

資料4
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
量子科学技術委員会(第20回)
令和元年6月6日

第3回イノベーション政策強化推進のための有識者会議
「量子技術イノベーション」(令和元年5月16日(木))
資料4より

量子技術イノベーション戦略 (中間整理案)



令和元年 5月

I 量子技術を取り巻く状況

- (1) 国内外の諸情勢の変化
- (2) 量子技術をめぐる諸外国の動向
- (3) 量子技術をめぐる我が国の動向
- (4) 国を挙げて量子技術に取り組む必要性

II 基本方針

III 量子技術が拓く社会像

IV 量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略

1. 技術開発戦略

- (1) 主要技術領域
- (2) 量子融合イノベーション領域
- (3) 量子inspired技術・準量子技術
- (4) 基礎基盤的な研究

2. 国際戦略

- (1) 国際協力の戦略的展開
- (2) 安全保障貿易管理の徹底

3. 産業・イノベーション戦略

- (1) 「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）（仮称）」の形成
- (2) 「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設
- (3) 創業・投資環境の整備

4. 知的財産・国際標準化戦略

- (1) 知的財産戦略
- (2) 国際標準化戦略

5. 人材戦略

- (1) 優れた研究者・技術者の育成・確保
- (2) 頭脳循環（ブレインサーキュレーション）の推進
- (3) 量子ネイティブ（Quantum Native）の育成

参考資料①

参考資料②

量子技術を取り巻く状況

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・社会への移行が国際競争力の源泉
- 我が国は、将来の目指すべき社会像の一つとしてデータ駆動型社会の実現を掲げており、人工知能（AI）やデータ連携基盤等は今後の経済・産業政策上、極めて重要。それに向けて、量子技術は鍵となる基盤技術と位置づけ
- 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・協力と国際競争を使い分けた戦略的な取組が急務

(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・社会に大きな変革をもたらす源泉・革新技術と位置づけ
- 米国、欧州、中国等を中心に、諸外国においては「量子技術」を戦略的な重要技術として明確に設定し、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
- 特に量子情報科学の取組が急速に拡大しており、量子コンピュータ（ハード）開発は欧米が大幅に先行

(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
- 現在、関係府省（内閣府、総務省、文科省、経産省）が、それぞれ個別に研究開発等の取組を推進
- 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、基礎理論や知識・技術基盤等に強み・優位性。一方、量子コンピュータをはじめ、技術の実用化・産業化（システム化）に向けた取組に課題

(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かねない状況
- 国として将来の産業・ビジネス構造等を見据えた上で、目指すべき社会像の実現に向け、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、関連する取組を抜本的に強化・拡充すべき

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、確固たる技術基盤を確立するとともに、これらを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。この考え方を「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。その際、「量子技術」の範囲を狭義に限定せず、量子技術に関連する技術や周辺技術等も幅広く包含することが重要
- また、「統合イノベーション戦略推進会議」で検討が進められている「AI戦略」、「バイオ戦略」と「量子技術イノベーション戦略」を相互に密接に連携させつつ、整合的に推進していくことが極めて重要。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
- さらに、量子技術は、個別技術毎に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、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、関連技術や周辺技術の波及や社会実装等も念頭に置いた計画的・戦略的な取組が重要

<量子技術イノベーションの範囲>

- 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（周辺技術を含む）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の一つである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、我が国の強みや競争力を分析・評価した上で、鍵となる重要な技術領域や具体的な推進方策等を特定

<社会像（案）>

① 生産性革命の実現

(例：量子コンピュータ技術・量子シミュレーション技術による情報通信・製造・金融・運輸・製薬等の幅広い産業・社会分野で新たな価値創造、量子マテリアル技術を活用した素材・材料、省エネ・創エネ等の産業に革新)

② 健康・長寿社会の実現

(例：量子計測・センシング技術を用いた治療法・創薬、早期診断・モニタリング等で生命科学・医療に飛躍的発展をもたらし、医療・医薬品産業に革新)

③ 国民の安全・安心の確保

(例：量子コンピュータ技術、量子通信・暗号技術による機密性・完全性等を持つセキュリティ環境の構築による国家安全保障と産業競争力強化に寄与)

IV. 量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略

1. 技術開発戦略

- 量子技術に関する個別技術は、それぞれ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の研究開発動向や我が国の強み・競争力を分析・評価した上で、重点を置くべき技術領域等を特定することが必要
- その際、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、技術体系全体を俯瞰した上で、技術の特性に応じた研究開発の重点化や、段階的な実用化等の実現に向けた取組を展開することが重要（例：量子コンピュータと現在（古典）コンピュータ、量子暗号と公開鍵暗号（古典暗号））

（1）主要技術領域

- IIIで掲げた社会像の実現に向けて、量子技術の基盤となる技術領域として以下の4つを「主要技術領域」に設定
- 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・イノベーションに対する寄与・貢献等を分析・評価した上で、国として特に重点的に推進すべき技術領域（重点技術課題）及び中長期的観点から着実に推進すべき研究領域（基礎基盤技術課題）を特定
- それぞれの技術領域の特性に応じて、中長期・短中期を見据えた戦略的取組を展開

<主要技術領域>

- i) 量子コンピュータ・量子シミュレーション
- ii) 量子計測・センシング
- iii) 量子通信・暗号
- iv) 量子マテリアル（量子物性・材料）

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、重点技術課題を対象として、中長期的を見据えて今後10年間に取組むべき具体的方策を示した「技術ロードマップ（仮称）」を作成
- ・ 国は、ロードマップに基づき、重点技術課題を対象として、国直轄プロジェクトや研究ファンディング等を通じた研究開発の支援を推進
- ・ 国は、重点技術課題の対象とする技術開発の進捗に応じて、民間から投資を呼び込む形での産学連携・官民協働による応用・実用化に向けた研究開発等支援を推進
- ・ 国は、基礎基盤技術課題を対象として、中長期的観点からファンディングを通じた研究の支援を推進 等

量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略②

i) 量子コンピュータ・量子シミュレーション

- 量子コンピュータは、現在のスパコンで非現実的な時間スケールを要する一部問題を、短時間かつ超低消費電力で計算することが可能となり、産業・社会のあらゆる分野で飛躍的なイノベーションをもたらす革新技術
- 欧米、中国等を中心に、政府、企業等を挙げた開発競争が激化し、研究開発投資も大幅に拡大しており、我が国としても戦略的な取組が不可欠

<重点技術課題>

ゲート型量子コンピュータ（超伝導量子ビット）、量子ソフトウェア（ゲート型、アニーリング型）、量子シミュレーション（冷却原子）、アニーリング型量子コンピュータ（超伝導量子ビット）

<基礎基盤技術課題>

シリコン量子ビット、イオントラップ、光量子コンピュータ 等

ii) 量子計測・センシング

- 次世代の技術基盤として、磁場、温度、加速度等を超高感度で計測可能な量子計測・センシングをめぐる国際競争が激化しており、欧米を中心に研究開発投資が大幅に拡大
- 量子コンピュータの実用化に向けた波及効果（スピリアウト）としても、比較的早期の段階で実用化・社会実装が期待される技術領域であり、我が国としても競争力の高い研究開発等に戦略的に取り組むことが必要

<重点技術課題>

固体量子センサ、量子慣性センサ・光格子時計、量子もつれ光センサ

<基礎基盤技術課題>

アト秒レーザー、重力センサ、量子スピントロニクスセンサ 等

iii) 量子通信・暗号

- 量子コンピュータの実用化等により、公開鍵暗号技術が解読される可能性が生じ、各国が将来の国家安全保障等に関わる脅威との認識の下、唯一、理論的安全性が証明されている量子通信・暗号に関する研究開発等を展開・加速
- 我が国としても、政府・企業等を挙げて、競争力の高い技術の研究開発・実用化等に向けた戦略的な取組が必要

<重点技術課題>

量子暗号技術、量子通信技術（光ファイバー、衛星通信）

<基礎基盤技術課題>

量子メモリ・量子中継技術 等

量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略③

iv) 量子マテリアル（量子物性・材料）

- 量子マテリアル（量子物性・材料）は、我が国が長年にわたる基礎・応用研究の積み重ねにより、理論・実験・材料開発等で、世界的にも強み・競争力を保持。一方、欧米を中心に国際競争が激化している状況
- 本技術領域は、我が国の産業・企業等のすそ野が広く、また、量子コンピュータや量子計測・センシングなど、幅広い量子技術の飛躍的発展を支える基盤技術であり、中長期的観点から研究開発等を推進することが不可欠

<基礎基盤技術課題>

トポロジカル量子物質、スピントロニクス材料 等

(2) 量子融合イノベーション領域（仮称）

- 量子技術の各主要技術領域について（1）で掲げた方策に基づき戦略的な取組を推進。一方、こうした我が国が強みを持つ技術領域を基盤として、本戦略で掲げた社会像実現に向けた検討を加速するため、量子技術と関連技術（既存技術含む）とを融合・連携させた、我が国独自の新たな技術体系を構築することが極めて重要
- これを「量子融合イノベーション領域（仮称）」として明確に位置づけ、我が国が世界を先導・主導すべく、最重点領域として戦略的取組を強力に推進・展開
- 本領域として、我が国が特に強み・競争力を保持し、かつ、早期の実用化・社会実装を実現することで、我が国の産業・イノベーションへの多大な寄与・貢献が期待される以下の3つの技術領域を特定・設定

<量子融合イノベーション領域（案）>

- i) 量子AI（量子古典ハイブリッド計算）
（例：教師あり・なし学習、アルゴリズム、システムアーキテクチャ開発 等）
- ii) 量子生命（量子バイオ）
（例：生体ナノ量子センサ、量子もつれ光イメージング、超偏極核磁気共鳴技術 等）
- iii) 量子セキュリティ
（例：量子セキュアクラウド、光・量子ネットワーク暗号等）

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、量子融合イノベーション領域毎に、関連技術も含めた技術体系の全体像を俯瞰した上で、中長期的観点から、今後10年間に取り組むべき戦略的かつ具体的方策を示した「中長期ロードマップ（仮称）」を作成
- ・ 国は、「中長期ロードマップ（仮称）」に基づき、民間から投資を呼び込む形での、国直轄の大規模な研究開発プロジェクトや大型の研究ファンディング等を通じた重点的な研究開発等支援を推進・展開 等

(3) 量子inspired技術・準量子技術（仮称）

- 我が国では、量子技術的な発想や手法を既存（古典）技術に取り込んだ独自の革新的な技術開発が進展（例：古典アニーリングマシン等）。量子コンピュータの実用化には中長期の時間スケールを要すると見込まれる中、こうした技術体系を「量子inspired技術・準量子技術」と明確に位置づけ、研究開発や社会実装等の取組を展開

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、産学連携・官民協働による革新的技術開発等について、研究ファンディング等を通じた支援を推進 等

(4) 基礎基盤的な研究

- 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ベースでの研究開発等を着実に推進
- 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的（例：微細解析、微細加工技術や光波制御・光デバイス技術、極低温エレクトロニクス、解析・評価技術）な研究や、最先端機器等の基盤施設・設備の整備等を推進することが重要

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整備・構築するとともに、政府・大学・研究機関等のあらゆるレベルにおいて、具体的協力を推進していくことが重要

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、米国・EUとの多国間協力の枠組みや、欧米各国を中心に二国間での具体的な協力枠組みに合意・推進
- ・ 国・大学・研究機関等は、特定の国との間で、国際共同研究に対する共同ファンディングの仕組み整備や合同シンポジウムの開催等を推進 等

(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・推進が重要

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、外国為替及び外国貿易法等に基づく安全保障貿易管理を推進
- ・ 国は、大学・研究機関等に対して、「安全保障貿易に係る機微技術管理ガイダンス」を一層周知・徹底等
- ・ 大学・研究機関等は、同法に基づく内部の安全保障輸出管理規定・就業規則等の整備を徹底 等

量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略⑥

3. 産業・イノベーション戦略

(1) 「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）（仮称）」の形成

- 欧米を中心に量子技術に関する拠点形成が急速に進展しており、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。我が国では、国際的にも認知・評価されるトップクラスの研究拠点が欠如している状況
- 量子技術に関して我が国が強み・競争力を保持する技術領域を中心に、国際競争力を確保・強化する観点から、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拠点（量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）（仮称））を形成することが極めて重要かつ有益
- 国立研究機関や大学等を中核に、企業等から積極的な投資を呼び込み、有機的な連携・協力体制を構築

<拠点の要件（案）>

- ・ 国際的評価の高い研究者を有し、かつ国際競争力の高いコア技術等を有する技術領域
- ・ 大学・研究機関等が高いポテンシャルを有し、産業・イノベーションの飛躍的発展が期待される技術領域
- ・ 国内外の企業等から投資が期待される、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
- ・ 人材・技術・予算等を集積化することが有益かつ効率的な技術領域

<拠点形態（案）>

- ・ 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
- ・ 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
- ・ 研究機関の傘下で、研究部門の一組織として発展・強化したセンター型

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、上記要件等に基づき、大学・研究機関等を主体とする国際的な研究開発拠点「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）（仮称）」形成を推進
- ・ 国は、同拠点について官民を挙げた研究開発拠点とするため、税財政・制度面での支援策等を検討・推進 等

(2) 「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設

- 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）を設けることが極めて有益
- こうした場を通じて、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）を構築・形成

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、特定技術領域毎に、アカデミア・産業界による主体的な「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設を支援 等

(3) 創業・投資環境の整備

- 欧米では、大企業が量子技術に対して巨額の研究開発投資を行うとともに、国際的な認知度の高いベンチャー企業が多数発足。一方、我が国では大企業やベンチャーの本格的参画に至らない状況
 - このため、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整備が極めて重要
- <具体的方策(案)>**
- ・ 大学・研究開発法人等は、出資機能拡大等を踏まえ、優れた技術シーズを基にしたベンチャー創出を支援
 - ・ 国は、量子技術を基にしたベンチャー創出拡大に向け、起業家育成・スタートアップ支援等の拡大を検討 等

4. 知財・国際標準化戦略

(1) 知的財産戦略

- 量子技術に関して、巨大IT企業等がオープン・クローズドを使い分けた戦略的な知的財産マネジメントを展開
- 国内外を問わず、産学連携・オープンイノベーションの取組が急速に拡大する中、我が国としても、大学・研究機関等におけるオープン・クローズド戦略の強化が重要

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、大学・研究機関等における研究開発成果等について、オープン・クローズド戦略に基づく、関連技術も含めた柔軟な権利化・利活用等を促進
- ・ 国は、大学等が有する優れたシーズと、企業・ベンチャー等のニーズとのマッチング・事業化等を支援 等

(2) 国際標準化戦略

- 欧米や中国を中心に、量子コンピュータや量子通信・暗号をはじめ、関連技術も含めた国際標準化に向けた検討が加速。我が国としても、技術的な優位性を活かした国際標準化に係る戦略的な取組を展開していくこと必要

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、大学・研究機関等と連携し、研究開発段階からの一体的な国際標準の獲得を支援
- ・ 国は、標準化が必要な技術の特定や標準策定、認証に至るまでの支援体制構築や、国際標準化機関（ISO）等への案件提案や審議参画が可能な人材の育成・確保を推進 等

5. 人材戦略

(1) 優れた研究者・技術者の育成・確保

- 量子技術をめぐる国際競争が激化する中、量子技術関連分野の人材層の質と厚みを飛躍的に高めるため、大学等における教育・研究環境等を充実・強化し、優れた若手研究者・技術者を戦略的に育成・確保していくことが重要
- また、「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の充実・確保を検討

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、研究者・技術者の戦略的な育成確保に向けたロードマップを作成し、大学等の人材育成を支援
- ・ 国は、大学・大学共同利用機関と連携・協力し、量子技術や関連する分野を幅広く含めた専攻や講座の設置・改編など、専門的教育を提供する教育拠点や環境整備を検討
- ・ 大学等は、量子技術に関する体系的・共通的な教育プログラム（教材・カリキュラム等）を開発し、各大学における学部・大学院教育等での活用・実施や、インターネット等を活用した教育を検討・推進 等

(2) 頭脳循環（ブレインサーキュレーション）の推進

- 優れた人材の確保に向けた国家間での競争が加速する中、我が国の研究力を維持・強化し、将来の産業競争力等を確保するため、国内の研究者の確保や、海外の優れた研究者・技術者の招聘・確保等が極めて重要

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、大学・研究機関等と連携し、海外から優れた研究者・技術者等を招聘・確保するための取組を支援・強化
- ・ 国は、大学・研究機関等と連携し、若手研究者や有望な学生等が海外の研究機関に所属して、研究開発に参画する機会を確保するとともに、その後の大学等での積極的な登用を促進 等

(3) 量子ネイティブ（Quantum Native）の育成

- 将来を担う研究者の確保等に向けて、早期の段階から量子技術に関して高い知識・技能を持つ「量子ネイティブ（Quantum Native）」の育成や、学校・社会教育等を通じた量子技術への興味関心を喚起する取組が重要

<具体的方策（案）>

- ・ 国は、中等教育段階における理数系教育の充実や、関連する最先端の研究を学ぶ機会等の提供を推進
- ・ 国は、大学・研究機関・企業等と連携し、量子技術に関する科学コミュニケーション活動を展開 等

參考資料

量子技術を取り巻く諸外国の動向

- 米欧中を中心に海外では、「量子技術」は経済・社会に大きな変革をもたらす重要な技術と位置づけ、政府主導で研究開発戦略を策定。近年、研究開発投資額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を戦略的に展開。
- 各国の大手IT企業も積極的な投資を進めており、ベンチャー企業の設立・資金調達も進んでいる。

○政府の取組



- ✓ 2018年9月、国家科学技術会議が「量子情報科学の国家戦略

概要」を策定

- ✓ 2018年12月、2019年より5年間で最大13億ドル(約1,400億円)規模の投資に関する法律が成立(DOD,CIA除く)
- ✓ DOEやNSFを中心に、10か所程度、研究開発や人材育成を行う拠点を形成



- ✓ 2017年6月、欧州委員会の有識者会議が研究開発戦略を策定

- ✓ 2018年から10年間で、10億ユーロ(約1250億円)規模のプロジェクトを開始
- ✓ 加えて、各国が独自予算で研究開発を実施
- ✓ 特に、蘭・英等は、国際的な研究拠点を形成。民間投資を呼び込んでいる



- ✓ 「科学技術イノベーション第13次五カ年計画(2016年)」において、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として位置づけ、積極的に投資

- ✓ 「量子情報科学国家実験室」を安徽省合肥市に約70億元(約1,200億円)かけて建設中(2020年完成予定)
- ✓ 衛星通信を用いた量子暗号など、暗号・通信分野での取組にも注力

○代表的な企業の取組

<大手IT企業>

Google

量子人工知能研究所を設立 (2013年～)

IBM

5年間で30億ドルの研究投資 (2014年～)

Microsoft

Station Qを設立 (2005年～)

阿里巴巴 (アリババ)

中国科学院に量子計算実験室を設立 (2015年～、3千万元/年)

<ベンチャー>

D-Wave

The Quantum Computing Company

世界初の商用量子アニーリングマシンを販売。2億ドルを資金調達。

rigetti

超伝導型量子コンピュータを開発。約1.2億ドルを資金調達。

注)為替レートは、発表時の当該月の我が国財務大臣が公示する基準外国為替相場及び裁定外国為替相場をもとに算定

世界的な競争が激化する中、量子技術をどのように推進するか岐路に立たされている

我が国の量子技術の取組の現状

- 量子技術は、第五期科学技術基本計画において、初めて重要な基盤技術として位置づけられたが、国全体を俯瞰した量子技術戦略は未策定。各府省が、それぞれ個別に研究開発を実施
- 我が国は、基礎理論や基盤技術等に優位性を持つが、技術の実用化・産業化（システム化）に向けた取組に課題

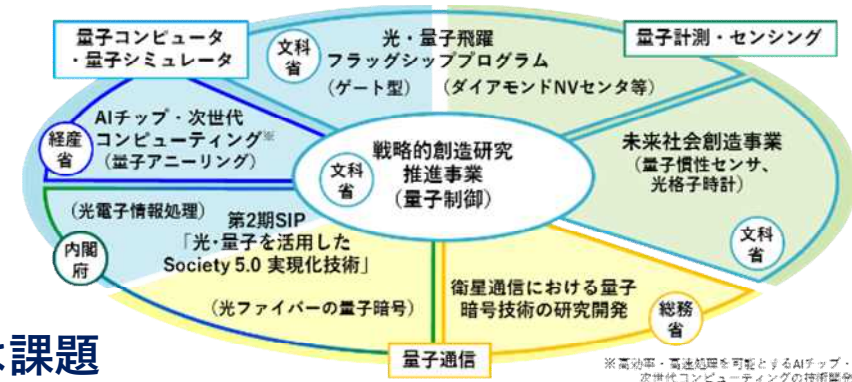
- 第5期科学技術基本計画(平成28年1月閣議決定)において、「光・量子技術」として初めて位置付けられる

「統合イノベーション戦略」(平成30年6月閣議決定)

光・量子基盤技術分野は、従前の技術では不可能であったことを可能とし、社会に変革をもたらす革新的な技術分野であることから、欧米や中国で積極的に研究開発が進められている。我が国としても、Society 5.0の実現のため、・・・我が国が強みを有する光・量子基盤技術の国際競争力を維持・向上させるべく取り組む。

- 各府省が、それぞれ個別に研究開発を実施

- ✓ 内閣府 量子暗号（光ファイバー）、光電子情報処理
- ✓ 総務省 量子暗号（衛星通信）
- ✓ 文科省 量子情報処理（ゲート型）、量子計測・センシング
- ✓ 経産省 量子情報処理（量子アニーリング）



- 我が国は、基礎理論等で優位性を持つが、技術のシステム化は課題

1998 西森秀稔教授（東工大）らが量子計算手法として「量子アニーリング法」を論文発表

2010 カナダのベンチャーD-Wave社が世界初となる商用機を発表



1999 中村泰信・蔡兆申氏（当時NEC）が超伝導回路による量子ビットを論文発表

2016 IBM社が世界初となるゲート型量子コンピュータのクラウド公開



このままでは諸外国に大きな後れを取り、将来の国の成長の基盤が脅かされない

「量子技術イノベーション戦略」が対象とする技術の範囲(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

エネルギーハーベスト

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

社会実装

量子セキュリティ

量子AI

量子生命技術

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

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

量子マテリアル

基盤技術

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

基礎学理

量子力学

主要研究領域① 量子情報処理

- ゲート型量子コンピュータ、量子シミュレーションの実現には技術的課題があるものの、**新奇材料や薬剤開発を効率化**することや**セキュリティ技術の向上**などに貢献し、産業・社会のあらゆる分野で飛躍的なイノベーションをもたらす
- 量子アニーリングは、**実問題の解決に向けた動きが企業を含めて活発**。得意とする組合せ最適化問題を解くことで、**交通渋滞の解消、工場生産プロセスの最適化**などを通じ、生産性向上に貢献

ゲート型量子コンピュータ（超伝導量子ビット）

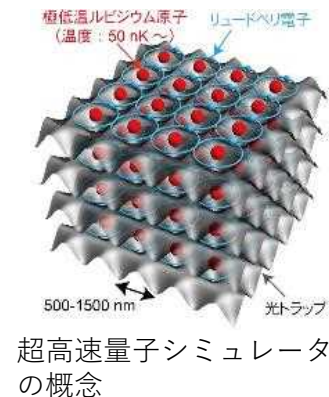
- ✓ 量子力学的な状態を情報処理の単位（量子ビット）として利用したコンピュータ
- ✓ 日本は超伝導量子ビット製作に世界に先駆けて成功。高品質の超伝導量子ビットの製作・制御に**高い技術力を保持**
- ✓ 高品質の超伝導量子ビットによる**大規模化**が課題
- ✓ 大規模超並列計算により、因数分解、検索、量子深層学習などの問題を**短時間かつ超低消費電力で計算が可能となる見通し**



量子ビットの冷却・制御装置

量子シミュレーション（冷却原子）

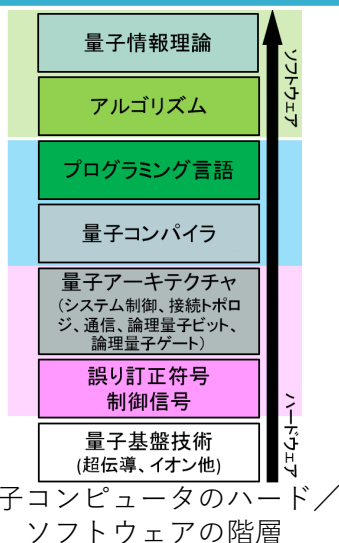
- ✓ 量子多体系のふるまいや相互作用に特化した問題について、**人工的な多数の粒子の量子状態を制御してシミュレーション実験**を行う技術
- ✓ 我が国は、**強相関電子系の理論的研究で世界をリード**
- ✓ 複数原子間の**長距離相互作用等の実装**に関する課題がある
- ✓ **量子多体系物理、高温超伝導の理論的解明**に期待。光や冷却装置などの**周辺技術の産業への波及**に期待



超高速量子シミュレータの概念

量子ソフトウェア

- ✓ 量子コンピュータで計算を行うために必要となるOSやシステムアーキテクチャ、アルゴリズム、アプリケーションの研究開発
- ✓ 大学・研究機関に加え、**ベンチャー企業を中心にゲート型・アニーリング型の双方で、開発が激化**
- ✓ 機械学習や量子化学計算などの**量子計算の高速化・大規模化により、産業・社会のイノベーションに期待**



量子アニーリング

- ✓ 量子ビットの「重ね合わせ」と量子ビット間の結合を利用し、**最適な組合せを導くことに特化したコンピュータ**
- ✓ **東工大西森らが理論提唱した量子アニーリングと超伝導量子ビットの技術を基にカナダのベンチャーが商用機を開発**
- ✓ 国内企業により、**量子技術にinspireされたハード開発が活発化**
- ✓ 交通問題などの**実社会問題の解決に向けた取組みが先行**



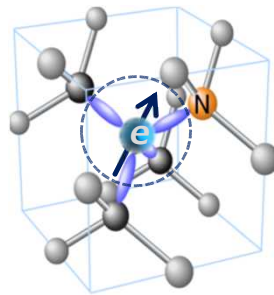
D-Wave社(カナダ)が開発した量子アニーリングマシン

主要研究領域② 量子計測・センシング

○量子計測・センシングは、量子状態のもろさを逆手にとり、従来技術を凌駕する感度・精度を実現する技術。生命・医療技術の向上による健康長寿社会、防災等の安全安心な社会の構築に貢献

固体量子センサ

- ✓ 電子スピン状態を利用した**高感度の磁場センサ**。従来の磁場計測法（ホール素子）に比べ、**高感度（10万倍）、高空間分解能（100倍程度）を室温下**で実現
- ✓ 日本は**材料作製技術**に強みを有している。基礎からデバイス開発まで一貫した研究開発が必要
- ✓ **脳磁・神経磁場**の計測の高度化により**ヘルスケア、安全走行、脳疾患の予防・治療**などへ期待



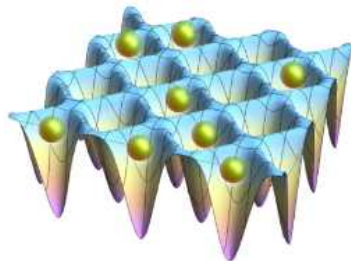
量子慣性センサ

- ✓ 原子の波としての性質を利用した**加速度や回転速度を測るセンサ**。現在広く利用されているリングレーザージャイロより**2桁の精度向上**が期待
- ✓ 日本は**光技術のレベルが高い**一方で、原理実証に留まっており、**実用に向けた小型化・可搬化**が重要
- ✓ GPS信号が無くても自分の位置を確認して目的地に到達できる、例えば、**完全自動運転車、自律型無線潜水機（AUV）**が実現可能



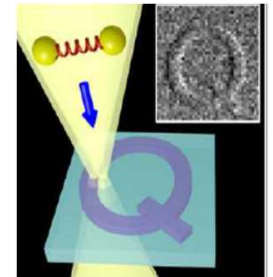
光格子時計

- ✓ レーザー光を活用し、**従来の原子時計に比べて、数桁高い精度で時間を測定**できる時計
- ✓ 日本の研究者が**原理を提案**。日本の光格子時計の**精度・連続稼働時間は世界をリード**。更なる**小型化・可搬化・耐環境性向上**が重要
- ✓ **新しい秒の定義の候補**
- ✓ 微弱な重力変化の計測による**地震・火山に関わる防災**や物理定数の恒常性の検証等に役立つことに期待



もつれ光センサ

- ✓ 2つの光子が離れていても影響を与える**量子もつれ状態**を利用した**高感度センサ**
- ✓ 日本は**高品質で大強度のもつれ光子源**を実現しており、実用化に向けたアプリケーションの原理実証が行われている。
- ✓ 細胞の非侵襲観察や網膜などの**組織厚みの精密計測装置**、化学プラントでの**薬品製造管理**などに必要な**高感度の小型赤外分光装置**が実現可能

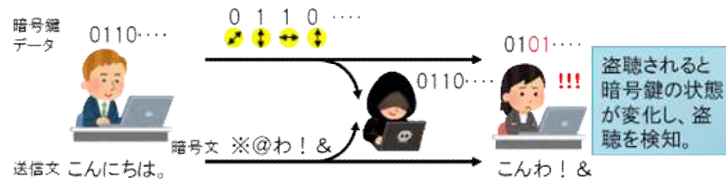


主要研究領域③ 量子通信・暗号

○量子暗号により、絶対に破られない暗号サービスが実現されるため、セキュリティの危殆化の懸念なく高秘匿情報をインターネット上でやり取りすることのできる社会が実現される。

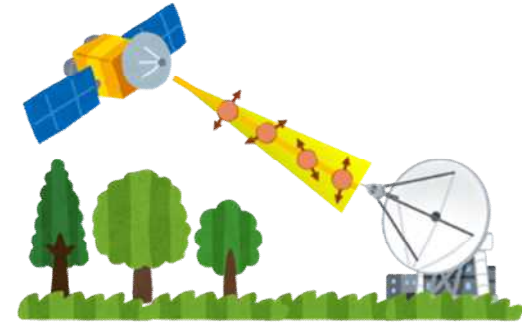
量子暗号|光ファイバー

- ✓ 暗号鍵データを光子に乗せ、光ファイバーで量子鍵を配送。あらゆる盗聴攻撃を検知し、情報理論的安全性が証明されている唯一の暗号方式
- ✓ 日本の強みは、高性能な量子暗号装置。一方で、低価格化やアプリケーションとの融合が課題
- ✓ データ保存や秘匿計算を合わせた我が国独自のシステムを開発し、社会実装につなげる事が重要



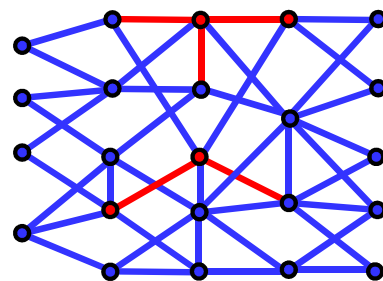
量子暗号|衛星通信

- ✓ 衛星間や衛星-地上局間で量子鍵配送を実施し、大陸間で高秘匿通信を可能とする技術
- ✓ 日本でも、光通信分野では世界最小となる超小型衛星を開発し、予備実験を実施
- ✓ 本技術の実現に向け、光子伝送の高速化、高精度レーザー捕捉追尾技術等の開発を行うことが重要



量子通信

- ✓ 光子の重ね合わせや量子もつれ状態などの伝送・制御により、超高効率の通信を実現する技術
- ✓ ネットワークアーキテクチャや集積化に向けた開発、超高効率通信に向けた量子受信機の研究開発が課題
- ✓ 超高効率通信以外にも、量子情報を量子コンピュータへ伝送する手段などへの応用も期待



量子中継

- ✓ 量子暗号は光の損失により100km程度の通信距離が限界。現在、物理的に盗聴者を侵入させない古典的手法で中継しており、理論上安全な中継技術は未確立
- ✓ 日本は、半導体技術やダイヤモンド結晶成長技術など、量子中継デバイスの集積化の強みとなり得る技術がある。
- ✓ 一方、実現には伝送速度、誤り訂正などの課題があり、長期的視点から取り組む必要がある

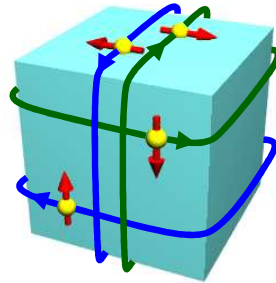


主要技術領域④ 量子マテリアル

- 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

トポロジカル量子物質

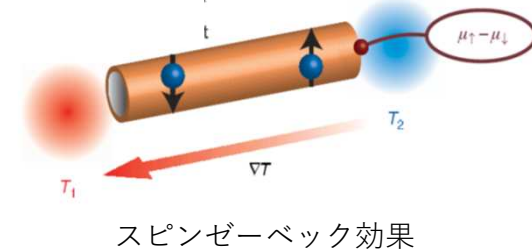
- ✓バルクでは絶縁体だが表面は金属である新規物質トポロジカル絶縁体を活用することで、高効率なスピン-電荷変換が可能となる
- ✓また、トポロジカル超伝導体のマヨラナ粒子は、ロバストな量子ビットとして期待されており、世界中で研究が実施されている
- ✓超低消費電力デバイスや新方式の量子コンピュータの実現に貢献



トポロジカル絶縁体

エネルギー変換材料

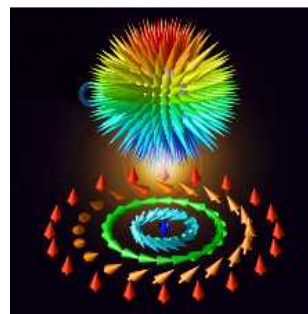
- ✓スピン-電荷変換による熱電効果であるスピントリック効果を活用
- ✓安価で大量作製が可能な熱電変換や単一デバイスで熱、振動、光等からエネルギーを獲得する多源環境発電が可能に
- ✓エネルギーハーベスティング技術を用いた無電源IoTセンサの実現に貢献



スピントリック効果

スピントロニクス材料

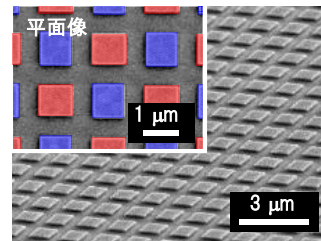
- ✓多数スピンからなるナノ粒子であるスキルミオンは、少ない電流で駆動できる情報担体となりうるとして研究が進展中
- ✓損失ゼロの電荷輸送による量子回路や低電流駆動が可能な情報担体が可能に
- ✓超低消費・大容量メモリの実現に貢献



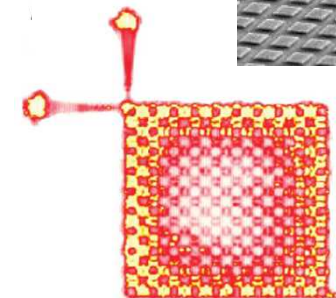
スキルミオン

フォトンクス材料

- ✓量子ドットからの単一光子発光や、トポロジカルなフォトリック結晶を用いるなど、新概念を用いた高効率レーザーの開発が進行
- ✓また、メタマテリアルを利用することで、光学限界を超える素子や電磁波遮蔽を実現
- ✓省エネ光源や次世代量子通信の実現に貢献



メタマテリアル



トポロジカルなフォトリック結晶 21

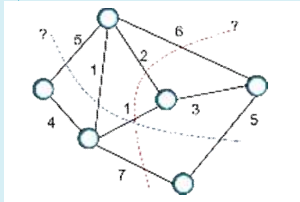
量子融合イノベーション領域① 量子AIのイメージ

- 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。

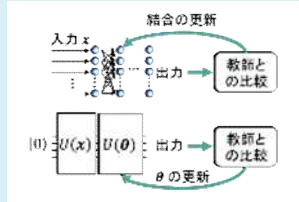
教師なし学習・教師あり学習

- ✓ 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を基にした人工知能の実現に貢献



MAXCUT問題（教師なし機械学習）の例

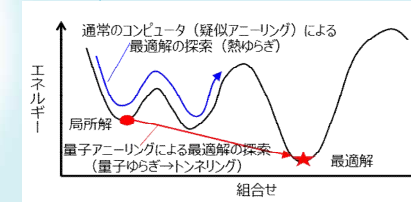


ニューラルネットワークと量子機械学習の対比

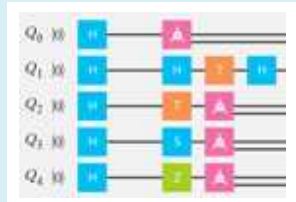
新アルゴリズム開発

- ✓ 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



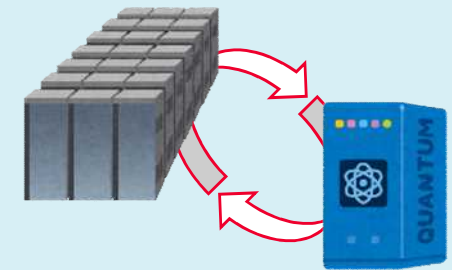
量子コンピュータのゲート操作イメージ

量子技術
量子アルゴリズム、
量子コンピュータ etc...
×
情報科学
機械学習、システムアーキテクチャ etc...

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

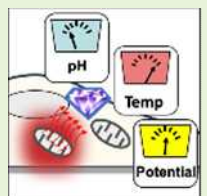
経済・社会の発展の鍵であるより高速かつ精度の高い人工知能を実現し、競争力の高い産業の創出や日本の抱える諸課題の解決に貢献

量子融合イノベーション領域② 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

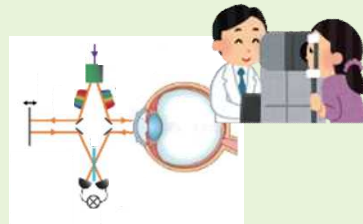
- ✓ ナノ量子センサを生体細胞に適用
- ✓ 核やミトコンドリアなど局所のpH、温度、電流等、これまで計測できなかった細胞内部および細胞組織のパラメータが取得可能に



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



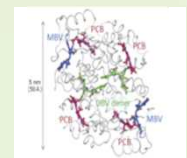
眼底検査 (イメージ)

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

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

麻薬・爆発物の高感度検知や人工光合成の実現

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！

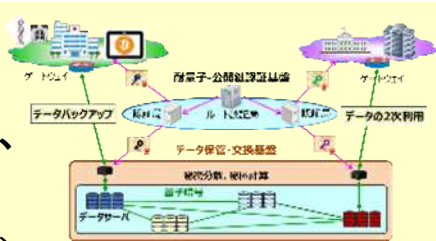
量子融合イノベーション領域③ 量子セキュリティのイメージ

- 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

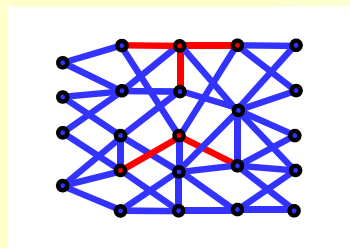
IoT機器やドローン等が、いつでもどこでも高速かつ安全な通信ができるサービスを提供



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）

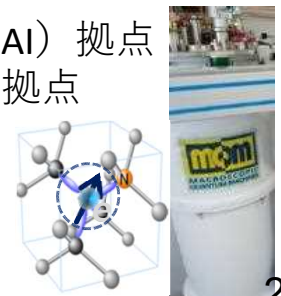
- 我が国が国際的評価の高い卓越した研究者を有し、かつ国際競争力の高い技術を有する領域であること
- 我が国の大学・研究機関・企業等が高いポテンシャルを有し、将来の産業・イノベーションの飛躍的な発展が期待される技術領域であること
- 海外の企業等から大きな投資が期待される又は海外の優れた人材が集積することが期待される技術領域であること
- 人材・技術・予算等を集積することが有益かつ効率的な技術領域であること 等

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(バイオ)研究拠点
- 量子材料研究拠点
- 量子慣性センサ拠点
- 量子セキュリティ拠点
等



人材育成のイメージ

- 量子技術をめぐる国際的な競争が激化する中、我が国の量子技術の研究開発等に携わる研究者・技術者層は、諸外国と比べて極めて薄い状況であり、国際的な研究開発競争から大きな後れをとる恐れ
- 量子技術関連分野の人材層の質と厚みを飛躍的に高めるため、高等教育段階での教育や研究環境等の充実を戦略的に実施する必要がある

取組のイメージ

ロードマップ
を作成

- ✓ 主要技術領域毎に、どのような人材が必要になるかを明らかにし、研究者・技術者の戦略的育成・確保に向けたロードマップを作成
(特定が必要な項目例) 習得が必要な学問や技術、拠点の要件、育成・確保に必要な方策 等

拠点整備・プログラム開発

- ✓ 国は、大学・研究機関等と連携・協力し、主要技術領域に対応した人材育成拠点を整備
- ✓ 拠点が中心となって共通的な教育プログラム(教材、カリキュラム等)を開発

開発した教育プログラムを全国の希望する大学等へ提供

戦略的な取り組み

- <人材育成拠点>
- ✓ 開発した教育プログラムを用いて人材を育成
 - ✓ 開発した教育プログラムを活用する全国の大学と連携し、各地の大学のみでは対応できない部分をフォロー(集中講義、チューターなど)

連携

- <各地の大学・大学院>
- ✓ 拠点が開発した教育プログラムを、各大学における学部・大学院教育等で活用。量子技術の専門的教育を提供する環境を整備
 - ✓ 各大学等でカバーできない部分は拠点と連携して実施



