

# 量子技術イノベーション戦略の検討の方向性

---



平成31年 4月

## I. 量子技術を取り巻く状況

### (1) 国内外の諸情勢の変化

- 現在、世界的に経済・社会構造のパラダイムシフトの只中にあり、労働・資本集約型から、知識集約型の経済・社会への移行が競争力の源泉（五神、十倉）
- 我が国は社会像「Society 5.0」を掲げ、データ駆動型社会の実現を目指す中、人工知能(AI)やデータの活用等は今後の経済・産業政策上、極めて重要。量子技術は鍵となる基盤技術（小林、十倉）
- グローバル化する世界において、先端技術やイノベーションをめぐる国際競争が激化する中、我が国と諸外国の強み・競争力を分析・評価し、国際連携・協力と競争環境を使い分けた戦略的な取り組みが急務（小林、五神）

### (2) 量子技術をめぐる諸外国の動向

- 量子技術は、将来の経済・社会に革新をもたらす源泉・革新技術として位置づけ（十倉）
- 米国、欧州、中国等を中心に、諸外国においては「量子技術」を国の重点技術領域として明確に位置づけ、近年、研究開発投資を大幅に拡充するとともに、研究開発拠点形成や人材育成等の戦略的取組を展開（小林、CRDS）
- 特に量子コンピュータのハードの開発は欧米が先行し、我が国はそれに依存する状況（小林）

### (3) 量子技術をめぐる我が国の動向

- 第5期科学技術基本計画や統合イノベーション戦略で「量子技術」の重要性を指摘しているものの未だ政府全体の将来を見通した中長期戦略は未策定
- このため、現在、関係府省が、それぞれ個別に研究開発等の取組を推進（内閣府、総務省、文科省、経産省）
- 我が国は、量子技術について長年にわたる基礎研究の蓄積により、基礎理論や基盤技術やアイデア等に優位性。一方で、技術の実用化・産業化（システム化）に向けた取組に課題・遅れ（小林、中村）

### (4) 国を挙げて量子技術に取り組む必要性

- 量子技術について諸外国の投資が急速に拡大する中、このままでは、我が国は量子技術の発展において諸外国に大きな後れを取り、将来の国の成長や国民の安全・安心の基盤が脅かされない状況
- 国として将来の産業・ビジネス構造の変化等を見据え、「Society 5.0」の実現に向けて、技術開発にとどまらず、産業・イノベーションまで念頭に置き、10～20年の中長期的視点に立った新たな国家戦略を策定すべき
- その上で、本戦略に基づき、我が国の総力を結集して取組を強化・拡充すべき（小林、五神、荒川）

## II. 基本方針

- 量子技術は、我が国の経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる可能性を持つ重要技術であり、確固たる技術基盤の確立と、我が国が抱える課題解決や将来の成長・発展等に結びつけることが不可欠。このため、これらを「量子技術イノベーション」として明確に位置づけ、国を挙げて総合的かつ戦略的に推進（小林、荒川、伊藤）
- その際、「量子技術」の範囲を狭義に限定するのではなく、量子技術に関連する技術やその周辺技術等も幅広く包含した上で、AI戦略、バイオ戦略及び量子戦略を相互に密接に連携させつつ、整合的に推進すべき（小林、五神、荒川、十倉、寒川、中村）
- また、量子技術は、それぞれの技術領域毎に、その社会実装に向けた時間軸（タイムスパン）が異なることを踏まえ、10～20年程度の中長期、5～10年程度を見通した短中期の両側面から全体を俯瞰した上で、具体的な取組方策（研究開発、人材育成、産業化・社会実装等）を検討すべき（小林、五神、伊藤、荒川、中村）
- さらに、予算・資源等の制約がある中で、国として推進すべき量子技術の領域を明確化、強み・競争力の確保と、国際的な連携・協調とを組み合わせた戦略的な取組が不可欠（小林、五神、伊藤、荒川、十倉）

### <量子技術イノベーションの範囲>

（例：量子に関する科学及びそれを応用する技術（量子技術）を基に、関連する技術（周辺技術等含む）を幅広く包含した上で、それらの成果を産業化・事業化等に結びつける革新(イノベーション)）

## III. 量子技術イノベーションが拓く社会像

- 知識集約型社会へのパラダイムシフトが急速に進む中、我が国が掲げる社会像「Society 5.0（データ駆動型社会）」の実現に向けて、「量子技術イノベーション」を通じて達成する将来の社会像を提示
- これに向けて、中長期・短中期の両側面から、我が国の強みを分析した上で、鍵となる重要な技術領域や具体的な推進方策等を特定（小林、五神）

### <社会像の例>

- ① 生産性革命の実現（データ駆動、新産業創出、製造業改革）（小林、五神）
- ② 健康・長寿社会の実現（伊藤、荒川）
- ③ 国民の安全・安心の確保（サイバーセキュリティ強化）（伊藤、佐々木）

## IV. 量子技術イノベーション実現に向けた戦略の方向性

### 1. 技術開発戦略

- 量子技術に関する各技術領域は、それぞれ産業化や社会実装に向けた時間軸（タイムスパン）が異なることを踏まえ、中長期・短中期的な観点から国内外動向や我が国の強み等を分析・評価した上で、重点的に推進すべき技術領域等を特定することが必要（小林、五神、伊藤、荒川、十倉、中村）
- また、量子技術そのものに加えて、これらと既存（古典）技術とを補完的に組み合わせつつ、技術体系の全体像を俯瞰した上で、実用化や社会実装の時間軸（タイムスパン）を検討することが重要（例：量子コンピュータと現在の（古典）コンピュータ）（伊藤、荒川、寒川、中村）

#### (1) 主要な技術領域

- 量子技術の基盤となる技術領域として、以下を主要な技術領域として設定（全委員）
- 各主要技術領域について、国内外の研究開発動向や我が国の強み・競争力、我が国将来の産業・イノベーションへの寄与等を分析・評価し、重点的に推進すべき技術領域等を特定

#### <主要技術領域>

- ① 量子コンピュータ・量子シミュレーション（小林、五神、伊藤、荒川、寒川）  
（量子コンピュータ（超電導等のゲート型、アニーリング型）のハード・ソフト、量子シミュレータ等）
- ② 量子計測・センシング（小林、荒川、寒川）  
（固体量子センサ、量子もつれセンサ、光格子時計、量子慣性センサ等）
- ③ 量子通信・暗号（小林、佐々木）  
（量子暗号技術、量子ネットワーク、衛星量子通信・暗号、量子中継等）

#### (2) 量子融合技術領域（仮称）

- 本戦略で掲げた社会像の実現に向けたイノベーションを加速するため、量子技術と関連分野の技術（既存技術含む）とを融合・連携させた新たな技術体系を構築・特定（下記は領域例）し、重点的な取組を推進（全委員）
  - ・ 量子AI（量子機械学習）（小林、伊藤、荒川）
  - ・ 量子バイオ（量子生命）（五神、荒川）
  - ・ 量子マテリアル（トポロジカル物質、スピン流材料（量子スピントロニクス）等）（十倉、寒川）
  - ・ 量子セキュリティ（量子暗号、秘密分散、秘密計算、耐量子-公開鍵暗号等）（佐々木）



# 量子技術イノベーション戦略(案)の検討の方向性④

## (3) 量子inspired技術(仮称)

- 量子技術的な発想や手法を既存技術(古典コンピュータ等)に取り込んだ革新的技術開発が進展(例:古典アニーリングマシン、光コンピュータ等)
- こうした技術体系を「量子inspired技術」と明確に位置づけ、戦略的な取組を推進(荒川、佐々木、寒川、中村)

## (4) 基礎基盤的な研究開発

- 量子技術は未だ発展途上の技術体系であり、長期的視野に立ったサイエンススペースでの研究等を着実に推進(小林、五神、十倉)
- その際、量子技術そのものに加えて、我が国の強みを分析・評価した上で、これらを支える基盤技術、周辺技術や関連技術も包含した裾野の広い基礎基盤研究を推進することが重要(五神、伊藤、荒川、十倉、中村)

## 2. 国際戦略

### (1) 国際協力の戦略的展開

- 我が国の国際優位性を確保しつつ、グローバル連携強化の観点から、量子技術に関する高い研究・技術水準等を有する国との間で多国間・二国間の協力枠組みを構築するとともに、政府・大学・研究機関等の間での具体的研究協力(共同研究の実施、国際会議の開催)等を推進(五神、荒川、十倉)

### (2) 安全保障貿易管理の徹底

- 先進技術である量子技術を巡る諸外国の研究開発競争等が激化しており、技術流出の防止等に向けて、外国為替及び外国貿易法等に基づく安全保障貿易管理体制の一層の強化に向けた取組を推進(五神、伊藤)

## 3. 産業・イノベーション戦略

### (1) 量子技術イノベーションに関する拠点形成

- 欧米を中心に量子技術に関する拠点形成が急速に進展。我が国の強みを持つ技術領域を中心に、人材・技術等を結集し、中長期的視野に立った基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、知財管理等に至るまでを一体的に担う拠点(量子技術イノベーション拠点(仮称))を形成(小林、五神、伊藤、荒川、十倉、中村)
- 国立研究機関や大学等を中核に、関連する企業が集積する拠点として設計することが重要(例:量子コンピュータ(ハード(超電導等)・ソフト(ゲート・アニーリング))、固体量子センサ、量子慣性センサ、量子セキュリティ)

# 量子技術イノベーション戦略(案)の検討の方向性⑤

## (2) 量子技術に関する産学官コンソーシアムの形成

- 我が国企業による量子技術に対する大型投資には時間を要することに鑑み、産学官をはじめ多様なステークホルダーが集い、量子技術の産業利活用等を検討・模索する場（コンソーシアム）を創設（小林、荒川、十倉、中村）
- 量子技術に関して、協調領域でのオープンイノベーションを促進する仕組み（エコシステム）が重要（小林）

## (3) 創業・投資環境の整備

- 量子技術に関する新たな発見・発明等を基にしたベンチャー創出を促進する環境等を整備・推進（小林、荒川）

## 4. 知財・国際標準化戦略

### (1) 知的財産戦略

- 量子技術に関する知的財産について、関係機関における柔軟なオープン・クローズド戦略を強化（五神、荒川、中村、十倉）

### (2) 国際標準化戦略

- 国際的な競争力強化・市場獲得に向けて、技術的優位性を活かした国際標準化の戦略的取組を推進（荒川）

## 5. 人材戦略

### (1) 優れた研究者・技術者の育成・確保

- 優れた若手研究者・技術者の育成・確保に向けて、量子技術及び関連する技術分野を含め、長期的視野に立って大学・研究機関におけるポストの確保、産業界との人材流動の促進、人材育成拠点の構築、量子技術関連の教育プログラム等の充実・強化を推進（五神、伊藤、荒川、十倉、中村）
- 「AI戦略」とも適切に連携させつつ、量子技術に関する知識を習得する機会を充実・確保（小林、五神、中村）

### (2) 頭脳循環の推進

- 国際連携・協力を促進・強化する観点から、国内の若手研究者等の海外派遣、海外からの優れた研究者・技術者の招聘・確保等を戦略的に推進（五神、伊藤、十倉）

### (3) 中等教育段階からの人材育成（量子ネイティブ（仮称）の育成）

- 量子技術に関連した中等教育段階での教育環境の充実や、科学コミュニケーションを展開（米国で取組例）

# 參考資料

# 「量子技術イノベーション」の範囲(案)

セキュリティ

情報処理

ライフサイエンス

計測・センシング

環境・エネルギー

量子セキュアクラウド

量子機械学習

組合せ最適化

脳磁・心磁計測

超小型・超高感度MRI

高精度加速度計

エナジーハーベスト

量子インターネット

量子認証

高精度・大規模量子化学計算

バイオセンサー

量子標準

革新的触媒

省電力デバイス

量子セキュリティ

量子AI

量子生命技術

量子マテリアル

量子通信・量子暗号

量子情報処理

量子計測・センシング

量子暗号鍵配送

ハイブリッド・分散システム

超伝導量子コンピュータ

ダイヤモンドNVセンタ

超偏極NMR

量子通信

量子ソフトウェア

イオントラップ量子コンピュータ

量子シミュレーション

光格子時計

原子干渉計

量子メモリ・量子中継

光量子コンピュータ

量子アニーラ

スピン量子コンピュータ

アト秒レーザー

もつれ光センサ

エレクトロニクス  
フォトニクス  
スピントロニクス

耐量子コンピュータ暗号

量子inspiredアルゴリズム

イジング型コンピュータ

量子inspired

量子情報理論による情報理論の再定式化

量子状態制御

量子コヒーレント制御

量子ビット実装

量子アルゴリズム

光波制御技術

核磁気共鳴

トポロジカル物質

超伝導

量子制御・モデリング

誤り訂正技術

単一光子源・検出器

量子もつれ

微細加工技術

Siフォトニクス

ダイヤモンドNVセンタ

スピン流・スピン波

極低温エレクトロニクス

イオントラップ

レーザー冷却

ボース・アインシュタイン凝縮

マルチフェロイクス

強相関電子系

量子物性・材料

量子エレクトロニクス

量子情報科学・工学

コンピュータ工学

材料科学

半導体工学

量子光学

原子・分子・光科学

量子計算理論

統計力学

量子化学

物性物理学

量子力学

社会実装

技術領域

基盤技術

基礎学理



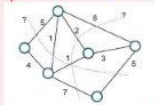
# 量子融合技術領域 量子AIのイメージ

- 人工知能の高度化は、Society 5.0実現の重要な鍵。AIの実社会への展開が次々となされているが、今後、この発展を支えていくためには、次世代コンピューティング技術の発展も重要な要因となる。
- 量子コンピュータのキラーアプリ候補として、機械学習に注目が集まっている。将来、量子コンピュータの高度化が実現した際、優位性が出る可能性が指摘されている。世界に先駆けて重点的な研究開発を実施し、世界をリードする。

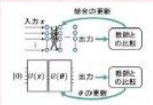
## 教師なし学習・教師あり学習

- ✓ QAOAや量子回路学習を計算基盤とした、教師なし学習、教師あり学習、強化学習の発展を目指し実応用に資する取り組みを展開する
- ✓ 画像診断や、材料開発・創薬などの分野への期待

大規模かつ複雑なデータに基づいた人工知能の実現に貢献



MAXCUT問題（教師なし機械学習）の例

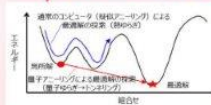


ニューラルネットワークと量子機械学習の対比

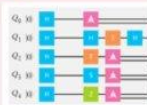
## 新アルゴリズム開発

- ✓ 人工知能の高度化・高精度化に繋がる新しいアルゴリズムを開発
- ✓ 量子コンピュータ等を用い、開発されたアルゴリズムの量子優位性などの性能を評価・検証を実施

量子コンピュータのAIへの適用先の拡大を実現



イジングマシンとの解を導く原理



量子コンピュータのゲート操作イメージ



## システムアーキテクチャ

- ✓ 人工知能の情報処理の中で、量子コンピュータが得意とする箇所を特定
- ✓ 量子コンピュータと現代コンピュータの計算資源の最適化を実施

人工知能の高度化・高精度化に貢献



連携イメージ

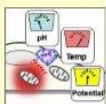
経済・社会の発展の鍵であるより高速かつ精度の高い人工知能を実現し、競争力の高い産業の創出や日本の抱える諸課題の解決に貢献

# 量子融合技術領域 量子生命技術のイメージ

- 近年の量子技術の発展に伴い、量子技術を生命科学に応用するとともに、量子論により生命現象を解明し、得られた知見を医療技術や環境技術の革新につなげることを目指した研究が開始されつつある。
- 超早期診断・治療や抗老化など健康・長寿社会の実現、生物の持つ「量子もつれ」や「重ね合わせ」等の量子効果を模倣した高機能材料の創出など、重要な革新がもたらされる可能性があり、世界に先駆けて取り組む必要がある。

## 生体ナノ量子センサ

- ✓ ナノ量子センサを生体細胞に適用
- ✓ 核やミトコンドリアなど局所のpH、温度、電流等、これまで計測できなかった細胞内部および細胞組織のパラメータが取得可能に



1細胞精度の診断  
(イメージ)

## 量子もつれ光イメージング

- ✓ 量子もつれ光をイメージングに活用
- ✓ 従来光のS/N比を超える高感度・高精細な計測により毛細血管等の細部観察が可能に



眼底検査 (イメージ)

老化状況や、がんの発症前予測など新たな診断が実現

眼科疾患や動脈硬化の超早期診断が実現

## 量子バイオミメティクス

- ✓ 生物の高い嗅覚や高効率の光合成・呼吸を実現する「量子効果」の仕組みを解明
- ✓ 麻薬探知犬を超える嗅覚センサや、人工光合成の開発の手掛かりに

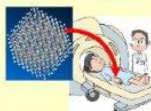


「重ね合わせ効果」により100%のエネルギー伝達を実現する光捕集タンパク質

麻薬・爆発物の高感度検知や人工光合成の実現

## 超偏極核磁気共鳴技術

- ✓ 核スピンの方向をそろえたスピン偏極化合物をMRI検査に活用
- ✓ 感度が従来法の千倍以上に向上。MRI検査時間の短縮やリアルタイム代謝イメージングが可能に



革新的MRI診断技術

MRI検査の健診への導入や、がん治療の効果判定が実現

量子技術  
量子もつれ、重ね合わせ、トンネル効果 etc...

×

生命科学

構造生物学、細胞生物学、発生生物学 etc...

量子生命技術により、健康長寿社会の実現や環境技術の革新に貢献！

# 量子融合技術領域 量子マテリアルのイメージ

- ナノテクノロジーの発展により、シングルナノオーダー、1原子層レベルの制御が可能になることで、従来観測不可能であった量子現象へもアクセスが可能になりつつある。
- これら現象の制御により、量子情報処理等の革新のみならず、エネルギー変換やエレクトロニクス等の革新など現在の技術レベルでは到達が不可能なレベルの機能の実現が期待される。
- そこで、量子技術イノベーションをフィジカル面から支えることで、Society 5.0の実現に貢献する研究領域として量子マテリアルの研究開発に取り組む必要がある。

## トポジカル量子物質

- ✓バルクでは絶縁体だが表面は金属である新規物質トポジカル絶縁体を活用
- ✓高効率なスピン-電荷変換やロバストな量子ビットの実現の手掛かりに



トポジカル絶縁体



スピンゼーベック効果

## エネルギー変換材料

- ✓スピン-電荷変換による熱電効果であるスピンゼーベック効果を活用
- ✓安価で大量作製が可能な熱電変換や単一デバイスで熱、振動、光等からエネルギーを獲得する多源環境発電が可能に

→ **エネルギーハーベスティング技術を用いたIoTセンサの実現**

量子技術  
量子位相、量子相関  
etc...  
×  
材料科学  
二次元物質、トポジカル物質、ナノ材料etc...

## スピントロニクス材料

- ✓多数スピンからなるナノ粒子スキルミオンを制御
- ✓損失ゼロの電荷輸送による量子回路や低電流駆動が可能な情報担体が可能に



スキルミオン

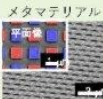
→ **超低消費・大容量メモリの実現**

## フォトニクス材料

- ✓新概念を用いた高効率レーザー実現の可能性
- ✓量子ドットからの単一光子発光
- ✓メタマテリアルを利用した光学限界を超える素子、電磁波遮蔽



トポジカルなフォトニック結晶



メタマテリアル

→ **省エネ光源や次世代量子通信の実現**

量子マテリアル技術により、Society 5.0の実現に貢献！



# 量子融合技術領域 量子セキュリティのイメージ

- 近年、量子コンピュータでも解読困難な耐量子-公開鍵暗号の標準化や現在の公開鍵認証基盤からの移行作業に関する検討が活発化している。また、クラウドサービス向けの秘密分散や秘密計算も実用化されつつある。
- これらの技術を量子暗号と融合することにより「超長期の機密性、改竄耐性、可用性、計算機能を有する量子セキュリティ技術」を実現でき、将来にわたり堅牢なセキュリティを持ったサイバー空間を構築することができる。

## 量子セキュアクラウド

- ✓ 量子暗号、秘密分散、秘密計算、耐量子-公開鍵暗号を統合
- ✓ 将来にわたり盗聴や改竄を防ぎ、秘匿性を保ったまま計算を実行



事業継続性のあるデータバックアップや安全なデータ2次利用を実現し、社会保障費の削減や新サービスを創出

## 適応的物理レイヤ暗号

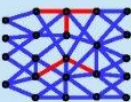
- ✓ 光や電波の量子的、電磁氣的性質に基づく無線暗号通信技術を開発
- ✓ 通信路の状況に応じて最適な電磁波帯域を用いて情報理論的に安全な暗号通信を実現



IoT機器やドローン等が、いつでもどこでも高速かつ安全な通信ができるサービスを提供

## 光・量子ネットワーク暗号化

- ✓ 量子暗号、秘密分散、ネットワーク理論を統合
- ✓ 複数のノードとリンクで分散的に符号化・暗号通信する光・量子ネットワーク暗号化技術を開発



サービス停止攻撃耐性や可用性に優れたスケーラブルな秘匿通信ネットワークを実現

## 量子暗号

不確定性原理、物理乱数

×

## 情報セキュリティ

現代暗号、計算機科学、ネットワーク理論

## 量子セキュア移動通信ネットワーク

- ✓ 衛星、ドローン、コネクテドカー等の移動体に量子セキュリティ技術を実装
- ✓ モビリティ、接続性、安全性に優れた移動通信技術を開発



宇宙、成層圏、高高度から地上網まで網羅する大容量かつ安全な移動通信ネットワークを実現

量子セキュリティ技術により、永続的セキュリティを持ったサイバー空間を構築！



# 量子技術イノベーション拠点(仮称)のイメージ

- 欧米では、量子技術に関する産学連携の拠点形成が急速に進展（オランダ・デルフト工科大（QuTech）、カナダ・トロント大、英国オックスフォード大等）国内外から優れた研究者を引き付ける舞台装置として機能。
- 我が国の国際競争力の確保・強化の観点から、強みを持つ技術領域を中心に人材・技術等を結集し、基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、知財管理等に至るまで一貫通貫で行う国際的な連携拠点（国際ハブ）を形成すべき

## 拠点形態（案）

### オープンプラットフォーム型

- 大学・研究機関と企業間の連携を深化・強化する **オープンプラットフォーム型**  
(例：東北大cies)

### 機関独立運営型

- 大学・研究機関の傘下に置くものの、自由度の高い独立した運営を確保する **拠点形成型**  
(例：WPI拠点)

### 機関内センター型

- 研究機関の傘下で、研究部門の一組織として発展・強化した **機関内センター型**  
(例：理研・産総研等の戦略センター)

## 拠点要件（案）

- 我が国が国際的評価の高い **卓越した研究者** を有し、かつ **国際競争力の高い技術** を有する領域であること
- 我が国の大学・研究機関・企業等が高いポテンシャルを有し、将来の **産業・イノベーションの飛躍的な発展** が期待される技術領域であること
- **海外の企業等から大きな投資** が期待される又は **海外の優れた人材が集積** することが期待される技術領域であること
- 人材・技術・予算等を **集積することが有益かつ効率的** な技術領域であること 等

## 拠点スキーム（案）

- 事業期間は **10～15年程度**（明確なマイルストーンを設定し、評価結果に応じて変更又は中止）
- **官民双方の出資・負担による産学連携拠点** として整備（ステージゲートを設け、段階的に民間投資の割合を拡大）
- 国に **事業全体を統括するボードを設置** するとともに、ハンズオン支援等を通じたきめ細やかな進捗管理を実施
- 各拠点に拠点長を置き、管理・研究・知財・事業化など、必要な **拠点機能を整備し、マネジメント体制を構築**

## 拠点（例）

- 量子コンピュータ開発拠点（ハードのシステム化）
- 量子ソフトウェア（量子AI）拠点
- 量子生命（パイオ）研究拠点
- 量子マテリアル研究拠点
- 量子慣性センサ拠点
- 量子セキュリティ拠点等



