

参考資料(IFE フォーラム ホームページ: <https://www.ilt.or.jp/ife-forum/>)

A1. 日米シンポジウム「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」

1.1 プログラム

第I部 (2019. 1. 23)

午前司会 三間罔興 (日本学術会議連携会員、大阪大学名誉教授、
学校法人光産業創成大学院大学特任教授)

9:00

開会の辞

鈴置保雄 (日本学術会議第三部会員、愛知工業大学工学部教授)

9:10

挨拶

渡辺美代子 (日本学術会議・副会長)

Patricia Falcone (Deputy Director, LLNL)

西尾章治郎 (大阪大学・総長) 代読 長谷川和彦 (大阪大学北米拠点・拠点長)

相川一俊 (駐米日本大使館・次席公使)

大石富彦 (IFE フォーラム座長、関西電力株式会社・取締役常務執行役員)

基調講演

9:30 US science and technology policy

Dr. James Van Dam (Director of OFES, DOE)

9:50 日本の科学技術政策

奥篤史 (文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基盤課量子研究推進室・室長)

10:10 日本における高エネルギー密度科学研究の展望と課題

兒玉了祐 (大阪大学レーザーエネルギー学研究所・所長)

10:40 (休憩)

講演

11:00 Prospects and issues of power laser and photon beam science

Njema Frazier (Acting Director of the Office of ICF, DOE)

11:20 Current status and future of NIF

Mark Hermann (NIF Deputy Director, LLNL)

11:50-13:00 昼食

午後司会 犬竹正明 (日本学術会議連携会員、東北大学名誉教授、
一般財団法人高度情報科学技術研究機構研究嘱託、)

13:00 パワーレーザーの開発と量子ビーム科学技術

河内哲哉 (国立研究開発法人量子科学技術研究会開発機構
関西光科学研究所・所長)

13:30 Current status and future of Laboratory for laser Energetics

Mike Campbell (Director of Laboratory for Laser Energetics)

14:00 理化学研究所が拓く高エネルギー光科学技術

石川哲也 (国立研究開発法人理化学研究所放射光科学総合研究センター
センター長)

14:30 Advanced photon science and technology at LCLS

Mike Dunne (Director of the Linac Coherent Light Source, Stanford
University)

15:00-15:30 (休憩)

15:30 総合討論 —エネルギー科学技術とパワーレーザー—

-Discussions on energy science & technology and high-power laser -

Chair: Hiroshi Azechi (Member of SCJ; ILE, Osaka University)

Coordinator: Shunsuke Kondo (Member of SCJ; Nuclear Waste Management Organization of
Japan)

Panelists:

- Michael Campbell (Director, LLE, University of Rochester)
- Mike Dunne (Director, Linac Coherent Light Source, SLAC)
- Mark Herrmann (NIF Director, LLNL)
- Terry Land (Deputy Principal Associate Director NIF & Photon Science, LLNL)
- Tetsuya Ishikawa (Director, RIKEN SPring-8 center)
- Yoshiaki Kato (Professor, The GPI; Advisor for President of QST)
- Tetsuya Kawachi (Director, Kansai Photon Science Institute, QST)
- Ryosuke Kodama (Director, ILE, Osaka University)
- Miyoko Watanabe (Vice-president, SCJ)

17:00 Concluding Remarks

Shunsuke Kondo (Member of SCJ; Nuclear Waste Management Organization of Japan)

Closing of Part I

17:15 Closing Remarks of Symposium

Kenichi Ueda (Member of SCJ; University of Electro-Communications)

第2部

17:30 **Signing Ceremony of Project Arrangement**

1. Opening Announcement
Seiichi Shimasaki (Chief of Science Section, Science Counselor, Embassy of Japan)
2. Addresses and Introduction of Project Arrangement from Signers
3. Signing of Project Arrangement between MEXT and DOE
Ms. Sonoko Watanabe (MEXT)
Dr. James Van Dam (DOE)
4. Photography
5. Commenting from Signers
6. Closing Announcement

18:00 **Reception**

Chair: Yasuhiko Sentoku (Institute of Laser Engineering, Osaka University)

Congratulatory Addresses

Miyoko Watanabe (Vice-president, SCJ)

Roger Falcone (President of American Physical Society for 2018)

Speech for a Toast

Seiichi Shimasaki (Chief of Science Section, Science Counselor, Embassy of Japan)

US-Japan Deep Dive (2022.1.24)

9:00-9:30 Review of Science Council of Japan Symposium 2015

Terry Land (LLNL)/ Kunioki Mima (GPI)

9:30-10:10 Introduction

US facilities and the research objectives

Tammy Ma (LLNL)

Japan facilities and the research objectives

Yasuhiko Sentoku (ILE, Osaka University)

10:10-10:30 Coffee break

11:30-12:00 Parallel sessions

Category -1) Laser Fusion , Plasma Physics and Neutron Source

Shinsuke Fujioka(ILE):Plasma experiment

A.Yogo, (ILE,Osaka) :Nuclear Photonics

Natsumi Iwata (ILE, Osaka): Theory and simulation

Tammy Ma (LLNL):Laser exp.,

Michael Murillo (MSU) :Kinetic Simulation

Lee Bernstein (UCB):Nuclear Engineering, and

Others.

Category -2) Laboratory Astrophysics

J.Koga (QST) High field science

Youichi Sawaka (ILE):Lase Laboratory Astrophysics
Mamiko Nishiuchi (QST): Laser particle acceleration
Bruce Remington (LLNL) :Lab Astro.,
Hoshino (The University of Tokyo): Collision-less shock acceleration
Carolyn Kuranz (UM) :Lab Astro. Exp.
Frederico Fiuza (SLAC) ;Lab Astro. Simulation/Theory, and
Others.

Category -3) Extreme Material Science and X-FEL

Norimasa Ozaki (Eng. Osaka Univ.): Ultra high pressure
Yabuuchi (RIKEN) X-FEL
Inubushi (JASRI) X-FEL
Hye-Sook Park (LLNL) :Shock exp.
Andrew McKinnon (LLNL):High pressure material
Rip Collins (UR) :Lab Astro. High pressure
James Hawreliak (Washington State University):Shock physics, and
Others.
Siegfried Glenzer (SLAC):XFEL

Category -4) High power laser integration (technology and particle acceleration)

J. Kawanaka (ILE): High power laser
T.Kawashima (HPK): High average power laser
Kenichi Ueda (UEC): Laser Technology
Kiryama (QST): Ultra-intense laser
Hosokai (Osaka Univ./RIKEN): Particle acceleration
Mio (The University of Tokyo)
Felice Albert(LLNL):Laser driven XFEL

Others.

12:00-13:00 Lunch

13:00-15:30 Parallel continue and Proposal discussions

15:30-16:00 Coffee break

16:00-17:00 Discussions and Summary

Chaired by Yasuhiko Sentoku(ILE,Osaka) and Tammy Ma (LLNL)

17:00-17:30 Closing remarks

Yasuhiko Sentoku (ILE,Osaka)

Tammy Ma (LLNL)

1.2 講演概要

2019年1月23日と24日の2日間、米国コロンビア特別区ワシントン市にて頭記の日本学術会議主催の日米シンポジウムが行われた。初日は日本国大使館旧大使公邸にて基調

講演を中心とした講演とパネルディスカッションが行われた。また、セッション終了後に文部科学省と米国エネルギー省の間で高エネルギー密度科学に関する Project Arrangement (PA) の調印式が執り行われた。2 日目には専門家ワークショップ (Deep Dives) が同市 Carnegie Endowment for International Peace にて開催され、4 つの分科会による研究テーマの紹介ののち、今後の日米共同研究としてポテンシャルをもつ領域の展開方策に関する具体的な議論が積極的に展開された。本シンポジウムでの参加者は会場の制約もあり日米ともに 30 数名 (合計 67 人) であったが、円卓を囲み日米が相対して議論することができ、大変盛況であった。

1 日目 シンポジウム

シンポジウムは三間罔興 (日本学術会議連携会員) の司会により、鈴置保雄 (日本学術会議第三部会員・愛知工業大学教授) の開催の辞で始まり、渡辺美代子 (日本学術会議副会長・科学技術振興機構副理事) より開催の挨拶が行われた。引き続き Patricia Falcone (ローレンスリバモア国立研究所副所長)、西尾章治郎 (大阪大学総長 : (代読) 長谷川和彦 (大阪大学北米拠点長)、相川一俊 (在米日本国大使館次席公使)、大石富彦 (IFE フォーラム 座長、関西電力株式会社 取締役常務執行役員) の開会の挨拶が行われた。



写真1 旧大使公邸におけるシンポジウム風景



写真2 鈴置保雄(日本学術会議第三部会員)
と渡辺美代子(日本学術会議副会長)

基調講演では、まず日本の科学技術政策について渡辺その子氏(文部科学省 大臣官房審議官(科学技術・学術政策局担当))より基調講演がなされた。続いて米国の科学技術政策について James Van Dam(米国エネルギー省核融合エネルギー科学室 室長)から説明がなされた。兒玉了祐(大阪大学レーザー科学研究所(ILE) 所長)から日本の高エネルギー密度科学の課題と展望について基調講演が行われた。

引き続き日米の研究施設長より現状と展望について講演が行われた。まず、Mark Herrmann 氏(米国ローレンスリバモア国立研究所)から NIF で行われている間接照射方式レーザー核融合の現状と展開について説明がなされた。

昼食休憩の後、午後のセッションが犬竹正明氏(日本学術会議連携会員)の司会により始まり、河内哲哉氏(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(QST))よりパワーレーザーの開発と量子ビーム科学技術について講演があった。Michael Campbell 氏(ロチェスター大学)よりレーザーエネルギー研究所(LLE)の現状と将来計画の説明がなされた。続いて石川哲也氏(国立研究開発法人理化学研究所 放射光科学研究センター)より理化学研究所が拓く高エネルギー光科学技術について、また、Mike Dunne 氏(SLAC 国立加速器研究所)より Linac Coherent Light Source(LCLS)における最先端光量子科学と施設の拡充計画の説明がなされた。

講演に続いて、疇地宏氏(日本学術会議連携会員)の司会により、総合討論「エネルギー科学技術とパワーレーザー」が、コーディネーター:近藤駿介氏(日本学術会議連携会員、原子力発電環境整備機構 理事長)のもと進められた。

パネリスト (米国側・日本側 アルファベット順)

米国：

Michael Campbell (ロチェスター大学)

Mike Dunne (SLAC 国立加速器研究所)

Terry Land (LLNL)

Mark Herrmann (LLNL)

日本：

石川哲也 (RIKEN SPring-8 center)

河内哲哉 (QST)

兒玉了祐 (大阪大学 ILE)

渡辺美代子 (日本学術会議)



写真3 シンポジウム初日の集合写真。撮影場所は大使館旧大使公邸のホール。



写真4 講演：Mike Dunne (SLAC 国立加速器研究所所長) とパネル討論風景

総合討論終了後、植田憲一氏(日本学術会議 連携会員・電気通信大学 名誉教授)からの閉会の辞をもってシンポジウムは終了した。シンポジウム終了後、高エネルギー密度科学に関する事業取決め(Project Arrangement)の署名式が同会場で執り行われた。

1.3 第2部 高エネルギー密度科学に関する事業取決め 署名式

司会：嶋崎政一氏(在米国日本大使館参事官)

署名者：

(日本側)：渡辺その子(文部科学省大臣官房審議官(科学技術・学術政策局担当))

(米国側)：Dr. James Van Dam (Acting Director of Office of Fusion Energy Sciences, DOE)



写真5 高エネルギー密度科学に関する日米事業協力の調印書の様子。DOE, J. Van Dam (DOE OFE Acting Director) と渡辺その子(文部科学省大臣官房審議官)



写真6 調印書の交換

1.3 意見交換会

調印式を受け、旧大使公邸ホールにて懇親会が開催された。

司会：千徳靖彦 大阪大学レーザー科学研究所

祝辞：渡辺美代子氏(日本学術会議副会長・科学技術振興機構副理事)

Roger Falcone 氏(アメリカ物理学会 2018 年学会長)

乾杯：嶋崎政一氏(在米国日本大使館参事官)



写真7 懇親会で祝辞を述べる渡辺美代子氏(上段中央)、Roger Falcone 氏(上段右)。嶋崎政一氏の乾杯のスピーチ(中段)。会場の様子など。

1.4 専門家ワークショップ(Deep Dives)

2 日目は初日の基調講演を受け、専門家ワークショップ(Deep Dives)が Carnegie Endowment for International Peace (CEIP)にて開催された。まず、前回 2015 年のシンポジウムのレビュー・まとめが Terry Land 氏(LLNL)と三間罔興氏(日本学術会議・光産業創成大学大学院)からなされた。Deep Dives は以下に示す 4 つの分科会で構成され、日米の Moderator(まとめ役)によって発表・議論が進められた。

① レーザー核融合・プラズマ物理と中性子源

Moderator: (日)藤岡慎介(大阪大学)、(米)Alexey Arefiev(UCSD)

② 実験室宇宙物理

Moderator: (日)坂和洋一(大阪大学)、(米)Bruce Remington(LLNL)

③ 高圧極限物性と XFEL

Moderator: (日)米田仁紀(電気通信大学)、(米)Gilbert Collins(U. Rochester)

④ ハイパワーレーザー・量子線源

Moderator: (日)西内満美子(QST)、(米)Tammy Ma(LLNL)

分科会ごとに日米間で研究トピックスの紹介、日米共同研究の可能性、研究を推進させるための方策(最適な装置利用)、共同研究を行う際のコンタクトパーソンなど、幅広い意見交換がなされた。

最終のサマリーセッションでは各分科会での議論の報告が行われ、二日間のシンポジウム・ワークショップを通して様々な分野でのポテンシャルを顕在化させることができた。初日に調印された高エネルギー密度科学に関する日米間の事業取り決め(PA)を進める上で、議論の成果は日米間の協調・協同(協力)事業の具体的なテーマとして提案することが可能であり、PAで規定されている委員会の設立、共同事業の設定に向けた重要なものとなった。

二日間のシンポジウム・ワークショップは、高エネルギー密度科学・レーザー科学に関する日米協力の推進に向けた日米両サイドの強い意欲を示すものであった。今回のシンポジウムでの議論がさらに発展し、日米両国の大学、国立研究機関間の戦略的連携、大型研究施設の相補完的活用の枠組みが構築され、この分野の教育・研究が加速し、持続的な研究開発が推進されることを期待したい。

最後に、出席いただき貴重なご意見を賜った皆様と、今回のシンポジウムの企画立案、実施に尽力いただいた、日本学術会議、日本国大使館、文部科学省、米国エネルギー省に感謝の意を表します。

1.5 パネル討論

近藤(司会)：高エネルギー密度科学は核融合、材料科学、量子ビームと幅広い展開がなされている。高エネルギー密度科学分野における日米協力のプラットフォームとして MEXT と DOE の間で **Project Arrangement** の調印がこの討論会のあとに執り行われる。そこで、ここではこの仕組みを活用して日米でどういった協調・協同することができるか・すべきかを以下の4つの観点から議論したい。

1. ハイパワーレーザーの科学コミュニティへの役割
2. 米国と日本のそれぞれのアドバンテージ
3. 研究のネットワーク
4. 教育・アウトリーチ

冒頭、これまでのセッションで発言の機会がなかった3人に、これらに関する所感を述べていただく。

加藤：日本において、パワーレーザー研究を牽引する **Impact** 事業、**MIRAI** 事業等が継続的に行われている。一方で、ネットワークに関しては、**Photon Frontier Network** 事業が2017年度に終了して以来、途絶えている状況である。米国においては **LaserNetUS**(5大学・2研究所)が立ち上がり、パワーレーザーを有する拠点が連携を開始した。日米協力においても、点と点では無く、ネットワーク-ネットワーク間連携が効率的であり、国内においても全国的なハイパワーレーザーネットワークが必要である。

Land：人材こそが最も重要なリソースである。LLNL ではサマーインターン(約800人)やポスドク(約220人)といった若者を多数受け入れ、教育に貢献している。個人的な経験からも、異なるバックグラウンドを有する国籍の異なる人との交流は、人としての幅を広げることに繋がる。ある特定の研究分野に精通した研究者との交流に加え、レーザー、ターゲット、計測やモデリングなど、分野横断的な研究者との交流によってこそ、高エネルギー密度科学のように急速に発展を続ける分野で常に最先端であることが可能になる。2015年

に設立した High Energy Density Center はバーチャルキャンパスとしての機能も果たしており、特定のトピックスに対する短期講義を大学(例えば UCSD など)と連携し行い、アイデアを交換するためのワークショップを開催している。

渡辺: 世界経済フォーラム (WEF) のランキングによると、製品を作り上げる能力は日本が 1 位、未来に向けたイノベーションではアメリカが 1 位である。それゆえ日米は研究開発を進める上で最高のパートナーといえる。日本学術会議では、若手アカデミーを組織し、優秀な若手研究者のネットワークを構築している。若手ネットワークが将来社会における問題として取り上げたトピックの 1 位は人口爆発、2 位がエネルギー問題、3 位が人権問題であった。その意味でも核融合エネルギー開発に繋がる高エネルギー密度科学は若手研究者にとっても重要な研究分野となり得る。ハイパワーレーザー分野で、若手同士のグローバルなネットワークの構築が醸成されることを期待している。

Campbell: スライドで、学術会議は人文科学 (the humanities) もカバーしていると見えたが、人文科学は科学か？

渡辺: 日本学術会議はそうしている。

Campbell: サイエンスの語源は知識。(自然) 科学者も正しいことを扱うために人文科学 (the humanities) を知るべき。

ハイパワーレーザーの役割について

近藤 (司会): 科学技術におけるハイパワーレーザーの役割、学術。産業におけるイノベーションの起爆材としての役割について聞きたい。

石川: 物質科学にとって、従来法を越える高圧力を発生出来るハイパワーレーザーは素晴らしい道具である。新物質、新機能材料や、物質の破壊の解明に繋がる。

兒玉: レーザーは超高圧を制御しテラパスカルを超える圧力まで発生できる唯一のツールである。惑星科学の観点からは、スーパーアースの物理に迫ることが可能である。ハイパワーレーザーに興味を持つ若手研究者は多い。次世代の研究者の育成にとって欠かせないものである。

Dunne: ハイパワーレーザーは天文学、真空の物理、医学応用など、幅広い活用が出来る。大事な特徴は、天文学がいい例であるが、通常は手の届かない現象を実験室でアクセス可能にできることであり、このことで若い人を科学技術研究に誘い、また研究者を刺激する。しかもその成果はジャーナリスト、一般市民や中高生にもアクセシブルなサイティングなものであり、多くの人々が裨益する。

Campbell: 自分はハイパワーレーザーのない世界は考えられない。これは祝福と呪いだ。祝福は極めて多くの分野で使えること。例えば、次世代の半導体デバイスの製造技術である EUV リソグラフィへの貢献: EUV リソグラフィの為には、小さなスズ球を連続供給し、それに絶え間なくレーザーを照射するピコ秒、マイクロスケールの制御が必要である。これは正にハイパワーレーザーの研究で育まれた技術である。ただ、これにはまさしくハードワークが必要である。その挑戦のために自分はこの分野にいるともいえる。課題はこのエクサイトメントをより広い分野の人と共有すること。例えば、天文学者はさらに巨費をかけて天体望遠鏡を作ろうとしているが、彼らにハイパワーレーザーで研究しては

どうですかということ。また、将来は都市化が進み、コンパクトなエネルギー源が重要になるので、それにレーザー核融合を使うことを考えている。これも実現にはハードワークが必要である。物理もそうだが、経済性の達成はもっと難しい。辛抱強く取り組むことが重要である。レーザー核融合研究では間接照射、直接照射、中心点火、高速点火、衝撃波点火など様々な手法が追求されている。これらを一つの研究所でカバーすることは出来ない。目標に向かっての取り組みの幅を維持するためには協力の強化が不可欠である。

河内：応用におけるハイパワーレーザーの技術課題を指摘しておきたい。現在、レーザー逆コンプトン散乱やレーザー加速イオンを用いた医療応用が進められている。非常にシビアな制約を課せられる医療応用においては、ハイパワーレーザーの安定性はまだ不十分である。如何にして、ハイパワーレーザーの特性を安定させ、かつ、コストを下げるができるかということのも重要な研究課題である。

米国と日本のそれぞれのアドバンテージについて

近藤 (司会)：午前中のプレゼンでは米国から機械学習、日本側からレーザー媒質というキーワードを聞いたが、日米の取り組みの力点を聞きたい。

Herrmann：LLNL では ELI-BL に繰り返し PW レーザーを供給した。今後は、レーザーと機械学習の組み合わせが必要になってくる。レーザーを使ったプラズマ研究においては、レーザーの繰り返しに追いつける、繰り返しのターゲット供給や計測とデータの取り込みから解析までを自動化し、それをフィードバックし機械学習させることが重要な挑戦となるだろう。

Campbell：それは全くその通り。もうひとつ、高平均パワー繰り返しレーザーの開発では、レーザー媒質やコーティングの開発も重要である。1 平方センチメートルの光学素子で達成出来ている超高品質を平方メートルスケールの光学素子で実現することが求められる。今後、ハイパワーレーザーは CPU の開発の歴史を辿るだろう。かつて、CPU は大きなコアで高速計算を求められたが、現在は複数の小さなコアを同時に動かして高速計算を実現している。次世代の高平均出力の繰り返しレーザーは、多数の適正サイズのビームが結合し、(レーザービームの一様性やレーザープラズマ相互作用の抑制の為に) 広帯域を有するという方向に進むだろう。

兒玉：レーザー装置のコンピューター制御やロボット化は多くのファシリティーで既に、程度の差はあるが、実現している。ただ、それに依存しすぎ配置されている技官の数が減ると、アクシデントが起こった時の復旧に対応出来ないという苦い経験を、昨年大阪北部地震で得たことを述べておきたい。

Campbell：高繰り返し実験のための共通の計測器開発が必要。

Dunne：XFEL の高繰り返し実験の計測器の含め、共同の技術開発が有効である。

ネットワークの重要性について

近藤 (司会)：最近の経営学では組織のイノベーション文化を刺激するのに組織間ネットワークの有効性が指摘されているが、LaserNetUS の意図と効用、この点における日本の状況を聞きたい。

Campbell: 全米科学アカデミーの提言は、米国のレーザー研究施設が種々の政府機関の予算で運営されていることもあって横のつながりが薄いことを改善するべきということ。これをうけて DOE が LaserNetUS を整備し、活動を支援するとしたことに感謝している。これは第一歩。学生が動き回れるためには診断装置を共通仕様にするとか、それに向けての環境整備が必要。

Dunne: 自分は世界中を巡ってきたが、その経験からすると、LaserNetUS は重要な飛躍の基盤。共同研究のメリットは、費用合理性のある取り組みの実現にとどまらない。単独ではできないことができるようになり、研究者・リーダーが変わる。長期的視点から支援することが重要。

加藤: 日本においてはパワーレーザーの拠点が近畿地方に局在しているが、国内の優秀な人材を呼び込むために、もっと広いネットワークが必要である。

兒玉: 日本では、パワーレーザーネットワークは予算化されていない状況である。日本のネットワークを立ち上げて、米国とネットワーク同士の連携が必要である。

Herrmann: LaserNetUS では学生達が、複数の大学、研究所を跨いで活躍している。2017 年度に阪大レーザー研の藤岡教授が LLNL に 1 年間滞在したのはいい例であるが、若い日本の研究者がアメリカに来て共に研究する機会を与えること、逆に、若いアメリカの研究者が日本で研究する機会を提供することは有意義である。また、ハイパワーレーザーを支える技術者の交流も欠かせない。

Campbell: ネットワークによる交流は学生にとって大変重要な経験である。研究者交流は共同のタスクを定義することが重要である。ELI はネットワークの賜の一つであろう。日米連携の第一歩として、LLE、Rochester と ILE、OU の学生・研究者の交換留学を提案する。

石川: 人材の交流は比較的容易である。協力の重要性は皆さんが仰る通りであるが、研究資材の輸送など何らかの財政支援が必要である。

Dunne: 現在の協力を円滑に進めるための措置については会議をもち、議論していくべき大事なことだ。同時に、この分野の重要な基盤的知識は大学で通常講義されていないという問題がある。これはお互いに協力してこのホットな分野のスペシャリスト養成コースのようなものを設立することはどうか。また、5 年 10 年の地平を見据えて、この分野で共通して開発すべき技術、解決すべき課題に安定した予算措置を講じるべく、異なる行政機関が協力することができないかとも考えている。

Land: High Energy Density Center では、ネットワークのメンバーに対して大学と連携して短期講義を提供している。今お話の講師がどこにでもいるわけではないテーマについて、私どもには適切な講師がいるので、ネットワークメンバーの大学にそれをインターネットを通じてリモート授業として配信することは大いに考えられることだ。

Campbell: UR と UC リバモアでもそうしたことを始めている。リバモアでは 60 人が聴講している。Laboratory for Energetics でも Betti 教授による慣性核融合の基礎に関する短期講義を配信している。こうしたことを広げていくことこそ取り組むべきこと。もっとやれること、やるべきことがある分野だ。

ハイパワーレーザーについての教育・社会への情報提供

近藤(司会) : 学生の交流等の提案がすでになされたが、日米協力のスコープはもっと広く、関連分野や産業界も含めて考えるべきことと思う。こうした点についてご意見を聞きたい。

渡辺 : 福島での原発事故以来、日本国民が科学に対する態度が大きく変わった。事故以前は、科学は科学者の問題であったが、科学が自分達の問題であると認識するようになった。最先端の科学の意義について、社会に説明する必要がある。

兒玉 : パワーレーザー科学は巨大科学と認知されている。一方、放射光施設は、施設そのものは巨大であるが、そこで行われている科学の全てが巨大科学ではない。いわゆる、スモールサイエンスが沢山行われて、身近な成果も沢山出ている。パワーレーザー科学でも、高平均出力の高繰り返しレーザーが実現すれば、学生の教育効果は大きく、そこにスモールサイエンスへも展開され、成果の伝わりやすさや、研究と教育の効率をもっと高められる。

Campbell : 自分が大学院生の頃は放射線を扱うのはビッグサイエンスだったが、いまはスモールサイエンスも放射線を大いに使っている。ハイパワーレーザーを使うサイエンスもいまはビッグサイエンスかもしれないが、将来はなんと呼ばれるか。原子炉もかつてはサイエンスの対象だったが、今は工学の対象だ。こういうことをきちんと人々に伝えていないことが、福島の場合もそうだが、問題を複雑にしている。もう一つ大切なことは研究者の多様性の拡大。この部屋は圧倒的に男性が多いが、もっと女性研究者を育てる必要がある。いうだけではだめ。我々は高校生対象のプログラムを運営している。そこでは35%の参加者は女性で、その多くが専門家を志向するといっている。そうした気配りのあるアウトリーチが必要だ。

Land : 相手に応じた取り組みの設計が大切。気配りだ。LLNLではアウトリーチ活動として、研究者の家族を研究所に呼ぶイベントを開催しており、毎年7000人規模の参加がある。またサタデーサイエンスというイベントで、研究を地域の人々に紹介している。レーザーロード、レーザーDJもある。大学と大学の交流、大学と産業界の交流もある。このような活動が社会の理解を得るのに必要であるとともに将来の研究者を産むためにも必要である。サマースクール、あるいは一年の学生交換などアウトリーチは日米で協力する一つの意味のあるタスクだと思う。

加藤 : 若い人達に夢を与えることが重要。1970年に大阪で開催された万博ではアメリカ館でアポロ計画が展示され、1969年の初の人類月面着陸で採集された「月の石」の実物は非常に大きな反響を呼び、若い人の宇宙への夢をかきたてた。2025年に大阪万博が開催されるので、若い人の夢を刺激する企画が日米協力できると良いと思う。

近藤(司会) : フロアから発言希望があれば伺いたい。

渡辺その子 : 日本の大学は、アメリカと比べて15年遅れていると思っている。大学教員は研究や教育以外の業務に追われている状況で、国際化も十分に進んでいない。米国の大学は公立大学を含め9ヶ月の給与プラス獲得研究費からの給与支給というシステムに移行し、教員の研究費獲得の動機付けを行い、競争的に研究が行われている。米国の大学が15年前にどうやって現システムへ改革することができたのか。そのあたりのことを知りたいと

思う。

1.6 結論：

1. ハイパワーレーザー分野における日米双方が有するネットワークを介して、学術分野及び技術分野での交流を進める必要がある。
2. ハイパワーレーザーは物質科学、宇宙惑星科学、核融合エネルギー、医療産業応用に資する魅力的な施設であり、次世代の育成にも大いに資する。
3. ハイパワーレーザーの意義を広く社会に伝えることが必要である。

A2. 第3回レーザー核融合によるエネルギー開発に向けた有識者会議

IFE フォーラムは標記有識者会議を設置し 2017 年9月レーザー核融合エネルギー開発に関する提言をまとめ、近藤議長より文部科学省事務次官に説明し、提出した。提出時、事務次官より「パワーレーザーに関連する科学技術を発展拡大させる事により、レーザー核融合の実現を目指すのが適切である」とのコメントがあった。また、有識者会議でも、パワーレーザーの学術、産業応用を視野に入れて、レーザー核融合研究開発を進める事が適切であるとされた。その後、2022年1月23日、24日には、日本学术会议主催の日米シンポジウムが、米国コロンビア特別区ワシントン市の日本大使館において開催され、同時に「高エネルギー密度科学に関する日米協力事業」のプロジェクト構想(Project Arrangement)が署名され、高エネルギー密度科学推進の気運が高まっている。

上記の状況を受けて、今後の推進方策を議論することを目的に2019年2月27日第3回有識者会議が大阪大学東京ブランチにて開催された。冒頭、近藤駿介議長より、開会挨拶と有識者会議のこれまでの経緯及び提言の文部科学省への提出につき説明があった(写真1)。引き続き、有識者会議議員の森英介衆議院議員と塩谷立衆議院議員より、レーザー核融合とパワーレーザー関連技術の社会実装への期待が述べられた(写真2)。また、大石富彦 IFE フォーラム座長より、関西の3つの大型レーザー施設が連携発展する事と、2025年の大阪万博においてパワーレーザー技術からの提案がなされたことについて期待が述べられた。



写真1：挨拶する近藤議長



写真 2： 森英介衆議院議員挨拶



写真 3： 新井知彦研究開発戦略官挨拶

続いて、文部科学省研究開発局新井知彦研究開発戦略官より、我が国の核融合開発施策と高エネルギー密度科学分野の日米協力事業 (Project Arrangement) に関する説明があった(写真3)。第3段階核融合開発ロードマップとして、ITER プロジェクトの進捗に合わせて、原型炉開発に取り組む事が説明された。

また、原型炉に向けて、ヘルカル

とレーザー核融合については、開発研究への移行の可否を、適当な次期にチェックアンドレビューすることも示された。

大阪大学レーザー科学研究所 児玉了祐所長からは、大阪大学レーザー科学研究所の動向につき講演があった。大阪大学レーザーエネルギー学研究中心がレーザー科学研究所に発展したこと、実験棟を改修してレーザー技術総合研究所と協力しオープンイノベーション

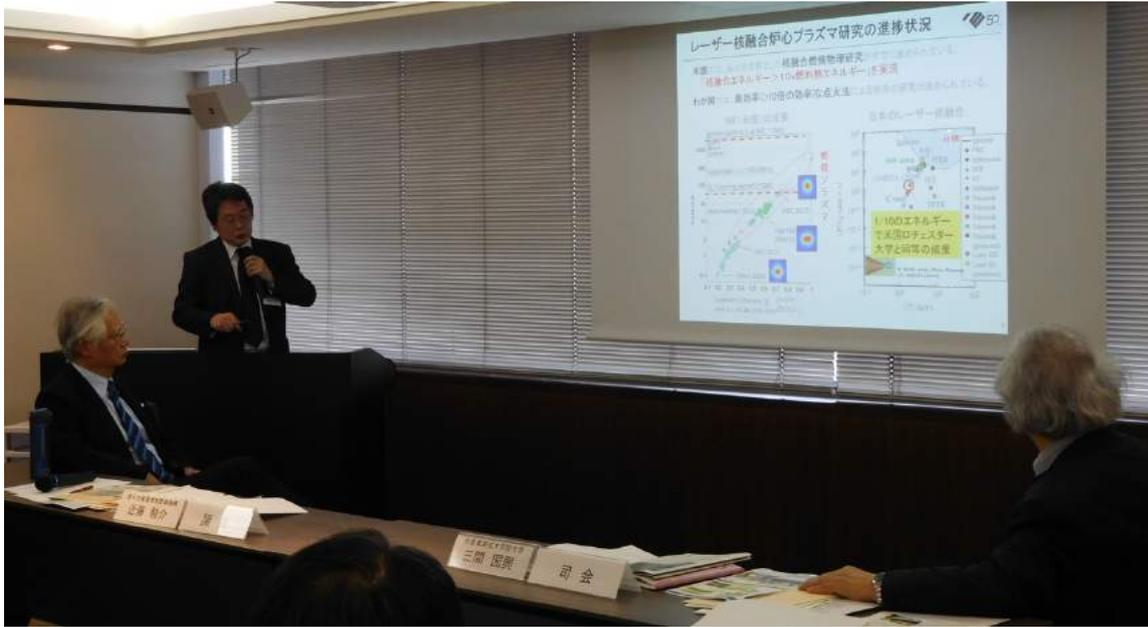


写真4 講演する兒玉了祐大阪大学レーザー科学研究所所長

ンラボラトリーを立ち上げ産学連携を推進する事、及び、パワーレーザー研究プロジェクトの推進のため、高平均出力で高パルスエネルギーの共同利用施設 J-EPoCH を学術の大型計画として提案する事につき、説明があった。

講演に続き、三間 IFE フォーラム座長代理より、今年1月の日本学術会議主催「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学に関する日米シンポジウム」について報告があった。シンポジウムは、日本からは文部科学省渡辺その子審議官、米国より James Van Dam エネルギー省核融合科学部長による、高エネルギー密度科学関連施策についての講演から始まった。引き続き、日米の大型レーザー研究施設を有する6研究機関の所長から、研究開発の動向につき講演があった。その後、日米10名のパネラーによる総合討論があった。総合討論で出された主な意見は以下通りであった。

- ◆ パワーレーザー研究を牽引する 事業の継続が必要：ネットワークに関しては、Photon Frontier Network事業が2017年度に終了し途絶えている。米国において LaserNetUS (5大学・2研究所)が立ち上がった。
- ◆ パワーレーザー科学は巨大科学と認知されているがハイパワー高繰り返しレーザーは、多様なスモールサイエンスを牽引し、学生の教育効果が大きい。
- ◆ 最先端の科学の意義について、社会に説明する必要がある：福島原発事故以来、日本国民の科学に対する態度が大きく変化している。自分達の問題と認識すべし。
- ◆ 若い人に夢を与える事が重要：1970年の大阪万博ではアメリカ館でアポロ計画と月面着陸で採集した「月の石」が展示された。2025年に大阪万博が開催されるので、若い人の夢を刺激する企画が日米協力で出来ると良い。
- ◆ 人材養成について：日本の大学は、アメリカと比べて15年遅れている。教員は研究、教育以外の業務大。米国の大学は研究者に9ヶ月の給与と獲得研究費で支給している。

15年前に現システムへどう改革したのか？



写真5 会議風景 前列左より 井澤靖和阪大、名東北大誉教授、犬竹正明名誉教授、疇地宏阪大名誉教授、神納祐一郎三菱重工執行役員フェロー、大森達夫三菱電機 主席技監（IFE フォーラム座長代理）

続いて、レーザー核融合戦略会議の進捗状況につき、光産業創成大学院大学 森芳孝准教授より報告が有り、連続したレーザー核融合実験により核融合炉工学の課題を抽出するプロジェクトの提案がなされた。また、そのための高平均出力レーザーJ-EPoC の重要性が指摘された。

講演と報告に続き、「我が国のハイパワーレーザーと高エネルギー密度科学研究ネットワーク拠点」と「次期有識者会議」が審議された。審議で出された意見は以下通りである。

- ・ ネットワーク拠点については、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が 2017 年に終了し、パワーレーザー関連技術のフロンティアを開拓する上で、研究施設の整備が重要。
- ・ 持続的な研究分野の発展には、人材養成が欠かせない。キャリアパスを開拓する上でも、産官学が一体となった取り組みが重要。
- ・ ハイパワーレーザーの対象を出来るだけ広い視野で捉えることが重要。
- ・ LaserNet US, Laser Lab Europe 等、諸外国の取り組みと連携できる施策が必要。
- ・ 社会への説明責任:アウトリーチへの取り組みが重要。
- ・ 研究成果をベースに次期計画の達成目標を明確に示す事が重要。

以上の意見をふまえて引き続き、有識者会議において、パワーレーザー、高エネルギー密度科学とレーザー核融合の進め方を審議するため、次期有識者会議の設置が決定された。

17 時 30 分に閉会し、その後、意見交換会が開催され、議員、専門委員の間で、引き続き活発に意見が交わされた。

A3. 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
パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会シンポジウム

共同開催 IFE フォーラム

目 次

- 1 はじめに
- 2 基調講演-I
 - 2.1 フォトニック結晶面発光レーザーの進展と展望 -究極の半導体パワーレーザーの実現を目指して-
野田 進 (学術会議連携会員、京都大学工学研究科教授)
 - 2.2 エネルギー科学におけるレーザープロセッシングの課題と展望
小林 洋平 (東京大学物性研究所教授)
 - 2.3 パワーレーザー・高エネルギー密度科学の課題と展望
兒玉了祐 (学術会議連携会員、阪大レーザー科学研究所所長)
3. 基調講演-II
 - 3.1 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用の現状と展望
藤岡恵子 (学術会議特任連携会員 株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役社長)
 - 3.2 エネルギー科学技術におけるレーザー駆動量子ビームの利用
河内哲哉 (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 関西研究所所長)
 - 3.3 エネルギー最適化に向けた東芝の取り組み
落合 誠 (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開発センタージェネラルマネージャー)
- 4 総合討論
 - 4.1 カーボンニュートラルに向けたレーザー技術の応用
 - 4.2 総合討論における質疑
 - 4.2.1 パワーレーザー技術と新産業創成と TRL
 - 4.2.2 熱エネルギー利用による CN への貢献について
 - 4.2.3 ネットワーク・国際連携、人材育成
 - 4.2.4 エネルギー科学技術と学術研究のあり方と研究開発中核拠点
 - 4.2.5 総合討論まとめ
- 5 閉会

1. はじめに

表記公開シンポジウムが日本学術会議（総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会）と IFE フォーラムの主催により、コロナ禍のなか2019年2月3日オンラインで開催された。大阪大学レーザー科学研究所を主会場として Zoom Webinar で配信され、のべ400名以上の参加があった。

会議の冒頭、エネルギーと科学技術分科会パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会 近藤駿介委員長（写真1）より、以下の趣旨の開会の辞があった。

「本日は、この公開シンポジウムにご参加賜り、誠にありがとうございます。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、2020年6月に、「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」と題する提言を公表しました。この提言は、「レーザー核融合」、「高圧物質科学」、「レーザー生成量子ビーム利用」、「レーザープロセス」等に関する研究開発が、次世代のエネルギー科学技術・産業活動への貢献とこれを担う人材育成の観点も踏まえて、激しい国際競争のもとで推進されているので、我が国としてはこれらに伍して進めてきているパワーレーザー・高エネルギー密度科学の研究開発を一層強化し、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設置し、新たな学術の開拓や産業創成に繋がる価値創造・人材育成にオールジャパンで取り組むべきというものです。

分科会はこの提言を踏まえて、この分野の研究開発を、我が国のエネルギー科学技術の進展に必須の新技术・新材料の創成と人材育成に寄与することも視野に入れてどう強化するべきかにつき、熱エネルギー利用や熱・電気エネルギー変換に関する分野からの入力も得て議論することは、2050年カーボンニュートラル(CN)が唱えられている今、時宜を得ていると考え関連分野の取り組みの報告とパネル討論とで構成されるこのシンポジウムを開催することにいたしました。370人を超える参加者を得て実りある会合としたく、全力を尽くしますのでよろしくご協力のほどお願いします。」



写真1 近藤駿介 委員長

引き続き、日本学術会議第三部 吉村忍部長（写真2）の挨拶で、「本日のこのシンポジウムで議論される内容につき、CN 全体に対する学術会議の大きな取り組みの一つとしてしっかりと位置付け、他の分野とも連携しながら進めていければと考えております。」と期待の言葉をいただいた。



写真2 日本学術会議第三部 吉村忍 部長

続いて、IFE フォーラムの高西一光座長（写真3）より「我が国において、レーザー核融合エネルギーの研究開発を加速していくためには、将来の社会実装に向けたマイルストーンを共有し、産学官が連携して連続、非連続のイノベーションを興し続ける必要があります。」



写真3 IFE フォーラム 高西一光 座長

また、その担い手である優秀な人材を育成し、輩出される仕組み作りも重要であると考えます。」と激励の言葉をいただいた。

最後に原子力委員会 上坂充委員長（写真4）から、「これまでレーザー加速などの研究に携わったこともあり、本日のパワーレーザーと高エネルギー密度科学に関するシンポジウムが実り多いものとなり、ハイパワーレーザーと応用が、日本の基盤技術として益々発

展していくことを期待しています。」とパワーレーザー技術開発への期待をいただいた。



写真4 原子力委員会 上坂充 委員長

2. 基調講演-I (司会 犬竹正明 学術会議連携会員 東北大学名誉教授)

2.1 フォトニック結晶面発光レーザーの進展と展望 -究極の半導体パワーレーザーの実現を目指して- (付属資料1)

野田 進 (学術会議連携会員、京都大学工学研究科教授) (写真5)

フォトニック結晶レーザー (PCSEL) は、既存の半導体レーザーの欠点、すなわち、高ビーム品質・高出力動作 (=高輝度動作) が困難であるという欠点を克服し、他の大型レーザー (CO₂ レーザーやファイバレーザー等) を一新する可能性をもつとともに、2次元ビーム走査や任意のビーム形状を生成させることが可能という高機能性をも有する。

半導体レーザーは、小型・高効率・高制御性ゆえに、通信・情報・光記憶の分野で欠くことの出来ないキーデバイスとなっているが、既存の半導体レーザーの欠点は、高ビーム品質・高出力動作が困難なことである。高出力化のために面積を大きくすると、面内方向の光の状態を制御する機構が存在しないため、多くの不要モードが出現し、ビーム品質が著しく低下する。このことが、最近、注目を集める超スマート社会 (Society 5.0) を支えるスマートモビリティやスマート製造分野の発展のボトルネックとなっている。例えば、自動運転や、ロボットの自動走行などの目の働きをする LiDAR (Light Detection and Ranging) センシングの光源部には、ビーム品質の悪い既存の半導体レーザーを用いざるを得ないため、複雑な光学系とその制御・調整が必須であり、コストの増大、サイズの増大、さらには信頼性の低下等の問題を生じている。一方、スマート製造の核となるレーザー加工においては、現状は、CO₂ レーザーやファイバレーザーなどの大型で低効率のレーザーが用いられているが、カーボンニュートラルの観点から小型・低消費電力・低コスト化に適した半導体レーザーの活用が切望されており、ここでも半導体レーザーの高輝度化は必須と言える。

半導体レーザーの高輝度化を実現可能な唯一の半導体レーザーが、フォトニック結晶レ

レーザー (PCSEL) である。本レーザーは、2次元面内の光の状態を制御可能で、不要モードの存在を許さない光共振器を形成可能なことを特徴とし、1mmΦ を超える、半導体レーザーでは極めて大きな面積でも、高ビーム品質かつ高出力動作が可能になってきている。さらに、フォトニック結晶の有する各種の光制御性ゆえに、任意の形状・偏光ビームの発生や、電氣的ビーム走査など、様々な機能性までが実現されている。本講演では、PCSEL の基礎から、最新の成果について報告した。

2.2 エネルギー科学におけるレーザープロセッシングの課題と展望(付属資料2)

小林 洋平 (東京大学物性研究所教授) (写真5)

この講演は、この先 50 年で日本の人口が 30%減少することから生じる社会問題を解決するために、労働生産性の向上が必要であるという課題提起から始める。脱炭素社会を実現するために省エネが必須であり、自動車の軽量化、電動化や半導体の微細化が求められている。例えば自動車では軽量で高剛性であるが難加工性材料である CFRP や電気自動車用の電池などに使われる複合材料のレーザー加工も重要な検討課題である。レーザー加工はこれら難加工性材料にも対応可能であるが、条件出しに労力と時間がかかるという問題がある。そこで、レーザー加工のパラメータ決定のために深層学習を用いた AI を利用する研究を行っている。これまで、深層学習でレーザー加工の進捗度の評価や、シミュレータを開発することに成功している。また、ベイズ最適化などの最適化ループがレーザー加工において成立することも示されている。

深層学習などの AI を適用するためには高品位な教師データが大量に必要となる。そこで、レーザー加工を全自動化し、高品位なデータを取得するマイスターデータジェネレーターと呼ばれる装置開発が行われた。これは 24 時間稼働できる装置であり、データ取得のスピード向上と大量データ取得が可能となった。

データ取得が人手に寄らず可能となったため、フィジカル空間とサイバー空間とを融合したサイバーフィジカルシステム (CPS) の構築が可能となった。レーザー加工の CPS をデモンストレーションし、現在は何のように活用していくかを探っている。

レーザー加工では波長やパルス幅、繰り返し周波数などのパラメータを可変できるパワーレーザーが必要となる。これは一つのレーザー装置で実現することは困難であり、多数の装置を利用してデータを確保する必要がある。レーザー加工プラットフォームの利用とともに、複数の機関が所有するレーザー装置をネットワーク化して活用することも模索されていることを紹介した。

2.3 パワーレーザー・高エネルギー密度科学の課題と展望 (付属資料3)

兒玉了祐 (学会会議連携会員、阪大レーザー科学研究所所長) (写真5)

この講演では、我が国の強みである「半導体レーザー、セラミック材料、光学薄膜」などパワーレーザー技術の分野に IoT 制御技術、AI 技術、センサー技術を統合し、国際競争力ある多目的の大型繰り返しパワーレーザー施設の重要性が指摘する。大型パワーレーザーの繰り返しを上げることで、統計精度の向上に伴いこれまで見えなかった詳細な物理過

程が見出される可能性など量子真空物理や超高压物質科学開拓の可能性がある。またスマート化された大型パワーレーザーによる極限的なレーザー圧縮技術による超高压の量子物質状態実現の可能性を示すとともに、レーザー核融合の分野においては、CNに貢献する将来のエネルギー開発に必要なキーテクノロジー開発の加速の可能性と重要性を示す。このような強みを生かし世界をリードするには、大型の高平均出力レーザーを利用できるパワーレーザー中核拠点を作り、それを活用した国際連携プロジェクトを推進しグローバルに活躍できる人材を育成することが重要である。

3. 基調講演-II (司会 三間罔興 学術会議連携会員、大阪大学名誉教授)

3.1 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用の現状と展望

藤岡恵子 (学術会議特任連携会員 株式会社ファンクショナル・フルிட்ட代表取締役社長) (写真5)

日本のエネルギー利用において、投入された一次エネルギーの60%以上が最終的に熱として廃棄されている。一方でエネルギー消費のうち70%以上が化石燃料を用いた熱利用であり、カーボンニュートラル実現にとって、熱エネルギーの有効利用は必須の課題である。カーボンニュートラルへの熱利用の寄与は、(1)排熱低減や熱リユースによる省エネルギー、(2)再生可能エネルギー大量導入時の出力変動の平準化のための蓄エネルギー、(3)電化が困難な産業プロセスへの排熱利用、(4)太陽熱、地中熱など大きな賦存量があるけれど利用されていない再生可能エネルギー熱の活用、にまとめることができる。

これらの推進のためには、熱の需要と供給の間の空間的差異を解消する蓄熱・熱輸送技術が重要である。熱輸送・蓄熱は長年にわたって開発されてきた多くの材料を用いて広い温度域に対応できる成熟した技術であり、近年はデジタルサイエンスやマテリアル・インフォマティックスの手法を用いた工学系以外の広い分野の研究者の参画による新しい発想の蓄熱・熱輸送材も提案されている。今後は、熱源や用途に応じた利用システム設計を進めることで、経済性・利便性を向上させ広く社会実装してゆくことが期待されている。熱利用システムを社会に導入する事例として地域熱供給がある。現在19都道府県の134地域で運用されており、コンビナート内の複数の工場間での熱利用も各地で展開されている。

今後の一層の進展のためには、情報の整備や政策的支援も必要である。FITのような制度的支援や、EUや英国で発表されている熱利用戦略のような中長期的な熱利用の方針を政府主導で示すことによって、企業や自治体の熱利用事業への参画やインフラ整備が促進されるだろう。技術にとどまらない未来のエネルギー利用社会のビジョン創成と共有も重要である。そのさきがけとして、種子島など主に離島で地域の産業や生活と共生する熱利用システムの実証試験が行われている。

本講演では、熱エネルギーの全体像を俯瞰し、カーボンニュートラルに対する寄与の可能性を示すことを目的として、熱エネルギー利用の現状と近い将来の進展について具体例を用いて紹介した。

3.2 エネルギー科学技術におけるレーザー駆動量子ビームの利用（附属資料5）

河内哲哉（国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 関西研究所所長）（写真5）

量子ビーム（Quantum Beam）という言葉は日本発の言葉であり、国の施策には2005年の原子力政策大綱において「高度に制御された高品位の放射線、すなわち、中性子、イオンビーム、レーザー、放射光などの「量子ビーム」が利用可能となっている」という形で登場する。またその際に、これまで放射線の範疇に入っていなかったレーザー（光量子）が放射線の一つとして組み込まれている。現在は、医療、工業、農業の様々な放射線利用の領域（経済規模4兆円（2018））において量子ビーム技術といえる放射線の制御・高度化がなされており、量子ビームの重要性がますます高まっているといえる。

量子ビームの最も重要なキーテクノロジーの一つは加速器であり、その加速器を大幅に小型化させる可能性を持つのがレーザー加速原理である。レーザー加速器の実現を通じて電子線やイオンビームをはじめとしてX線、ガンマ線源、更には中性子や中間子、RIなどの発生装置の小型化や、学術目的の超大型加速器を現実的なサイズに抑えることが可能になると考えられている。

レーザー加速研究の最近の進捗として、レーザー電子加速の場合には、高強度レーザーをガス中に集光して電子の航跡場を作ることで加速長20cmに対して8GeVまでの電子ビーム発生に成功している。また、レーザー加速で得られた電子バンチをアンジュレータに入射することでFELの発振が確認されるなど、新しい電子加速器実現に向けて着実に研究開発が進んでいる。レーザーイオン加速の場合には、イオンの質量が電子に比べて重いためにイオンをそのまま航跡場に乘せて加速することは難しい。そこで、レーザーを固体薄膜に照射することで薄膜裏面側に電荷分離状態を生成し、その電場（数10兆V/m）を利用してイオンを引き出して加速する研究が行われている。加速長0.1mm程度で、陽子を98MeV、銀の多価イオン（45価イオン）を20MeV/u（2.2GeV）まで加速した成果が報告されている。レーザーイオン加速は多価イオン生成と加速を同時に行うことができるため、特に重イオン加速器の前段部ライナックに置き換わる可能性が注目されている。このようなレーザー加速器実現に向けた試みの一例として、量研では重粒子線がん治療装置の小型化（量子メスプロジェクト）が進められている。重粒子線がん治療は高い治療効果が期待できる手法として注目されているが、装置の規模が大きいために治療コストを低くできないという問題がある。そこで、量研では、レーザー加速によるイオンビーム入射器と超電導技術を用いた小型サイクロトロン及びガントリーを組み合わせることで病院の建屋に収まるサイズの小型の重粒子線がん治療装置の開発を進めている。

レーザー駆動量子ビームの産業応用、医療応用などを進めていくうえで最も重要な課題はレーザーの高平均出力化（または高繰り返し化）と高安定化の実現になる。量子メス用イオンビーム入射器や中性子線発生とそのラジオグラフィーへの応用などは、超短パルスレーザーの平均出力が現状の1桁～2桁程度向上すれば実用化の範疇に入ってくる一方で、RI製造やADSによる消滅処理などの提案を実現させていくためには、高出力化にともなう排熱技術、光学素子の大型化を避けるためのビーム結合技術、高耐力光学素子技術、超短

パルス（広帯域化）技術、新しいレーザー媒質の開拓等々の光関連技術の底上げが必要不可欠である。そのためにも、多種多様な人材が集い、レーザー技術やそれを支える光学技術そしてレーザー駆動の量子ビーム利用技術を醸成し発展させていく中核的拠点を形成していくことが重要である。

3.3 エネルギー最適化に向けた東芝の取り組み

落合 誠（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開発センタージェネラルマネージャー）（写真5）

東芝エネルギーシステムズ株式会社ではエネルギーを「つくる」「おくる」「ためる」「かしくつかう」の全領域に幅広く技術・製品・サービスを提供している。その研究開発組織であるエネルギーシステム技術開発センターでは、現在の主力エネルギー事業領域はもちろろん、将来に向けた先端研究を行っており、カーボンニュートラルの推進、インフラレジリエンスの向上、Quality of Life(QoL)の向上に関連する技術で社会に貢献している。

カーボンニュートラルでは、例えば洋上風況解析技術を活用した洋上風力発電の最適な配置・運用の提案、再生可能エネルギーと需要のエネルギーマッチング、エネルギーを水素に転換する Power to Gas (P2G) など環境・エネルギー分野の研究開発に取り組んでいる。

また、近年、地震や台風など災害時の停電リスクが顕在化してきており、これらの悪影響に対する抵抗・回復力であるレジリエンスの向上が求められてきている。そこで、太陽光パネルや蓄電池などの分散型電源の導入による効果を、不確実な災害発生を確率的に考慮して定量的に評価する手法を開発している。

さらに QoL 分野では、例えば「切らないがん治療」に取り組んでいる。長年取り組んできた重粒子がん治療装置では、超電導回転ガントリーや量子メスなどの機能・性能向上に貢献してきた。また近年では、放射線核種を用いた標的核医学治療が世界的に立ち上がりつつあり、半減期 7 時間のアルファ核種であるアスタチン (At-211) の製造・利用に向けた開発も行っている。この他にも、多様なエネルギーニーズに応える電源として、固体減速材とヒートパイプを用いたマイクロリアクターの開発、電源供給・熱供給・水素製造を組み合わせたエネルギー マネジメントの検討も行っている。

エネルギー分野以外でも、宇宙線ミュオンの散乱・透過を用いて物質判別するコンテナスキャナや、シールド工法等によるトンネル工事時の異常(空洞など)発生検知を行う診断装置の開発を行っている。レーザー応用としては、マイクロチップレーザーによるレーザー超音波法などのユビキタスな検査計測システム、レーザーピーニングによる応力腐食割れ予防や疲労強度改善などに取り組んでいる。

今後ともカーボンニュートラル、レジリエンス、QoL に関連する技術開発に取り組み、特に QoL 分野では、超電導、加速器、レーザーなど量子応用技術の活用を展開していく。

4. 総合討論

上記の基調講演を受けて、図1の写真5にある9名の方々：コーディネーター笹尾真美

子氏（東北大名誉教授）と講演者ならびに久間和生氏（レーザー学会会長）と岩田夏弥氏（阪大准教授）による総合討論により、シンポジウムが総括された。

4.1 カーボンニュートラルに向けたレーザー技術の応用（付属資料7）

（久間和生 レーザー学会会長 国立研究開発法人農業・食品産業技術研究機構理事長）（写真5）

総合討論の冒頭、CNに向けたレーザー技術の応用につき久間和生氏より講演をいただき、以下に示すレーザー学会の活動の紹介があった。

「レーザー学会では今年の1月に、2050年カーボンニュートラルへのレーザー技術の貢献ということで、レーザー学会に所属する先生方をお願いして、提言書を作った。提言書の要約は以下の通りである。

地球温暖化は世界的な課題である。気温上昇の主な原因は、人為的な二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素など温室効果ガス（GHG）の排出であり、GHGの排出を大幅に削減しない限り、21世紀中頃に気温上昇が2℃を超えると予測されている。日本は、2030年にGHG排出を46%削減し、2050年にはカーボンニュートラル（CN）を実現することを国際社会に表明している。

経済産業省は、2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定し、経済発展と温暖化抑制の両立に向けて重点的に取り組む14の重要分野を特定した。レーザー技術は、光通信、照明、自動車等での利用が拡大しているとともに、農業、レーザー核融合など新分野への展開が加速しているなど、14の重要分野うち7分野に貢献できる重要技術です。今後、半導体レーザーの更なる小型・低消費電力化により、レーザー技術の適用拡大が促進される。レーザー学会では、産学の専門家によるタスクフォースを立ち上げ、レーザー技術がCN実現にどのように貢献できるかを検討し、2022年1月に提言書「2050年カーボンニュートラルへのレーザー技術の貢献」を公表した。レーザー技術は、国内で10～20%、世界で5～10%のGHG削減に貢献できるポテンシャルがあります。以下に、CN実現に貢献できる注目すべきレーザー技術を3点紹介する。

① レーザー核融合

2021年8月に米国ローレンス・リバモア国立研究所がレーザーによる世界初の核融合燃焼に成功した。日本でも、大阪大学レーザー科学研究所（ILE）を中心にレーザー核融合の実現に取り組んでいる。ILEでは、2050年CN実現に貢献するため、核融合による高温を利用した安価な水素製造を実用化の第1段階とする計画である。

② レーザースマート照明

レーザー走査とセンシングにより、室内の必要な部分のみ照らすことで超低消費電力（LED照明の十分の一以下）を可能とする。このとき、AIにより人の動きや周囲の環境変化を検知・予測することで違和感なく照らす。

③ スマート農業

高効率のレーザー光源を植物工場に利用することで大幅に消費電力を削減する。また、AIによる検知とレーザー照射を組み合わせた害虫の狙撃や雑草の除去により、農薬使用に

伴う GHG 排出を削減する。さらに、レーザーを用いた光センサーにより土壌の肥沃土や、土壌中の病原菌・有用微生物の状態を把握し、生育環境の最適制御を行うことで土壌からの GHG 排出削減と収量の最大化を両立する。

2050 年 CN 実現に向けたレーザー技術の応用を拡大するには、Society5.0 を具体化するレーザー技術と ICT の融合が最重要課題である。レーザー学会は、カーボンニュートラル実現に資するレーザー技術の発展に向けて、学術の振興と新分野・融合分野の開拓、社会・産業界での実用化、人材育成に務める。

4.2 総合討論における質疑

基調講演と久間氏の講演を踏まえて、パネラーならびに会場の中で意見交換がなされた。以下の4つの視点が提案された。

- 1) パワーレーザー技術と新産業創成と TRL
- 2) 熱エネルギー利用による CN への貢献について
- 3) ネットワーク・国際連携、人材育成
- 4) エネルギー科学技術と学術研究のあり方と研究開発中核拠点

意見の概要は以下の通りである。

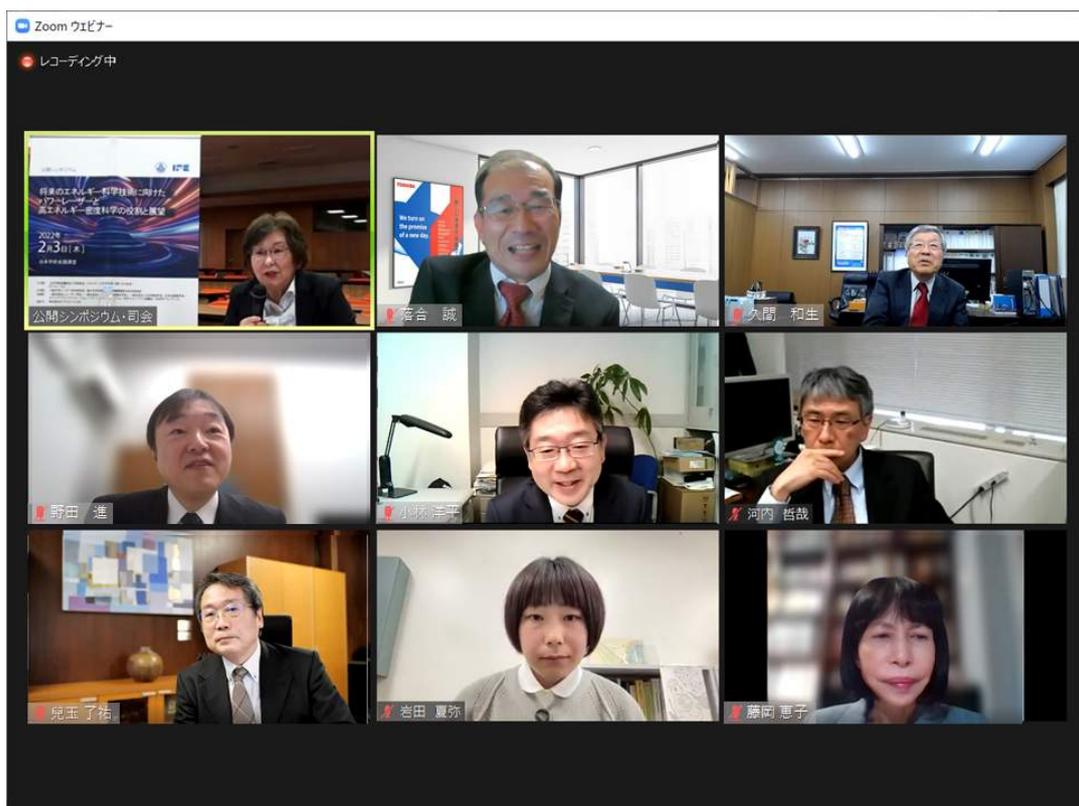


写真5 総合討論パネラー (左上から右下)
笹尾真美子 (コーディネータ)、落合誠、久間和生、野田進、
小林洋平、河内哲哉、兒玉了祐、岩田夏弥、藤岡恵子 (敬称略)

1) パワーレーザー技術と新産業創成と TRL

1. 持続的に研究開発を進め、その成果を時機を見極めて事業化する。その過程のいろいろなステージで人材を育てる必要がある。
2. 今回の新型コロナウイルス感染症拡大で、学生たちが何を望んでいるかわかったことがある。リモート、いわゆるサイバー空間での活動はできたが、一方でリアルな活動を求めていることがわかった。リアルとサイバーが一緒になった形で展開していくことの有用性がクローズアップされた。さらに言えば、本当に人が集まる空間、すなわち国内に国際的競争力のある拠点で海外の拠点と連携・競争することが重要である。
3. 研究計画を立てるにあたり、TRL (Technology Readiness Levels) の評価実現までのロードマップを作成して議論する必要がある。
4. TRL はまだまだアカデミアにはなじみの薄い言葉である。TRL5 は実験室の中での原理実証であり、これは普段やっている研究とほぼ同じである。しかし、TRL6~7 ぐらいまで行くのは一段とハードルが高い。
5. ハイパワーレーザーがもたらす先にあるゴールには、いろいろなものがある。高繰り返しパワーレーザーは物理学などの学術応用のみならず産業応用に広がっていくのが共通認識だが、学術応用での TRL 評価も考えるとよい。

2) 熱エネルギー利用による CN への貢献について

1. 水素製造・メタネーションは日本のカーボンニュートラルの中で非常に大きな柱になっている。核融合による水素製造は選択肢が増えることになり、大変重要である。
2. 核融合炉からどんな熱が出てくるかは非常に興味がある。多量に 200°C くらいの熱が出るのであれば、この温度域の熱を利用する技術は現在でも非常に成熟しており、社会システムとしてうまく生かすためのインフラや制度の完備が課題である。
3. レーザー加工技術は、熱エネルギー利用にとって重要な熱伝達、流体と電熱と熱伝達を促進するような表面加工や、蒸発を促進するような表面加工、あるいは材料開発自体にも応用が考えられる。
4. マイクロリアクターによる水素製造技術に対する位置付けを考慮する必要がある。

3) ネットワーク・国際連携、人材育成

1. 米国ではパワーレーザー施設の連携を米国では 10 機関ぐらいで行っている。その中でまとまって施設整備をやっている。我が国も、米国のネットワークとリンクしパワーレーザーの施設連携を行うことが重要。
2. 現在、我が国のレーザーネットワークにはレーザー加工分野のデジタルトランスフォーメーション (DX) がある。人材育成を含めた形で国際連携を進めるべきである。
3. 最近の日本の科学技術の低下が問題になっている。一つの原因は、海外の一流の機関に行って自ら研究する意欲を持つ若手研究者の数の減少である。その結果として、海外との共著論文が著しく減っている。中核拠点での研究開発では、海外の拠点とのネットワークで若手研究者の育成も含めて行う必要がある。
4. 現在の日本の企業では海外の経験があることがプラスになる。以前は会社の留学制

度の応募が非常に高い倍率だったのが、最近では倍率がそれほど上がらないのが問題である。実際海外に行ってみて、その社会の中で自分の実力だけでやってみるといふモチベーションを如何に上げていくかが課題である。

4.2.4 エネルギー科学技術と学術研究のあり方と研究開発中核拠点

1. パワーレーザーは、高エネルギー密度状態での複雑な相互作用を通して、物質がどのような姿を見せてくれるのか、そしてどんな機能を発現するのかといった研究を可能にするものである。その解明には個別の分野ではなくて、物理、化学、数学といったさまざまな学術分野の融合研究を展開していくことが鍵である。
2. 世界で多数の大型パワーレーザー施設では、真空の物理から核融合燃焼プラズマの科学まで、新しい領域が開発されようとしている。世界と共に日本がこれからの世界に必要とされる学術や産業を先導していくためには、最先端の研究をできる環境が重要である。
3. J-EPoCH などの大型パワーレーザー施設は、世界と伍する研究環境を提供するものである。研究拠点が国内にあるのは、日本の若い学生やこの分野に進もうと思っている若手研究者にとって、とても励みになることである。
4. 自然科学から社会実装につなげるには、産官学が融合したネットワーク拠点を国内に作る有効である。
5. 中核拠点での共同利用・共同研究は、研究成果の評価基準、新しい課題創出、共通のブレークスルーポイントを持つことができるメリットがある。
6. 我が国の人口減少は大きな問題であり、人材育成がさまざまな分野の共通課題である。人口が減じた分を補うには知財生産効率を上げる必要がある。若い人々が今まで以上に科学技術に強い関心を持てるような政策が必要である。
7. 中核拠点を作ることによって、ドクターを取った人たちの活躍する現場（キャリアパス）ができ、大学院の研究がそのまま研究者としての道につながる人材育成の場となることを期待される。

4.2.5 総合討論まとめ

以上の総合討論により、「パワーレーザーと高エネルギー密度科学は、科学技術・産業技術における Society5.0 の実現ならびに CN の達成に重要な役割を果たすものであり、長期的に我が国がこの分野の研究開発において世界を牽引するには、国際的人材育成のため“世界の道場”としての中核拠点を国内に持つべき」であり、ひいては国際的にリーダーシップを取れる人材の育成に資すると結論された。

5. 閉会

最後に疇地宏氏（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）（写真6）より閉会の辞が述べられ盛会裏にシンポジウムは閉幕した。



写真6 総合工学委員会エネルギーと科学技術分科会 疇地宏 委員長

学術会議ホームページ：

<https://www.sc.j.go.jp/ja/event/2022/317-s-0203.html>

A4. 米国国会下院、科学技術と宇宙委員会エネルギー部会における核融合に関する証言記録 (2021. 9. 11)

科学技術・宇宙委員会:議長(女性): Eddie Berbice Johnson (民主議員:Texas), Ranking Member: Frank Lucas (議員:オクラホマ)
エネルギー部会議長: Jamaal Bowman (民主議員: New York),
Ranking Member: Randy Weber (共和議員: Texas)

Dr. Bob Mungaard (Commonwealth Fusion System 会社 代表取締役) 証言

Dr. McCarthy は ITER が中心的役割を果たすと主張。しかし、ITER とは別に、超電導コイルの新技术により、約2倍高い磁場を用いることで、装置の体積が 1/8 になることを利用する新型高磁場核融合実験装置 (SPARC) を、マサチューセッツ工科大学に出資して建設を開始した。この実験結果をうけて、高磁場核融合実験炉 (ARC) を 2050 年までに建設し、発電を実証する予定である。

Prof. S. C. Cowley (プリンストン大学 プラズマ研究所所長) 証言

ITER のコストを下げるために、球状トカマク実験装置をプリンストンで建設している。この実験結果を活用し、この方式で、ITER の結果も活用して、小型核融合発電のパイロットプラントの設計可能である。産業界の開発を積極的に活用することが重要である。

Prof. Troy Carter (UCLA カリフォルニア大学、プラズマ科学技術研究所)

米国エネルギー省科学局核融合エネルギー部 FESAC 委員 証言

FESAC の核融合とプラズマ科学長期計画部会 部会長

より積極的に核融合エネルギー開発を進めるべしとの意見を表明。

2つの核融合研究の進歩を特筆

- 1) レーザー核融合のローレンスリバモア研究所の点火成功
- 2) 高温超伝導技術革新による超高磁場核融合の可能性実証 (磁場強度 20 T (20 万ガウス) 発生に成功)

Dr. Tammy Ma (ローレンスリバモア研究所 NIF-高強度レーザー・高エネルギー密度科学プログラムリーダー) 証言

NIF により、昨年8月、点火実証に成功 (数参照)。この結果、レーザー核融合開発を加速する提案がヨーロッパ、中国、ロシアで改めて浮上している。

上記の結果を受けて、慣性核融合エネルギー開発を再構築することを米国エネルギー省に強く求めている。

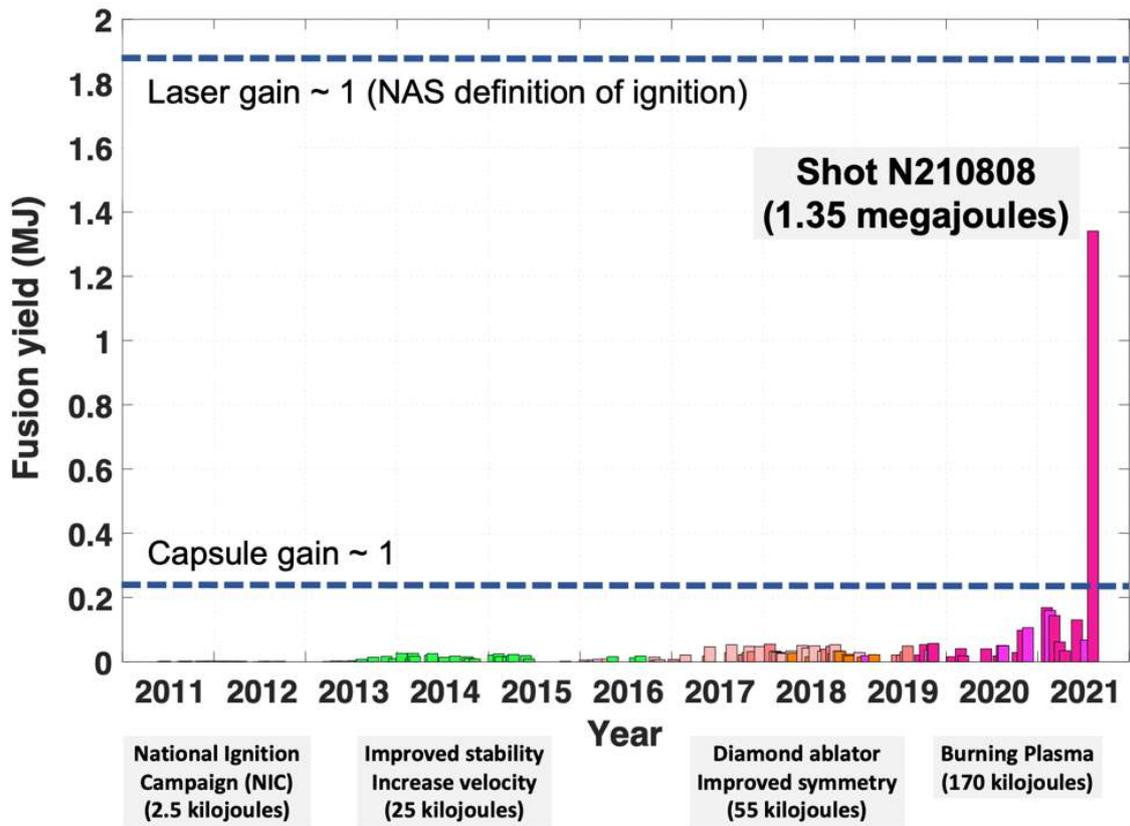


Figure 1. Shot N210808 on NIF produced more than 1.35 megajoules of fusion yield and marks a significant advance in ICF research. The histogram shows the progress over a decade of dedicated research and development on the NIF.

A5. 海外の IFE 開発戦略

A5.1 米国の IFE 開発戦略

BASIC RESEARCH NEEDS WORKSHOP 2022 Report (Executive Summary)

2021.8月のNIFによるBreak-even達成を受け開かれた米国DOE OFES主催の標記ワークショップのレポートのExecutive Summaryにもとづく米国のIFE開発戦略を紹介する。その後、このレポートをもとに、イナーシャルヒュージョンエネルギー開発をDOE OFESのプロジェクトとして取り上げるようになった。米国においては、現在IFEの研究開発が予算化されつつある。

レポート詳細は <https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/workshop-reports/2023/IFE-Basic-Research-Needs-Final-Report.pdf> を参照

BASIC RESEARCH NEEDS WORKSHOP ON Inertial Fusion Energy REPORT OF THE FUSION ENERGY SCIENCES WORKSHOP ON INERTIAL FUSION ENERGY. 2023.01.11

Chair: Tammy Ma, Lawrence Livermore National Laboratory
Co-chair: Ricardo Betti, University of Rochester. Laboratory for Laser Energetics

EXECUTIVE SUMMARY

Fusion has the potential to provide a reliable, limitless, safe, and clean energy source. Developing fusion energy is a grand scientific and technical challenge that will require diverse approaches and paths to maximize the likelihood of success. Inertial Fusion Energy, or IFE, is one such highly promising approach. While the main approach previously pursued by the U.S. Fusion Energy Science program has been Magnetic Fusion Energy (MFE), a 2013 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) report concluded that



**DEVELOPING
FUSION ENERGY**

Fusion is the process that powers the Sun. The ability to harness this power would provide a source of reliable, abundant, safe, and clean energy to move us away from a reliance on hydrocarbon-based energy sources. Inertial fusion energy (IFE) is a particularly promising approach to achieving this grand scientific and technical challenge.

The DOE-sponsored Basic Research Needs (BRN) workshop, held in June 2022, produced a list of Priority Research Opportunities (PROs) to inform future research efforts in the areas constituting the building blocks of an IFE program:

- Target physics
 - Energy coupling
 - Compression and burn
 - Alternate fusion concepts
- Target design
- Driver technologies
- Power systems
- Cross-cutting fields
 - Theory and simulations
 - Machine learning and artificial intelligence
 - Measurement innovation
 - Workforce development
 - Research infrastructure

“The appropriate time for the establishment of a national, coordinated, broad-based *inertial fusion energy program* within DOE would be when ignition is achieved.”

In December 2022, after the conclusion of the BRN Workshop, NIF demonstrated greater energy out of the target (3.15 MJ) via fusion reactions than the lasers delivered to the target (2.05 MJ), well above the ignition threshold and with a target energy gain of 1.5. This latest achievement, along with increasing private investment, ideally positions IFE as a highly promising approach for harnessing fusion for our energy needs here on Earth.

Why Inertial Fusion Energy (IFE)?

In the pursuit of fusion as a clean energy source, IFE has numerous advantages over other fusion approaches:

- IFE would utilize separable components and is highly modular, allowing for flexibility now as subsystems are developed and later in a commercial reactor
- IFE has multiple target concepts that can be tested with the same driver, hedging risk and allowing for varied tests with the same facility
- IFE has an expected higher burn-up fraction of the DT fuel
- IFE presents an attractive development path that enables methodical progress on systematically more complex facilities
- IFE pursuits will result in myriad technology and science spin-outs that will undoubtedly strengthen the U.S. economy and competitiveness

One of the key milestones on the path to fusion energy is the demonstration of a self-sustaining burning plasma of deuterium-tritium (DT) in the laboratory. Such a milestone was achieved *for the first time for any type of fusion* anywhere in the world in August 2021 at NIF. In this experiment, a tiny, mm-size capsule filled with DT was compressed and heated by the NIF laser to achieve the extreme conditions required for ignition. A thermal runaway driven by the fusion reaction products occurred and ignited the plasma, producing approximately 1.37 MJ of fusion energy, an amount about 50x larger than the mechanical work used to compress the plasma. This achievement carried profound implications as it demonstrated that laboratory ignition is possible. However, because of inefficiencies of the implosion process, only about 25 kJ of energy (out of 1.9 MJ of laser energy) reached the imploded DT plasma.

In December 2022, scientists achieved the next step in the development of inertial fusion energy by demonstrating a net target gain with the fusion energy output exceeding the laser energy on the target (scientific breakeven or $Q > 1$). Net target gain is a critical step along the path of developing the science and technology to achieve a positive “engineering gain” ($Q_E > 1$ where total energy out $>$ total energy in) required to establish the viability of IFE for energy production. The laboratory demonstration of ignition and net target gain has

long been considered as a critical milestone for initiating a coordinated program aimed at developing IFE, as stated in the 2013 NASEM report on IFE: “In the event that ignition is achieved on the National Ignition Facility or another facility, and assuming that there is a federal commitment to establish a national inertial fusion energy research and development (R&D) program, the Department of Energy should develop plans to administer such a national program (including both science and technology research) through a single program office.”

The private sector is showing rapidly growing interest in developing fusion energy, further augmenting the urgency to establish a federal IFE program. Private funding for fusion has skyrocketed in the last decade and surpassed \$4.7B, with \$180M going into IFE in the last two years [FIA website reference]. Establishing and growing a national IFE program while

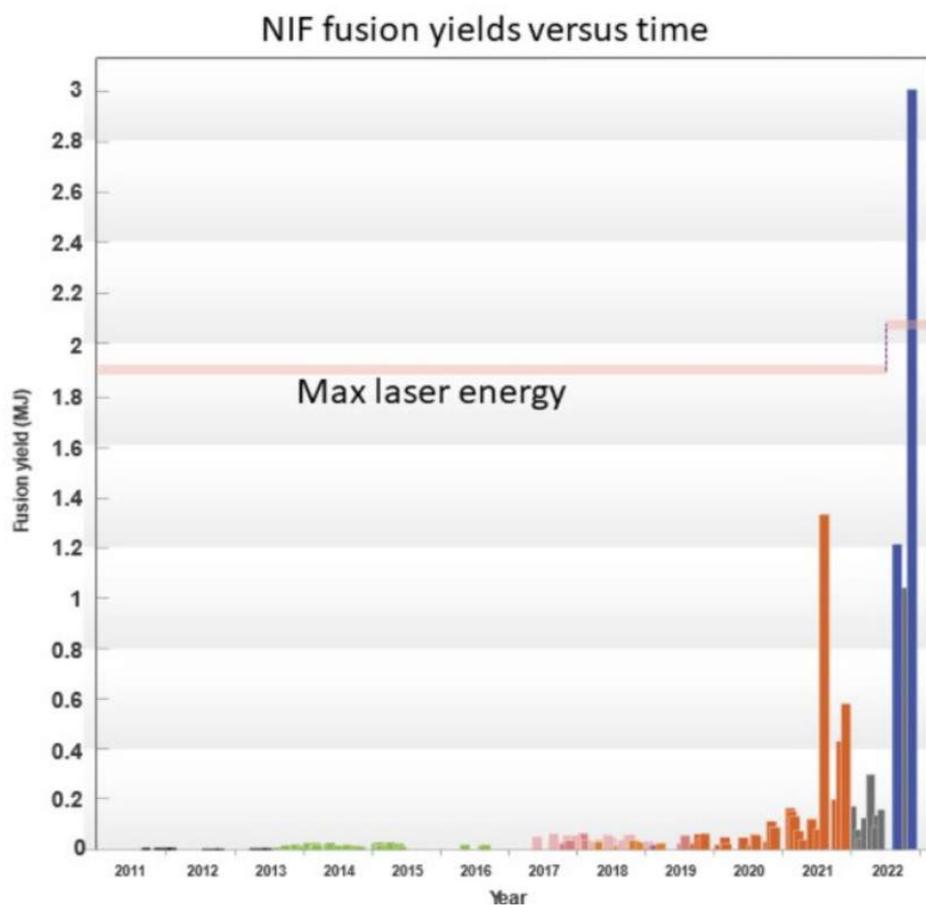


Figure ES.1: In December 2022, a shot on the NIF produced more than 3.15 MJ of fusion yield, achieving ignition, a long-sought-after landmark in inertial confinement fusion (ICF) research.

partnering with private industry could fast-track the development path for fusion energy. In pursuit of such an outcome, in March 2022 the White House Office of Science and Technology Policy hosted a summit of fusion technology leaders from the public and private sectors to develop a decadal vision for commercial fusion energy[reference]. Further, a renewed interest in inertial fusion energy was already manifest in the two-year long community planning process to provide input for the DOE Long Range Strategic Plan for Fusion Energy, first through the American Physical Society’s Division of Plasma Physics (APS-DPP) Community Planning Process (CPP) and followed by the Fusion Energy Sciences Advisory Committee’s (FESAC) subcommittee report, “Powering the Future: Fusion & Plasmas.” After the demonstration of ignition threshold in 2021, experts in inertial fusion and high energy density physics convened online in February 2022 for a community-led IFE planning workshop, to which attendees submitted more than 90 white papers. A community- driven report was released in May 2022 calling for near and long-term assessments for research opportunities in IFE.

Basic Research Needs (BRN) Inertial Fusion Energy (IFE) Effort

The 2022 Basic Research Needs (BRN) effort, organized under the auspices of

Basic Research Needs (BRN) Effort

DOE FES invited a total of **120 subject matter experts** from across **the U.S. and internationally** to serve as workshop panelists for the BRN. The panelists, divided into twelve subpanels, worked over the months of March – November 2022 to address the charge elements and to identify focused PROs in each of the specific IFE research and development areas. An **online workshop, held June 21-23, 2022, gathered the community together** for targeted discussions. Engineers from U.S. and international academic institutions, national laboratories, private companies, and government officials attended. A series of closed working sessions attended only by the panel members followed the day-long open session.



the DOE Office of Fusion Energy Sciences (FES), sought to identify the main priority research opportunities (PROs) that should be supported by a newly established IFE program within FES. In addition, the DOE charge for the BRN (called for a Technology Readiness Assessment of the different IFE concepts, an evaluation of the magnetic fusion energy (MFE) efforts that could be leveraged to advance IFE, and an assessment of the private sector role in a national IFE Program.

An integrated IFE program will necessarily include many different science areas, technology development efforts, infrastructure needs, private industry involvement, and workforce recruitment. ***In June 2022, the DOE Office of Science sponsored a Basic Research Needs to lay out the foundations for an IFE program within the Fusion Energy Sciences Program (FES).*** Following the workshop, BRN panel members worked to provide comprehensive guidance through PROs, developed at a high level (Overarching PROs), as well as at each area-specific level (Focused PROs). They provided additional guidance in the form of Structural Concepts that could benefit the development of a new IFE program at its inception.

Below we provide a summary of these **BRN Findings, Structural Concepts** for developing a new IFE program, and **Overarching PROs** that should be the main priority for this new program; these points are further detailed and supported in the body of this report. IFE-specific science and technology areas, as well as cross-cutting areas, are each described in the chapters that follow, with their current status, challenges, and specific priority research opportunities outlined.

BRN FINDINGS:

(The BRN Findings are observations or general conclusions reached as a result of the BRN panel's deliberations.)

IFE is a promising approach to fusion energy with different technical risks and benefits with respect to MFE and must be an important part of the FES R&D portfolio.

The recent demonstration of thermonuclear ignition on the National Ignition Facility constitutes a **pivotal point in the development of inertial fusion energy.**

Major advances in IFE-relevant physics and technology, including demonstration of ignition, occurred over the last several decades funded mostly under the national security mission. The **United States is the recognized leader in IFE science and technology** because of this investment.

Private industry is driving the commercialization of fusion energy in the United States, and public-private partnerships could greatly accelerate the development of all fusion energy concepts.

Accelerating IFE will require a suite of dedicated, new, and upgraded facilities to increase the rate of learning and test new technologies. Facilities would range from “at scale” physics facility(ies) for testing concepts to a wide range of component and sub-system development facilities (that can also test technologies in a modular way).

The **ICF modeling codes** that primarily reside at the NNSA national laboratories are built on decades of investment and expertise and constitute a valuable resource for advancing IFE science and technology.

The climate and culture of the broader field of fusion/plasma research **requires improvements to enhance diversity, equity, and inclusion.**

Developing a New IFE Program from Inception: *Structural Concepts*

(Structural Concepts are suggestions from the BRN panel on developing the framework for a new IFE program within DOE-SC.)

1. Grow a healthy IFE program and partnerships by leveraging MFE and other relevant technology development programs where appropriate. Develop collaborations with MFE to address common issues and IFE specific issues.
2. Develop public-private partnership as part of DOE’s milestone program and other funding opportunities. Organize workshops, knowledge seminars, industry days, and technical exchange meetings. Streamline partnering mechanisms.
3. Foster engagement with community partners, universities, and the private sector to promote partnership to recruit and develop the next IFE workforce.
4. Periodically re-evaluate IFE research opportunities to take advantage of the rapid developments within the larger NNSA-funded ICF program and private sector.

Overarching Priority Research Opportunities (PROs) for New IFE Program:

(Overarching Priority Research Opportunities are PRO’s that are common across multiple IFE areas and of high importance to the FES mission space and a new IFE program.)

Take advantage of and spur emerging technologies (exascale computing, artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), advanced manufacturing, high-rep-rate laser systems, etc.) to accelerate progress toward the goal of a fusion pilot plant (FPP).

Employ system-level integrated studies to guide IFE R&D in a coordinated fashion with the objective to advance the different areas of IFE science and technology toward the goal of building and operating an FPP.

Develop scoping studies to evaluate the various IFE concepts. With input from the energy industry and fusion science and technology experts, identify the most promising concepts to guide down-selection and to inform directions of technological development.

Accelerate the pace of IFE and reduce risk through the pursuit of parallel development paths.

Leverage existing facilities (including LaserNetUS), expertise, and international collaboration to advance IFE S&T. Explore ways to expand shot time on existing U.S. facilities and develop upgrades to meet IFE-specific needs.

Assess how to optimally and securely access and use ICF codes for IFE development and how to leverage the deep code expertise that resides at the NNSA-funded labs. Carry out the assessment with NNSA input.

Technology readiness assessment

In response to the charge letter, the BRN effort carried out a preliminary readiness assessment of different fusion concepts to determine their potential and maturity as candidates for a Fusion Pilot Plant (FPP). Using DOE Technology Readiness Level (TRL) guidelines [7], we identified five fusion concepts as possible candidates based on current work and carried out our technology readiness assessment for seven aspects critical for any IFE development path:

TRL levels for five IFE concepts for the seven aspects critical for any IFE development path

Relative to the other concepts, we ranked laser indirect and direct drive at a higher readiness level. This ranking is in large part a consequence of the extensive development of laser fusion within the NNSA-funded Stockpile Stewardship Program and is not necessarily an intrinsic advantage of laser fusion toward IFE. Also note that no technology or component has yet been demonstrated at TRL 5 or greater. Thus, although some components have been validated in laboratory environments, they are still “low fidelity” (TRL 4) compared to the eventual system and have yet to be validated as prototypes at reasonable scale in IFE-relevant environments (at or near full shot rate and/or lifetime or in simulated extreme environments) (TRL 5).

We emphasize that our assessment was only a preliminary step and is by no means exhaustive or conclusive. It should be viewed as a starting point for a more comprehensive assessment from a scoping study sponsored by FES as stated above as an overarching PRO.

<i>IFE Concepts →</i>	Laser Indirect Drive	Laser Direct Drive (including Shock Ignition)	Fast Ignition	Heavy Ion Fusion	Magnetically Driven Fusion
<i>Critical aspects for IFE development ↓</i>					
Demonstration of ignition and reactor-level gain	4	3	2	1	3
Manufacturing and mass production of reactor-compatible targets	2	2	2	2	1
Driver technology at reactor-compatible energy, efficiency, and repetition rate	4	4	3	2	3
Target injection, tracking, and engagement at reactor-compatible specifications	2	2	2	2	1
Chamber design and first wall materials	1	1	1	1	1
Maturity of Theory and Simulations	3	3	2	2	2
Availability of diagnostic capabilities for critical measurements	3	3	2	2	2

Laser Indirect Drive

Laser Direct Drive (including Shock Ignition)

Fast Ignition

Heavy Ion Fusion

Magnetically Driven Fusion

Demonstration of ignition and reactor-level gain

Manufacturing and mass production of reactor-compatible targets

Driver technology at reactor-compatible energy, efficiency, and repetition rate

Target injection, tracking, and engagement at reactor-compatible specifications

Chamber design and first wall materials

Maturity of Theory and Simulations

Focused Priority Research Opportunities

A major objective of the BRN workshop was to provide DOE-FES with the main PROs to inform future research efforts and funding opportunities in the specific areas constituting the building

blocks of an IFE program. Twelve subpanels identified PROs in IFE-specific science and technology areas, as well as in six cross cutting areas:

- Target physics: Coupling
- Target physics: Compression and burn
- Target physics: Alternate fusion concepts
- Driver Technologies
- Target Manufacturing
- Power Systems Science, Engineering, and Technologies
- Cross cutting: Theory and Simulations
- Cross cutting: Artificial Intelligence and Machine Learning
- Cross cutting: Measurement Innovation
- Cross cutting: Research Infrastructure
- Cross cutting: Public Private Partnerships
- Cross cutting: Workforce Development

A summary of the main PROs within each of the nine areas is listed below.

Target Physics

- **Coupling:** Develop techniques for Laser Plasma Instability (LPI) mitigation and control and improve understanding of mid- to high-intensity LPIs for all laser fusion concepts (LID, LDD, SI and FI) and laser preheat for MagLIF and PP coupling.
- **Compression and Burn:** Identify the underlying physics limiting the convergence/areal density required for high gains (all concepts).
- **Alternate Fusion Concepts:** Demonstrate fuel assembly at high areal densities and localized heating of compressed fuel to thermonuclear temperatures (FI and SI). Develop alternative approaches to support future performance (e.g. HIF, magnetized fusion).

Driver Technologies

- **IFE Driver Technologies:** IFE drivers must lead in technology to fully leverage their capabilities to deliver a successful IFE platform. Mitigating future risks to realizing IFE concepts requires a multi-pronged R&D approach: developing comprehensive driver concepts for an IFE demonstrator to derive modular development plans, and pursuing key long-term R&D goals for improved IFE driver and gigashot (10^9 shot) capabilities, particularly in developing technical solutions in partnership with the private sector to reduce their cost.

Target Manufacturing

- **Targets:** Develop innovative techniques for target mass production and begin studies of target injections, engagement, and survivability.

Power Systems Science, Engineering, and Technologies

- **Fusion Materials:** Establish an IFE-unique pulsed irradiation program, with combined experiment and modeling using mid-scale facilities.
- **Chamber and Fuel Cycle:** Actively co-design across the target physics community, fuel cycle teams, and chamber design teams.
- **System Integration and Design:** Begin iterative integrated design activities to inform viability of concepts.

Cross-Cutting Areas

- **Theory and Simulation:** Take advantage of exascale computing, AI, and ML for improved speed and accuracy for 3D production runs as well as for new physics modules. Extend simulation capabilities to include physics currently missing in ICF rad-hydro codes.
- **Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML):** Take advantage of AI-ML for data analysis of next generation of high rep rated facilities for improving current predictive capabilities to bridge the gap between experiments and simulations and for developing surrogate physics models
- **Measurement Innovations:** Diagnose quantities limiting or leading to high gain, enhance combined measurement resolutions (spatial and temporal) and develop diagnostics for high rep rates and radiation hardened environments.
- **Research Infrastructure:** Establish an Innovation Hub to perform integrated system studies for all the concepts. Form teams from the labs, universities, and private sector. Use these studies to begin initial upgrades of existing facilities.
- **Public-Private Partnership:** Facilitate partnerships between private IFE companies and government labs and universities to leverage substantial public sector capabilities towards joint development and acceleration of IFE commercialization, and to aid private companies to capture greater private investment monies.
- **Workforce Development:** Support education, collaboration opportunities, and research programs to attract and train a robust IFE workforce that minimizes obstacles to participation through considerations of diversity, equity, and inclusion. Actively engage more university departments and the emerging private sector.

A5.2 ドイツ IFE 開発の動向

ドイツ政府の教育研究省（BMBF）主催の委員会が取りまとめたレポートの
エグゼクティブサマリー（2023年5月22日）。

詳細は

https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.pdf?__blob=publicationFile&v=1%E2%80%82 を参照

本レポートでは、ドイツが2045年までにレーザー核融合炉の実現を目指すとしている。

Executive Summary of Memorandum of Laser Inertial Fusion Energy

By Expert Commission:

Prof. Dr. Constantin Leon Haefner (Head) Neil Alexander, PhD

Prof. Riccardo Betti, PhD

Omar Hurricane, PhD

Tammy Ma, PhD

Prof. Dr. Robert Stieglitz Prof. Dr. Hartmut Zohm

Fusion is the process by which two light atoms combine to form a heavier atom. This creates a large amount of energy. This process is the primary source of energy in the sun. If we were able to replicate these reactions on Earth, it would serve as a significant source of renewable energy as well. In recent years, fusion researchers and companies around the world have made significant progress in developing ways to harness this energy source. In December 2022, the U.S.'s Lawrence Livermore National Laboratory's National Ignition Facility achieved a groundbreaking scientific milestone: generating more energy from a laser-driven fusion reaction than delivered by the lasers to start it. This was the first time this has been achieved in a controlled laboratory environment and is the result of over 60 years of scientific research and development. It spans multiple fields, including fusion and plasma physics, materials science, laser technology, and engineering advances. It has taken dedication, perseverance, public investment, and collaboration among brilliant minds from around the world.

There are various technical approaches to fusion being pursued. Inertial confinement fusion (IFE), on which this report is centered, uses a pulsed driver, such as massive lasers or electric currents, to induce an implosion of a fusion fuel capsule, creating conditions that surpass those at the center of the sun. The fuel then burns for tens of trillionths of seconds, confined by its own inertia. The approach demonstrated at the NIF is currently the only one to have achieved burning plasma, where

fusion reactions are strong enough to allow the plasma to self-heat, and then beyond that to ignition, where the reaction produces more energy than it consumes. Besides the essential demonstration of scientific viability, inertial fusion also offers technological advantages and diversity in a field with immense commercial potential.

Inspired by recent progress, the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) initiated a series of activities starting in 2022 to assess the need and potential for IFE. To gain a comprehensive understanding, it charged a group of world-leading experts in various technology fields relevant to fusion energy to evaluate the opportunities for Germany to engage in the field of inertial fusion energy. After a comprehensive assessment of the current state of the art, the panel concluded that fusion holds great promise for the world's future energy supply and represents an outstanding opportunity for German industry and society to pursue high-tech development towards achieving a clean, resilient, and sustainable energy source. Although there are still scientific hurdles to overcome, the feasibility of ignition has already been demonstrated with lasers. Therefore, the focus should now shift towards expanding research and development (R&D) efforts on concept, technology, construction, and operation of a fusion power plant, as well as the development of the business case for it, including supply chains and production engineering.

The recent advancements in fusion technology have also fueled the race for commercializing fusion energy worldwide: with a total private investment of over \$5 billion, more than 38 start-ups, including four in Germany, are pursuing R&D for the use of fusion energy. However, even with the rapid progress, significant advancements are still needed before fusion can become an economically viable energy source. One of the most critical challenges is the balance of plant, or overall efficiency of a fusion energy system and the need to demonstrate engineering gain. Fusion energy will need to show that it can create more power than the power plant consumes for its own operation.

Fusion energy research is a critical and high-stakes endeavor that requires the pursuit of a diverse range of approaches and technologies to increase the chances of success. Magnetic (confinement) fusion energy (MFE) and inertial (confinement) fusion energy (IFE) are two promising technologies that can help achieve the goal of sustainable energy. Given the magnitude and large quantity of challenges still to be overcome in both approaches, it would be premature to declare a definitive winning technology at this stage. By investing in research and development (R&D) for both MFE and IFE, we increase the likelihood of success in achieving our sustainable energy goals. The panel carefully reviewed reports from the U.S. National Academy of Sciences, the Department of Energy and peer-reviewed science literature. In this memorandum we focused specifically on using lasers as a driver for IFE because it became clear that non-laser approaches to IFE lack a lot of the key advantages of lasers and were not as advanced in their technology readiness level, and furthermore Germany possesses world leading expertise in lasers.

The panel believes that with an aggressive IFE program and strong international partnerships, the enabling technologies for a first-of-a-kind IFE based fusion power plant design could be developed within the next decade or two. With an ambitious and well-funded research and development roadmap, it is conceivable that an operational inertial fusion energy (IFE) demonstration power plant could be achievable by approximately 2045, following typical development and deployment schedules. Consequently, the panel believes that fusion energy is not anticipated to contribute to the ongoing energy transition that is slated to be completed by 2045.

This underscores the urgency for Germany to invest in IFE and establish a framework that builds and promotes a vibrant fusion energy ecosystem based on four main pillars:

- 1. a strong science program to educate and train the next generation while solving precompetitive science questions,**
- 2. an open research infrastructure for both academia and industry,**
- 3. a competent industry that participates in innovation and facilitates technology transfer, and**
- 4. international collaboration between governments to leverage resources and funding while reducing duplication of efforts.**

Ultimately, the successful commercialization of fusion energy will require strong collaboration and partnership between industry, government, and academia. Comprehensive, risk-tolerant public-private partnerships are needed to ensure alignment with market requirements, reduce risks and costs for taxpayers, leverage the strengths of both public and private sectors and stakeholders, create jobs in new industries, and ensure that scientific and technical innovations lead to Germany's leadership in commercial fusion energy and enabling technologies.

A strong backing and commitment from political leadership to fusion energy is an essential and paramount prerequisite for facilitating the commercialization of fusion energy. To facilitate building a successful innovation ecosystem, it is crucial to establish a technology-open regulatory framework that addresses safety and security concerns and fosters innovations, harmonizes technology export regulations, implements effective export controls, supports supply chains, and engages the public. It should be noted that the dual-use concerns regarding IFE are limited to certain design technologies and not applicable to IFE plants in general. Establishing a concise, technology-open fusion regulatory framework will help attract investors who prioritize fundamental analysis and due diligence, and who are committed to investing for the long term.

To put this into perspective, the U.S.'s Biden Administration has issued its intent to fund fusion research with \$1.01 billion in 2024, reflecting the recent breakthrough potential of fusion energy and bipartisan consensus in Congress. \$135 million are reserved for the private-public partnership

program that launched in fall 2022. At the 2022 White House fusion summit, a program was announced with the objective of expediting commercial fusion energy initiatives to benefit the entire country. The funding provided by the program seeks to hasten the development of innovative technologies for clean energy solutions and facilitate the commercialization of fusion as a promising source of clean energy. Furthermore, the Fusion Energy Sciences Advisory Committee (FESAC), which advises the U.S. Department of Energy (DOE), laid out research priorities under different budget scenarios in 2020. The 2021 “Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research” report by the National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) was one of several reports that offered a comparable evaluation for the progression of burning plasma science and fusion energy development in the United States. The 2023 Basic Research Needs (BRN) report, compiled by a large scientific panel that includes some members of this memorandum’s expert panel, provides guidance for research funding by the US government, academia, and industry. It identifies the scientific and technological challenges that must be overcome and offers recommendations for advancing science and technology towards a fusion power plant demonstrator. The report provides a recent and comprehensive overview of IFE and forms a valuable resource for this memorandum.

To achieve commercial laser driven IFE, several challenges need to be addressed, including understanding burning plasmas, developing efficient laser drivers and suitable targets, creating materials that can withstand fusion conditions, and solving complex engineering problems. As the worldwide program now starts to strongly push towards inertial fusion energy, IFE-specific technology will have to be developed substantially, since there has only been very limited dedicated effort in the past. Although the R&D involved in plasma physics and reaction chamber is distinct for IFE and MFE, some significant synergies exist in specific elements, particularly those further from the fusion-generating plasma. Germany should leverage its strength in MFE fusion technology in these areas while planning the way forward. To ensure success, IFE stakeholders in Germany must attain technological leadership and enhance their capabilities.

The fusion energy research portfolio must include technology and engineering research for a fusion power plant, not just basic plasma science. Initial emphasis should be placed on design studies for an IFE power plant to inform a comprehensive R&D strategy. This will concentrate resources on pertinent technology advancements and diminish future risks related to IFE concepts. To promote the growth of crucial and high-return-on-investment technologies for Germany, it is recommended to organize the development of enabling technologies, competencies, and capabilities in hubs. Open innovation principles should be encouraged to facilitate rapid progress in fusion research and commercialization. The hubs could be based on the following areas in order of urgency:

Germany’s world-leading expertise in laser technology and research is a key advantage in developing Inertial Fusion Energy (IFE). By focusing on developing capable driver concepts for an IFE demonstrator and improving laser driver and multi-gigashot laser capabilities, Germany

can leverage its position as a leader in the laser industry to lay a solid foundation for competitive production of advanced high-power lasers for IFE. This will strengthen Germany's competitive edge in the international marketplace and lead to new distinctive unique selling points (USP). Failure to act promptly could result in the long-term in losing the competitive advantage in the laser market.

IFE requires cost-effective, mass-produced fusion targets, but there are currently no suppliers in the world that can meet the required quantity and quality. Germany has already vast expertise and capability in target manufacturing technologies. Thus, the country has an opportunity to lead the way in target development due to the expertise in fabricating spherical capsules lined with foam, metalworking, and verification techniques. Failure to invest in target development could mean missing out on a significant energy market and relying on foreign nations for a critical component for IFE reactors, creating economic uncertainty and energy security risks. The expert panel recommends establishing strong program for mass-producing IFE targets and injectors, as well as demonstrating accurate targeting.

Once the plasma has ignited and released its energy, the structural, functional, and armor materials present the greatest challenges for a future fusion power plant and set the constraints for the engineering design of the power plant's reaction chamber. This includes optical materials exposed to neutrons, x-rays, and debris. In all these areas, Germany has considerable experience and has established research labs for material characterization, complemented by considerable material modelling and simulation efforts, without no power plant can be built. There is quite a bit of overlap with the German MFE program, and accession would be a catalyst for accelerated progress. If German institutions do not participate in this area, a unique opportunity for Germany's public & private sector to play a key role in future development will be lost.

The blanket is necessary for energy recovery and the fuel cycle, and as such a crucial component of a fusion power plant. A consistent blanket design is essential for an economically viable power plant, with long service life and easy remote handling. Globally, efforts have been very limited in blanket design and the private sector is looking to the public sector to develop this challenging component. Germany's experience, both in the public and private sector are leading the way in developing its manufacturing and joining processes. Germany's successful participation in this under-developed element could secure its leadership. Furthermore, to produce energy in a fusion power plant, hydrogen isotopes (tritium, deuterium) must be separated and reprocessed from the exhaust gas or the blanket. Germany leads the way globally in process control, diagnostics, and developing new technologies for tritium research and facilities, such as tritium laboratories. As hydrogen technology grows in importance, expanding Germany's expertise and capabilities in this area is crucial for both fusion and hydrogen. While Germany has no strong IFE physics capability, it can leverage its existing substantial expertise in Artificial Intelligence (AI) and High-Performance

Computing (HPC) to develop IFE simulation codes bridging multi-physics, multi-fidelity, and multi-systems, to extract experimental and modeling insights, to execute experiments at the high repetition rates (>10 Hz) that will be required of IFE power plants and develop full systems models. In the future, AI and HPC will be required to run an IFE power plant in an automated fashion. AI and HPC are cross-cutting areas that will be required for IFE research across the board, and without investment in this area for IFE-specific applications, Germany will not be able to establish a leadership position.

Although the reaction chamber is a critical component of any future IFE power plant, surprisingly few conceptual design studies have been conducted. Its interfaces require an integrated design process to balance trade-offs and inform design constraints for the rest of the power plant. It is important to increase the level of technical readiness and to collaborate with countries that have already conducted studies, principally the US and UK.

Germany's private sector is currently involved in developing an understanding and operations model for an IFE power plant. However, there is a notable absence of a tool for integrated conceptual studies of IFE fusion power plants in the community. Such a tool is essential for scoping studies to guide the optimal combination of various elements in an IFE power plant and to set component requirements in an integrated fashion. We strongly suggest that Germany collaborates with the international community to create a comprehensive system code, leveraging its own expertise in the field.

Highly specialized diagnostics are required to study the extreme conditions of ICF plasmas while being compressed, heated and ignite. Furthermore, diagnostics must provide information on the drivers and systems surrounding the plasma. Data obtained are used to validate and verify theories, models, and codes used for design and prediction. In a fully operational commercial fusion power plant, diagnostics are expected to be minimal, but on the intermediate test facilities and pilot plants leading up to that point, diagnostics will play a critical role in advancing overall understanding. While Germany does not currently have a particularly unique or advanced ICF diagnostic capability, the development of diagnostics and the ability to validate and verify claims and experimental results must be established for any new fusion facility (including test or intermediate facilities) and for Germany to make progress in any of the other areas discussed in this report.

Establishing a robust fusion energy program in Germany can serve as a compelling draw for global talent and reinforce the significance and worth of high-tech advancements, especially in the midst of the international race to fusion energy. However, it is indeed a challenge for Germany to address the limited availability of experienced workforce in the areas of IFE plasma science and engineering, nuclear engineering, and energetic laser development. To meet the growing demands of the private sector while maintaining the excellence of publicly funded research and development, it is crucial to invest in building up a comprehensive and modern curriculum at universities and colleges.

Specialization and hands-on training are important components and require experimental facilities and cutting-edge development funding. Universities and colleges should work with industry partners to develop programs that offer practical training opportunities in experimental facilities.

Germany has not yet established itself as a significant contributor to the field of ICF or IFE when compared to the United States, United Kingdom, Japan, Italy, or France. While China and Russia have yet to declare IFE ambitions, they have already embarked on building large-scale ICF lasers that resemble the NIF. Nevertheless, the challenges posed by this technology are vast, and Germany has a unique opportunity to utilize its capabilities to make a significant impact and establish itself as a crucial partner in this area. To achieve this goal, Germany must establish and strengthen international partnerships with strategic allies and IFE technology leaders.

We are in a pivotal decade, and it's important to take ambitious action towards addressing

A6. 日本学術会議 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」

この見解の原案は、総合工学委員会 エネルギーと科学技術分科会 ならびに、当分科会に設置された 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 で取りまとめられたものである。

5.1 要旨

5.1.1 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の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。

5.1.2 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。

5.1.3 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。

5.2 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

5.3 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一つとなる。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。一つは、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]。もう一つの大きな進展は、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るべきである。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变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）。

5.4 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、超高圧物性、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。

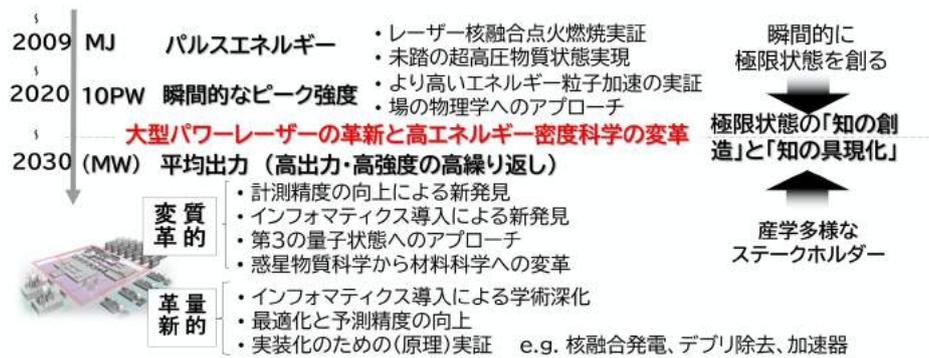


図2 大型パワーレーザー施設の革新と高エネルギー密度科学の変革
(出典：小委員会で作成)

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まだ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リソニック結晶^(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できる。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、

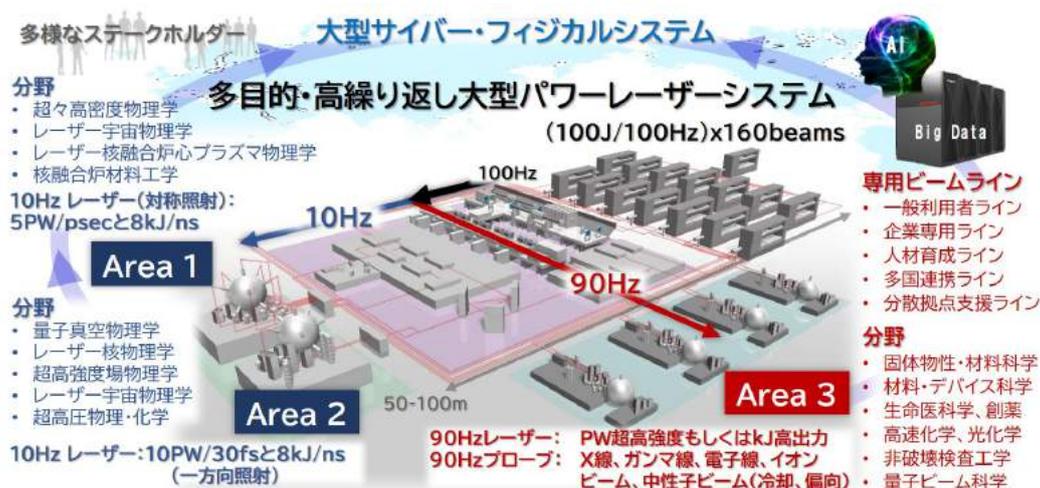


図3 多目的高繰り返し大型パワーレーザー施設概念図 (出典: 小委員会で作成)

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。

5.5 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、オンゲストロームから 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を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圧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下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、超高压状態下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、超高压状態下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。これは究極的な高圧量子材料探査の1つであり、新たな学術領域として、我が国が超高圧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のような超高圧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・高温の極限的状態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放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おり、レーザーの繰り返しが 100 Hz 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 100 Hz 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200 MeV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、中核拠点を目指す 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。

5.6 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 low 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研究所、QST 関西光量子科学研究研究所、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な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が期待できる。

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ィ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、過去の大規模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。

5.7 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、超高強度場や超高压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發展とともに、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發展に貢献できる。

<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で、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、フォトリック結晶（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) による超高压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リソグラフィ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 超高压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 超高压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>