実際にシングルショットで電池材料をレーザー駆動中性子のX線で同時撮影にも成功している。また、シングルショットで中性子共鳴吸収法^(用語13)による元素別温度測定などにも応用されようとしている。今後、レーザーの繰り返しが増えることにより、さらに幅広く生命科学、高分子化学、物性研究や産業応用に必要な線量が期待できる。

レーザー駆動による量子ビームは、最終的には社会実装されることが1つの目標である。社会実装の前に多目的大型レーザー施設などで実験システムとして実装することで、利用装置としての性能と信頼性を上げ、社会実装を加速することにつながる。さらに、レーザー駆動量子ビームのコンパクト性と汎用性によりX線と中性子ビームを診断 (プローブ) ビームとして同時に利用した先駆的な応用研究を実現できる。

③ 多目的に活用できる高繰り返し大型パワーレーザー施設

前述のように多様な研究者コミュニティからの要求仕様に基づいて図3に示すよう

な多目的高繰り返し大型パワーレーザー施設の概念設計ができ、現在、基本設計の段階となっている。多ビーム・高繰り返し大型レーザーの基本モジュールである100J/100Hzのレーザー開発がほぼ最終段階であり、今後、5年程度でこれを160台程度実装するための現実的な取組方法の検討が産学で進められている。また、実験エリアで必要となる波長変換に関しても開発された10J/100Hzレーザーにより技術開発が開始されており、100J/100Hzレーザーによる波長変換の実装も3年程度で実現できる段階にある。さらに、このモジュールレーザーを励起光源とした超高強度短パルスレーザーの開発も産業界（世界初の10PWレーザーを実装した海外メーカー）との連携が始まっており、5年程度で現在のPW級レーザーの繰り返しに比べ1桁程度以上高い繰り返しが可能である。このような状況を踏まえ、図3に示すような多ビーム・高繰り返し大型レーザーによる実験システム構築が2030年頃には実現できる段階にある。このような実験システムでは、これまでのシングルショットベースの大型レーザー実験施設とは異なる利用方法及び多様な利用者が期待できる一方、システム運用上の新たな技術課題もある。

まず、技術課題の1つが、ターゲット供給と高繰り返しターゲットインジェクション^(用語11)である。多目的で多ビームの高繰り返しのレーザーシステムには大量のターゲットが必要となるが、ロボティクスを活用したターゲット制作の開発が始められようとしている。また、インジェクションに関しては、単純な形状のものは回転式ホルダーやテープターゲットで対応できるが、複雑なものに対しては高精度のターゲット供給技術だけでなくリアルタイムでモニターし集光に反映できる高速トラッキング技術が必要となる。さらに、高繰り返しによるビッグデータの取扱いに関しては、放射光施設などの実績を活用できる。加えて、固体ターゲット利用した実験において、実験チャンバー内で大量のデブリ対策も重要な課題であるが、レーザーによるXUVリソグラフィ^(用語30)に関する研究開発で培われた技術を活用あるいは発展させることで乗り越えることが見込まれる。

複数の実験を同時に実現できる放射光施設のように、多様なユーザーへの対応には、

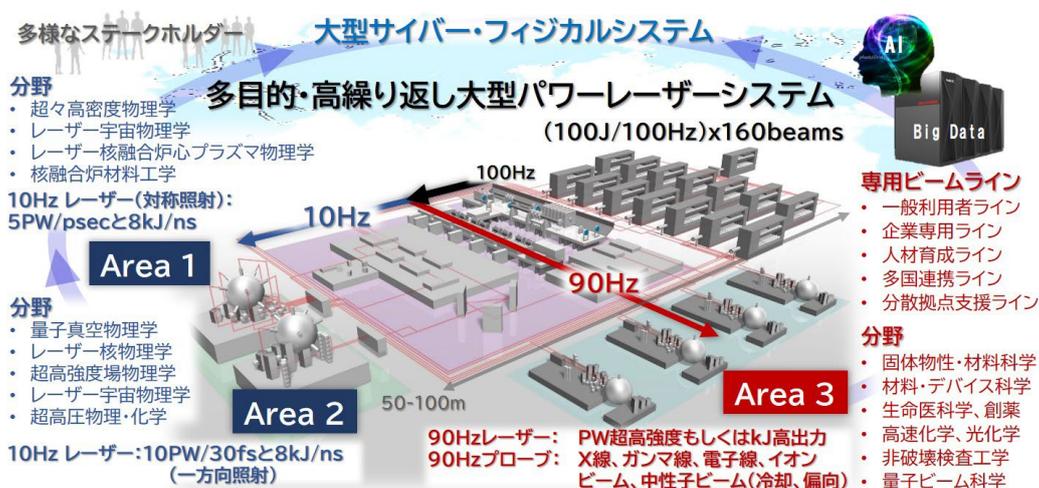


図3 多目的高繰り返し大型パワーレーザー施設概念図（出典：小委員会で作成）

高速高精度の多ビームステアリング（制御）技術が不可欠である。例えば、基本となるレーザーの繰り返しが 100Hz の場合、大型サイバーフィジカルシステムを使って 10Hz を全ビームエネルギー利用するエリア（ビッグサイエンスなど学術フロンティア開拓を目的としたエリア）に、残り 90Hz を多種のビーム（レーザー、X線源、中性子源等）を同時に高繰り返しで利用する応用エリアに振り分けることが可能である。システム全体での機能的なデータ収集・活用が期待できる。大型パワーレーザー施設においては、レーザーX線源、中性子源ともにプラズマデバイスを活用するため、加速器、放射光施設に比べ圧倒的に小さく、かつ、低コストで多様な専用ビームラインを構築できる。そのため、産業界はもとより発展途上国によるコンソシアムや人材育成のための多様なビームラインが期待できる。

3 高繰り返しパワーレーザーを有した中核拠点で拓かれる学際的な学術

中核拠点で拓かれる高エネルギー密度の学術・科学技術は、(1)凝縮物質の科学、(2)プラズマ科学、(3)場の科学からなる。本章ではこれらの学術・科学技術が 10 年先、20 年～30 年先に期待される「スマート化」、「宇宙利用推進」、「省エネルギー化」、「クリーンエネルギー創生」など社会が必要とする技術（4 (3)参照）をどのように先導し得るかを論じる。

(1) 高エネルギー密度状態の固体物質材料科学

① レーザープロセス工学

・現状：

パワーレーザーの産業応用で最も重要な用途の 1 つにレーザー加工がある。レーザー加工は型レス、非接触、ドライ、自由曲線加工などの特徴を持つために機械加工からの置き換えが進んできた。脱炭素のための省エネルギー化の観点では、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）など軽量で強靱な難加工性材料の加工や、次世代半導体の超微細加工用の高効率 EUV 光源への期待が大きい。実現したい技術ニーズは顕在化しているが、加工の条件探索に時間的、人的コストが掛かっている問題がある。そのため産業界は学界に対し、レーザープロセス（加工）の学理から適切なパラメータを予測できるようになることを要望している。レーザー加工はフェムト秒からミリ秒に渡る時間スケールと、オングストロームから mm に渡る空間スケールを包括しており、学理構築には時間がかかる。近年加工データを大量に積み重ねることで機械学習が可用となり、複雑な現象であるレーザープロセスをシミュレーションできるようになった。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10 年程度先）：

機械学習を適用するには大量の教師データ^(用語4)が必要となるため、大型装置の高繰り返し化が望まれる。また、産業利用においてはプロセスのスピードが重要となるため、やはり高繰り返し化が必須である。レーザープロセスの適用拡大には、多くのレーザー関連機関の連携によりデータを取得する必要がある。現在、国内では、大阪大学レーザー科学研究所の大型パワーレーザー施設、量子科学技術研究開発機構（以下「QST」という。）や理化学研究所の高ピークパワーレーザー設備、産業技術総合研究

所や電気通信大学レーザー新世代研究センターの先端レーザー、東京大学物性研究所のレーザー加工プラットフォーム等を活用することができる。今後、中核拠点が整備されれば、中核拠点を含むそれら各レーザー施設でデータを相補的に取得し、AIを活用しスマート化したレーザープロセスが実現する。スマート化したレーザープロセスでは、システム運用の最適化によりエネルギー消費を抑えたシステムが実現でき、競争力あるレーザー加工システムを提供できる。その結果、2030年には5兆円に達すると見込まれているレーザー加工機市場を我が国がリードすることが期待できる。

・ 20年～30年先を見越した課題・期待：

レーザープロセスの学理解明のために、高ピークパワーや高出力エネルギーレーザー、超短パルスレーザーなど、特徴的なレーザーシステムを国内に整備し、多様なユーザーが連携して活用し、関係するデータを統一的に取り扱えるデータベースの構築が重要である。これを統合的に活用できるようになることで、2040～2050年代においてはレーザープロセスと材料合成の学理ができ、それに基づく完全自動スマートプロセスが実現する。高密度物質における高強度光科学の1つとして、レーザー加工は体系化される。物質中でのレーザー照射下では極めて大きな温度と圧力が掛かるが、その状況における物質変化の学理により、機能性材料をデザインできるようになることで物質材料科学に貢献する。

② 物質材料科学のための診断技術

・ 現状：

パワーレーザーの光は容易にX線、ガンマ線、中性子、荷電粒子ビームに変換ができる。X線は、プラズマ^(用語19)からの放射だけでなく、レーザー加速された電子のアンジュレータ放射^(用語1)やベータトロン放射^(用語21)といった加速器ベースで開発されたものさえ発生させることが可能となっている。中性子発生に関しては、線源の大きさが小さく短パルス化されている特徴も持つ。現在の物性研究では、電子・X線・中性子線など異なる特徴を持つ計測プローブを同時に利用できるような複合プローブが求められているが、それらを同じレーザー光源から発生できる。ただし、中性子の熱化や電子のエネルギー広がりや狭帯化などが今後、技術開発としては必要になってくる。

・ 高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

これまで、パワーレーザーによる物性診断用の線源開発研究は、各大学・研究所で自由かつ精力的に進められてきた。今後、物質科学のユーザー参加を拡大し研究発展させるためには、kHz以上の高繰り返し性がパワーレーザーシステムに要求される。また、上述した複合ビームでの診断も複数の駆動用レーザーが必要になる。高品質な診断ビームの開発やそれを用いた新しい測定手法などは、個別の大学・研究所で原理実証され、それを取り込む形で中核拠点到整備されることが多様な科学を展開する上で重要である。また、加速器を中心とした他の施設と、計測器や基準器の標準化を始めとした協力を行っていく必要があり、既存の研究者コミュニティとの協力・協調が必要になってくる。

・ 20年～30年先を見越した課題・期待：

物質科学に特有な高時間空間分解能、高エネルギー高運動量空間分解能を持ち、レーザー駆動量子ビームを基本とする複合診断ビームからなるプラットフォームを作り上げることが第一歩となる。それには、高速構造相転移や超高压化学反応などに関係する物質科学研究者の協力が必要である。レーザー科学と物質科学の研究者が互いに要求を出しながら研究開発を進めていくための拠点を早期に実現させるべきである。

③ 原子過程が支配的な高エネルギー密度物質科学

・現状

短パルスレーザーと物質との相互作用においては、固体とプラズマの遷移領域にある物質状態：warm dense matter（以下「WDM」という。）を生成することができる。この状態では、秩序性の高い固体物理学と自由電子が支配的なプラズマ物理学領域の遷移過程が混合し、純粋に固体状態あるいはプラズマだけの状態の物性とは全く異なる。例えば、ある金属を短パルスレーザーで照射加熱膨張アブレーションさせると、導電率が金属の高い状態から一気に数桁低下したのちに、再び高温化されたプラズマ状態の高い導電率を示す。この動的に電子の局在・非局在を含む遷移中間状態は物理としては新しい。一方で、レーザー加工などでは、この領域に対する理解が付加価値の高い加工応用などに重要である。理論的には量子力学的な分子動力学モデルなど大規模計算を必要とするが、実際には、この遷移状態が非常に薄い数 μm 程度の大きさであるために、精度の高い計測が難しい。さらに、遷移状態は非平衡性も高いために電子の速度分布関数や原子準位密度などを直接観測し、履歴を含めた密度の関数として決定していくことが必要になる。X線自由電子レーザー（XFEL）^(用語29)が誕生した当初、硬X線を使った非弾性散乱計測が、局所的（ $< \mu\text{m}$ ）、短時間（ $\sim 10\text{fs}$ ）で温度、密度、イオン価数等を決定できるとの期待があったが、遷移状態についての十分な理解を得るところまでは至っていない。このように、現在のところ実験、理論モデルの検証ともに不完全な部分がある。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

現状の課題を打開するためには、複合的なプローブでの観測システムが必要で、光、硬X線、ガンマ線、電子、イオン、中性子ビームを利用できる中核拠点は重要である。詳細な物理モデルの検証には高精度のデータが要求されるため、高繰り返しで安定なレーザー駆動プローブの整備が必須となってくる。また、中核拠点で比較的大きなレーザーエネルギーが利用できるようになれば、WDM状態となる対象物の大きさも1桁以上大きくでき、結果的に計測精度を上げる実験も行えるようになることが期待できる。このようなシングルショットで時空間の1点を狙ってデータを獲得する実験と、繰り返しレーザーを用いて様々な物質の多様な温度密度状態での特異な物質状態を探索することは、両輪のような関係になる。

・20年～30年先を見越した課題・期待：

WDMの研究は、低温固体の秩序性のある状態から高温プラズマ状態までを一気につなげる物理モデルの形成にもなるが、そのためには、単なる実験観測や断片的な詳細理論物理モデルの研究だけでなく、幅広い視野や価値を見出せる人材が必要になる。

中核拠点において、現在の放射光ユーザーのように精密な計測が簡易にでき、他分野との類似性・異質性もユーザー間で議論できるようになれば、現在の状況も打開でき、国際的にもリーダーシップをとり得る状態になる。こういった体制は一足飛びにはできないので、精度の高い特異なデータを積み上げ、公開していきながら関連分野の理論研究者との協力体制を作り上げることが必要である。

④ 超高压状態の物理学と地球・惑星科学

・現状：

現有の繰り返しパワーレーザーで比較的容易に実現できる 10GPa (10 万気圧) 程度の圧力状態は、従来のマクロな状態方程式から、構造変化などマイクロダイナミクスの理解を含む超高压下の物質状態変化に関する学術の開拓[3. 1. 1]に利用されているほか、産業にも利用されている。また、シングルショットベースの大型パワーレーザーで実現できる 100GPa 以上の領域においては、惑星科学などの分野と連携した学術が展開されている。特に 500GPa 以上の領域は、一般的には静圧縮技術では困難[3. 1. 2]で大型パワーレーザーが唯一のアプローチ方法である。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^(用語 15)の動的圧縮により TPa を超える固体状態を実現できるようになってきている。また、パワーレーザーによる超高压状態の固体・液体状態の高速ダイナミクス(弾性波、塑性波の振る舞いや相転移)の詳細も光学計測やレーザープラズマ X 線、さらには XFEL を利用して調べられ、材料科学や地球・惑星科学などとの連携が進められている。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること(10 年程度先)：

高繰り返しレーザーによるビッグデータをもとに物質ごとに最適化されたレーザーパルス波形成型により、究極的にエントロピー制御された動的圧縮が 2030 年代には期待できる。これにより例えば、液体金属水素状態の巨大ガス惑星のコアや、水素イオンが電気伝導を支配するスーパーアイオニック状態にあると思われる巨大水惑星のコアを地上に実現することが期待できる。また、TPa を超える固体状態の実現により体心立方(BC8)構造のダイヤモンドや金属炭素など未知の物質状態をつくることで、系外巨大惑星のコアの物質状態を探索できるようになる。中核拠点におけるこれらの取組に加えて、XFEL(例えば、SACLA)や高強度中性子ビーム施設(例えば、J-PARC)との連携により、より高精度に圧縮のダイナミクスを解明できる。さらに、より高い圧力状態を一次元圧縮で実現しシミュレーション比較できるシングルショットベースのより高出力のレーザー施設(例えば、米国ローレンスリバモア国立研究所やロチェスター大学)を活用した連携も不可欠である。

・20 年～30 年先を見越した課題・期待：

高繰り返しパワーレーザーでパルス波形成型と高压物質の構造相転移を考慮したエントロピー・圧力制御技術を速やかに確立し、多ビーム・高繰り返し大型パワーレーザーシステムに適用することで他の施設では得られない温度制御された超高压状態を実現でき、独自の高エネルギー密度物質材料科学の展開が期待できる。加えて、衝撃波インピーダンスマッチング法^(用語 8)、さらには静的圧縮と組み合わせた圧縮法などの

多様な圧力制御技術を収斂することで、10TPa の高密度に圧縮した固体を創ることが可能となる。これにより、原子間隔が物質特有の波長より短く、非常に縮退した第3の量子状態（極小スケール、極低温に次ぐ超高压）を世界に先駆けて実現できる可能性があり、新たな学術領域として超高压量子物質科学の創成が期待できる。

⑤ 超高压状態の物質材料科学

・現状：

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につながる技術として利用されている。また、XFEL などを用いた高速診断技術の進歩により、レーザーアブレーション^(用語 25)と衝撃波による破砕 (spallation) 現象や粒界のナノクリスタル化などレーザーによる材料改変・改質に関する研究も進んでいる。また、レーザー衝撃波の1次元性圧縮による異常弾性波による無拡散相転移の発見により、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を生成することに成功するなど材料科学につながる新たな可能性も出てきている[3.1.3]。さらに、レーザー衝撃波の超高压状態で創られた物質状態を大気圧状態に保持する研究も出てきており[3.1.4]、新しい物質材料科学への展開が期待できる。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

数百GPa以上となる圧力は、一般的な化学結合のエネルギー密度以上に相当するため大気圧状態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[3.1.5]。一方で、材料として評価するのに必要な試料の量を生成するには、パワーレーザーの繰り返しは低く、試料の取り出しなど材料科学への展開や産業応用としての実現性が見えなかった。これに対して中核拠点のような高繰り返しパワーレーザー施設が実現できれば、例えば100J-1kJパワーレーザービームラインでは100GPa-TPaの圧力状態を繰り返し実現でき、超高压状態で創られる試料が従来に比べ桁違いに多くなり、新たな材料としての物性研究が進展する。放射光施設や高強度中性子施設と連携することで、超高压状態で創られた試料の高い精度の物性診断も可能となり、超高压物質材料科学を加速することになる。加えて、加工成形や改質などのレーザープロセスに限定されていたパワーレーザー産業応用が、新材料を創り出す新たな手段となり産業構造に変革をもたらすことが期待できる。

・20年～30年先を見越した課題・期待：

上記のような中核拠点を実現できれば、スーパーダイヤモンド（BC8構造のダイヤモンド）の商業生産や高エネルギー密度機能性材料デザイン工学の確立が期待できる。一方で、圧縮技術の向上により、人類未踏の10TPaの圧力をもつ固体の実現が期待できる。これは究極的な超高压量子材料探査の1つであり、新たな学術領域として、我が国が超高压量子物質科学を先導できる。3-10TPaのような圧力下になると、内部コア電子が結合に関与するような新たな材料創成の可能性がある。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。また、10TPaのような超高压状態を固体で実現できれば、全く新しい量子材料となる

可能性あり、新たな物質材料科学を切り拓くことになる。

(2) 高エネルギー密度状態のプラズマサイエンス

① プラズマ物理学

・現状：

プラズマは、電荷を帯びていないガスや液体、固体のような中性の物質では見られない多様な現象を生み出す。パワーレーザーは地上で最も高いエネルギー密度のプラズマを生成し、極限的な物質状態を探究する学術と様々な技術応用を拓いてきた[1.8]。このようなプラズマは、超多体の粒子群が電磁場を生成しながら集団運動する複雑系であり、ミクロな原子過程からマクロな流体運動まで多階層の物理が結合する現象の理解は極めて難しい。今後、理解進展の鍵は、統計的に十分有意な実験と多角的計測により現象を紐解いていくことである。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

高繰り返しパワーレーザーが実現すれば、従来、誤差に埋もれていた実験値と理論値の差異が有意な情報となり現れる。これは、非線形性の強いプラズマのダイナミクス理解のために重要であり、新たな基礎物理発見につながる。レーザービーム構成の自由度を生かすことで、短時間で現れる非平衡過程などミクロ現象と、長時間で現れる流動や加熱などマクロ現象をシームレスにつなぐ解析が可能となる。理論研究ではそれぞれの階層をスケール分離してモデルが構築されてきたが、その適用範囲を実験で明らかにする[3.2.1]新展開も期待され、複雑現象の理解深化に貢献できる。また、大規模データを活用したパラメータ依存性探索などのプラズマ物理インフォマティクスを確立することで複雑系科学^(用語18)の進展や新たな発見に寄与できる[2.1]。パワーレーザーと多種光量子ビームの同時照射はプラズマ計測の自由度向上をもたらす。例えば、フェムト (10^{-15}) 秒スケールのプラズマ時間発展を、光量子ビームを用いて多数のショットで観測できれば、電子流が駆動する高速物質加熱といった現象を追跡できる。加えて数桁を超える広範囲で波数・エネルギー分布計測を可能とし、乱流電磁場中での統計的粒子加速などの基礎物理[3.2.2]解明に貢献する。これまで高繰り返し実験が実現されていない kJ を超えるレーザーエネルギー領域では、星進化等に関わるプラズマ中の輸送現象が研究可能となる。このようにプラズマの広いスケールでの統合的解析を可能とすることで、高ピーク強度など特化したパラメータを持つ他のレーザー施設と相補的な研究発展が見込まれる。

・20年～30年先を見越した課題・期待：

高エネルギー密度プラズマの形成・発展ダイナミクスを理解することは、プラズマの特異な機能が生み出される原理を知ることであり、プラズマ物理学として取り組むべき重要課題である。これは物質特性を高効率に利用した科学技術イノベーションを我が国から生み出す基盤につながる。また、中核拠点において学際研究を発展させることは、プラズマを含む複雑系における集団現象の物理の理解深化をもたらす。複雑系としての自然を理解することで、同じく複雑系である我々の社会についても持続可

能なかたちを科学的に追求していけるだろう。その基礎となる学術研究を我が国の中核拠点で推進し世界を先導すべきである。

② レーザー宇宙物理学

・現状：

現代宇宙物理学は、突発的なガンマ線放出、ニュートリノ放出、重力波放出など新たな宇宙の窓により多面的な進展（マルチメッセンジャー天文学^(用語22)）をもたらしている。ブラックホールや中性子星の物理など現代宇宙物理学の大きな課題となってきた現象は高密度・高温の極限的状态のプラズマ現象が関与しており、プラズマ中の原子過程、核融合反応、エネルギー散逸過程や構造形成などの素過程の検証が極めて重要となる。宇宙・天文プラズマにおける素過程をパワーレーザーにより研究するレーザー宇宙物理学[3.2.3]が我が国から提唱され、世界的に展開されている[3.2.4]。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

レーザー宇宙物理学の研究には、宇宙観測では実現できない計測の自由度と精度の確保が重要である。高繰り返し実験により現象の時空間発展の詳細計測が可能となれば、ミクロの粒子運動が駆動するプラズマ乱流形成といった動的現象の理解が進展する。プラズマ乱流は宇宙の強磁場が生み出される機構の1つと考えられ[3.2.5]、天然の粒子加速器の候補である無衝突衝撃波の形成にも関わる[3.2.6, 3.2.7]。多くの実験により構造発展のビッグデータ解析が可能となれば、太陽フレアなど大規模イベントの引き金となる突発現象の予測も現実的となる。また、多種光量子ビームを利用した実験においても粒子や電磁場、輻射の同時計測、すなわちマルチメッセンジャー計測が可能となり、プラズマ現象の素過程の解明が加速されるとともに、プラズマジェット形成等の物理解明にも貢献する。さらに、X線・ガンマ線などの光伝播特性の解明は、星内部の光透過度（opacity）など天文観測で用いられるモデルの高精度化につながる。このように、中核拠点のパワーレーザーシステムの計測の自由度・精度を活かすことで、宇宙の複雑現象に組み込まれた素過程の物理解明が進むと期待される。一方、世界には、ブラックホール近傍の重力現象の再現が期待される欧州 ELI (Extreme Light Infrastructure) レーザー群[3.2.8]、無衝突衝撃波や核燃焼プラズマを MJ 級エネルギーで実現する米国国立点火施設 (NIF) などがあり、相補的に研究を進めることで幅広い宇宙・天文現象へのアプローチが可能となる。

・20年～30年先を見越した課題・期待：

2021年8月に米国国立点火施設のパワーレーザー実験において核融合燃焼伝播が実証され、核燃焼プラズマの実験的研究の可能性が拓かれた[3.2.9]。宇宙では、核燃焼状態で生成される粒子や輻射が天体を構成する高密度プラズマ中でエネルギーを輸送し超新星爆発に見られる爆燃波を形成すると考えられている。パワーレーザーはこのような極限状態のプラズマ現象を探究できる唯一のツールであり今後20～30年で現代宇宙物理学に新展開をもたらす可能性がある。また、プラズマ粒子加速や突発現象の素過程の理解深化は、宇宙プラズマ環境の変動による通信障害等の予測や、宇宙放射線環境下での物性評価による宇宙機器の耐久性向上など、安全な宇宙利用推進に

貢献できる。高繰り返しパワーレーザーにより宇宙の謎の解明に我が国から新しい可能性を提供し、得られる学術的知見を宇宙開発利用に活かすことが望まれる。

③ レーザー核融合科学

・現状：

レーザー核融合研究は、1972年に爆縮による核融合の概念が米国で提案され、世界で大型レーザー装置の建設とともにレーザー核融合研究が本格化した。我が国においては、1990年代前半までに、点火条件である温度10keVと高密度（固体密度の1,000倍）を個別に達成し世界を先導した。これらの結果を受け、米国・仏国は超大型レーザーによる核融合点火燃焼研究へ移行した。2009年米国で世界最大出力のレーザーシステムからなる国立点火施設が稼働を開始し、核融合燃焼に関する本格的な研究が始まった。2021年8月、米国は核融合でエネルギーを取り出すために不可欠な自律的な核融合燃焼を実証し、エネルギー増幅の入口に人類史上で初めて到達した。一方、我が国では、より効率的な高速点火方式を選択し、原理実証[3.2.10]から加熱物理の解明[3.2.11]とともに高速点火に適した爆縮新手法を発見している[3.2.12]。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

繰り返し大型レーザーにより炉心プラズマに関するビッグデータの統計的扱いが現実的となり予測の高精度化とともにデータマイニングによる最適化が期待できる。さらに、関連するプラズマ物理学（レーザーアブレーションの物理、プラズマ乱流の理解、ターゲット材料の状態方程式データベースなど）へのインフォマティクス技術^(甲 語²⁾)導入により学術深化が期待でき、レーザー核融合プラズマ物理のパラダイムシフトが期待される。また、レーザー核融合燃焼物理の理解には、日米科学技術協力協定並びにローレンスリバモア国立研究所と大学の学術交流協定の下で核融合燃焼物理に関する実験的研究を進めることが必要である。

また、10kJ以上の出力の高繰り返しパワーレーザーは、核融合反応で発生する高密度の中性子源として核融合工学に新たな可能性を提供できる。これを利用して核融合炉に必要な炉材料、ブランケット技術開発が可能だけでなく、数ワットの電気出力でミニチュアの核融合発電システムを実現できる[3.2.13]。レーザー核融合炉システム最適化を含めた総合的な研究開発で世界を先導できる。核融合炉工学を推進する上で、磁場核融合などで培われた炉工学技術が不可欠であり、核融合科学研究所(NIFS)やQST六ヶ所研究所との連携は不可欠である。また、核融合燃料である3重水素など本格的な利用に関しても富山大学水素同位体科学研究センターやQST六ヶ所研究所との連携が必要である。

・20年～30年先を見越した課題・期待：

核融合燃焼の実現や大型レーザーの高繰り返し化技術の成熟により、レーザー核融合研究は、炉心プラズマ物理の研究からエネルギーを取り出すための学術研究へ移行する段階となってきた。レーザー炉工学の本格的な取組を開始するとともに、データサイエンスとの連携による炉心プラズマの最適化や国際連携により核融合燃焼プラズマ物理の理解を通じた研究を、中核拠点などを活用し10年以内に開始する必要

がある。レーザー核融合エネルギーの早期利用（20年～30年先）を目指した新たな可能性（水素製造）もレーザー学会等から出ており[3.2.14]、日本原子力研究開発機構（JAEA）高温ガス炉研究開発センターと連携を行いながら早急に取り組む必要がある。

④ レーザープラズマ加速物理と加速器科学

・現状：

レーザー電子加速では、1PW レーザーで8GeV までの電子の加速に成功するとともに[3.2.15]、490MeV 級のレーザー加速電子ビームを用いた真空紫外領域のFEL の原理実証[3.2.16]がなされるなど、電子を数 GeV まで加速する技術はほぼ確立している。

レーザーイオン加速については、小型の重粒子線がん治療装置実現に向けた手法としての位置付けが大きくなっている。従来のイオン入射器では、イオンの加速と電離度の向上を個別に行う必要があるために必然的に装置が大きくなるが、レーザー加速では多価イオン生成と加速を同時に行うために加速器の超小型化が期待できる。このような理由で、4MeV/u のレーザー加速入射器とシンクロトロンを組み合わせたがん治療用炭素加速器が提案されている。ルミノシティ^(用語24)の観点では、数100TW 級のレーザーを用いることで、4MeV/u \pm 10%の多価炭素イオンを 10^8 ions/sr/shot 程度で発生させることができ、レーザーの繰り返しが100Hz になればイオン発生量に関しては実用レベルに達する。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

極めて高いピークパワーと100Hz 程度の高繰り返しで安定なレーザーの利用が可能になれば、レーザー加速物理の精密な検証が可能になる。イオン加速においては、理論的に高い加速効率が予測されている輻射圧加速[3.2.17]や、我が国独自の水素クラスターによるイオン加速[3.2.18]等に加えて、大学等の研究機関などから提案される様々なアイデアの検証を通じて超小型で高効率のイオン加速手法が生まれる可能性がある。電子加速においても、100GeV 級のレーザー加速実証が狙えるとともに、高い繰り返し性能を活用することで電子加速ビームの安定化や多段加速に向けた技術開発が飛躍的に進むであろう。国際的に見てもレーザーの繰り返し性能に主眼が置いた拠点形成の動きは未だなく、中核拠点を起点としてレーザー加速の研究を先導することができれば、その役割は非常に大きい。

・20年～30年先を見越した課題・期待：

レーザー加速研究では、電子やイオンの高エネルギー化に向けた科学的課題や加速器の実用化に向けた技術的課題が明確になりつつある。中核拠点を活用したオールジャパン体制でこれらの課題の解決にあたることが重要である。学術面では、加速の理解とレーザー技術の進展により、エネルギーフロンティアとしてのTeV 領域の電子加速やGeV 領域のイオン加速の実現が期待できる。また、レーザー加速器の実用面では、重粒子線がん治療用小型イオン加速器の実用化やイオンビーム駆動の非破壊検査用中性子線源、さらにはレーザー加速ベースの小型XFEL やコンプトンガンマ線源等のレーザー駆動の小型量子ビーム源の新しい医療・産業応用が期待される。さらに、レーザー加速の大幅な高効率化が示されれば、高いルミノシティを必要とする、がん治療・

診断用の放射性同位体 (RI) 製造や、核変換による放射性廃棄物低減技術等への展開が見えてくる。

(3) 高エネルギー密度場の科学

① 超高強度場物理学

・現状：

レーザーの作る電場強度のみで真空の崩壊^(用語⁹)を引き起こすために必要な電場強度 (シュウィンガー場) は 1.3×10^{16} V/cm のオーダー (レーザー強度で 10^{29} W/cm²) であり、現在の技術レベルでは到達が非常に困難な領域となる。しかし、シュウィンガー場よりも低い領域で起こることが量子電磁力学 (QED) により予想される現象、すなわち、電子・陽電子カスケード[3.3.1]、光子-光子散乱[3.3.2]、非線形コンプトン散乱[3.3.3]、後述する真空量子物理学など学術的に魅力ある研究対象は数多くある。これらの現象は、総じて発生確率 (頻度) の小さいイベントになるため、現象の観測・検証を通じてその物理に肉薄するためには、データ蓄積型の精密測定を可能とする高繰り返し・高安定の高強度レーザー施設が必要となる。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること (10 年程度先)：

非線形コンプトン散乱を例にとれば、照射強度 10^{23} W/cm² のレーザーが 200MeV の電子ビームによりコンプトン散乱を受ける際に、 10^2 個程度のガンマ線光子がアト (10^{-18}) 秒の時間幅で 1mrad^2 の立体角に発生するという試算がある[3.3.3]。アト秒領域のガンマ線の検出効率を仮に 10^{-3} 程度とすれば、繰り返し 100Hz のレーザーならば 20 分間の計測で統計誤差を 1% 程度まで抑えることが可能となる。このように、高繰り返し・高安定高強度レーザーを用いることで非線形 QED 現象の精密計測を始めとする様々な高強度場物理現象の探索が可能となり、レーザー科学と素粒子物理の融合領域の開拓が期待できる。

また、中核拠点と国内小中規模のレーザー施設の役割と強みを考慮した戦略的な連携により、当分野における我が国の国際的な競争力が一層上がると期待できる。さらに海外の大型レーザー施設 (ELI-NP、ELI-Beamlines や CAS 上海応用物理研究所 SHINE 施設) [1.3] との相補性を考え、海外施設のより高いピーク強度を活用した検証的な性格の実験と、中核拠点の高繰り返し・高安定性能を活用した精密実験という棲み分けにより学術の進展のみならず国際的なプレゼンスの向上にもつながる。

・20 年～30 年先を見越した課題・期待：

真空崩壊を引き起こすシュウィンガー場より低い領域においても、学術的に重要かつ魅力ある研究対象が数多くある。高繰り返し性能と高安定性能を前面に出すことで、データ蓄積型の精密測定を目指す高強度レーザー施設の提案は世界的にまだ無く、国内外の大型加速器や他の大型レーザー施設と相補的な利活用を通じて、高強度レーザー科学と素粒子物理学や高エネルギー宇宙物理学の融合領域の醸成が進むであろう。その結果として、非線形 QED の解明や光と真空の“量子ゆらぎ”^(用語¹⁰) の相互作用に起因する物理現象の観察などを通じて、基礎物理学の地平を広げることが期待できる。

この実現のためには、中核拠点のレーザー施設整備だけでなく異分野の研究者が長期間共同作業できる環境や次の世代を担う人材育成をサポートできる環境の醸成が必要である。あわせて、中核拠点には、新しい人材の斬新な研究提案を受け止めるための装置のアップグレードを可能とするスペースを持たせておくことが望ましい。

② 量子真空物理学

・現状：

宇宙の創成にも関連する量子真空物理学開拓の1つの方法として、光と真空の“量子ゆらぎ”の相互作用が挙げられる。真空と光の相互作用の確率は、極端に低く、世界ではレーザー強度をより増強していくことが1つの流れとなっている。世界初の10PWを実現したルーマニアのELI-NP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力学を開拓する可能性を秘めている[3.3.4]。一方で、真空と光の相互作用の特徴を考慮した実験提案[3.3.5]や、数PW-10PW程度で繰り返しを上げることで真空からの散乱光を観測することも提案されている[3.3.6]。また、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であるウンルー効果の検証も提案されている[3.3.7]。相対論で示されるように重力場と加速度場の等価性が成り立つと仮定し、レーザーとプラズマの航跡場を利用して加速度場からの放射や散乱光への影響を観測する提案もされている[3.3.8]。

・高繰り返し大型パワーレーザーシステムでできること（10年程度先）：

光と真空の“量子ゆらぎ”の相互作用は確率が極めて低いが、真空と光の相互作用は、物質との相互作用と全く異なり、電磁波の電場と磁場が絡み合い散乱光の偏光に大きく影響するため、効率的に真空分極による信号を分離検出できると考えられる。加えて、光と真空の相互作用はしきい値反応ではないため、光の強度とともに繰り返しを上げることで、より精度の高い実験が期待できる。例えば、シングルショットで真空からの散乱光のイメージを偏光分離により $S/N > 1000$ で捉えるには、200PW程度の強度のレーザーが必要であるが、中核拠点が目指す10PW/1-10Hzであれば、10分程度で同様の信号を得ることが期待できる。また、中核拠点における繰り返し実験の補完として、既に稼働しているELI-NPの10PWレーザーや、整備計画を進めているCAS上海応用物理研究所（SHINE施設）の100PWとの連携は重要である。

・20年～30年先を見越した課題・提言：

中核拠点の10PW/1-10Hzレーザーによる光と真空の相互作用の実証をもとに、我が国で開発されているプラズマフォトリックデバイス[3.3.9]やレーザー駆動高エネルギー電子ビーム・X線自由電子レーザーなどの技術を融合させることができれば、さらに多様な光と真空の相互作用実験が期待でき、量子真空光学の創始が期待できる。また、中核拠点の10kJ/100Hz/160本ビームのレーザーを全て極短パルスレーザーの励起光源として利用できれば、最大100PW/100Hz/10ビームの国際競争力ある超高強度レーザーが実現できる。これにより、光子・光子衝突をはじめ真空や光の本質に関する

物理実験が可能となり、光による量子真空物理学の深化が期待できる。さらに、中性子星やブラックホールなどの極限状態下の真空の物理との関連を含め宇宙物理学への貢献も期待できる。

4 人的資本・技術的資源の拡大による社会への貢献

前述のように、多様な知が活躍できる大型パワーレーザー施設を有した中核拠点の実現により、新たな学術の創生と幅広い分野の開拓ができる。中核拠点の実現は、パワーレーザーの技術的発展や学際的な高エネルギー密度科学分野の学術としての発展だけでなく、人的資本・技術的資源の拡大による社会への貢献も期待できる。ここでは、特に従来の大型レーザー施設では困難であった新たな人材育成の可能性を取り上げるとともに、多様な分野の施設との連携による中核拠点の活動分野のさらなる拡がりの可能性を示す。加えて本拠点の実現に伴い、社会が必要とする幅広い技術の発展への貢献の可能性を示す。

(1) 新たな人材育成

多ビーム・高繰り返し大型レーザーによる実験システムは、従来の大型レーザー施設で行われてきたレーザー核融合や宇宙物理学など学術フロンティア開拓を目的としたビッグサイエンスに貢献するだけではない。多種多様なビーム（レーザー、X線源、中性子源など）を同時に高繰り返しで利用できるように放射光施設のように、学術利用の爆発的な拡大のみならず、前述したように産学連携を含めた様々な応用研究が期待できる。このように、スモールサイエンスからビッグサイエンスまで、基礎的な学術研究から社会課題解決を目指した産学連携まで学際性豊かな研究が展開される環境は、新たな学際連携による新領域開拓や分野融合などの好機を生み出すことが期待できる。また、従来のシングルショットベースの大型レーザー施設では困難であった多様な研究の同時進行により、相互裨益の機会が飛躍的に増大し、科学におけるセレンディピティの可能性が高まることも期待できる。さらに、比較的低コストで実現できる専用ビームラインでは、産業利用はもとより人材育成を目的としたものを構築できる。人材育成専用ビームラインでは、我が国の教育プログラムで十分な対応ができていなかった「失敗を通して学ぶ」実践教育を最先端の研究の場で実現することができるなど、我が国の科学技術人材育成の在り方にも大きなインパクトを与える可能性がある。

(2) 施設連携による分野の拡がり

現在、我が国では、東京大学物性研究所、京都大学化学研究所、大阪大学レーザー科学研究所、QST 関西光量子科学研究所、理化学研究所 SACLA のパワーレーザー施設が連携し、ユーザーへのワンストップサービスと DX 推進ならびに共通のデータベース構築に必要となるデータ取扱いフォーマットの共通化などの取組が行われている[4. 1]。将来的には、診断装置をはじめレーザー装置の共通化を進めることで、各地のパワーレーザー施設の効率的な運用が日本全体で行われることが期待できる。中核拠点の大型レーザーは、多数の小型モジュールからなるため、連携している施設及び新たな連携施設とこ

の小型モジュールを共有することで、メンテナンスや運転の効率化が期待できる。さらに、中核拠点の施設の遠隔利用の効率を上げるなど、日本全体がバーチャルに1つの施設へ発展することが期待できる。

また、多種多様なビームライン（レーザー、X線源、中性子源など）と大型パワーレーザーを有し、多様な知が活躍できる本中核拠点は、X線や中性子など大型量子ビーム施設、核融合研究施設及び原子力研究開発施設など多様な施設との連携へ発展することが期待でき、さらなる分野の拡がりも期待できる。

このような中核拠点を活用した幅広い分野の展開は、我が国のより効率的かつ効果的な研究推進体制を実現させるものである。

(3) 社会が必要とする技術の発展

① 将来、実用化が期待される先端技術創出への貢献

中核拠点では、学术界と産業界の連携や異分野の連携・国際連携により、多様性と包摂・包括・社会的な一体性（インクルージョン）を同一空間で実現し、よりイノベーションが生まれやすい環境となる。海外では、大型レーザー施設を擁する中核拠点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、関連する幅広い技術が多方面から集積され、競争・協調して活用され、新たな技術が次々に生み出されている。我が国においても、多様な担い手により生み出される新たな技術が世界最先端の研究インフラに集積し、競争・協調して成果を生み出していく新たな環境（分散、集中と多様性の共存）を中核拠点で早急に作り出す必要がある。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、新たな学問が生み出され、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。(2)で述べた施設連携による分野の拡がりに加えて、多ビーム・高繰り返しパワーレーザー技術の進展は、考古学者や鉱物資源学者など新規のステークホルダーとの多様な連携による新たな共創を生み出すことが期待できる。例えば、kW級のレーザーによるスマート分光は、文化財調査から鉱物資源探査まで幅広く役立つ文理融合の新テーマとして開拓され始めている[4.2]。その他、大型パワーレーザー施設の高繰り返し動作の実現により、レーザーによる新規材料創出、材料・インフラ・生命生体診断、宇宙デブリ除去や核融合によるエネルギー創出など将来、実用化が期待される先端技術の創出に貢献できる。

② 産業や国家の持続的発展の基盤となる重要な技術力維持・強化への貢献

我が国は、世界を先導する高繰り返し大型レーザー施設実現のための基礎技術、基幹技術を有している。例えば、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、プラズマフォトンクスの提案と実証[3.3.9]、複数ビームのコヒーレント結合技術など数々のアイデアと技術開発によって世界のレーザー科学技術に寄与している。また、波長変換する非線形光学結晶分野や、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。これら我が国が既に保有している、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次世代の高繰り返し大型パワーレーザー開発のための基礎技術、基幹技術を結集し、国際競争力ある大型パワーレーザー施設を実現させることで、産業や国家の持続的発展の基盤となる重要な技術を継承・発展させることが期待できる。

さらに、中核拠点の施設を実現する多様な技術は、多様なステークホルダーとの新たな共創を生み出す。高繰り返し化に必要な先端キーテクノロジーは、超高耐力光学材料・デバイス技術や IoT を取り入れたシステム制御技術だけではない。高繰り返しの応用実験に不可欠な、ビームステアリング技術、診断技術、ターゲットインジェクションとそのトラッキング技術など多様な分野への技術的波及効果も期待できる。

③ グリーントランスフォーメーション (GX) への貢献

IoT・AI などによる生産の自律化や生活の効率化が進む第4次産業革命によるスマート社会への変革を実現するとともに持続可能な社会を目指したカーボンニュートラルな社会を目指すには、革新的な省エネルギー技術や、化石燃料が担ってきた供給力を代替できる新たなエネルギー源が不可欠である。中核拠点に集約する技術や応用研究における GX への貢献は、大きく分けると省エネシステム・省エネ新材料の創成、クリーンエネルギーの創生などが挙げられる[4.3]。

・省エネルギー化されたシステム：

パワーレーザーシステムの省エネルギー化は、レーザープロセスを中心とした産業界で、人工知能・機械学習の導入などによるシステムのスマート化として進められている。高繰り返し・高平均出力レーザー施設を有した中核拠点においても省エネルギー化は不可欠の課題である。利用者とシステムの一体運用を目指したスマート化を産業界と連携し推進し、多様なユーザーに最適な運用を行える省エネルギー化された研究施設の構築と運営を実現する必要がある。このような大型システムの省エネ化技術は、他の大型システムの省エネ化にも貢献が期待できる。

・省エネルギー材料の創成：

多種多様なビーム（レーザー、X線源、中性子源など）を同時に高繰り返しで利用できる中核拠点では、触媒、電池材料、切削加工材料など省エネルギーにつながる新材料開発に大きく貢献できる。また、レーザーによる超高压状態は、切削加工における省エネルギー化を実現する上で必要な硬度のより高いナノ結晶材料などの創成に貢献できる。さらに、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の創成も期待できる。スーパーダイヤモンドが実現できれば、従来のダイヤモンド加工に比べ加工時間は1/3～1/5以下に短縮されるので、加工プロセスにおける大幅な省エネルギー化が実現できる。

・クリーンエネルギー創生：

国際情勢の影響を受けるエネルギー問題や環境問題などの課題解決に、核融合エネルギー研究開発は重要な取組の1つである。2021年には、米国で慣性核融合方式によ

る核融合燃焼が実証され、世界に大きなインパクトを与えた。しかしながら、この方式がエネルギー源として利用できるためには、高利得の核融合燃焼と繰り返し動作可能なシステムを実現するための技術を確立する必要がある。そのためには、まだ20年から30年の期間が必要であり、安定的な電気エネルギーとして社会で利用できるようになるのは、2050年以降と考えられる。一方で、現在、水素社会を目指した研究開発プロジェクトが世界的に進められており、そこでは多様な熱源を利用した水素製造法が開発されており、2030年代から2040年代にかけて水素取扱い技術は大きく飛躍する可能性がある。このような水素取扱い技術を取り入れ、核融合反応の熱源を直接水素製造に利用することで、より早期に社会貢献できる可能性がある。

このような将来の可能性に対して、中核拠点の大型高繰り返しレーザー施設を活用することで、未臨界状態であるが核融合エネルギーによる水素製造と発電により、完璧なものではないとはいえ核融合エネルギー利用システムのプロトタイプを実現できる。これにより、2040年代より前に安定な核融合反応に関するデータベースの構築と核融合炉に関する工学的な要素技術開発を先行させるとともに、核融合エネルギー開発に必要なとなる多くの人材を育成できる。

5 おわりに

パワーレーザーを用いた高エネルギー密度科学は、固体・プラズマ・真空の極限状態の学術の創成と産業イノベーションにつながる新しい技術の創出が多く期待できる学際分野として、世界的にその重要性が増すとともに大きく進展している。このような中で、我が国は、この高エネルギー密度科学に関する多くの実績とそれを推進するためのパワーレーザー技術における競争力を有しており、速やかに高エネルギー密度科学の中核拠点を確立すべきである。

そのために、我が国の革新的なパワーレーザーに関連する国際競争力ある技術^(注釈1,2)をオールジャパン体制で統合（インテグレーション）することで、世界初の高繰り返しパワーレーザー複合施設を実現すべきである。これにより、超高強度場や超高圧の状態下での新たな量子の世界を、世界に先駆けて切り拓く。さらにAI・IoT技術により多様なユーザーに現実的に対応できるスマート化技術を導入することで、高エネルギー密度科学という最先端学術の開拓から社会を豊かにする身近な技術開発まで、幅広い研究者が利用できる国際的な知の拠点とすべきである。

これにより、我が国において多様な「知の創造」と「知の具現化」を実現するとともに、「国際的な連携を推進する要」となる高エネルギー密度科学の中核拠点を確立し、これを「世界を先導できる分野」として発展させることができる。その結果、高エネルギー物理学、宇宙物理学、プラズマ物理学などの基礎科学やエネルギー学、物質材料科学、レーザー工学、プロセス工学、情報科学など多様な学術の飛躍的発展とともに、産業構造の変革やグローバルに活躍できる人材の育成に大きく貢献できる。加えて、生命科学・医学や人文科学などを含めた「総合知」による新たな共創により我が国の学術と社会の持続的発展に貢献できる。

<用語の説明と注釈>

用語説明

1) アンジュレータ放射

周期的な磁場の中を荷電粒子が蛇行しながら通過する際に起こる、荷電粒子からの光の放射。

2) インフォマティクス技術

情報科学を用いてデータや情報の処理・統合などを行う技術。

3) 拡散ボンディング手法

材料の融点以下の温度で加圧し、接合面の間に生じる原子の拡散を利用して材料を接合する方法。

4) 教師データ

教師データとは機械学習に利用するデータのこと、それぞれの例題に対応した正解が用意されているデータのことを指す。AIに学習させる際には、例題に対して正解を出力させるための訓練を行う「教師あり学習」を行う場合があり、その際に教師データが必要になる。

5) 高エネルギー密度科学

高いエネルギー密度(圧力)の状態下で発現する現象や物性を解明する科学。超高密度・超高温といった極限的な状態での自然の謎に迫ることができる。固体やプラズマといった物質に加え、高エネルギー密度の電磁場(高強度場)も対象とする。高エネルギー密度とはおよそ100万気圧(100GPa)以上のエネルギー密度を指す。

6) コヒーレント加算

複数の波の位相関係が一定なコヒーレント状態で波を加算すること。

7) サイバーフィジカルシステム

フィジカル空間(現実の空間)で得られるデータをサイバー空間(仮想空間)で共有・処理・分析し、その結果をフィジカル空間にフィードバックするシステム。

8) 衝撃波インピーダンスマッチング法

試料物質中を伝わる衝撃波速度を、衝撃圧縮特性が既知である標準物質中での衝撃波速度と比較することで、試料物質における圧力などの物理量を決定する手法。試料物質と標準物質が接した境界面における衝撃波伝播では、両物質で圧力及び粒子速度が等しいという原理を用いる。

9) 真空の崩壊

真空から物質粒子・反粒子対が取り出されること。

10) 真空の“量子ゆらぎ”

場の量子力学の用語。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。

11) ターゲットインジェクション

レーザーを照射する試料（ターゲット）を、レーザーが集光する実験真空容器内の所定のタイミングで、所定の位置に投入すること、あるいはその技術。

12) チャープパルス増幅技術

広帯域の短パルスレーザー光（パルス状の有限の時間幅を持つレーザー光）を、周波数分散を利用して時間的に一度引き延ばし（パルス伸長）、レーザー光の増幅後に再び短パルスに圧縮することで高い強度を実現する技術。レーザー増幅過程における光学素子の損傷を防ぐために用いられる。2018年ノーベル物理学賞受賞技術。

13) 中性子共鳴吸収法

特定のエネルギーを持つ中性子が物質に入射した際に原子核による中性子捕獲（吸収）の反応確率が極端に大きくなる共鳴現象を利用し、試料中に含まれる原子核の種類を診断する手法。

14) 超高強度レーザー

大型パワーレーザーの中でもピーク強度が高いレーザー。レーザー光を短いパルス幅（フェムト（ 10^{-15} ）秒からピコ（ 10^{-12} ）秒程度）に圧縮することで実現される。

15) 低エントロピー

エントロピーが低いこと。エントロピーとは系の微視的な乱雑さを表す物理量である。エントロピーが低いと乱雑さは小さい。

16) パワーレーザー

出力1kW以上のパルスレーザー。NEDO報告書「パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて」（2015.11）<https://www.nedo.go.jp/content/100764489.pdf>

17) フォトニック結晶

光の波長と同程度の間隔の周期的な屈折率分布を持つ結晶。

18) 複雑系科学

多数の要素の集まりが要素同士の相互作用を通して集団構造形成や機能創発を行うメカニズムを解明する科学。

19) プラズマ

固体、液体、気体に続く第4の物質状態（相）で、電離気体とも呼ばれる。物質を構成する原子の一部又は全部がイオンと電子に分離しており、個々の粒子が電磁場を介して集団的な振る舞いを行う。

20) プラズマフォトリックデバイス

プラズマを利用した光学デバイス。

21) ベータトロン放射

荷電粒子ビームの軌道に振動成分があるときに起こる、荷電粒子からの光の放射。

22) マルチメッセンジャー天文学

天体现象によって発生する電磁波、重力波、宇宙線やニュートリノなどの粒子といった複数の情報（メッセンジャー）を観測し、総合的に解析することで天体现象を解明する天文学。

23) 面発光型レーザー

発光面に垂直な方向にレーザー光が出射される素子構造を持つレーザー。比較的広く利用されている垂直共振器型のVCSEL（Vertical Cavity Surface Emitting Laser）や、フォトニック結晶（用語 17 参照）を使ったPCSEL（Photonic Crystal Surface Emitting Laser）などがある。

24) ルミノシティ

ビーム（加速器）の衝突性能もしくは相互作用性能であり、ビーム電流に比例し、衝突点におけるビームサイズに逆比例する。

25) レーザーアブレーション

レーザー光の照射によって固体や液体の表面がプラズマ状態になり、表面を構成していた物質が放出される現象。

26) レーザー科学

量子エレクトロニクス、量子物理学をベースにしたレーザー物理学とレーザー工学及びレーザーを利用した基礎科学・応用科学の総称。

27) レーザー核融合エネルギー

レーザー核融合で生成されるエネルギー。レーザー核融合とは、パワーレーザーを用いて、重水素と三重水素のガスを高密度に圧縮するとともに高温に加熱することで高エネルギー密度プラズマを生成し、内部で起こる核融合反応を利用してエネルギーを得る方法である。

28) FEL

自由電子レーザー (free electron laser)。多数の磁石を周期的に並べた装置 (アンジュレータ) に加速器で高エネルギーに加速した自由電子を入射し、コヒーレントな光を発生させる。

29) X線自由電子レーザー

X-ray free electron laser (XFEL)。FEL (用語 28 参照) のうち、レーザー光の波長が X 線領域にあるものを指す。

30) XUV リソグラフィ

極紫外線 (extreme ultraviolet, XUV) を利用して半導体の基板などに微細な回路パターンを焼き付ける手法。

注釈

1) 我が国は、プラズマフォトンクス提案と実証[4.3]、レーザー宇宙物理学の提唱 (本文 3 (2)② (14 ページ) 参照) といった高エネルギー密度科学の学術領域の開拓を牽引してきた。また、パワーレーザーと XFEL の同時照射を世界で初めて可能とする設備構築 (理化学研究所 SACLA と大阪大学の連携) による超高圧物質研究の新しい研究手法の提供、レーザー核融合の高効率な点火手段である高速点火方式の原理実証と関連物理の解明 (本文 3 (2)③ (15 ページ) 参照) など先進的な研究で成果を上げている。

2) 大型で高繰り返し率のレーザーを実現するためのレーザーセラミック材料 (本文 2 (2) (4 ページ) 参照)、高出力を実現するフォトンクス結晶を用いた面発光型半導体レーザー (本文 2 (3)① (5 ページ) 参照)、高出力レーザーに対応した高耐力光学薄膜 (本文 2 (3)① (5 ページ) 参照) に代表される我が国のパワーレーザー技術は、世界的な競争力 (付録資料 3 を参照) を有している。

<参考文献>

1 はじめに

- [1.1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Opportunities in Intense Ultrafast Lasers: Reaching for the Brightest Light”, The National Academies Press, Washington DC (2018).
- [1.2] ELI – Extreme Light Infrastructure Whitebook, Ed. by G. A. Mourou, G. Korn, W. Sandner, and J. Collier (THOSS Media, Berlin, 2011).
- [1.3] C. N. Danson et al., “Petawatt and exawatt class lasers worldwide”, High Power Laser Science and Engineering 7, 54 (2019).
- [1.4] 文部科学省共同利用・共同研究拠点事業、同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、同先端研究設備プラットフォームプログラム等
- [1.5] レーザー学会技術専門委員会「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学」(2018.4~2019.3)
- [1.6] JSPS国際先端事業、同アジア拠点事業、仏国CNRS-GDRIプログラム、GDRI-INRプログラム
- [1.7] 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)
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t291-2.pdf>
- [1.8] 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、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」、(2020年6月16日) <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h160824.pdf>
- [1.9] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Bringing Fusion to the U.S. Grid”, The National Academies Press, Washington DC (2021) <https://doi.org/10.17226/25991>.

2 国際競争力ある大型パワーレーザー施設の実現性

(1) 世界の大型パワーレーザー施設

- [2.1] P. W. Hatfield et al., “The data-driven future of high-energy-density physics”, Nature 593, 351 (2021).

3 高繰り返し大型パワーレーザーを有した中核拠点で拓かれる学際的な学術

(1) 高エネルギー密度状態の固体物質材料科学

④ 超高圧状態の物理学と惑星科学

- [3.1.1] “特集：衝撃圧縮下の物質のミクロな挙動”，高圧力の科学と技術 31, No. 3, 131 (2021).
- [3.1.2] L. Dubrovinsky et al., “The most incompressible metal osmium at static pressures above 750 gigapascals”, Nature 525, 226 (2015).

⑤ 超高圧状態の物質材料科学

- [3.1.3] K. Katagiri et al., “X-ray free electron laser (XFEL) observation of lonsdaleite formation by ultrafast laser shock compression”, *Review of Laser Engineering* 47, 47 (2019).
- [3.1.4] M. Tsujino, et al., “Quenching of high-pressure phases of silicon using femtosecond laser-driven shock wave”, *Review of Laser Engineering* 36, 1218 (2008).
- [3.1.5] T. Sekine et al., “Shock compression response of forsterite above 250 GPa”, *Science Advances* 2, e1600157 (2016).

(2) 高エネルギー密度状態のプラズマサイエンス

① プラズマ物理学

- [3.2.1] L. Chopineau et al., “Identification of coupling mechanisms between ultraintense laser light and dense plasmas”, *Physical Review X* 9, 011050 (2019).
- [3.2.2] S. V. Bulanov et al., “Relativistic laser-matter interaction and relativistic laboratory astrophysics”, *Eur. Phys. J. D* 55, 483 (2009).

② レーザー宇宙物理学

- [3.2.3] 高部英明、“慣性核融合と超新星爆発”、*プラズマ・核融合学会誌* 69, 1285 (1993).
- [3.2.4] B. Remington et al., “Modeling Astrophysical Phenomena in the Laboratory with Intense Lasers”, *Science* 284, 1488 (1999).
- [3.2.5] P. Tzeferacos et al., “Laboratory evidence of dynamo amplification of magnetic fields in a turbulent plasma”, *Nature Communications* 9, 591 (2018).
- [3.2.6] 坂和洋一、高部英明、“宇宙と実験室の無衝突衝撃波 一粒子加速と磁場生成・増幅”、*プラズマ・核融合学会誌* 92, 73 (2016).
- [3.2.7] Y. Matsumoto et al., “Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave”, *Science* 347, 974 (2015).
- [3.2.8] <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>.
- [3.2.9] D. Clery, “Laser-powered fusion effort nears ‘ignition’”, *Science*, 373, 6557 (2021).

③ レーザー核融合科学

- [3.2.10] R. Kodama et al., “Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step

- towards laser fusion ignition”, Nature 412, 798 (2001).
- [3.2.11] K. Matsuo et al., “Petapascal pressure driven by fast isochoric heating with a multipicosecond intense laser pulse”, Physical Review Letters 124, 035001 (2020).
- [3.2.12] S. Sakata et al., “Magnetized fast isochoric laser heating for efficient creation of ultra-high-energy-density states”, Nature Communications 9, 3937 (2018).
- [3.2.13] A. Iwamoto and R. Kodama, “Conceptual design of a subcritical research reactor for inertial fusion energy with the J-EPoCH facility”, High Energy Density Physics 36, 100842 (2020).
- [3.2.14] 一般社団法人レーザー学会、提言書「2050年カーボンニュートラルへのレーザー技術の貢献」(2022年1月12日)
https://www.lsj.or.jp/wp-content/uploads/Download_files/teigensho.pdf

④ レーザープラズマ加速物理と加速器科学

- [3.2.15] A. J. Gonsales, et al., “Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide”, Physical Review Letters, 122, 084801 (2019).
- [3.2.16] W. Wang, et al., “Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator”, Nature 595, 516 (2021).
- [3.2.17] T. Esirkepov, et al., “Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime”, Physical Review Letters, 92, 175003 (2003).
- [3.2.18] Y. Fukuda, et al., “Energy increase in multi-MeV ion acceleration in the interaction of a short pulse laser with a cluster-gas target”, Physical Review Letters 103, 164002 (2009).

(3) 高エネルギー密度場の科学

① 超高強度場物理学

- [3.3.1] A. R. Bell and J. G. Kirk, “Possibility of prolific pair production with high power lasers”, Physical Review Letters, 101, 200403 (2008).
- [3.3.2] J. K. Koga and T. Hayakawa, “Possible precise measurement of Delbruck scattering using the polarized photon beams”, Physical Review Letters, 118, 204801 (2017).
- [3.3.3] J. Li et al., “Attosecond gamma-ray pulses via nonlinear Compton scattering in the radiation-dominated regime”, Physical Review Letters, 115, 204801 (2015).

② 量子真空物理学

- [3.3.4] E. Lundström et al., “Using high-power lasers for detection of elastic photon-photon scattering”, *Physical Review Letters*. 96, 083602 (2006).
- [3.3.5] Y. Monden and R. Kodama, “Enhancement of laser interaction with vacuum for a large angular aperture”, *Physical Review Letters* 107, 073602 (2011).
- [3.3.6] Y. Monden and R. Kodama, “Interaction of two counterpropagating laser beams with vacuum”, *Physical Review A* 86, 033810 (2012).
- [3.3.7] P. Chen and T. Tajima, “Testing Unruh radiation with ultra-intense lasers”, *Physical Review Letters*, 83, 256 (1999).
- [3.3.8] M. Yano et al., “Possibility for observing Hawking-like effects via the interaction of multi-PW class laser pulses with underdense plasmas”, *Physics of Plasmas* 25, 103104 (2018); M. Yano, A. Zhidkov, T. Hosokai and R. Kodama, “Probing space-time distortion via the interaction of multi-PW class laser pulses with underdense plasmas”, *High Energy Density Physics* 30, 21 (2019).
- [3.3.9] R Kodama et al., “Plasma devices to guide and collimate a high density of MeV electrons”, *Nature* 432, 1005 (2004).

4 中核拠点による人的資本・技術的資源の拡大

- [4.1] パワーレーザーDXプラットフォーム: <https://powerlaser.jp/>
- [4.2] 清水俊彦、宮原暁、 “イメージング分光による新しい文化財調査アプローチ～破片から「文化財」へ～”, *Optronics* 41, 481 (2022)
- [4.3] 日本学術会議 カーボンニュートラル（ネットゼロ）に関する連絡会議にて、カーボンニュートラルのための学術、テクノロジー開発への貢献の議論を開始している。<https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/carbon/index.html>

<参考資料>審議経過

第 25 期総合工学委員会 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技術と高エネルギー密度科学小委員会

令和 3 年

- 6 月 4 日第 1 回小委員会
 - ・意志の表出の方法を審議
- 8 月 26 日第 2 回小委員会
 - ・意志の表出の方法を審議
- 10 月 15 日第 3 回小委員会
 - ・見解素案を審議

令和 4 年

- 1 月 17 日第 4 回小委員会
 - ・見解草案を審議
- 2 月 4 日第 5 回小委員会
 - ・見解草案を審議
- 4 月 25 日第 6 回小委員会
 - ・見解原案を審議
- 6 月 6 日第 7 回小委員会
 - ・見解原案を審議
- 7 月 25 日第 8 回小委員会
 - ・見解原案を審議
- 9 月 16 日第 9 回小委員会
 - ・見解原案を審議
- 10 月 14 日第 10 回小委員会
 - ・見解原案を審議
- 11 月 18 日第 11 回小委員会
 - ・見解原案の最終案を審議

第 25 期総合工学委員会 エネルギーと科学技術に関する分科会

令和 3 年

- 1 月 15 日第 1 回分科会
 - ・ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会設置の承認
- 8 月 12 日第 2 回分科会
 - ・ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会の活動状況の報告とともに、関連する日本学術会議公開シンポジウム（2022 年 2 月 3 日開催「将来のエネルギー科学技術に向けたパワーレーザーとエネルギー密度科学の役割と展望」）の提案・審議

令和4年

1月14日第4回分科会

- ・ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会の活動状況の報告

8月18日第5回分科会

- ・ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会の活動状況の報告並びに、見解の発出について審議

11月29日第6回分科会

- ・見解原案を審議・承認

第25期物理学委員会物性物理学・一般物理学分科会

令和3年

1月21日第1回分科会

- ・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技術と高エネルギー密度科学小委員会の設置に関する報告

令和4年

1月4日第2回分科会

- ・ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会の活動状況の報告、今後の小委員会の活動スケジュール及び関連する日本学術会議公開シンポジウムの紹介

10月4日第3回分科会

- ・ハイパワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会の活動状況の報告

令和5年

9月14日科学的助言等対応委員会承認

- ・見解「多様な知が活躍できる大型パワーレーザー施設の実現と国際的な中核拠点の構築」

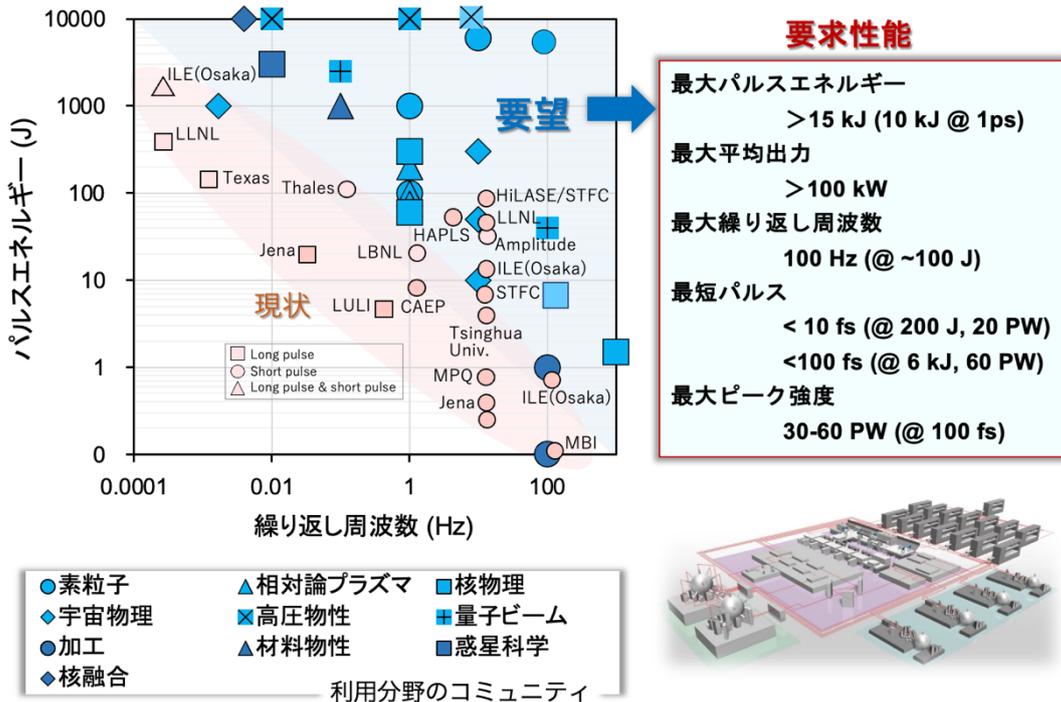
<付録>

付録資料1 研究者コミュニティにおける「高エネルギー密度科学の推進を目的とした次期大型パワーレーザー施設と中核拠点」に関する議論の経緯

創生期 (2015-2016)	2015.12.24	パワーレーザーコミュニティ会議(延べ1000名規模のメーリングリスト)を設置し、高エネルギー密度科学新展開の重要性を議論		
	2016. 3. 29	高エネルギー密度科学研究推進体制の議論		
	2016.11.24	推進体制キックオフ(阪大-QST協定)		
過渡期 (2017-2018)	2017-2019	レーザー学会技術専門会でのJ-EPoCH概念設計 物理系のコミュニティの意見を取り入れた装置仕様の策定		
	2018.11. 1 2018.11.28	産業界との協奏の場として、パワーレーザーフォーラム設置 J-EPoCH概念設計のコミュニティ会議での最終案合意		
発展期 (2019-2020)	2019. 1.23 2019. 1.28 2019. 3.31	日米政府間科学技術協定、9番目の新たな枠組み「パワーレーザー応用」調印 パワーレーザーフォーラムに革新的パワーレーザー建設ワーキングを設置し基本設計開始 日本学術会議マスタープラン2020提案(阪大-QST)		
	2019-2020	レーザー学会に新たな技術専門会設置し、サイバー空間を活用したスマート大型施設の基本設計ならびに分野拡大(産業界の支援)		
	2019. 5.22	日本学術会議に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を設置		
	2020. 3.31 2020. 6.16	文部科学省ロードマップ 提案 日本学術会議提言「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」		
	成熟期 (2021-)	2021. 5	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内にパワーレーザーによる高エネルギー密度科学小委員会を設置	
		2021. 6	パワーレーザーDXプラットフォーム(5機関連携)スタート(文部科学省「先端研究基盤共用促進事業」)	
2021. 8. 4		パワーレーザー共創コアリションキックオフ(多様な連携イニシアチブ)		
2021. 8.19 2022. 1. 1		レーザー学会によるカーボンニュートラルタスクフォースキックオフ(大型パワーレーザーの活用) レーザー学会提言「2050年カーボンニュートラルへのレーザー技術の貢献」		
				

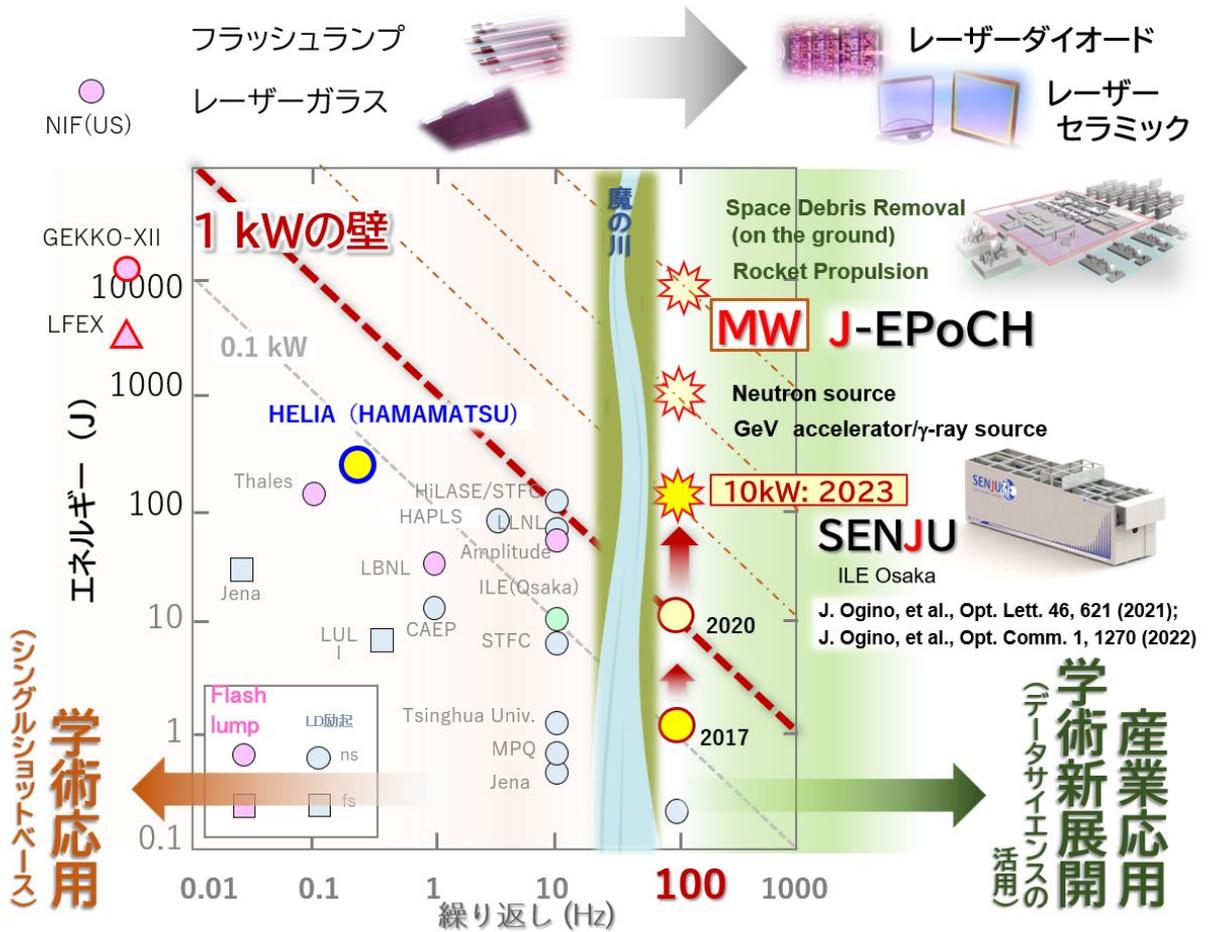
(出典) 小委員会で作成

付録資料2 レーザー学会技術専門委員会「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学」での多様な研究者コミュニティからのパワーレーザーへの要求仕様



(出典) [1.5]より編集

付録資料3 世界の主要なパワーレーザーの繰り返しとエネルギー。平均出力 1kW 及びエネルギー1J 以上で 100Hz 以上の繰り返しに大きな開発の壁があった。



(出典) 小委員会で作成