

量子科学技術（光・量子技術）

「量子」のふるまいや影響に関する科学とそれを応用する技術

※量子とは、ナノあるいはナノより小さい、原子を構成する微細な粒子や光子等。粒と波の二重性、重ね合わせ、もつれといった、身の回りの物理法則とは異なる「量子力学」が作用。

- 近年の技術進展により、サイエンスのみならず、**超スマート社会(Society5.0)**実現に向けた社会課題の解決と産業応用を視野に入れた**新しい技術体系**が発展する兆し。
- 経済・社会の様々な課題が**複雑化**し、**資本**や**競争優位**が激しく動く社会の中で、量子科学技術（光・量子技術）は、
 - ・ 高度な情報処理から、材料・ものづくり、医療まで、**広範な応用**があり、
 - ・ **非連続に課題を解決（Quantum leap）**できる大きな潜在力を有しており、
 - ・ 我が国の産学官が培ってきた科学技術における強みをベースに、**簡単にコモディティ化できない知識集約度の高い技術体系**であることから、21世紀の**あらゆる分野**の科学技術進展と我が国競争力の強化の**根源**及びプラットフォームとなりうる。
- 世界的に、産業界を含む投資の拡大と産業応用の模索の動きが早く、ここ数年が、我が国の研究・技術の優位性をイノベーションに結び付け、将来の成長に転換できるかの岐路。府省横断で政策や政策資源の投入を検討すべき**重要な時期**。

新たな推進方策

① ネットワーク型研究拠点を通じたSociety5.0関連技術の横断的強化

ア. トップダウン的なアプローチによる研究開発推進

- ・ 中長期にわたるインパクトが期待される研究・技術領域において、委員会で策定した**ロードマップ**を踏まえた研究開発を推進し、**従来技術の限界を非連続に解決（Quantum leap）**し得る「量子」のポテンシャルを最大限に引き出し、**Society5.0関連技術を横断的に強化**
- ・ 理論、基礎物理、材料等の異分野、基礎研究や実用化といった異なる技術段階の融合等のため、**ネットワーク型研究拠点による研究開発**を推進
- ・ 明確な研究開発目標等の設定ときめ細かな進捗管理により推進する**Flagshipプロジェクト**を中核に、様々な挑戦的課題に取り組むことで持続的にサイエンスエクスセレンス創出を図る**基礎基盤研究に併せて取り組む**ことが重要

イ. 量子科学技術を支える共通的な基盤技術の長期的視点に立った研究開発の推進

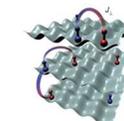
② 新たな技術シーズの持続的創出を支える戦略的な基礎研究の継続的強化

- ・ 「量子」のポテンシャルを最大限引き出すため、①に加え、将来社会に大きな影響をもたらす新たな技術シーズの創出を目指し**戦略的な基礎研究を併せて進める必要**

<中長期にわたるインパクトが期待される研究・技術領域>

i) 量子情報処理（主に量子シミュレータ・量子コンピュータ）

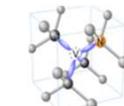
〔**電子の相互作用等のシミュレーション**により、物性や化学反応を支配する電子状態を解明し、超低消費電力デバイス等の開発や創薬への応用を実現。大規模データの高速処理・計算へ発展〕



量子シミュレーション

ii) 量子計測・センシング

〔**従来技術を凌駕する精度・感度**により、自動走行やIoTはもとより、生命・医療、省エネ等の様々な分野でこれまでなかった情報と応用を実現〕



固体量子センサ
(ダイヤモンドNVセンサ)

iii) 極短パルスレーザー

〔**電子の動きの計測・制御**を実現するアト秒スケールの極短パルスレーザーの開発・活用により、化学反応メカニズム解明や電子状態制御による高性能電子デバイス等を実現〕



アト秒パルスによる
電子状態の観測

iv) 次世代レーザー加工

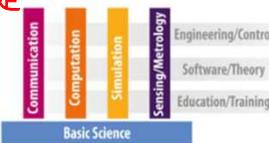
〔加工学理や機械学習を活用し、ワンストップで最終形状に仕上げが可能な高精度・低コストの**CPS（サイバー・フィジカル・システム）型次世代レーザー加工技術**を実現〕



CPS型次世代レーザー加工

量子科学技術分野における海外政府の研究開発投資状況

近年、「第二次量子革命」が到来。米欧中を中心に海外では、「量子科学技術」はこれまでの常識を凌駕し、社会に変革をもたらす重要な技術と位置づけ、研究開発投資額を増加させている。

	政府文書等における位置づけ	取り組み状況	技術領域	その他
 アメリカ	・2016年7月、国家科学技術会議の下に設置された量子科学技術に関する省庁間WGのレポートを公表。 ・量子科学技術は、 情報の処理、通信等に質的・量的に莫大な飛躍をもたらす技術 であり、アメリカの 科学的リーダーシップや国家安全保障、経済的競争性を構成する重要な技術 として 投資の優先事項 として特定	・近年、国防省やNSF等より 毎年200百万ドル(約218億円)オーダーの投資 ・DOEにおいても2017年より新たなプロジェクトを開始	・量子センサー ・量子通信 ・量子シミュレータ ・量子コンピュータを、重視。	
 EU	・2016年5月、欧州委員会の求めに応じて、研究者や産業界、研究機関がとりまとめたロードマップ「Quantum Manifesto」が公表 ・量子科学技術は、 長期にわたる富の創出と安全保障に貢献する競争力の高い産業を創出する 	・ 2019年から10億ユーロ(約1250億円)規模プロジェクト「Quantum Technology Flagship」を開始予定 (10年計画)  プロジェクトの有識者委員会中間報告書より抜粋	・量子通信 ・量子コンピュータ ・量子シミュレータ ・量子センサ・計測を、戦略研究課題として検討中	・レーザー領域については、別途ELIプロジェクト(総額850百万ユーロ)で研究開発を実施
 イギリス	・2015年3月、量子技術に関する大型プロジェクトのアドバイザーボードがレポートを公表。 ・量子科学技術への投資によって、 新たに勃興してくる数十億ポンド規模の量子技術市場において、イギリスが世界でリードする	・量子技術に関する大型プロジェクト「the UK National Quantum Technologies Programme」を2014年2月より 総額270百万ポンド(約456億円) で実施(5年計画) 	・量子センサー・計測 ・量子イメージング ・量子情報技術 ・量子通信を研究拠点のテーマに設定(約10億円/年・拠点)	
 中国	・「科学技術イノベーション第13次五カ年計画(2016年)」の重点分野として、量子通信と量子コンピュータを重大科学技術プロジェクト、量子制御と量子情報を基礎研究の強化に位置づけ。 ・「国家中長期科学技術発展計画綱要2006～2020年」において、先端技術分野の一つとして、レーザー技術を挙げている。		・量子通信 } 重大科学技術プロジェクト ・量子コンピュータ } ・量子制御 } 基礎研究の強化 ・量子情報 } ・レーザー技術→先端技術分野	

量子科学技術がもたらす非連続な課題解決

これまでの古典的な科学技術手法(シミュレーション、計測、制御)では限界がきており、新たな科学技術手法(量子科学技術)の発展により、電子レベルでの物質の挙動等を明らかにすることで、非連続的な課題解決を図る。

《現在》

既存計算機

- 現実的な計算時間の観点から、限られた数の原子のシミュレーション
⇒ 詳細な電子状態の計算は困難



短パルスレーザー

- フェムト秒パルスレーザーで分子のダイナミクスを観測
⇒ 電子の超高速ダイナミクスの観測は困難

フェムト秒 = 10^{-15} 秒

既存センサ(SQUID)

- 脳磁等の計測に超伝導技術(極低温)を用いた大型の装置が必要



レーザー加工

- 現在のレーザー加工は人の経験と勘に依存
- 難解な加工現象(なぜレーザーで物が切れるか)が未解明

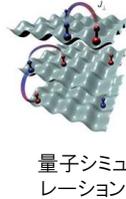
古典科学技術

量子科学技術によるフィジカル空間の高度化

《将来(5~10年)》

量子シミュレータ・量子コンピュータ

- 量子状態の高度制御が実現
⇒ 大規模な電子状態シミュレーションによる高度な物性予測が可能に
⇒ 大規模データの高速度処理・計算へ発展



量子シミュレーション

極短パルスレーザー

- アト秒パルスレーザーの開発・利用を通じ、化学反応や物性の理解の鍵となる超高速電子ダイナミクス観測及び制御を実現



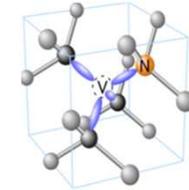
アト秒パルスレーザーによる電子状態の観測

アト秒 = 10^{-18} 秒

量子センサ

- 外乱で壊れやすい量子の性質を利用し、室温動作かつ小型の超高度センサを実現

※ウェアラブル磁気センサ、実動作中デバイス
の局所計測、自動走行等への応用が期待



固体量子センサ
(ダイヤモンドNVセンサ)

次世代レーザー加工

- 非線形・非平衡の加工学理の解明、機械学習を通じ、加工結果を事前にシミュレーションし、結果通りに加工できるCPS型(サイバーフィジカルシステム型)の次世代レーザー加工が実現



CPS型次世代レーザー加工

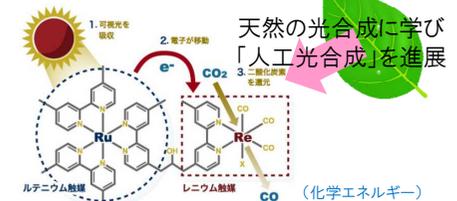
非連続な課題解決

《解決される社会課題》

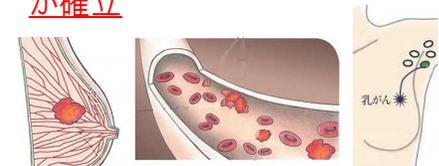
健康長寿 エネルギー 環境・災害対応
ものづくり 交通・物流

(例)

- 超高速電子ダイナミクスの模擬・観測・制御による光合成過程のミクロな理解に基づく高効率人工光合成デバイス開発により、**環境・エネルギー課題を解決**



- 自覚症状がない初期がんなどの、既存の検査技術では見逃されていた疾病の、**早期診断・治療法が確立**



新たに同定した、血中にわずかに含まれるがんシグナルや、転移薬を高感度検出

- ワンストップで最終仕上げが可能な高精度・低コストのCPS型次世代レーザー加工により**ものづくり生産プロセスを革新**

※成長市場である半導体、電子部品、自動車産業へのレーザー加工機の導入が進展。現在約1.46兆円(2016年)の市場規模が年率5-10%で拡大すると見込まれる。

超スマート社会(Society 5.0)

量子科学技術 (粒子と波の二重性、量子重ね合わせ、量子もつれ)

量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)に係るロードマップ

社会的課題の解決

量子力学的な効果を情報処理の単位とした計算や物質中の電子等の振る舞いを人工的な別の量子状態で模擬する技術。物性や化学反応を支配する電子状態の解明に基づく、超低消費電力デバイス等の開発や創薬への応用、量子コンピュータへの発展が期待。

物流・交通

ものづくり

エネルギー

健康長寿

経済・社会 インパクト

- 超伝導ビット、量子ドット、光
- 冷却原子・分子、イオントラップ、光トポロジ
- 量子アニーリング
- 共通

科学技術 インパクト

(可能となる 模擬実験)

研究・技術 の進展

- 量子性を活かした小規模なサービスや基盤技術が発展する。
(例: 完全乱数や秘匿性の高い計算の提供、量子アルゴリズムが発展する)
- 大規模組合せ最適化問題の近似解が求められるようになり、実社会の問題に適用され始める。
(例: AIの高度化、渋滞緩和、スマートグリッドの高効率化等が期待される)
- AIを備えたIoT技術の高精度化が進み、高度な自動化が加速する。
(自動運転の高度化、工場の自動化の発展が期待される)
- 物質の機能や化学反応に関する理解が深まり、狙った機能をもつ材料の設計指針に繋がる研究が進展する(テーラーメイド物質創成へ)。
(例: 人工光合成物質、高効率触媒等の開発が期待される)
- 室温動作する超低消費電力デバイスの開発が進展する。
(例: 室温超伝導体の開発、超高速光電子デバイスの発展等が期待される)
- 汎用デジタル量子コンピュータへ発展する。
(膨大なデータを用いた大規模・複雑な計算を高速・高精度・低消費電力で実現)
- 物性の予測に基づく高効率な創薬への道が開ける。
(例: ターゲット分子の量子化学計算に基づいた薬剤のデザインが期待される)
- トポロジカル量子計算技術が発展し、複雑で大規模な物質の理解が深化する。
(例: タンパク質の立体構造の高度な理解に基づく物性予測が進展し、病理の理解が加速する)
- 未解明の物理・化学現象に関する理解が深まり、基礎物理や化学における学理が発展する。
(例: 非平衡量子物理分野の進展が期待される)
- 外部の利用者がクラウドを通して量子シミュレータを利用できる環境の整備が進む。
(利用者の増加により広範な分野での研究・技術の加速的発展が期待される)
- 量子誤り訂正と関連する量子状態の高度計測・制御が発展する。
 - 多数の物理量子ビット(500~1,000個)を実装した量子シミュレータの利用が始まる。
(大規模な量子多体系における高精度な計算が可能となり、物性の予測精度が大きく向上する)
- 電子状態の変化も含めた高度な計算により、幅広い物質の機能に関する理解が進展する。
(例: 物質の光に対する応答に関して予測と実験との直接比較ができるようになる)
- 高温超伝導の発現メカニズムの理解が深まり、設計指針につながる研究が発展する。
- スパコンでも困難な計算が可能になり始める
(量子優位性の実現)
- 50~100個程度の粒子を含む物理系の高度な計算が始まる。
(ポスト「京」でも厳密計算では25~30個程度の粒子の計算が限界。消費電力も100分の1以下に低減)
- 非平衡状態(過渡現象や化学反応過程)における電子状態の模擬・計測が可能になり始める。
- 外部の利用者がクラウドを通して量子シミュレータを利用できる環境の整備が進む。
(利用者の増加により広範な分野での研究・技術の加速的発展が期待される)
- 10⁵個の原子を規則的に捕捉し、短距離相互作用に基づく模擬実験が可能
- 制御性の高い物理量子ビットでは10個程度が実現
- 捕捉する原子の低温化や長距離相互作用、不規則な原子配置の導入により、実在する物質の模擬が可能となる。
- 20~50個程度の物理量子ビットの任意の量子操作が可能となる。
- 捕捉した原子の時間制御や捕捉方法の高度化により、物質の状態の時間変化の模擬・計測が実現する。
- 100個程度の物理量子ビットの任意の量子操作が可能となる。
- 新たな物理原理(トポロジ)を利用した量子計算の基盤研究が進み、応用への展開が始まる。
- 宇宙物理や素粒子物理研究への展開が始まる。
(例: 検証の難しい初期宇宙や中性子星内部の実験的検証が期待される)
- 基本的な物理系における電子状態のマクロな相転移を模擬
- 応用上重要な物質(例: 高温超伝導体)における電子の平衡状態の模擬・計測が可能になり始める。

現在
(2017年度)

5年
(2022年度)

10年
(2027年度)

20年

極短パルスレーザーに係るロードマップ

1パルスの時間幅が非常に短いレーザー。これまで難しかった、電子が動く時間(アト(10^{-18})秒)スケールでの電子の動きの計測・制御を実現するパルスレーザー開発が進んでおり、光合成等の化学反応メカニズム解明、電子状態制御による高性能電子デバイス等の開発が期待。

社会的課題の解決

健康長寿 ものづくり エネルギー

経済・社会インパクト

- 高強度型 (強い光で物質の性質を変化)
- 高繰返し型 (短時間で多くの高精度なデータを取得)
- 共通

科学技術インパクト

- ナノスケール・超高速光電子デバイスへの道が拓ける。(例:スマートフォン型パソコンの開発が期待される)
- 化学反応の制御に基づく高効率な創薬への道が拓ける。
- 極短パルスレーザー加工の原理解明による利用が拡大する。
- 狙った機能をもつ材料を効率的に合成するテーラーメイド物質創成が始まる。(例:人工光合成物質、高効率触媒等の開発が期待される)
- 超スマート・省エネルギー社会を支える情報処理・通信デバイスや工業製品の開発が加速する。(例:超高速スイッチ、超高密度メモリ、高性能高温超伝導モータ、トポロジカルデバイス等)
- 生体に対する放射線の影響の微視的メカニズム解明や有機デバイスや高効率触媒、創薬の設計指針につながる研究が加速する。
- 電子材料や新機能材料などの物性の理解が深まり、超高速で動作する光電子・光磁気デバイス(トランジスタ、メモリ等)の設計指針につながる研究が進展する。
- 未解明の物理・化学現象の理解が深まり、基礎物理・化学における学理が進展する。(例:多電子相互作用、化学反応素過程などの解明が期待される)
- 高温超伝導の発現メカニズムの理解が深まり、高温超伝導体の設計指針につながる研究が進展する。
- テーブルトップのアト秒X線パルス源やアト秒分光装置が開発・商用化され汎用的に使われ始める。
- テーブルトップのアト秒X線パルスと加速器技術の融合技術が登場する。
- 外部利用者が簡易に操作できる小型装置が整備され始める。

可能となる研究

放射光施設や量子シミュレータ等との連携を促進。基盤レーザー技術の国内育成を考慮。

- 「水の窓」波長で溶液中分子や生体分子の電子と原子核の超高速な動きの計測が可能となり始める。
- ナノスケール空間分解能での電子の動きの計測や化学反応の制御(電子や原子核の動きの制御)が可能となり始める。
- 気体分子の電子と原子核の超高速な動きの計測が可能となり始める。
- アト秒領域の非線形光学が発展し、光と物質の相互作用に関する理解(非常に強い光に対する電子の応答の理解)が進展する。
- 電子・新機能材料*の電子・原子・スピンの超高速な動きの計測が可能となり始める。
- 生体に対する放射線の影響を、より詳細に計測することが可能となり始める。
- 固体表面と分子の間等における電子の超高速な動きの計測が可能となり始める。

研究・技術の進展(光源及び計測)

- 集光強度約 10^{14} W/cm²、波長30nm、最短パルス幅数百アト秒、のレーザーが発生可能。
- 集光強度約 10^{16} W/cm²、波長1.5nm~300 μ m、最短パルス幅数十アト秒、のレーザーが発生。
- 集光強度約 10^{18} W/cm²、波長0.15nm~300 μ m、最短パルス幅数十アト秒、のレーザーが発生。
- 繰返し数約1kHz、波長3nm、最短パルス幅数十アト秒、のレーザーが発生可能。
- 繰返し数約100kHz、波長1.5nm~300 μ m、最短パルス幅数十アト秒、のレーザーが発生。
- 繰返し数約1MHz、最短パルス幅アト秒、のレーザーが発生。
- レーザーの集光径を10nmに縮小。
- パルス中電場波形の観測・制御の高精度化。

※ 半導体、高温超伝導体、トポロジカル物質、光誘起相転移物質、磁性体等。トポロジカル物質は、例えば内部は電気の流れない絶縁体なのに、表面は金属のように電気が流れる新しい物質。光誘起相転移は、光を照射することで、絶縁体が金属に変化したり、磁性が変化する現象。



次世代レーザー加工に係るロードマップ

加工学理または機械学習からの予測を活用し、ワンストップで最終形状に仕上げが可能な高精度・低コストのCPS(サイバー・フィジカル・システム)型次世代レーザー加工技術。次世代レーザー加工機によりスマート生産体制が構築され、製造・流通の革新が期待。

社会的課題の解決

ものづくり

物流・交通

経済・社会インパクト

- マクロ加工(切断、付加)
- マイクロ加工
- レーザー援用露光加工
- 改質加工(機能付加、除去、コーティング)
- 共通

科学技術インパクト

- 加工パラメータの一部に機械学習または加工学理からの予測を活用するCPS(サイバー・フィジカル・システム)援用型レーザー加工技術が進展する。
- 金属(銅やアルミ)から複合材(CFRP等)まで、複数材料を組み合わせたマルチマテリアル加工技術が進展する。

- CFRP等の難加工材料の高品位レーザー加工が可能になる。
- シリコン基板、ガラスなどの電子部品材料分野の高品位レーザー加工が可能になる。
- 半導体微細加工へのレーザー援用露光加工の導入が始まる。
- 熱影響を制御・活用した表層強化やコーティングなどの高品位改質加工が可能になる。
- 加工後に研磨などの仕上げ加工が不要な精密3次元加工が実現する。
- 加工後に化学液処理などのケミカル加工が不要なレーザー加工が実現する。
- 半導体のナノメートルサイズでの任意形状微細加工が実現する。
- 微小面積・任意深部領域のオンデマンド加工が可能になり、微細材料等の機能改質が実現する。

- 加工精度、深さ
 - ・ マクロ加工 ⇒ 5ミクロン精度
 - ・ マイクロ加工 ⇒ 50nm精度
 - ・ レーザー援用露光加工 ⇒ 5nm精度
 - ・ 改質加工 ⇒ 20nm精度(構造改質)
 - 100ミクロン深さ(表層改質)
- 加工パラメータ制御の一部に機械学習または加工学理からの予測を活用することが可能になり始める
- 加工精度、深さ
 - ・ マクロ加工 ⇒ 1ミクロン精度
 - ・ マイクロ加工 ⇒ 10nm精度
 - ・ レーザー援用露光加工 ⇒ 1nm精度
 - ・ 改質加工 ⇒ 2nm精度(構造改質)
 - ミリ深さ(表層改質)
- 現状では職人の経験から導出されている加工パラメータを、機械学習または学理からの予測に置き換えることが可能になる

- CPS型次世代レーザー加工機による製造・流通革新
 - ・ ワンストップで最終形状に仕上げが可能な高精度・低コストのCPS型次世代レーザー加工機が市場に導入。
 - ・ これらがネットワークに接続されることにより、各種製品を最小コストかつ最適地で生産・提供できるスマート生産体制が構築され、製造・流通革新がもたらされる。

- 1兆円を超える市場へのCPS援用型レーザー加工機の導入が進展
 - ・ 顧客の好みの材料・形状に対して、加工条件を精密に自動生成できるCPS援用型レーザー加工機が市場に導入。
 - ・ 仕上げ機械加工が不要な精密切断加工、仕上げの化学処理が不要なケミカルレス加工、量子効果の出でくるシングルnmサイズでの半導体任意形状微細加工、高硬度・軽量等の高付加価値化をもたらす改質加工などが実現し、1兆円を超える現行レーザー加工機に加え、その他の加工過程においてもCPS援用型レーザー加工機の導入が進む。

- 加工結果を事前にシミュレーションし、その結果どおりに加工できるCPS型の次世代レーザー加工技術が進展する。

- ・ 現在約1.46兆円(2016年)の市場規模*が年率5-10%程度で拡大すると見込まれる。
- ・ 成長市場である半導体産業、電子部品産業、自動車産業(特に電気自動車)へのレーザー加工機の導入が進展。

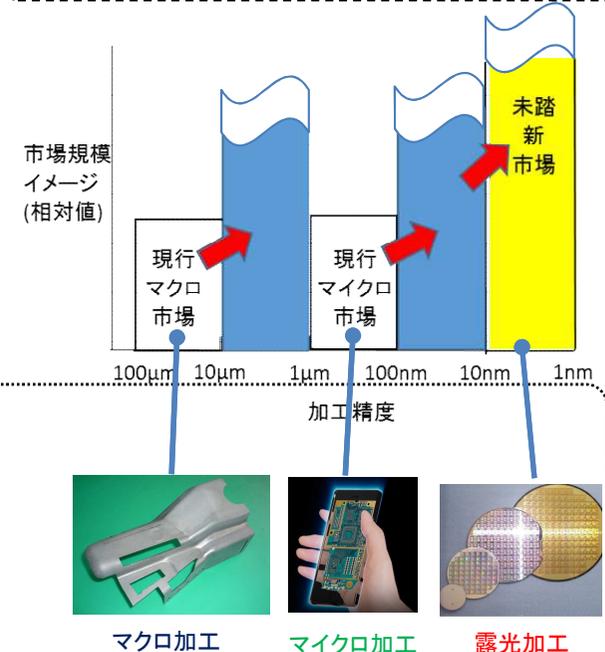
*OPTTECH CONSULTINGの市場調査に基づく

(可能となる技術)

- 加工精度、深さ
 - ・ マクロ加工 ⇒ 10ミクロン精度
 - ・ マイクロ加工 ⇒ 100nm精度
 - ・ レーザー援用露光加工 ⇒ 10nm精度
 - ・ 改質加工 ⇒ 100nm精度(構造改質)
 - 100ミクロン深さ(表層改質)

研究・技術の進展

- レーザー加工現象が未解明(レーザーで何故切断・接合できるのか等)
- 現状では職人の経験に基づき、加工パラメータ(波長、パルス幅、パワー、繰返し等)を導出
- 難解なレーザー加工現象の物理モデル探索
 - ・ 加工現象の観測(最先端研究基盤などを駆使したその場マイクロ観測、超高時間分解観測、マルチスケール観測)、機械学習の活用により、「4相(固相、液相、気相、プラズマ)＋開放系」の物理モデルの構築が進む。
 - ・ 物理モデルに基づき、加工過程のマイクロ(原子レベル)からマクロの理解(物質の励起過程から励起後までを含めたダイナミクス)が進む。
 - ・ 原子・分子・固体物理に跨り、レーザー物理、材料、情報科学分野等から成る融合研究分野が創生される。
 - ・ 複合量子ビームによる新プロセスの探索が進む。
- 学理に裏付けられたレーザー加工技術
 - ・ 各物理モデルを融合したレーザー加工の学理構築が進み、加工現象の原子レベルのデジタル化が可能になる。
 - ・ 第一原理計算から流体/連続体力学計算を取り込み、さらに機械学習も活用したシミュレーションが可能になる。
 - ・ 加工の学理に基づき、各種加工に必要な光源の設計指針を得ることが可能になる。



現在 (2017年度)

5年 (2022年度)

10年 (2027年度)

20年

7