

量子技術イノベーション戦略 (最終報告)

令和2年1月21日

統合イノベーション戦略推進会議

目次

．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) 国をあげて量子技術に取り組む必要性

．基本方針

．量子技術イノベーションが拓く社会像

．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）」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) 優れた人材の育成・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

．本戦略の推進体制

．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・社会構造の歴史的なパラダイムシフトが起こる只中にあり、従来の労働・資本集約型とは異なる知識集約型へと経済・社会が不連続に移行しつつある。この転換を適切にとらえることが、我が国の国際競争力を握る鍵となっている。また、我が国の地政学的な位置づけや、ハイテク技術の覇権をめぐる国際環境が激変しており、米国や欧州、中国を中心に我が国との連携に対する期待感が高まっている状況にある。

我が国は、将来の目指すべき社会像として「Society 5.0」や「データ駆動型社会」を世界に先駆けて掲げており、特に人工知能（AI）やデータ連携基盤は経済・産業政策上、競争力の源泉となる重要な技術インフラとなっている。量子技術は、こうした重要技術インフラをさらに飛躍的・非連続的に発展させる鍵となる基盤技術である。

こうした観点から、近年、量子技術に対する国際的な注目が急速に高まっており、米国、欧州、中国をはじめ、将来の経済・社会に大きな変革をもたらす源泉あるいは革新技术として位置づけ、国をあげた取組を加速している状況にある。

あらゆる面で大変革が起こり得る世界において、先端技術の獲得やイノベーション実現に向けた国際競争が激化する中、重要な革新技术かつ基盤技術である量子技術について、我が国と諸外国の強みや競争力を精緻に分析・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必要不可欠である。

(2) 量子技術をめぐる諸外国の動向

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基盤技術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な取組を展開している。

米国では、「量子情報科学の国家戦略概要」の策定や量子情報科学に関する法律の制定により、エネルギー省（DOE）・国立科学財団（NSF）を通じた国際的な研究拠点形成の支援や、国立標準技術研究所（NIST）による国際標準化に関する産学コンソーシアム結成の支援など、毎年2億ドル以上の研究開発投資等を戦略的に展開している。

また、EUでは、「量子技術フラッグシップ最終報告書」をとりまとめ、2018年から10億ユーロ規模のプロジェクト等を開始している。また、英国、ドイツ等においても、幅広い量子技術を重要技術として位置づけた上で、国として研究開発プロジェクトの推進や研究開発拠点の形成を推進するなど、投資を大幅に拡大している。

中国では、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、量子情報科学国家実験室の整備等のために約70億元を投資している。

政府以外では、欧米や中国を中心に、巨大IT企業（Google、IBM、Intel、アリババ等）やベンチャー企業（D-Wave、Rigetti、IonQ等）が、量子コンピュータをはじめとする量子技術に積極的な投資を行っている。令和元年10月には、Googleが英科学誌Natureに独自開発した量子コンピュータを用いて「量子超越（Quantum Supremacy）」を初めて達成（量子コンピュータがスパコンをはじめとする従来のコンピュータを計算能力で上回ることを実証）したと発表するなど競争が激化している。

(3) 量子技術をめぐる我が国の動向

我が国は「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」を将来の重点技術領域として位置づけた。また、「統合イノベーション戦略」(平成30年6月閣議決定)において、社会に変革をもたらす革新的技術として、「我が国が強みを有する光・量子技術基盤の国際競争力を維持・向上」を図ることを掲げており、これらを踏まえた取組を検討、推進している。

文部科学省では、「量子科学技術(光・量子技術)の新たな推進方策」(平成29年8月)を策定し、量子情報処理、量子計測・センシング、次世代レーザーを重点領域として位置付けた。これに基づき、平成30年度より、新たな研究開発プログラム「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム(Q-LEAP)」を開始するなど、量子技術に対する重点的な支援を開始している。

一方で、これまで国全体をあげた量子技術に関する中長期戦略は策定しておらず、このため、関係府省(内閣府、総務省、文部科学省、経済産業省)が、それぞれ所掌に応じて、それぞれ個別に研究開発等の取組を行うなど、政府全体として、必ずしも整合性ある取組が行われてこなかった現状にある。

(4) 国をあげて量子技術に取り組む必要性

米国、欧州、中国をはじめとする諸外国においては、量子技術を将来の経済・社会に変革をもたらす、また安全保障の観点からも極めて重要な基盤技術として位置づけ、近年、国家としての新たな戦略等を策定するとともに、国・産業界をあげて、投資を大幅に拡充している。

一方、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・基盤技術等で強みや優位性、競争力を有しているものの、技術の実用化や産業化(システム化)等に向けた取組では諸外国の後塵を拝する分野・領域もあるなど、極めて深刻な状況にあると言わざるを得ない。

政府では、第5期「科学技術基本計画」(平成28年度)や「統合イノベーション戦略」(平成30年度)において、初めて光・量子技術を重要技術として位置づけたものの、現状では関係府省や企業が、それぞれ個別に研究開発等の取組を始めた段階にあり、必ずしも整合性のある十分な取組が行われてはいない。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・発展や国民の安全・安心の基盤が脅かされかねない状況にあることを強く認識する必要がある。

このため、国として将来の産業・ビジネス構造の変化等を見据え、目指すべき社会像を明確に設定した上で、その実現に向けて、短期的な技術開発にとどまらず、産業・イノベーションまでを念頭に置き、かつ10~20年の中長期的な視点に立った新たな国家戦略として、この「量子技術イノベーション戦略」を策定する。

今後、本戦略に基づき、我が国の産学官の総力を結集して、量子技術イノベーションを牽引すべく、その実現に向けた研究開発から社会実装に至るまでの幅広い取組を強力的に推進・展開していく。

・基本方針

量子技術は、我が国の経済・社会等を飛躍的・非連続的に発展（Quantum Leap）させる鍵となる革新技術（コア技術）であり、国として、確固たる技術の基盤確立を目指すとともに、これらを我が国が抱える様々な課題の解決や、将来の持続的な成長・発展等に確実に結びつけていくことが不可欠である。

このため、本戦略では、こうした考え方・概念を「量子技術イノベーション」として明確に位置づけ、国をあげて総合的かつ戦略的な取組を展開していく。

その際、「量子技術」を狭義の概念として限定的にとらえるのではなく、「量子技術イノベーション」という観点から、量子技術に関連する技術や、その周辺技術として不可欠な技術までも幅広く包含することが必要である。さらに、こうした「量子技術」と既存（古典）技術を相補的・相乗的に組み合わせた上で、一体的かつ総合的に推進していくことが極めて重要である。

また、統合イノベーション戦略推進会議で策定される「統合イノベーション戦略」の下、「Society 5.0」実現に向けて、「全ての科学技術イノベーションに影響する最先端の基盤的技術」とされている AI、バイオ、量子技術の3つの戦略技術により、将来の我が国にとって必要不可欠な基盤技術を確実に獲得・強化し、これからの産業・イノベーションを牽引していくという方向性が重要となる。

こうした観点から、同会議で検討・策定される「AI 戦略」、「バイオ戦略」、そして「量子技術イノベーション戦略」を国の3つの重要技術戦略と位置づけ、これにより我が国の経済・産業政策上の主要分野を網羅する形で、相互に密接に融合・連携させつつ、政府全体として整合性のある取組を強力に推進・展開していく。

さらに、「量子技術イノベーション戦略」の推進に当たっては、予算・資源等の制約がある中で、国として強化すべき量子技術の領域を明確化し、我が国の強み・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必要不可欠である。同時に、量子技術については、個別技術ごとに産業化や事業化等に向けた時間軸（タイムスパン）が大きく異なることを踏まえ、10～20年程度の中長期と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かつ戦略的な取組を推進することが重要である。

ここにおいて、本戦略では、以下の3つを基本方針として掲げる。

< 3つの基本方針 >

「量子技術イノベーション」の戦略的展開

量子技術と既存（古典）技術等の一体的・総合的推進

量子技術イノベーション戦略、AI 戦略及びバイオ戦略の融合・連携強化

< 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（周辺技術として必須な技術も含む）を幅広く包含した上で、それらの成果を産業化・事業化等に結び付ける革新（イノベーション）をいう。

・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展する中、我が国が掲げる社会像「Society 5.0」や「データ駆動型社会」の次世代の社会像の実現に向けて、「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明確に設定することが重要である。

本戦略では、こうした我が国が目指すべき将来の姿として、以下の3つの社会像を掲げる。また、この実現に向けて、次章以降で、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することとする。

<目指すべき3つの社会像>

生産性革命の実現

近い将来、急速な高齢化・労働人口の減少等が見込まれる中、技術革新を先取りし、IT（デジタル）、AI に続く「量子革命」を通じて、我が国の産業競争力の強化、これによる生産性の飛躍的向上を実現。

現在のスパコンでは非現実的な時間を要する問題を、超高速・超並列情報処理する「量子コンピュータ技術」や「量子シミュレーション技術」により、情報通信・製造・金融・運輸・製薬・化学等、幅広い産業・社会分野で新たな価値を創出。また、既存技術を凌駕する精度・感度を持つ「量子計測・センシング技術」や、極微の世界で発現する量子性を利用した「量子物性・材料技術（量子マテリアル技術）」により、素材・材料、半導体、デバイス製造、蓄電・省エネ・創エネ等での革新を実現。

健康・長寿社会の実現

我が国が諸外国に先駆けて超高齢化社会を迎える中、量子技術を用いた革新的な医療や健康管理等を通じて、世界に冠たる健康・長寿社会を実現。

従来技術に比べて超高感度・高分解能を持つ量子センサ・イメージング等の「量子計測・センシング技術」により、生命現象の本質的理解に基づく治療法・創薬や高精度な早期診断・モニタリングなど、生命科学・医療に飛躍的発展をもたらし、関連する医療や医薬品・医療機器産業等における革新を実現。

国及び国民の安全・安心の確保

個人情報をはじめ、秘匿性の高いデジタル情報が急速に増大する中、量子的な効果を応用した通信・暗号技術により、高度セキュリティ社会を実現し、国及び国民の安全・安心を確保。

近年の「量子コンピュータ技術」の飛躍的発展により、公開鍵暗号技術等が破られる可能性がある中、耐量子計算機暗号への移行に向けた対応を進めつつ、唯一の原理的安全性を持つ「量子通信・暗号技術」により、機密性・完全性等を有するセキュリティ環境を構築・高度化するとともに、産業競争力の強化にも寄与。また、既存技術を凌駕する高感度・高精度な「量子計測・センシング技術」により、他国に依存しない我が国独自の技術基盤を確立するとともに、「量子コンピュータ技術」の幅広い分野での利活用を促進し、国及び国民の安全・安心の確保に寄与。

．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

量子技術に含まれる個別技術は、それぞれ社会実装に向けた時間軸が異なることを踏まえ、中長期・短中期の両側面から、国内外の研究開発動向や国の強み・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である。

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、また関連技術や周辺技術も含めて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戦略的に展開していくことが極めて重要である。

（1）主要技術領域

量子技術イノベーションを通じて掲げた将来の社会像を達成するため、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」として設定する。

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、我が国の将来の産業・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、それぞれ中長期・短中期を見通した全体・個別方針を設定する。その上で、国として、特に重点を置いて、速やかに推進すべき技術課題（重点技術課題）及び、中長期的な観点から着実に推進すべき研究課題（基礎基盤技術課題）を特定し、設定する。

なお、ここで掲げる4つの主要技術領域は、国際的な競争が激化しており、極めて急速に技術が進展している状況にある。このため、最新動向を的確に把握するとともに、これを踏まえて柔軟に重点技術課題等の見直しを行っていくことが不可欠である。

目標：重点技術課題毎に「技術ロードマップ」を作成し、これらに基づく研究開発支援等の戦略的な取組を推進・展開

<主要技術領域>

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

<全体方針>

- ・ 各主要技術領域、及び、その中に含まれる各個別技術領域は、それぞれ技術の開発・進展の程度、産業界の関与・参入の状況、また、実用化・事業化等を通じた社会実装に向けた時間軸（タイムスパン）等が異なることから、それぞれの技術の特性に応じて、研究開発等の重点化、実用化等の実現に向けた取組を検討・推進。
- ・ 量子コンピュータ・量子シミュレーションは、ハードの開発では中長期を見通した戦略的な取組が必要な一方、ソフトウェアや量子計測・センシング、量子通信・暗号の一部技術は、既存（古典）技術との補完・連携により、短中期での実用化等が可能と見込まれることから、次に掲げる個別方針に基づき、それぞれの技術領域を対象に重点化や実用化等に向けた戦略的な取組を展開。

- ・ 同時に、量子技術と、これに関連する既存（古典）技術の双方について、スピナウト等を通じて関連・周辺技術を実用化等に結び付けるための取組を推進。

< 具体的方策 >

- ・ 国は、関係府省等の連携・協力の下、重点技術課題を対象に、関連技術・周辺技術も含めた技術体系の全体像を俯瞰した上で、今後20年程度の間官民で推進すべき具体的取組等を示した「技術ロードマップ」を作成し、本戦略と一体的に策定。
- ・ 国は、本ロードマップに基づき、国直轄のプロジェクトや研究開発ファンディング（例：内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」、文部科学省「Q-LEAP」、科学技術振興機構(JST)「未来社会創造事業」、経済産業省/新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発事業」）等を通じて、幅広い研究開発支援等を推進。
- ・ 国は、本ロードマップに基づき、上記の支援等も基にしつつ、研究開発の進捗に応じて民間から投資を呼び込み、産学連携・官民協働による研究開発や、企業等による実用化・事業化等に向けた幅広い取組等を推進・展開。
- ・ 国は、基礎基盤技術課題を対象として、中長期的な観点から、研究開発ファンディング（例：科学研究費助成事業、JST 戦略的創造研究推進事業）を通じた基礎的・基盤的な研究支援等を推進。

）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（古典コンピュータ）でも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を可能とし、産業・社会のあらゆる分野において飛躍的なイノベーションをもたらす得る革新技术である。欧米や中国を中心に政府・企業をあげた開発競争が激化しており、研究開発投資も大幅に拡大する中、我が国としても戦略的な取組が必要不可欠である。

ゲート型量子コンピュータを実現する基盤技術の中で、超伝導量子ビットは我が国発の技術であり、有力候補の一つとなっている。我が国は、高品質な超伝導量子ビットの作製・制御に関しては、世界と比肩する高い技術力を保持しており、かつ、国際的にも高く評価されている著名な研究者が存在する。

一方、諸外国では、例えば、IBM が超伝導量子ビットを用いた量子コンピュータの商用化・サービス化を進めており、Google もまた、独自開発した同型の量子コンピュータを用いて、令和元年10月に「量子超越」を達成したと論文発表するなど、ここ数年の間で急速な技術の進展が見られる。さらに、Rigetti 等のベンチャー企業や中国企業（アリババ等）の参入など競争環境が一層激化している。ただし、超伝導量子ビットについては、制御性やスケール化（大規模集積化）等の課題も指摘されている。

シリコン量子ビットは、既存の半導体集積技術を応用し、多量子ビット化に向けて注目が集まるなど、国際的にも研究開発競争が激化している。我が国では、理化学研究所が世界最高忠実度のシリコン量子ビット開発に成功している。超伝導量子ビットと比べて研究開発の規模や進捗で遅れがみられ、また同様にスケール化（大規模集積化）等が課題とされている。

いずれの基盤技術であっても、誤り耐性のあるゲート型汎用量子コンピュータの実用化には、今後20年～30年単位の時間を要すると見込まれている。Googleが論文発表した「量子超越」は、重要なマイルストーンの一つとして評価されるものであるが、汎用性のある量子コンピュータの実用化には、克服すべき課題が山積している。このため、量子コンピュータ（ハード）の実機開発に向けては、我が国の強み・競争力のある技術を基に、中長期的観点から研究開発等を推進する必要がある。また、これと並行して、誤り訂正無しの量子コンピュータ（NISQ）の実現や、関連・周辺技術の発展等、研究面・産業面で多方面の波及・展開を促進することが重要である。

量子コンピュータ向けのソフトウェア（量子ソフトウェア（アーキテクチャ、アルゴリズム、コンパイラ、アプリケーション等））は、近年、大学・研究機関に加えて、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競争が加速している。ゲート型量子コンピュータのソフトウェアについては、米国等で急速に開発が進展している。我が国は、研究者層は厚くはないが、ゲート型・アニーリング型双方で、国際的にも通用する若手研究者が存在している。今後、量子コンピュータ（ハード）の開発と並行して、研究開発や社会実装の飛躍的な進展・加速が期待される領域である。

量子シミュレーションは、多体電子系等のシミュレーションにより、物質の機能解明や新物質探索への貢献が期待されており、欧米や中国との間で研究開発競争が拡大している。我が国においても国際的に評価の高い研究者が存在する。シミュレータやこれを活かしたアニーリング型量子コンピュータとしての実用化に向けた技術開発等の見通しに加え、光技術や冷凍機等の開発など、関連産業への波及・展開が期待される技術領域として、その重要性は一層高まっている。

アニーリング型量子コンピュータは、組み合わせ最適化問題に特化した量子コンピュータとして、ゲート型と比べて実用化に向けた取組が先行している。我が国の研究者が理論提案を行ったアニーリング手法を基に、超伝導量子ビットの技術等を用いて、カナダのD-Waveが世界初の商用機を開発・発売している。実機開発では他国が先行したものの、理論面では依然、我が国に世界水準の研究者が存在する。2018年には産業技術総合研究所（AIST）が日本初の超伝導量子アニーリングマシン（50量子ビット）の製造に成功している。さらに、理化学研究所や日本電気株式会社（NEC）においても、実機開発に向けた研究開発等が展開されている。

イオントラップは、レーザー等の電磁場を用いてイオンを空間に閉じ込める技術であり、量子コンピュータを実現するための有望な物理系として注目されている。米国では、既に企業がNISQデバイスの商用化を実現している。一方、冷却イオンに関しては、量子ビットのゲート時間の長さやゲート操作に係る忠実度の低下、さらに、スケール化に向けた量子ビットの個別制御や光学素子の小型化等が課題とされている。

光量子コンピュータは、レーザーで作製した光子を用いて量子ビットを表現する技術を用いており、近年、研究開発で大きな進展が見られる。室温・大気中で動作できるため、冷凍機や真空装置等が不要とされ、また、光通信によるネットワーク化やゲートの高速動作、小型化が可能であるなどの見通しがあり、有望な技術とされる。一方、ゲート操作の困難さやゲート精度の向上等について課題が指摘されている。

<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コンピュータ）
- ・ 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

<個別方針>

- ・ ゲート型汎用量子コンピュータは、実用化に向けて20～30年単位の時間を要すると見込まれ、かつ、実機開発に向けて多額の費用を要する見込み。ただし、ハードの実機開発・保有、これに向けた基盤技術の確立は、国の研究開発力の維持・強化のみならず、産業政策の観点からも極めて重要であり、我が国企業の参入を促しつつ、国をあげた研究開発等の取組を推進。
- ・ その際、同コンピュータを実現する本命技術が未だ確定していない状況を踏まえ、多様性を確保する観点から幅広い研究開発等を推進しつつ、特に我が国が強み・競争力を持つ超伝導量子ビットに重点化する二方面の戦略的取組を推進。
- ・ また、実機開発に向けた段階的取組として、NISQ や、量子ビット作製技術（構造解析技術、微細加工技術、三次元実装技術）・希釈冷凍技術・マイクロ波制御技術・低温エレクトロニクス技術・ハードウェアアーキテクチャ等の関連技術・周辺技術の研究開発を並行して推進し、これらの短中期での実用化等に向けた取組を推進。
- ・ 量子ソフトウェア（ゲート型・アニーリング型量子コンピュータ双方）は、ハード開発と並行して、企業等の参画を得つつ、特に重点的に研究開発等を推進するとともに、スパコンや我が国独自の「量子 inspired 技術・準量子技術（以下、（3）参照）」と補完・連携させた「量子・古典ハイブリッド型」のソフトウェア開発により、短中期での実用化等に向けた取組を推進。
- ・ 量子シミュレーション（冷却原子）は、我が国が競争力を持つ素材・化学産業での活用・応用が期待される技術領域であり、企業等の参画を得て、基礎研究を基にした早期の実用化等に向けた取組を推進。
- ・ アニーリング型量子コンピュータは、外国企業に加えて、我が国企業においても、国の研究機関との連携・協力の下、研究開発等の取組が進展しており、実用化・事業化等に向けた支援を展開。

）量子計測・センシング

センサの国内・国際的な市場は一層拡大しており、次世代の基盤技術として、量子計測・センシングに対する期待は極めて高い。欧米を中心に、この領域に対する研究開発投資を大幅に拡充するとともに、我が国との間で国際的な競争が激化している。

また、量子計測・センシングの対象は、磁場、電場、温度、加速度等の多岐にわたっており、その計測方法も多様化・複雑化する状況にある。

また、量子コンピュータの実用化に向けた波及・展開（スピアウト）としても、これら量子計測・センシングは、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、事業化・市場化を見据えた国際競争力の高い研究開発等に取り組むことが極めて重要である。

固体量子センサ（ダイヤモンド NV 中心等）は、室温・大気中において、磁場、電場、温度を、それぞれ超高感度で計測できる特長があり、センサ材料の中でも特に競争が激しい分野である。我が国は、固体量子センサの材料開発で高い技術力を保持（東京工業大学、量子科学技術研究開発機構（QST）、物質・材料研究機構（NIMS）、産業技術総合研究所（AIST）等）しており、海外の研究グループに対して材料提供を行っている。計測技術でも国際的に高い技術力を有している。幅広い産業において利活用が期待される領域でもあり、我が国企業の研究開発等への参画も拡大しつつある。

量子慣性センサは、量子効果を用いて加速度・角速度を検出する技術であり、高精度の自己位置推定機器など、幅広い産業に多大な波及効果が期待されるとともに、国及び国民の安全・安心の観点からも重要なコア技術である。また、光格子時計は、従来の原子時計と比較して桁高い精度を実現する時計であり、我が国が精度・連続稼働時間において世界を圧倒的にリードしている。国際単位系の秒の再定義への貢献や、超高精度な時空間計測インフラとして波及効果が期待される領域である。いずれも、この分野で世界を牽引する研究者が存在し、かつ、我が国が世界トップレベルの技術を保持しており、これらを確実に維持・強化していくことが必要不可欠である。

量子もつれ光センサは、従来の光学顕微鏡の計測精度を上回る「量子もつれ顕微鏡」や、光コヒーレンストモグラフィー（OCT）の分解能を飛躍的に向上させる「量子 OCT」等に関する研究開発が進展している。我が国は、大学を中心に企業等と連携・協力しつつ、量子もつれ光源開発やアプリケーション利用等において、世界に先駆けた取組を展開している。これまでに、量子もつれ光を用いて、既存技術を超える分解能の実証等に成功しており、早期の実用化・事業化等に向けた研究開発や実証等に関する取組を拡大していくことが重要である。

量子スピントロニクスセンサは、外界からの刺激によって生じる物質中のスピンの変化を量子力学的効果によって検出する技術である。トンネル磁気抵抗（TMR）素子を使った磁気センサは、MRAM 等の製品開発に係る技術を基に企業の参入が進んでいる。欧米でも、ベンチャー企業が積極的に参入しつつあり、将来的な実用化・産業化に向けた模索が始まっている。また、スピン熱流センサは、熱の流れの情報の活用が可能な新しいセンサで、熱に関わる産業や社会インフラでの利用が期待される。我が国は、基本原理等で世界を牽引しており、着実に研究開発を進める必要がある。

極短パルスレーザーは、フェムト秒からアト秒の科学へと進展しており、材料物性の解明や磁気デバイスの開発など、幅広い産業分野への応用拡大につながると期待される。我が国は、高繰り返し・高強度型の双方において、レーザー光源技術等で強み・競争力を有する。欧米、中国等との競争が激化する中、将来の産業応用・利用を念頭に、我が国としても着実に研究開発を進めることが重要である。

< 重点技術課題 >

- ・ 固体量子センサ（ダイヤモンド NV 中心等）
- ・ 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 >

- ・ 量子スピントロニクスセンサ
- ・ 重力センサ
- ・ アト秒レーザー 等

< 個別方針 >

- ・ 固体量子センサは、我が国が作製技術に強みを持ち、将来的に医療・健康分野をはじめ幅広い分野での応用が期待されることから、基礎から応用・実用化に至るまでの幅広い研究開発等を重点的に推進。一方、デバイス開発等での早期活用・応用が期待されることから、企業等の積極的な参画を促進し、短中期での実用化・事業化等に向けた取組を展開。
- ・ 量子慣性センサ・光格子時計は、技術的確立の見通しが得られ、かつ、多方面での活用・応用等の展開が見込まれる技術であることから、研究開発等を重点的に推進するとともに、政府も関与する形で早期の実用化等に向けた戦略的な取組を展開。
- ・ 量子もつれ光センサは、「量子 OCT」と既存（古典）OCT と組み合わせたハイブリッド型の研究開発等を行い、また、小型・可搬な装置で化学物質の分析が可能となる赤外量子吸収分光については原理実証に向けた研究開発等を推進することにより、企業等の参画を促進しつつ、短中期での実用化等に向けた取組を展開。

）量子通信・暗号

近年、計算技術や AI、医療技術等の発展により、機密性の高い重要なデジタル情報が次々に生み出されている状況にある。こうした重要情報が漏えいした場合、社会的・経済的な影響は甚大であることから、超長期にわたる機密性と完全性の確保は、極めて重要な課題である。

ゲート型量子コンピュータの急速な進展により、現代のインターネットセキュリティを支える公開鍵暗号技術が解読される可能性が生じ、国際的に耐量子計算機暗号に関する検討が進められている。一方、耐量子計算機暗号においても危殆化のリスクがあるため、米国や中国をはじめ、各国が安全保障にも関わる重大脅威との認識の下、原理的に安全性が確保される量子通信・暗号に関する研究開発を急速に進めている。

我が国では、株式会社東芝や NEC が世界最高速の BB84 量子暗号装置を製造し、また情報通信研究機構（NICT）や東京大学、日本電信電話株式会社（NTT）、三菱電機株式会社等が、理論研究及び実証で世界を先導している。NICT が量子通信・暗号送受信装置の開発を進め、都市圏テストベッド「Tokyo QKD Network」で世界最長期間の運用実績を有するなど、世界をリードしている。東京大学は、量子コンピュータ

でも解読できない暗号アルゴリズム研究を推進している。衛星量子通信に関しては、中国が独自開発した衛星「墨子」を用いて地上との間での量子通信に成功したと発表し、世界を驚かせた。我が国では、NICT が低軌道衛星と地上局間での実証実験に成功した。

暗号送受信装置については、我が国の企業が早期の製品化・事業化に向けた取組を進めており、NICT とともに、欧州電気通信標準化機構（ETSI）や、国際電気通信連合（ITU）において標準化活動を推進しており、世界を先導している。

量子中継技術（量子メモリ・量子もつれ等）は、大阪大学や NTT、NICT 等が冷却原子量子メモリと光子の間の量子もつれや、全光量子中継方式等の原理実証で世界を先導している。長距離伝送の実証や多重化・集積化・大規模化等が課題である。欧米や中国等で多数の研究開発プロジェクトが立ち上がるなど国際競争が激化している。

ネットワーク化技術（構築、運用、保守等）は、量子メモリ・量子中継が原理実証段階にあるため、現在のインターネットに代わる量子インターネットの実現には未だ時間を要する。このため、量子通信に係るトラステッドノードのアーキテクチャが検討されており、ITU-T では本アーキテクチャを前提とした標準化の議論が進んでいる。

我が国としても、国及び国民の安全・安心の確保、産業競争力の強化等の観点から、重要デジタル情報を安全に保管する手段として、機密性・完全性等を有し、かつ市場化を見据えて国際競争力の高い、量子通信・暗号に関する研究開発や、その事業化・標準化等に、国をあげて取り組むことが極めて重要である。

< 重点技術課題 >

- ・ 量子通信・暗号リンク技術

< 基礎基盤技術課題 >

- ・ 量子中継技術（量子メモリ・量子もつれ等）
- ・ ネットワーク化技術（構築、運用、保守等） 等

< 個別方針 >

- ・ 量子通信・暗号リンク技術のうち、光ファイバーを用いた量子通信は、送受信装置の基盤技術が確立し、我が国企業による実用化・事業化の段階にあるため、研究開発等に加えて、政府も関与する形で、短中期の国内外で事業展開を実現するための戦略的な取組を推進するとともに、産学官が密接に連携・協力し、国際標準化活動を推進。

また、衛星量子通信に関しては、国及び国民の安全・安心や産業政策上の重要性に鑑み、短中期・中長期の両側面から、研究開発等を重点的に推進するとともに、通信環境整備など、実用化等に向けた戦略的な取組を展開。

）量子マテリアル（量子物性・材料）

量子状態を精密制御することで機能を発現する物性・材料「量子マテリアル」は、我が国が長年にわたる基礎研究・応用研究の積み重ねにより、理論・実験・材料開発等において、世界的にも強み・競争力を有する領域である。一方、近年、物性物理学

に位相幾何学（トポロジー）の概念等が積極的に導入され、それに基づく新たな機能を発現する物質の探索や、その機能理解等の研究が急速に拡大するなど、欧米、中国を中心に国際競争が激化している。

この技術領域は、我が国の大学・研究機関で質の高い研究開発が行われ、人材層の厚みがあることに加えて、我が国の産業・企業等の裾野が広く、かつ高い国際競争力を保持している。次世代のデバイス開発や新たな物性材料の創成など、これまで、国際的な成長産業分野において、世界に後塵を拝してきた我が国の産業競争力の強化にもつながる有望な技術領域として位置付けられる。

グラフェン等のトポロジカル量子物質は、高効率なスピン・電荷変換等の実現を通じて、省エネデバイスや新物性材料等への応用が期待される物質材料であり、将来の産業波及効果が高い技術領域とされている。米国や欧州、中国において、研究開発が活発化する中、我が国には国際的に評価の高い研究開発等を行っている核となる研究者が存在している。

スピン流を利用可能な材料（スピン流材料）は、単一デバイスで熱、振動、光等からエネルギーを獲得するスピントロニクスデバイスに利用することが可能な革新材料と期待されている。スピントロニクス技術は、我が国の大学・研究機関等が、長年の基礎研究等の蓄積を有する技術領域である。こうした材料を用いたセンシングは、熱流や回転の流れを測る新たなセンシング技術等としての期待が高まっており、基礎研究の段階から着実な推進が重要である。

< 基礎基盤技術課題 >

- ・ トポロジカル量子物質（グラフェン等）
- ・ トポロジカル磁性体
- ・ スピン流材料 等

（２）量子融合イノベーション領域

量子技術に関する各主要技術領域については、（１）で掲げた方策に基づき、戦略的な取組を進めていくことが必要である。一方、こうした我が国の強みを持つ技術領域を基盤に、本戦略で掲げた将来の社会像の実現に向けて、イノベーションのスピードと確度を高めるため、量子技術と関連技術（既存技術を含む）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・展開していくことが極めて重要である。

量子コンピュータは、特定の問題を対象に、古典コンピュータをはるかに凌駕する計算性能が期待され、特に機械学習やクラスタリングなどの AI 技術は、相補性が高く、重要なキラーアプリケーションの一つとして期待が高まっている。国際的に注目されているものの、未だ研究開発等は途上にある一方で、我が国は量子ソフトウェア開発等で強みを保持している。このため、AI 技術の一部を量子コンピュータ（我が国独自の量子 inspired 技術も含む）に置換し、アクセラレータとして融合・活用する「量子 AI 技術」は、極めて有望な技術領域として位置付けられる。

生命現象の細胞レベルでの機能解明や医療・健康分野等への固体量子センサの活用など、量子技術と生命・医療等とを融合した「量子生命技術」は、我が国独自の学問

的開拓が始まった段階にある。一方、高齢化の進展や健康寿命の延伸、医療費の高騰など、我が国が抱える課題を解決し、健康・長寿社会を実現する上で、極めて大きな波及効果が期待される有望な技術領域である。

量子コンピュータ技術の進展に伴い、現在の公開鍵暗号技術等が解読される可能性が生じる中、国及び国民の安全・安心の確保の観点から、量子・古典技術を融合してネットワークセキュリティ高度化を図る「量子セキュリティ技術」は、極めて重要な技術領域である。欧米や中国が大規模な研究開発等を進める中、我が国も、先駆的な取組を進めており、これを確固たる基盤技術として発展させることが急務である。

こうした、量子技術と関連技術とを融合・連携させた新たな技術領域を「量子融合イノベーション領域」と明確に位置づけ、これらの領域で我が国が世界を先導・主導すべく、国の最重点領域として戦略的取組を強力に推進・展開することとする。

目標 : 将来の我が国産業・イノベーションの発展に向けた最重点領域として、「量子融合イノベーション領域」を設定し、それぞれ「融合領域ロードマップ」を策定した上で、これらに基づく研究開発支援等の戦略的取組を強化・推進

<量子融合イノベーション領域>

- ・ 量子 AI 技術
(例: 量子古典ハイブリッド計算(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(量子 inspired 技術活用含む)等)
- ・ 量子生命技術(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(超偏極・超小型 MRI)等)
- ・ 量子セキュリティ技術
(例: 量子セキュアクラウド、光・量子ネットワーク暗号化等)

<全体方針>

- ・ 量子融合イノベーション領域は、我が国が特に強み・競争力を保持し、かつ、可能な限り早期に高い確度で実用化・事業化等を実現することで、我が国の産業・イノベーションに大きな寄与・貢献が期待される技術領域を対象に設定。
- ・ それぞれの量子融合イノベーション領域について、中長期の視野に立ち、国をあげて最重点を置いた研究開発等を推進するとともに、既存(古典)技術と組み合わせることで、短中期に、関連・周辺技術への波及・展開(スピリアウト)も含めた実用化・事業化等を実現するための戦略的な取組を展開。

<具体的方策>

- ・ 国は、関係府省等の連携・協力の下、量子融合イノベーション領域を対象として、関連技術・周辺技術も含む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20年程度の間に取り組みべき戦略的かつ具体的な方策を示した「融合領域ロードマップ」を作成し、本戦略と一体的に策定。

- ・ 国は、「融合領域ロードマップ」に基づき、各量子融合イノベーション領域を対象として、国直轄の大規模なプロジェクトや大型の研究開発ファンディング等を通じた重点的な研究開発支援等を行うとともに、これらを基に民間から積極的に投資を呼び込み、産学連携・官民協働による研究開発や実用化等に向けた幅広い取組を推進・展開。

(3) 量子 inspired 技術・準量子技術

我が国では、企業を中心として、アニーリング技術や量子ビットに相当するレーザーパルスを用いる（光の量子性を活用する）技術など、量子技術の発想や手法を既存（古典）技術（古典コンピュータ等）に取り込んだ、独自の革新的な技術開発や製品化・サービス展開が進展している。

例えば、株式会社日立製作所の CMOS アニーリングマシンや富士通株式会社のデジタルアニーラ、東芝のシミュレーテッド分岐マシン、NTT の LASOLV（内閣府「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）事業時の QNN）など、特定の組み合わせ最適化問題等を古典コンピュータよりもはるかに高速で処理するイジング型コンピュータの技術開発・実機の製品化が、先行して進展している。こうした実機化は、我が国独自の動きであり、世界で他に例は存在しない。また、世界的に見れば、例えば、量子アルゴリズムに着想を得て、古典アルゴリズムの高速化が図られるという取組も行われている。

特に、ゲート型汎用量子コンピュータのスケール化・実用化には中長期的な視野に立った取組が必要であり、また同じイジングモデルに基づくアニーリング型量子コンピュータのスケール化についても一定の時間を要することが見込まれる中、こうした我が国独自の技術は、将来の量子コンピュータの評価・検証に加えて、金融・保険・製造業・運輸業など様々な産業分野での応用・展開等が期待される技術領域として高く評価されるべきである。

このため、こうした技術体系を「量子 inspired 技術・準量子技術」として明確に位置づけ、研究開発や社会実装等の取組を展開していく。

目標 : 我が国発の有望な「量子 inspired 技術・準量子技術」を評価・特定した上で、速やかに戦略的な研究開発や実用化支援等を充実・推進

< 全体方針 >

- ・ 「量子 inspired 技術・準量子技術」は、我が国企業が中心に開発した独自技術であり、これらと量子技術と組み合わせた「量子・古典ハイブリッド」による研究開発等を重点的に推進するとともに、短中期での産業化・事業化に結び付けるための戦略的取組を展開。

< 具体的方策 >

- ・ 国は、研究開発ファンディング等の支援を通じて、CMOS アニーリングマシンやデジタルアニーラ、シミュレーテッド分岐マシン、LASOLV など、我が国企業が有する「量子 inspired 技術・準量子技術」を活用した産学連携・官民協働による革新的な研究開発（アプリケーション開発等）や社会実装等を推進。

- ・ 国は、我が国のアカデミア・企業等の協力を得て、将来有望な「量子 inspired 技術・準量子技術」の特定・評価等を実施。

(4) 基礎基盤的な研究

量子技術は、今後の飛躍的な発展が見込まれる一方、未だ基礎研究段階にある技術領域が多く、我が国の技術・人材等の厚みを増す観点からも、幅広い領域を対象として中長期的視野に立ったサイエンスベース（基礎研究段階）での研究開発等を着実に推進していくことが極めて重要である。

また、(1)～(3)で掲げた技術領域を発展させるためには、量子技術そのものに加えて、我が国の強み・競争力を分析・評価した上で、これらを支える基盤技術、関連技術・周辺技術をも包含した裾野の広い基礎基盤的な研究（例：微細構造解析、微細加工技術や光波制御・光デバイス技術、半導体技術、希釈冷凍機等の冷却技術、極低温エレクトロニクス、解析・評価技術）が必要である。また、こうした基盤技術の国際競争力の強化や国産化も念頭に置いた事業化・実用化の促進、それらを実現する先端機器等の基盤施設・設備等の整備・共用化、さらに、基盤施設・設備等の運用に不可欠な戦略物質の確保等を確実にかつ積極的に推進していくことが不可欠である。

このため、(1)～(3)で掲げた技術領域や関連する領域も含めて、こうした基礎基盤的な研究や、基盤施設・設備等の整備・共用化等を、より一層充実・強化しつつ、着実に推進する。

2. 国際戦略

(1) 国際協力の戦略的展開

米国や欧州では、量子技術について、様々なファンディング等を通じて、サイエンススペース（基礎研究段階）での研究開発を推進しており、この分野における我が国との協力拡大への期待が高まっている。特に、日米政府間では、令和元年5月に開催された閣僚級の科学技術協力合同高級委員会において、量子技術に関する日米協力の加速について議論を行った。また、日EU政府間では、昨年来、量子技術分野における協力を拡大することの重要性で一致し、合同シンポジウムを開催した。英国やドイツ等も日本と政府レベルでの協力合意に期待を寄せている。

こうした中、我が国としては、国及び国民の安全・安心の確保や産業政策上の観点から、共通の価値観を有するとともに、量子技術に関する高い研究・技術水準等を有する国・地域との間で、今後、政府レベルでの多国間の協力枠組みを整備・構築していくことが、我が国の戦略上、極めて有益かつ重要である。

さらに、米国、英国、ドイツ等、量子技術に関する高い研究技術レベルを有する国との間で、特定の技術領域毎に、我が国にとっての強み・競争力、研究協力に係るメリット・デメリットを勘案した上で、政府・大学・研究機関等での多層的かつ戦略的な二国間の協力枠組みを構築し、具体的協力を推進していくことが重要である。

目標：5年以内を目途に、欧米を中心として、量子技術に関する政府レベルでの多国間・二国間の協力枠組みを整備・構築

< 具体的方策 >

- ・ 米国・EU との間で、量子技術（量子情報科学等）に関する多国間での協力枠組みについて検討・合意するとともに、合同シンポジウムやワークショップの開催等を通じた研究協力の拡大等を検討・推進。
- ・ 米国、英国、ドイツ等との間で、科学技術協力合同委員会等の既存の枠組みを積極的に活用し、量子技術に関する二国間での具体的な協力枠組み（MOU 等）を検討・推進。
- ・ 特定の国・地域との間で、我が国の強み・メリット等を勘案しつつ、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。

(2) 安全保障貿易管理の徹底

量子技術は、将来の産業・安全保障等の観点から重要な基盤技術であり、国際輸出管理レジームにおいても、耐量子暗号技術等に対する規制を強化している。さらに、米国では、国防権限法等に基づき、近年、量子技術をはじめとする先進技術について、輸出や投資の両面から規制強化を検討している。また、EU 等も量子技術に対する投資規制を強化している状況にある。

我が国では、国際輸出管理レジームの合意を踏まえ、「外国為替及び外国貿易法」に基づき、厳格な安全保障貿易管理を推進している。本法律等に基づき、大学・研究機関等に対しても、先進技術等の管理体制整備の働きかけを行っているものの、未だ管理体制の整備や研究者への周知徹底等で課題も指摘されている状況にある。

このため、政府全体として、量子技術を含む先進技術を対象とした安全保障貿易管理を推進するとともに、法令遵守や組織内における適正管理に向けた体制整備等を一層促進することにより、大学・研究機関等における管理体制整備等を強化・推進することが必要不可欠である。

目標 : 量子技術をはじめとする先進技術の研究等を行う大学・研究機関等における、外国為替及び外国貿易法等の遵守を含めた管理体制整備等を強化・推進
--

<具体的方策>

- ・ 国は、機微技術の管理強化に関する国際的な議論を踏まえつつ、外国為替及び外国貿易法に基づく安全保障貿易管理を推進・徹底。
- ・ 国は、「安全保障貿易に係る機微技術管理ガイドンス（大学・研究機関用）」に基づき、大学・研究機関等における安全保障貿易管理体制強化に向けた働きかけを一層強化・推進。
- ・ 大学・研究機関等は、同法等に基づく学内・機関内の安全保障輸出管理規程等の整備を加速するとともに、研究者への周知を徹底するなど、運用体制を一層強化。

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)」の形成

欧米では、量子技術に関する拠点形成が急速に進展(例:オランダ・デルフト工科大(QuTech)、カナダ・トロント大、米国・カリフォルニア大学・ローレンスバークレー国立研究所、英国・オックスフォード大等)しており、こうした拠点が国内外から優れた研究者を惹きつける舞台装置として機能している。我が国では、比較的少数の研究者が大学・研究機関・企業等に分散して活動しており、国際的にも認知・評価されるトップクラスの研究拠点の欠如が大きな課題としてあげられる。

量子技術に関して、これまで我が国の大学・研究機関等で長年にわたって蓄積してきた研究や人材の厚みを一層増し、かつ、基礎的・基盤的な研究の多様性を確保する観点から、こうした大学・研究機関における幅広い研究等に対し、国として継続的な支援を充実・強化していくことが重要である。

その上で、我が国が強み・競争力を保持する技術領域を中心として、国際競争力を確保・強化する観点から、技術の特性に応じて人材・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、知的財産管理、人材育成等に至るまで産学官で一気通貫に取り組む拠点を形成することが極めて重要である。こうした国際的な研究開発拠点として、新たに「量子技術イノベーション拠点(国際ハブ)」を形成する。

同拠点は、国の研究機関や大学等を中核として、国内外から優れた研究者・技術者を結集するとともに、企業等から積極的な投資を呼び込み、大学・企業間の有機的な連携・協力体制を構築する。同時に、複数の大学・大学院等と連携・接続し、将来を担う量子技術分野の人材育成を行う中核拠点としての役割も整備・構築していく。

目標 : 2020年度からの5年間で「量子技術イノベーション拠点(国際ハブ)」を国内に5拠点以上、整備・形成

< 拠点要件例 >

- ・ 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コア技術等を有する技術領域であること。
- ・ 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発展が期待される技術領域であること。
- ・ 国内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・予算等を集積化することが有益かつ効率的な技術領域であること。

< 拠点形態例 >

- ・ 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:IMEC、東北大学国際エレクトロニクス集積拠点(cies))。
- ・ 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:文部科学省「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」)。
- ・ 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(例:理化学研究所・産業技術総合研究所(AIST)等の戦略センター)。

< 拠点候補 >

- ・ 超伝導量子コンピュータ研究拠点
- ・ 量子デバイス開発拠点
- ・ 量子ソフトウェア（量子 AI 等）研究拠点
- ・ 量子生命（バイオ）研究拠点（固体量子センサ活用等）
- ・ 量子マテリアル研究拠点
- ・ 量子慣性センサ・光格子時計研究拠点
- ・ 量子セキュリティ研究拠点

< 具体的方策 >

- ・ 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）」形成を推進。
- ・ 同拠点については、関係府省による財政面・税制面・制度面（特区制度の活用等を含む）等の中長期的な支援に加えて、国内外の企業等から相応の投資を呼び込む形での官民をあげた研究開発拠点として整備・推進。

（２）「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設

- ・ 量子技術は、将来の産業・イノベーションにつながる重要技術との認識や期待が高い一方、未だ技術的には未成熟・発展途上にあり、我が国産業界が積極的に参入する段階には至っていない。一方、例えば米国では、量子情報科学に関する法案に基づき NIST を中心としてアカデミア・産業界が量子技術の研究開発や利活用について検討するコンソーシアムを新たに形成する動きがある。
- ・ こうした中、我が国においても、産学官をはじめとする多様なステークホルダーが集い、量子技術の現状分析や研究開発の発展、産業・社会での利活用等を検討・議論するための「場（コンソーシアム）」を設けることが極めて有益である。既に「（一社）量子 ICT フォーラム」の創設など関連する取組も始まっており、これらも念頭に、特定の技術領域を対象とした「量子技術イノベーション協議会（仮称）」を創設する。
- ・ 同協議会においては、産学官が連携・協力して、個別の技術課題等に関する具体的な取組やロードマップ等の検討を先導し、これらを基にした協調領域でのオープンイノベーションを促進（エコ・システムを構築）する。さらに、最新の研究・技術動向等に基づき、海外企業・研究機関等との連携も含めた、我が国産業の戦略的な振興策や支援策等を検討・推進していく。

目標 : 5年以内を目途に、特定の技術領域毎に大学・研究機関・企業等で構成される「量子技術イノベーション協議会（仮称）」を創設

< 協議会の位置付け・役割例 >

- ・ アカデミア・産業界による主体的な取組であること。
- ・ 複数の企業等が参画し、また大学・研究機関、関係省庁等も含め、量子技術に関する特定領域に関心を有する多様な組織・機関等が参画する取組であること。

- ・ 当該特定領域について、技術の現状分析や研究開発の方向性、産業・社会での利活用など、幅広い観点から検討・議論等を行う取組であること。

<協議会候補>

- ・ 量子コンピュータ・ソフトウェア協議会
- ・ 量子センサ利活用協議会、量子マテリアル利活用協議会
- ・ 量子情報通信・ネットワーク技術協議会（量子 ICT 協議会）

<具体的方策>

- ・ 国は、特定の技術領域毎に、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）」の創設や活動と関連する取組を支援（例：アカデミアと産業界との間の橋渡し、関係府省の関係者の参画、助成金等の支援）。

（３）創業・投資環境の整備

欧米では、Google や IBM、Microsoft、Intel をはじめとする巨大 IT 企業が量子コンピュータをはじめとする最先端の量子技術に対して巨額の研究開発投資を行う一方、Rigetti や D-Wave、IonQ など、高い技術を有し、国際的認知度の高いベンチャー企業が生まれるなど、新たな産業創出に対する期待が高まっている。

我が国では、量子技術が未成熟な段階にあり、将来の見通しが立たない等の事由により、大企業が最先端の量子技術開発等に積極的に参画するには至っていない。一方で、大学等の技術を基にしたベンチャー企業も他国に比べて少ないものの、MDR や QunaSys 等の設立など、積極的な動きも生まれつつある。量子技術を産業・イノベーションに結び付ける観点からも、こうした先進的な量子技術を基にした大学発・企業発ベンチャー企業の創設を一層促進するための環境整備が極めて重要である。

さらに、量子技術の事業化・産業化に向けて、開発する企業側やユーザー側双方の投資を誘発する観点から、欧米の例も参考にしつつ、政府において先行して技術導入や活用を促進するなど、企業等の投資を促進するための環境整備が極めて重要である。

目標 : 10年以内を目途に、量子技術を基にした大学・研究機関発、又は企業発ベンチャー企業を、要素技術関連も含めて10社以上、新規創設

<具体的方策>

- ・ 大学や研究開発法人等は、関係法令に基づく出資機能の拡大等を踏まえ、各大学等が有する優れた技術シーズを基にしたベンチャー企業創出を積極的に支援。
- ・ 国は、「量子技術イノベーション協議会（仮称）」等を通じて、企業内ベンチャーや企業発ベンチャーを育成する環境の整備・拡充を支援。
- ・ 国は、量子技術を基にしたベンチャー企業創出の拡大に向けて、政府系金融機関や産業革新投資機構等を通じた支援、起業家育成・スタートアップ支援等の拡大を検討。
- ・ 国は、量子暗号装置をはじめ、量子技術に関する先端技術や製品等の先行的な導入・活用を促進。

4. 知的財産・国際標準化戦略

(1) 知的財産戦略

量子技術については、政府のみならず、巨大 IT 企業等が積極的な投資を行い、大学・研究機関等と密接に連携・協力しつつ、最先端の研究開発を展開している。こうした企業等は、オープン・クローズドを巧みに使い分けて、特に重要なコア技術については、将来的な囲い込みも視野に戦略的な知的財産マネジメントを進めている。

国・企業の枠を超えた競争が激化する中、量子技術関連の知的財産について戦略的なマネジメントが不可欠である。また、国内外を問わず、この分野の産学連携・オープンイノベーションの取組が急拡大する中、主に大学・研究機関等におけるオープン・クローズド戦略を、プロジェクトに先立ち強化していくことが極めて重要である。

目標 : 量子技術に関して、オープン・クローズド戦略に基づく知的財産の戦略的な権利化・利活用等を推進

< 具体的方策 >

- ・ 国は、大学・研究機関等における量子技術に関する研究開発の成果等について、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、大学等が有する有望な量子技術に係るシーズと、企業・ベンチャー等のニーズとのマッチングを推進するとともに、大学やこうした企業等における事業化・橋渡し等を促進。

(2) 国際標準化戦略

量子コンピュータや量子暗号をはじめ、社会実装に近い領域では、量子技術や関連技術の国際標準化に向けた取組を進めていくことが重要である。米国は、量子情報科学の分野で、NIST を中心に産学のコンソーシアムを構築し、標準化獲得に向けた検討を開始している。また、ISO/IEC JTC1 では量子コンピューティングに関する調査グループを設置し、中国、日本を中心に標準化作業項目の抽出を進めている。

我が国としても、国際的な競争力強化・市場獲得に向けて、特に強みを有する量子技術領域を中心に、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が必要不可欠である。その際、特に、共通の価値観を有する米国や欧州の各国等と協調し、迅速かつ的確な国際標準化戦略を推進することが重要である。

目標 : 我が国が強みを有し、大きな経済的波及効果等が期待される量子技術領域を特定し、国際標準の獲得に向けた戦略を検討・推進

< 具体的方策 >

- ・ 国は、大学・研究機関等と連携し、重点技術課題等を中心に関連技術も含めた、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、国際標準化に係る関係団体・認証団体など関係機関との連携・協力の下、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を構築。
- ・ 国は、量子技術に関して、国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）、ITU等の国際標準化機関に対する案件提案や審議参画等が可能な人材の育成・確保を推進。

5. 人材戦略

(1) 優れた人材の育成・確保

量子技術をめぐる国際的な競争が激化する中、我が国で量子技術の研究開発等に携わる研究者の層は、諸外国と比して薄い状況にある。特に量子コンピュータや量子ソフトウェア等、米国や中国の企業が莫大な投資を行い、国内外から優秀な人材を高い報酬で集める中、国際的な人材獲得競争からも大きな後れをとるおそれがある。

このため、我が国においても、量子技術分野の人材層の質と厚みを飛躍的に高めるべく、大学をはじめとする高等教育段階で、量子技術関連分野の教育や研究環境等を充実・強化することなどを通じて、当該分野の研究開発等を担う優れた若手研究者・技術者等を戦略的に育成・確保していくことが極めて重要かつ不可欠である。

さらに、ポスト AI を見据えて、「AI 戦略」に基づく人材育成とも適切に連携させていくことが重要である。大学等で AI を学ぶ学生や研究開発に携わる若手研究者等を対象に、AI 技術に加えて最先端の量子技術に関する知識等を習得する機会を充実・確保し、量子技術関連分野に精通した人材層の厚みを増していくことが必要である。

目標 : 5年以内の早い段階で、大学等における量子技術に関する講座・専攻等の設置や体系的な教育プログラムの開発等を通じた人材育成を推進

< 具体的方策 >

- ・ 国は、大学・研究機関・企業等と連携・協力し、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等を検討し、大学等における人材育成・確保を支援。
- ・ 国は、大学・大学共同利用機関と連携・協力し、AI 戦略の人材育成策とも連動させつつ、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、量子技術に関する専門的教育を提供する環境・機会の整備を検討・推進。
- ・ 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・大学院教育等で活用・実施するとともに、インターネット等を活用した教育を検討・推進。
- ・ 国は、大学・研究機関、さらには企業等と連携・協力し、優れた研究者・技術者が組織や分野の枠を超えて相互に人事交流、移籍、クロスアポイントメント等を通じて、量子技術に係る新たな知見・技能等を習得する機会を確保。

(2) 頭脳循環（ブレインサーキュレーション）の推進

量子技術をめぐる国家間・企業間の競争が一層激化する中、優れた人材の確保は共通の課題であり、国籍の枠を超えて、世界中で人材の獲得競争が急速に進展している。我が国は、量子技術に関する基盤技術や基礎的な理論、材料開発等において、現在も世界トップレベルの研究力を保持しているが、既に欧米や中国の企業・大学等から、日本の大学等に所属する優秀な研究者の引き抜きが始まっているとも指摘されている。

このように、量子技術が先端技術分野における国際競争の最前線であることを踏まえ、我が国の研究力・人材層の維持・強化を図るとともに、将来の産業競争力等を確保する観点から、国内の研究者等の確保に加えて、海外から優れた研究者等を招聘・確保するための取組を戦略的に進めることが極めて重要である。

さらに、我が国の優れた若手研究者・技術者等の知識・技能等の向上を図るため、海外の大学等で研さんを積む機会を確保することも必要である。

目標： 多国間・二国間の協力枠組み等に基づき、国内外のトップレベルの研究者・技術者等の参画を得て、量子技術イノベーションに関する国際シンポジウム等を毎年開催し、頭脳循環を実現する環境を整備・構築

< 具体的方策 >

- ・ 国は、「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）」をはじめ、大学・研究機関と連携し、海外から量子技術イノベーションに関わる優れた研究者・技術者等を招聘・確保するための取組を支援・強化。
- ・ 大学・研究機関等は、国内外から優れた研究者・技術者等を確保・育成するための環境を整備するとともに、ポスト確保等を通じて積極的な登用を推進。
- ・ 国は、大学・研究機関等と連携し、大学等に所属する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、量子技術に係る最先端の研究開発に携わ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等を促進。

（３）量子ネイティブ（Quantum Native）の育成

量子技術は、中長期にわたる戦略的な研究開発等が必要な分野であり、将来を担う研究者の育成・確保は極めて重要な政策課題と言える。既に米国や欧州等では、国をあげて、比較的早期の段階から、将来の研究者・技術者等の育成・確保に向けて、量子技術や関連する分野を学ぶ機会を提供するなどの取組を進めている。

我が国でも、早期の段階から量子技術を使いこなす高い知識・技能を持った「量子ネイティブ（Quantum Native）」の育成・確保に向けて、特に高等学校や高等専門学校等で特に興味関心を持つ生徒等を対象として、量子力学をはじめ、関連する分野等を学ぶ機会を積極的に提供していくことが極めて重要である。

さらに、学校教育や社会教育等を通じて、児童・生徒等に対し、最先端の量子技術の内容や社会・産業等での利活用の現状・将来に対して、興味関心を喚起するような取組を進めることも重要である。

目標： 将来を担う「量子ネイティブ（Quantum Native）」の育成・確保に向けて、特に高等学校や高等専門学校等の生徒を対象に学ぶ機会の提供や、幅広い科学コミュニケーション活動を展開

< 具体的方策 >

- ・ 国は、高等学校や高等専門学校等における数学・物理等の理数系教育を充実するとともに、特に量子技術等に高い興味関心を持つ同学校等の生徒に対して、量子力学や電子情報処理、物性・材料科学等、関連する学問や最先端の研究を学ぶ機会の提供等を推進。
- ・ 国は、大学・研究機関・企業・科学館等と連携・協力し、科学コミュニケーション活動等を通じて、量子コンピュータをはじめ、最先端の量子技術に触れる機会等を充実・確保。

．本戦略の推進体制

「統合イノベーション戦略推進会議」を中心に、本戦略に基づく取組を確実に推進するための体制を整備・構築していくことが必要である。特に、本戦略の下、「量子融合イノベーション領域」や「重点技術課題」等を対象として、中長期的観点から今後20年程度の間に取り組むべき具体的方策等を盛り込んだロードマップに基づき、戦略的に研究開発等を推進していく体制整備が極めて重要である。

また、本戦略に基づく取組の実効性を確保する観点から、「統合イノベーション戦略推進会議」の下、関係府省等が連携・協力して、税財政面・制度面等あらゆる方策を検討し、確実に実行に移していくことが必要である。

こうした観点から、有識者会議「量子技術イノベーション」を発展的に改組して、「統合イノベーション戦略推進会議」の下に、政府と産学の有識者で構成する「量子技術イノベーション会議（仮称）」を設置することを検討する。

量子技術をめぐる動向が急速に変化する現状を踏まえ、本会議において、国内外の最新動向を適時適切に把握するとともに、本戦略（技術ロードマップ・融合領域ロードマップを含む）について、着実にフォローアップを実施する。

なお、フォローアップの実施に当たっては、厳しい財政状況の中、中長期にわたり研究開発投資を行う戦略であることに鑑み、官民の適切な役割分担や民間の主体的参画を促進する観点から、個別事業等における取組状況の評価・検証を横断的に行うとともに、重点技術課題やロードマップ等を機動的に見直していく。

(別添1)

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」 の開催について

平成31年2月12日
令和元年11月26日一部改正
統合イノベーション戦略推進会議議長決定

1. 「イノベーション政策強化推進のための有識者会議」の設置について(平成30年7月27日統合イノベーション戦略推進会議決定)第2項の規定に基づき、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」(以下「会議」という。)を開催する。
2. 同第2項及び第3項の規定に基づき、会議の座長及び構成員は別紙のとおりとする。
3. 会議の運営については、同第4項から第7項までのとおりとする。

(別紙)

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」

<座長及び構成員>

荒川 泰彦 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構特任教授

伊藤 公平 慶應義塾大学理工学部教授

五神 真 東京大学総長

座長 小林 喜光 株式会社三菱ケミカルホールディングス取締役会長

佐々木 雅英 情報通信研究機構未来ICT研究所主管研究員

寒川 哲臣 NTT先端技術総合研究所所長

十倉 好紀 東京大学東京カレッジ卓越教授

中村 祐一 NEC中央研究所上席技術主幹

(令和元年11月26日までは小林会長が、同日以降は五神総長が、有識者会議の座長)

量子技術イノベーション戦略の策定に向けた検討経緯

平成31年

3月29日 第1回有識者会議

4月18日 第2回有識者会議

令和元年

5月16日 第3回有識者会議

6月11日 第5回統合イノベーション戦略推進会議

6月19日 第45回総合科学技術・イノベーション会議

7月5日 第4回有識者会議

7月30日 「量子技術イノベーション戦略」中間報告取りまとめ

9月24日 第5回有識者会議（WG設置に係る持ち回り開催）

9月30日 第1回量子コンピュータ・シミュレーションWG（非公開）

10月2日 第1回量子通信・暗号WG（非公開）

10月4日 第1回量子計測・センシングWG（非公開）

10月29日 第2回量子コンピュータ・シミュレーションWG（非公開）

11月5日 第2回量子通信・暗号WG（非公開）

11月6日 第2回量子計測・センシングWG（非公開）

11月27日 第6回有識者会議

令和2年

1月21日 第6回統合イノベーション戦略推進会議

「量子技術イノベーション戦略」最終報告取りまとめ

技術ロードマップ

本ロードマップは、重点技術課題等を対象に、国内外の研究動向等を踏まえ、今後20年程度の各技術の発展の見通しを取りまとめたものである。各ロードマップにおいては、技術の達成目標、中核となる技術体系、周辺技術・関連技術、そしてこれらがもたらす社会的・経済的インパクト、を記載しており、官民で今後のビジョンを共有することを目的の一つとしている。

政府においては、本ロードマップに基づき、重点技術課題等に対する研究開発支援等を強化していく予定である。これらの支援等も踏まえ、民間からの新規の投資や積極的な参画・参入等が促進され、国をあげた産学連携・官民協働のプロジェクトへと発展していくことを強く期待する。

1. 量子コンピュータ・量子シミュレーション
 - 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)
 - 量子ソフトウェア(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)

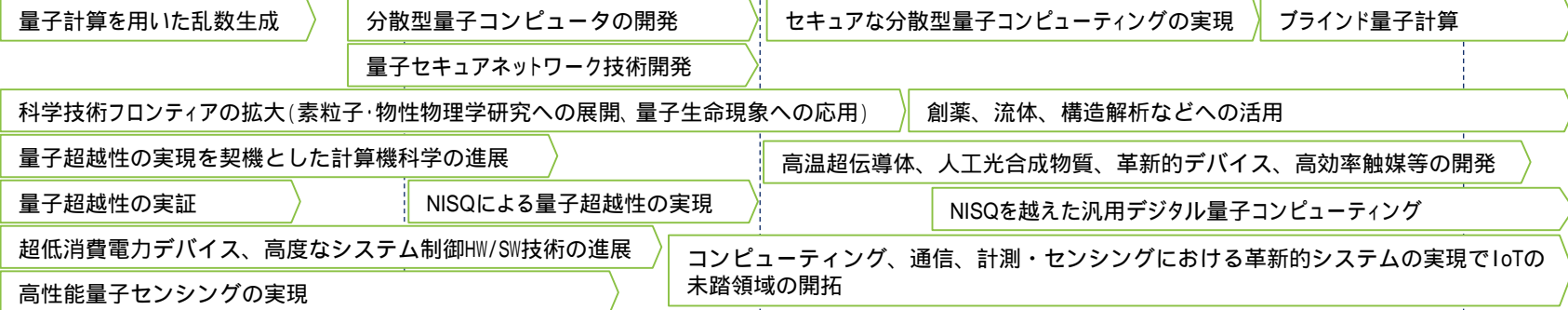
2. 量子計測・センシング
 - 固体量子センサ(ダイヤモンドNV中心等)
 - 量子慣性センサ
 - 光格子時計
 - 量子もつれ光センサ
 - 量子スピントロニクスセンサ(トンネル磁気抵抗センサ・スピン熱流センサ)

3. 量子通信・暗号
 - 量子通信・暗号リンク技術
 - 量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)
 - ネットワーク化技術(構築、運用、保守等)

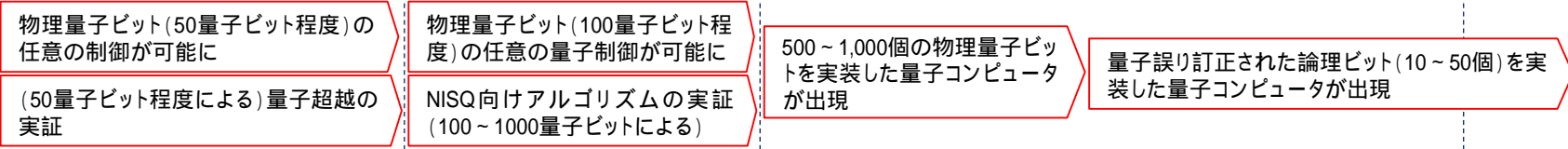
ゲート型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

大規模で複雑な計算を高速・高精度・低消費電力で実行可能な汎用デジタル量子コンピュータを実現
 10年後以降、1,000個程度の物理量子ビットを実装。さらに、量子誤り訂正された50個程度の量子ビットを実装
 大規模化に向けた設計支援技術や冷凍・低温技術開発により、大規模化を進める

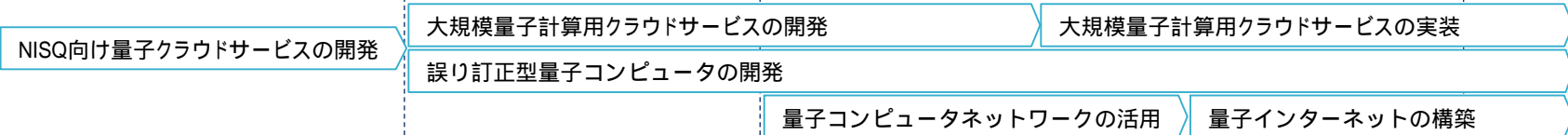
経済・社会 インパクト



量子ビット 集積化

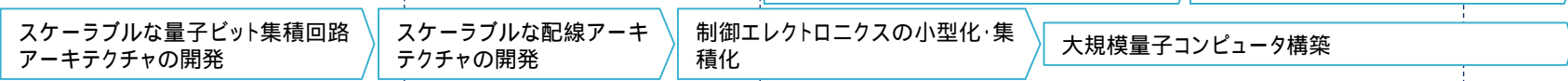


クラウド サービス

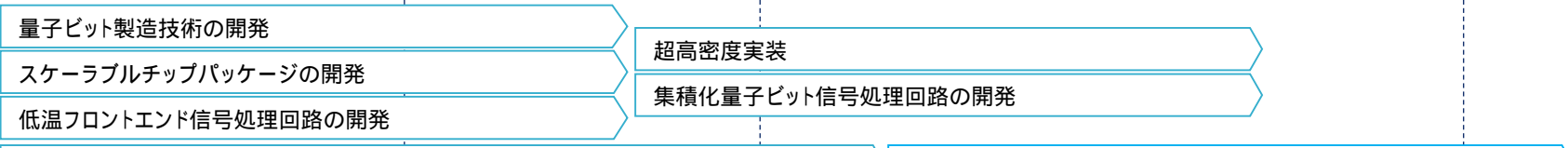


技術の進展

システム 化技術



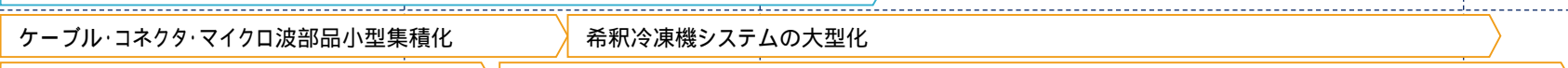
製造技術



制御・ 計測技術



冷凍・ 低温技術



設計支援 技術



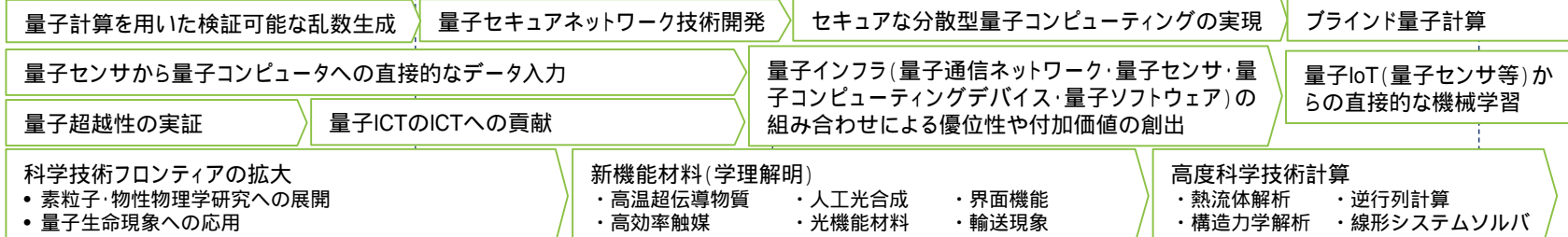
本技術を支える周辺技術の進展



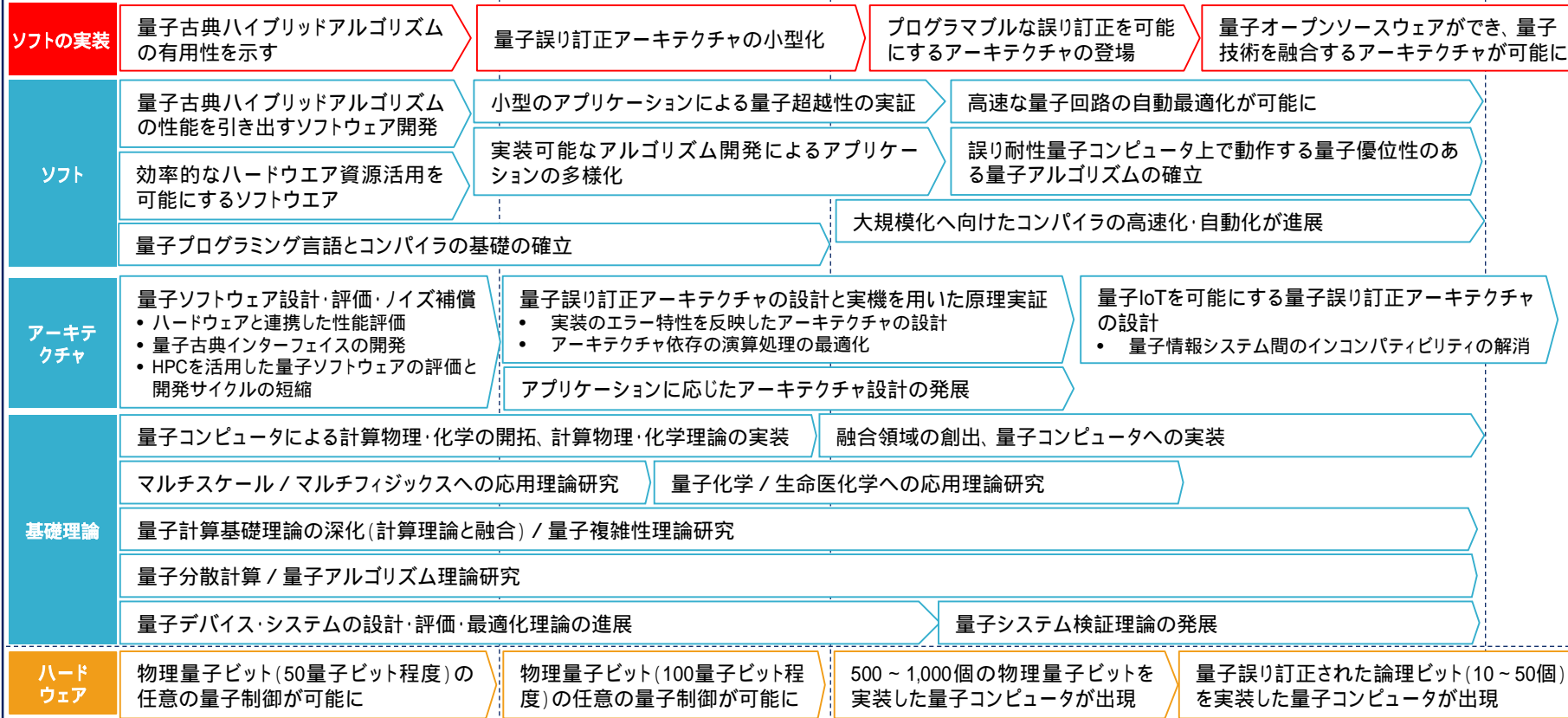
量子ソフトウェア(ゲート型)

大きな原子・分子系の物理・化学計算により、材料・医学・創薬・機械学習、金融、セキュリティなど幅広い応用が可能に
1,000個以上の量子ビットを実装した量子超越性の実証、誤り訂正アーキテクチャを実装した量子コンピュータに実装
物理・化学・計算科学の基礎理論に基づき量子計算に適したアルゴリズムの創出、融合領域を開拓

経済・社会 インパクト



技術の進展



本技術を支える周辺技術の進展



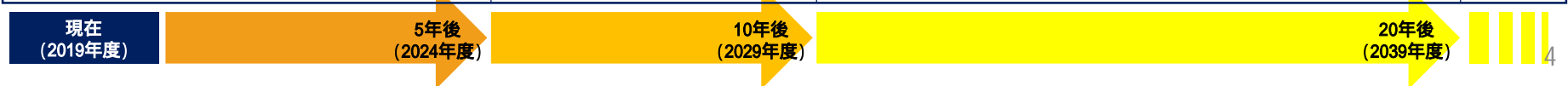
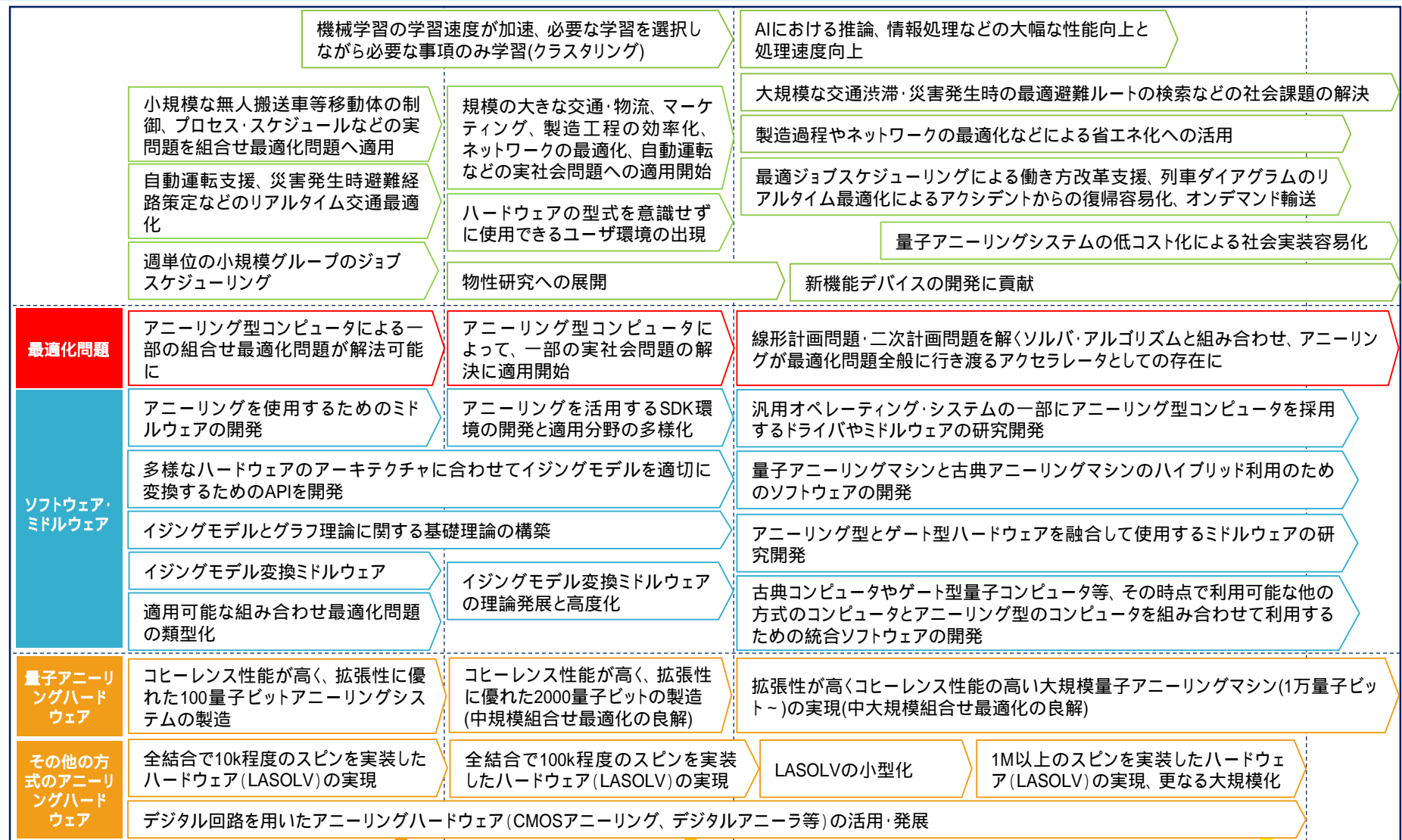
量子ソフトウェア(アニーリング型)

交通や工場プロセス、製造スケジュールの最適化から、自動車の自動運転技術への応用まで、様々な最適化問題に対応
 5~10年後、組合せ最適化問題に組み込む課題のモデル化やイジングモデルの機械学習、交通や工場プロセス、自動車技術などへの適用
 ユーザ向けのツールの開発、多様な分野に適用可能なミドルウェア・ソフトウェア技術の高度化より、大規模社会実装を進める

経済・社会 インパクト

技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展



量子シミュレーション（冷却原子）

新規物質相の解明を促す物性量子シミュレータと社会課題・産業課題の解決を加速させる最適化用量子シミュレータの2種類の開発を展開
 光の空間制御技術の開発、冷却原子特性の開拓を通じ、10年後、10⁶以上の量子ビットを持つ量子シミュレータを実現
 ゲート型汎用量子コンピュータへの応用；高精度光制御技術を医療・生命科学、光微細加工へ展開

経済・社会インパクト

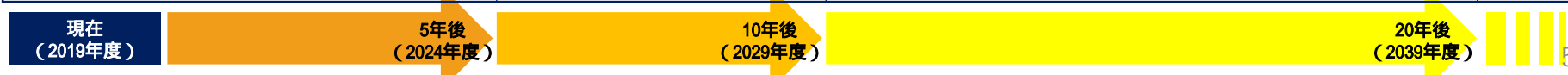
新規物質相(高温超伝導、量子磁性、トポロジカル物性、高エネルギー物理、非平衡ダイナミクス)の学理解明が可能に	量子シミュレータによる物質相の理解に基づく新規デバイスが開発される(低損失電力輸送が可能な高温超伝導体、量子磁性を活用した高機能メモリ等)
古典に対する量子の優位性の社会的認知	産業的に有意義な問題を解くことが可能に
	トラック配送、交通渋滞解消、予測健康管理などの社会的課題の解決。複雑な分子の量子化学計算。物質、創薬設計などの産業的問題解決の加速
	ゲート型汎用量子コンピュータへの応用 高精度光制御技術を医療・生命科学、光微細加工へ展開

技術の進展

シミュレーション	多体基底状態および多体励起状態を実現し、新規物質相の発現メカニズムを探索	量子シミュレーションにより得られた知見を物質科学へフィードバックし、固体物質中での新規物質相の発現を実証
	10~100量子ビットの量子シミュレーションを実現 ・最適化問題を解く ・量子優位性を実証	1,000量子ビットの量子シミュレーションを実現 ・小規模な量子化学問題を解く ・小規模な社会的課題を解決
		10 ⁶ 以上の量子ビットを持つ量子シミュレータの実装
		シミュレーション時間の短縮、パラメータの自動最適化による量子シミュレーションの高効率化
シミュレーション	多体基底状態への冷却と多体励起状態の生成および非平衡量子多体ダイナミクスの観測	量子シミュレーションにより得られた知見を物質科学へフィードバックし、固体物質中での新規物質相の発現を実証
	量子気体顕微鏡の開発	新規物質相の観測手法の開発(時間、空間、運動量、スピン等の相関の測定手法等)
	物理・化学モデルの実装方法の開発	古典計算機とのハイブリッド化技術
	物理量子ビットの全結合のスケールアップ	量子誤り検出および訂正機構の実装
	高い忠実度の量子ビットの開発	
共通	量子優位性を示す課題の探求	産業的問題を解決する量子優位性を有したアルゴリズムの開発
	単一原子光ピンセットの開発	
	量子シミュレーションの結果を検証する理論的手法の開発	

本技術を支える周辺技術の進展

冷却原子系の基礎	冷却原子系における原子特性の探索	
	冷却原子系の新たな原子種や混合系の制御	
光源・光学系技術	光の空間形状制御(任意の複数サイトへの配列技術、トラップ形状制御技術)の開発	
	全自動、コンピュータ制御、高速動作、位相・強度変調が可能な統合型光源システムの開発	オンプレミス型量子シミュレータの実装
実装技術	問題をハードウェアに実装するユーザインターフェースの構築	
	全統合型の冷却原子量子シミュレータの開発	

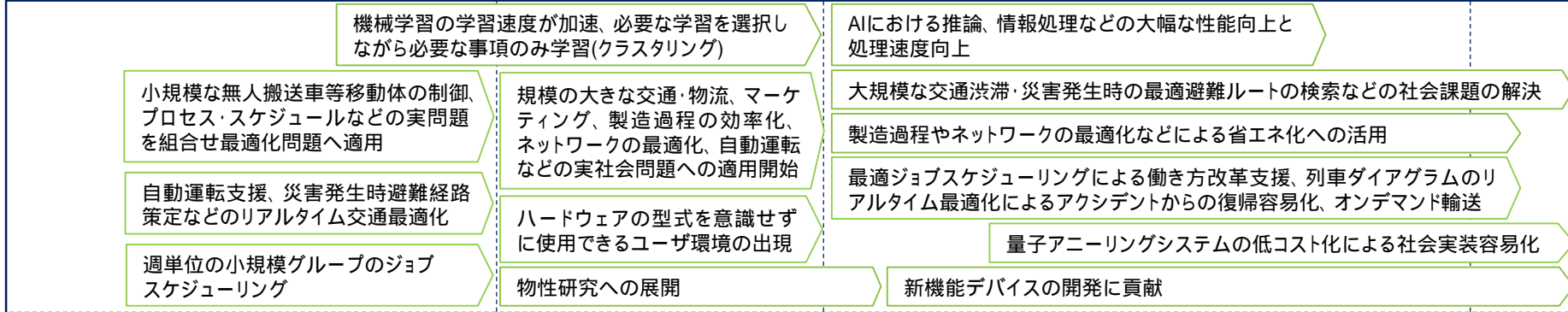


アニーリング型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

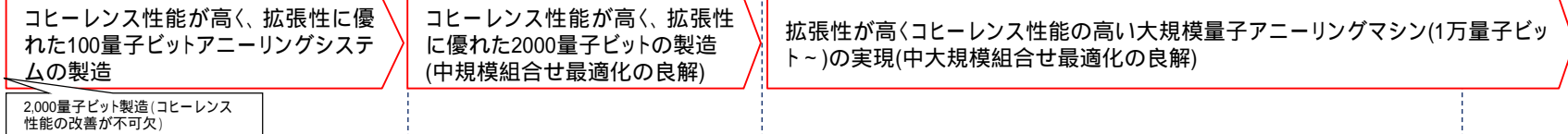
10年後以降、高いコヒーレンス性能の1万量子ビット程度のアニーリング型量子コンピュータの実用化により、物流・交通最適化、機械学習速度加速、検索等のリアルタイム性向上

低温エレクトロニクスや3次元配線設計を支援する開発環境の整備により、アニーリング型量子コンピュータの大規模化を進める
長期的には、ゲート操作に近い制御を可能とするマシンの開発も追求していく

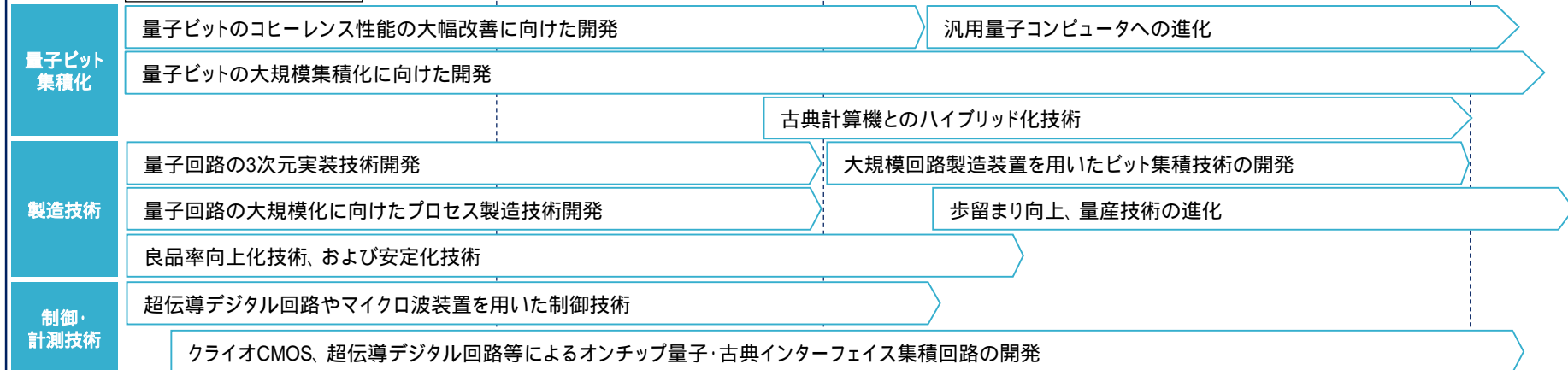
経済・社会インパクト



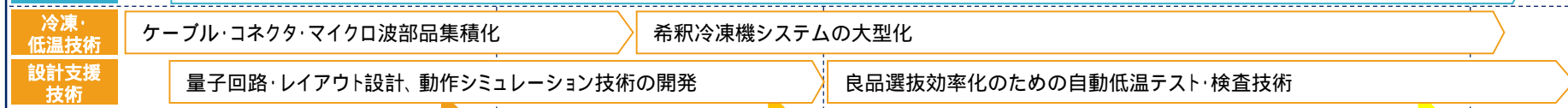
ハードウェアシステム化



技術の進展



本技術を支える周辺技術の進展



固体量子センサ(ダイヤモンドNV中心等)

小型でロバストな超高感度の固体センサの実現により、脳磁計測(医療・ヘルスケア)や極限環境、生命分野等での利用が期待
5年後に 10^{-12} T(テスラ)、10年後に 10^{-14} Tの室温下の微弱磁場の観測を達成。さらに温度や電流の同時計測技術等を確立
センサの高感度化のため、高度な量子状態の制御技術の開発やセンサ材料の高品質化を進める

経済・社会
インパクト

省エネ、安心安全等への貢献

- パワエレ・バッテリーの高精度制御による省エネ、温度モニタによる安全性向上
- 食品・薬品・電池材料中などの微量異物検知

小型・ウェアラブル脳磁・神経計測によるヘルスケア・医療・BMIへ貢献

- 脳の構造・機能、神経系の免疫メカニズム、認知症・うつ病等が解明
- 脳磁計測システム普及による心療内科、健康用途、創薬への利用
- 電極フリーのブレインマシーンインターフェースが実現

インフラ、宇宙、資源探査、ロバストな超高感度センサによる極限環境での探索

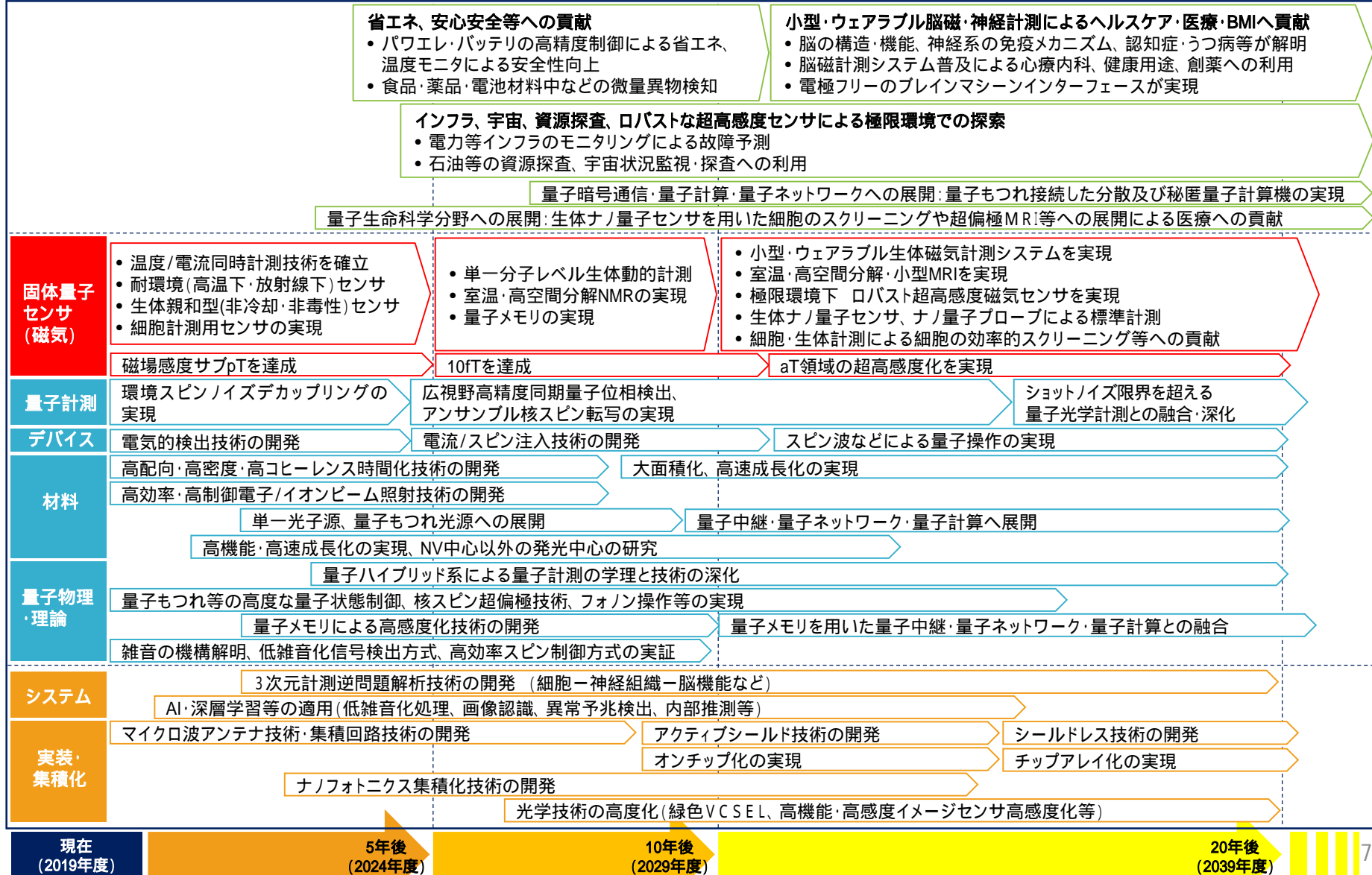
- 電力等インフラのモニタリングによる故障予測
- 石油等の資源探査、宇宙状況監視・探査への利用

量子暗号通信・量子計算・量子ネットワークへの展開:量子もつれ接続した分散及び秘匿量子計算機の実現

量子生命科学分野への展開:生体ナノ量子センサを用いた細胞のスクリーニングや超偏極MRI等への展開による医療への貢献

技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展



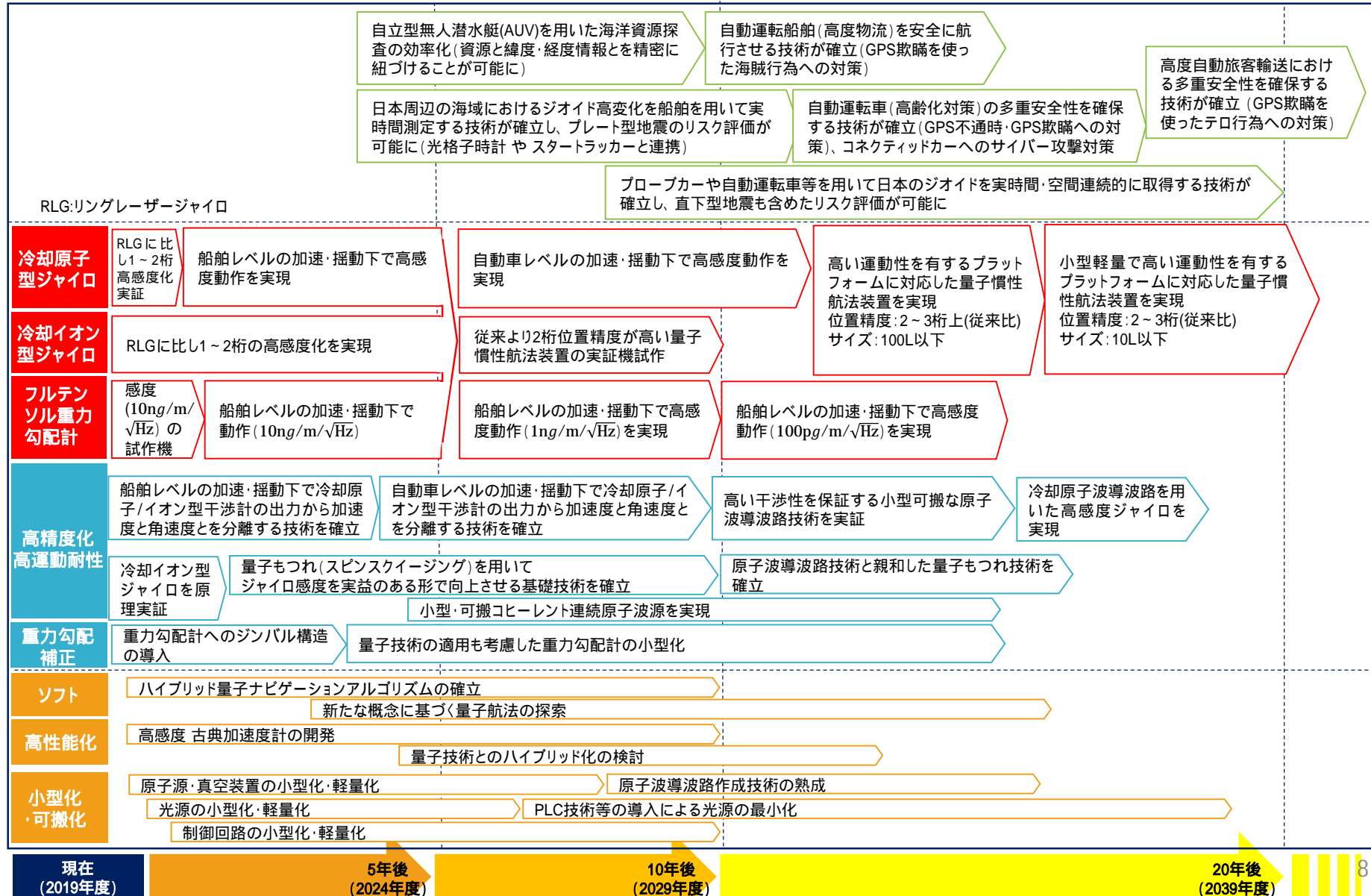
量子慣性センサ

現行装置の精度を凌駕する航法装置を実現。自動運転車・船舶の多重安全性確保、光格子時計と合わせた地震防災等への活用
 5年後に船舶環境下でのジャイロの高感度動作を実現、10年後に量子慣性航法装置の実証機を試作
 冷却イオン型ジャイロについて原理実証、冷却原子型ジャイロについて船舶レベルの加速・揺動下で角速度を精密計測する技術の確立を進める

経済・社会インパクト

技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展



光格子時計

超高精度な時間を社会に広く供給することにより、次世代の通信や相対論的測位等、新たなタイムビジネス市場を獲得
 光格子時計の更なる小型化・普及に取り組み、原子時計の標準化や相対論的測地を実証
 光格子時計の高精度化に向けた要素技術開発のほか、小型化・可搬化や測地につながる要素技術開発を進める

経済・社会 インパクト

大規模地震リスク評価
(量子慣性センサと連携)

非同期高速・大容量通信化
 ・高度位置情報サービス(VLBI、レーダー等)の高速・高精度化
 ・電力網スマートグリッドの高速最適化
 (潜在的な大災害の際の安定運用)

光格子 時計

従来の原子時計に比べ4桁精度が高い19桁精度・光格子時計を実証
(この精度ではmmレベルの高低差を検出可能)

光格子時計装置を体積400Lに小型化

光格子時計装置を体積200Lに小型化

相対論的測地のフィールドデモンストレーション
(mmオーダーでの変位観測)

高精度光原子時計(18桁精度)による秒の再定義

GNSS非依存の時空間ネットワーク、高精度分散システム(18桁精度)
 重力ポテンシャルの実時間マッピング(cmオーダー)

光格子時計装置の可搬化・低価格化(普及)

技術の進展

高精度化 (高信頼化)

原子の捕獲、冷却技術の小型化、高信頼化
 均一、ゼロ磁場高精度制御技術
 高安定・ロバストな光周波数制御技術

光格子時計装置の高信頼化

光格子時計装置の量産技術

測地・ マッピング

19桁光格子時計長期安定動作、高信頼化、無人運転化
 光格子時計による測地・マッピングシステム化

小型化 ・可搬化

半導体レーザ高性能化、高信頼化、安定供給化
 狭線幅、高集積小型光回路・光モジュール技術、高信頼化
 小型高信頼光・電気回路技術
 均一磁場高精度制御技術
 車載化を含めた光格子時計装置化技術

ネットワー ク化

長距離光リンク(1000km級)
 光格子時計光リンク中継器技術、高信頼化、低価格化
 光ファイバネットワークの低コスト化

本技術を支える周辺技術の進展

現在
(2019年度)

5年後
(2024年度)

10年後
(2029年度)

20年後
(2039年度)

量子もつれ光センサ

細胞の非侵襲観察や網膜厚みの精密計測など医療技術の進展や、高感度化学物質検知により、安全・安心社会に貢献
 10年後に量子OCTで体積分解能 $1\mu\text{m}^3$ 以下を実現。また、可視光検出器で遠赤外域までの量子赤外吸収分光を実現
 可視・赤外量子もつれ光源の開発、光子検出器の高速化や赤外域での長波長化、統合的な高速信号処理の開発を進める

経済・社会 インパクト

分散耐性・高分解能量子OCTによる、透明電子デバイス(画像素子や光IC)などの評価・検査技術に革新

3次元高分解能量子OCTにより、細胞のその場観察が可能となり、再生医療などの発展に寄与

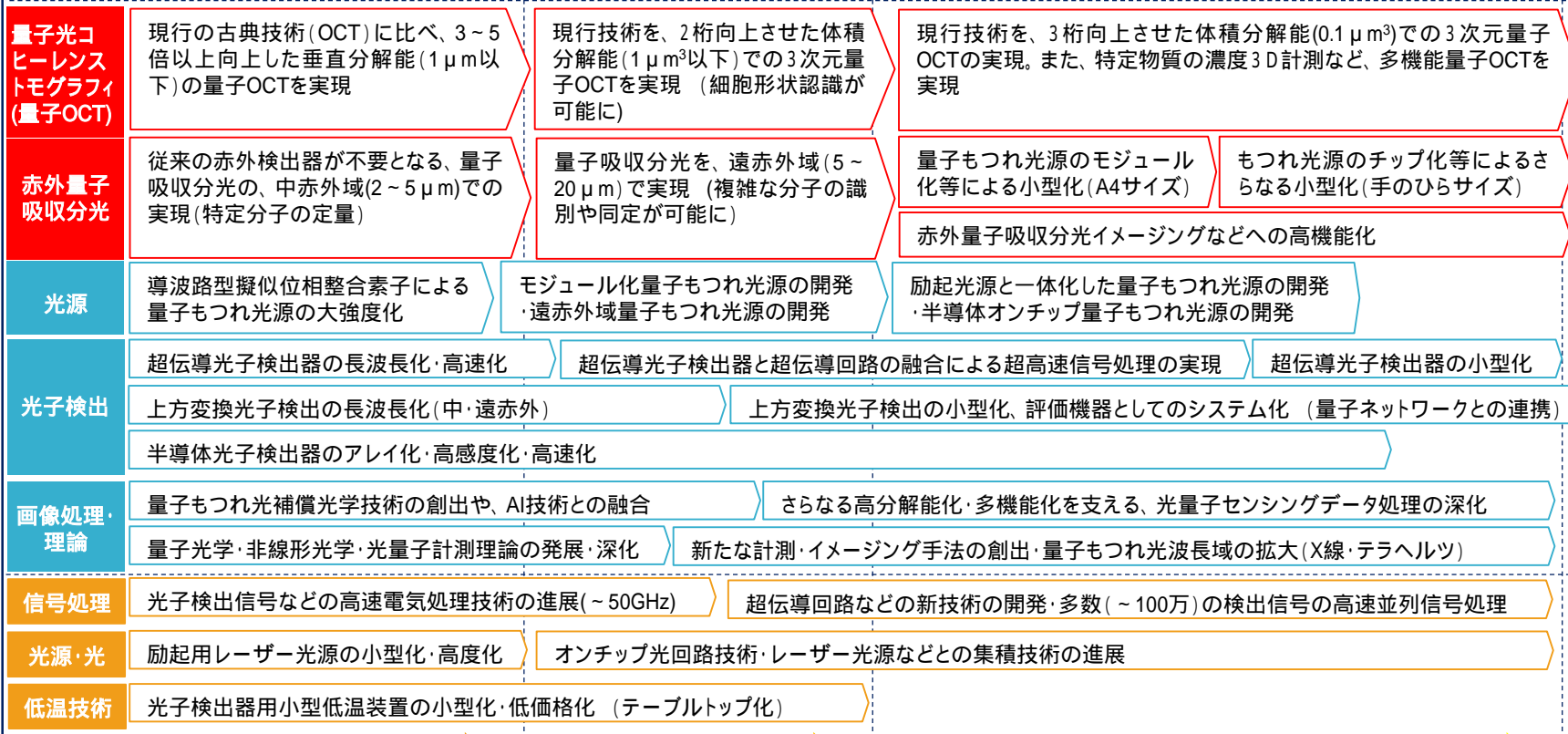
量子OCTによる超高分解能観察により、疾患の早期発見が可能になり、健康長寿に寄与。

中赤外量子吸収分光による、コンパクトな危険物識別装置で、より安全・安心な社会へ。

遠赤外量子吸収分光による、化学物質・薬剤の検出・同定・分析がどこでも実施可能となり、環境モニタリング、薬品製造、医療などへ大きな波及効果

量子生命科学研究、固体量子センサへの波及・展開

技術の進展



本技術を支える周辺技術の進展



量子スピントロニクスセンサ(トンネル磁気抵抗センサ・スピン熱流センサ)

トンネル磁気抵抗(TMR)センサ: 低価格・大量生産性により安全で高性能且つ安価な磁場センサの実現により社会インフラや建築物、農地、生体モニターへ応用
スピン熱流センサ: 熱の流れの情報の活用が可能で、プラントなど熱に関わる産業や社会インフラの中での活用が期待
 10年後には省電力かつ自励発振可能なTMRセンサ、小型、可搬、マトリクス状などのスピン熱流センサが実現
 強磁性トンネル接合作製技術の向上、スピンによる量子整流機構やトポロジカル電子構造を利用した熱電変換技術の開発等を進める

経済・社会インパクト

技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展

経済・社会インパクト

技術の進展

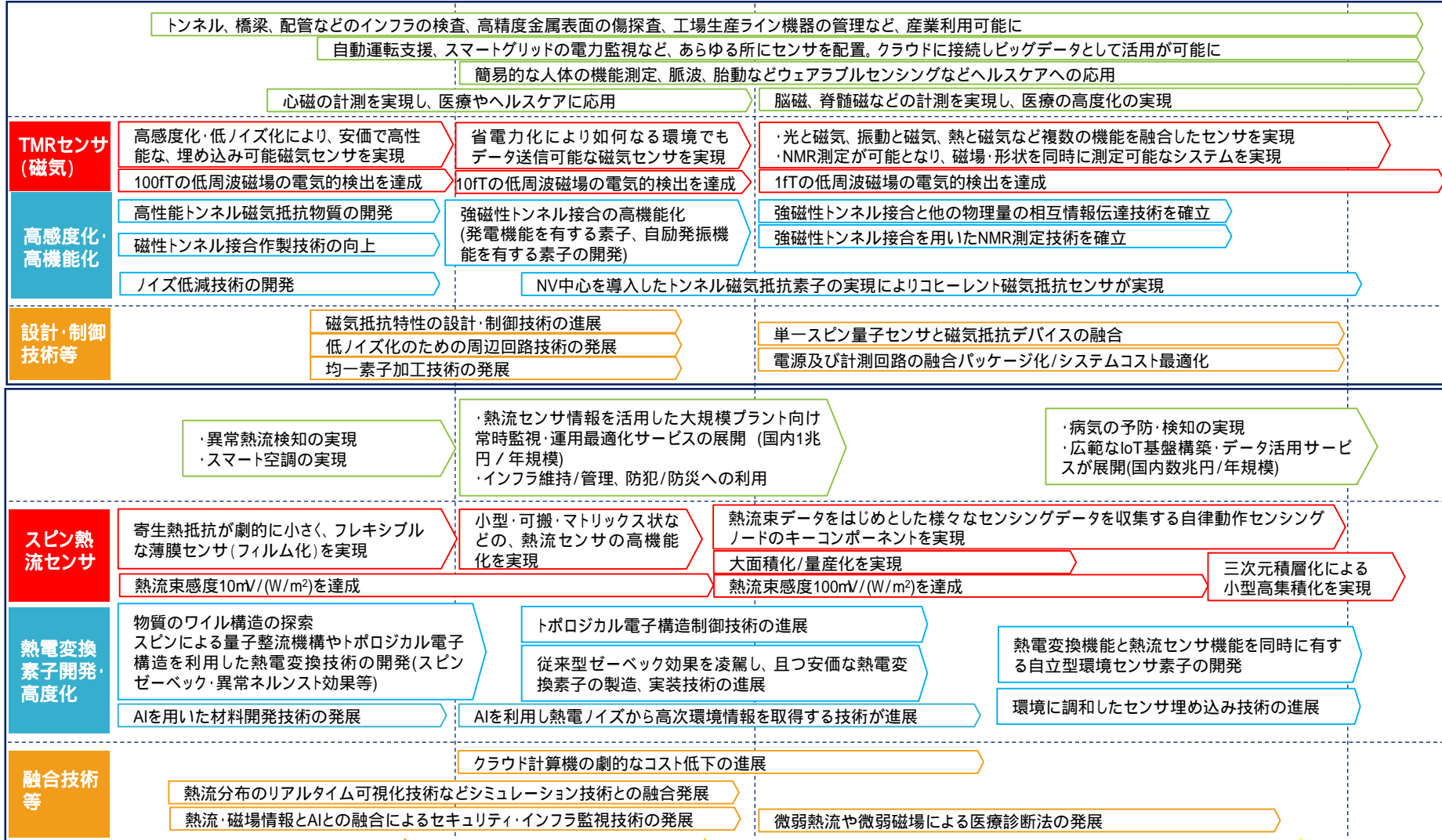
本技術を支える周辺技術の進展

現在 (2019年度)

5年後 (2024年度)

10年後 (2029年度)

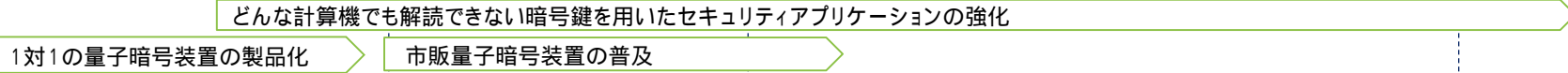
20年後 (2039年度)



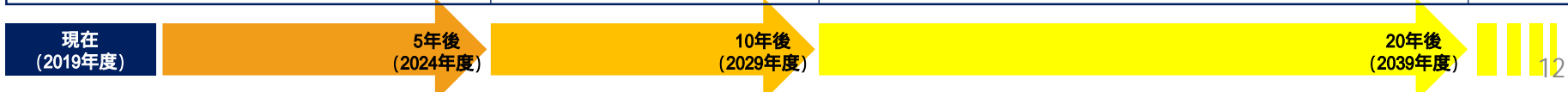
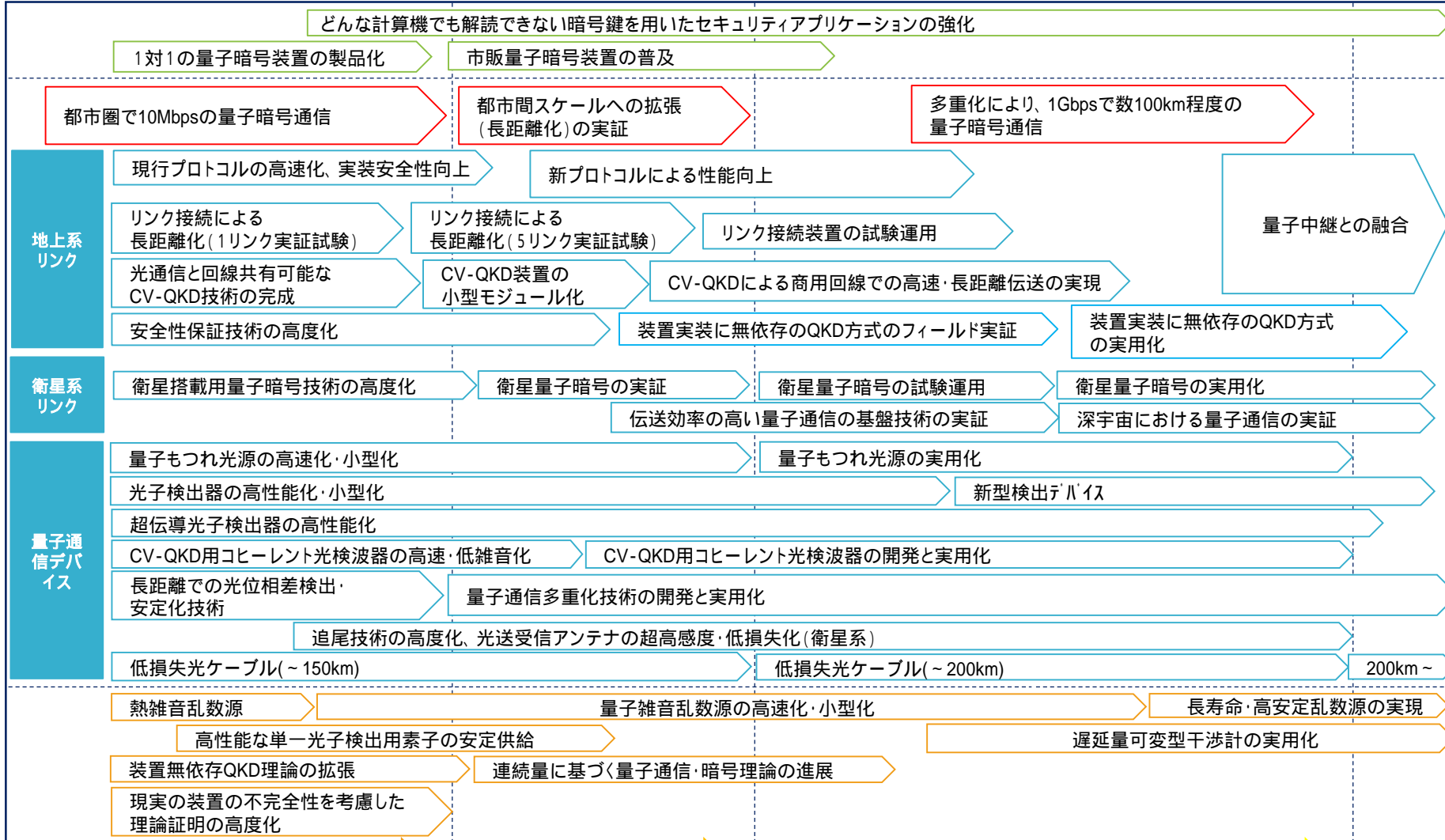
量子通信・暗号リンク技術

量子暗号装置の製品化によって、様々なセキュリティアプリケーションの安全性を強化
 5年後までに都市圏で10Mbpsの量子暗号通信、10年後までに都市間スケールへの拡張(長距離化)の実証
 高性能な単一光子検出器や量子もつれ光源、乱数源等の研究開発。加えて、QKDの新方式の研究開発

経済・社会 インパクト



技術の進展

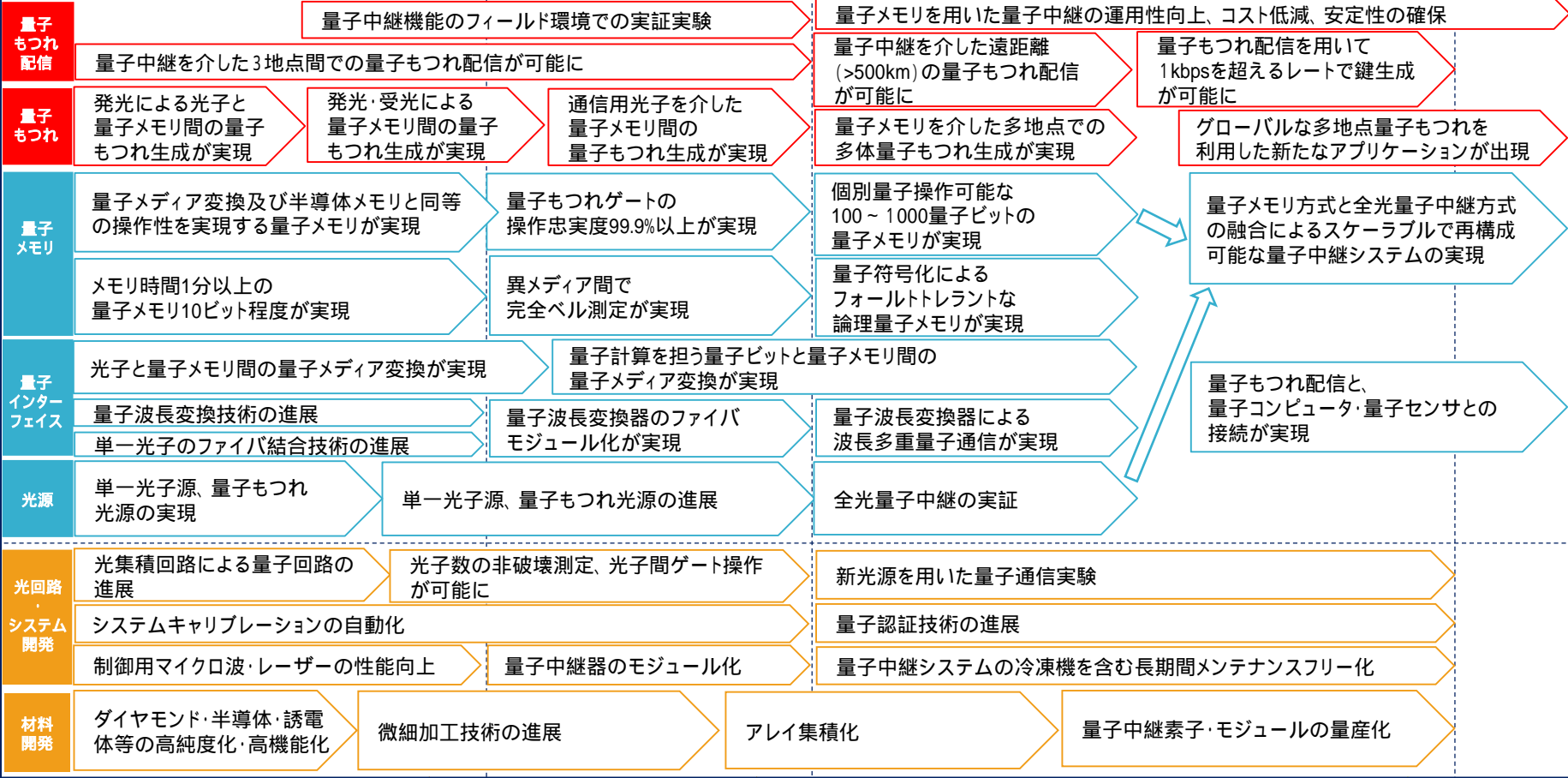


量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)

量子インターネット接続による秘匿量子計算や分散量子計算を実現することで、データ処理を高速化
 10年後までに3地点間量子もつれ配信、20年後までに量子もつれ配信を用いた 1 kbps を超える鍵生成を実現
 量子中継器を実現するための量子メモリ実装、量子もつれ生成及び光との接続技術等の研究開発

経済・社会インパクト

- ユーザ間を量子インターネットで接続した量子暗号通信が可能に
- 量子コンピュータとユーザ間を量子インターネットで接続し秘匿量子計算が可能に
- 量子コンピュータ同士を量子インターネットで接続し分散量子計算が可能に
- 量子センサを量子インターネットで接続し量子センサネットワークが可能に



技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展

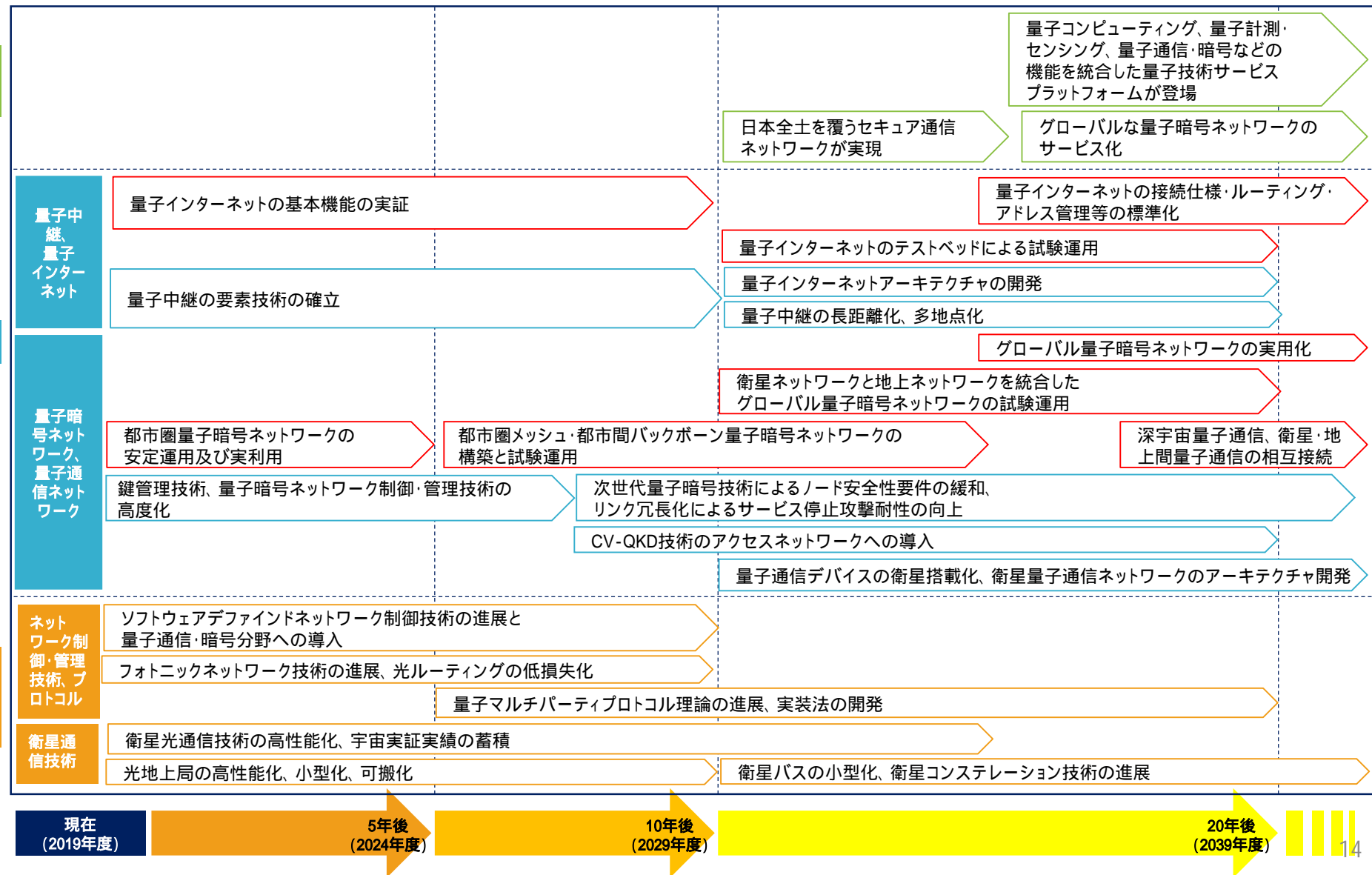
ネットワーク化技術(構築、運用、保守等)

地上系・衛星系を統合した量子暗号ネットワーク、深宇宙量子通信ネットワーク及び量子インターネットを構築、安全で高効率なネットワークを実現
 10年後までに都市圏メッシュ、20年後までにグローバル量子暗号ネットワークを実現、深宇宙量子通信及び量子インターネットを実証
 リンク技術・量子中継技術を駆使した量子通信・暗号のネットワーク化技術や量子インターネット基盤技術等に関する研究開発

経済・社会
インパクト

技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展



現在 (2019年度) 5年後 (2024年度) 10年後 (2029年度) 20年後 (2039年度)

融合領域ロードマップ

本ロードマップは、量子融合イノベーション領域を対象に、国内外の研究動向等を踏まえ、今後20年程度の各領域の発展の見通しを取りまとめたものである。各ロードマップにおいては、融合領域の進展、融合領域を支える技術体系、そしてこれらがもたらす社会的・経済的インパクト、を記載しており、官民で今後のビジョンを共有することを目的の一つとしている。

政府においては、本ロードマップに基づき、量子融合イノベーション領域に対する研究開発支援等を強化していく予定である。これらの支援等も踏まえ、民間からの新規の投資や積極的な参画・参入等が促進され、国をあげた産学連携・官民協働のプロジェクトへと発展していくことを強く期待する。

1. 量子コンピュータ・量子シミュレーション
量子AI技術
2. 量子計測・センシング
量子生命科学(生体ナノ量子センサ)
量子生命科学(量子技術を用いた超高感度MRI/NMR)
量子生命科学(量子論的生命現象の解明・模倣)
3. 量子通信・暗号
量子セキュリティ技術

量子AI技術

将来的なニューラルネットや人類の学習メカニズムにおける量子力学的要素の解明、実証など、AIの可能性を最大化
 量子インフラ(量子通信・インターネット、量子センサ、量子コンピュータ)を組み合わせた量子AIシステムの創出
 機械学習(AI)と量子情報処理の融合による、量子機械学習の基礎学理の構築やマテリアルズ・インフォマティクスなど化学・材料・物性計算、
 量子シミュレーション、量子系の制御に量子AIの方法論を応用

経済・社会 インパクト

機械学習の学習速度が加速、必要な学習を選択しながら
 必要な事項のみ学習(クラスタリング)

AIにおける推論、情報処理などの大幅な性能向上と処理速度向上

科学技術フロンティアの拡大
 ・素粒子・物性物理学研究への展開
 ・量子生命現象への応用

新機能材料(学理解明)
 ・高温超伝導物質
 ・高効率触媒

人工光合成
 ・界面機能
 ・光機能材料
 ・輸送現象

高度科学技術計算
 ・熱流体解析
 ・逆行列計算
 ・構造力学解析
 ・線形システムソルバ

アニーラ型 ハード/ ソフト

イジングモデルの量子機械学習への適用
 量子ボルツマンマシン学習理論の応用
 古典疑似不可能なダイナミクスの適用

機械学習から量子AI機能の開発
 AIの加速に向けた計算手法の確立
 量子AIの数理に関する学問的探求

量子ニューラルネットワークの計算可能性の解明
 NP困難な問題に対峙した時の実際の計算性能
 自然界におけるガラスの機構の解明など複雑な現象への挑戦
 人類の学習機構における量子力学的要素の解明

領域の進展

ゲート型 ハード/ ソフト

量子回路学習・量子カーネル法・量子生成モデルなどの量子機械学習フレームワークの開発

指数加速が起こりうる高度な量子機械学習アルゴリズムの構築

実データや実問題への量子機械学習の適用

量子AIアプローチの量子制御への応用

量子センシングとNISQマシンを組み合わせた量子機械学習の構築

量子センシングとNISQを組み合わせた量子機械学習の量子生命科学への応用

量子AIアプローチの量子多体系(材料・化学)への応用

NISQマシンを用いた量子機械学習の実装

量子機械学習や量子化学計算を用いた量子マテリアルズ・インフォマティクスや量子ケモインフォマティクス

量子機械学習アルゴリズムの性能評価

古典データと量子データのインターフェース・データ構造の構築

脱量子化、量子インスパイアードアルゴリズムの構築

量子AIの数理の学問的探求(量子モデルの構成、パラメータ空間の情報幾何、パラメータ調整方法の開発、量子特徴量空間の表現能力・分離能力の解析)

本領域を支える技術の進展

アニーラ型 ハード/ ソフト

コヒーレンス性能が高く、拡張性に優れた100量子ビットの製造

コヒーレンス性能が高く、拡張性に優れた2000量子ビットの製造

拡張性が高くコヒーレンス性能の高い大規模量子アニーリングマシンの実現

アニーリング型コンピュータによる一部の組合せ最適化問題が解法可能に

アニーリング型コンピュータによって、一部の実社会問題の解決に適用開始

線形計画問題・二次計画問題を解くソルバ・アルゴリズムと組み合わせ、アニーリングが最適化問題全般に行き渡るアクセラレータとしての存在に

アニーラ/ ゲート共通

量子プログラミング言語とコンパイラの基礎の確立

大規模化へ向けたコンパイラの高速度化・自動化が進展

ゲート型 ハード/ ソフト

物理量子ビット(50量子ビット程度)の任意の制御が可能に

物理量子ビット(100量子ビット程度)の任意の量子制御が可能に

500~1,000個の物理量子ビットを実装した量子コンピュータが出現

量子誤り訂正された論理ビット(10~50個)を実装した量子コンピュータが出現

量子古典ハイブリッドアルゴリズムの優位性の実証

量子誤り訂正アーキテクチャの設計と実機を用いた量子の優位性の実証

プログラマブルな誤り訂正を可能にするアーキテクチャの登場

量子オープンソースウェアができ、量子技術を融合するアーキテクチャが可能に

現在
(2019年度)

5年後
(2024年度)

10年後
(2029年度)

20年後
(2039年度)

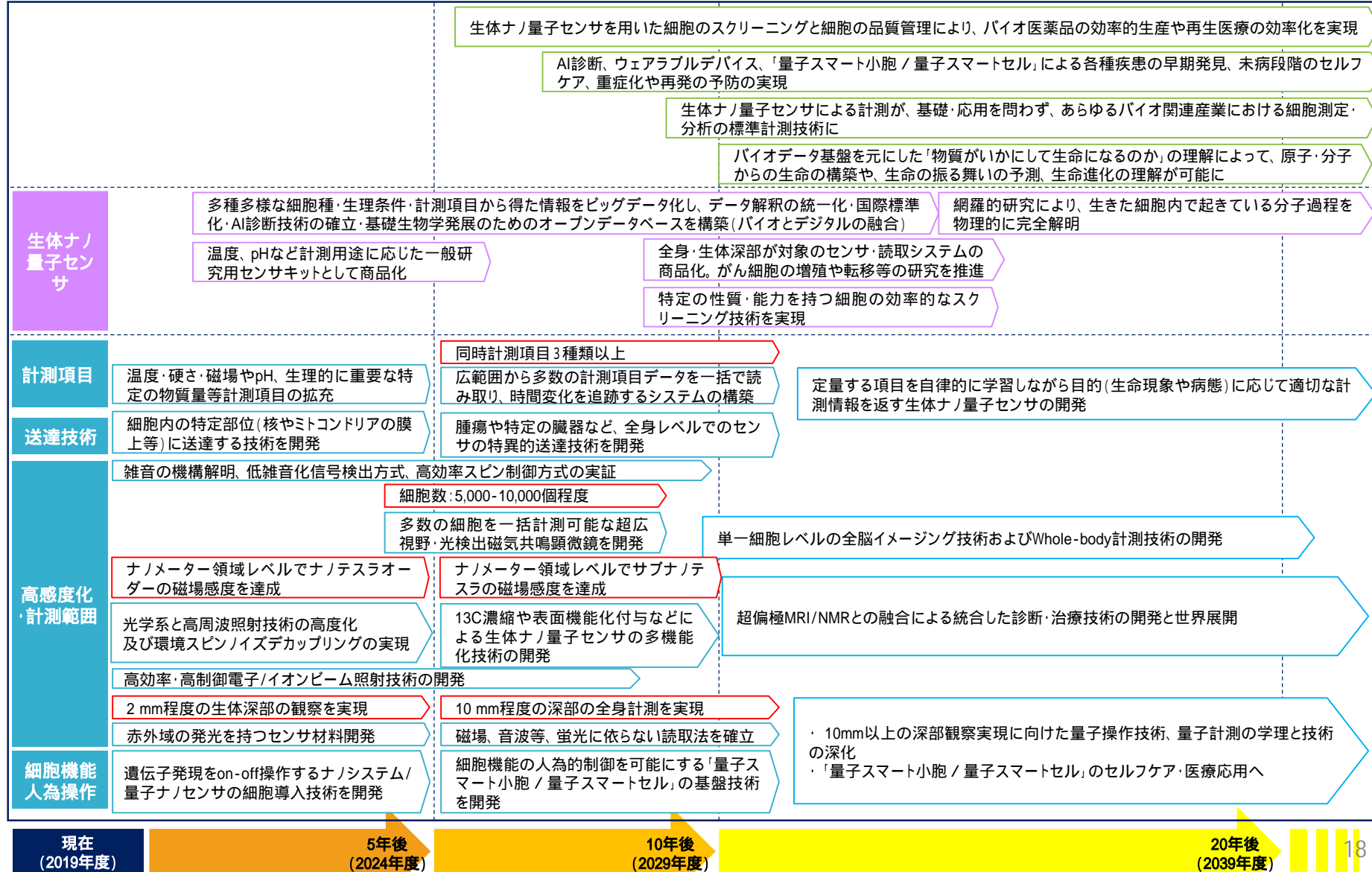
量子生命科学 (生体ナノ量子センサ)

特定の性質・能力を持つ細胞のスクリーニングが可能となり、バイオ医薬品の効率的生産や再生医療の効率化等が期待
5年後は個々の細胞レベル、10年後は生物個体レベルの計測範囲を実現し、生命現象の予測・再構築のメソッドを構築する
計測可能項目の拡充や細胞内の特定部位への送達技術、広範囲観察、生体深部観察技術の開発を進める

経済・社会
インパクト

領域の進展

本領域を支える技術の
進展



量子生命科学 (量子技術を用いた超高感度MRI/NMR)

薬剤スクリーニングによる新薬開発への貢献、代謝イメージングによる深部がん治療効果判定や難病診断、早期発見等が期待
5年後、室温超偏極による薬剤スクリーニングや長時間代謝過程可視化が実現。10年後、医療診断が実現、臨床治験が開始
超偏極化、量子符号化、ナノセンサ造影技術等の開発により、超高感度化を進める。また、多種分子の超偏極化技術も開発

経済・社会 インパクト

分子構造情報に基づく高速薬剤スクリーニングが生化学、薬学系研究室・創薬メーカーに普及し、新薬開発に大きく貢献

代謝イメージングが生命医科学系研究室に普及し、生命現象・病理の解明に大きく貢献

膵臓、前立腺、腎臓等の人体深部のがんの治療効果を直後に判定。循環器・脳疾患診断等の難病診断も可能に

安全かつ環境に優しいナノ造影技術が、造影剤として実用化

超偏極、ナノ造影、およびAI技術によるMRIを利用した手軽でエビデンスに基づいた診断により、未病段階での早期発見や重症化・再発の予防等を切れ目なく行う社会システムを実現

領域の進展

室温超偏極技術

室温超偏極生体分子構造解析
室温超偏極薬剤スクリーニング
量子符号化による長時間代謝プロセス可視化の実現

室温超偏極薬効薬理・動態試験
大型動物での室温超偏極代謝イメージングの実現

様々な分子で大規模量子もつれを利用した生体分子解析・生体内分析の実現
室温超偏極プローブによる抗がん剤治療効果判定の臨床試験の実施

低温超偏極技術

高偏極率低温超偏極による長寿命プローブの代謝イメージングが実現

低価格化に資する偏極技術開発による生体代謝イメージングの実用化

多種分子の超偏極プローブ/センサによる高速疾患診断技術の臨床試験の実施
多種分子の超偏極プローブ/センサの臨床応用

複合技術

ナノセンサ造影材と超偏極技術により従来手法では困難な1mm以下の初期がんや身体深部の膵臓がん等の明瞭な観測を実現

超偏極化したナノセンサ造影材を用いた多変量計測とAI解析により、がんの生検不要なその場病理診断や発症予測の技術を確立

本領域を支える技術の進展

超偏極プローブ

少量試料10,000倍高感度化
大容量試料1,000倍高感度化
抗がん剤効果判定用ビルビリン酸の室温超偏極化
量子符号化センサ技術の開発

大容量試料10,000倍高感度化
多種分子の超偏極化技術の開発
高偏極率・長寿命分子プローブ開発
量子符号化もつれセンサ技術の開発

大容量多種分子10,000倍高感度化
より長寿命なプローブの実用化
量子コンピューティングによる大規模な量子化学計算と量子AIの活用による、より高度な量子符号化センサの開発

超偏極装置

小容量室温超偏極装置の開発
高偏極率・低価格低温超偏極装置の開発

超偏極と小型磁石と組合せた高感度磁気共鳴装置の開発
社会実装に向けた装置の大容量化、偏極効率の向上、低価格化、GMP準拠などの改良

ナノセンサ造影技術

ナノ粒子による病巣への送達や造影技術を高度化し、ナノセンサ造影剤を複数開発

ナノ造影技術の臨床応用開発

アルゴリズムとデータベース

多変量計測による病理推定アルゴリズムを開発
がんや脳疾患等の病理推定の自動化を目的とするデータベースを構築

多変量計測、ナノ造影技術とAIによる病理推定技術を実現

大容量・多変量画像解析による「MRI病理診断」を可能とする情報技術の確立

現在
(2019年度)

5年後
(2024年度)

10年後
(2029年度)

20年後
(2039年度)

量子生命科学 (量子論的生命現象の解明・模倣)

光合成等生物機能を模倣した技術の実現により、省エネ、有用物質生産、持続的・一次生産、地球環境改善等への貢献が期待
 5年後は分子レベルで量子効果の機能性を解明、10年後は細胞レベルに展開
 光合成における量子コヒーレンス等、生物内の量子状態計測や生体分子の動構造解析、情報科学による統合的解析を進める

経済・社会 インパクト

- 候補物質に対する生体反応のシミュレーションによる超効率的・低コストの創薬を実現
嗅覚を模倣・改良した超高感度物質センサによる超早期病気発見
- 発酵微生物や薬用植物の酵素の働きを模倣・改良し、食品を高付加価値化
突然変異を量子レベルで制御するスマート育種で有用作物を作出し、持続的・一次生産に貢献
- 生物を模倣し、ありふれた元素を用いた人工光合成、人工酵素、超省エネ肥料生産等により、経済性と環境適性を両立した持続可能なエネルギー生産、有用物質(バイオ燃料、バイオ素材、バイオ医薬等)生産、農業生産を実現・普及し、地球環境を改善
- 「物質が集まり、いかにして生命になるのか」という学術的に最も根源的な問いの解明
原子・分子からの生命の再構築と生命の振る舞い(人間の意識など)の予測が可能に

領域の進展

量子論的な物理法則でしか説明できないナノスケール世界の生命現象とマクロスケール世界への波及機構の解明

- 光合成、呼吸鎖系、生物的窒素固定等の量子～細胞レベルでの機構解明
- 嗅覚、磁気等の環境受容の量子～細胞レベルでの機構解明
- 突然変異・進化、遺伝子発現の量子～細胞レベルでの機構解明
- 酵素反応や、受容体による情報伝達等、分子相互作用の精密解明
- 多様な神経回路から生じる脳機能の量子～個体レベル計測に基づく機構解明

生物機能を模倣した技術の開発、商品化

- 器官・個体レベルへの波及機構の解明
- 生物機能のメカニズムや利用元素に倣った人工光合成システム、太陽電池、超省エネ窒素固定技術の実現
- 嗅覚センサ等を開発、病原物質の検出などへ応用
- 量子効果を制御した人工酵素による物質生産技術の開発
- 脳機能の予測

本領域を支える技術の進展

- 量子状態計測**
 - 超短パルスレーザー等を利用した、光合成や呼吸における量子コヒーレンスの高精度観測、生物的窒素固定反応の量子計測
 - 生物の磁気・嗅覚受容メカニズムにおける量子効果の分光学的解析
 - DNA突然変異、酵素反応等における量子の重ね合わせ状態の計測と理論的解析
 - 高輝度放射光軟X線を用いたポンプ-プローブ法による生体分子の量子計測
 - 生体分子の波動関数の理論計算
- 量子効果を利用する生物機能に倣った分子設計**
- 生体分子の動構造解析**
 - 1 以下の高解像度での分子構造解析が可能な中性子構造解析システム
 - 10万以上の高分子量に解析対象を拡大した、X線相補データを組み合わせた量子レベル構造解析
 - 量子レベル構造解析と実験的ダイナミクス解析を量子シミュレーション解析で統合した、シームレス高精度動構造解析
 - 多種多様な生物種で、超分子でのサブ分解能、サブピコ秒での時分割の構造解析
 - 電子軌道数10万超を1,2時間で量子化学計算
 - 情報科学によるバイオデータの統合的解析
 - 量子コンピュータにより深化した物質機能や化学反応の理解を元にした、生命機能の化学的理解
 - 量子センシングとNISQによる量子機械学習の生命科学応用システムとしての生命現象の理解へ
- 情報科学**
 - 新しい計測技術により得られる生物各階層のバイオデータを統合的に解析するためのオープンなデータベースを構築
 - 量子確率論的フレームワークの生命科学への応用



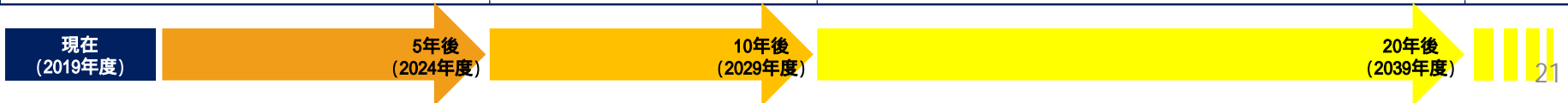
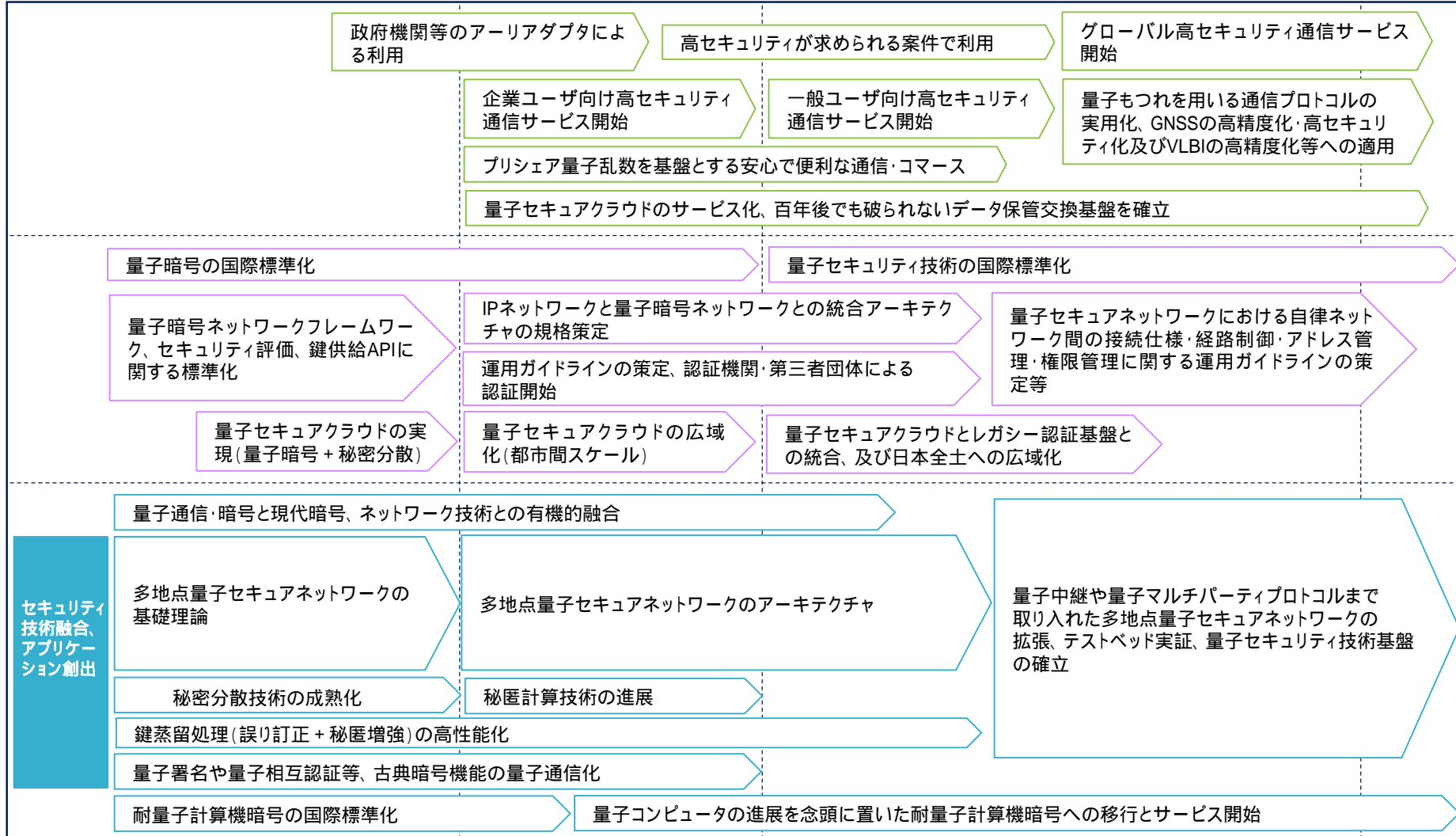
量子セキュリティ技術

政府機関等のアーリアダプタによる利用や、企業ユーザ及び一般ユーザ向けの高セキュリティ通信サービスを実現
 5年後までに量子セキュアクラウドを実現、15年後までに量子セキュアクラウドとレガシー認証基盤の統合及び広域化
 量子暗号技術と計算量に依らないセキュリティ技術(秘密分散技術等)の有機的融合、これらと認証基盤との連携を推進

経済・社会 インパクト

領域の進展

本領域を支える技術の 進展



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、ベンチャー企業の実立・資金調達も進んでいる。

政府の取組



ü 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

- ü 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)
- ü 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



ü 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

- ü 2018年から10年間で、10億ユーロ(約1,250億円)規模のプロジェクトを開始
- ü 加えて、各国が独自予算で研究開発を実施
- ü 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



ü 「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

- ü 「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)
- ü 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~)



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

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

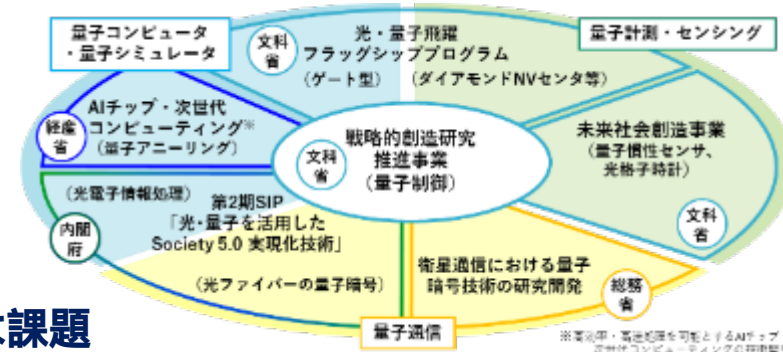
第5期科学技術基本計画(平成28年1月閣議決定)において、「光・量子技術」として初めて位置付けられる

「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



(出典：D-Wave社)

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



(出典：IBM社)

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

アト秒レーザー

もつれ光センサ

エレクトロニクス
フォトンクス
スピントロニクス

耐量子計算機暗号

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フォトンクス

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

主要技術領域

量子コンピュータ・量子シミュレーション

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）

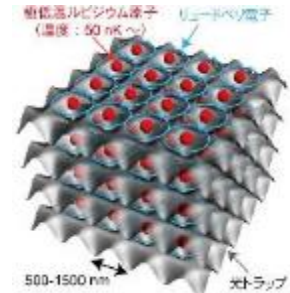
- 量子力学的な状態を情報処理の単位（量子ビット）として利用したコンピュータ
- 日本は超伝導量子ビット製作に世界に先駆けて成功。高品質の超伝導量子ビットの製作・制御に高い技術力を保持
- 高品質の超伝導量子ビットによる大規模化が課題
- 大規模超並列計算により、因数分解、検索、量子深層学習などの問題を短時間かつ超低消費電力で計算が可能となる見通し



量子ビットの冷却・制御装置（東大 中村教授）

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（分子研 大森教授）

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



量子コンピュータのハード/ソフトウェアの階層

量子アニーリング

- 量子力学的「重ね合わせ」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

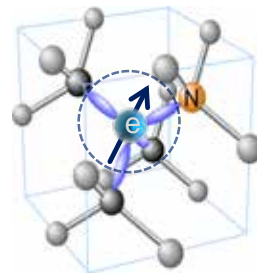


D-Wave社(カナダ)が開発した量子アニーリングマシン（出典：D-Wave社）

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通貫な研究開発が必要
- 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

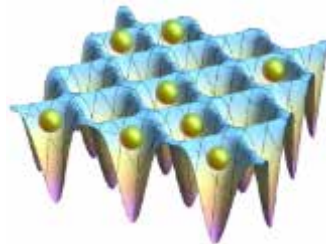
- 原子の波としての性質を利用した**加速度や回転速度を測るセンサ**。現在広く利用されているリングレーザージャイロより**2桁の精度向上**が期待
- 日本は**光技術のレベルが高い**一方で、原理実証に留まっており、**実用に向けた小型化・可搬化**が重要
- GPS信号が無くても自分の位置を確認して目的地に到達できる、例えば、**完全自動運転車、自律型無人潜水機（AUV）**が実現可能



(出典：JAMSTEC)

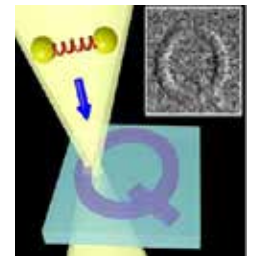
光格子時計

- 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

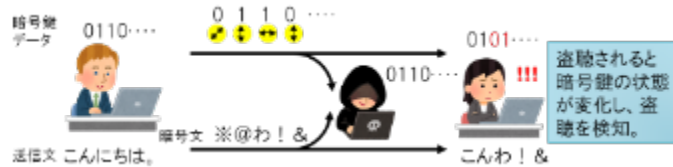


主要技術領域 量子通信・暗号

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。

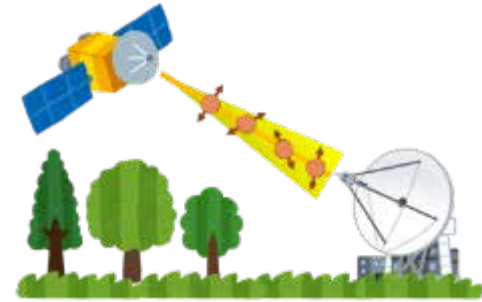
量子暗号|光ファイバー

- 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組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ことが重要



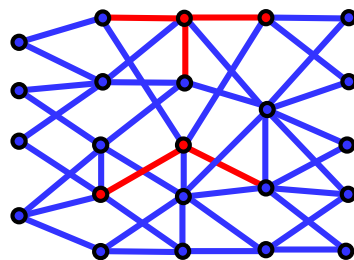
量子暗号|衛星通信

- 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

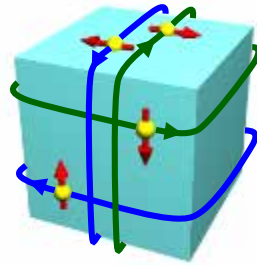
- 量子暗号は光の損失により100km程度の通信距離が限界。現在、物理的に盗聴者を侵入させない古典的手法で中継しており、理論上安全な中継技術は未確立
- 日本には、半導体技術やダイヤモンド結晶成長技術など、量子中継デバイスの集積化の強みとなり得る技術がある。
- 一方、実現には伝送速度、誤り訂正などの課題があり、長期的視点から取り組む必要がある。



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

スピントロニクス材料

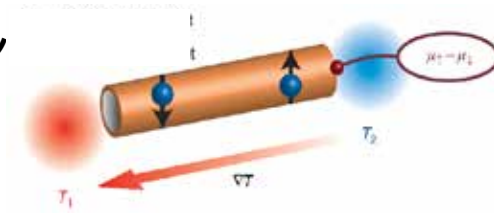
- 多数スピンからなるナノ粒子である**スキルミオン**は、少ない電流で駆動できる**情報担体**となりうるとして研究が進展中
- 損失ゼロの電荷輸送**による量子回路や**低電流駆動が可能**な情報担体が可能に
- 超低消費・大容量メモリの実現に貢献**



スキルミオン

エネルギー変換材料

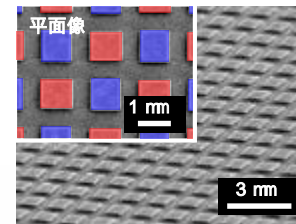
- スピン-電荷変換による熱電効果であるスピンゼーベック効果**を活用
- 安価で**大量作製が可能**な熱電変換や単一デバイスで**熱、振動、光等からエネルギーを獲得する多源環境発電**が可能に
- エネルギーハーベスティング技術を用いた無電源IoTセンサの実現に貢献**



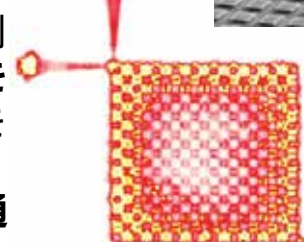
スピンゼーベック効果

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ニック結晶**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ニック結晶 7

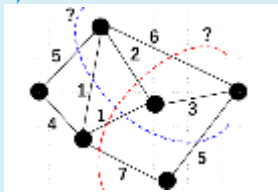
人工知能の高度化は、Society 5.0実現の重要な鍵。AIの実社会への展開が次々となされているが、今後、この発展を支えていくためには、次世代コンピューティング技術の発展も重要な要因となる。

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。

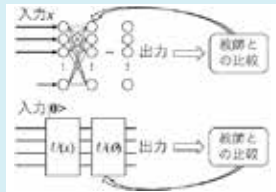
教師なし学習・教師あり学習

- QAQA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
- 画像診断や、材料開発・創薬などの分野に期待

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

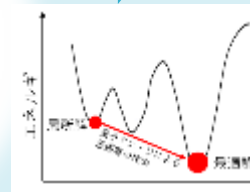


ニューラルネットと量子機械学習の対比

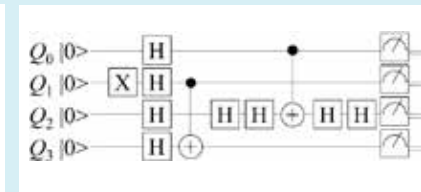
新アルゴリズム開発

- 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



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



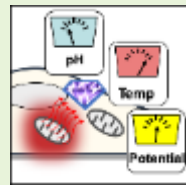
連携イメージ

量子AI技術により、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！

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

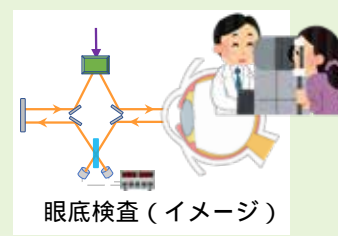
- ナノ量子センサを生体細胞に適用
- 核やミトコンドリアなど局所のpH、温度、電流等、これまで計測できなかった細胞内部および細胞組織のパラメータが取得可能に



1細胞精度の診断 (イメージ)

量子もつれ光イメージング

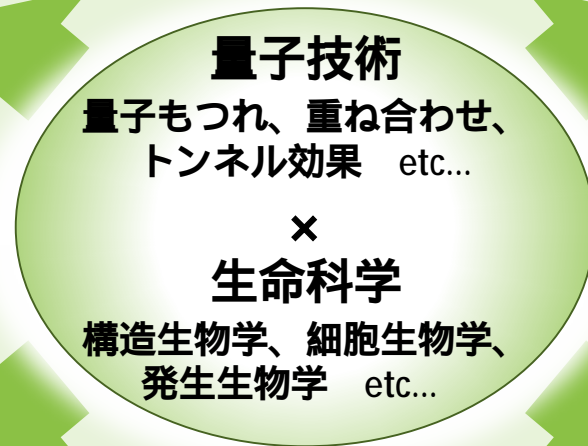
- 量子もつれ光をイメージングに活用
- 従来光のS/N比を超える高感度・高精細な計測により毛細血管等の細部観察が可能に



眼底検査 (イメージ)

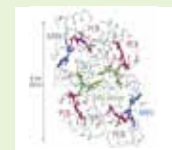
老化状況や、がんの発症前予測など新たな診断が実現

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

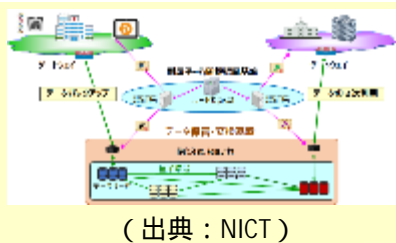
量子生命技術により、健康・長寿社会の実現や環境技術の革新に貢献！

近年、量子コンピュータでも解読困難な耐量子計算機暗号技術や現在の公開鍵認証基盤からの移行技術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統合することにより「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、耐量子計算機暗号を統合
- 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

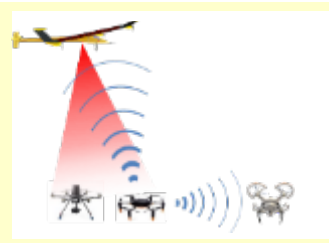
事業継続性のあるデータバックアップや安全なデータ2次利用を実現し、社会保障費の削減や新サービスを創出



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

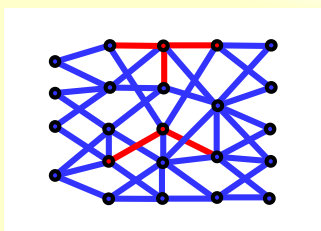
IoT機器やドローン等が、いつでもどこでも高速かつ安全な通信ができるサービスを提供



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(国際ハブ)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(例)

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:東北大学)

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(例)

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コア技術等を有する技術領域であること
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發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・予算等を集積化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)

超伝導量子コンピュータ研究拠点
量子デバイス開発拠点
量子ソフトウェア(量子AI等)研究拠点
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
量子セキュリティ研究拠点
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、我が国で量子技術の研究開発等に携わる研究者・技術者層は、諸外国と比べて薄い状況であり、国際的な人材獲得競争から大きな後れをとるおそれ
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・技術者の戦略的な育成・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

戦略的な取組

- <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



優れた研究者・技術者を戦略的に育成・確保し、我が国の研究開発力の維持・向上させる 12