

日本学術会議・IFE フォーラム 公開シンポジウム報告

「将来のエネルギー科学技術に向けた
パワーレーザーと高エネルギー密度科学の役割と展望」



2022年6月6日

日本学術会議 総合工学委員会 エネルギーと科学技術に関する分科会
パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学小委員会

IFE フォーラム

目 次

1 はじめに	1
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)	3
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)	3
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)	4
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)	5
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)	5
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)	7
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	8
4.2 総合討論における質疑	9
4.2.1 パワーレーザー技術と新産業創成と TRL	10
4.2.2 熱エネルギー利用による CN への貢献について	10
4.2.3 ネットワーク・国際連携、人材育成	10
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	11
4.2.5 総合討論まとめ	12
5 閉会	12

6 付属説

6.1	講演資料 1 (野田 進)	-----	13
6.2	講演資料 2 (小林洋平)	-----	30
6.3	講演資料 3 (兒玉了祐)	-----	45
6.4	講演資料 4 (藤岡恵子)	-----	57
6.5	講演資料 5 (河内哲哉)	-----	63
6.6	講演資料 6 (落合 誠)	-----	70
6.7	講演資料 7 (久間和生)	-----	81

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、去る 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委員長の近藤駿介氏（写真 1）より、以下の趣旨の開会の辞があった。



写真 1 近藤駿介 委員長

「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まで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おり、実りある会合といたたく、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。」

引き続き、日本学術会議第三部 吉村忍部長（写真 2）から、「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が述べられた。



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- (講演資料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、サイズを増大、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、1mm Φ 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。

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 (講演資料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、現在はどう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。

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 (講演資料 3) 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) (写真 5)

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もある。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

(講演資料 4)

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・フルイド代表取締役社長) (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。

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 (講演資料 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

(講演資料 6)

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」「かしこくつかう」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、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)で総合討論を行い、シンポジウムが総括した。

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の講演で、以下に示すレーザー学会の活動の紹介があった。

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 (講演資料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)

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ある。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る。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ことができる。

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 実現に向けてこのように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つの視点で出された意見の概要は以下の通りである。

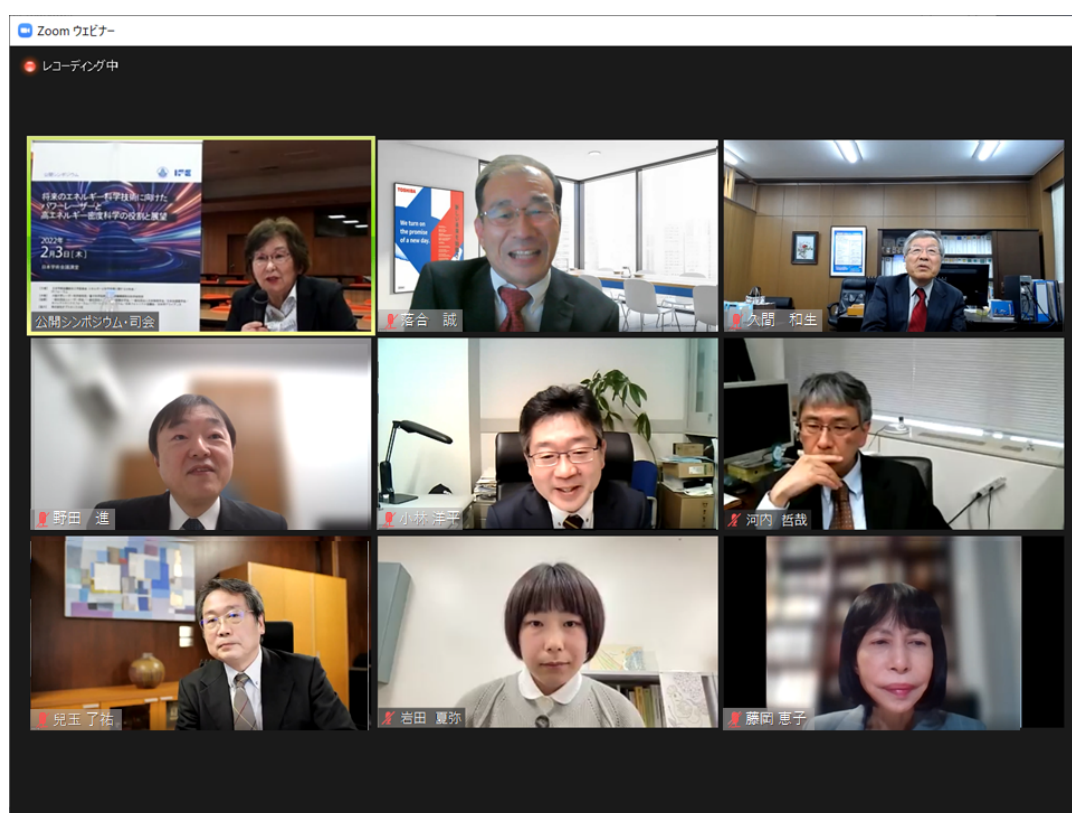


写真5 総合討論パネラー（左上から右下）
笹尾真実子（コーディネータ）、落合誠、久間和生、野田進、
小林洋平、河内哲哉、兒玉了祐、岩田夏弥、藤岡恵子（敬称略）

4.2.1 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つ

た。リモート、いわゆるサイバー空間での活動はできても、やはり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) の評価をふまえて、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。

4.2.2 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℃ 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いるが、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。

4.2.3 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 10 機関ぐらいで行っていて、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) に関するネットワークがある。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、最近は何倍も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う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、新しい領域が展開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ことを有効である。
- 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が期待される。

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>

公開シンポジウム「将来のエネルギー科学技術に向けた
パワーレーザーと高エネルギー密度科学の役割展望」
2022年2月3日

フォトリ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 —

京都大学工学研究科

野田 進

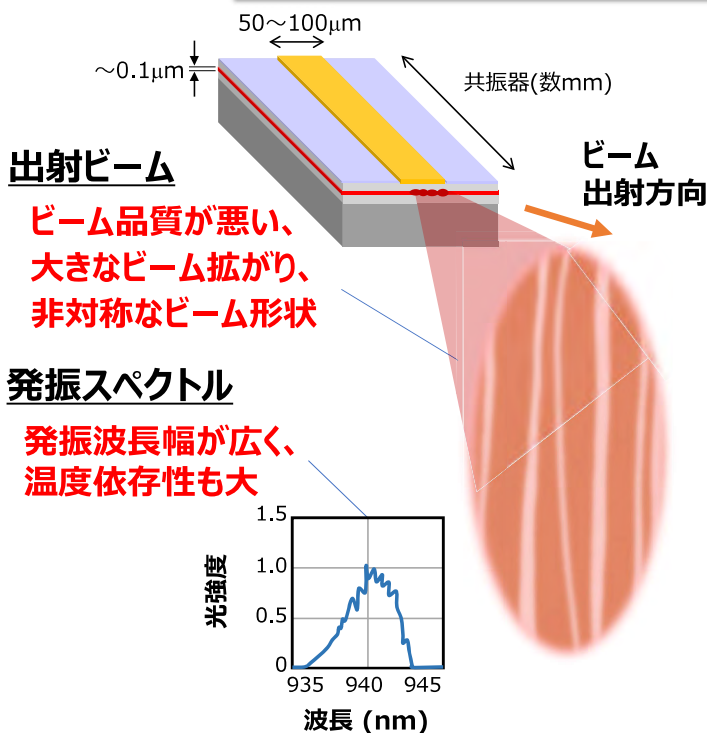
パワーレーザーは、スマート製造、 スマートモビリティを支えるコア技術



目次

- ・ブロードエリア半導体レーザー、CO₂レーザー、ファイバーレーザーの課題
- ・フォトニック結晶レーザーによるボトルネック解消
- ・フォトニック結晶レーザー高輝度性・高機能性の実証（直近の出口としてのLiDAR応用を例に）
- ・フォトニック結晶レーザーによる超小型加工システムへの展望

ブロードエリア半導体レーザーと課題



課題:

・LiDAR センシング:

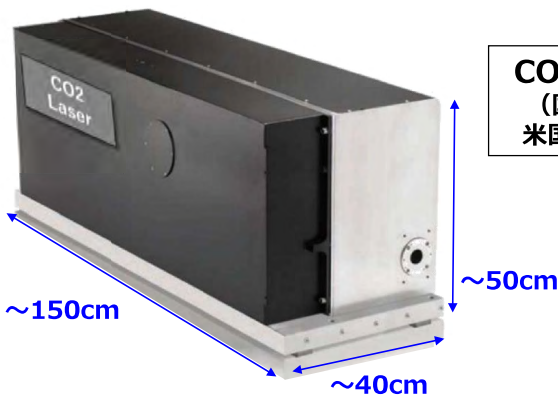
ビーム成形のために、複雑なレンズ系と、精密調整が必要

(*In addition, S/N ratio cannot be increased because broad spectrum does not allow to use narrow spectral band-pass filter to eliminate background light.)

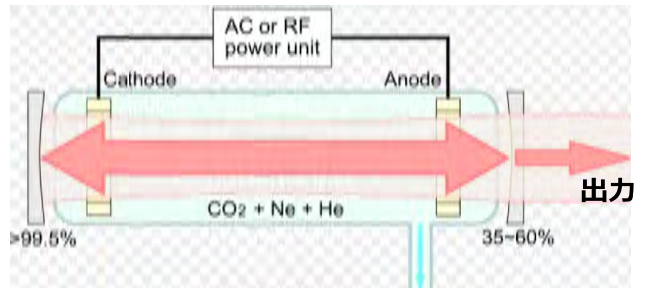
・レーザー加工:

輝度が、CO₂レーザーやファイバーレーザーよりも極めて低いために、直接加工に用いることは困難

CO₂レーザーと課題



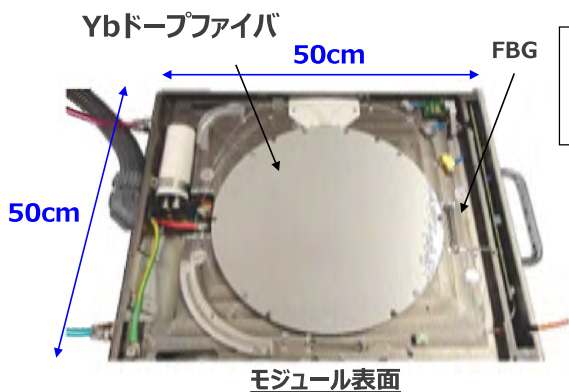
CO₂レーザー
(国内企業、
米国企業等)



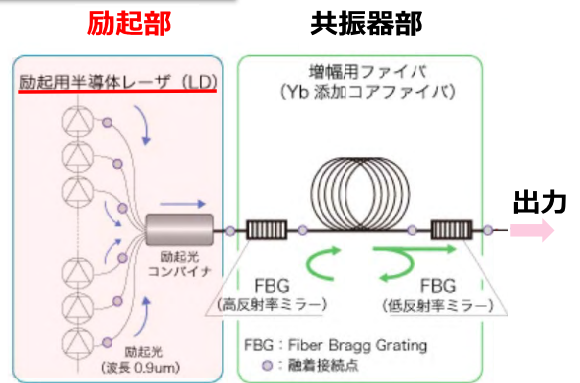
CO₂ガス中で放電を行い、両側に鏡をおくことで、共振させ、レーザー発振を行う。
波長は、10μm帯。レーザー光は、自由空間を伝搬させて、加工に用いられる。

- ・ガスレーザーゆえに**大型**
- ・同様に、ガスレーザーゆえに**低効率 (~10%)**

ファイバーレーザーと課題



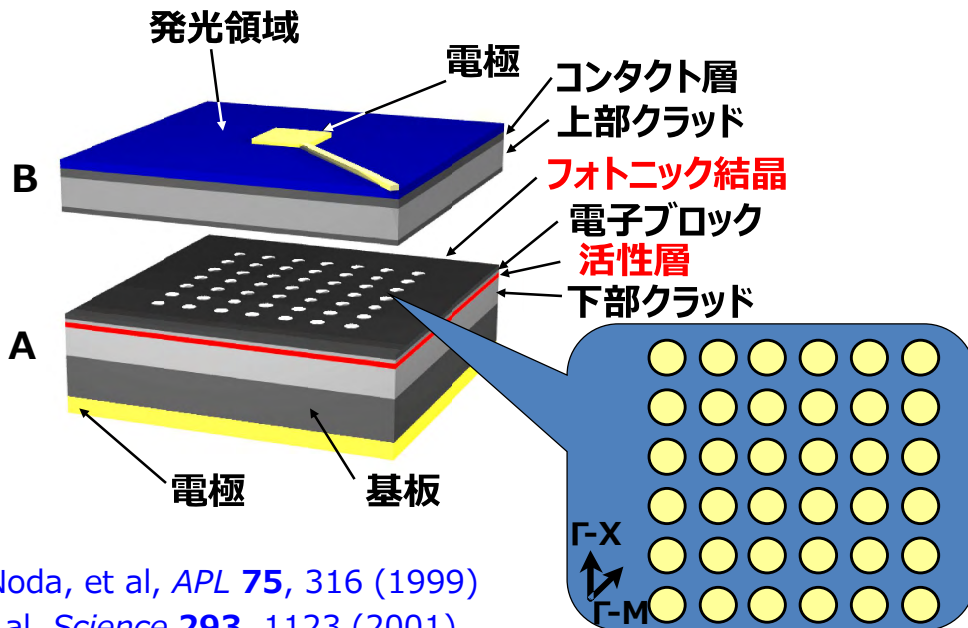
ファイバーレーザー
(米国企業等)



非常に数多くの半導体レーザー（数100個の半導体レーザー）から出た光をコンバインし、Yb添加ファイバーを励起する。両側に設けたFBGにより共振。

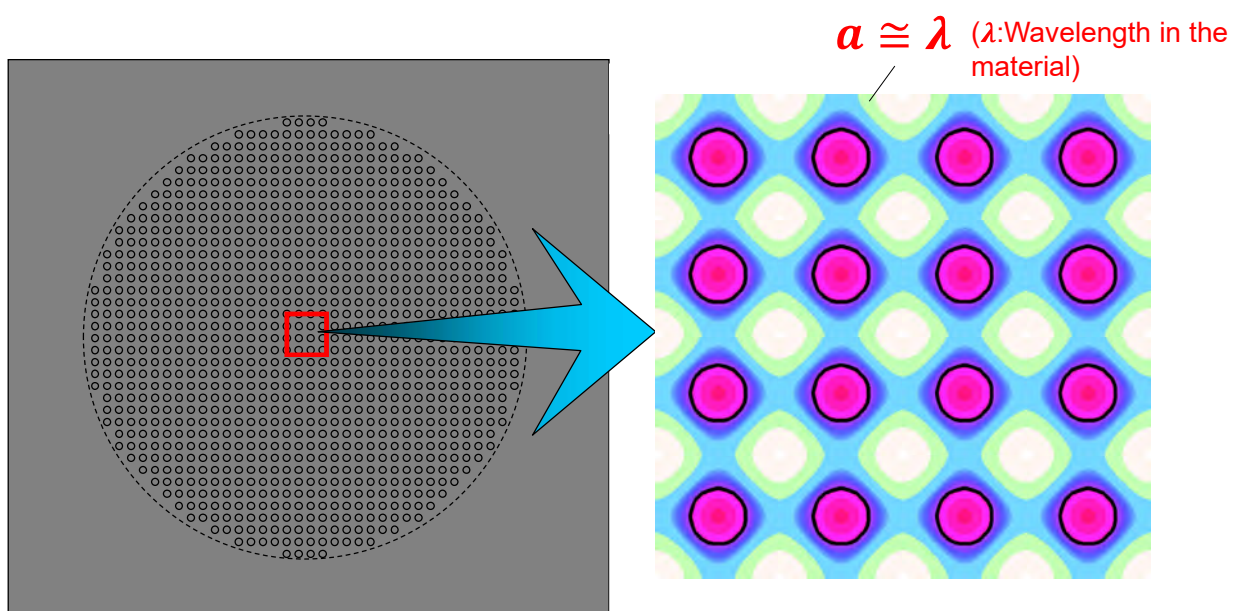
- ・多くの半導体レーザーを励起用として用いる。必然的に**大型**。**複雑**。
- ・半導体レーザーの効率 x ファイバーに添加されたYb原子のストークス損失が効率決定：**効率増大に限界**

ボトルネック解消の鍵：フォトニック結晶レーザー



Imada, Noda, et al, *APL* **75**, 316 (1999)
 Noda, et al, *Science* **293**, 1123 (2001)

動作原理



原理的に大面積でも基本モード動作可能
= 高ビーム品質、狭発散角動作可能

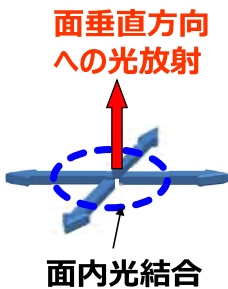
⇒ 高輝度化

(CO₂レーザー、ファイバーレーザーと同等輝度が期待)

$$\text{輝度} \propto \frac{S}{(m+1)(n+1)}$$

S: 発振面積, m, n : 横モード次数

基本モード動作時、m=n=0で輝度最大



格子点形状や格子点位置・大きさ制御により
ビーム走査、ビーム形状制御が可能に

⇒ 高機能化

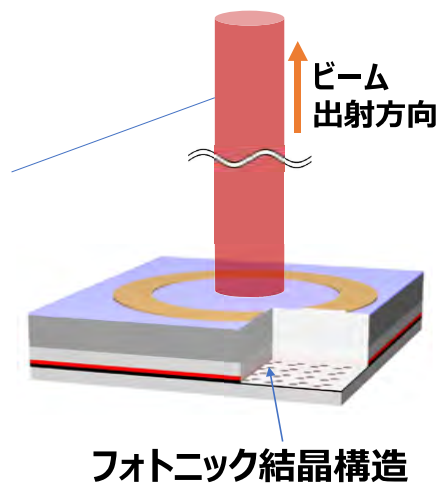
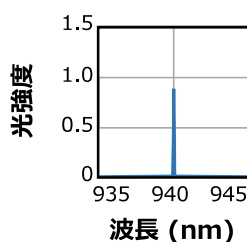
フォトニック結晶レーザーの特長のまとめ

出射ビーム

高ビーム品質、
極めて狭いビーム拡がり、
対称なビーム形状

発振スペクトル

発振波長が単一、
温度変化が小さい



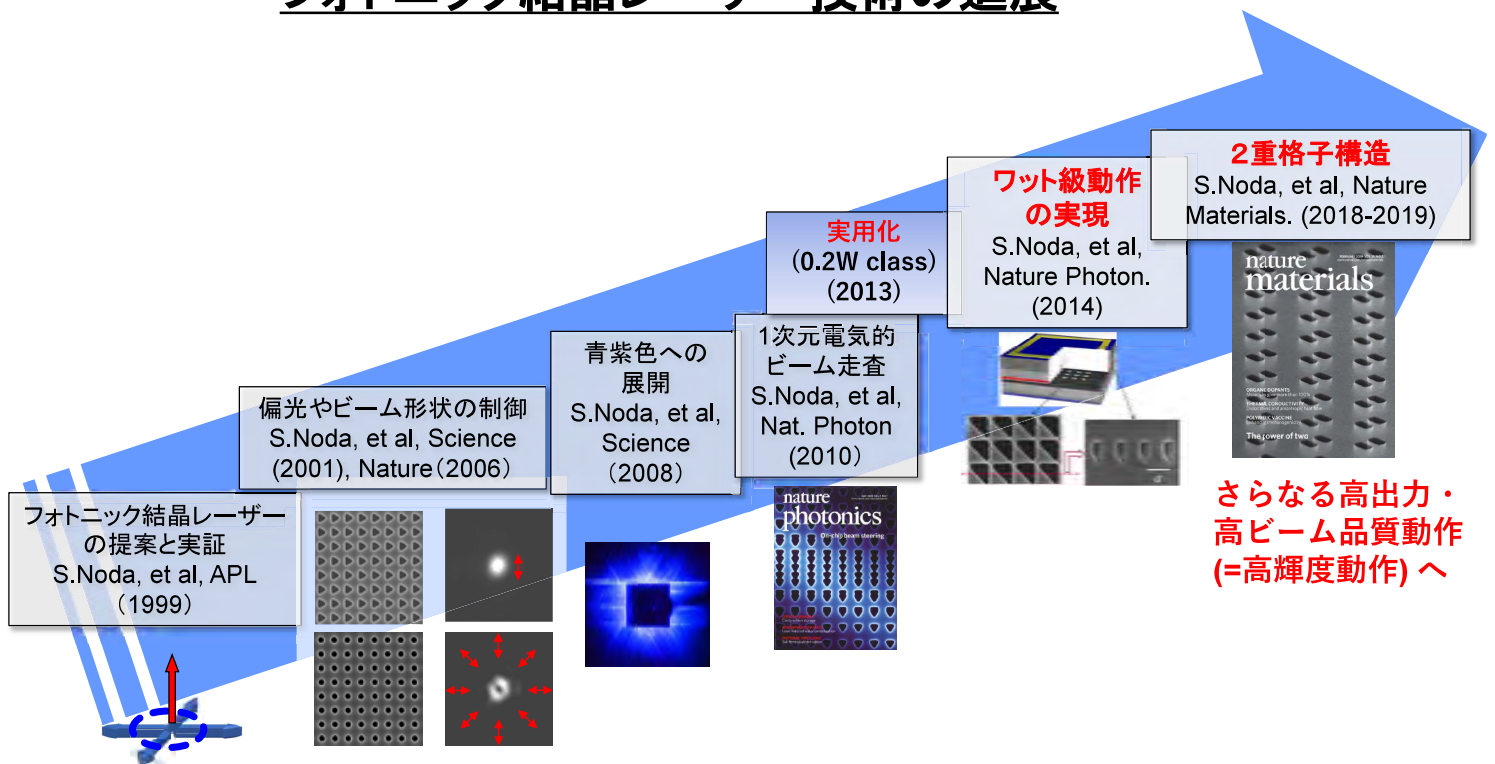
優位性

複雑なレンズ系不要で、
部品数大幅削減、調整不要
⇒ 小型化・低コスト化

ワンチップで、高ビーム品質・高出力動作が可能
⇒ 超小型加工システムへの展開が期待

スマート製造、スマートモビリティを支える
キーデバイスとして期待

フォトニック結晶レーザー技術の進展

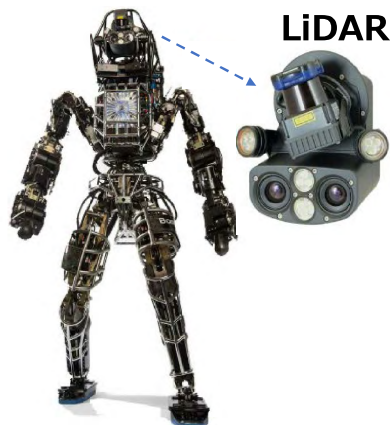


目次

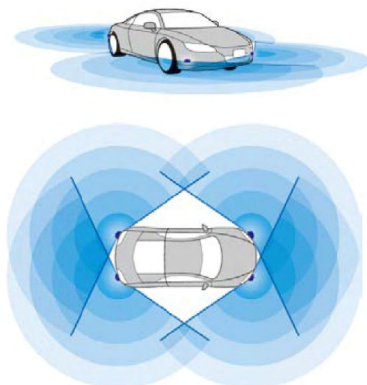
- ・ブロードエリア半導体レーザー、CO₂レーザー、ファイバーレーザーの課題
- ・フォトニック結晶レーザーによるボトルネック解消
- ・フォトニック結晶レーザー高輝度性・高機能性の実証 (直近の出口としてのLiDAR応用を例に)
- ・フォトニック結晶レーザーによる超小型加工システムへの展開の展望

LiDAR（光測距システム）は、光パルスを物体に照射し、反射して帰ってくるまでの時間を測定することで、物体や障害物までの距離を検出するシステム

来たるべき超スマート社会におけるスマートモビリティ、すなわち、ロボット、農機、建機、自動車等の自動運転の実現のために極めて重要



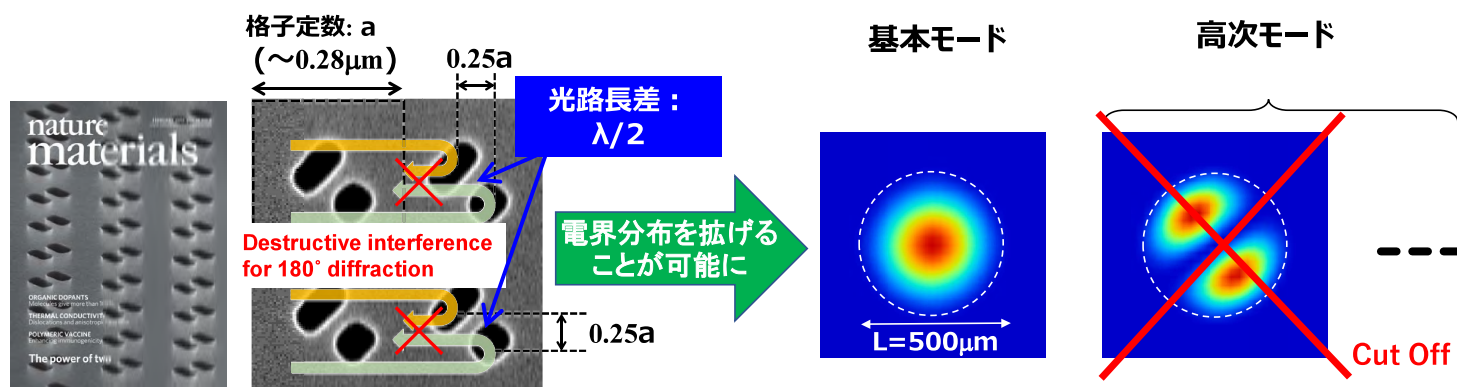
LiDAR



<https://www.sciencenews.org/article/designing-robots-help-disaster>

https://autoprove.net/supplier_news/pioneer/8731/?a=all

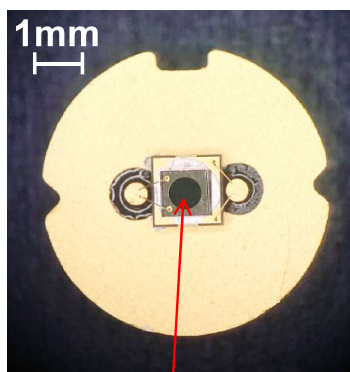
高輝度動作を実現する2重格子フォトニック結晶



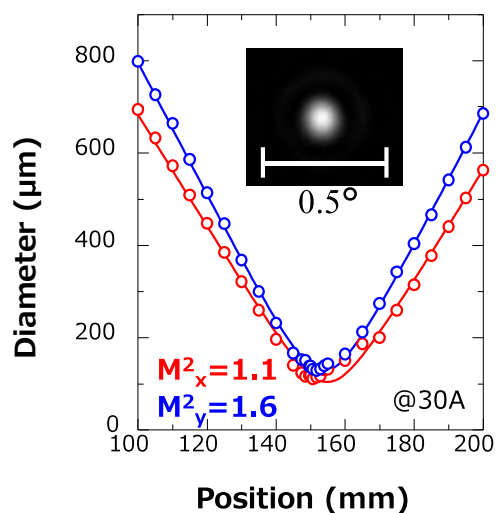
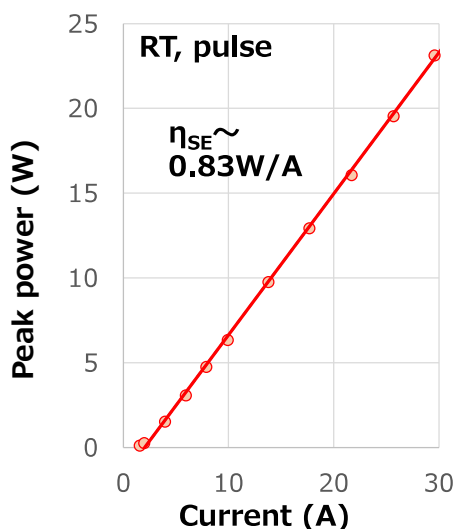
高ビーム品質・高輝度動作が可能に

デバイス特性

上面図



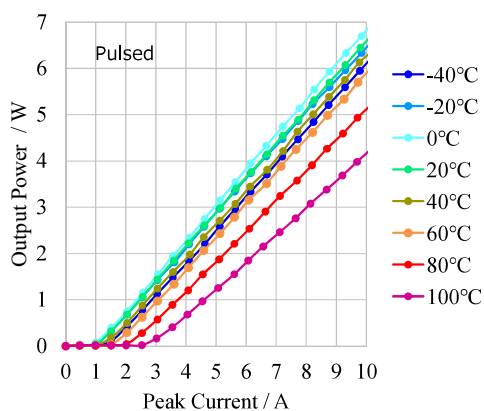
デバイスサイズ : 500 $\mu\text{m}\Phi$
 アップサイズダウンで
 5.6mm Φ のCan Package
 に実装。基板側から出射。



最大輝度 = 1.5 GWcm⁻²sr⁻¹ : 従来の半導体レーザーの10倍以上の高輝度化に成功

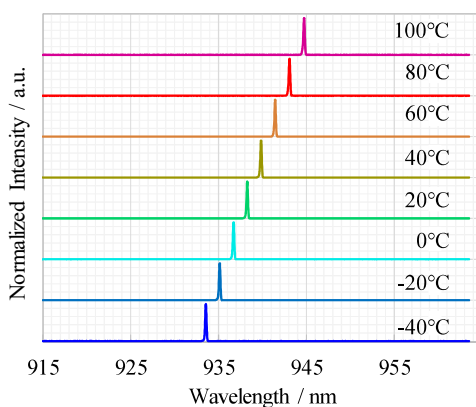
詳細なデバイス特性

Temperature dependence of I-L characteristics



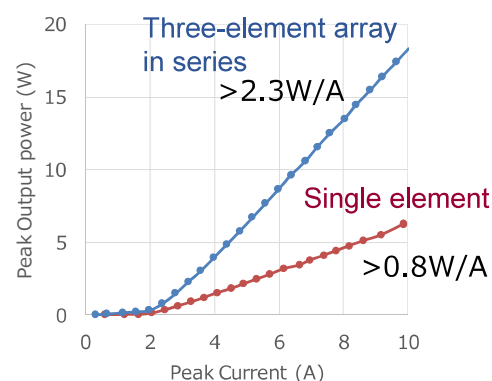
Temperature dependence of output power for fixed current: -0.36%/K
 [Superior to FP lasers (-0.40%/K)]

Temperature dependence of lasing spectrum @ 10A



Temperature dependence of lasing wavelength: 0.08nm/K
 [Superior to FP lasers (~0.3nm/K)]

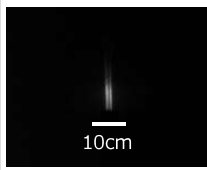
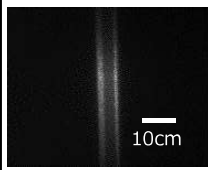
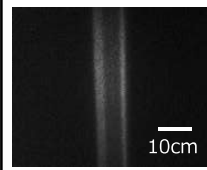
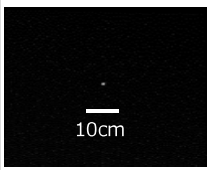
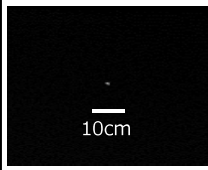
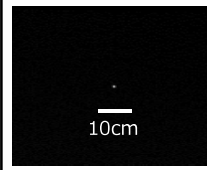
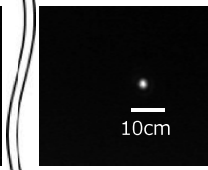
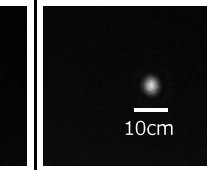
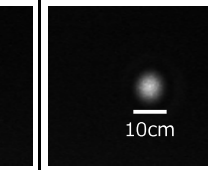
Improvement of Slope Efficiency



Slope efficiency can be increased by three-element array (series)

フォトニック結晶レーザーと通常の半導体レーザーの詳細比較

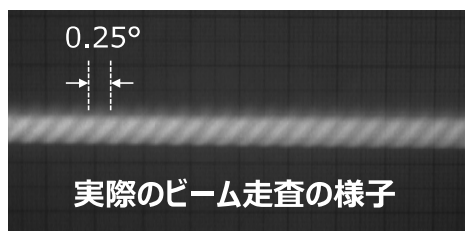
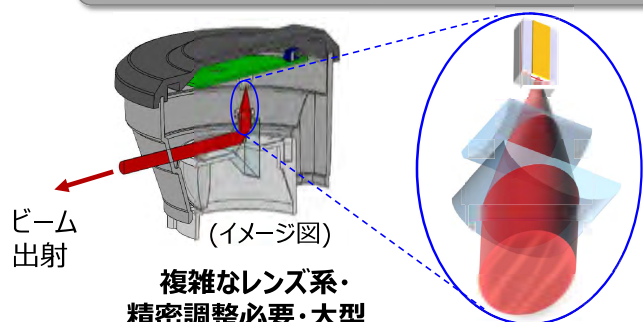
レンズフリーでの長距離伝播実験

	15cm	50cm	1m	10m	20m	30m
通常のブロードエリア半導体レーザー				確認不可	確認不可	確認不可
フォトニック結晶レーザー (500μmφ)						

30mという遠方においても～5cmという狭いビームスポット
高輝度性を示す重要な結果

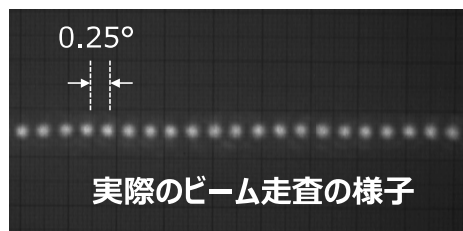
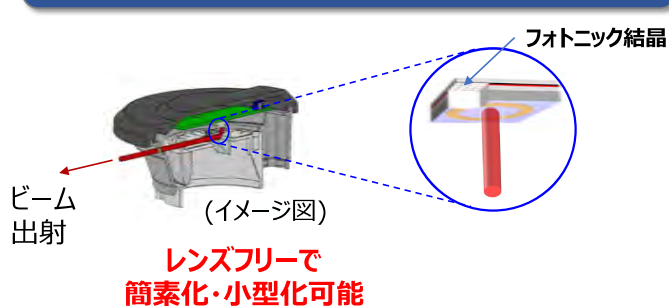
フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDAR構築とその効果

通常の半導体レーザーを搭載したLiDARの光源部



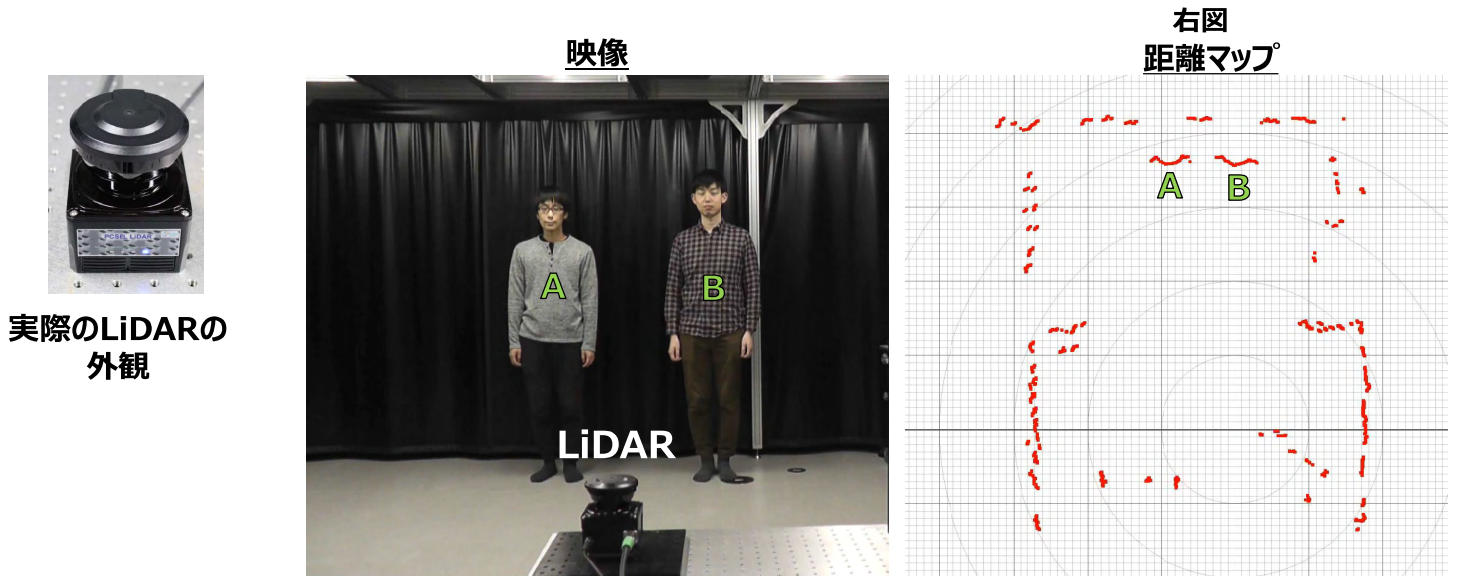
ビーム拡がりが大きく、分解能が低い

フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDARの光源部

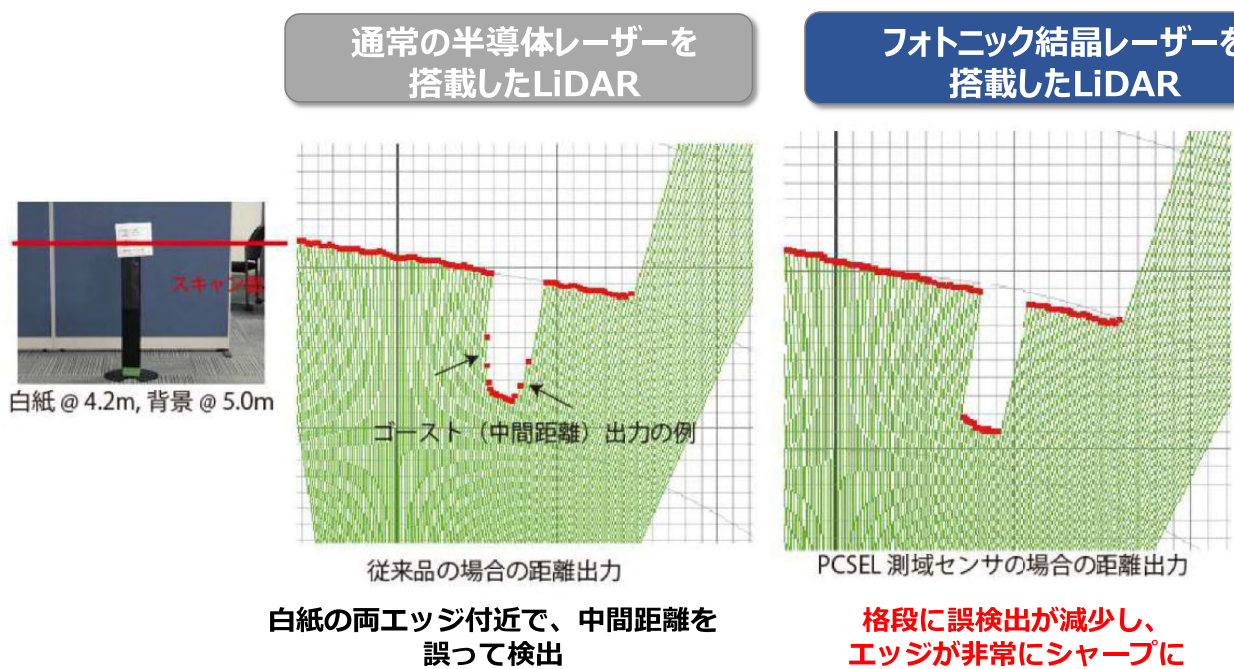


ビーム拡がり小さく、分解能が高い

フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDARのデモンストレーション



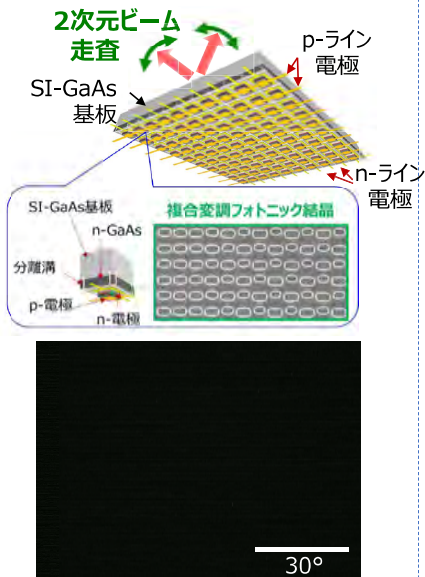
フォトニック結晶レーザーによる空間分解能の向上（ユーザー企業での詳細評価）



スマート化

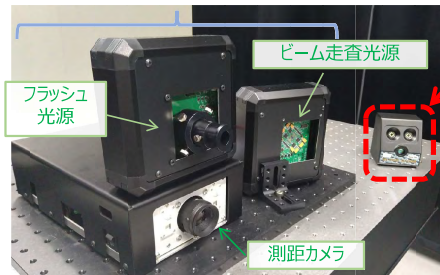
—ビーム走査PCSEL開発と新型LiDARへの展開—

電氣的2次元ビーム走査 PCSELの開発・深化



新型非機械式LiDARシステム（フラッシュ+ビーム走査型）の構築

2020年バージョン



2021年バージョン

一体化

- ・測距カメラ
- ・フラッシュ光源 (30°×30°一括照射)
- ・ビーム走査光源 (30°×30°の走査)

ユーザー企業からの要望に基づき、新たに開発

走査範囲を前回から拡大



1/15の体積へと小型化することに成功

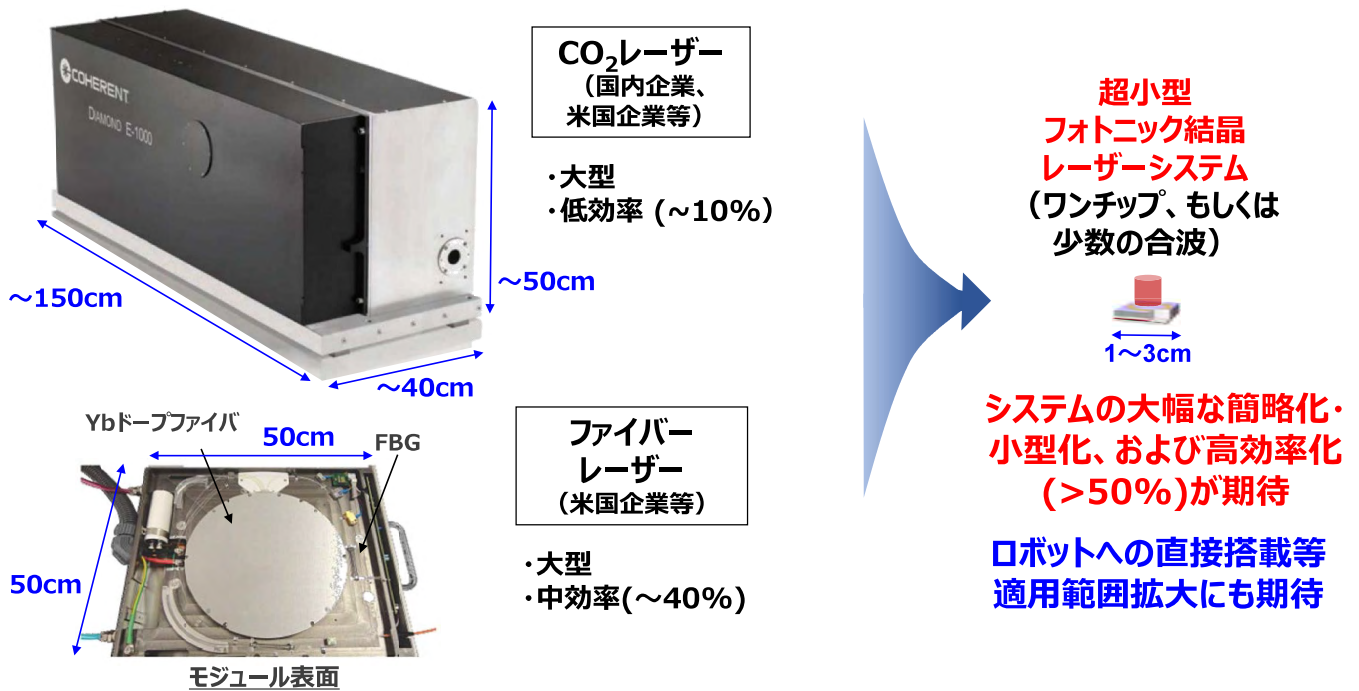


フラッシュLiDARが検出困難な低反射物体の検出を
ビーム走査光源活用で可能に

目次

- ・ブロードエリア半導体レーザー、CO₂レーザー、ファイバーレーザーの課題
- ・フォトニック結晶レーザーによるボトルネック解消
- ・フォトニック結晶レーザー高輝度性・高機能性の実証（直近の出口としてのLiDAR応用を例に）
- ・フォトニック結晶レーザーによる超小型加工システムへの展開の展望

フォトニック結晶レーザーの将来のスマート加工応用

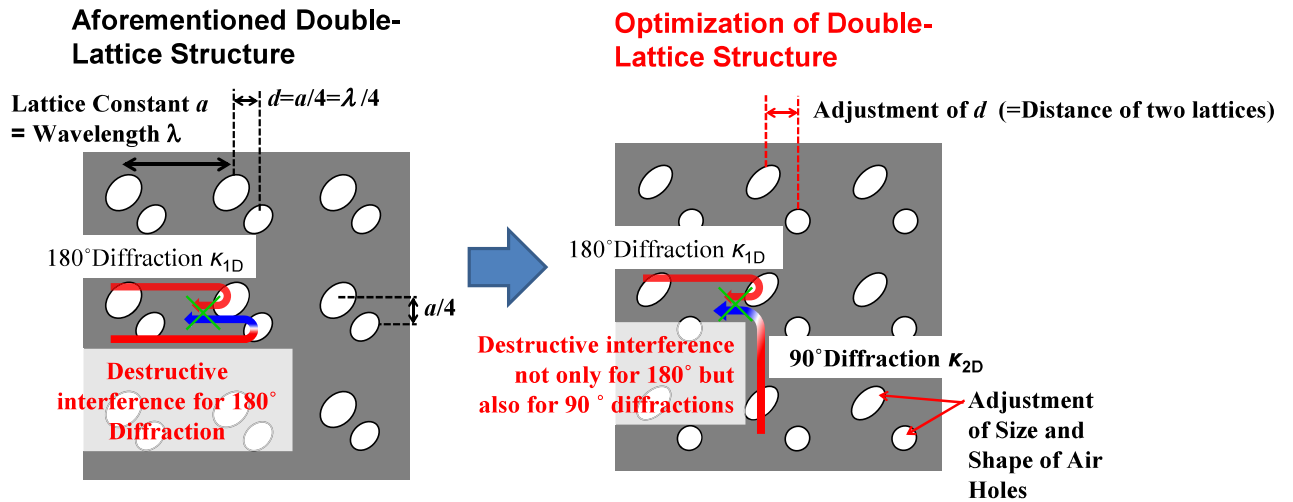


ゴールに向けた戦略

1. 先に述べたフォトニック結晶技術を発展させ、まず、10W級の高ビーム品質連続動作可能なPCSEL (1mmΦ)の開発
2. デバイスサイズを2-3mmΦ (さらには1cmΦ、あるいはそれ以上)と大きくし、100W級 (さらには kW級、10kW級)へと展開.
3. 他の重要な要素技術の開発 (冷却・パッケージ技術、トポロジカルフォトニクス (3mmΦ、1cmΦという超大面積での単一モード動作)、合波技術、等).

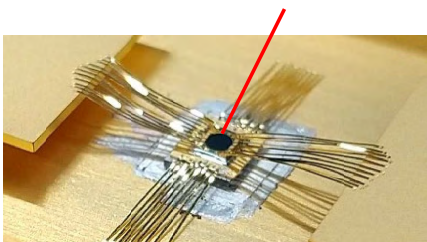
1.10W級の高ビーム品質連続動作可能なPCSEL (1mmΦ)の開発

1mmΦに最適な2重格子構造の設計



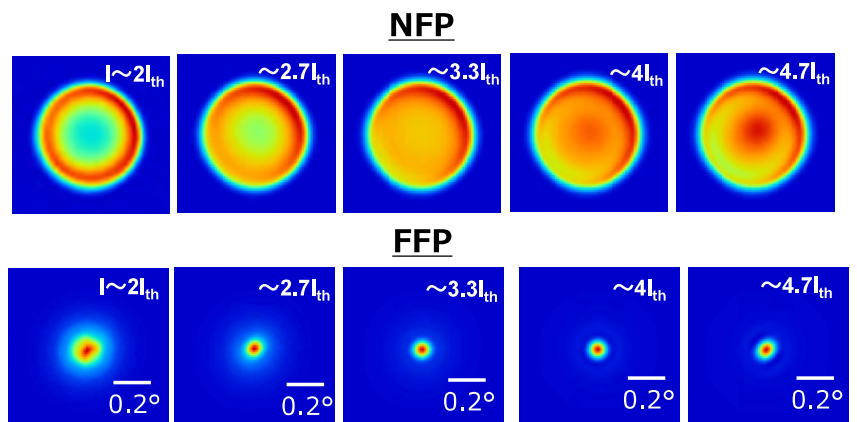
デバイス作製と近視野像(NFP)・遠視野像(FFP)の計算

1mmΦ PCSEL



・アップサイドダウンで治具にボンディング

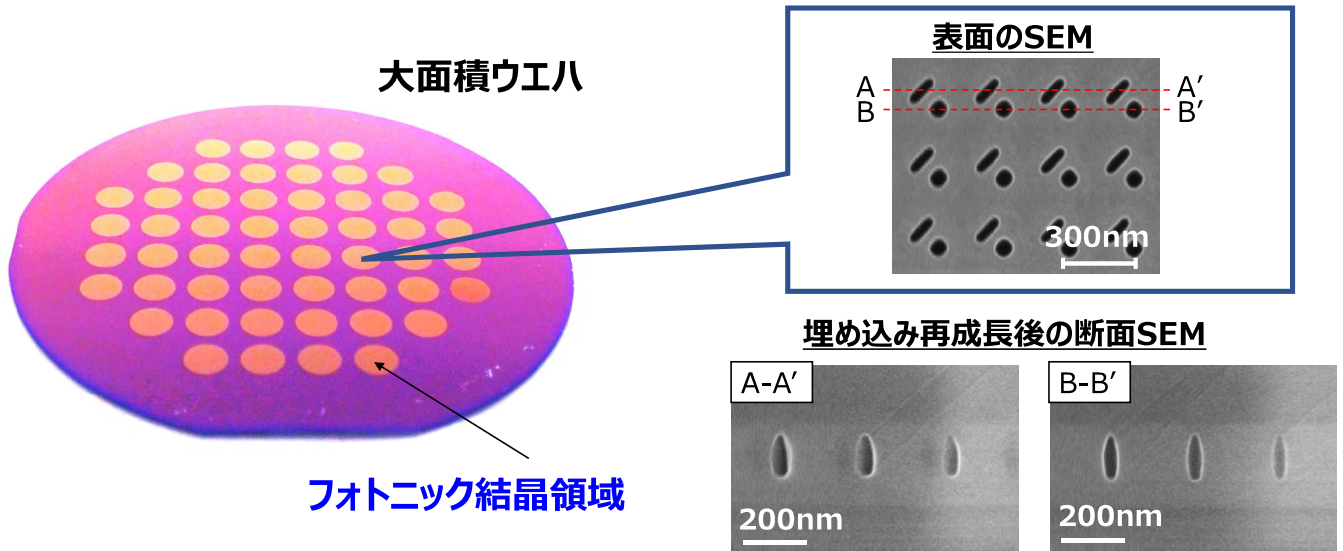
電子・正孔、光、熱の相互作用を考慮した独自の計算法で、近視野像、遠視野像を計算したもの



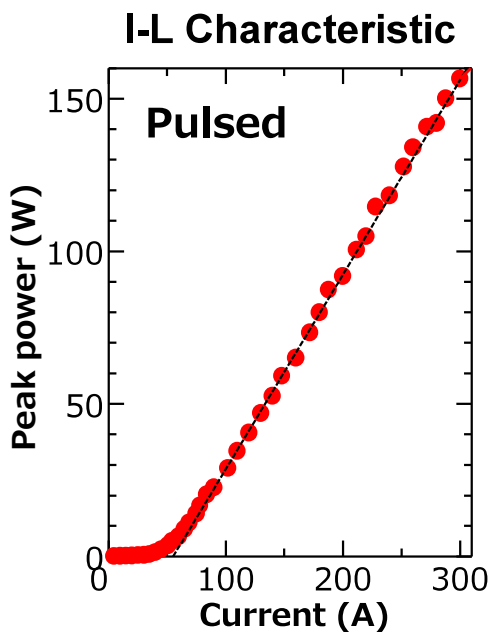
⇒ 10W級の高ビーム品質動作が期待

2. デバイス面積の拡大 (2-3mmΦデバイスの開発)

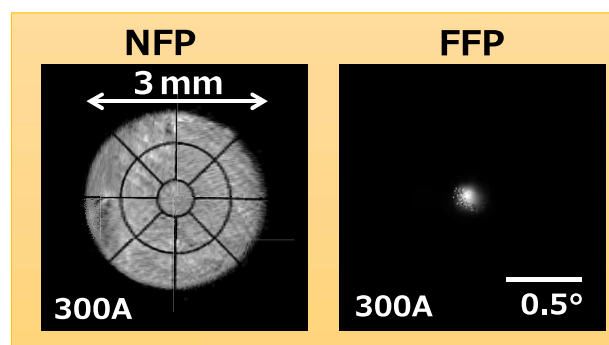
面積を拡大して、単位面積あたりの発熱量を低く保ちつつ、CW動作で $1 \text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を実現していく



3mmΦデバイスの第一次試作



NFP and FFP

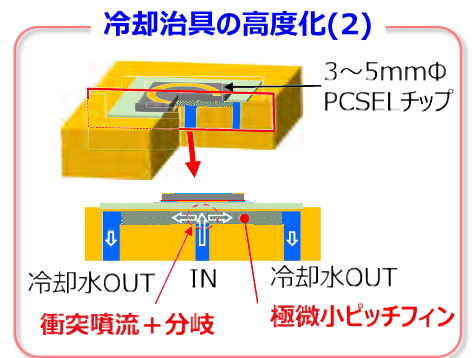
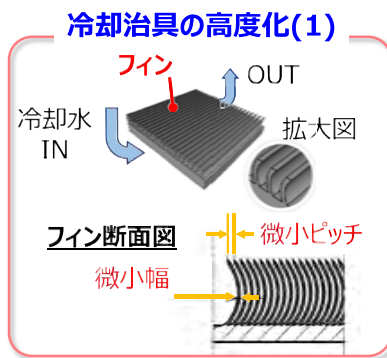
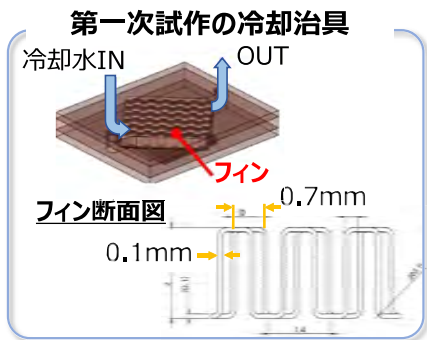


- ・わずか閾値の6倍で、150W出力。
- ・フィラメンテーションが見られず、一様発振の実現。
- ・非常に狭い出射角度：3mmΦにも関わらず、少数のモードでの発振（高ビーム品質動作）。

1cmサイズでkW級動作が期待、さらなる面積拡大、あるいは、少数の合波で数10kW級も期待

3. 放熱・実装、さらなる高ビーム品質化、合波技術等

● **放熱・実装技術の構築**



水路幅・ピッチの縮小化と水流の変化による冷却効果増大

● **3mmΦ以上の大面積におけるさらなる高ビーム品質化($M^2 < 2$)**

非エルミート・トポロジー物理による $M^2 \sim 1$ が可能なフォトニック結晶構造の考案

● **合波技術の開発**

新しい空間合波法や、波長・偏波合波法の考案・開発

フォトニック結晶レーザーに関する拠点形成（PCSEL京大拠点）

ターゲット

研究開発を通じて生み出される、“モノ”および“コト”の両方

直接のアウト
プットとしての
PCSELそのもの
(=“モノ”)

SIP推進中 ・ 京大拠点から、各種のユーザー企業・機関へと、PCSELその“モノ”を提供（LiDAR、加工、医用、分析、科学技術、その他の応用に向けて）
※MTA（Material Transfer Agreements）を介して提供

SIP終了後 ・ 終了後速やかに、ロームから、LiDAR等のセンシング分野を主として社会実装
・ その後数年で、三菱電機から汎用CW PCSELとして社会実装
さらに、その数年後、PCSELを組み込んだレーザー加工システムを社会実装
・ また、他の技術移転先企業から、照明や通信等の用途にて社会実装を目指す

PCSELの製造等
に関する、データ、
インテリジェンス
(=“コト”)

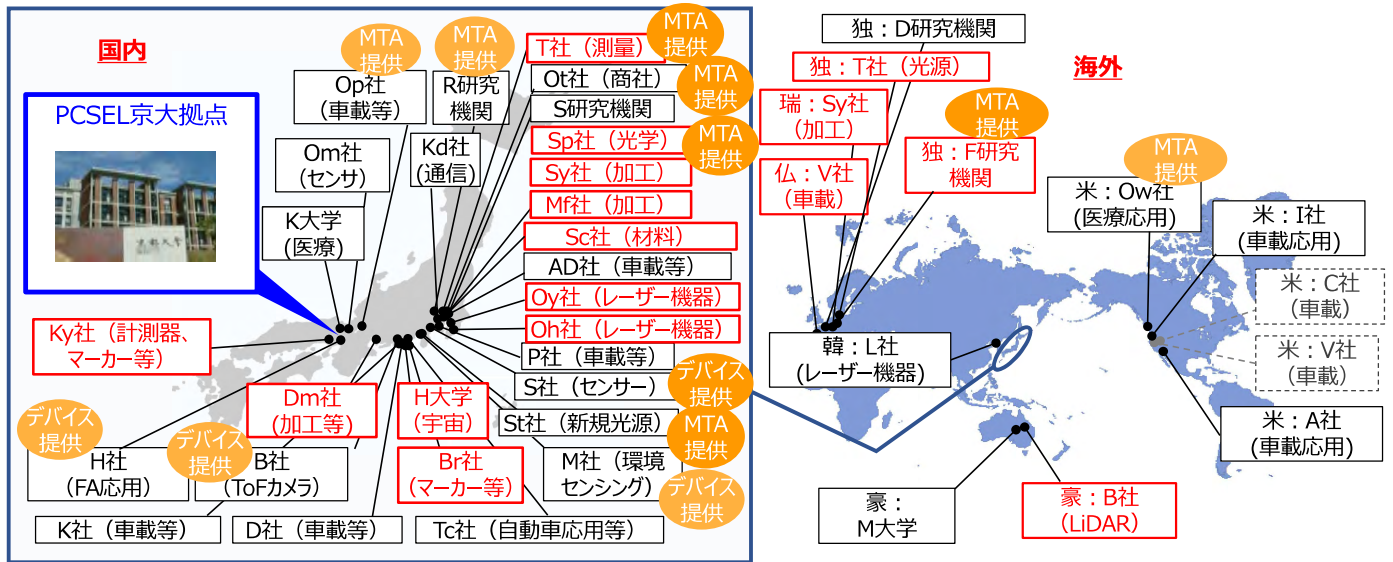
SIP推進中 ・ フォトニック結晶レーザー製造のCPS化（デジタルツイン形成）を通じてPCSEL製造に不可欠な、貴重なデータ、ノウハウやインテリジェンスを蓄積

SIP終了後 ・ 京大拠点から製造企業へと、高付加価値のデータ、インテリジェンス等の“コト”を提供していき、大規模な共同研究へと展開。
(R&D部門のみならず、事業部門との数億円レベルの大規模な共同研究への発展を念頭に推進)

さらに、社会実装の拡大化に向けたグローバル連携（日独蘭、日加蘭、日台蘭等）

“モノ”と“コト”の社会実装の拡大化

国内外の、センサー、医療応用等、幅広い分野のユーザー企業との連携や、フォトニック結晶レーザーその“モノ”の提供を拡大化

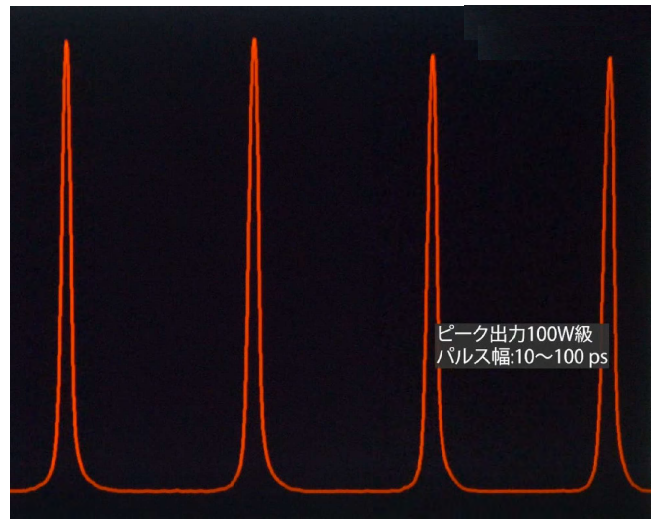
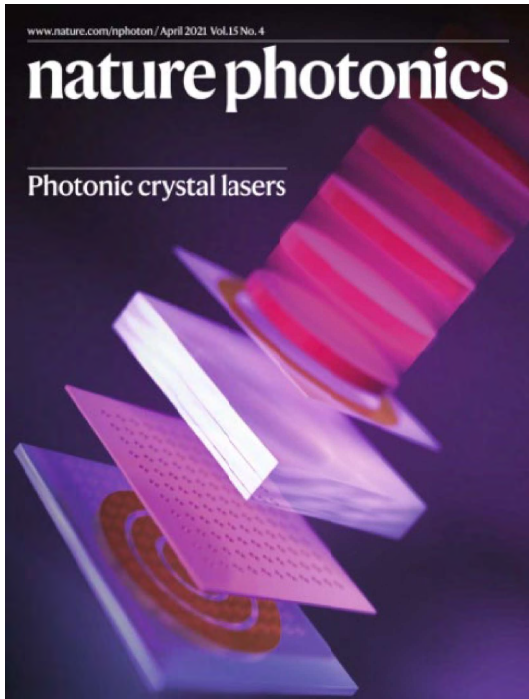


PCSEL 拠点 : <http://www.pcel-coe.kuee.kyoto-u.ac.jp>

LIDARセンシング、レーザー加工は、スマートモビリティやスマート製造を支えるコア技術



(参考1) さらなる短パルス・高ピーク出力化



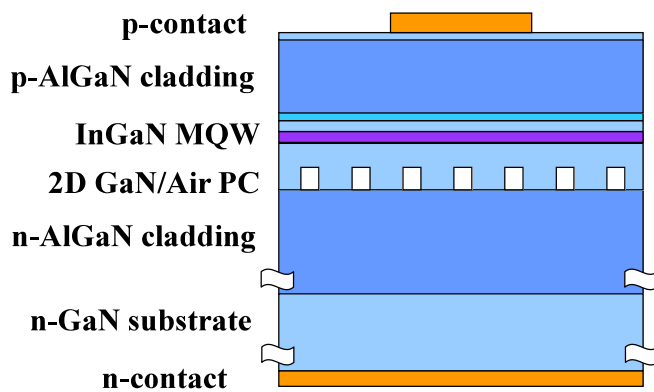
ピーク出力100W級
パルス幅:10~100 ps

ストリークカメラ像 (~30ps)

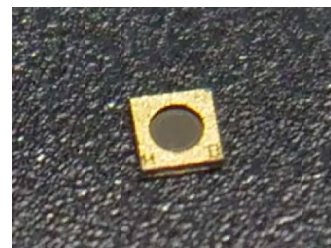
Nature Photonics 誌4月号表紙

(参考2) 短波長化

GaN系への展開



短波長発振



素子写真



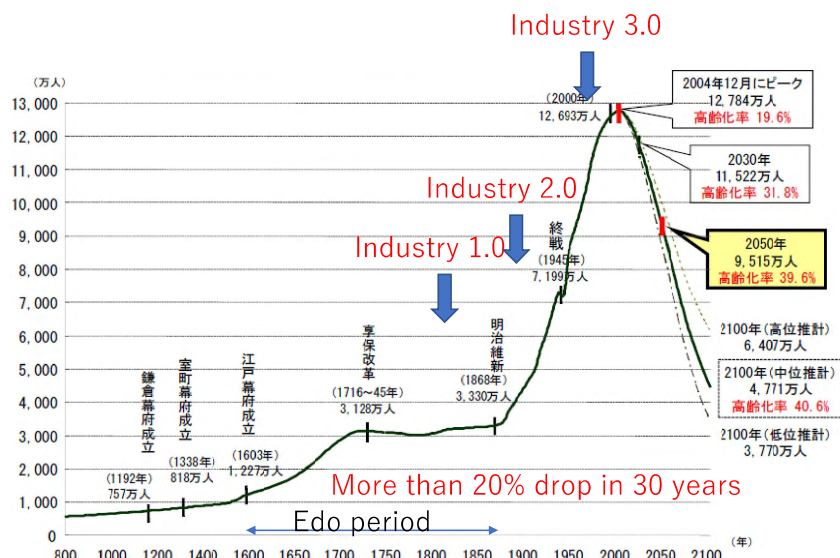
発振の様子

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

東京大学 物性研究所 小林 洋平

日本では

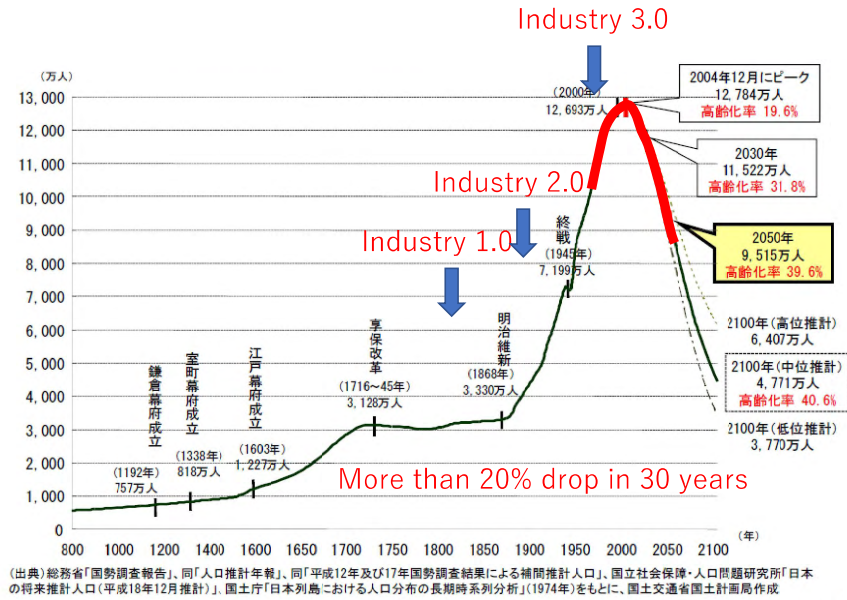
人口の急減にともなう問題



典)総務省「国勢調査報告」、同「人口推計年報」、同「平成12年及び17年国勢調査結果による補間推計人口」、国立社会保障・人口問題研究所「日本将来推計人口(平成18年12月推計)」、国土庁「日本列島における人口分布の長期時系列分析」(1974年)をもとに、国土交通省国土計画局作成

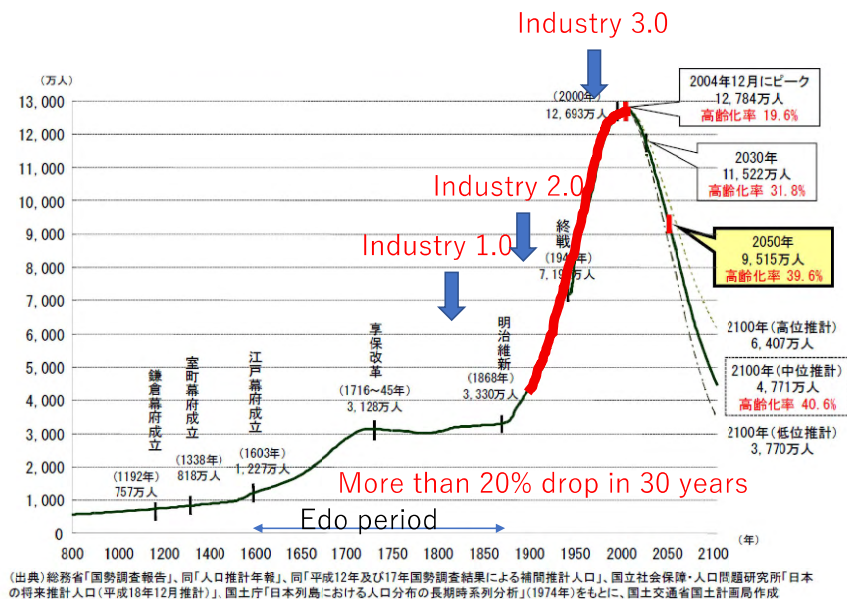
日本では

人口の急減にともなう問題



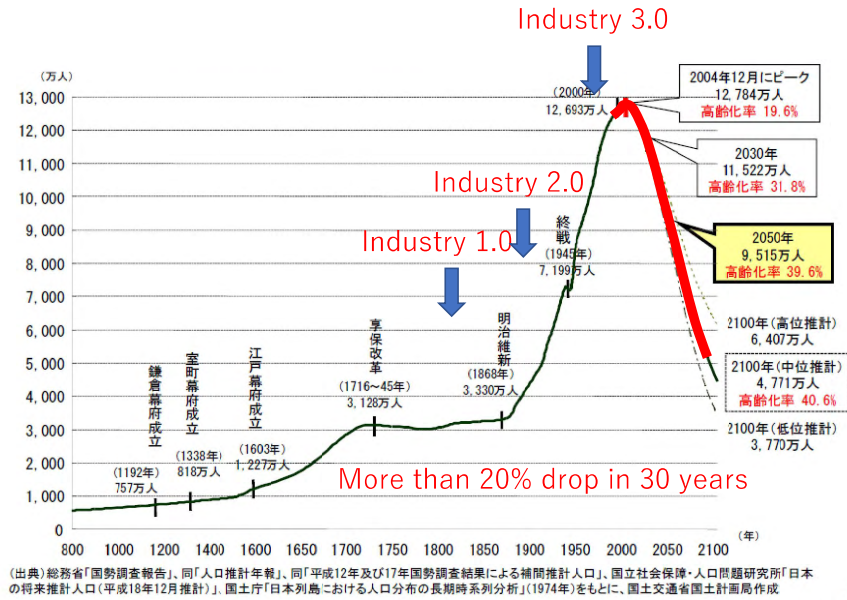
日本では

人口の急減にともなう問題



日本では

人口の急減にともなう問題



日本の課題

- 労働生産性を上げる
 - 匠の技をサイバー空間へ
→ものづくりCPSの構築, 加工シミュレータによる試作レスの実現
 - 少量多品種生産の実現へ
→機械加工からレーザー加工へ
- エネルギー・炭酸ガス排出問題
 - 省エネルギー社会へ
→燃費の向上・EV化
 - 半導体の小型化

人口減少先進国としての課題が山積している

世界の課題

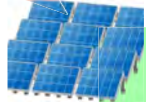
脱炭素

吸収



呼気: 0.3 t/年人
⇨木 30本/人

日本の総排出量: 10 t/年人
⇨木 1000本/人
⇨木 1000億本/日本
cf: 日本の樹木: 数100億本?



再生可能
エネルギー

EV



電池



省エネ

複合材
軽く



改質
強く



半導体
小さく



前工程



後工程

レーザー改質

レーザーリソ レーザー穴あけ

レーザー溶接

レーザー加工が活躍!

省エネ社会に向けて

ボーイング787



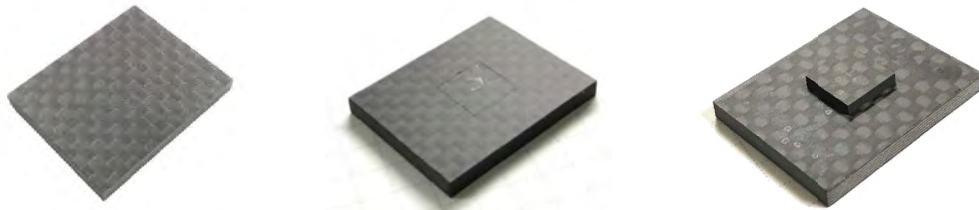
<https://www.ana.co.jp/>

BMW i8

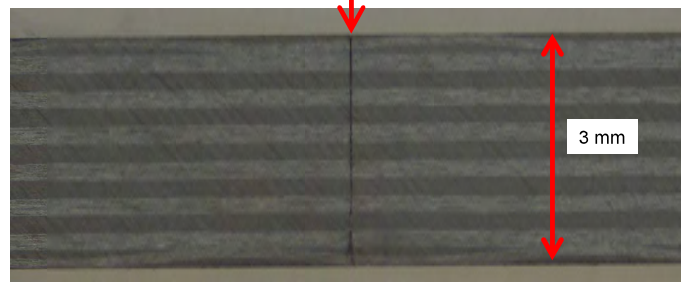


軽くて丈夫な素材
「炭素繊維強化プラスチック
(Carbon Fiber Reinforced Plastic)」

レーザーで挑戦



- ・ スパッと綺麗な断面
- ・ ほとんど隙間のない加工に成功



小菅

材料の改質

国内自動車・航空機における石油使用量（年間） ～100 Gℓ（CO₂～20000万t）

1%の軽量化で200万tCO₂の削減

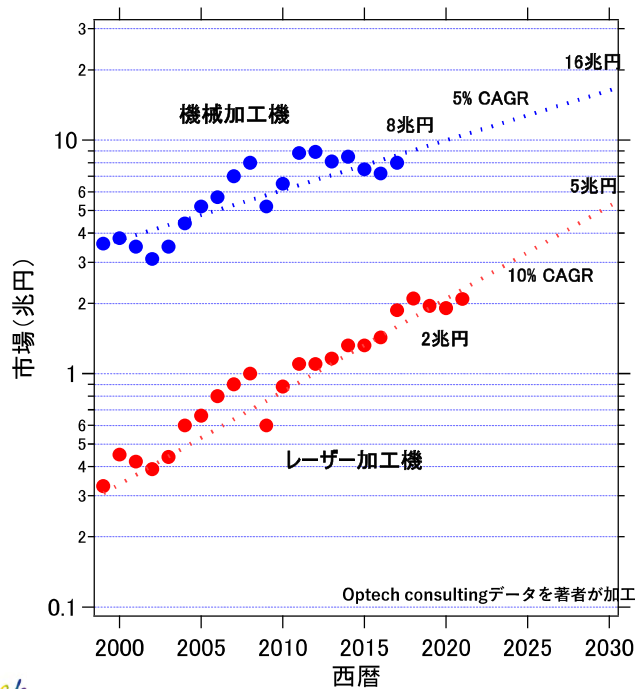
CFRP等難加工性材料による軽量化
レーザーピーニングによる軽量化

材料開発に強みを持つ日本で、
新規加工プロセスは材料開発にも重要。

高パルスエネルギーレーザーでは日本は長い歴史を持つ。産業への適用の好機

繰り返しパワーレーザー開発

レーザー加工市場



レーザー加工は機械加工の
2倍の伸び率

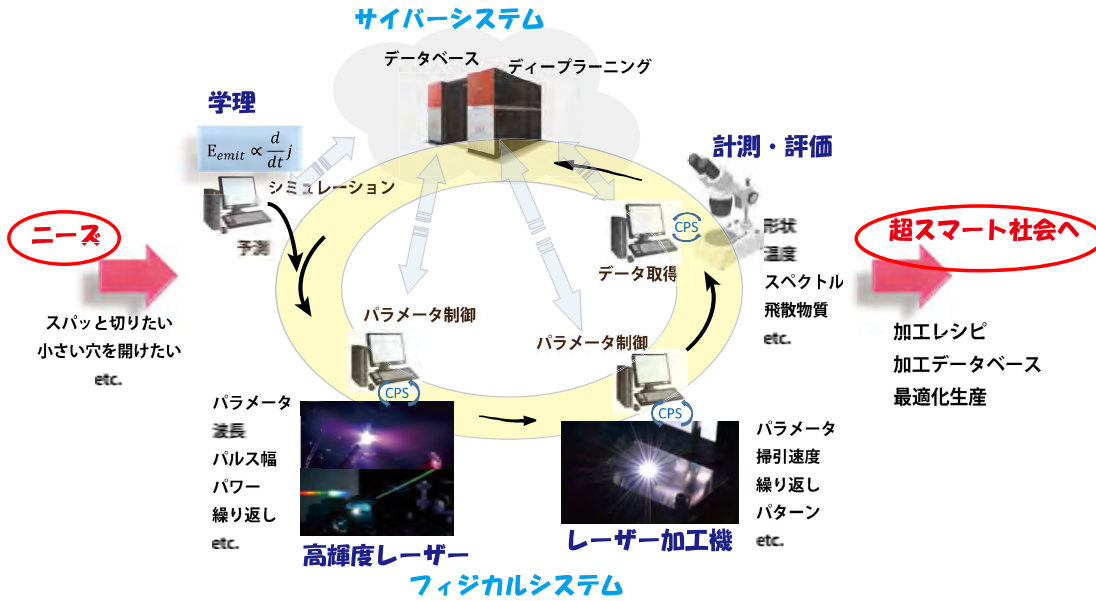
- 型レス
ドライ
少量多品種
高速
摩耗レス
DXとの相性
- × **難しい**
(パラメータだし)
高い??

レーザー加工のパラメータ

現状では職人が数か月かけて探している

短時間・低コストで決定したい

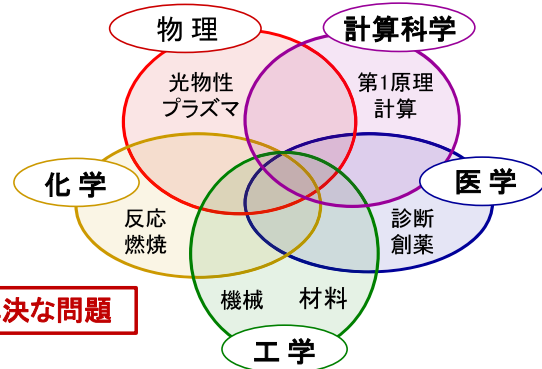
レーザー加工のパラメータ探索 ～匠の経験と勘から最適化へ～



レーザー加工はなぜ難しいか

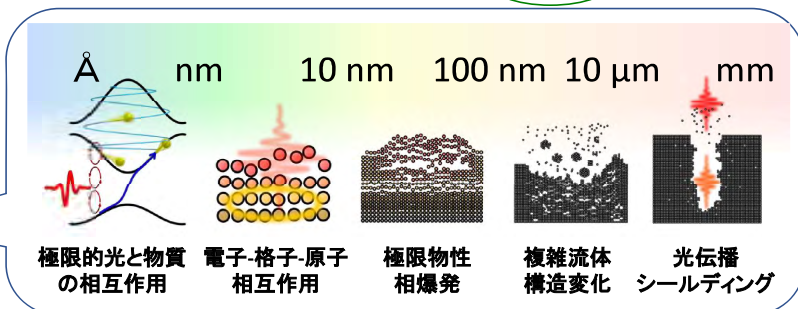
物理学からみたレーザー加工:

- ・ 熱過程、非熱過程の混合
- ・ 物理プロセスと化学プロセスの混合
- ・ 非線形、非平衡、開放系、マルチスケール、マルチディシプリナリ



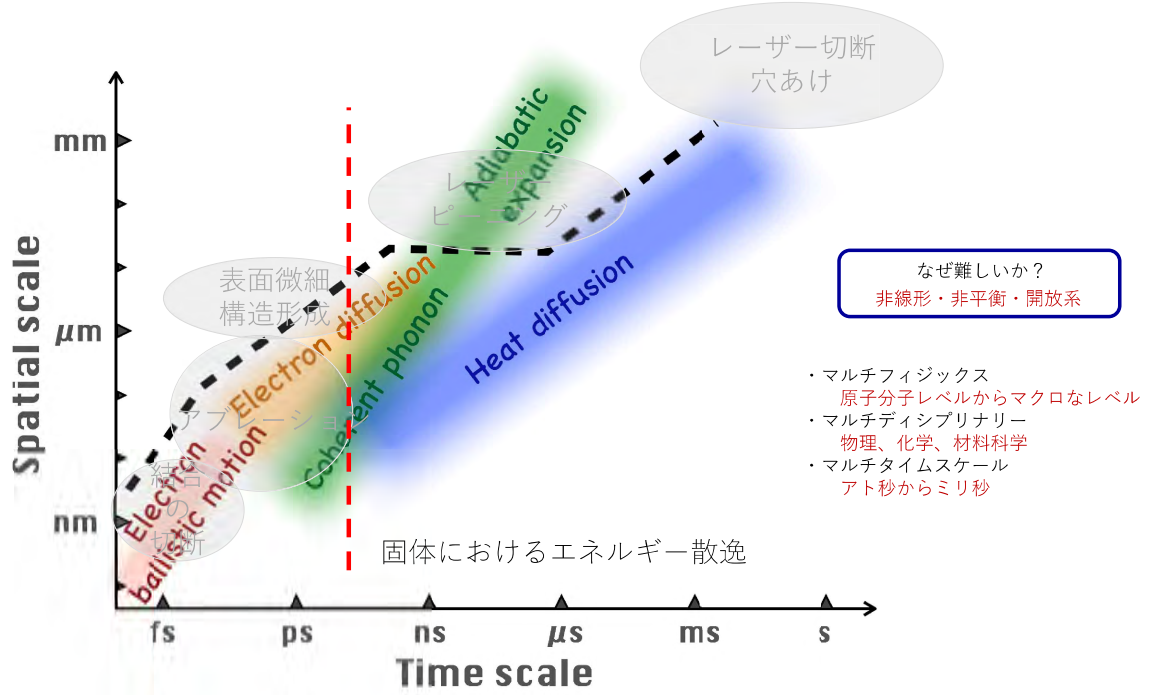
現代でも最も難しい問題の一つであり、

「加工のモデル」づくりは方法論レベルで未解決な問題



“なぜものが切れるか”がわかる

→ パラメータ探索のコスト削減



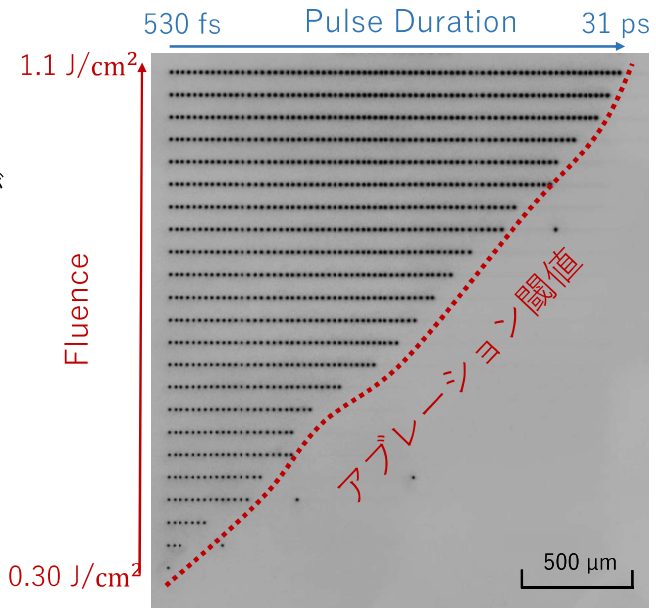
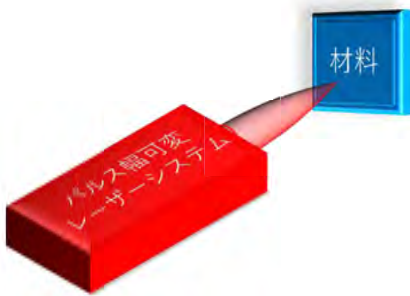
大量のデータから学理を考える



高橋

Target : Si (100)
Number of Shots : 10^5
Polarization : Linear

アブレーション閾値の変化が
視覚的に分かる



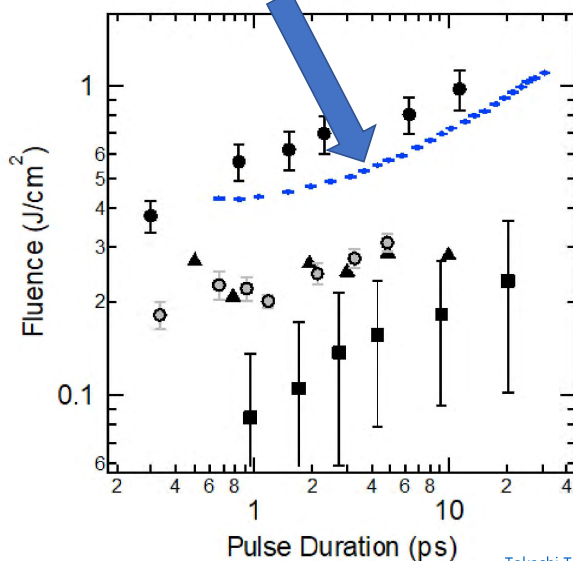
顕微鏡写真



高橋

我々の
測定結果

Target : Si



Symbol	Wavelength h	Number of pulses	Beam radius ($1/e^2$)
--------	-----------------	------------------------	-------------------------------

●	1030 nm	10^5	3.8 μ m 6.6 μ m
● ¹	1030 nm	single	22 μ m
▲ ²	1030 nm	64	13.5 μ m
■ ³	1064 nm	single	n/a
● ⁴	775 nm	single	142 μ m

- [1] D. A. Zayarny *et al.*, JETP Letters 103.12 (2016)
- [2] B. Neuenschwander *et al.* LAMOM XVII. Vol. 8243 (2012)
- [3] P. P. Pronko, *et al.* Physical Review B 58.5 (1998)
- [4] P. Allenspacher *et al.* Proc. SPIE 4932, 358 (2003)

1桁以上精度向上
→緻密な物理の議論が可能へ

大量データ

— 深層学習の適用 —

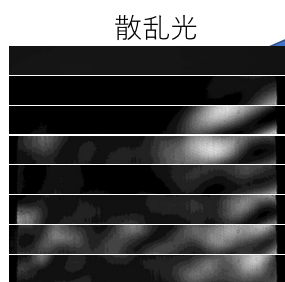
Kobayashi lab

TACMI
CONSORTIUM

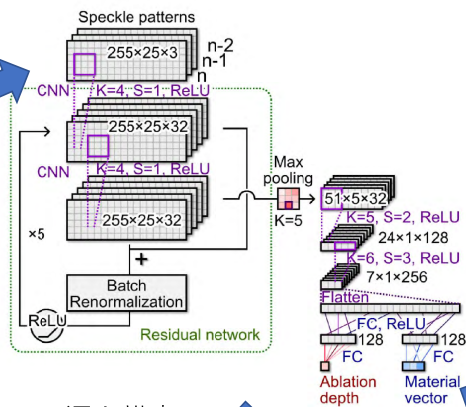
モニタリングへの機械学習の適用



青柳

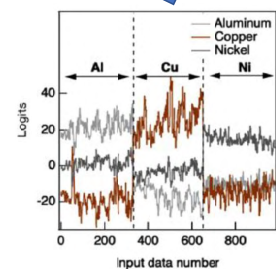
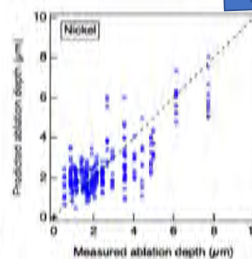
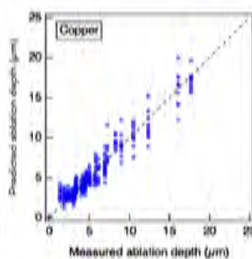
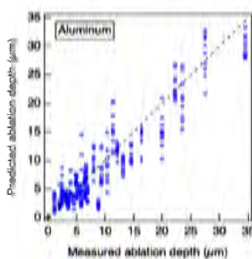


散乱光



深さ推定

材料推定

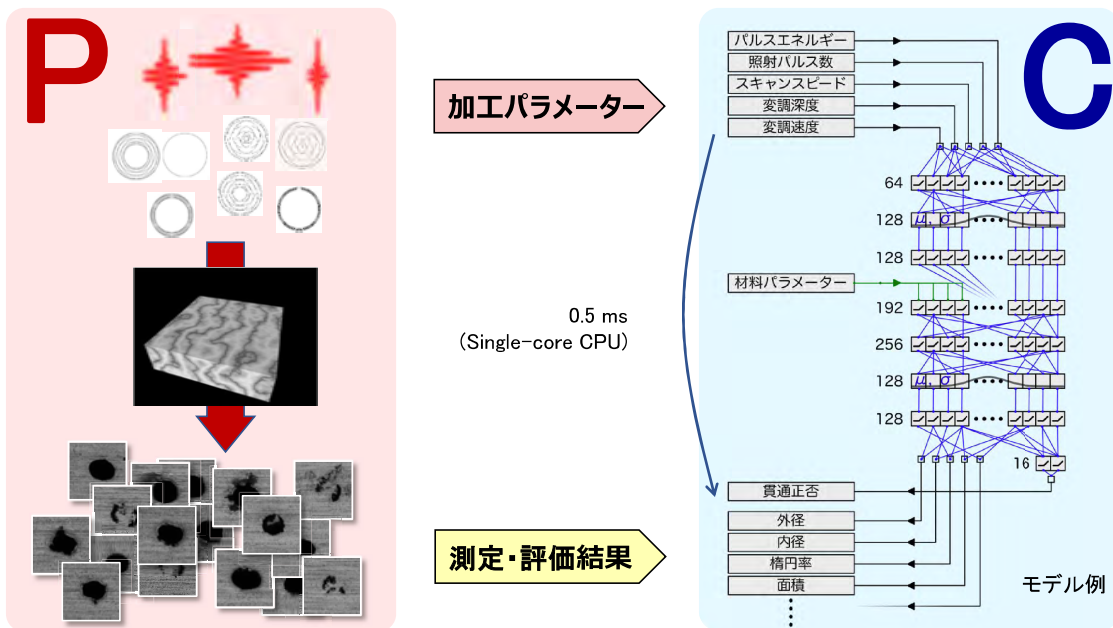


Kobayashi lab

AIシミュレータの開発

Kobayashi lab

ニューラルネットワークによるレーザー加工のモデル化



谷



島原

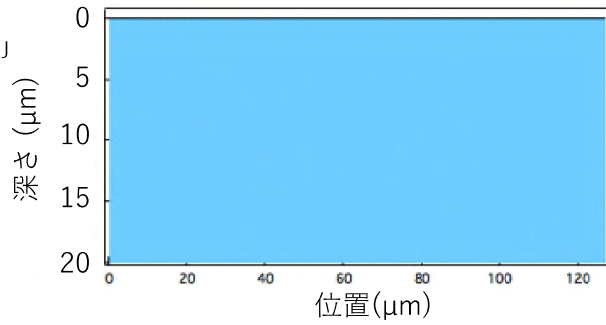
Kobayashi lab

レーザー加工形状のシミュレーション



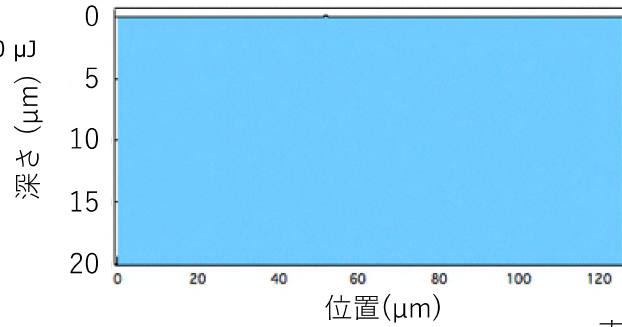
谷

対象：石英ガラス
パルスエネルギー：60 μJ



サイバー側と同一のパラメーターによる実際の加工

対象：石英ガラス
パルスエネルギー：60 μJ



あきらめられていた超短パルスのレーザー加工シミュレーションが可能に

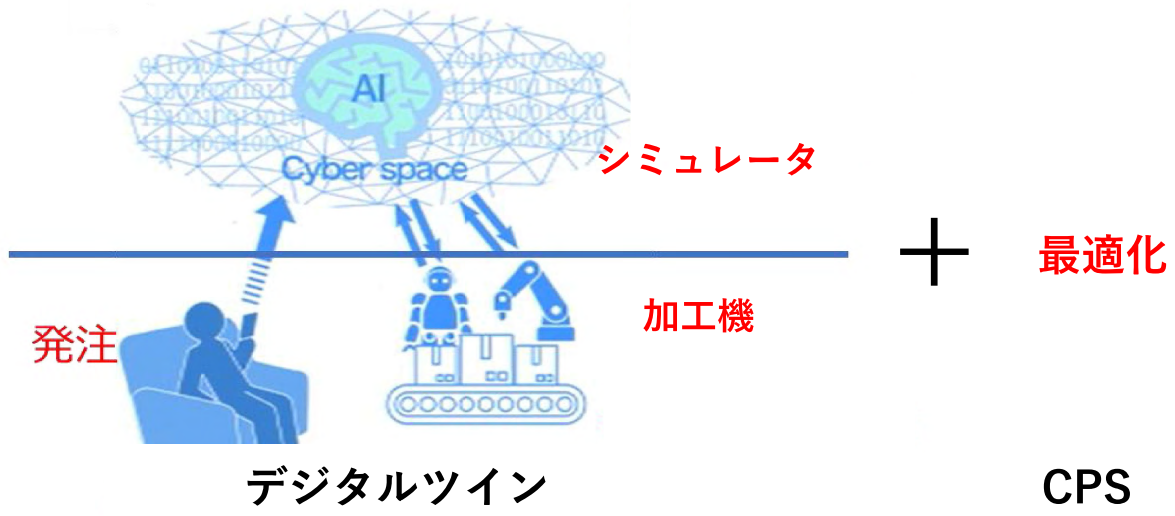
東大出願済

サイバーフィジカルシステム (CPS) へ

Digital Twin と CPS

サイバーフィジカル
システム

サイバー空間
デジタルツイン
サイバー空間



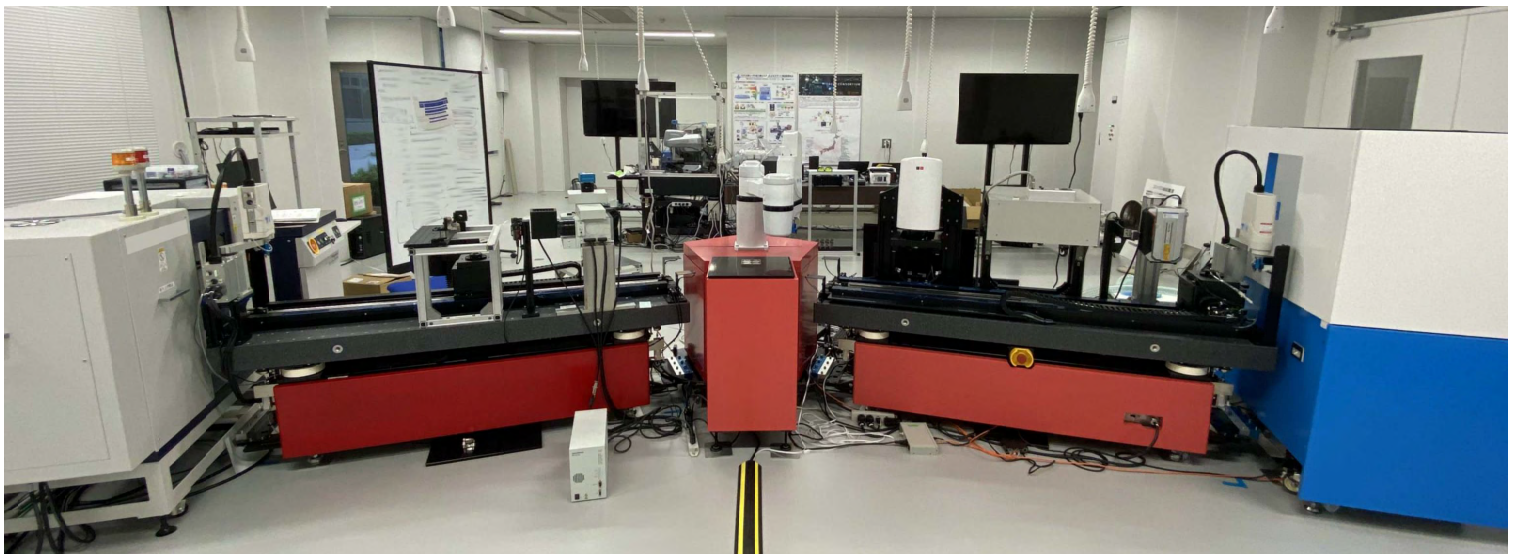
Kobayashi lab

Society 5.0

マイスターデータジェネレーター (MDG)



田丸 坂上 谷 櫻井 中里



Kobayashi lab

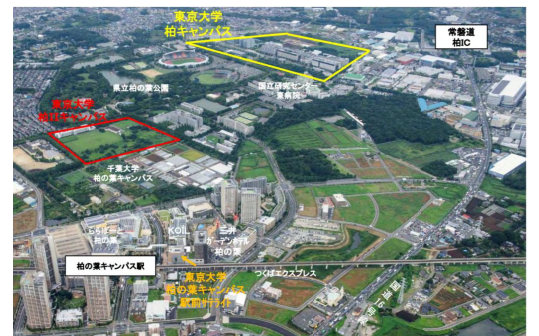
社会への実装

Kobayashi lab

TACMIコンソーシアム

<http://www.utripl.u-tokyo.ac.jp/tacmi/>

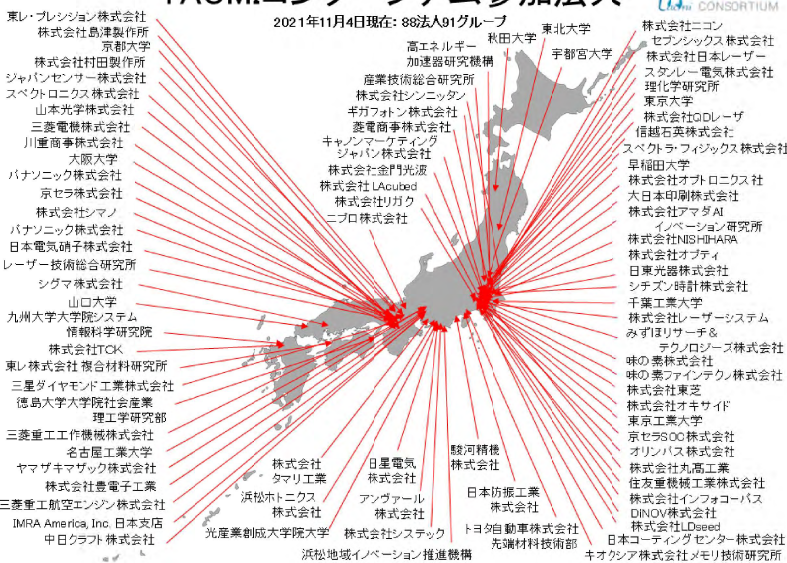
東京大学 柏II キャンパス



TACMIコンソーシアム参加法人



2021年11月4日現在: 88法人91グループ



レーザー加工の先端要素技術に加えて、最近では、プロセス開発の加速、スマート化・CPS化に関心の強い企業に次々と入会いただいている

Kobayashi lab

多様なレーザー装置への展開

産業界が解きたい問題をアカデミアで挑戦

- ニーズは膨大
- データベースの充実, データ活用の模索
- シミュレーションの実現へ

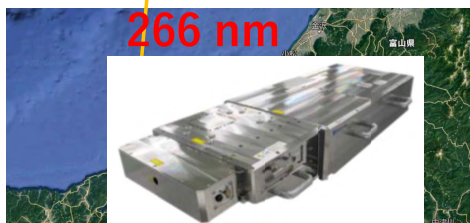
様々なレーザーパラメータ、材料、加工法

- 産官学協創
- 理論-実験の融合で学理探索
- レーザー施設の連携

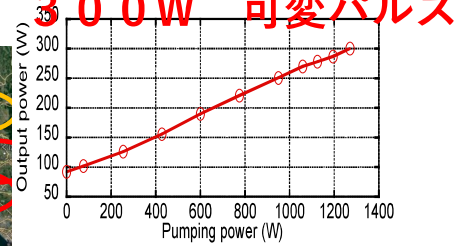
Kobayashi lab

産官学 TACMI レーザー加工プラットフォーム連携

三菱電機 尼崎



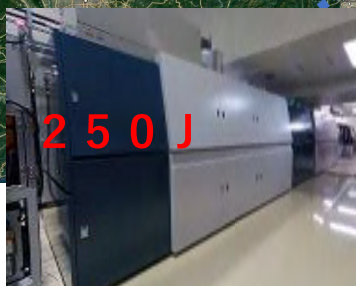
ギガフォトン 小山



193 nm



青色LD AM加工機
阪大吹田



Kobayashi lab

NEDOプロ(2021終了) で開発したレーザー加工機が連携している

パワーレーザー・高エネルギー密度科学の 課題と展望

- パワーレーザーによる高エネルギー密度科学
- 変革をもたらすパワーレーザー技術
- 創造の科学へ変革する高エネルギー密度科学
- まとめ

大阪大学レーザー科学研究所
兒玉 了祐



知を創造する高エネルギー密度科学

大型パワーレーザーで、
高エネルギー密度状態(圧力10万気圧から数10超気圧に相当する極限状態)を実現し、
極限的非平衡状態での“構造変化と破壊”に関する“知”を創造

社会課題
学術的価値
(レーザー科学)

大型
パワーレーザー

高エネルギー密度科学
知の創造・学術の創成

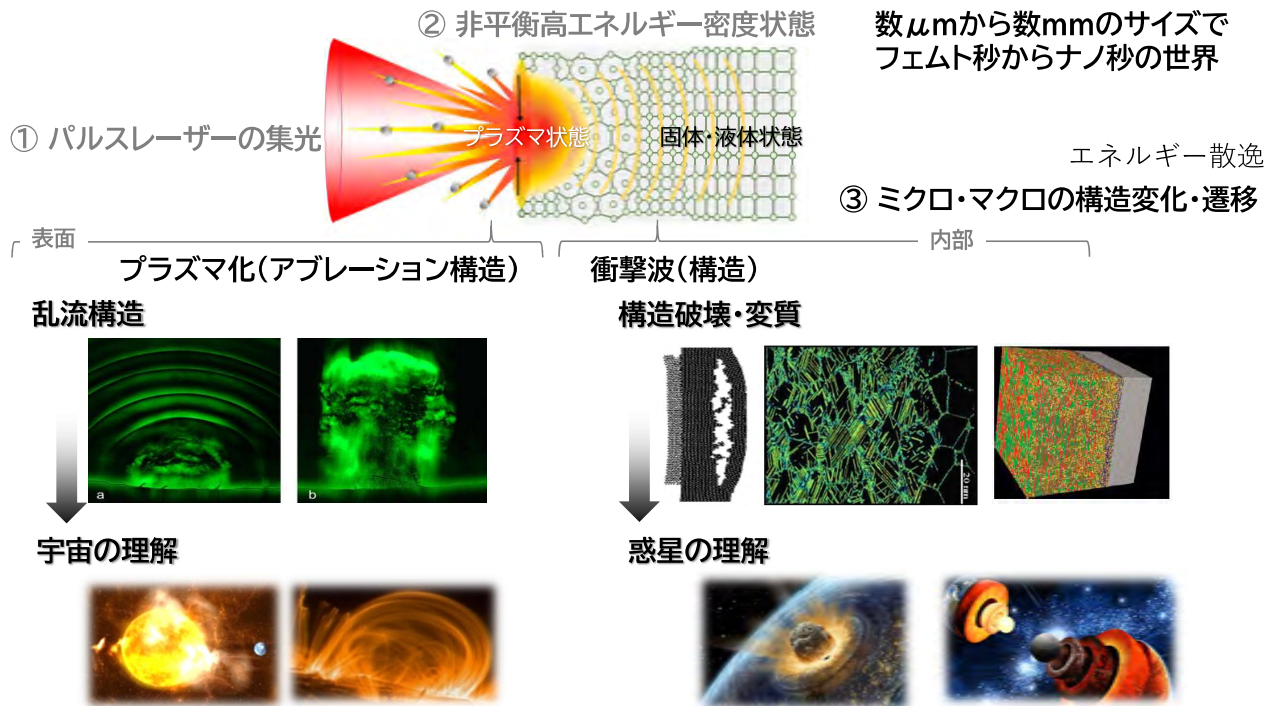
プラズマ物理学
宇宙物理学
惑星物理学
超高圧物理学
核物理学
核融合プラズマ物理学
など

先端キーテクノロジーの開発推進と統合

我が国の強み: 高耐力光学素子、光学材料、光学薄膜
我が国が推進すべき技術: 制御技術、センサー技術

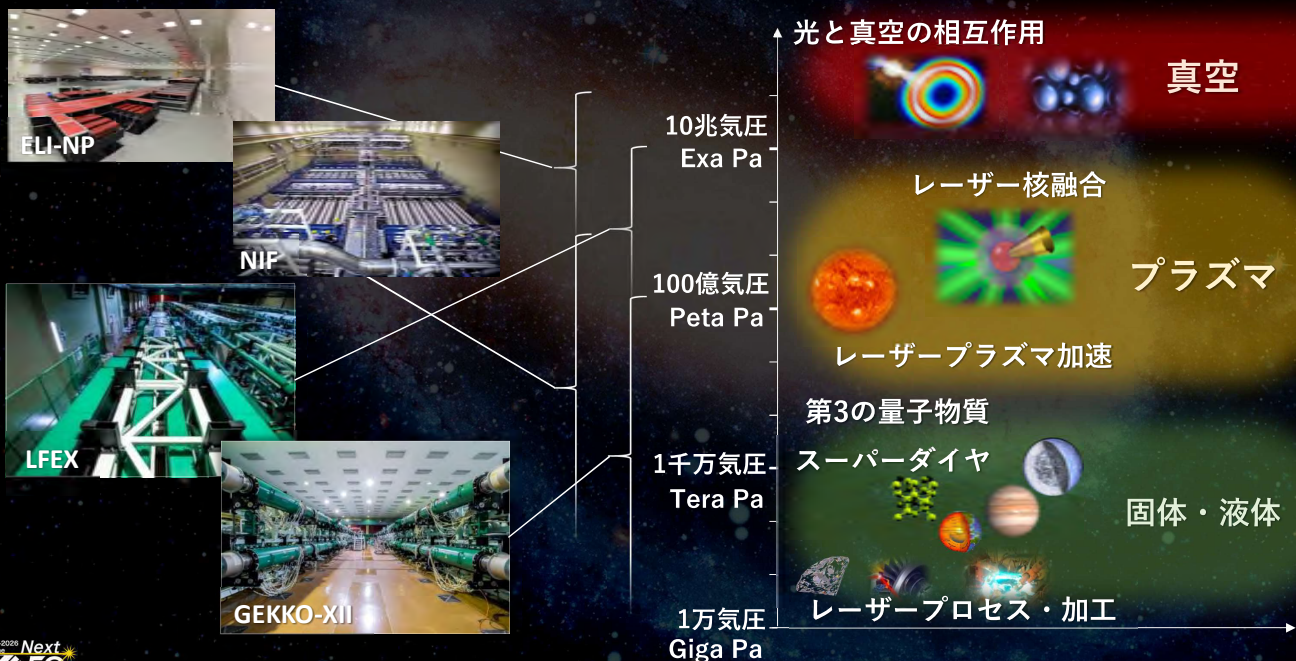


非平衡高エネルギー密度極限状態での“構造変化と破壊”

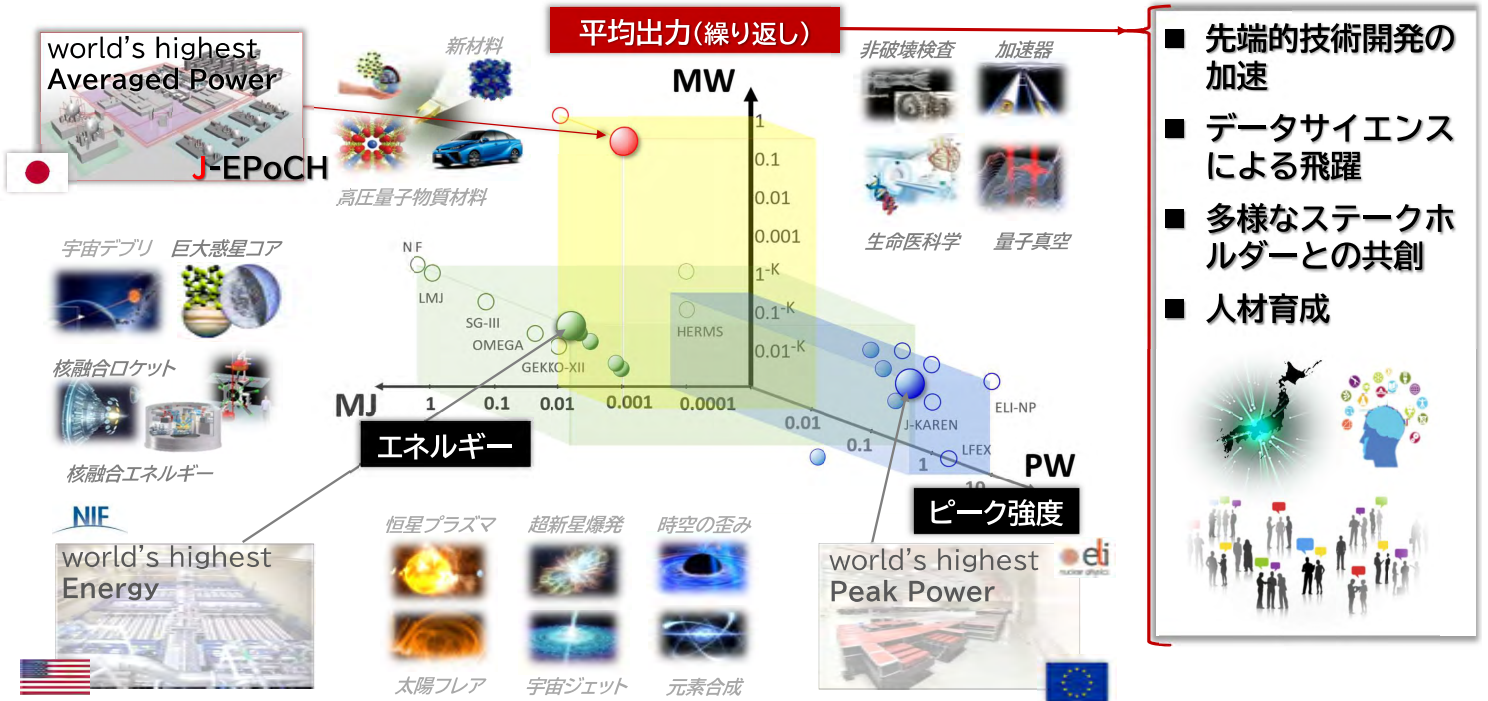


パワーレーザーによる高エネルギー密度科学

～ギガからエクサの超高压状態～



高エネルギー密度科学に変革をもたらす新たな軸 大型高繰り返しパワーレーザーでゲームチェンジ



我が国の技術を生かし、世界を先導できる 大型高繰り返しレーザーシステム: J-EPoCH



現在 (40-50年前の技術)

これから (50年前の技術からの脱却)

高出力キロジュールレーザー
12Beams 12kJ/0.0001Hz

35cm 2kJ

LFEX kJ-PW laser
4 Beam let 8kJ/0.0001Hz

フラッシュランプ ガラスレーザー

1-100万倍の繰り返しショットを実現する
世界一の繰り返しパワーレーザー

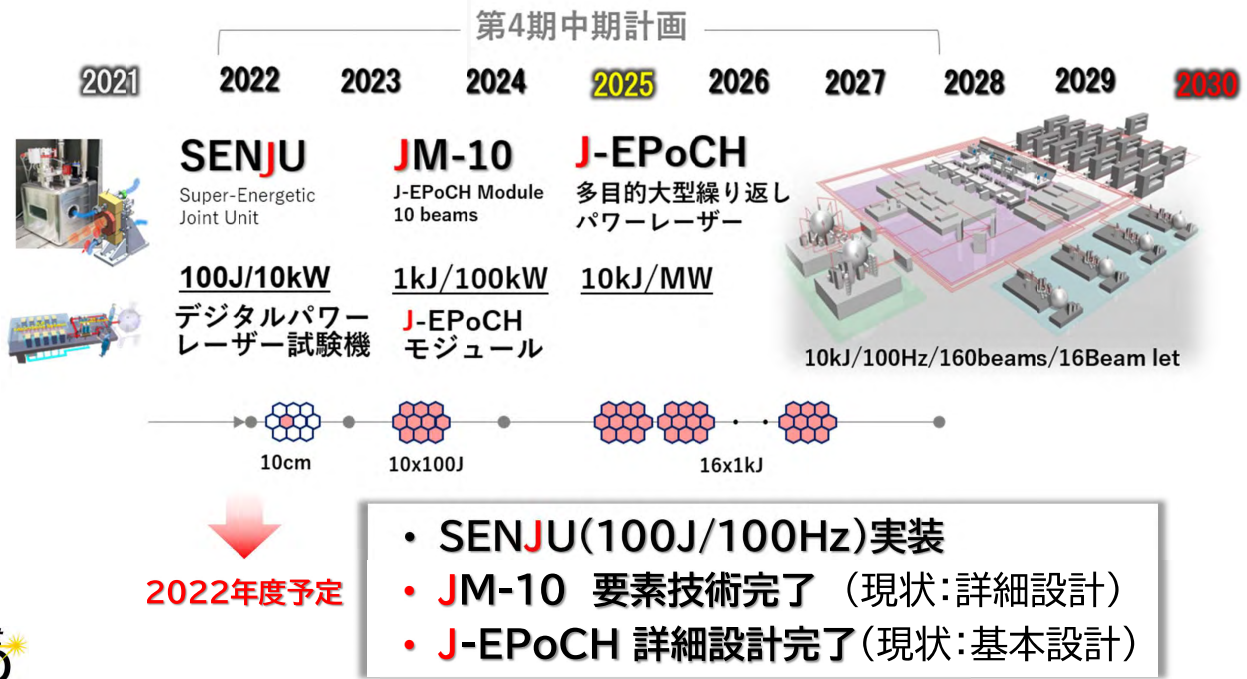
10cm SENJU 160台 J-EPoCH

デジタルパワーレーザー 多目的多機能レーザーシステム
100J/100Hz/10kW 10kJ/100Hz

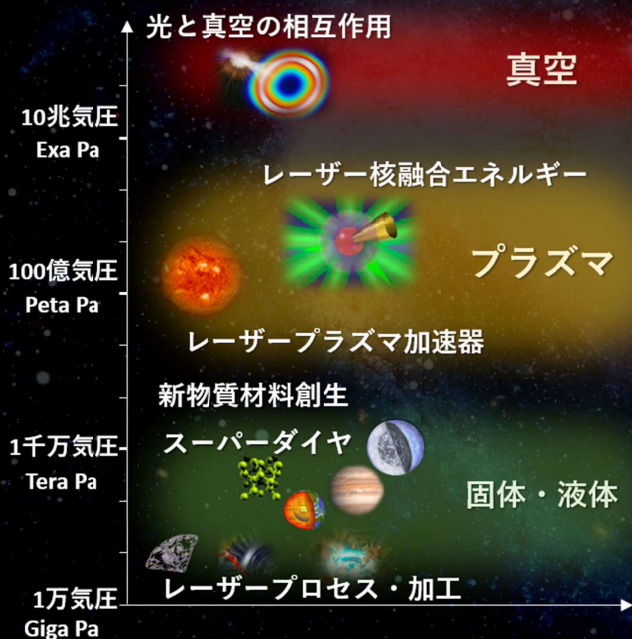
我が国の産業活性化と競争力増強

30万個 大量の半導体レーザー 大量先端光学材料・光学素子

大阪万博までにkJ繰り返しレーザーで応用実験をスタート、 10年以内に10kJ繰り返しレーザー施設有した中核拠点活動の確立



高繰り返し化で変革する高エネルギー密度科学

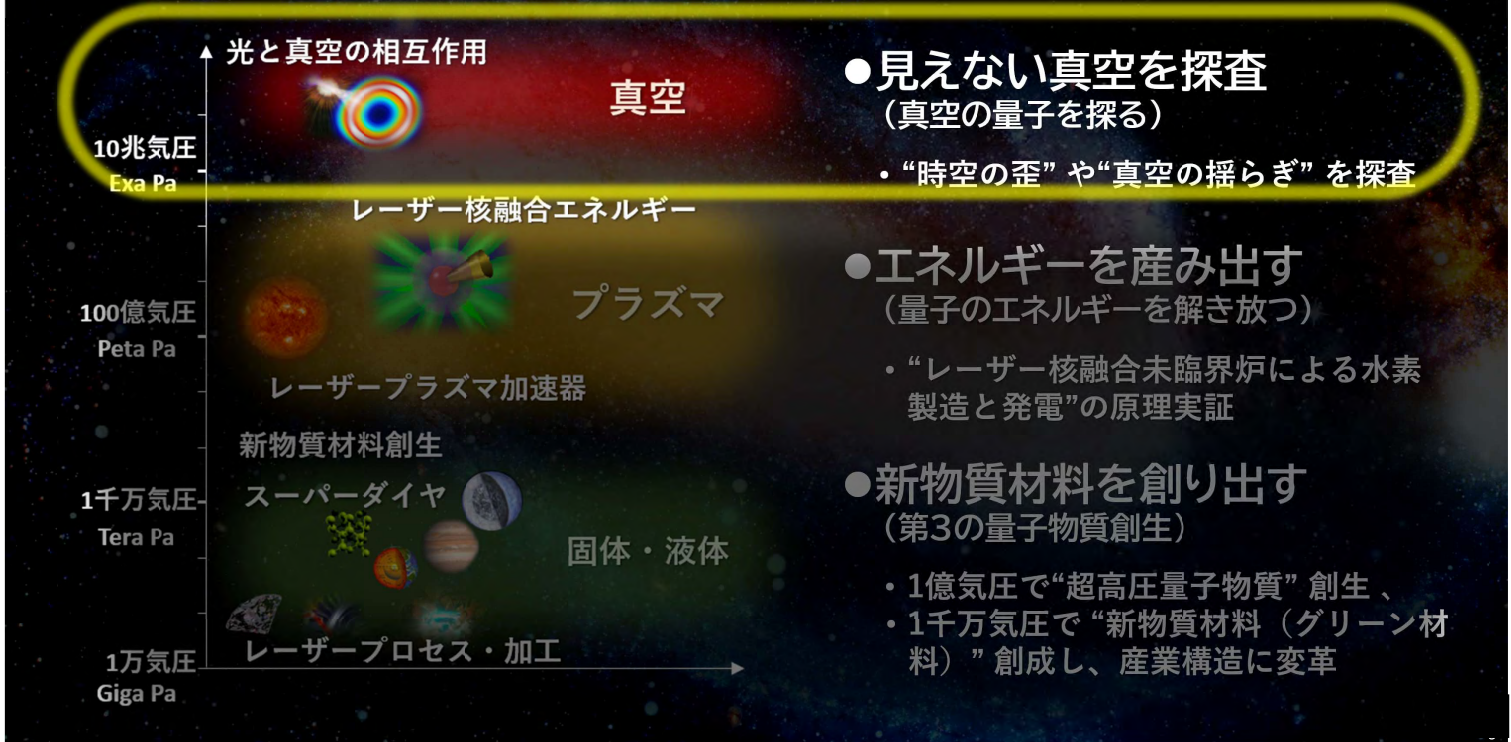


世界の殆どの大型レーザーは、シングルショットベースで、より大きなエネルギー、より強いレーザーで高エネルギー密度(圧力10万気圧から数10超気圧)の極限状態を探索

繰り返しを上げることで、

- ビッグデータによる高精度診断・データ解析
- 高精度レーザースマート制御(相互作用を考慮したレーザー制御)

新たな学術領域の開拓



真空の量子揺らぎ



不確定原理

$$\Delta t \cdot \Delta \varepsilon \approx \hbar \sim 5 \times 10^{-35} \text{ J} \cdot \text{s}$$

小さすぎて身の回りで感じることはない

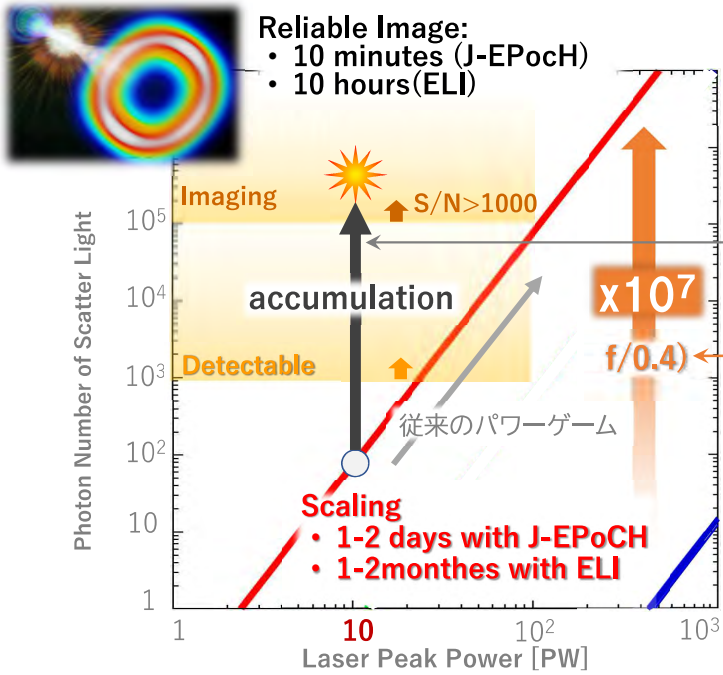
$$E = mc^2$$

エネルギー=質量



真空に強い光をあてると、
量子揺らぎと低い確率で相互作用(散乱)

繰り返し超高強度レーザーと高速集光プラズマミラーを利用して、 真空偏極(真空量子揺らぎ)による光の散乱を効率的に観測



繰り返し超高強度レーザー

J-EPoCH

ELI-NP

我が国オリジナルの
高速集光プラズマミラー

Opt. Letts. 35, (2010) 2314

10PW

10^{-5} Torr

Perturbed Quantum Vacuum

散乱光子数: 10^{5-6}
 レーザー光子数: 10^{21}

偏光子: 7枚
 透過率: 50%
 消光比: 10^{-5}

イメージS/N > 1000

Y. Monden and R. Kodama, Phys. Rev. Letters 107, (2011) 073602; Phys. Rev. A 86, (2012) 033810

世界一の繰り返し大型レーザーで、極限量子の世界を切り拓く！



光と真空の相互作用

真空

10兆気圧
Exa Pa

レーザー核融合エネルギー

プラズマ

100億気圧
Peta Pa

レーザープラズマ加速器

新物質材料創生

1千万気圧
Tera Pa

スーパーダイヤモンド

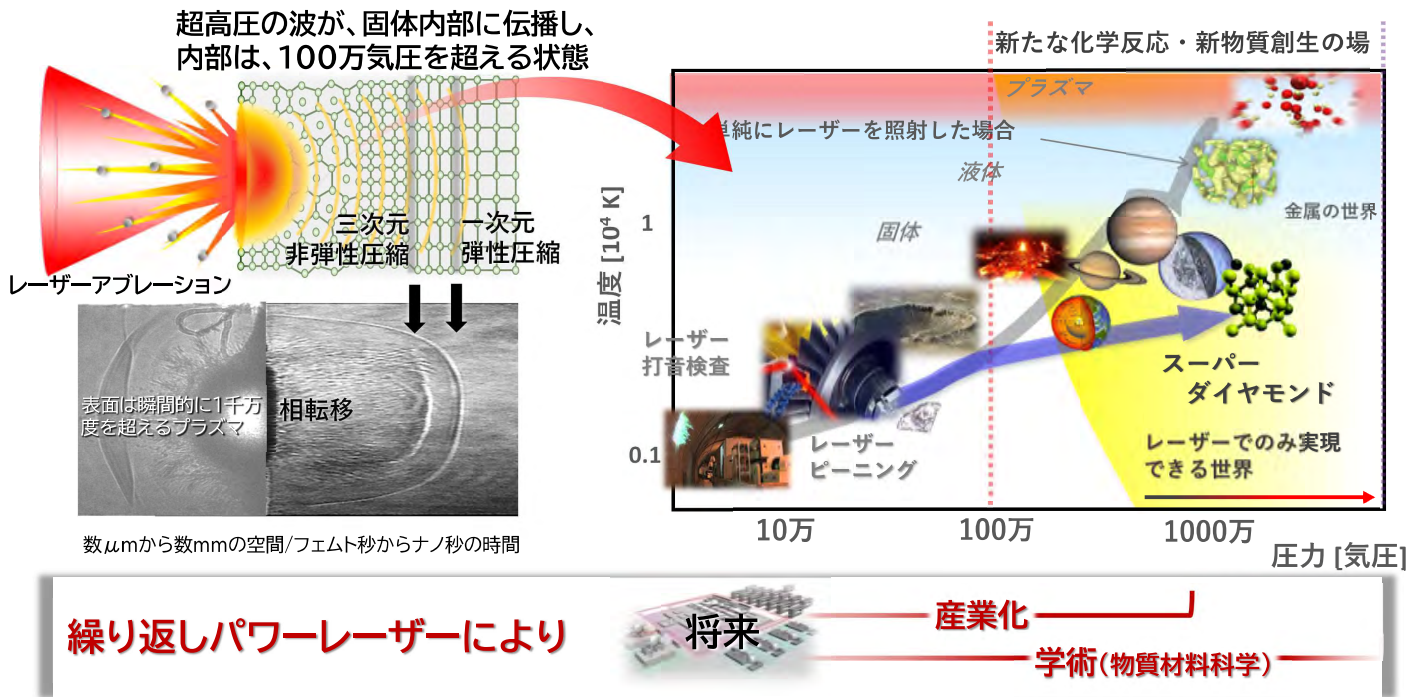
固体・液体

1万気圧
Giga Pa

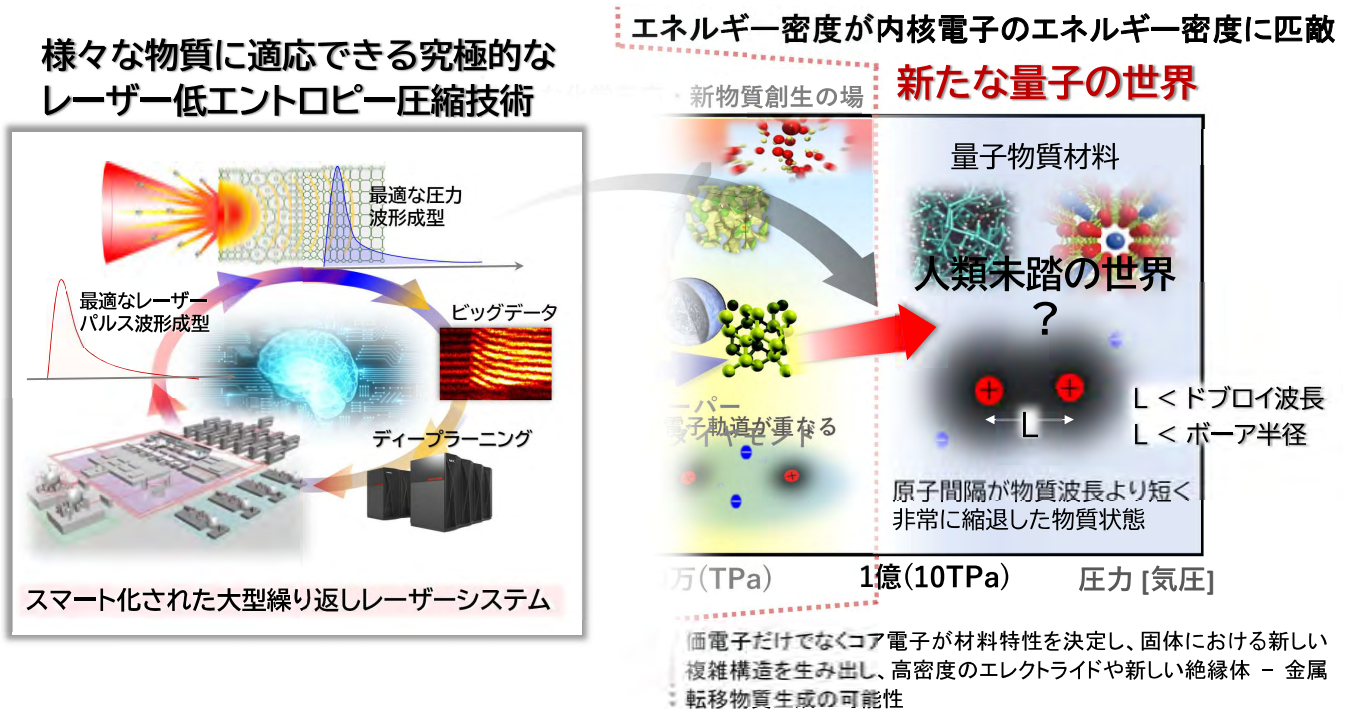
レーザープロセス・加工

- 見えない真空を探査 (真空の量子を探る)
 - “時空の歪”や“真空の揺らぎ”を探査
- エネルギーを産み出す (量子のエネルギーを解き放つ)
 - “レーザー核融合未臨界炉による水素製造と発電”の原理実証
- 新物質材料を創り出す (第3の量子物質創生)
 - 1億気圧で“超高圧量子物質”創生、
 - 1千万気圧で“新物質材料(グリーン材料)”創成し、産業構造に変革

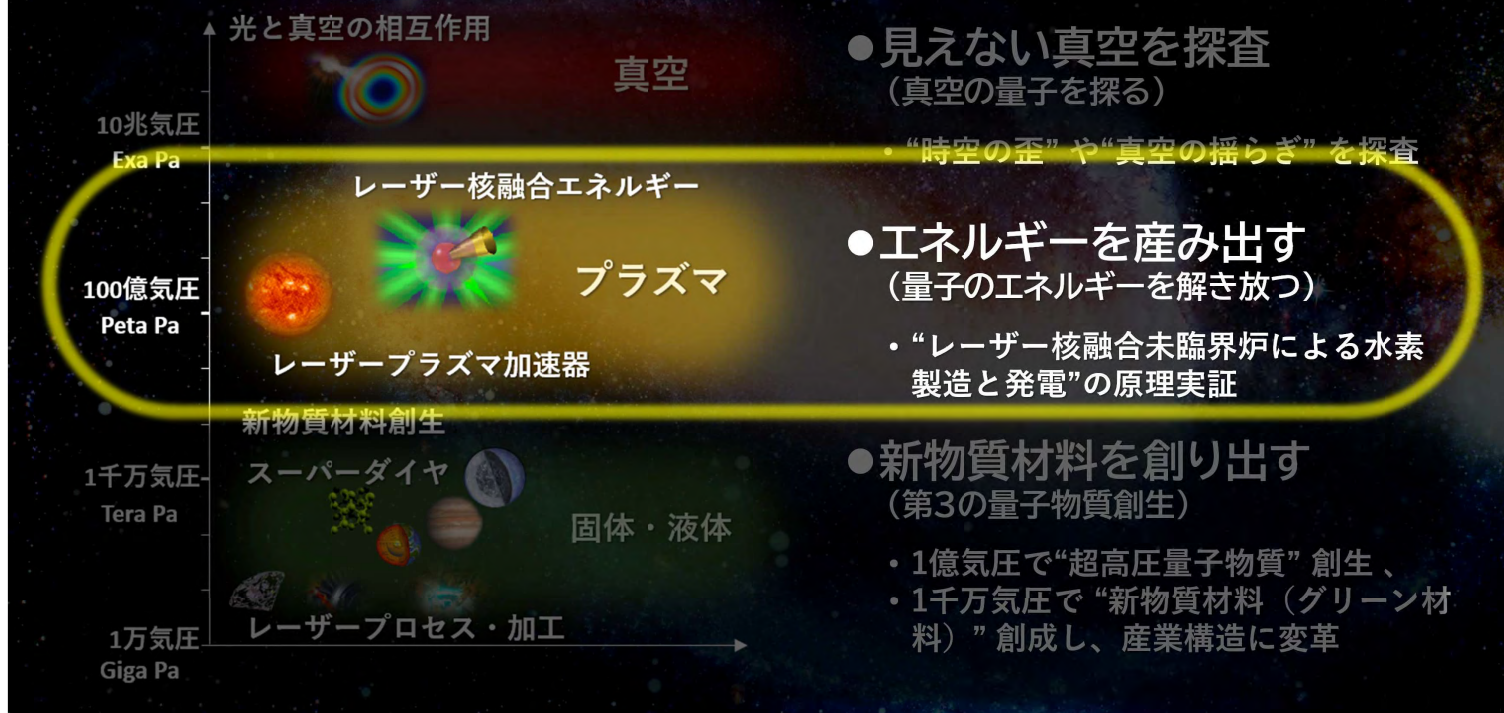
パワーレーザーの繰り返し化技術による新たな学術と産業



極限的なレーザー圧縮技術により第3番目の量子の世界へアプローチ

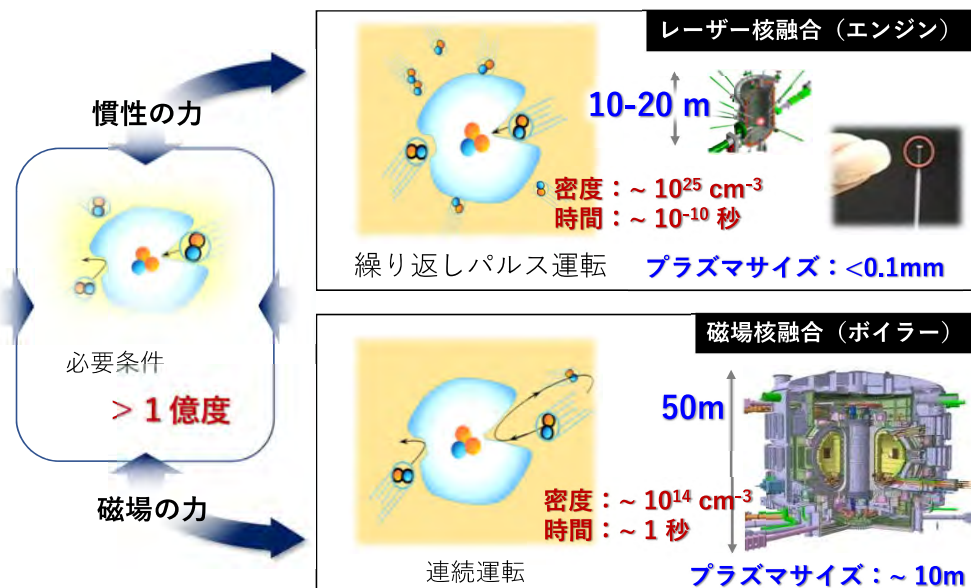


世界一の繰り返し大型レーザーで、極限量子の世界を切り拓く！



核融合反応を維持する力は太陽では重力が、 地上では、2種類の閉じ込め方法の研究が進められている

単に閉じ込めるだけでなく、発電に十分な核融合反応は、**燃料密度 × 閉じ込め時間**を一定以上にする必要があります。



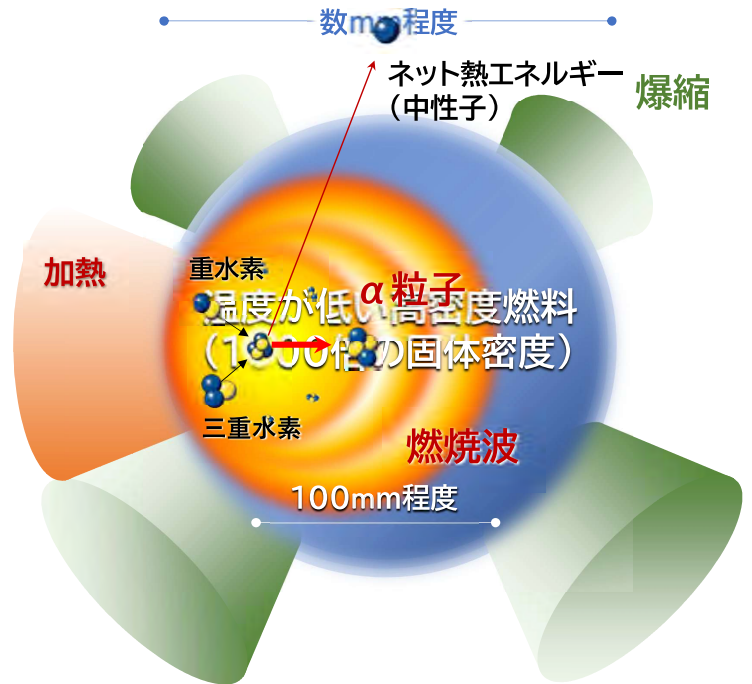
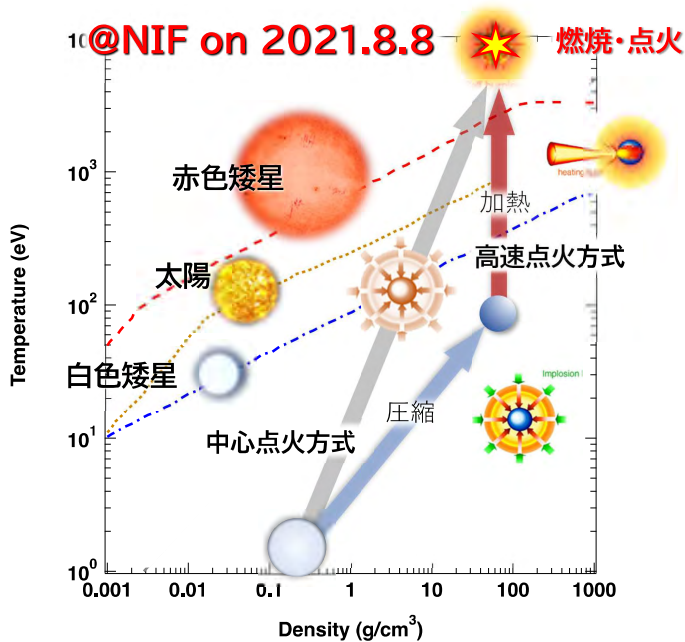
- 小型核融合炉*が可能
- 物理課題と工学的課題解決の独立性
- 他の目的で開発されるキーテクノロジー

*分散型スマート社会に適したレーザー核融合小型炉

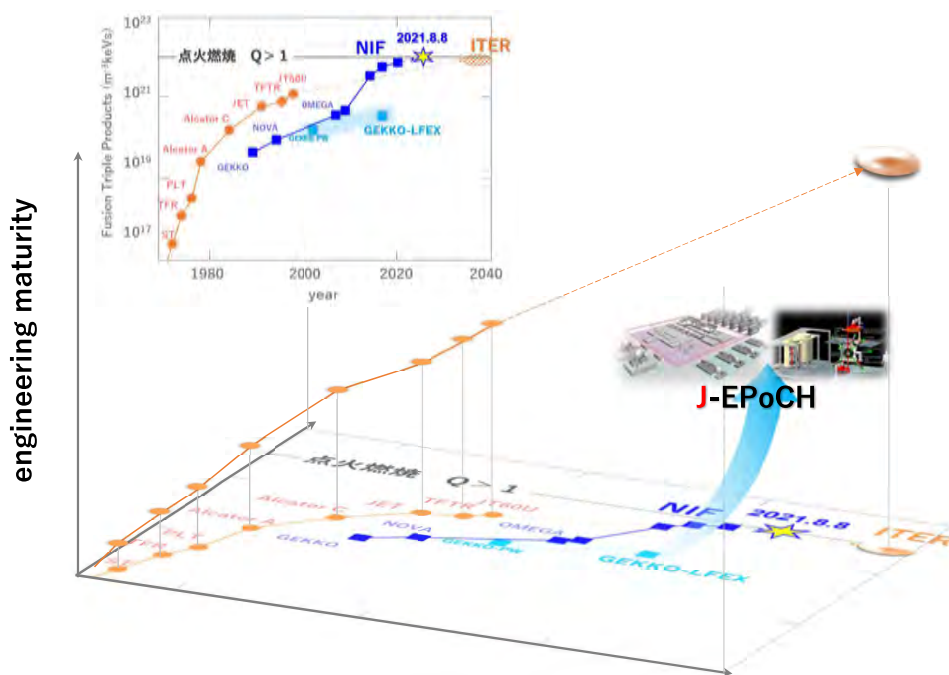
- エネルギー：温度×密度↑×体積↓
- 出力10万～100万KW中小型
- 電力量可変(繰り返し運転)

レーザー核融合が目指す状態と実現へのアプローチ

温度:5000万度~1億度 / 密度:1000倍の固体密度



核融合炉心プラズマ研究の現状と核融合エネルギー実現へ向けた今後の課題



米国においてレーザー核融合によるエネルギー増幅を実証

"This is a Wright Brothers moment" on 2021. 8.8



- 核融合燃焼物理に関する実験的研究の幕開け (プラズマ物理、宇宙物理学)
- エネルギーを取り出すための課題解決 (核融合エネルギー工学)
 - ・ 高利得核融合の実証
 - ・ 繰り返し核融合反応の実証と炉工学の取り組み

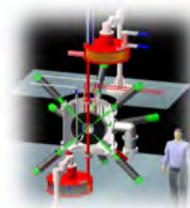
レーザー核融合研究は新たな段階へ

- 連続した核融合反応(20-200W)
- 定常な核融合出力(14-140W)

■ レーザー核融合炉工学の創始

- 未臨界核融合炉(ミニチュア炉)

発電原理実証: 数W-数10W
 水素発生(バイオマス)原理実証: 3-30g/h
 炉材料開発: $10^{13} \sim 10^{14}$ n/sec
 トリチウム増殖比: 7×10^{-6}
 磁場核融合ダイバーター熱負荷試験: 64 -640kW/m² @10cm



■ 炉心プラズマ物理学の深化 (データサイエンス)

- 加熱プラズマ物理の基礎
 複雑系の理解(レーザープラズマ相互作用)
 加熱プラズマの理解と予測
- 高密度プラズマ・流体不安定性の物理と応用
 不安定性回避の予測
 不安定性抑止手法の開発

- 核融合燃焼物理の開拓(LLNL-NIFとの連携:日本の窓口)
 効率的な核融合燃焼への知見
 宇宙における核融合燃焼現象の探究

繰り返し大型パワーレーザー J-EPoCH(10kJ/1-10Hz)

- 核融合プラズマに関するビッグデータ(1万倍)
- 計測精度の飛躍によるデータの高精度化

- LLNLにおける核融合燃焼の実現(2021)
- 日米科学技術協力協定(2019)

世界を先導する大型繰り返しレーザーで、 新たな学術領域:極限量子科学の開拓!

● 見えない真空を探査(真空の量子を探る)

- “時空の歪”をレーザーで探査
- レーザーとプラズマで“真空の揺らぎ”をとらえる



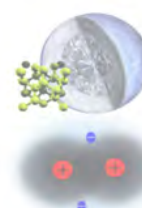
● エネルギーを産み出す(湯川力を解き放つ)

- プラズマサイエンスと“データサイエンス”との融合による最適化
- “レーザー核融合未臨界炉による水素製造と発電”の原理実証



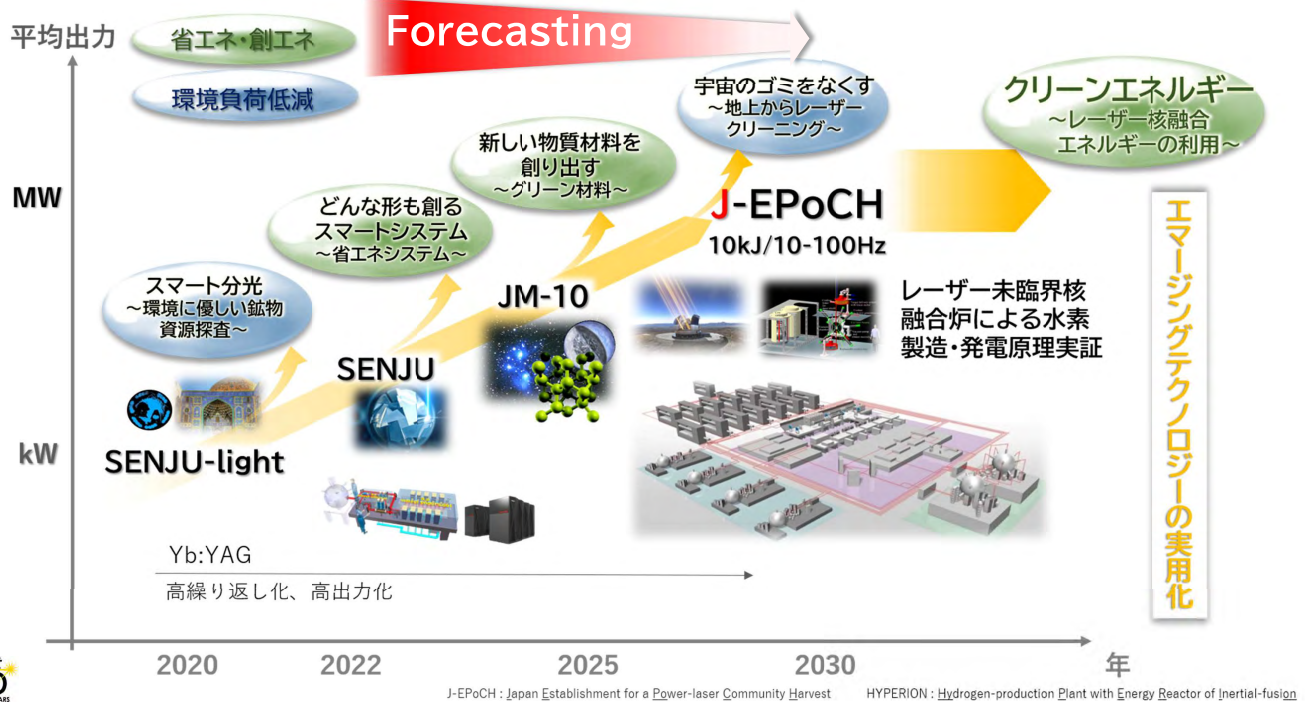
● 新物質材料を創り出す(第3の量子物質創生)

- 1億気圧で“超高压量子物質”を創生 ≪高精度パルス波形制御
- 1千万気圧で“新物質材料(グリーン材料)”を創成し、産業構造に変革をもたらす高压材料科学の創成

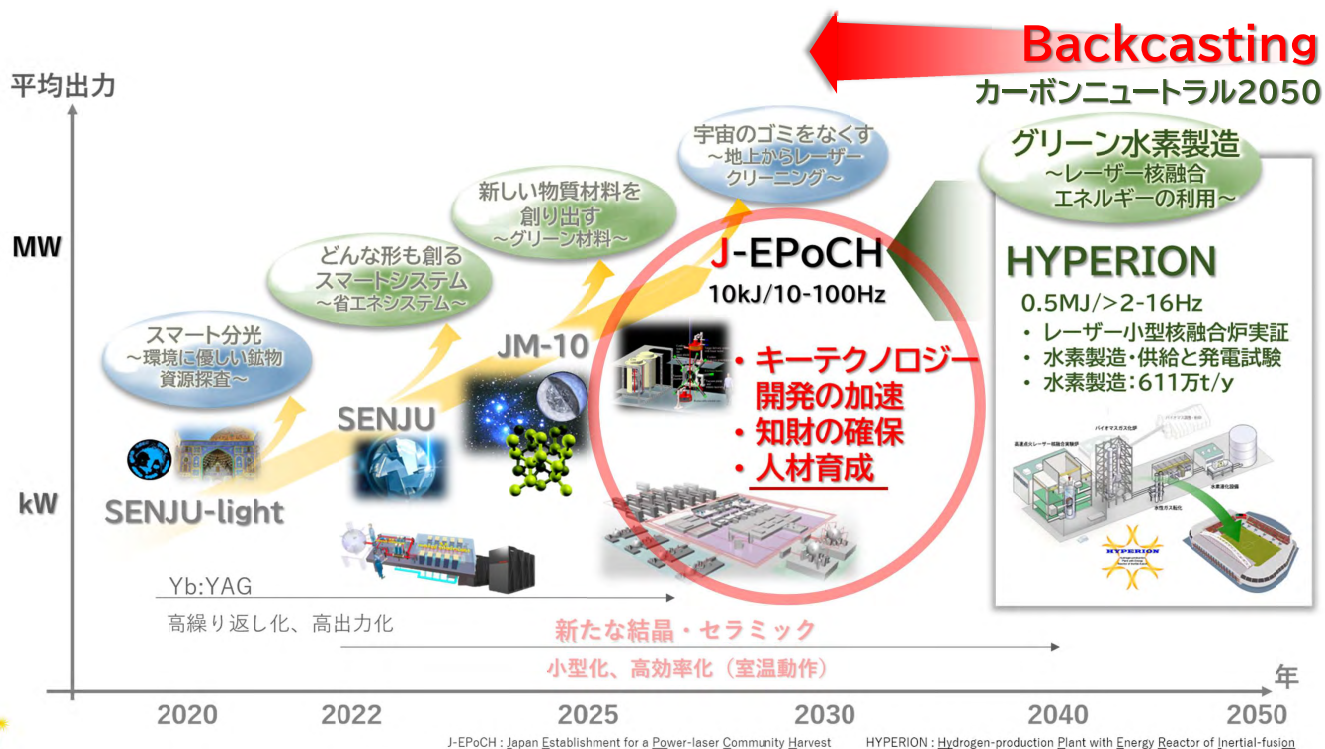


高平均出力(kW~MW)レーザーによるイノベーション創出

大型繰り返しレーザー技術は、新たな学術領域の開拓だけでなく様々なエマージングテクノロジーを創出

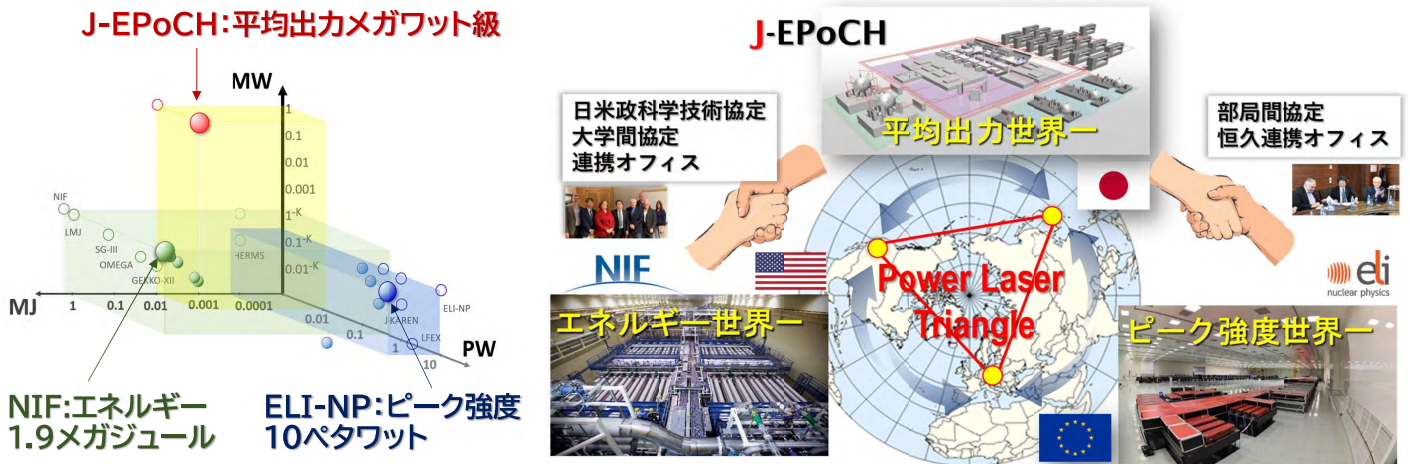


多様なステークホルダーのバックキャストによる課題の明確化



大型繰り返しレーザーの中核拠点が育むグローバル人材

- 世界から多様なステークホルダーが集まる学際研究環境
- 様々な応用と多くの利用機会を提供できる多ビーム・高繰り返し大型レーザーシステム
- 世界を先導できる欧米の中核拠点との連携(国際頭脳循環システム)



繰り返しパワーレーザーで変革する高エネルギー密度科学

エマージングテクノロジーの源泉(イノベーション)

超高耐力光学材料・デバイス、スマートレーザーシステム
 パワーレーザー応用(小型核融合炉、小型加速器、宇宙デブリ除去、新グリーン材料創生など)

- 人材育成に適した実験環境
- 科学的セレンディピティの可能性向上

(カーボンニュートラル)
社会課題
学術的価値
 (レーザー科学)

大型**繰り返し**
パワーレーザー

知の創造・学術の創成

従来の高エネルギー密度科学
 +
 物理インフォマティクス
 量子真空物理学
 超高压材料科学
 レーザー核融合炉工学
 など

先端キーテクノロジーの開発推進と統合

我が国の強み: 半導体レーザー、セラミック材料、光学薄膜
 我が国が推進すべき技術: IoT制御技術、AI技術、センサー技術

クリティカルテクノロジー保持力の強化



日本学術会議公開シンポジウム
 「将来のエネルギー科学技術に向けた パワーレーザーと 高エネルギー密度科学の役割と展望」
 2022年2月3日

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

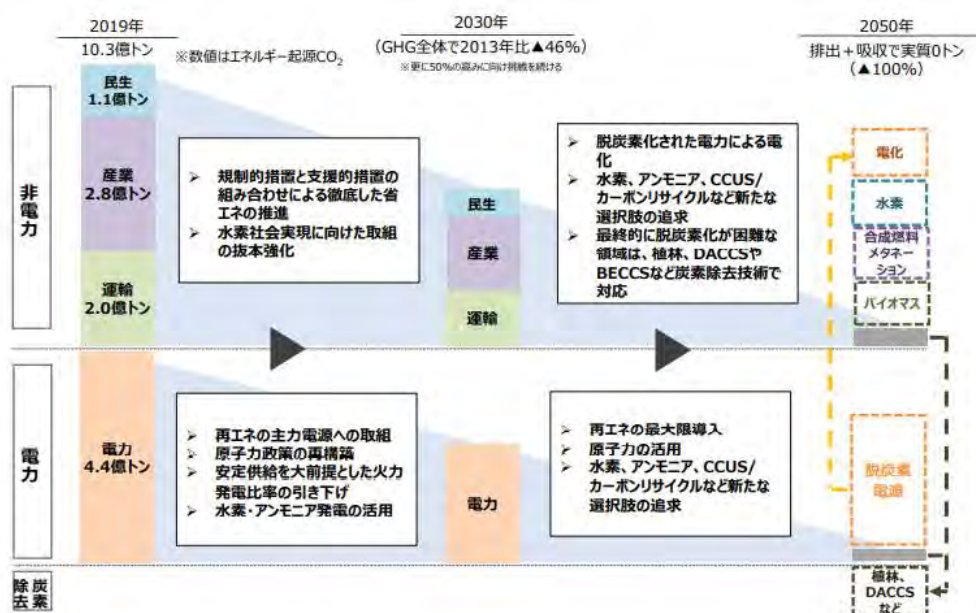


藤岡恵子

ファンクショナル・フルイッド

カーボンニュートラルへの道筋

- ・電力：非化石電源（再エネ、原子力）
- ・非電力：熱利用など（電化、水素、メタネーション、バイオマス）
- ・炭素除去：最終的なCO2排出分をオフセット（植林、DACCS）



出典：経産省他、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」2021年6月18日

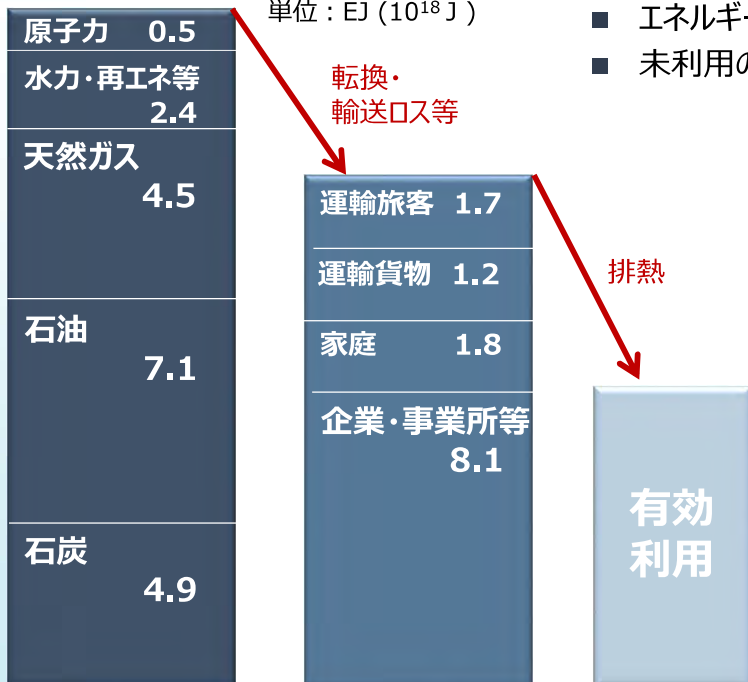
日本のエネルギーバランスフロー

一次エネルギー国内供給 最終エネルギー消費

19.1

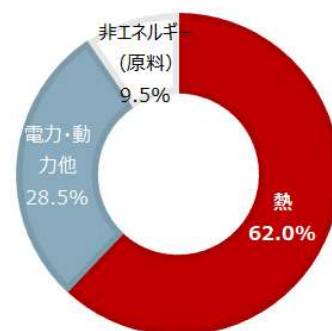
12.9

単位：EJ (10¹⁸J)



- 大量のエネルギーが排熱として廃棄されている
- エネルギー消費の用途としては熱利用が最大
- 未利用の再生可能エネルギー熱も大量にある

民生・産業部門の用途別エネルギー消費

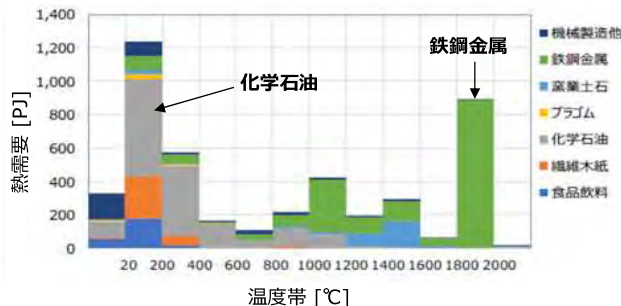
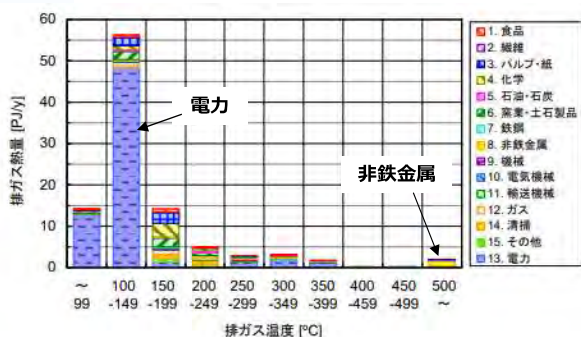


データ出典：資源エネルギー庁「エネルギー白書2021」

産業部門の業種別・温度別の排熱と熱需要

排ガス熱量の合計は743PJ/y
そのうち76%にあたる565PJ/yは200℃未満の排熱

熱需要は低温域から高温域まで多岐にわたる
低温域：食品飲料、繊維木紙
高温域：鉄鋼業、窯業土石



出典：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センター「産業分野の排熱実態調査報告書」2019年3月

出典：平成29年度新エネルギー等導入効果促進のための基礎調査、2021年1月27日第36回基本瀬策分科会資料

民生・家庭・業務部門のエネルギー需要の40%以上は100℃以下の熱（約2EJ）

カーボンニュートラルへの熱利用の寄与

第6次エネルギー基本計画 の省エネルギー目標

2030年度におけるエネルギー需給の見通しのポイント①

- 今回の見通しは、2030年度の新たな削減目標を踏まえ、徹底した省エネルギーや非化石エネルギーの拡大を進める上での需給両面における様々な課題の克服を野心的に想定した場合に、どのようなエネルギー需給の見通しとなるかを示すもの。
- 今回の野心的な見通しに向けた施策の実施に当たっては、安定供給に支障が出ることのないよう、施策の強度、実施のタイミングなどは十分考慮する必要がある。（例えば、非化石電源が十分に導入される前の段階で、直ちに化石電源の抑制策を講じることになれば、電力の安定供給に支障が生じかねない。）

		(2019年度 ⇒ 旧ミックス)	2030年度ミックス (野心的な見通し)						
省エネ		(1,655万kl ⇒ 5,030万kl)	6,200万kl						
最終エネルギー消費(省エネ前)		(35,000万kl ⇒ 37,700万kl)	35,000万kl						
電源構成 発電電力量: 10,650億kWh ⇒ 約9,340 億kWh程度	再エネ	(18% ⇒ 22~24%)	36~38%* ※現在取り組んでいる再生可能エネルギーの研究開発の成果の活用・実装が進んだ場合には、38%以上の高みを目指す。						
	水素・アンモニア	(0% ⇒ 0%)	1% (再エネの内訳)						
	原子力	(6% ⇒ 20~22%)	20~22%						
	LNG	(37% ⇒ 27%)	20%						
	石炭	(32% ⇒ 26%)	19%						
	石油等	(7% ⇒ 3%)	2%						
	太陽光 6.7% ⇒ 7.0%	風力 0.7% ⇒ 1.7%	地熱 0.3% ⇒ 1.0~1.1%	水力 7.8% ⇒ 8.8~9.2%	バイオマス 2.6% ⇒ 3.7~4.6%	太陽光 14~16%	風力 5%	地熱 1%	水力 11%
(+ 非エネルギー起源ガス・吸収源)			46% 更に50%の高みを目指す						
温室効果ガス削減割合		(14% ⇒ 26%)							

出典：資源エネルギー庁、「第6次エネルギー基本計画の概要」2021年10月

未利用熱の推定利用可能量

現在の技術を用いて回収・利用できる熱エネルギーは、工場排熱、ゴミ焼却排熱などの都市・産業排熱だけで年間に0.9~1.5 EJと見積もることができる。これは日本の年間一次エネルギー消費量約20 EJの5~8%に相当する。現在、地域熱供給事業者によって利用されている排熱量は0.03 EJで、利用可能量の1/200程度。

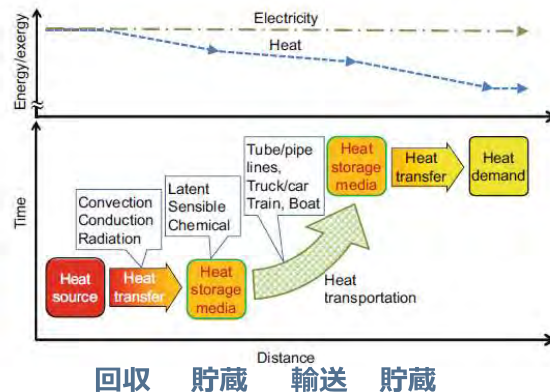
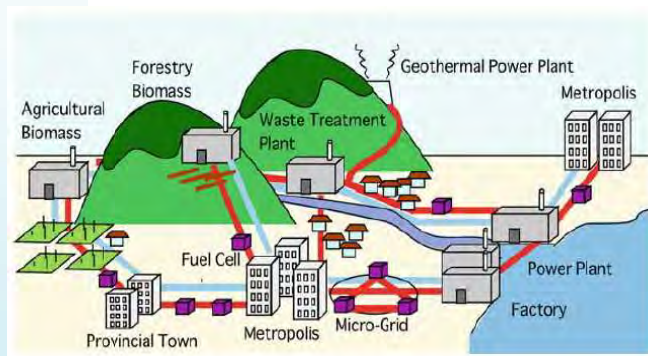
排熱の種類	利用システム	実用化レベル	利用可能量 [EJ/年]
工場排熱	工場排熱発電	△	0.40 ~ 1.03 (熱)
	熱回収ヒートポンプ	○	
都市排熱	熱回収ヒートポンプ	○	0.03 (熱)
ゴミ焼却排熱 (一般廃棄物処理場のみ)	ゴミ焼却発電	○	0.20 (熱)
	排熱空調・給湯システム	○	
	熱回収ヒートポンプ	○	
下水熱	汚泥焼却排熱発電	○	0.21 (熱)
	排熱空調・給湯システム	○	
	熱回収ヒートポンプ	○	

実用化レベル： ◎普及段階、○実用化段階、△実証試験段階、研究開発段階

エネルギーと科学技術に関する分科会「熱エネルギー利用の社会実装基盤小委員会報告書(2017)より
省エネルギーセンター「工場群の排熱実態調査」(2002)、経済産業省「未利用エネルギー面的活用熱供給導入促進ガイド」(2007)、
環境省「一般廃棄物処理事業実態調査」(2015) 矢野経済研究所「未利用熱エネルギーの事業化可能性調査」(2016)など先行研究より木村誠一郎委員が算出

熱エネルギー利用の課題

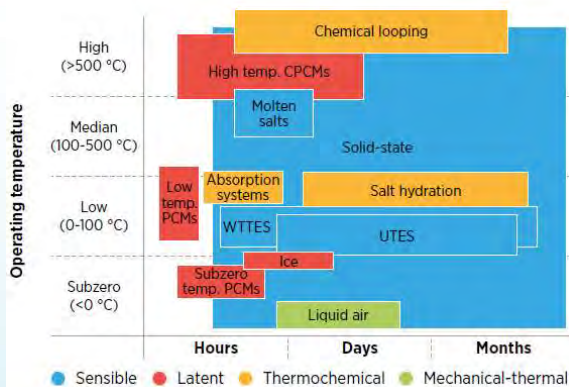
- 需要/供給間の、空間的・時間的・質的な違い
- 経済性－熱は安い
- インフラの未整備
- 電力に比べて政策的な位置づけ・支援が未整備
- 熱機利用機器の性能向上
- 熱移動、熱輸送に関わる機器や材料の開発・性能向上
- 熱利用システムの普及
- 新たな用途の開発



図出典：Y. Kato et al. "Energy Technology Roadmaps of Japan", Springer(2016)

蓄熱技術

蓄熱技術の現段階

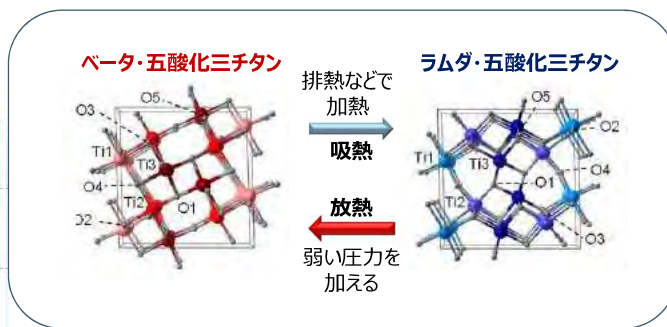


出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020

顕熱：水、熔融塩、煉瓦、岩石、躯体

潜熱：氷、パラフィン、無機塩、エリスリトール

熱化学：臭化リチウム（吸収）、ゼオライト（吸着）、塩化カルシム（ケミカル）

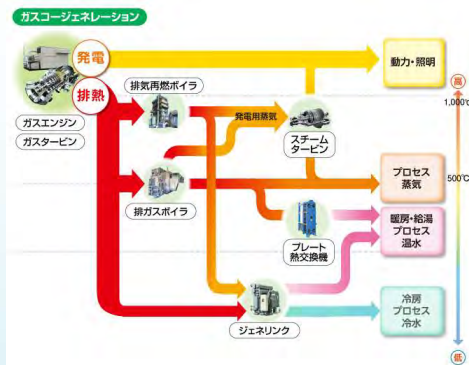


- 全固体蓄熱材
 - ・弱い加圧によって放熱するセラミック蓄熱材（東大・大越慎一）
 - ・固体相変化材を金属を分散させた蓄熱材（産総研）
 - ・固体相変化材をガラスと複合化した蓄熱材（東北大・藤原巧）

放熱なく長期保存が可能
液-固変化がなく利便性が向上
早い応答

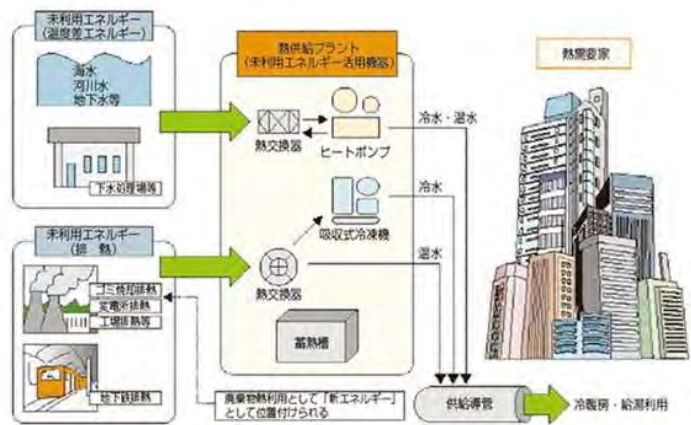
熱利用システム

個別利用者での熱のカスケード利用



出典：大阪ガスホームページ
<https://ene.osakagas.co.jp/product/cogeneration/gas-cogeneration/whats.html>

熱の面的利用：企業間・エリアでの熱利用

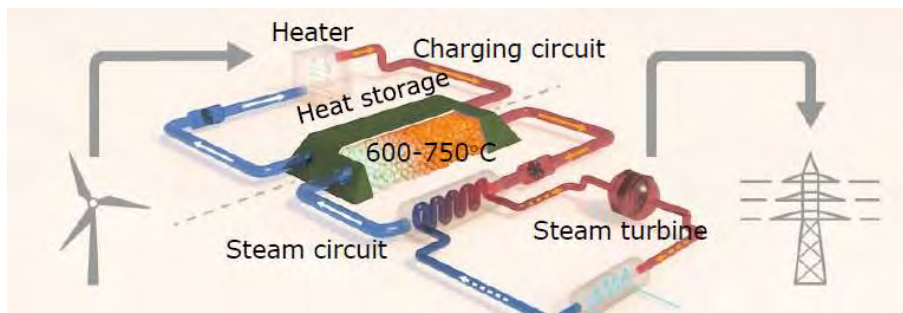


出典：資源エネルギー庁「エネルギー白書2021」

地域熱供給、コンビナートの熱利用

社会実装が期待される熱利用システム – 蓄熱発電

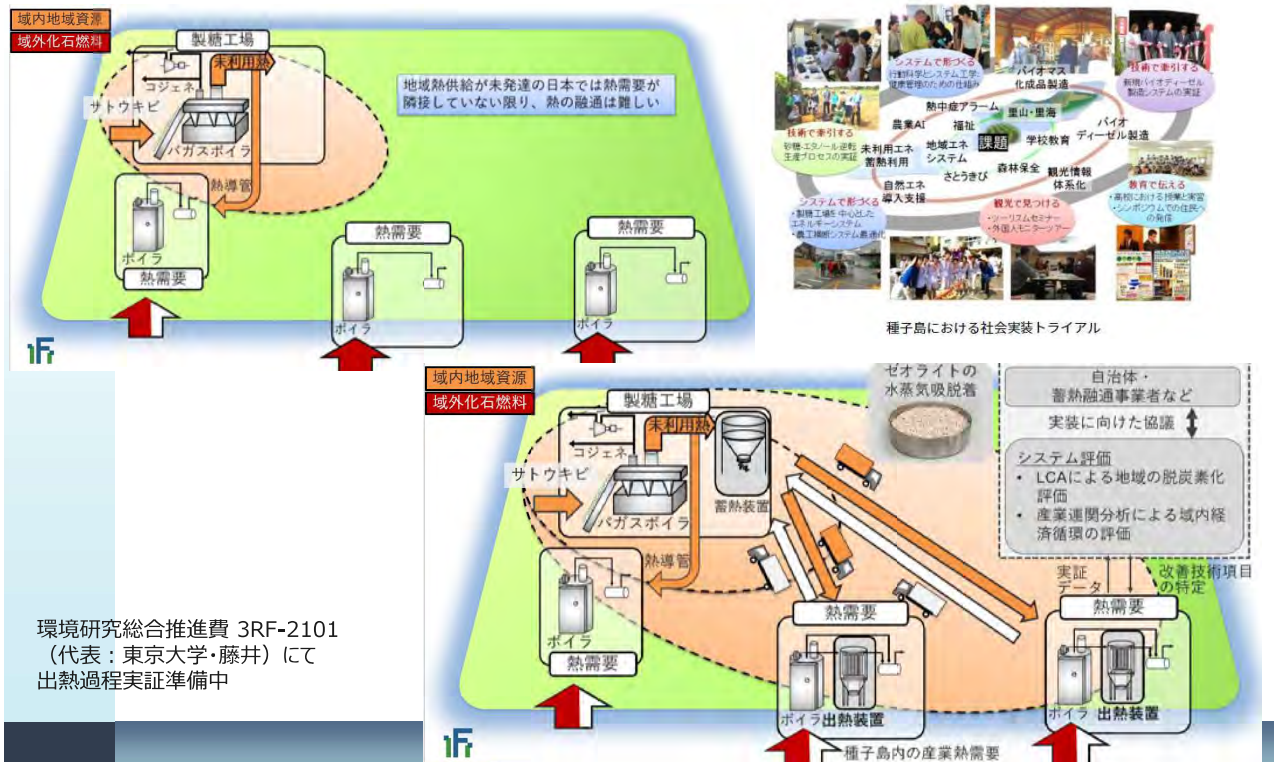
- 再生可能エネルギーの電力を熱にして蓄え、需要時に発電し、再エネ電力を平準化する。
- 稼働停止した石炭火力などの設備（タービン）を使える。
- 蓄電池より安価で、長期貯蔵できるのが利点、ただし応答性は低い。
- ヨーロッパ、アメリカで多くの実証プラントが運営中で、2024年に商用大規模設備が稼働する予定。



出典：Siemens社ホームページ

社会実装が期待される熱利用システム – 地域との共生

未利用熱融通の時空間的拡充による地域資源の有効利用
(種子島・サトウキビ製糖工場未利用熱の事例)



熱エネルギー利用拡大のために

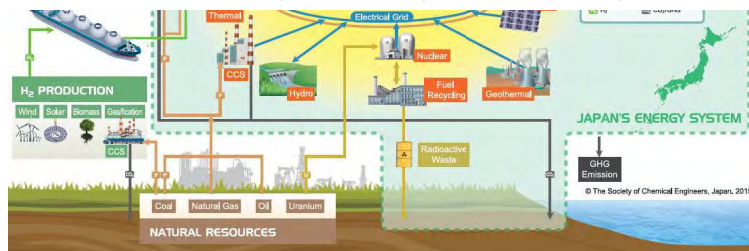
- 蓄熱・熱輸送技術、熱利用装置の性能向上
- 熱を効果的に利用できるシステム
- 熱エネルギー需要と供給についての情報
- 政策的支援、長期計画
- 技術にとどまらない、未来のエネルギー社会のビジョン創成と共有

ヨーロッパの熱分野戦略

EU, "An EU Strategy on Heating and Cooling", 2016

英国, "Future of Heating; a strategic framework for low carbon heat in the UK", 2012

"The Future of Heating; meeting the challenge", 2013



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

(国研)量子科学技術研究開発機構
量子ビーム科学部門 関西光科学研究所
河内 哲哉



量子ビームとは

「量子ビーム」という言葉は1990年代から使われ始め、国の施策では2005年の原子力政策大綱で初出：「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きた。」

主要な分野における研究例及び実用例等

●福島対応の例

- ・セシウム捕集材の開発

●科学・技術・学術分野の例

- ・量子ビームを用いた研究
- ・ナノテクノロジー
- ・高温超伝導材料の研究開発
- ・RIを利用したトレーサー研究など



大強度陽子加速器施設J-PARC

(出典)日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構

●工業分野の例

- ・精密計測
- ・非破壊検査
- ・材料の改良
- ・半導体素子の加工プロセス
- ・自動車タイヤ等の部品製造など

●医療分野の例

- ・イメージング (X線CT、PETなど)
- ・放射線治療 (X線、電子線、γ線、中性子線、陽子線、重粒子線など)
- ・医療用具の滅菌
- ・RIの製造 など



CT機能とPET機能を有するPET-CT装置

(出典)原子力委員会 新計画策定会議 資料

●農業分野の例

- ・品種改良 (花・米の新品種の開発)
- ・害虫防除 (不妊虫放飼法による害虫防除)
- ・食品照射 (ばれいしょの発芽防止) など



パステル調の花色のオステオスペルマムの新品種

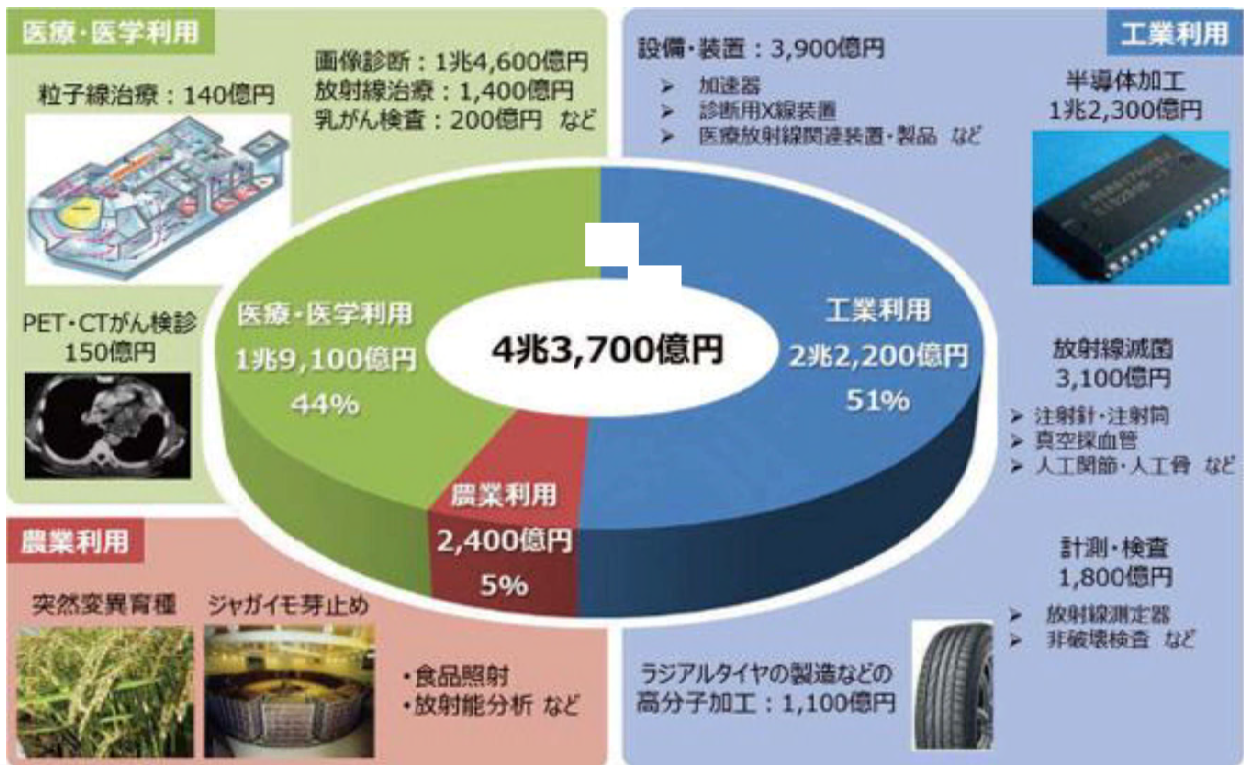
(出典)日本原子力研究開発機構

●環境・資源分野の例

- ・窒素酸化物、硫酸酸化物等の分解、除去
- ・ダイオキシンの要因となる揮発性有機化合物の分解など

新大綱策定会議(第1回)資料第5号 平成22年12月21日

量子ビームの利用：放射線利用の経済規模（2018）



出典：平成30年度版 原子力白書



レーザー駆動量子ビームの可能性

レーザー加速：放射線利用のキーテクノロジーである加速器の小型化

- レーザー加速による電子やイオン、加速粒子を用いた中性子、ミュオン、RI等の生成
レーザー駆動のX線、ガンマ線
- X線と中性子の相補的利用のような「マルチビーム利用」が容易
- 学術研究の観点：未踏の高エネルギー領域の加速器の実現
レーザーの集光強度の高さによる高強度場科学

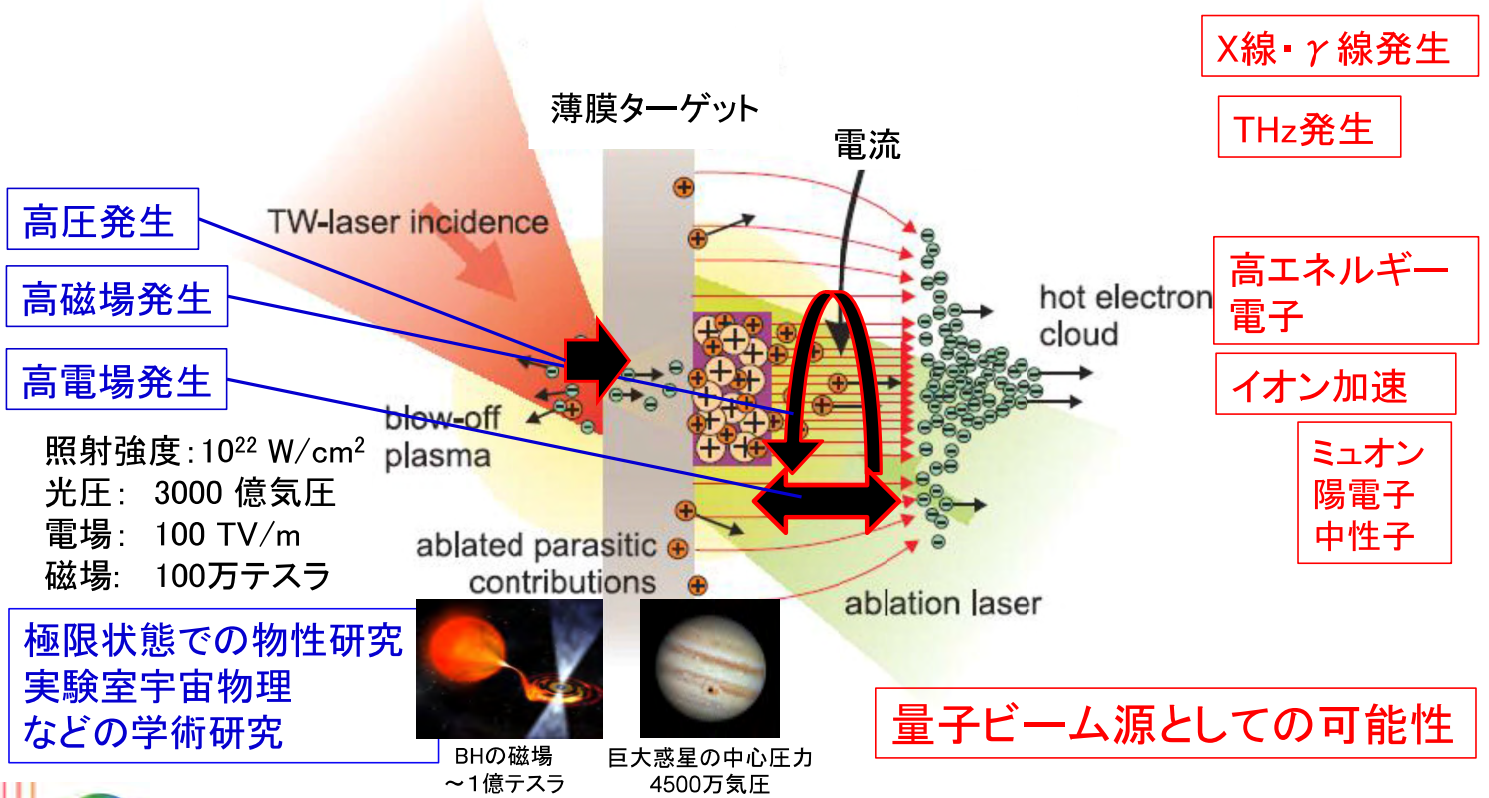
➡ 加速器の可搬化、低コスト化 → **新しい量子ビーム利用の創出**

レーザー駆動量子ビームの課題

- 安定性の向上（レーザー及び量子ビームの）
- 平均出力の向上
- レーザーのコスト問題の解決等



高強度レーザーと物質の相互作用



レーザー駆動量子ビームの利用



世界の主な高強度フェムト秒レーザー施設

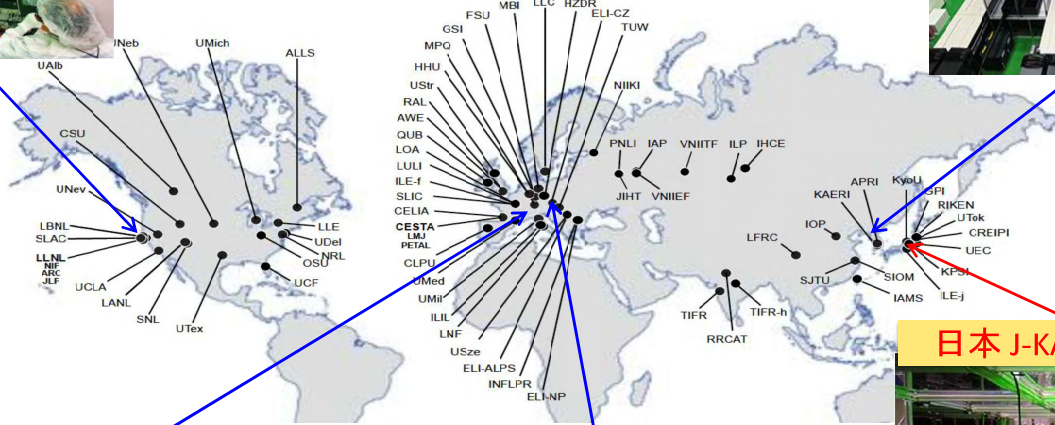
米国 BELLA laser



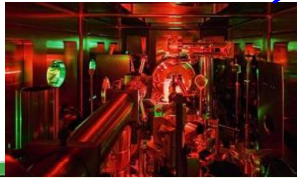
韓国 GIST 4PW Laser



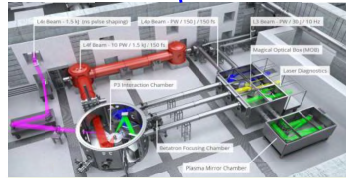
World's ICUIL World Map of Ultrahigh Intensity Laser Capabilities



日本 J-KAREN-P Laser



独 国 DRACO Laser



欧州(EU) ELI

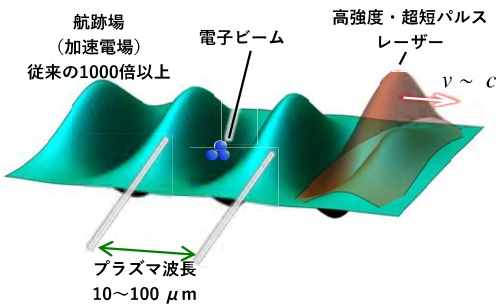


レーザー加速手法と、原理実証に関する最近の成果

電子の場合

レーザーがプラズマを通過する際に生じるプラズマの波（航跡場）を利用。

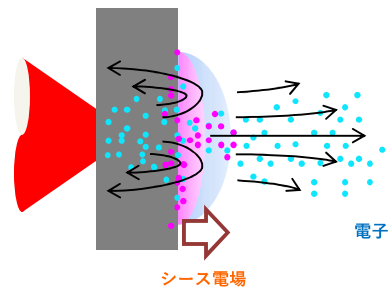
Tajima & Dawson(1979)



典型的には $10\text{-}100\text{GeV/m} = 10^{4-5} \text{ MeV/m}$

イオンの場合

レーザーの薄膜照射時に裏面に生じる電荷分離状態（シース電場）を利用。



典型的には $\text{MeV}/\mu\text{m} = 10^{7-8} \text{ MeV/m}$
(既存RF加速器の加速勾配： 100MeV/m)

加速長20cmで8GeVの電子の発生(米国)
A. J. Gonsalves et al., PRL (2019).

レーザー加速電子からFEL信号を観測(中国)
W. Wang et al., Nature (2021).

94MeVまでの陽子加速を確認 (英国)
Higginson et al., Nature Commun, (2018)

$8 \times 10^7 \text{ MeV/m}$ の静電場発生を確認 (日本)
Nishiuchi et al., Phys. Rev. Res., (2020)



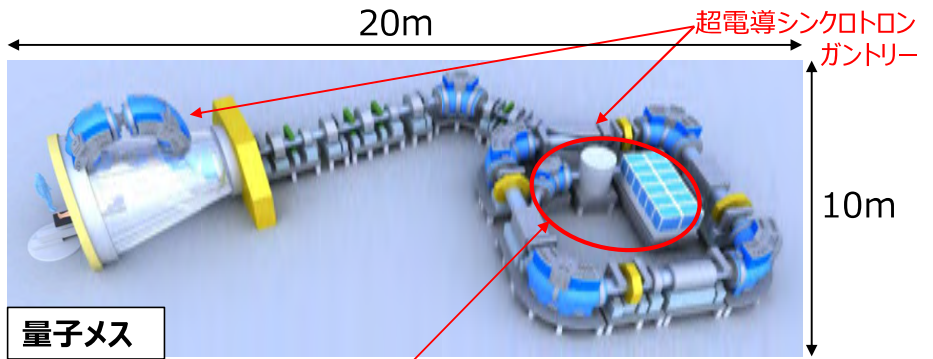
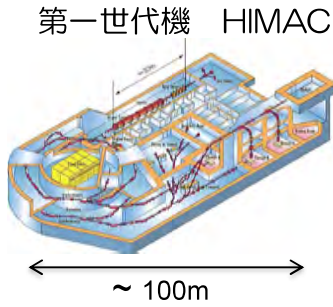
例：医療応用に向けたレーザーイオン加速器開発：量子メス

量子メスプロジェクト：

がん死ゼロ健康長寿社会実現に資する重粒子線がん治療装置の大幅な小型化をめざす。

- ・超電導技術を用いた小型サイクロトロン
- ・レーザー加速によるイオンビーム入射器

量子メス（第5世代量子線がん治療装置）



H28.12に量子メス実現に向けた、重電メーカーとQSTの間で研究開発包括協定を締結



レーザーイオン入射器

要求性能
 10^7 C⁶⁺ ions
@4MeV/u/mSr/sec

→ ~10J, ~100Hz, で
高安定に稼働する
フェムト秒レーザーが必要

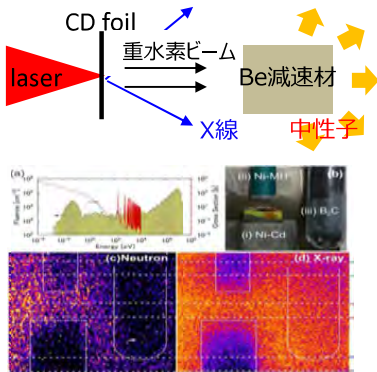
世界初のレーザー加速器、健康長寿社会実現に向けた貢献



例：非破壊検査に向けた応用

中性子線発生

レーザー加速重水素ビームとBeを衝突

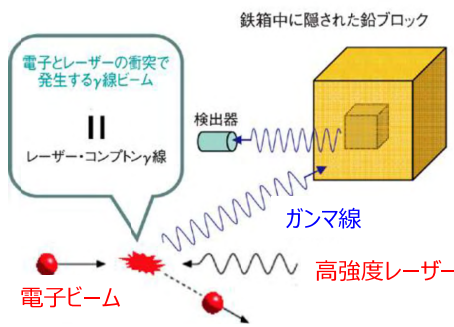


蓄電池内部の透過像をX線と中性子線の相補利用により取得

A. Yogo et al. APL (2021)

ガンマ線発生

レーザー加速電子とレーザーの衝突による逆コンプトンガンマ線発生

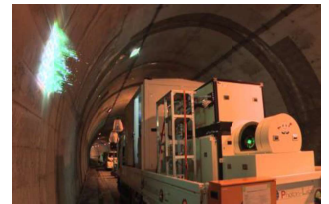


核共鳴蛍光散乱法により、遮蔽容器内部の物質の検出の実証

C.T. Angel et al. NIM-B (2014)

レーザー

レーザーによるコンクリート内部の遠隔センシング技術



レーザー打音法によるトンネル内部欠陥検査技術を実用化 (R3.国交省技術カタログ掲載)



250W 車載用レーザー 5J, 50Hz (1.8mx0.8m)

N. Hasegawa et al. 計測と制御 (2021)

将来の安全安心な社会実現への貢献

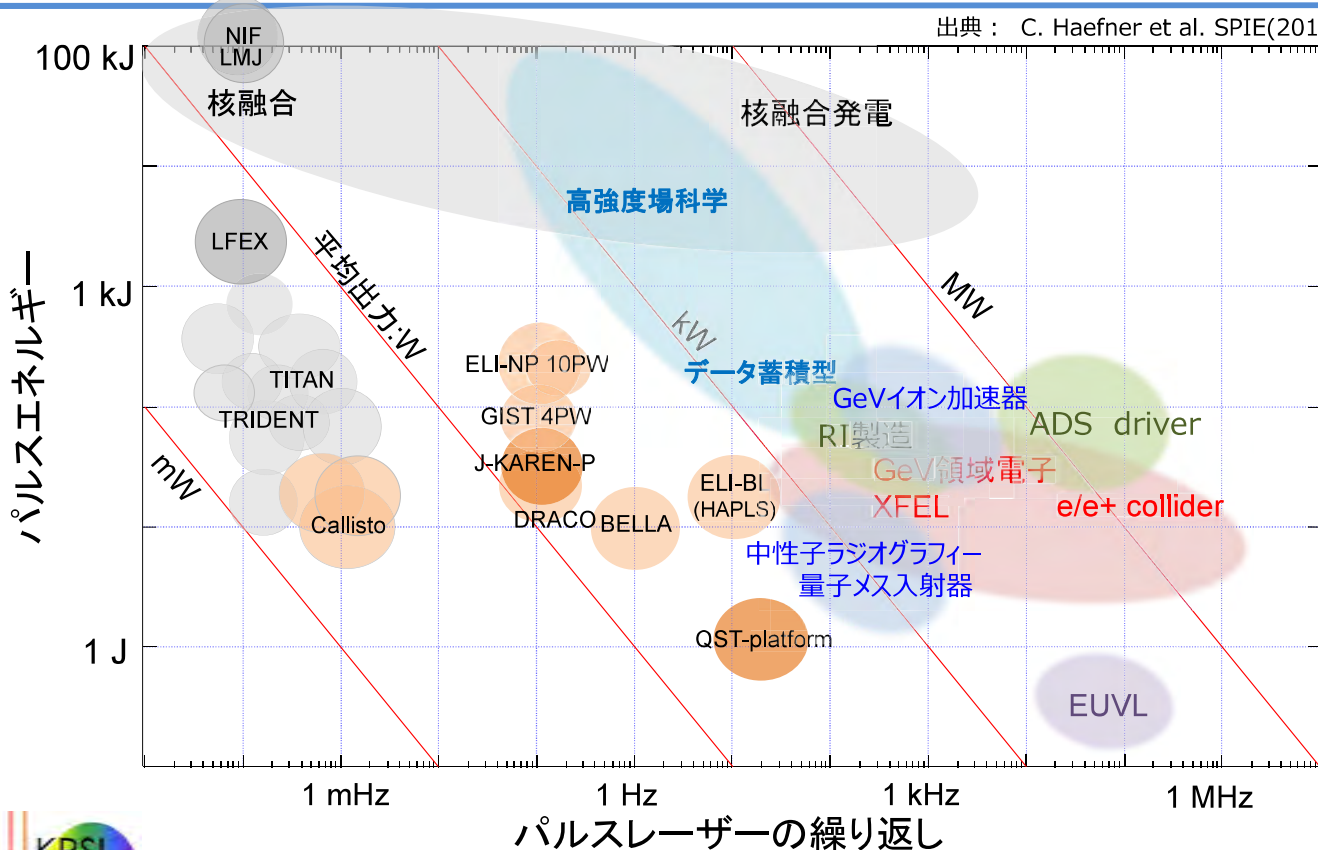
社会インフラのアセットマネジメント



レーザー駆動量子ビームの実用化に向けたパワーレーザー性能

いくつかの応用が、フェムト秒レーザーの高繰り返し化で実用化研究のフェーズに入る

出典： C. Haefner et al. SPIE(2017)を一部改訂

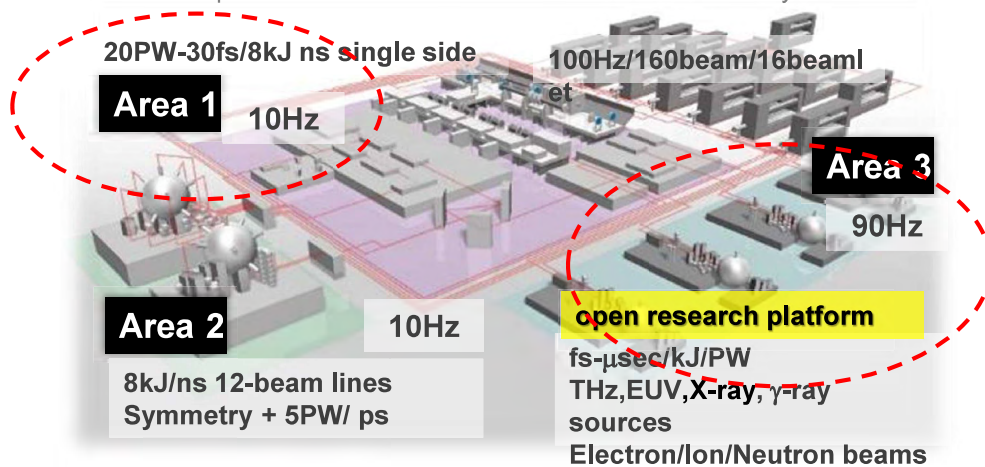


大型レーザー施設への期待

レーザー駆動量子ビームの応用の観点から期待すること：

- ・ 高強度レーザーの高安定・高繰り返し化技術の継続的な底上げ
- ・ 量子ビームの新しい産業・学術応用に向けた様々な分野の方が集う場

J-EPoCH: Japan Establishment for a Power-laser Community Harvest



マスタープラン2020への提案
「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」より



まとめ

- 1) 高強度レーザーは、従来の加速器の大幅な小型化する可能性を持っており、
 - ・加速器の可搬化、低コスト化等による従来の量子ビーム利用の拡大
 - ・マルチビーム利用を含む、新しい量子ビーム利用の開拓、などが期待される。

- 2) 大きな課題としては、安定に高い平均出力を出せるレーザー技術の確立であり、その技術を継続的に底上げできるような、大型レーザー施設建設が望まれる。

- 3) 量子ビーム応用の観点からは、医療用イオン加速器や中性子非破壊検査技術等、あと少しのレーザー性能向上で、実用化フェーズに入る技術がある。
これらのショートの技術課題を着実に解決したうえで、より高度なレーザー性能を必要とする量子ビーム発生・応用・実用化に進んでいくことが望まれる。

エネルギー最適化に向けた東芝の取り組み

TOSHIBA

落合 誠

エネルギーシステム技術開発センター

東芝エネルギーシステムズ株式会社

2022.2.3

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

Contents

- 01 組織紹介
- 02 カーボンニュートラル実現への取り組み
- 03 レジリエンス向上への取り組み
- 04 Quality of Life (QoL) 向上への取り組み
- 05 まとめ

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

01

組織紹介



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

組織体制

株式会社 東芝

東芝インフラシステムズ株式会社

東芝デバイス&ストレージ株式会社

東芝デジタルソリューションズ株式会社

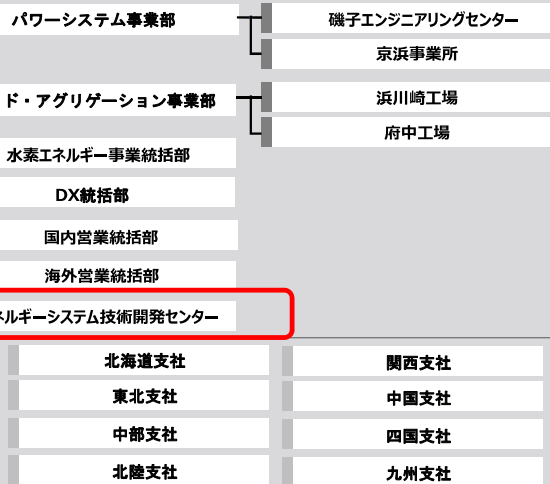
東芝エネルギーシステムズ株式会社

2021年10月1日現在



東芝エネルギーシステムズ
代表取締役社長

小西 崇夫 (こにし たかお)



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

事業領域

・ デジタルトランスフォーメーションで、よりスマートなエネルギー社会に貢献

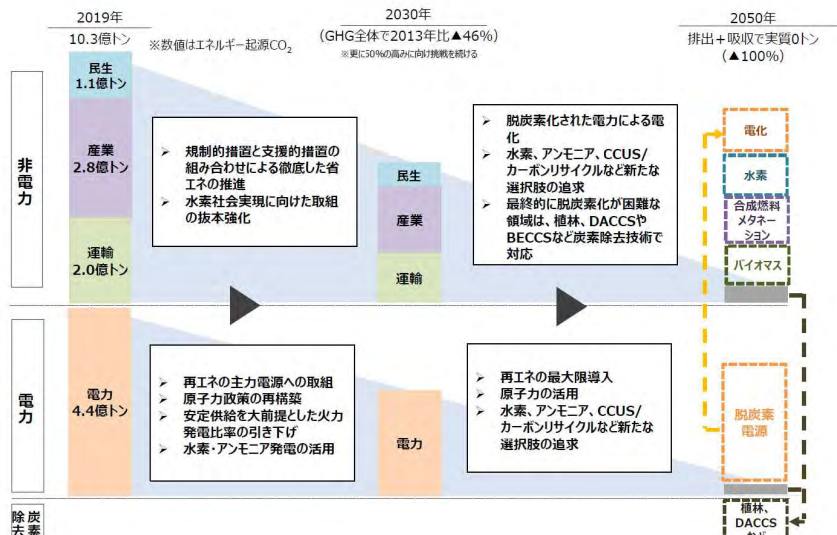
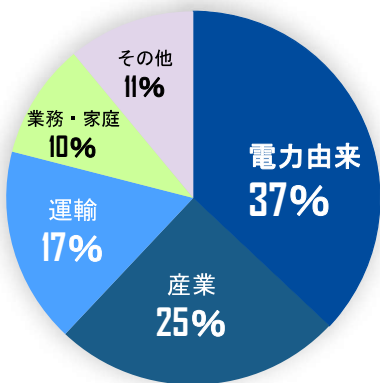


© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

CO₂排出の現状と2050年へのグリーン成長戦略

電力由来CO₂削減への取り組みはグリーン成長の柱のひとつ
東芝グループの保有技術と最新の研究成果で貢献し続ける

【CO₂部門別排出割合】



出典：経済産業省 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」をもとに再作図

出典：経済産業省 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

02

カーボンニュートラル実現への取り組み



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

東芝グループのエネルギーソリューション

つくる	おくる	ためる	かしこくつかう
陸上・洋上風力 コンポーネント 製造販売、O&M 風況解析 ソリューションサービス	系統制御システム、VPP 需給調整・マッチングサービス 研究開発、設計  自然由来ガス GIS/GIT 開発設計、販売 直流送電 (HVDC) 省エネ半導体 IEGT素子 開発設計、販売	水素製造 P2G 太陽光で水素製造	CO2資源化 P2C /CCU CO2電解技術 ジェット燃料
太陽光 メガソーラー建設、 システム開発 電池モジュール ヘロプスカイト タンデム		水素ステーション 貯蔵技術	グリーンモビリティ 鉄道・船舶 FC化技術
水力/ 地熱/ 原子力		蓄電池SCiB™	エネルギーシステム エネルギーマネジメン ト・マッチング
CO2分離回収 / CCS プラント建設、 システム開発 吸収素材の研究開発		蓄エネルギーシステム	

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

03

レジリエンス向上への取り組み

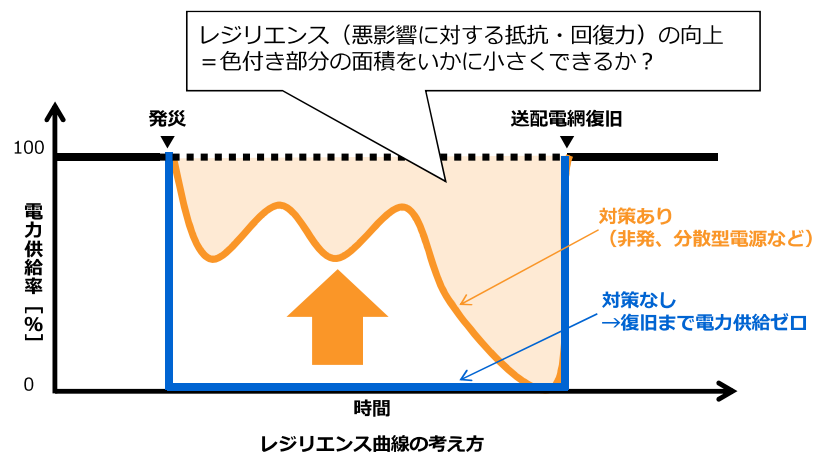
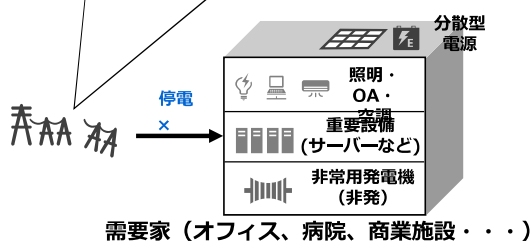
～カーボンニュートラルと同時に満足すべき、もう一つの価値～

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

エネルギー（停電）に対するレジリエンスの評価

停電時対策としての分散型電源の付加価値を算定

- ・ 2018年北海道胆振東部地震、2019年台風15号など、災害時の停電リスクが顕在化
- ・ 太陽光発電、蓄電池などの分散型電源は、停電時にも需要家へ電気を供給可能
→停電に対するレジリエンス向上を付加価値として評価する手法を開発中



写真の出典：資源エネルギー庁ホームページ

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

04

Quality of Life向上への取り組み

～エネルギーの、より有効な活用を目指して～



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

東芝の重粒子線治療装置

1994
QST/HIMAC-PJ
臨床試験開始

- 世界初の重粒子線治療装置プロジェクト

2011, 2016
QST病院新治療棟治療開始、回転ガントリー

- スキャンシステム
- 治療システム
- 超伝導回転ガントリー

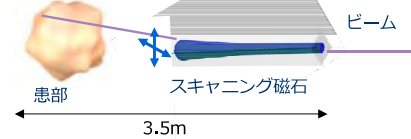
2015
神奈川県立がんセンター治療開始

- 重粒子フルシステム
- 4室スキャンシステム

2021
山形大学治療開始

- 新型スキャン照射システム
- 次世代小型超伝導回転ガントリー

新型スキャン照射システム



2軸走査の電磁石を採用

東芝はRF空洞、真空排気系、ビーム輸送系電磁石を担当



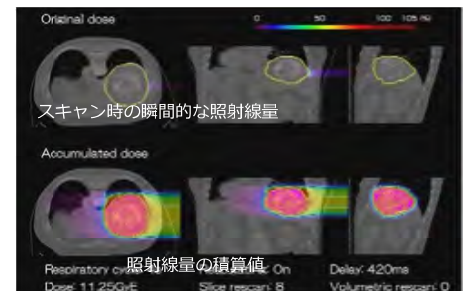
By Courtesy of QST



By courtesy of Kanagawa Cancer Center



By courtesy of Yamagata University Hospital



By Courtesy of QST

重粒子線がん治療の普及に向け30年以上技術開発を継続

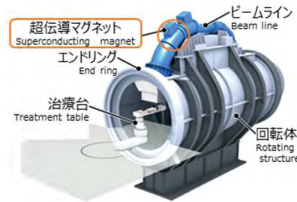
© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

がんを切らずに重粒子線で治す：超電導技術

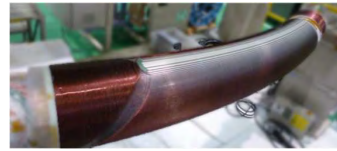
超伝導技術で重粒子線治療装置の小型化を実現



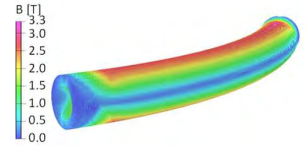
Courtesy of QST



超伝導回転ガントリー



超伝導コイル

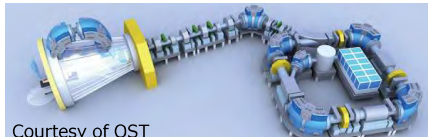


超伝導コイルの磁場解析

次世代に向けた小型化

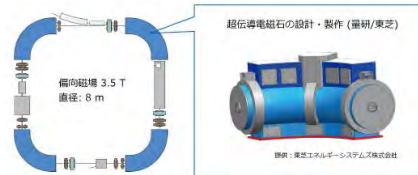
量子メスプロジェクト(QST)に参画

レーザー加速入射器と超伝導シンクロトロンの小型システム



Courtesy of QST
<https://www.qst.go.jp/site/qst-kakushin/39695.html>

シンクロトロン用超伝導電磁石

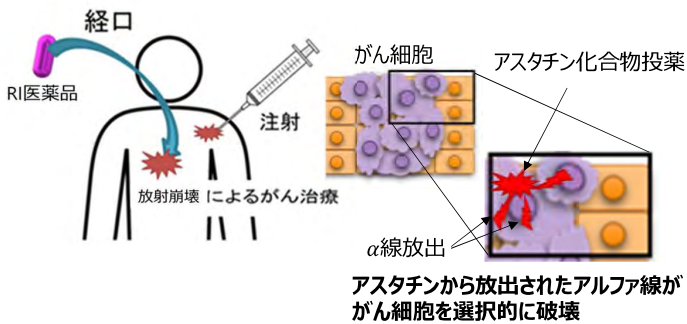


超伝導電磁石の設計・製作 (審研/東芝)

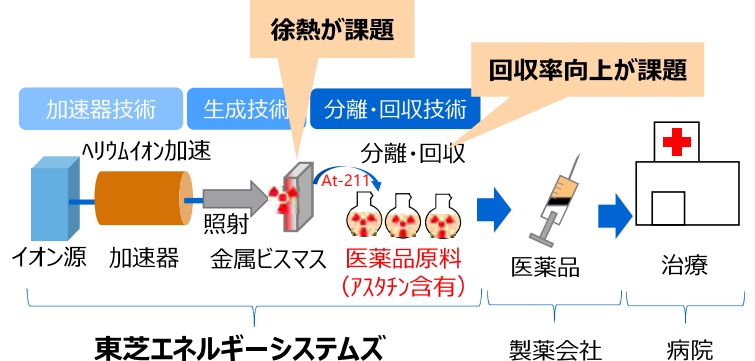
© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

がんを切らずにアルファ線で治す：アスタチン

大電流加速器・核種生成最適化・素早い核種分離を用いたアスタチン (^{211}At) 量産化



アスタチンから放出されたアルファ線ががん細胞を選択的に破壊



東芝エネルギーシステムズ

製薬会社

病院

アスタチン量産化技術を通じ、

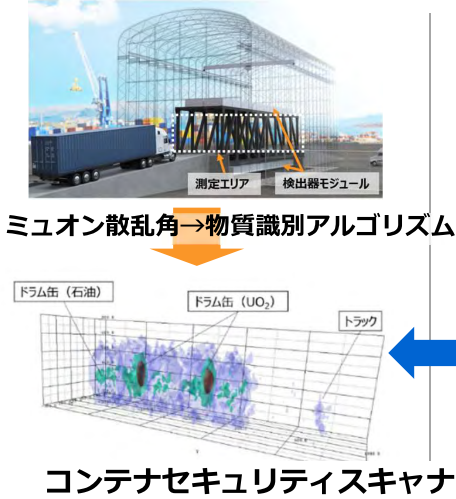
アルファ核種を用いたがん治療の普及に貢献

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

社会の安全と安心に貢献するミュオンイメージング

宇宙線ミュオンによる物質内部の透視・診断技術で安心安全な社会の実現

コンテナ内の密輸物質を透視



宇宙線ミュオン(μ)

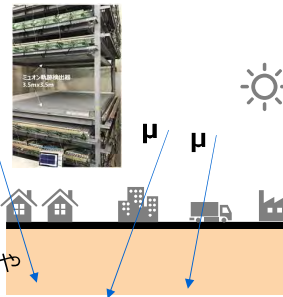
上空から降り注ぐ宇宙線の一種 μ

透過力が高く、建物や地中を貫通する

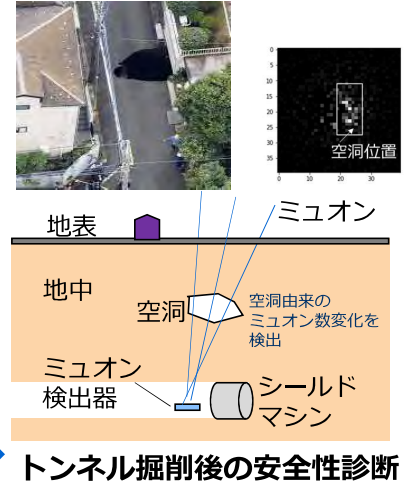
宇宙線ミュオンを測定することで見えるもの

ミュオンの「散乱角」(軌跡変化)を測定
→ 遮蔽体内部の物質の種類を特定可能 (元素分析)

ミュオンの「数」を測定
→ 巨大建造物の物質の密度分布が分かる



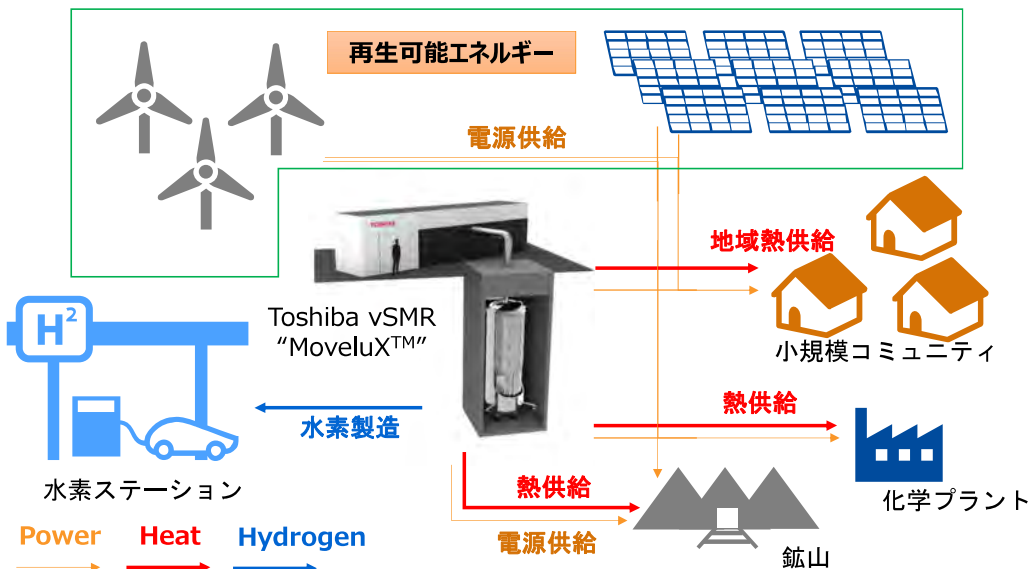
地盤の異常 (空洞等) を検知



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

多様なエネルギーニーズに応えるマイクロリアクター

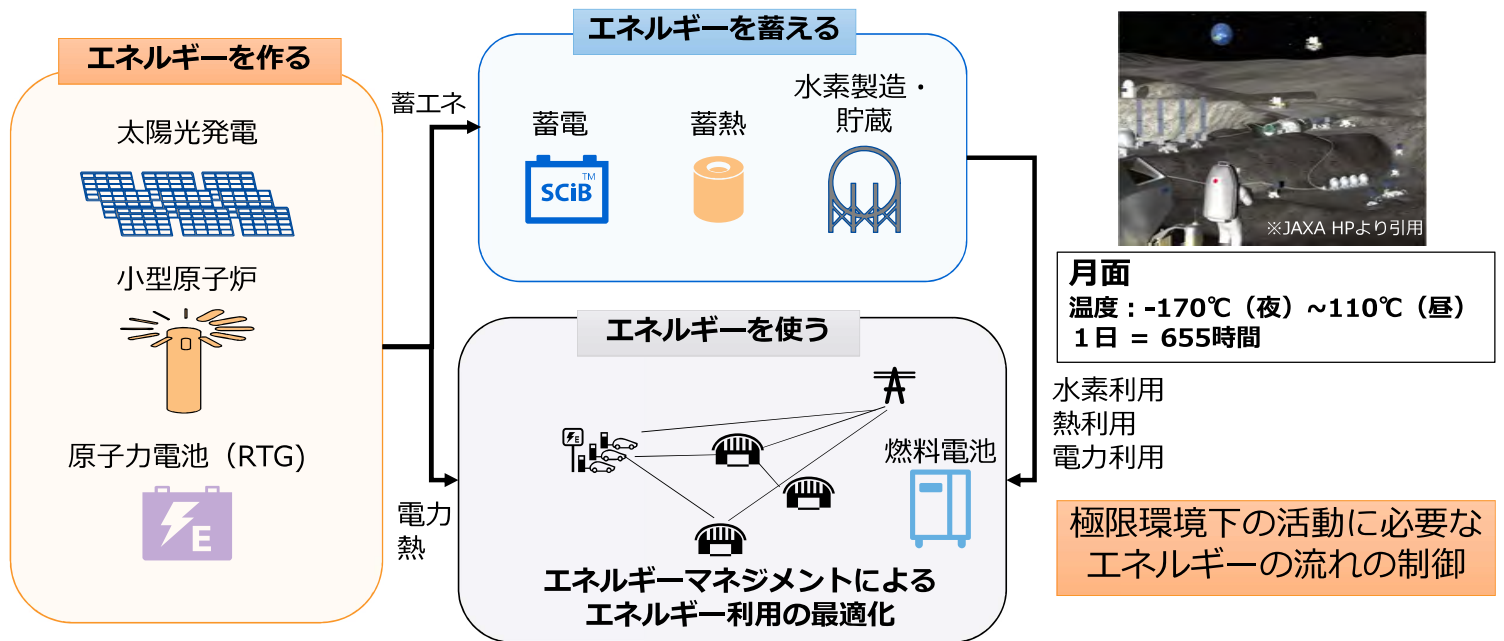
ヒートパイプ冷却による受動的除熱・熱電供給など多目的な小型炉



項目	内容・値
減速材	水素化カルシウム (CaH ₂)
炉心冷却	ヒートパイプ
炉心熱出力 (電気出力)	10 MW (3.2MW)
ヒートパイプ内部温度	700 °C
炉心圧力	常圧
燃料/最高濃縮度	シリサイド燃料 /4.99 wt%
原子炉容器直径/高さ	2.0 m/5.0m (熱交換器込)
運転期間	20年 (燃料交換無)

© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

将来に向けて：宇宙開発におけるエネルギーマネジメント検討



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

レーザ超音波による非接触での材料欠陥検査

マイクロチップレーザを活用、ユビキタスな検査・計測システムを開発

レーザ超音波法
2種のレーザにより超音波を送受信
欠陥を検出

パルスレーザ (送信)
レーザ干渉計 (受信)
超音波励起
微小振動計測
欠陥

遠隔・非接触での超音波計測が可能

- ・高温製造物の施工中検査
- ・原子力プラントなど高放射線環境
- ・狭隘部などアクセス困難な対象の検査

従来システム

- ・装置サイズ大 (製造中検査向け、据置き型)
- ・高価格
- ・測定対象により受光量変動

適用先が限定

開発システム

マイクロチップレーザを活用
モバイル化・低価格化

省人化システムへ搭載

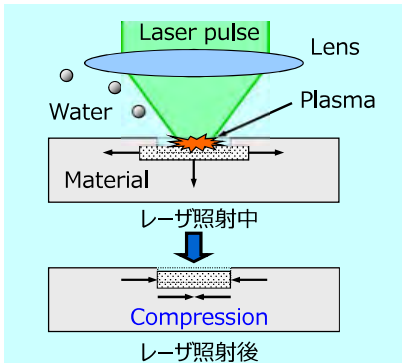
ドローン / 風車 / 工場 / 建物 / ロボット

適用先の拡大

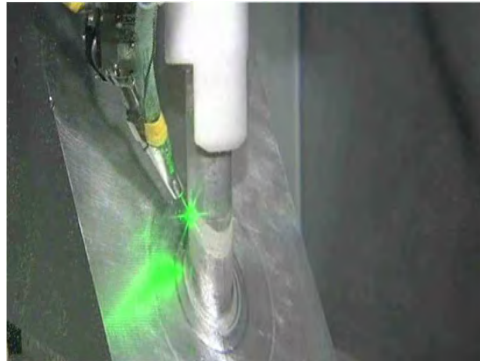
© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

レーザーピーニングによる材料強化

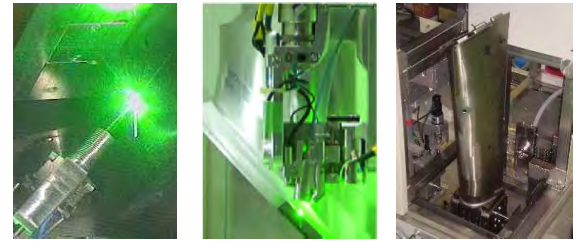
応力腐食割れ予防や疲労強度改善など、プラント構造材を改質・改善



概念図



レーザーピーニング施工状況（動画）



原子カプラントへの適用実績

- 短パルスレーザーにより材料表面を叩き、表面に加工硬化層や圧縮残留応力を付与
- 原子カプラントの応力腐食割れ予防保全技術として実用化
- タービン翼等の疲労強度改善技術に適用拡大

© 2022 Toshiba Energy Systems and Solutions Corporation

05

まとめ



© 2022 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

まとめ

- カーボンニュートラルの実現、および、それと同時に満足すべきインフラレジリエンスの向上、QoLの向上につき、弊社の技術的な取り組みをご紹介します。
- 特にQoL分野では、超電導、加速器、粒子線、レーザーなどの量子応用技術の活用が大いに期待される。

© 2022 Toshiba Energy Systems and Solutions Corporation

TOSHIBA

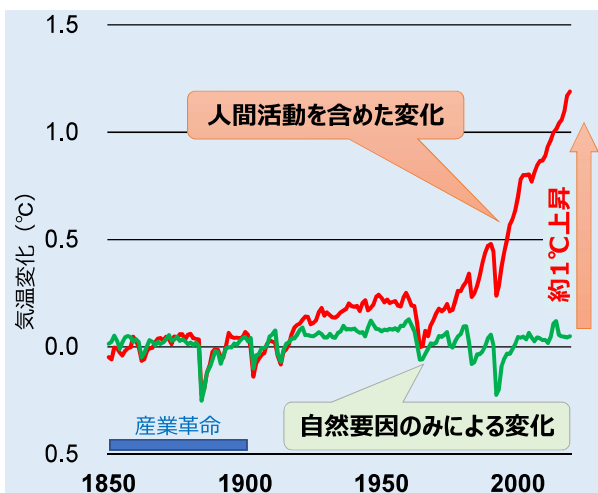
カーボンニュートラル実現に向けた レーザー技術の応用

レーザー学会会長
農研機構理事長

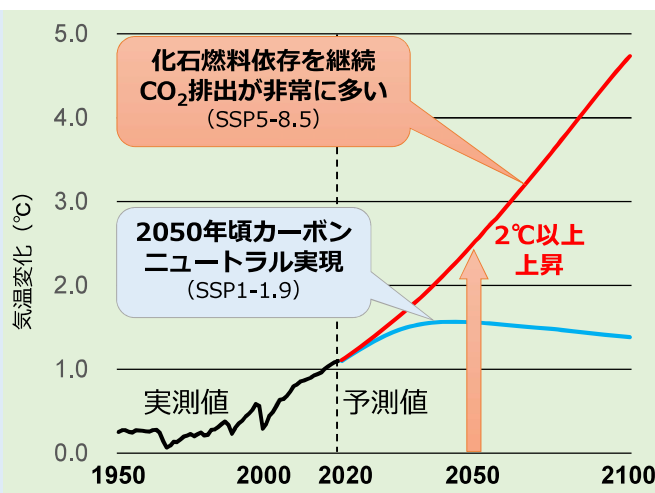
久間 和生

気候変動を巡る世界の現状

- 現在の気温は、産業革命以前と比べて約1°C上昇
- 気温上昇は、人間活動が原因であることは明確
- 温室効果ガス (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°Cを超える



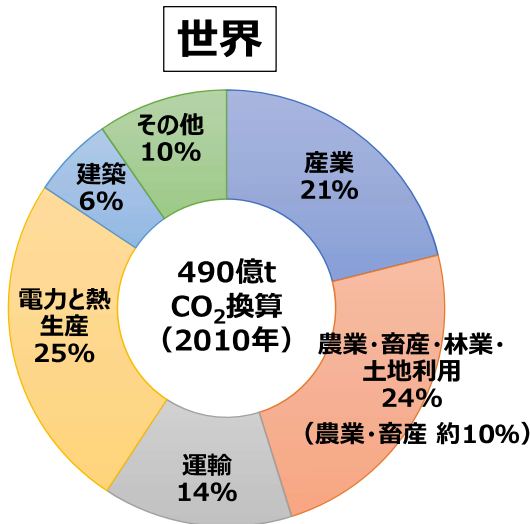
世界平均気温(年平均)の変化
(1850~1900年を基準とする)



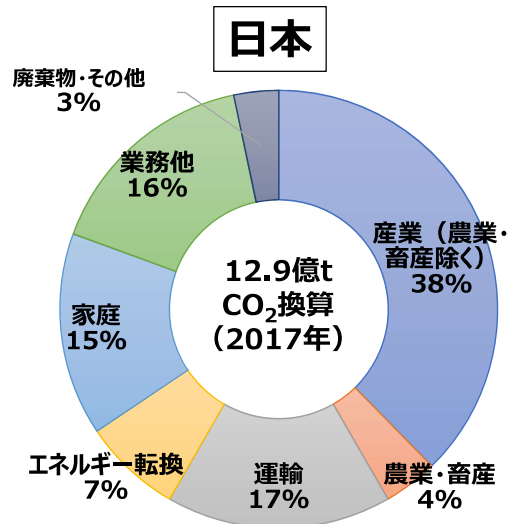
世界の年平均気温変化の推定
(1850~1900年を基準とする)

「国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) AR6/WG1報告書政策決定者向け要約」より

- GHG排出源の重要分野：産業、運輸、エネルギー転換、業務・家庭、農業・畜産
- 世界のGHG排出量：農業・畜産・林業・土地利用で約24%
(日本では約4%)



第5次評価報告書 第3作業部会報告書
(Climate Change 2014, IPCC, 2014)



国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス
日本の温室効果ガス排出量データ(1990~2017年度確報値)を集計

気候変動に対する国際的取り組みと日本の方針

最近の国際的取り組み

- COP26 「グラスゴー気候合意」 (2021年11月)
 - ✓ 世界の平均気温上昇を産業革命以前から**1.5°C**に抑える
 - ✓ 世界のCO₂の排出量を**2030年までに45%削減** (2010年比)、**2050年頃までに実質ゼロ**にする

パリ協定(2015)より
厳しい目標値

日本政府の方針

- **2030年にGHGを46%削減** (2013年比)、**2050年にカーボンニュートラル**を実現 (2020年10月)

GHG排出抑制をコストではなく、成長の機会と捉え、
イノベーションによる「**経済発展と温暖化抑制の両立**」を狙う

II
グリーン社会

グリーン社会の実現に向けた政府の施策

- 経産省「**グリーンイノベーション戦略推進会議**」(2020年7月～)
 - 2050年カーボンニュートラル実現を目指した全体構想を議論し、**重点的に取り組むべき14分野を特定**



- 経産省「**グリーン成長戦略**」(2020年12月)
 - ✓ NEDOに10年間で**2兆円**の「**グリーンイノベーション基金**」を創設し、技術開発から実証・社会実装まで一気通貫で支援を実施
 - ✓ 予算、税、規制・標準化、民間の資金誘導等、政策ツールを総動員

● グリーン成長戦略における14の重要分野

分野	
① 洋上風力産業	⑧ 物流・人流・土木インフラ
② 燃料アンモニア産業	⑨ 食料・農林水産業
③ 水素産業	⑩ 航空機産業
④ 原子力産業	⑪ カーボンリサイクル産業
⑤ 自動車・蓄電池産業	⑫ 住宅・建築/次世代太陽光
⑥ 半導体・情報通信産業	⑬ 資源循環関連産業
⑦ 船舶産業	⑭ ライフスタイル関連産業



第3回グリーンイノベーション戦略推進会議
(2021年11月)
(第1回より委員として参加)

レーザー技術の産業応用

- 単色性、指向性など**光源として優れた特性**
- 高出力化・波長領域拡大等により光通信、照明、自動車等での利用促進と、**農業、光給電、レーザー核融合**など**新分野の開拓加速**
- レーザー技術の産業応用は**グリーン社会の実現に極めて重要**

レーザー技術の産業への応用



■「2050年カーボンニュートラルへのレーザー技術の貢献」

- ✓ レーザーの高効率化（半導体レーザーなど）
- ✓ システム革新（スマート農業、無線給電、スマート照明など）
- ✓ クリーンエネルギーの生成（レーザー核融合、太陽光励起レーザー）

グリーン成長戦略14重要分野におけるレーザー技術の貢献（7分野）

重要分野	カーボンニュートラルへの貢献	
	高効率化・システム革新	クリーンエネルギー
③水素産業		核融合（水素製造）
④原子力産業		核融合（発電）
⑤自動車・蓄電池産業	ヘッドライト、レーザー加工、ワイヤーハーネス（光通信）	
⑥半導体・情報通信産業	半導体レーザー、光通信	
⑧物流・人流・土木インフラ	無線給電	
⑨食料・農林水産業	植物工場（LD照明）、スマート農業	
⑫住宅・建築/次世代太陽光	スマート照明	太陽光励起レーザー

レーザー技術によるGHG削減効果

- レーザー技術を応用したクリーンエネルギーの生成とシステム革新は、2050年に国内で10～20%、世界で5～10%のGHG削減※に貢献するポテンシャルがある。

※GHG総排出量の国内10.6億t（2018年）、世界328億t(2017年)に対する割合

レーザー技術の応用による国内、世界のGHG削減量（CO₂換算）

（単位：万t）

エリア	国内		世界	
	2030年	2050年	2030年	2050年
＜レーザーを用いたクリーンエネルギー＞				
レーザー核融合、H ₂ 製造	0	5,000-17,000	0	70,000-170,000
太陽光励起レーザー	500	2,700	8,000	25,000
＜レーザー適用によるシステム革新＞				
スマート農食産業	50	320	3,400	25,000
レーザー加工の産業応用	60	480	1,200	9,600
光無線給電	830	2,700	15,000	52,000
LDスマート照明	1,200	3,400	33,000	91,000
自動車へのレーザー応用	50	190	1,500	5,100
総計	2,700	14,000-27,000	62,000	270,000-380,000

※半導体レーザーの低消費電力化は他の項目に含まれるので、ここには記載しない

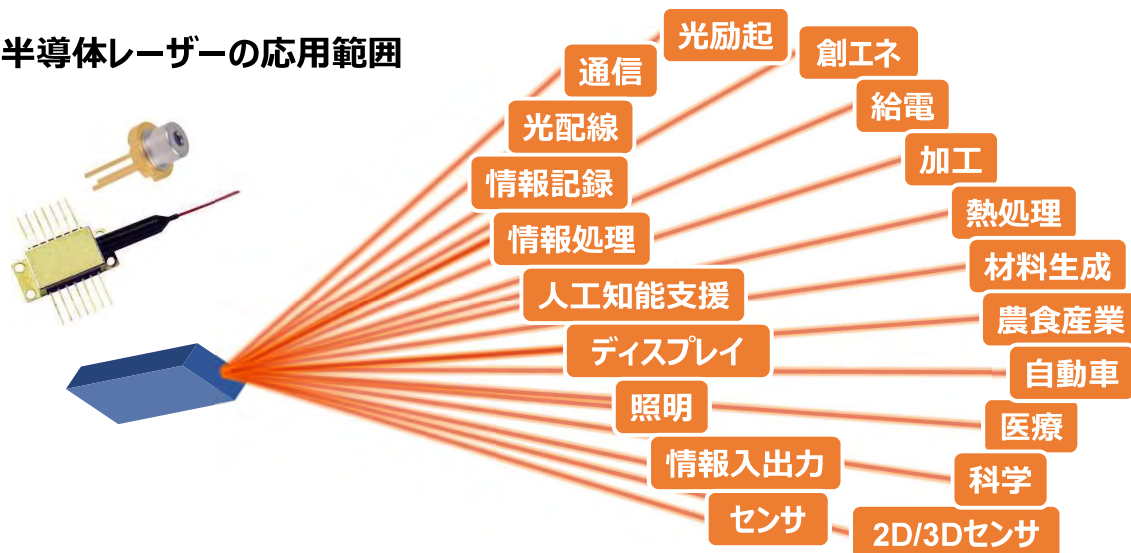
① 半導体レーザー

- 通信、照明、加工など様々な産業で利用拡大
- 高効率化※によりCO₂排出量を削減

※現在：50%(青)~75%(近赤外)⇒2050年：80%以上

- 小型・低消費電力化により適用拡大が促進され、カーボンニュートラルに向けた正の循環がうまれる

半導体レーザーの応用範囲



半導体レーザーの高効率化への課題

- 半導体レーザーの高効率化には、内部抵抗、動作電流、動作電圧、光損失を圧倒的に低減することが必要

半導体レーザーの高効率化に必要な技術

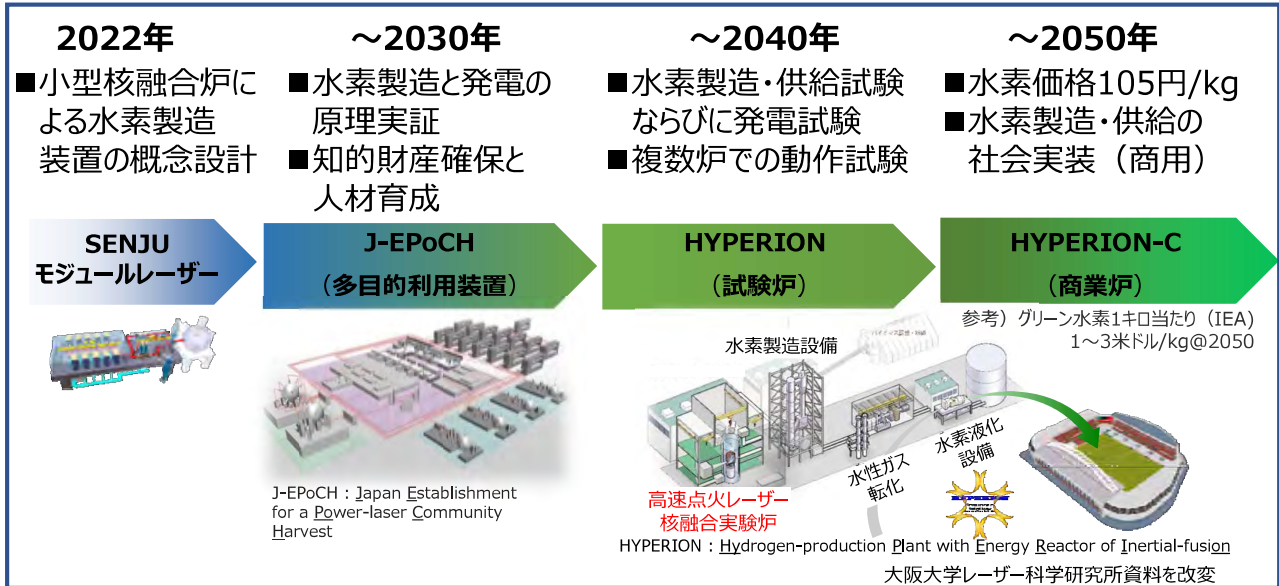
項目	必要な技術
結晶	無欠陥結晶：多様な化合物半導体や歪結晶の高品質形成
プロセス	超微細加工：多様な材料の原子レベル立体制御による高精度ナノ構造
構造設計	高精度設計：材料・構造の最適設計
集積	高度集積化：光・電子・微細メカなどの複合集積

②レーザー核融合

- 米国NIF※がレーザーによる**世界初の核融合燃焼**に成功(2021年8月)
国内でも点火・燃焼実現のための要素技術は準備できており、実証待ち
- 実用化の第1段階として、**社会的ニーズが高い水素製造**から実施
- **小型炉を分散配置**することで、2050年に日本全体に**クリーン水素**を供給

※NIF : National Ignition Facility(国立点火施設)

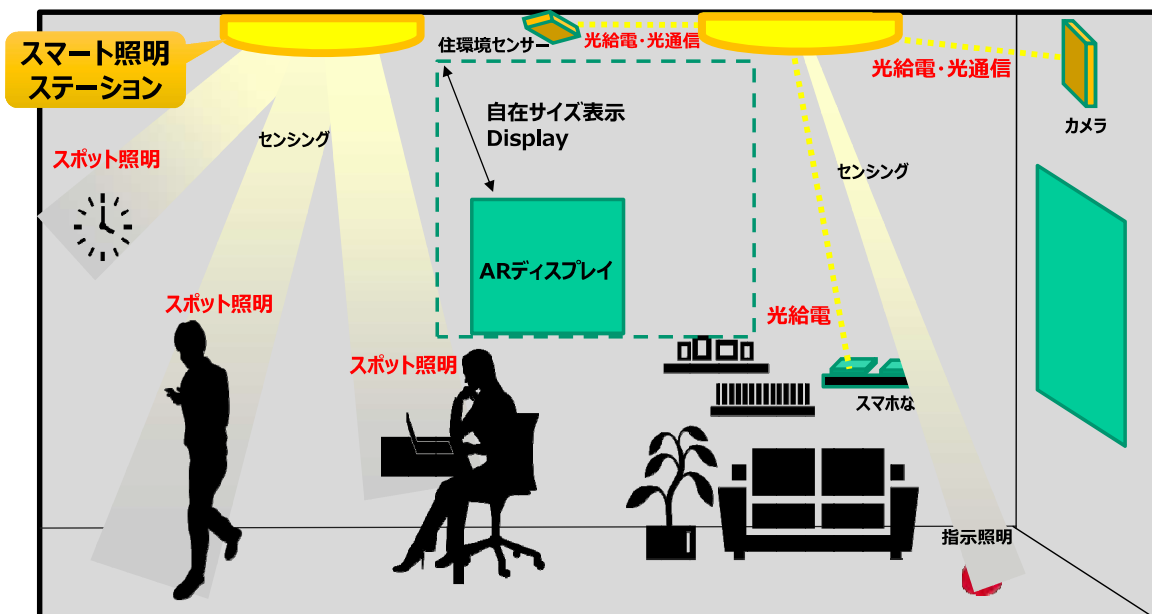
レーザー核融合のロードマップ



③レーザースマート照明

- レーザー走査・センシングにより、必要な部分のみレーザー照射するスマート照明で**超低消費電力が可能(1/10以下)**

超低消費電力を可能とするスマート照明ステーション



(大阪大学レーザー科学研究所 山本和久教授作成資料を改変)

植物工場

- 人工光を用いた多段式植物工場では、露地の300倍以上の生産性を実現
- 高効率のレーザー光源により大幅に消費電力を削減

多段式植物工場



AeroFarms社
(FaceBook掲載画像を許可を得て引用)

レーザー光を用いた栽培



(浜松ホトニクス社より提供)

農薬ゼロの食料生産

- レーザーにより無農薬で害虫、雑草を防除
 - 生産性向上と環境保全を両立する農水省の「みどりの食料システム戦略※」(2020.5)に貢献
- ※カーボンニュートラル、農薬50%減、化学肥料30%減、有機農業100万ha等

害虫の検知・狙撃



雑草の識別・除草



土壌メンテナンス・システム

- 光センサにより土壌の肥沃土、土壌病害、微生物等をセンシングし、防除・施肥等を最適化
 - 土壌からのGHG※排出削減と収量の最大化を両立
- ※N₂O、CH₄を含む

サイバー空間



センシング

肥沃度
土壌病害
微生物等

行動計画

防除
施肥等

フィジカル空間



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

■今後、取り組みを強化すべき施策

- ✓ Society5.0の実現に向けたレーザー技術とICTの融合
- ✓ 拠点形成と人材育成、開発資金の投入
(特に、欧米、中国などの諸外国に先行するため)
- ✓ 産学官の学際的なプレイヤーが連携する体制の構築
- ✓ 知財確保・国際標準化、規制改革の推進
- ✓ 社会実装の加速と産業競争力の強化

■レーザー学会の役割

- ✓ 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

