

## 量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策について ～我が国競争力の根源となりうる「量子」のポテンシャルを解き放つために～

### 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。

### ポイント

- 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)における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**が一瞬で動く中、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）する大きな可能性が指摘され、かつ、
  - ・ 我が国の産学官が培ってきた強みをベースに、**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**・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**。

### 国際動向

この数年、米欧中の政府や産業界が研究開発投資を拡大



- ・ Quantum AI研究所を**設立**／カナダD-Wave社より量子計算機を**導入**（2013～）
- ・ 米大学の量子コンピューティング研究グループを**吸収**（2014～）



- ・ 5年間で**\$3B**の研究イニシアティブ（2014～）  
（「7nm and beyond」+「post silicon」）



- ・ 複数のファンディング機関が上記を含む研究を**支援**



- ・ フォトニクス研究を継続支援
- ・ 量子研究計画を進行中（2017～）



- ・ 5年間で**£270M**の研究イニシアティブ（2014～）  
（量子コンピューティング、量子センサ、量子イメージング、量子通信）



- ・ 10年間で**€135M**の研究イニシアティブ（2015～）
- ・ 科学技術外交の「National Icon」に指定



- ・ 蘭大学に10年間で**\$50M**の支援（2015～）



- ・ 「量子技術Flagship」事業として**€1B**規模とされる計画を進行中（2018～）



- ・ **先端技術**（8分野）と**重大科学研究**（4項目）に光・量子（レーザー技術、量子制御）
- ・ 中国科学院にアリババ量子計算実験室を**設立**（2015～）

### 我が国における状況

我が国には強みも課題も存在

- ・ 我が国の**基礎研究**は一定の存在感。その成果が海外で活用・展開される事例も。例：超電導量子ビット、量子計算理論、量子センサ材料、光学技術・素子
- ・ これらは地道で息の長い研究や技術基盤から生まれている一方、研究者層の厚みや流動性、分野融合、若手が安定して研究できる環境等に課題。
- ・ 我が国独自の視点・アイデア、突出した点と点を繋ぐハイブリッド型推進といった観点も考慮しつつ、**更に推進方策を検討**。

（参考）政策的な動向

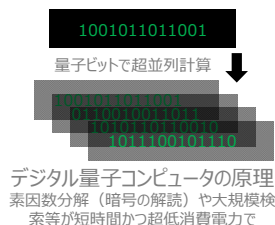
- 平成28年1月 第5期科学技術基本計画に「光・量子技術」が位置付け（「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」）
- 平成28年3月 科学技術・学術審議会にて調査検討開始
- 平成28年4月 科学技術振興機構(JST)にて戦略目標に基づく基礎研究支援開始(CREST、さきがけ等。量子関係では13年ぶり。)
- 平成28年4月 量子科学技術研究開発機構(QST)が発足
- 今般 科学技術・学術審議会にて中間とりまとめ

## (1) 量子情報処理・通信

最速スパコンでも現実的な時間で解けないような、大規模情報処理、新物質の探索シミュレーションや、高セキュリティな暗号通信を可能に。

### ◆ 量子コンピューティング

量子力学的な効果（「0」と「1」が重ね合わせで存在する状態）を情報処理の単位（量子ビット）として計算する技術。組合せ最適化問題(\*)を解く量子アニーリングが先行。  
重要なアイデア・要素技術が我が国研究者の研究に端を発している。



量子アニーリングマシン  
我が国では内閣府ImPACT  
でレーザーを用いた研究開発

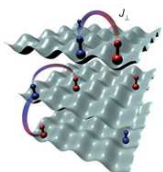
[組合せ最適化問題]

- 人工知能（深層学習）における情報処理
- 物流・資源割当の最適化

(\*)セールスマンが複数都市をすべて巡回する場合の最短経路など、膨大な選択肢から最適解を見つけ出す問題。複雑問題では計算時間が指数関数的に増大し、最速スパコンでも限界に。

### ◆ 量子シミュレーション

解析の難しい物質中の電子等のふるまいや相互作用を人工的な別の量子状態で模擬シミュレーションを行う技術。  
量子コンピュータと同様の技術であるが、複雑性が少ないためより短期的に実現が可能であると考えられており、各国の政策においてキラーコンテンツとされている。



量子シミュレータ  
(冷却原子・分子方式)

[量子シミュレータ]

- 量子レベルの物性・反応を支配する電子状態の解明に基づく、新物質等の探索と開発
- 創薬を支える量子ダイナミクスや化学反応機構の解明

### ◆ 量子通信・暗号

大容量・低電力な通信や理論上破ることができない高度な暗号を用いたセキュリティの高い通信を行う技術。中継技術の確立が今後のマイルストーン。



量子鍵配送 (QKD)  
「量子状態は観察されると壊れてしまう」という性質を利用し、伝送したい情報を暗号化・復号する鍵を、送信者と受信者だけが共有。



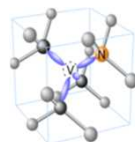
量子中継にダイヤモンドを用いた1.3kmの実証実験

## (2) 量子計測・センシング・イメージング

電子等が有する量子状態を利用し、古典力学を基本とした従来技術を凌駕する精度・感度・空間分解能等を可能に。

### ◆ 固体量子センサ

量子状態の本質（外乱で壊れやすい）を逆にとり、従来技術では難しい微弱な磁場・電場・温度・光等を計測。(例:磁場はフェムトテスラ:  $10^{-15}$ T(地磁気の約100億分の1)も可能) 室温動作し、幅広い用途にブレイクスルー（生命科学含む）が期待されている。



ダイヤモンドNVセンサ

ダイヤモンド結晶の格子中の炭素原子の置換位置に入った窒素 (N) と隣接する炭素原子が抜けた空孔 (Vacancy) に電子スピンの閉じ込められている。

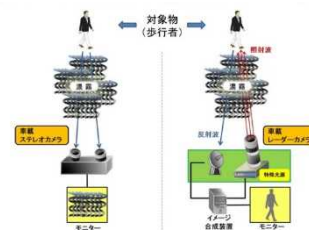
[固体量子センサ]

- 蓄電池等のエネルギー・車載センサ、インフラや製造にわたるIoT利活用
- 脳磁等の計測による産業・医療応用、従来技術では観察困難な生命・医療フロンティア

炭化ケイ素(SiC)中のシリコン空孔も含め、我が国研究機関の作製技術は高く、海外研究グループから提供の引き合い。

### ◆ 量子もつれ光

量子もつれ光（複数の光子がもつれ状態にある光）を用い、水分を通しても分解能がほぼ劣化せず、眼科等へ応用できる量子OCT（光干渉断層計）等を可能に。  
また、悪天候や逆光の影響を受けない量子レーダーカメラ等への展開も。



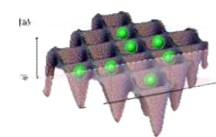
量子もつれ光を利用したレーダーカメラ(右) 2つの光子がどこに存在するかによらず対となる量子もつれ状態では、一方の光子を対象に当てずに計測可能。

[量子もつれ光]

- 網膜疾患の早期鋭敏診断等、様々な高感度計測機器の発展
- 衝突防止センサなどの、更なる自動運転技術の進展

### ◆ 光格子時計

「秒の再定義」が期待。相対論的な「時空のゆがみ」の計測も可能に。我が国研究者が提唱、10数年の連綿とした研究で実現。量子慣性センサと共通する要素技術。



光格子時計  
特別な波長のレーザー光で作った光格子の中に、卵パックに入った卵のように原子を捕縛し、別のレーザー光を当てて共鳴周波数を測定する原子時計

[光格子時計]

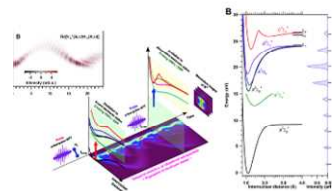
- 測地、マグマだまりや海底地殻変動などの地震・火山研究

### (3) 最先端フォトニクス・レーザー

光源や光機能の先鋭化は、「量子」研究を支え、フロンティアを切り拓いてきたが、その進展により、超高速の物質の電子状態の解明や新たな産業応用を可能に。

#### ◆ 極短パルスレーザー

1パルスの時間幅が非常に短いレーザー。フェムト秒( $10^{-15}$ 秒)級のパルスレーザーはこの10年ほどで小型化・市販が進み、分子の運動の追跡が可能に。更なる技術革新(高次高調波技術)が続き、化学反応等において**分子の中の電子が動く時間スケールであるアト秒( $10^{-18}$ 秒)パルスレーザー**が開発されつつある。



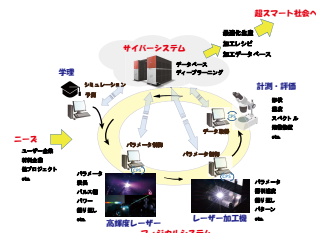
アト秒パルスによる分子の電子状態の直接観測

[極短パルスレーザー]

- 光合成等の**化学反応メカニズム**や**材料物性の発現機構**の解明
- 電子状態の制御による**高性能電池**、**超高密度磁気デバイス**等の開発

#### ◆ 産業応用の高度化

AI・IoT時代の集積回路に求められる極小加工(現行波長レーザーの線幅限界を超える半導体加工)に向け**EUVリソグラフィ**開発(光源大出力化と光学検査装置開発)が進展。また、材料・デバイス製造に汎用される**レーザー加工**において、世界的に、**難解な加工学理**の解明とともに、**IoT知的生産技術**の確立の動き。



CPS型の次世代レーザー加工

[産業応用]

- **CPS型(サイバー・フィジカル・システム型)の高品位・省エネ次世代レーザー加工技術**による、材料・デバイス製造の革新

これまで経験と勘から導き出されてきた加工のパラメータを、IoT・AIを駆使したシステムで導出し、最適化。加工という非線形・非平衡の物理現象解明も必要。

#### ◆ パワーレーザー

瞬間的な最大出力が極めて高い超高強度レーザー。1000万気圧を超える**超高压状態による新材料創成**(例:スーパーダイヤモンド)や、従来の**加速器を超小型化**するレーザープラズマ加速が可能に。

パワーレーザー  
LD励起高繰り返しセラミックレーザー  
(我が国のパワーレーザー用光学材料・素子は、世界的にも強みを有する。)



### (4) 量子ビーム利用推進小委員会における議論

当委員会の下の量子ビーム利用推進小委員会において、量子ビーム技術について調査検討。軟X線向け高輝度放射光源やその利用について、本年2月に中間的整理。

#### ◆ 軟X線領域に強みを持つ高輝度放射光源

最先端のサイエンスは、**物質の構造解析から物質の機能の理解**へと向かっている。物質の機能を理解するためには、**電子状態を元素選択的に観測**できる軟X線光源が非常に有用。

(国際施設動向)

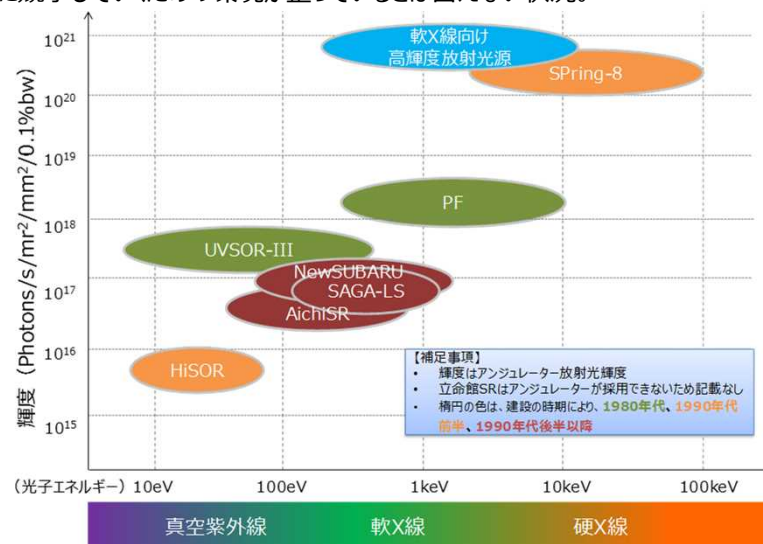
海外では、2000年代に軟X線向け光源が相次いで建設されたのに加え、2010年代にはさらに**高輝度**を目指した光源が**米国**、**台湾**、**スウェーデン**で稼働開始している。



(目標)0.55→(実効性能)1.5 nm·rad (目標)1.6→(実効性能)1.6 nm·rad (目標)0.33→(実効性能) - nm·rad

(国内施設動向)

我が国では、**軟X線に強みを持つ高輝度光源の放射光施設が存在せず**、世界と互角に競争していくための環境が整っているとは言えない状況。



# Society 5.0と量子科学技術（光・量子技術）

○ 量子科学技術（光・量子技術）は、Society 5.0（サイバー・フィジカル空間の融合）関連技術を横断的に強化するとともに、「その先」に不可欠なフィジカル空間を高度化する鍵であり、新産業創出の源泉

このようなコア技術として、次のような例が挙げられる。

人工知能（深層学習）における情報処理、物流・資源割当の最適化を高速に行う **量子コンピューティング**技術

パラメータや組合せの最適化は、問題が複雑になると指数関数的に計算時間が増大し、**従来技術**（例：スパコン）には**限界が存在**。  
例：人工知能（深層学習処理）への適用による学習パラメータの高速処理、物流・交通・配置の最適化、通信ネットワークにおける周波数帯域の動的割当、IoT・計算機のリソース割当等の有限資源の最適配分、集積回路設計や工場の工程設計等のものづくり利用など

IoT・ネットワークのセキュリティを向上させる **量子暗号・量子中継**技術

**従来技術**（公開鍵暗号）は、量子技術が発達すれば合理的な時間内に解読可能になるとの中長期的な**限界が存在**。  
例：インターネットの電子決済やキャッシュカード取引・銀行間の秘密通信等のセキュリティ向上など

既存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、蓄電・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もたらす **量子センサ**技術

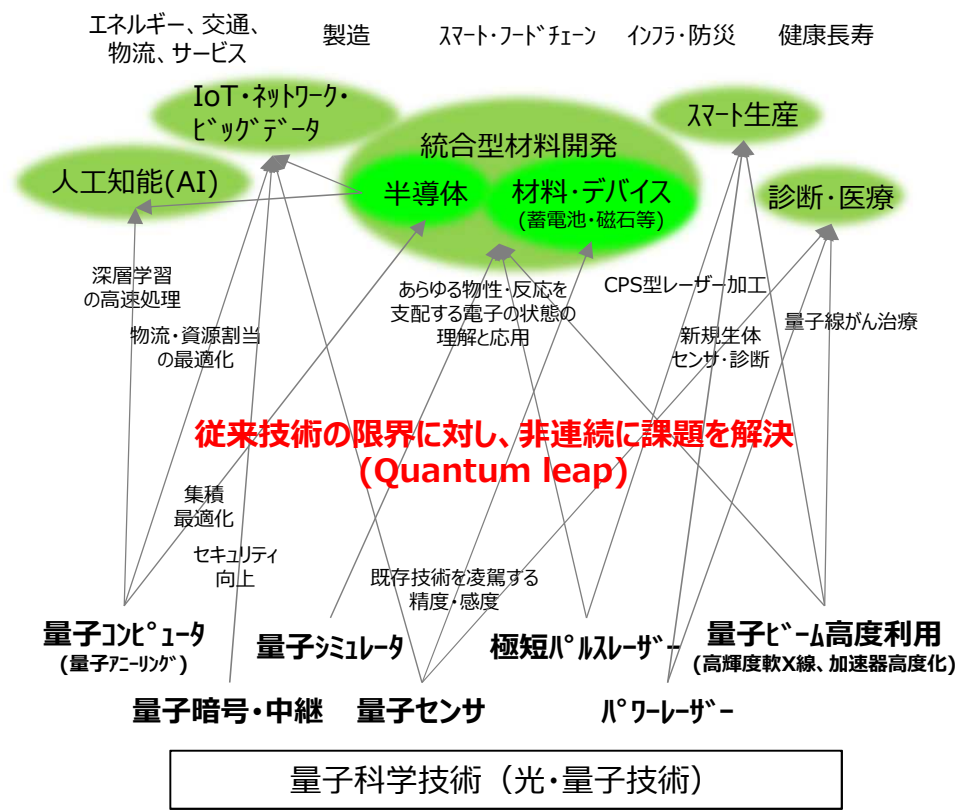
**従来技術**は、古典力学の活用を基本とし、精度・感度に一定の**限界が存在**。

次世代の材料・デバイス産業に向け、量子レベルの物性・反応を支配する電子状態の解明に至る、**高輝度放射光**や**極短パルスレーザー**技術、それらによる電子状態の解明を基に現在のスパコンの限界を超え、新物質の探索を行う **量子シミュレータ**技術

**従来技術**では、電子状態の鮮明な観察に**限界が存在**。また、新物質の探索は、**従来技術**（例：スパコンによる量子化学計算）では、近似が避けられず、現実的な計算量に**限界が存在**。

材料・デバイス製造に汎用されるレーザー加工に革命をもたらし、加工に係る高強度レーザー場と物質反応という非線形・非平衡系現象の学理解明に基づき、高品位・省エネ加工を狙う、CPS（サイバー・フィジカル・システム）型の**次世代レーザー加工技術**

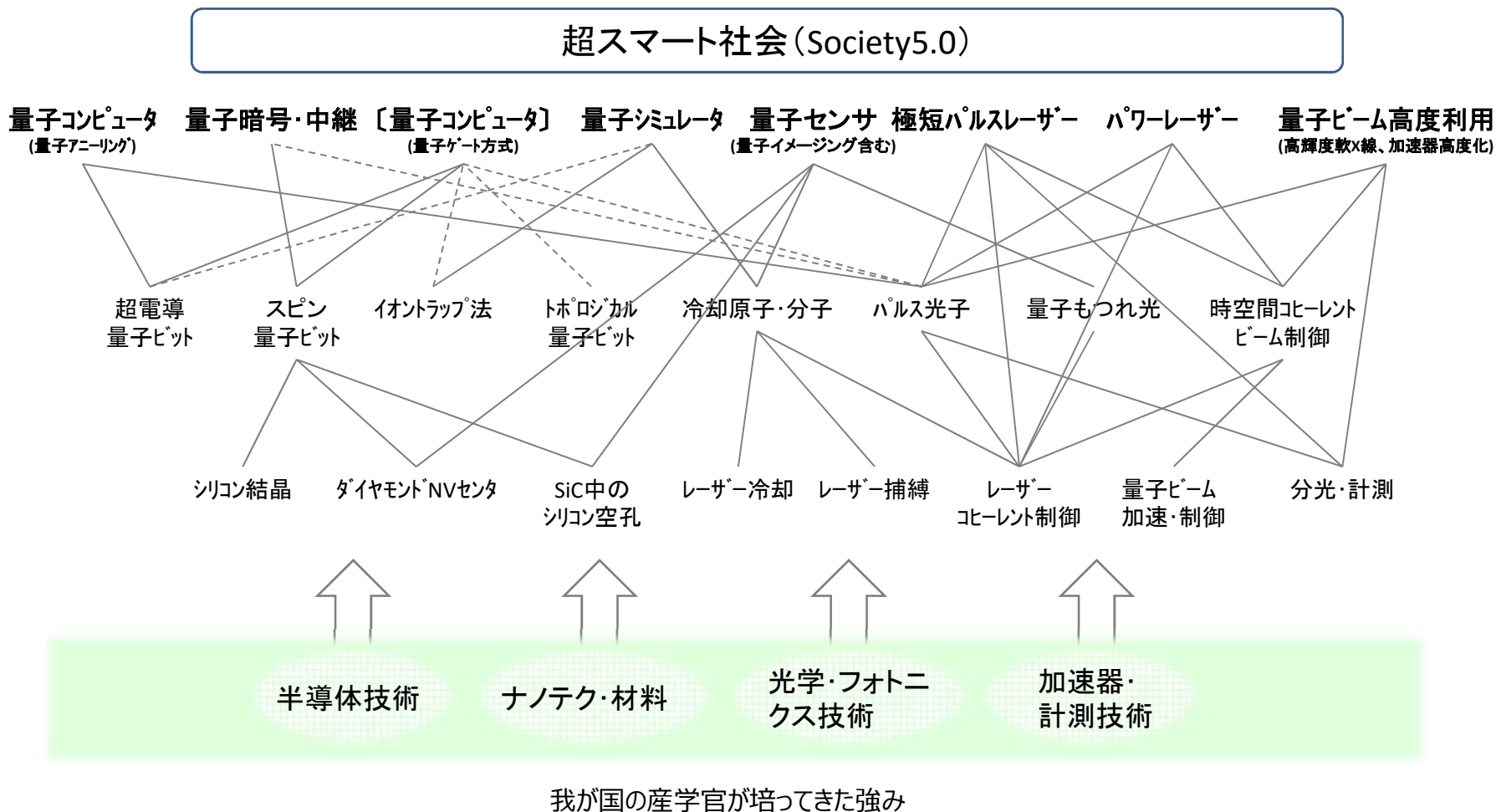
**従来技術**は、ものづくり現場に広く導入されているが、なぜレーザーで物が切れるかは科学的に難解な現象で解明されておらず、最適な加工条件の探索やCFRPといった難加工材料の加工に**限界が存在**。



注：「量子コンピュータ」(量子ゲート方式)は、ビッグデータの超大規模検索、ネットワーク暗号解読等に係る素因数分解といった超並列計算に大きなポテンシャルを有するが（スパコンを遥かに凌駕する超高速・超省エネ）、短中期的には基礎基盤研究が重要。ただし、上記技術と基盤要素技術が共通なため、上記技術への投資からの展開・派生が十分あり得る。

## 量子科学技術（光・量子技術）に共通する要素技術

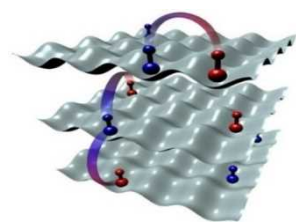
- 量子科学技術（光・量子技術）の今後を担う重要な要素技術の多くが共通あるいは関連しており、超スマート社会の実現に向けて、我が国の産学官が培ってきた半導体・ナノテク・光学技術等の強みを発揮することが可能



(参考3)

# 量子科学技術（光・量子技術）の展開例（物性や反応の量子レベルの理解と応用）

○ あらゆる物性や反応(触媒、化学、生体等)は電子が支配。以下のようなコア技術の実現は、サイエンスにもイノベーションにも高インパクトの革新を引き起こし、我が国の材料・デバイス等の「ものづくり」の高付加価値化を牽引することが期待

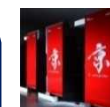


## 量子シミュレータ

物性・反応の理解を基に  
新物質・機能等の「探索」を行う

・電子の関わる複雑な相互作用を  
量子多体系のダイナミクスとして模擬実験可能

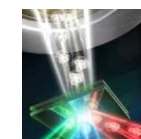
量子化学計算（第一原理計算）は、近似が避けられない上、現状のスパコンでは限界



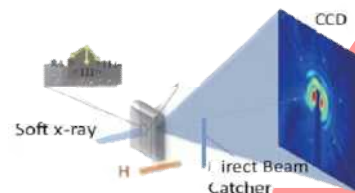
スパコン「京」

## 量子センサ

・物質、生体の超微弱量（磁気、電場、温度、光等）をセンシング



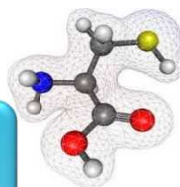
革新的な量子科学技術  
フロンティア



## 高輝度軟 X 線光源

電子が支配する  
「物性」と「反応」に迫る

・電子状態の軌道構造(s, p, d, …)、  
磁気構造、トポロジカル構造等を解明



## 極短パルスレーザー

電子が支配する  
超高速の「反応」に迫る

・電子の軌道の変化に伴う超高速の反応  
(化学反応等)を極短時間分割で追跡