

# 量子技術イノベーション戦略 (最終報告案)

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

## 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) 国をあげて量子技術に取り組む必要性

## II. 基本方針

## III. 量子技術イノベーションが拓く社会像

## 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）」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

## V. 本戦略の推進体制

## 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術として位置づけ、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、重要な革新技術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で推進・展開していく。

## Ⅱ. 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る上で、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る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>

- ① 「量子技術イノベーション」の戦略的展開
- ② 量子技術と既存（古典）技術等の一体的・総合的推進
- ③ 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。

### 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>

##### ① 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。

##### ② 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。

##### ③ 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。

## 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Ⅲで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、スピント等を通じて関連・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。

#### 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（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。

### ii) 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（スピナウト）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数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。

### iii) 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。

#### iv) 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發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。

<p>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</p>
--

#### <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、将来的な困り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。

## V. 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。



# 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、①技術の達成目標、②中核となる技術体系、③周辺技術・関連技術、そしてこれらがもたらす④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

- ①ゲート型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)
- ②量子ソフトウェア(ゲート型)
- ③量子ソフトウェア(アニーリング型)
- ④量子シミュレーション(冷却原子)
- ⑤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

- ⑥固体量子センサ(ダイヤモンドNV中心等)
- ⑦量子慣性センサ
- ⑧光格子時計
- ⑨量子もつれ光センサ
- ⑩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)

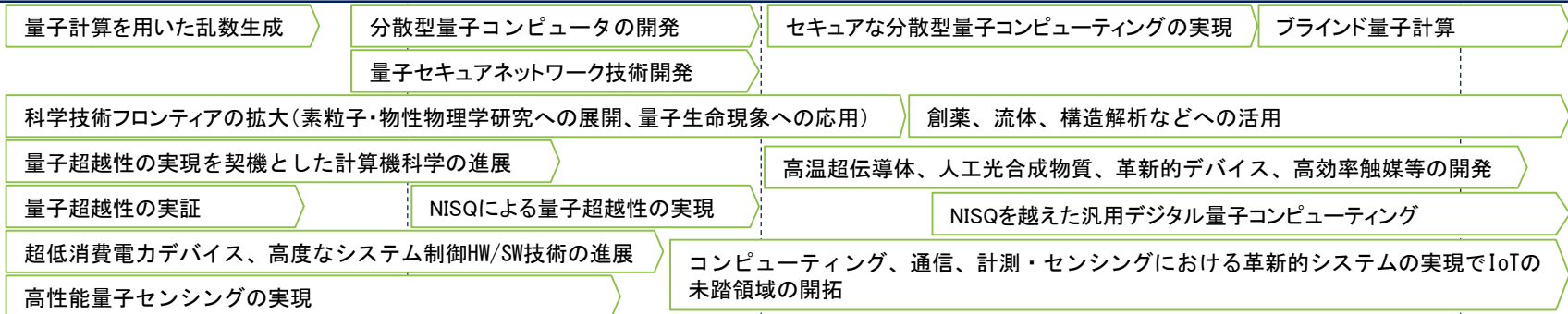
## 3. 量子通信・暗号

- ⑪量子通信・暗号リンク技術
- ⑫量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)
- ⑬ネットワーク化技術(構築、運用、保守等)

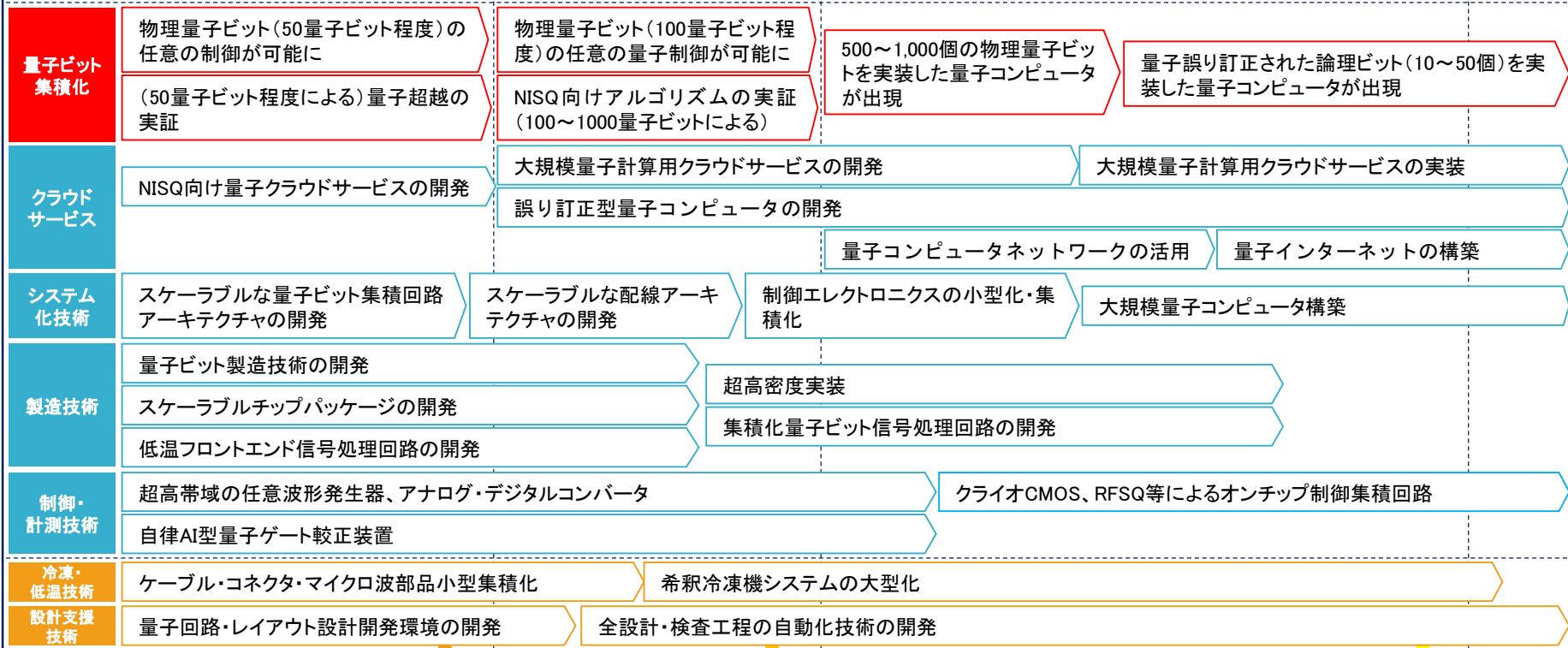
# ①ゲート型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

- 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

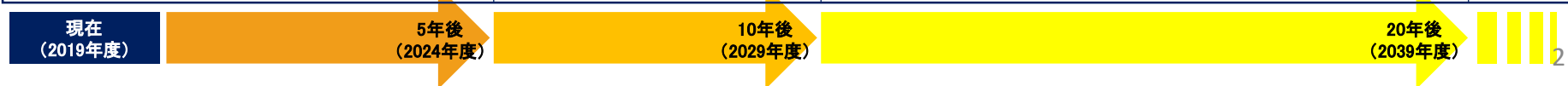
## 経済・社会 インパクト



## 技術の進展



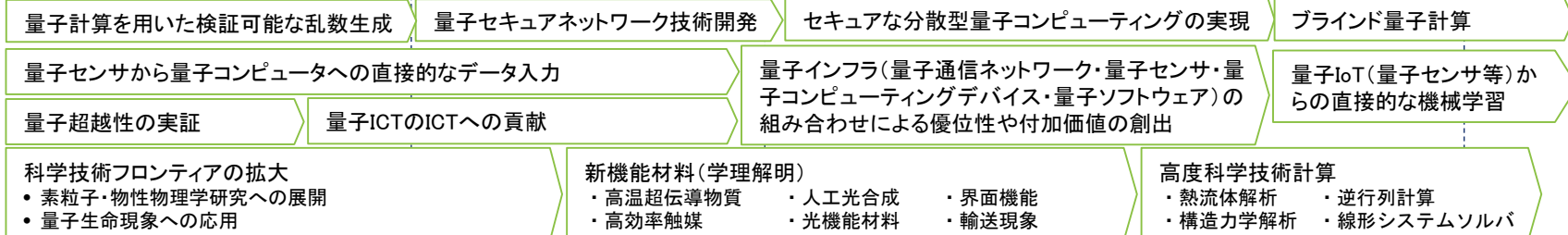
## 本技術を支える 周辺技術の進展



## ②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

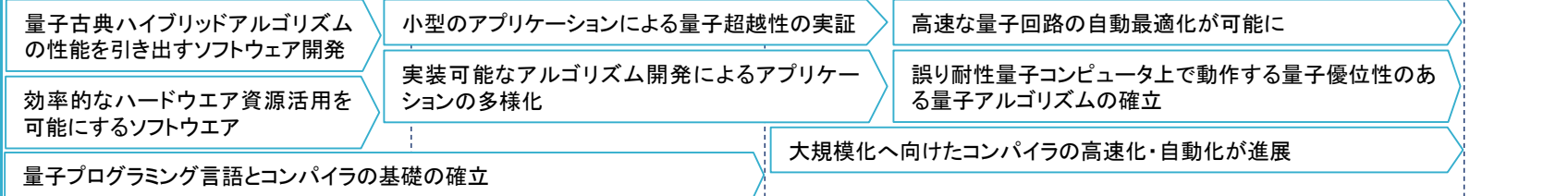
### 経済・社会 インパクト



### ソフトの実装

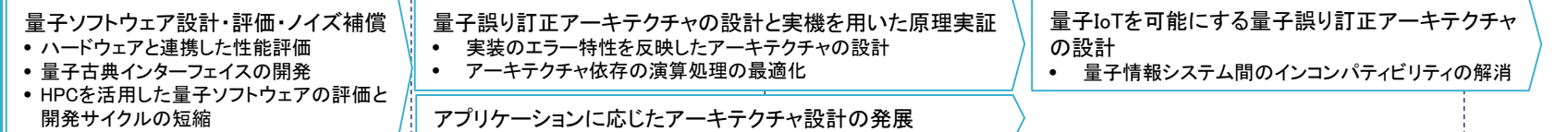


### ソフト

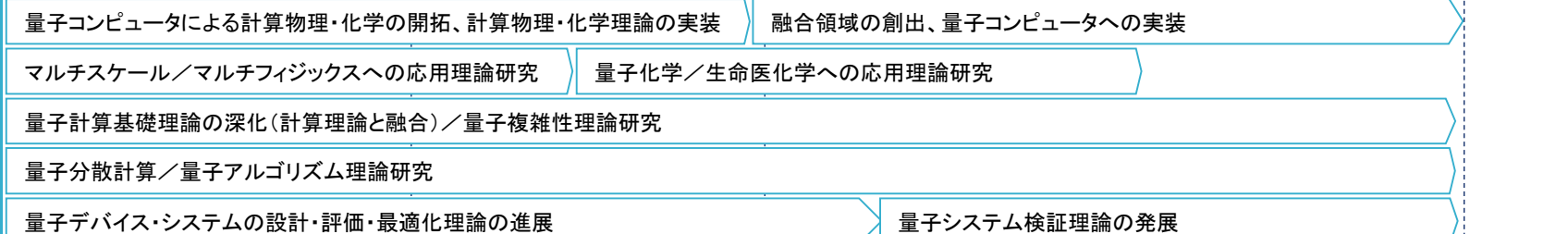


### 技術の進展

#### アーキテクチャ



#### 基礎理論



#### ハードウェア



現在  
(2019年度)

5年後  
(2024年度)

10年後  
(2029年度)

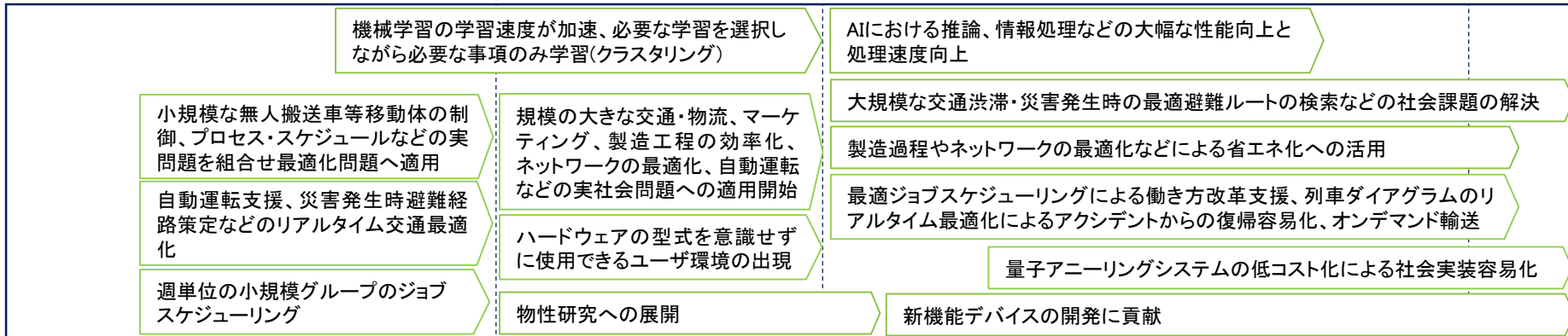
20年後  
(2039年度)



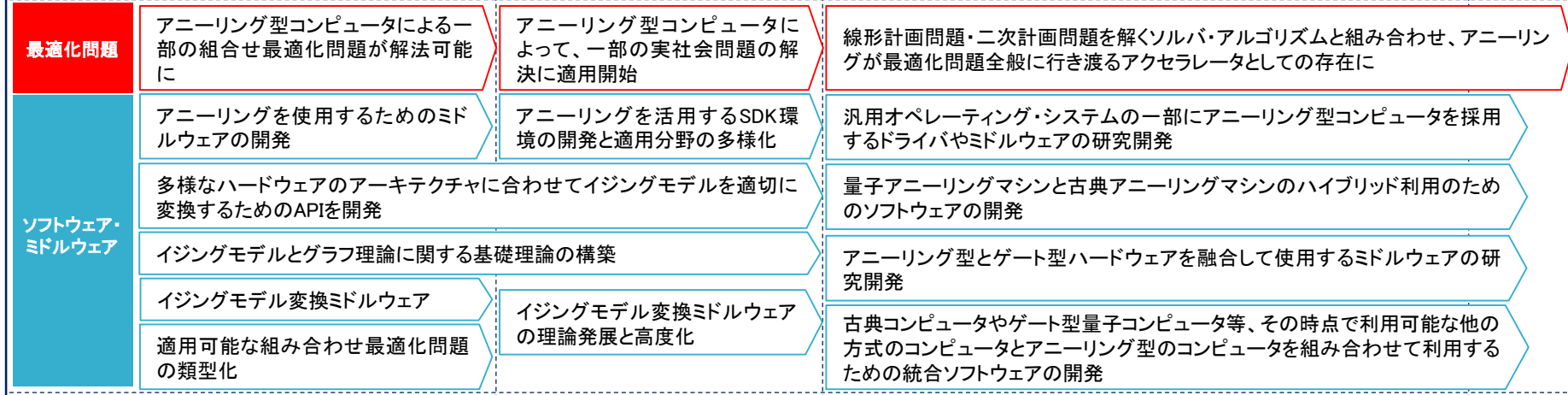
# ③量子ソフトウェア(アニーリング型)

- 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

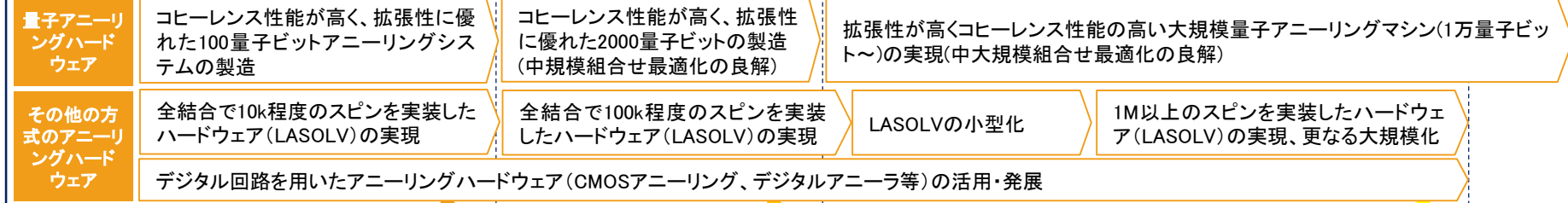
## 経済・社会インパクト



## 技術の進展



## 本技術を支える周辺技術の進展



# ④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、 $10^6$ 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

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

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

$10^6$ 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

量子優位性を示す課題の探索

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

**共通**

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

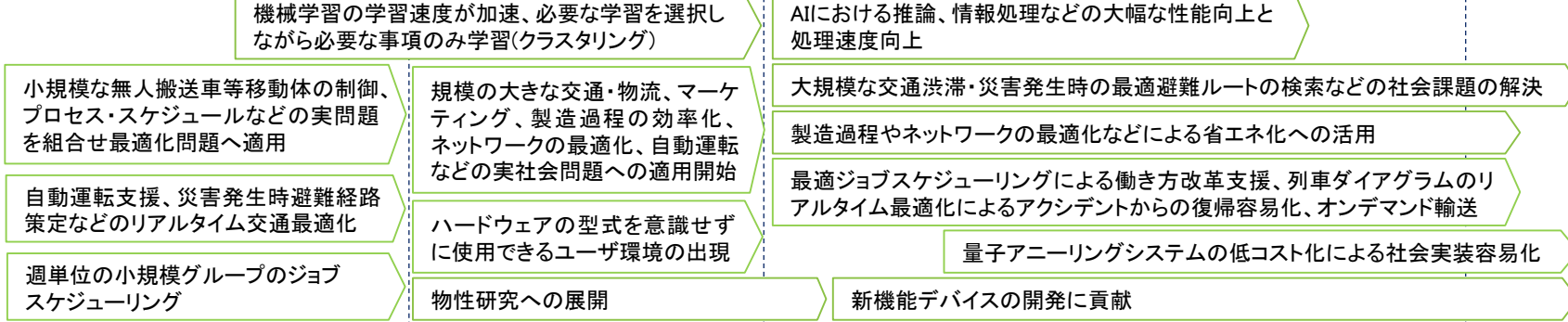
全統合型の冷却原子量子シミュレータの開発



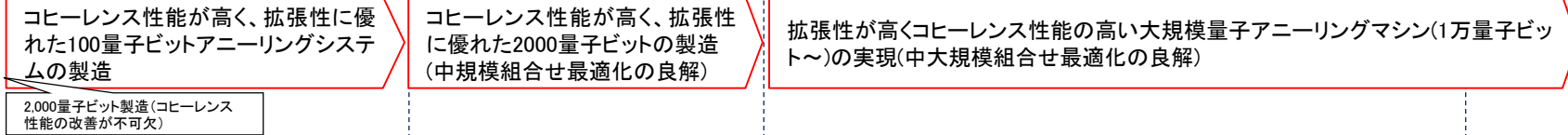
# ⑤アニーリング型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

- 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

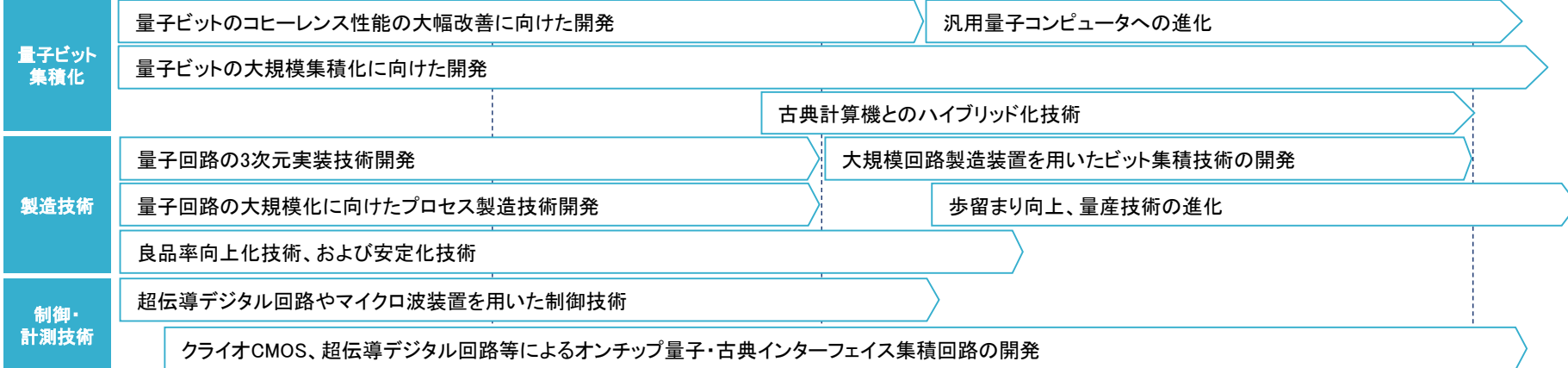
## 経済・社会インパクト



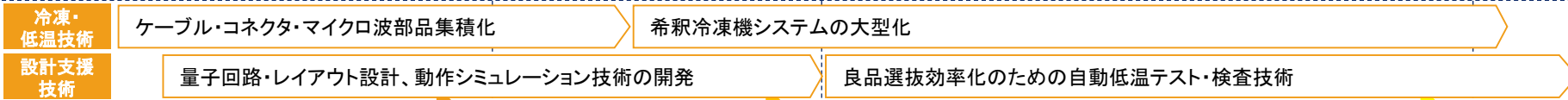
## ハードウェアシステム化



## 技術の進展



## 本技術を支える周辺技術の進展



# ⑥固体量子センサ(ダイヤモンドNV中心等)

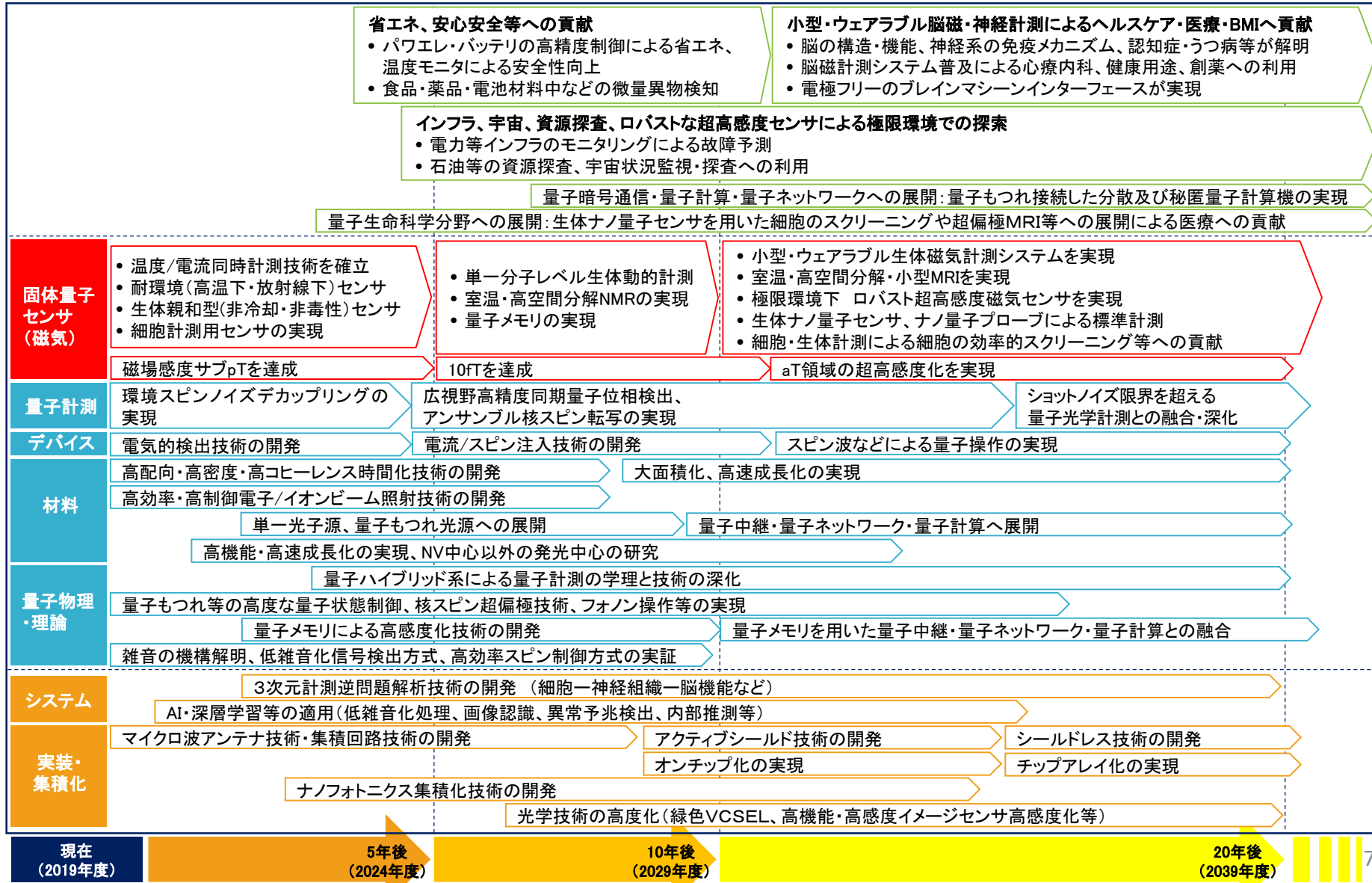
- 小型でロバストな超高感度の固体センサの実現により、脳磁計測(医療・ヘルスケア)や極限環境、生命分野等での利用が期待
- 5年後に $10^{-12}$ T(テスラ)、10年後に $10^{-14}$ Tの室温下の微弱磁場の観測を達成。さらに温度や電流の同時計測技術等を確立
- センサの高感度化のため、高度な量子状態の制御技術の開発やセンサ材料の高品質化を進める

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





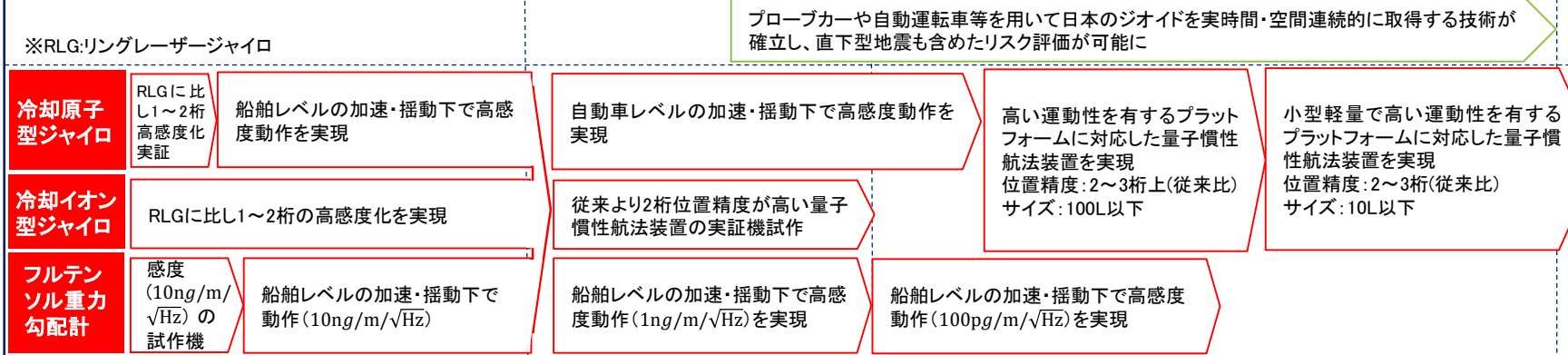
# ⑦量子慣性センサ

- 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

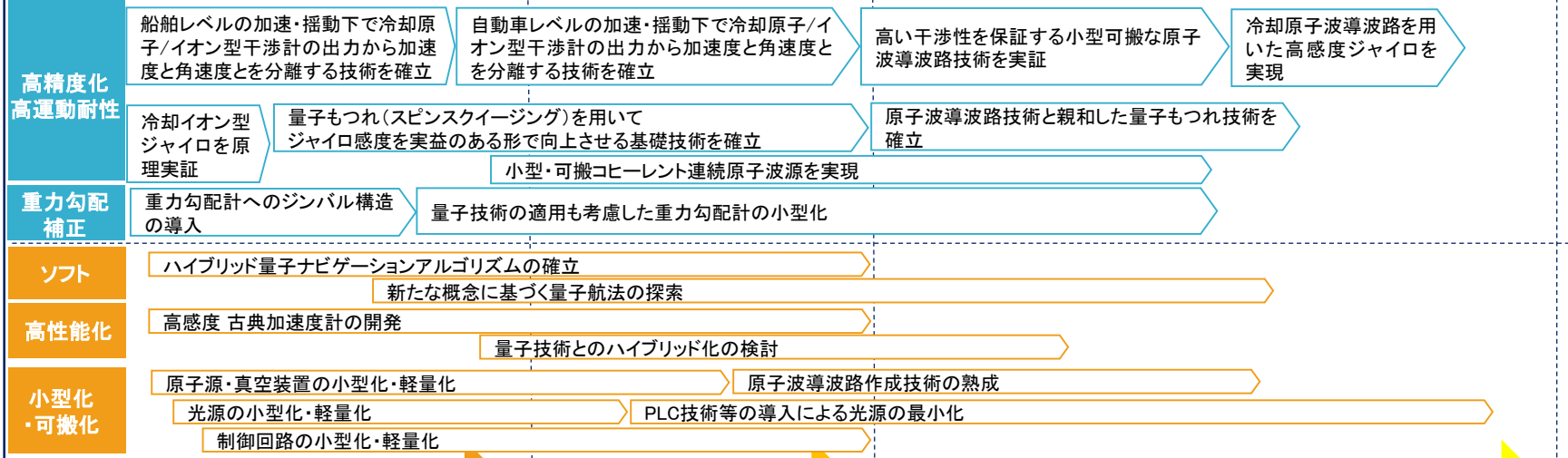
## 経済・社会インパクト

- 自立型無人潜水艇(AUV)を用いた海洋資源探査の効率化(資源と緯度・経度情報とを精密に紐づけることが可能に)
- 自動運転船舶(高度物流)を安全に航行させる技術が確立(GPS欺瞞を使った海賊行為への対策)
- 高度自動旅客輸送における多重安全性を確保する技術が確立(GPS欺瞞を使ったテロ行為への対策)
- 日本周辺の海域におけるジオイド高変化を船舶を用いて実時間測定する技術が確立し、プレート型地震のリスク評価が可能に(光格子時計やスタートラッカーと連携)
- 自動運転車(高齢化対策)の多重安全性を確保する技術が確立(GPS不通時・GPS欺瞞への対策)、コネクティッドカーへのサイバー攻撃対策

## 技術の進展



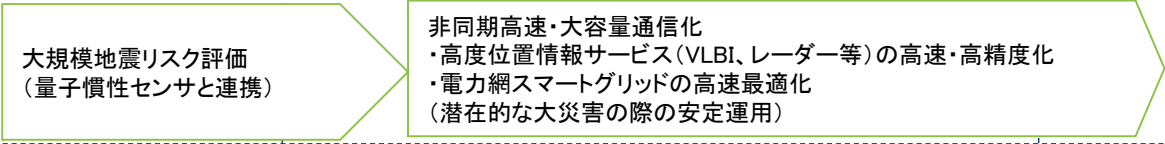
## 本技術を支える周辺技術の進展



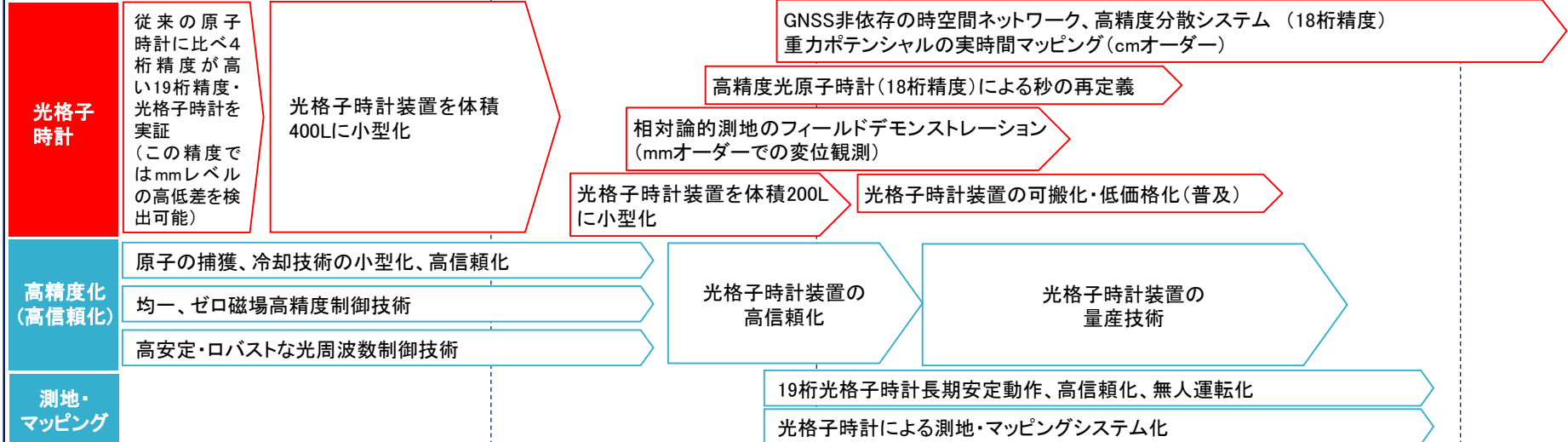
# ⑧光格子時計

- 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

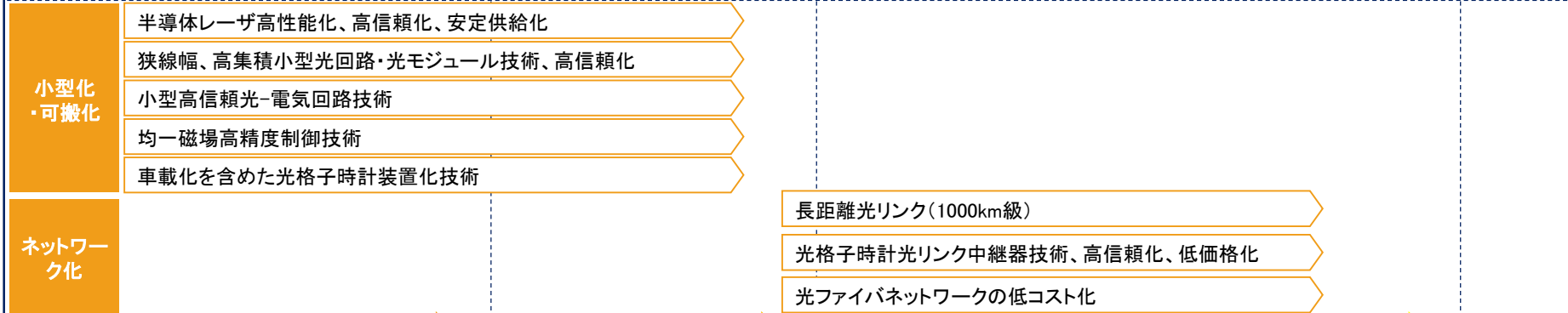
## 経済・社会 インパクト



## 技術の進展



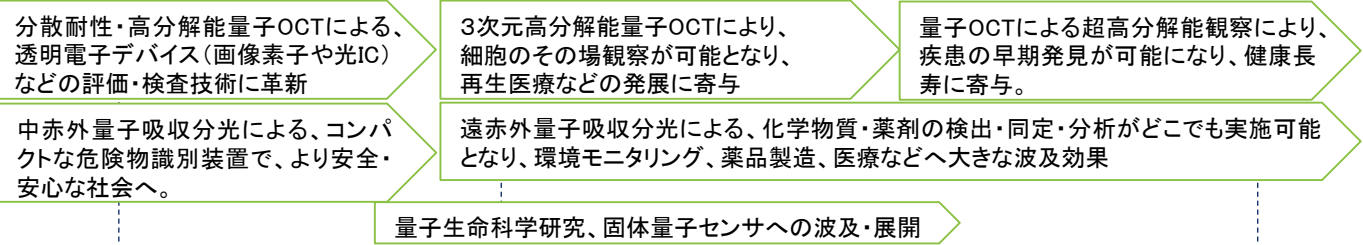
## 本技術を支える周辺技術の進展



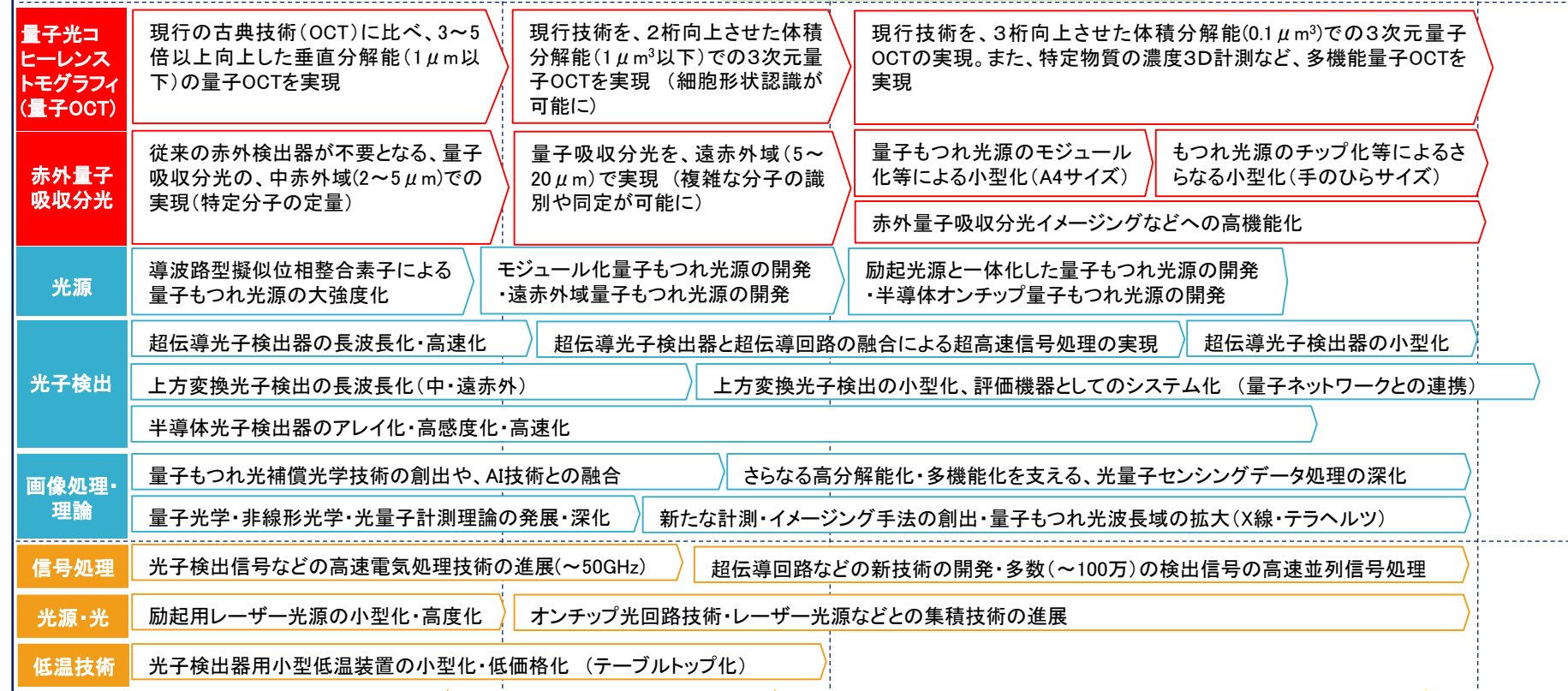
# ⑨量子もつれ光センサ

- 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



## 技術の進展

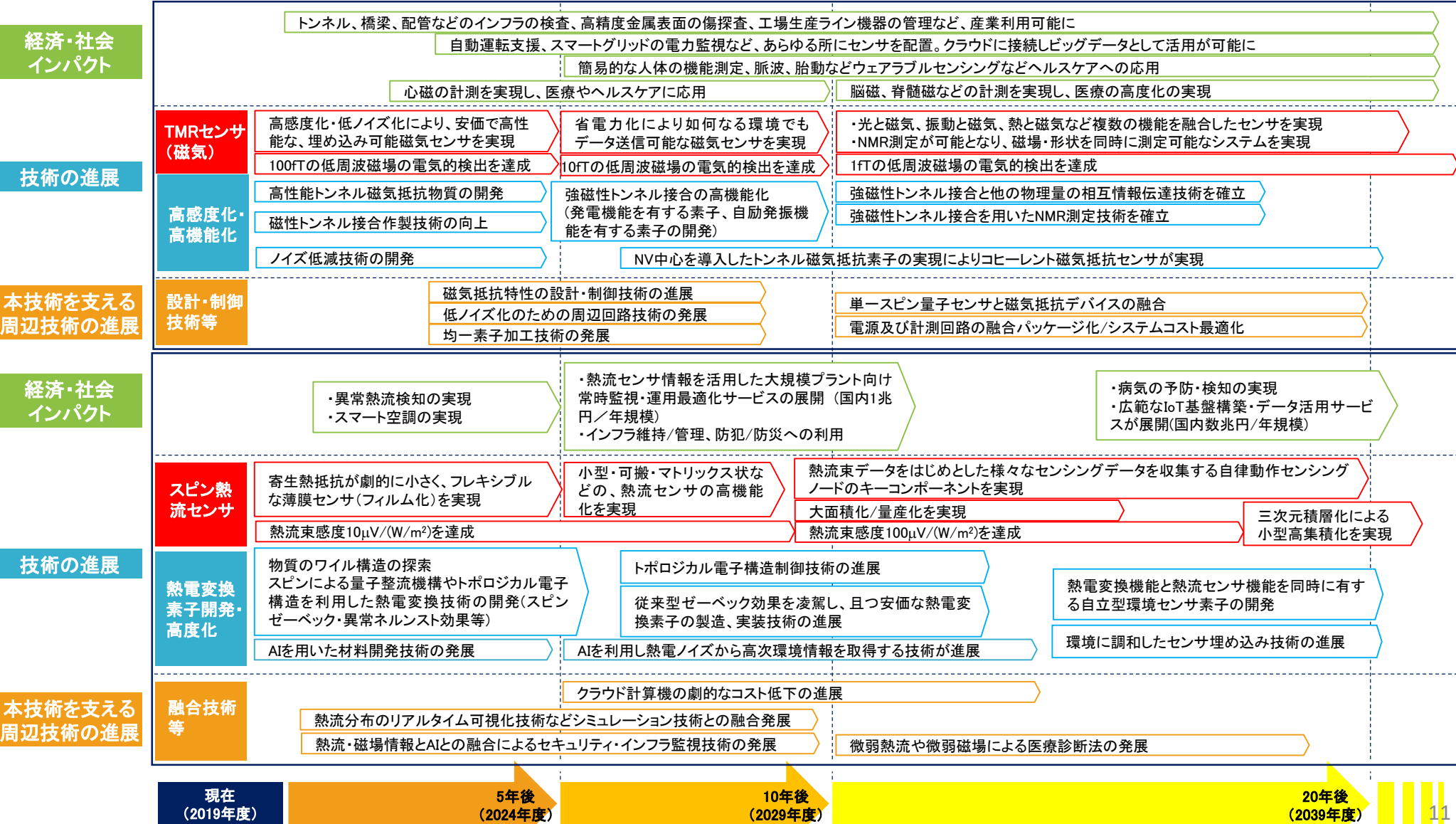


## 本技術を支える周辺技術の進展



# ⑩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

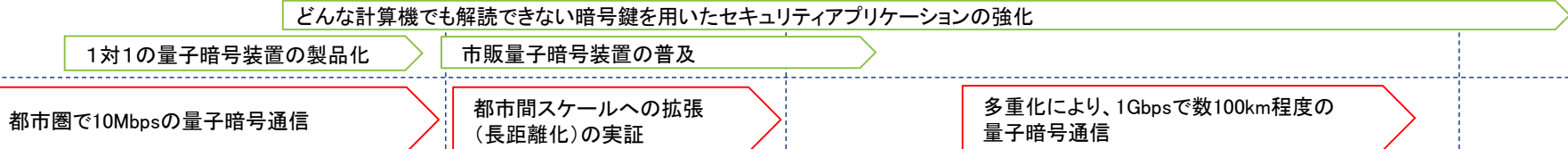




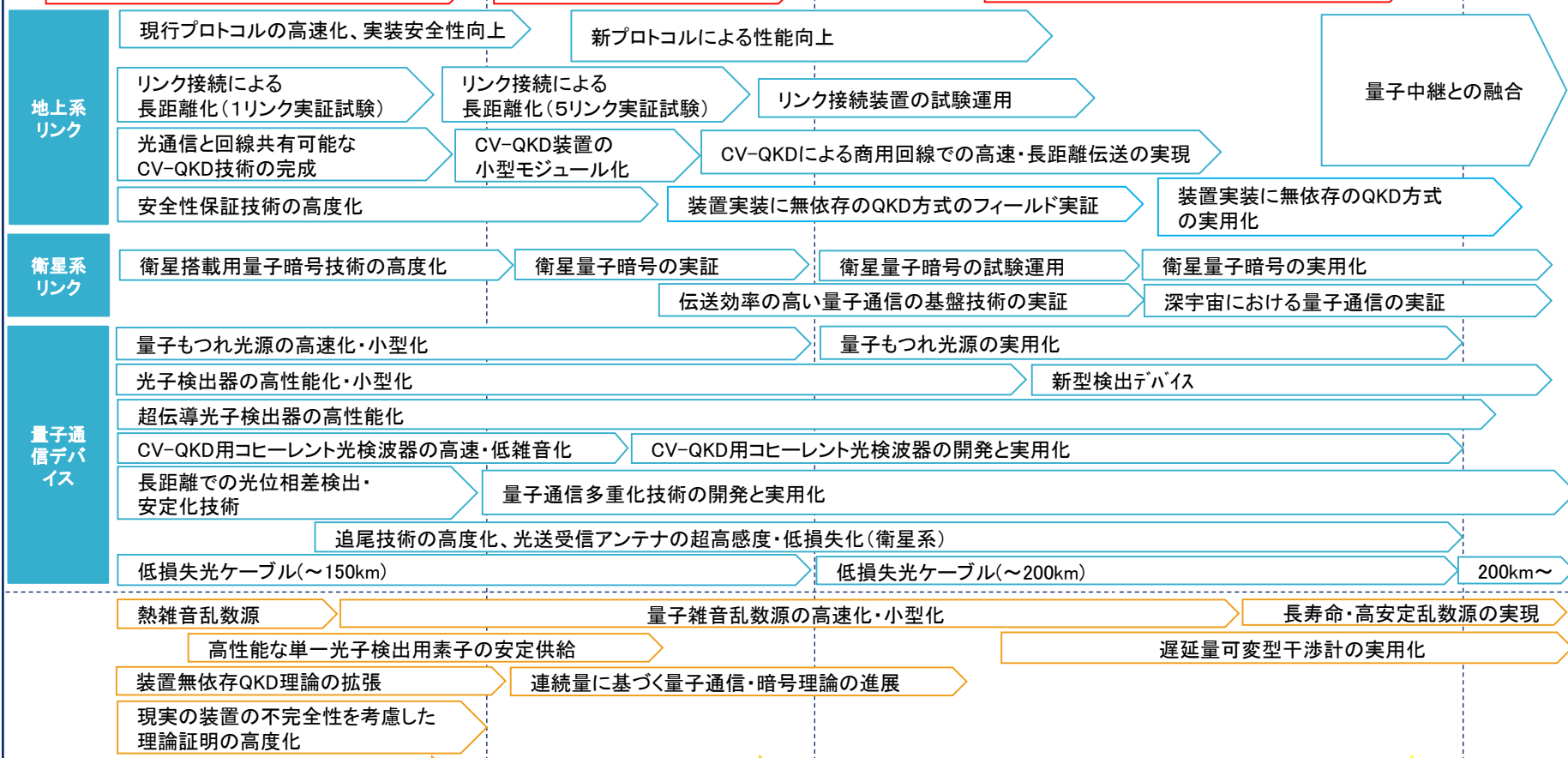
# ⑪量子通信・暗号リンク技術

- 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

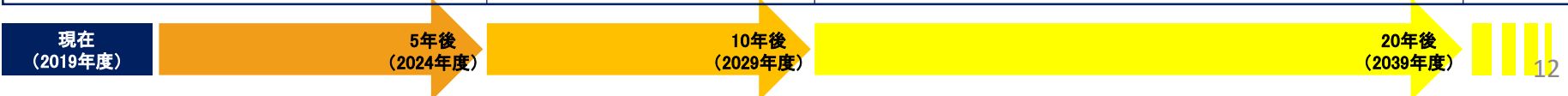
## 経済・社会 インパクト



## 技術の進展



## 本技術を支える周辺技術の進展



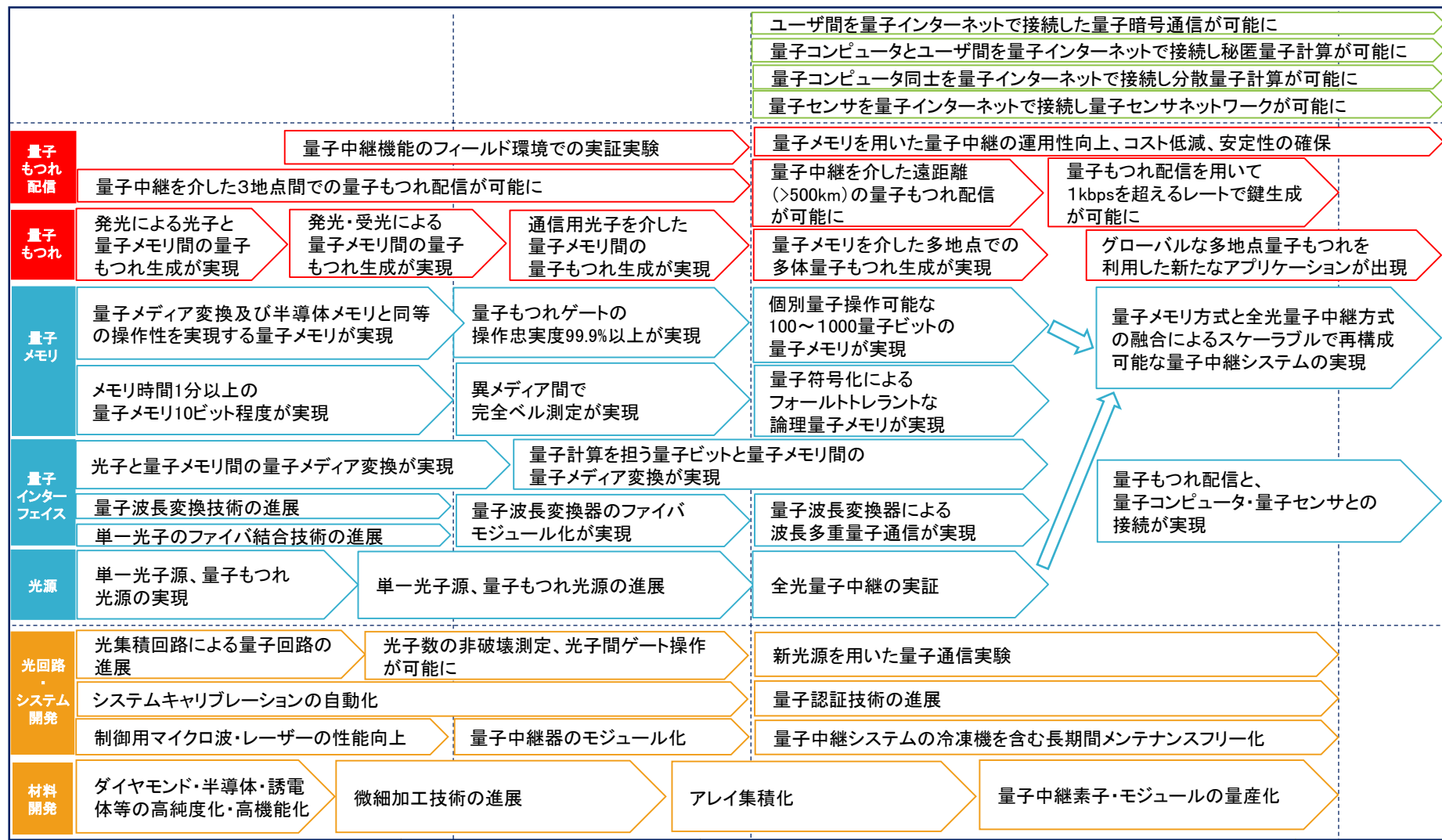
# ⑫量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)

- 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

## 技術の進展

## 本技術を支える周辺技術の進展



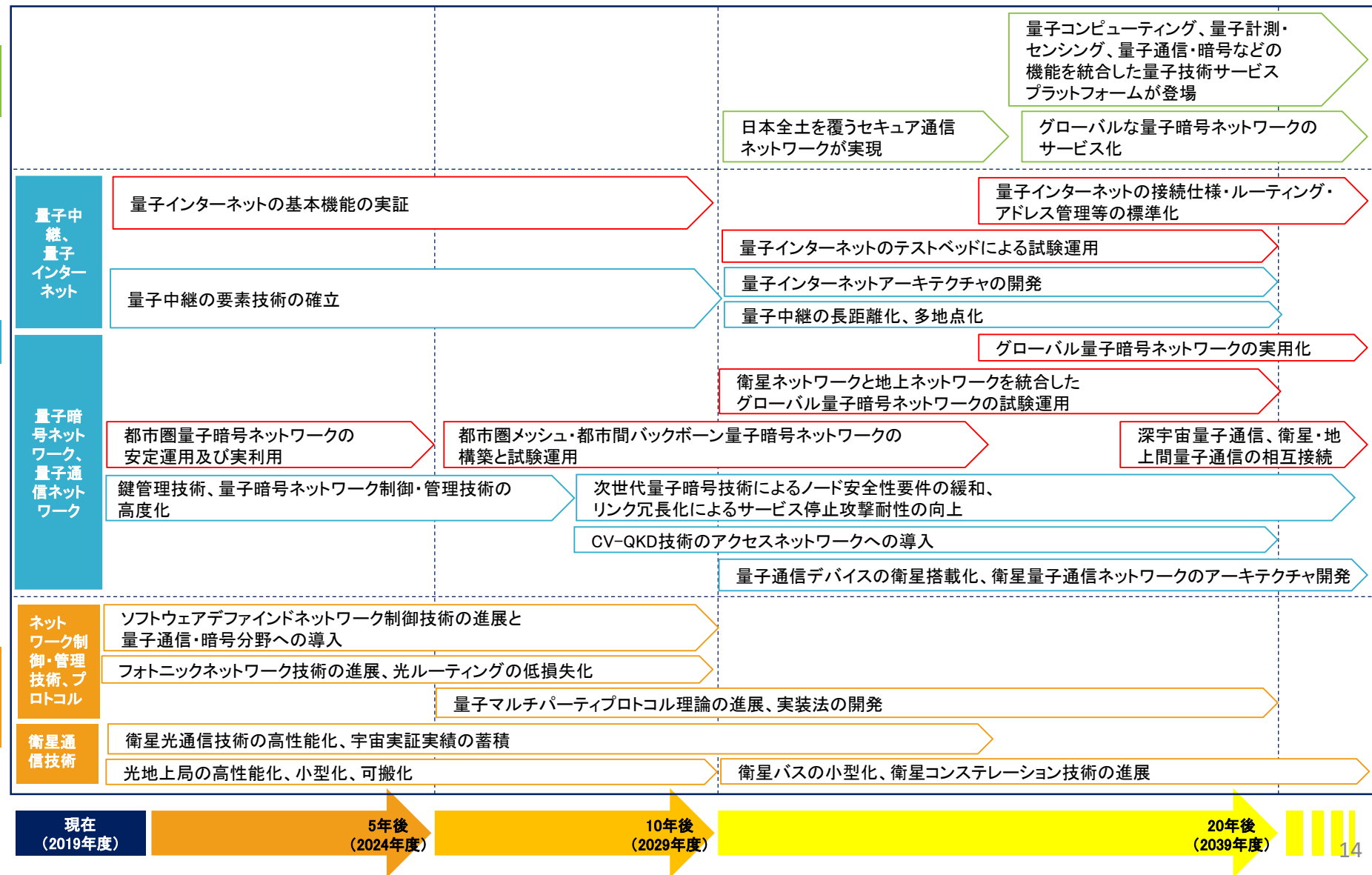
# ⑬ネットワーク化技術(構築、運用、保守等)

- 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



# 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、①融合領域の進展、②融合領域を支える技術体系、そしてこれらがもたらす③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

### ①量子AI技術

## 2. 量子計測・センシング

### ②量子生命科学(生体ナノ量子センサ)

### ③量子生命科学(量子技術を用いた超高感度MRI/NMR)

### ④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

### ⑤量子セキュリティ技術

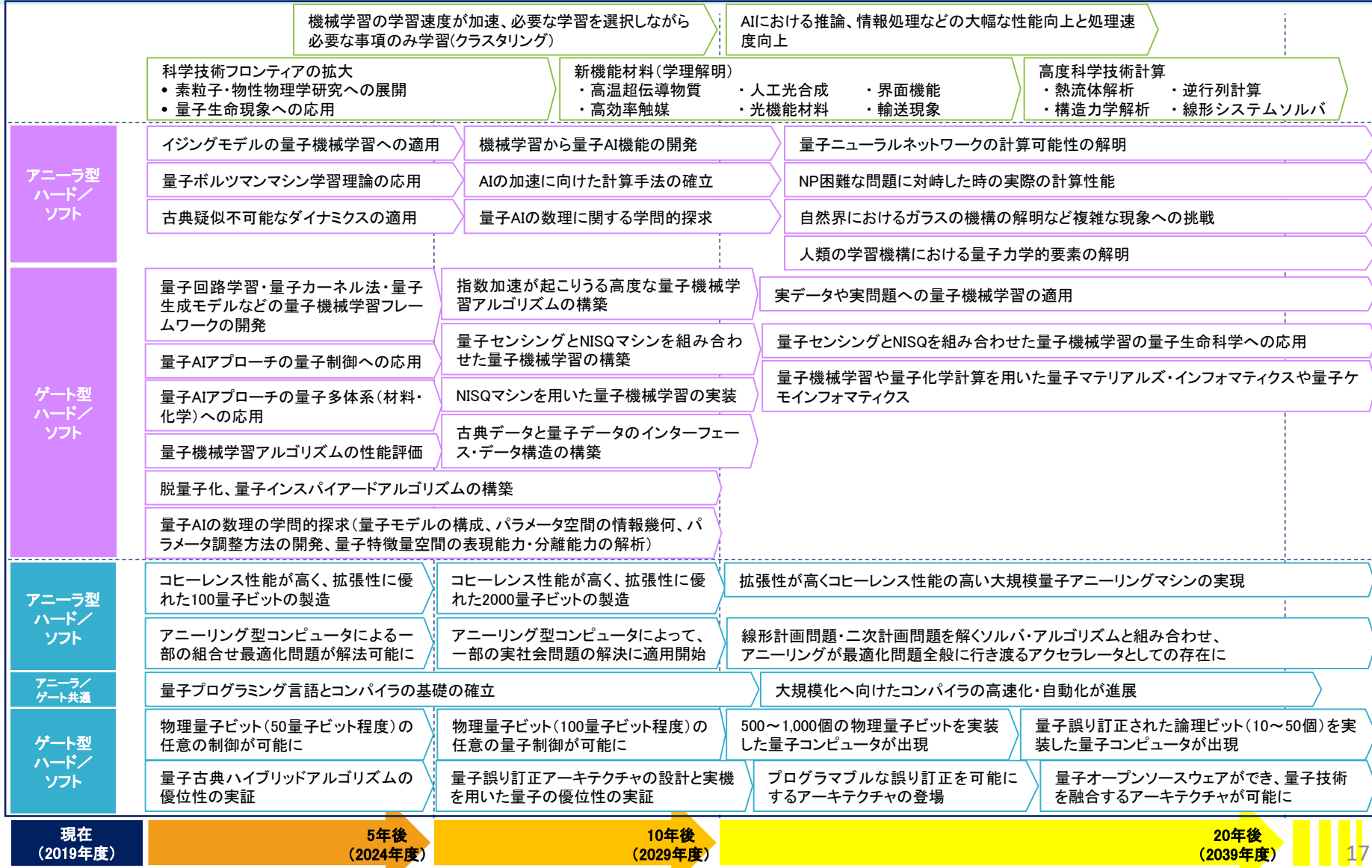
# ①量子AI技術

- 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

## 領域の進展

## 本領域を支える技術の進展



# ②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

生体ナノ量子センサを用いた細胞のスクリーニングと細胞の品質管理により、バイオ医薬品の効率的生産や再生医療の効率化を実現

AI診断、ウェアラブルデバイス、「量子スマート小胞／量子スマートセル」による各種疾患の早期発見、未病段階のセルフケア、重症化や再発の予防の実現

生体ナノ量子センサによる計測が、基礎・応用を問わず、あらゆるバイオ関連産業における細胞測定・分析の標準計測技術に

バイオデータ基盤を元にした「物質がいかんして生命になるのか」の理解によって、原子・分子からの生命の構築や、生命の振る舞いの予測、生命進化の理解が可能に

## 領域の進展

### 生体ナノ量子センサ

多種多様な細胞種・生理条件・計測項目から得た情報をビッグデータ化し、データ解釈の統一化・国際標準化・AI診断技術の確立・基礎生物学発展のためのオープンデータベースを構築（バイオとデジタルの融合）

網羅的研究により、生きた細胞内で起きている分子過程を物理的に完全解明

温度、pHなど計測用途に応じた一般研究用センサキットとして商品化

全身・生体深部が対象のセンサ・読取システムの商品化。がん細胞の増殖や転移等の研究を推進

特定の性質・能力を持つ細胞の効率的なスクリーニング技術を実現

### 計測項目

温度・硬さ・磁場やpH、生理的に重要な特定の物質等計測項目の拡充

同時計測項目3種類以上

広範囲から多数の計測項目データを一括で読み取り、時間変化を追跡するシステムの構築

定量する項目を自律的に学習しながら目的（生命現象や病態）に応じて適切な計測情報を返す生体ナノ量子センサの開発

### 送達技術

細胞内の特定部位（核やミトコンドリアの膜上等）に送達する技術を開発

腫瘍や特定の臓器など、全身レベルでのセンサの特異的送達技術を開発

## 本領域を支える技術の進展

### 高感度化・計測範囲

雑音の機構解明、低雑音化信号検出方式、高効率スピン制御方式の実証

細胞数：5,000-10,000個程度

多数の細胞を一括計測可能な超広視野・光検出磁気共鳴顕微鏡を開発

単一細胞レベルの全脳イメージング技術およびWhole-body計測技術の開発

ナノメートル領域レベルでナノテスラオーダーの磁場感度を達成

ナノメートル領域レベルでサブナノテスラの磁場感度を達成

超偏極MRI/NMRとの融合による統合した診断・治療技術の開発と世界展開

光学系と高周波照射技術の高度化及び環境スピノイズデカップリングの実現

13C濃縮や表面機能化付与などによる生体ナノ量子センサの多機能化技術の開発

高効率・高制御電子/イオンビーム照射技術の開発

2 mm程度の生体深部の観察を実現

10 mm程度の深部の全身計測を実現

赤外域の発光を持つセンサ材料開発

磁場、音波等、蛍光に依らない読取法を確立

・ 10mm以上の深部観察実現に向けた量子操作技術、量子計測の学理と技術の深化  
・ 「量子スマート小胞／量子スマートセル」のセルフケア・医療応用へ

### 細胞機能人為操作

遺伝子発現をon-off操作するナノシステム/量子ナノセンサの細胞導入技術を開発

細胞機能の人為的制御を可能にする「量子スマート小胞／量子スマートセル」の基盤技術を開発

現在  
(2019年度)

5年後  
(2024年度)

10年後  
(2029年度)

20年後  
(2039年度)



# ③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

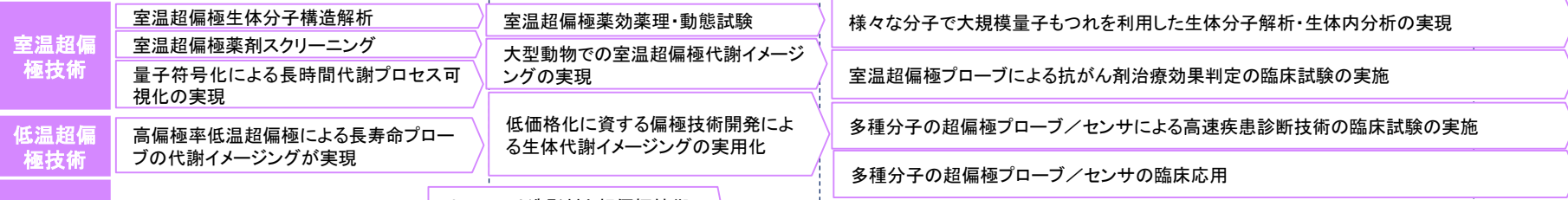
代謝イメージングが生命医科学系研究室に普及し、生命現象・病理の解明に大きく貢献

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

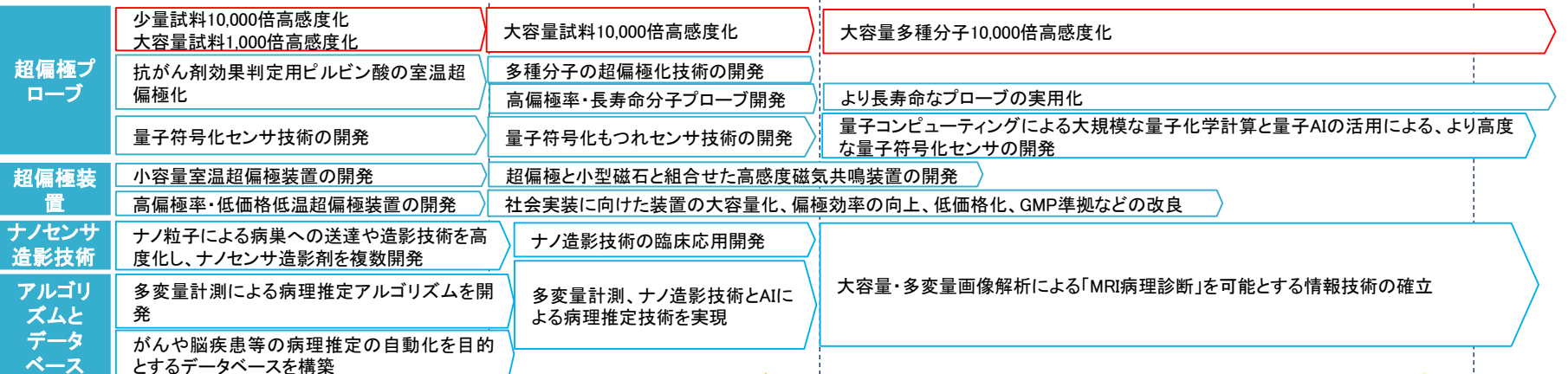
## 領域の進展



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





# ④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

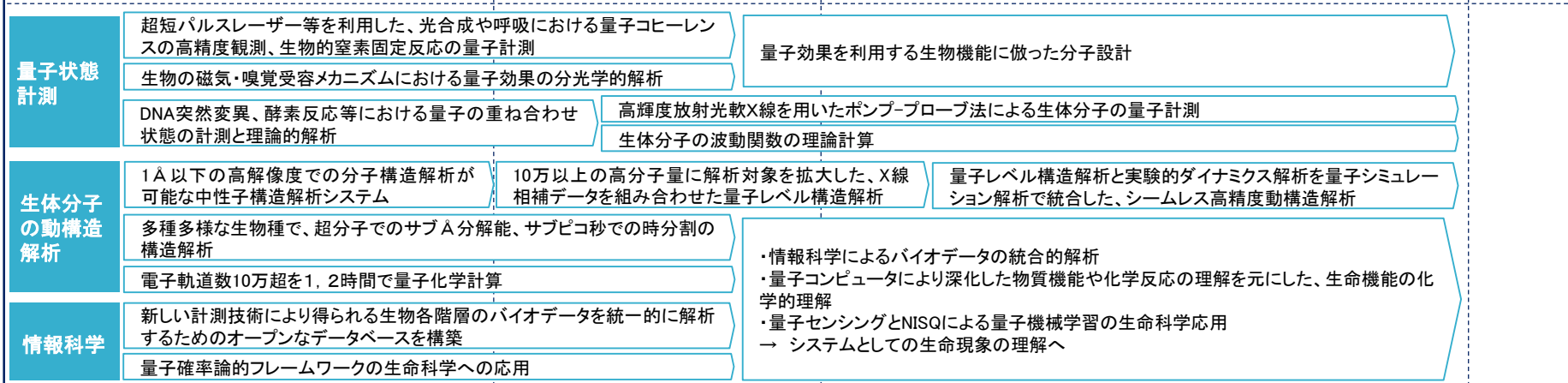
## 経済・社会インパクト

- 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



## 本領域を支える技術の進展



# ⑤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

政府機関等のアーリアダプタによる利用

高セキュリティが求められる案件で利用

グローバル高セキュリティ通信サービス開始

企業ユーザ向け高セキュリティ通信サービス開始

一般ユーザ向け高セキュリティ通信サービス開始

量子もつれを用いる通信プロトコルの実用化、GNSSの高精度化・高セキュリティ化及びVLBIの高精度化等への適用

プリシエ量子乱数を基盤とする安心で便利な通信・コマース

量子セキュアクラウドのサービス化、百年後も破られないデータ保管交換基盤を確立

## 領域の進展

量子暗号の国際標準化

量子セキュリティ技術の国際標準化

量子暗号ネットワークフレームワーク、セキュリティ評価、鍵供給APIに関する標準化

IPネットワークと量子暗号ネットワークとの統合アーキテクチャの規格策定

量子セキュアネットワークにおける自律ネットワーク間の接続仕様・経路制御・アドレス管理・権限管理に関する運用ガイドラインの策定等

運用ガイドラインの策定、認証機関・第三者団体による認証開始

量子セキュアクラウドの実現(量子暗号+秘密分散)

量子セキュアクラウドの広域化(都市間スケール)

量子セキュアクラウドとレガシー認証基盤との統合、及び日本本土への広域化

## 本領域を支える技術の進展

セキュリティ技術融合、アプリケーション創出

量子通信・暗号と現代暗号、ネットワーク技術との有機的融合

多地点量子セキュアネットワークの基礎理論

多地点量子セキュアネットワークのアーキテクチャ

量子中継や量子マルチパーティプロトコルまで取り入れた多地点量子セキュアネットワークの拡張、テストベッド実証、量子セキュリティ技術基盤の確立

秘密分散技術の成熟化

秘匿計算技術の進展

鍵蒸留処理(誤り訂正+秘匿増強)の高性能化

量子署名や量子相互認証等、古典暗号機能の量子通信化

耐量子計算機暗号の国際標準化

量子コンピュータの進展を念頭に置いた耐量子計算機暗号への移行とサービス開始

現在  
(2019年度)

5年後  
(2024年度)

10年後  
(2029年度)

20年後  
(2039年度)