

# 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。

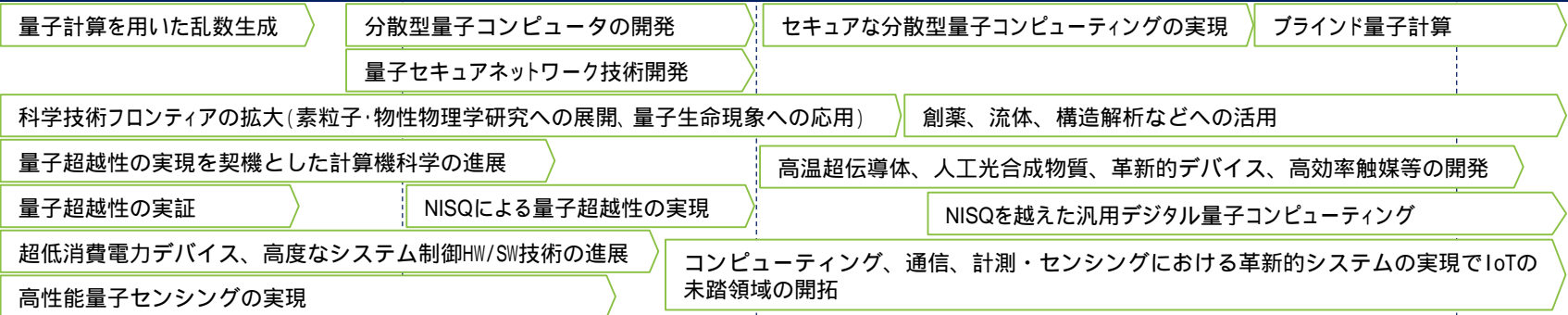
政府においては、本ロードマップに基づき、重点技術課題等に対する研究開発支援等を強化していく予定である。これらの支援等も踏まえ、民間からの新規の投資や積極的な参画・参入等が促進され、国をあげた産学連携・官民協働のプロジェクトへと発展していくことを強く期待する。

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)

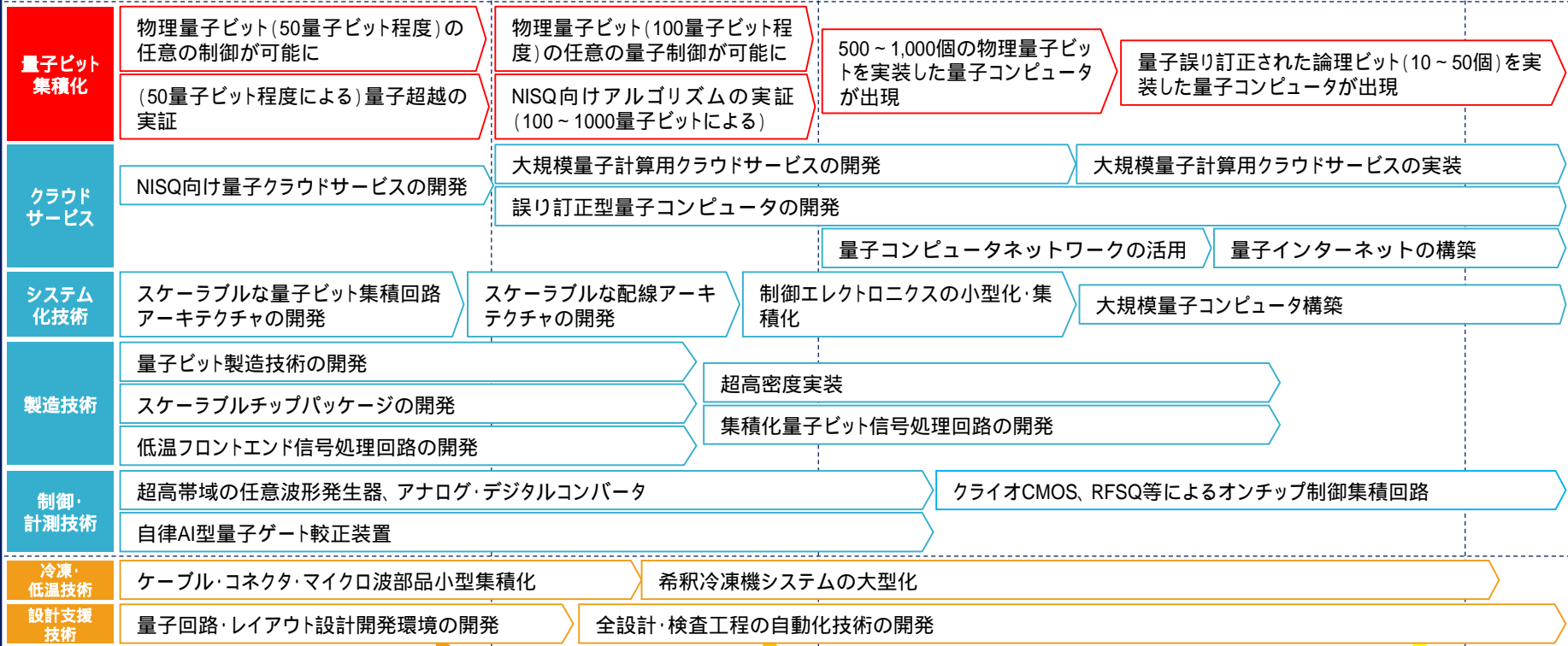
# ゲート型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

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

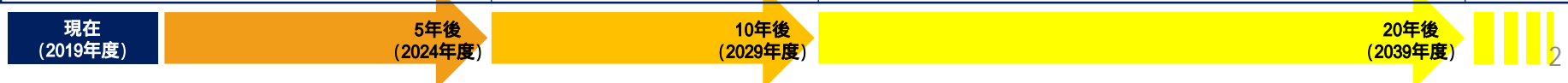
## 経済・社会 インパクト



## 技術の進展



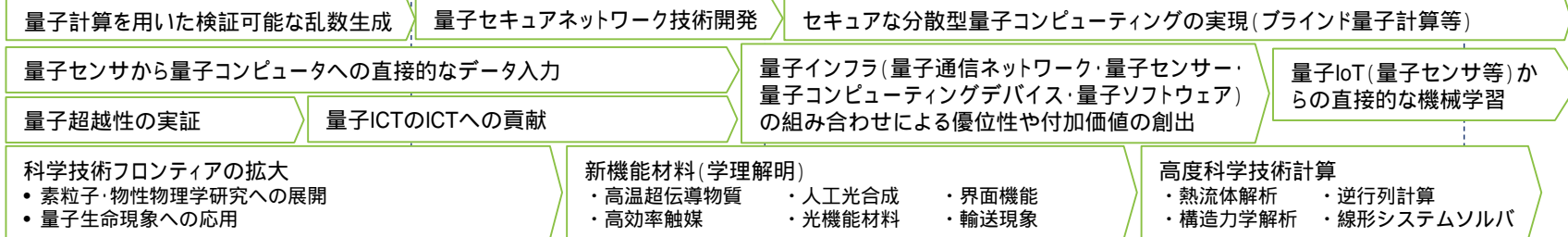
## 本技術を支える周辺技術の進展



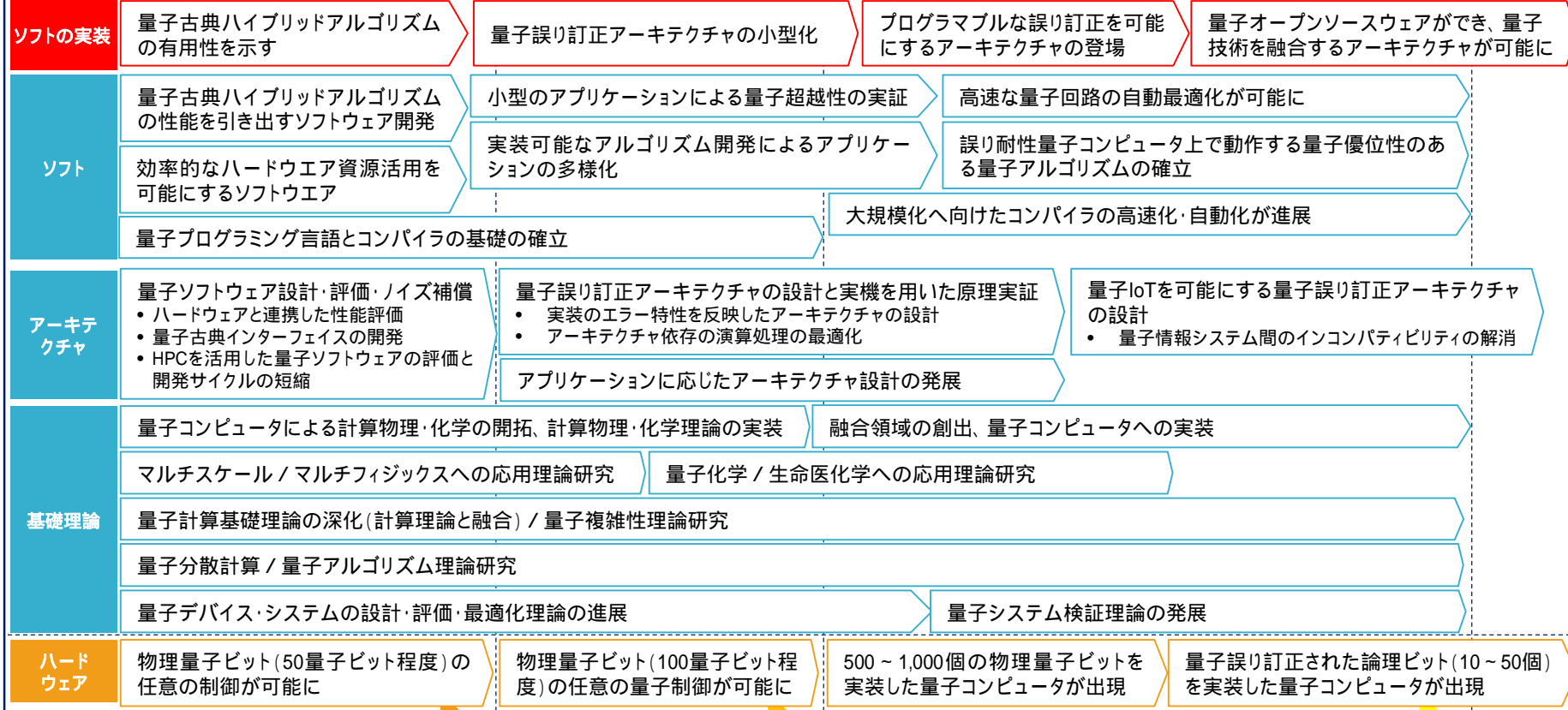
# 量子ソフトウェア(ゲート型)

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



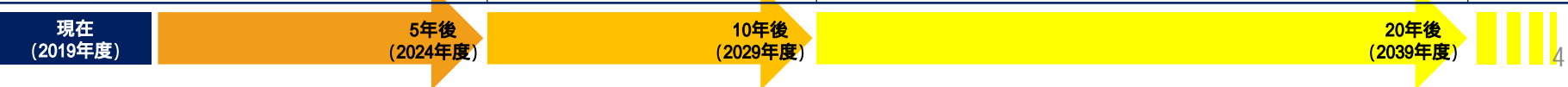
# 量子ソフトウェア(アニーリング型)

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

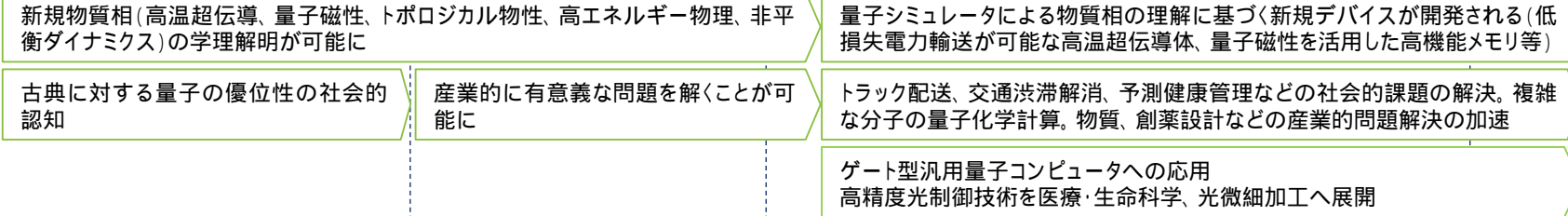
## 本技術を支える周辺技術の進展



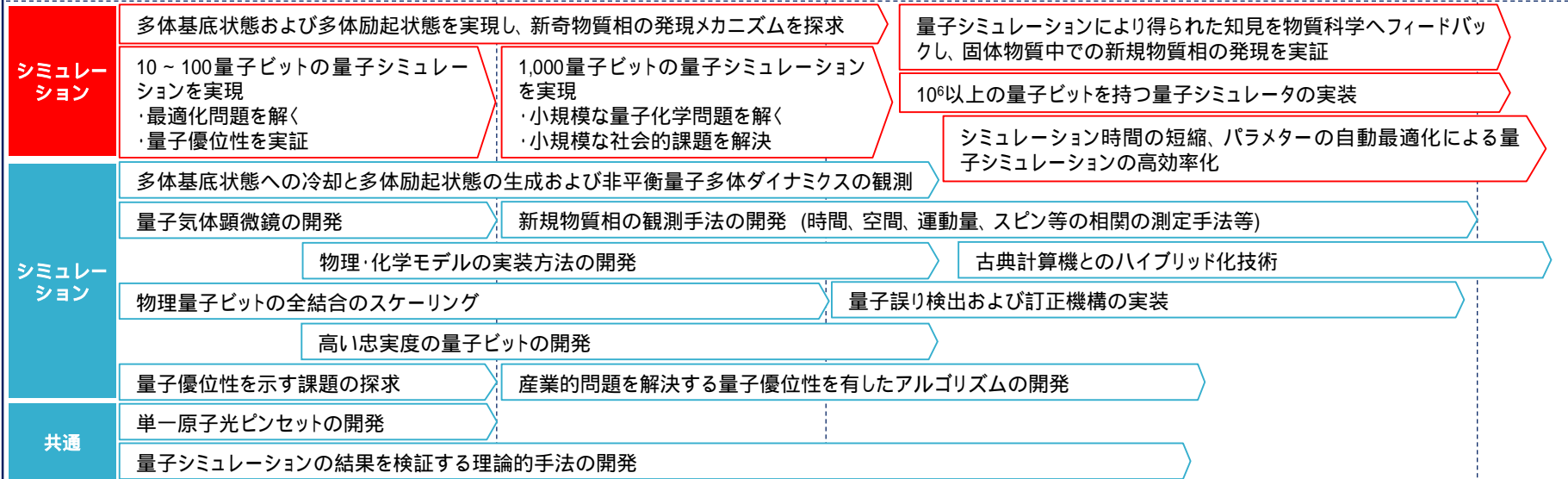
# 量子シミュレーション（冷却原子）

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、10<sup>6</sup>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

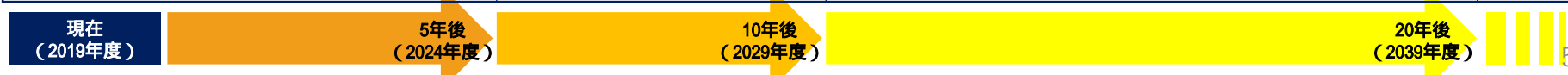
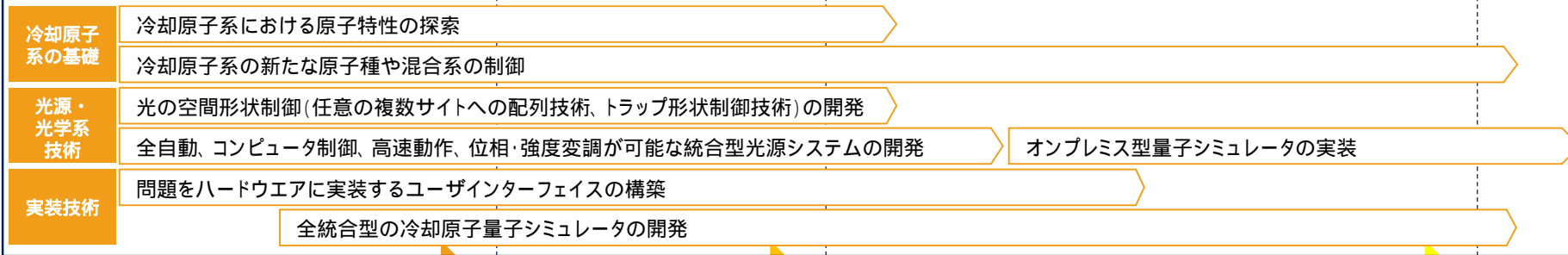
## 経済・社会インパクト



## 技術の進展



## 本技術を支える周辺技術の進展



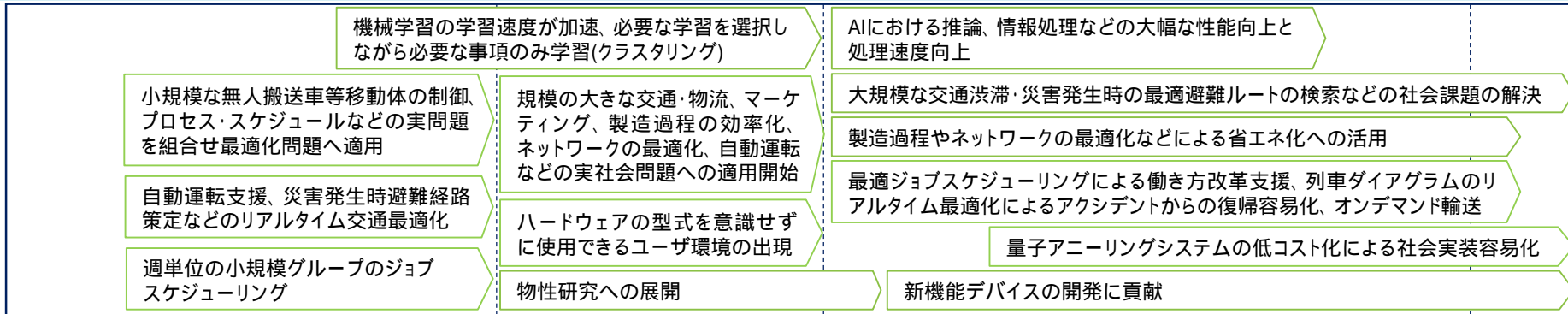


# アニーリング型量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

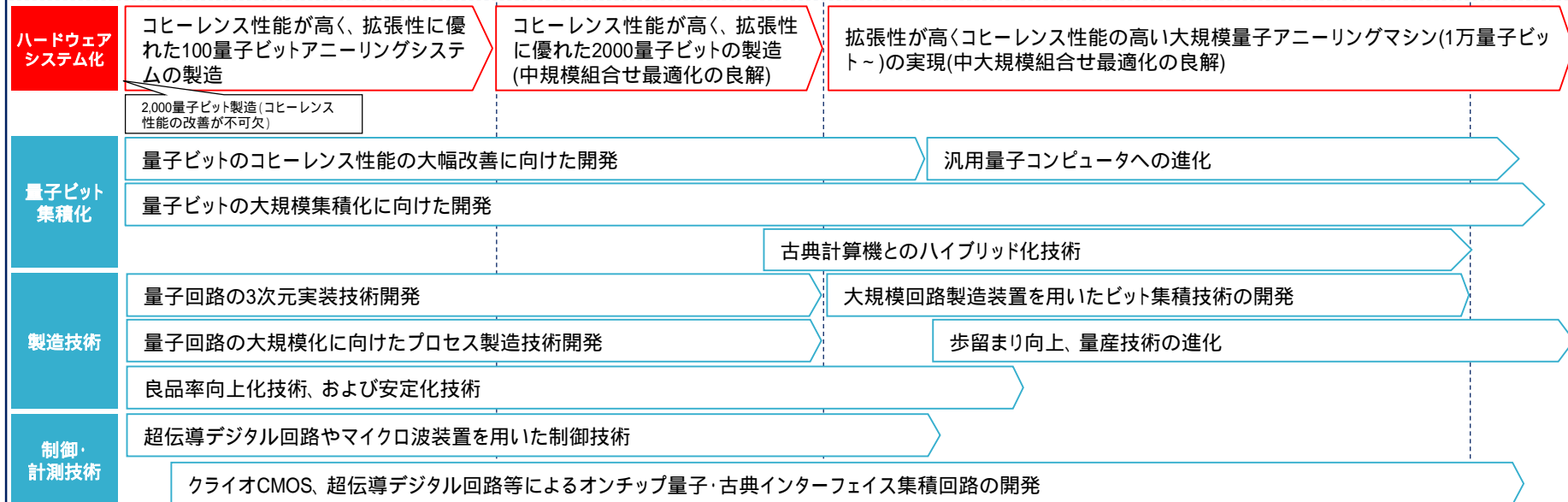
10年後以降、高いコヒーレンス性能の1万量子ビット程度のアニーリング型量子コンピュータの実用化により、物流・交通最適化、機械学習速度加速、検索等のリアルタイム性向上

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

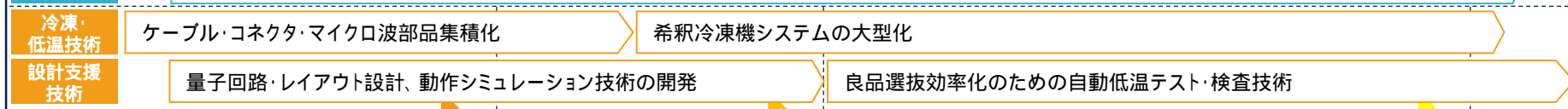
## 経済・社会インパクト



## 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

固体量子  
センサ  
(磁気)

- 温度/電流同時計測技術を確立
- 耐環境(高温下・放射線下)センサ
- 生体親和型(非冷却・非毒性)センサ
- 細胞計測用センサの実現

- 単一分子レベル生体動的計測
- 室温・高空間分解NMRの実現
- 量子メモリの実現

- 小型・ウェアラブル生体磁気計測システムを実現
- 室温・高空間分解・小型MRIを実現
- 極限環境下 ロバスト超高感度磁気センサを実現
- 生体ナノ量子センサ、ナノ量子プローブによる標準計測
- 細胞・生体計測による細胞の効率的スクリーニング等への貢献

磁場感度サブpTを達成

10fTを達成

aT領域の超高感度化を実現

量子計測

環境スピンノイズデカップリングの実現

広視野高精度同期量子位相検出、アンサンブル核スピン転写の実現

ショットノイズ限界を超える量子光学計測との融合・深化

デバイス

電氣的検出技術の開発

電流/スピン注入技術の開発

スピン波などによる量子操作の実現

材料

高配向・高密度・高コヒーレンス時間化技術の開発

大面積化、高速成長化の実現

高効率・高制御電子/イオンビーム照射技術の開発

単一光子源、量子もつれ光源への展開

量子中継・量子ネットワーク・量子計算へ展開

高機能・高速成長化の実現、NV中心以外の発光中心の研究

量子物理  
理論

量子ハイブリッド系による量子計測の学理と技術の深化

量子もつれ等の高度な量子状態制御、核スピン超偏極技術、フォノン操作等の実現

量子メモリによる高感度化技術の開発

量子メモリを用いた量子中継・量子ネットワーク・量子計算との融合

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

システム

3次元計測逆問題解析技術の開発(細胞-神経組織-脳機能など)

AI・深層学習等の適用(低雑音化処理、画像認識、異常予兆検出、内部推測等)の開発

実装・  
集積化

マイクロ波アンテナ技術・集積回路技術の開発

アクティブシールド技術の開発

シールドレス技術の開発

オンチップ化の実現

チップアレイ化の実現

ナノフォトニクス集積化技術の開発

光学技術の高度化(緑色VCSEL、高機能・高感度イメージセンサ高感度化等)

現在  
(2019年度)

5年後  
(2024年度)

10年後  
(2029年度)

20年後  
(2039年度)



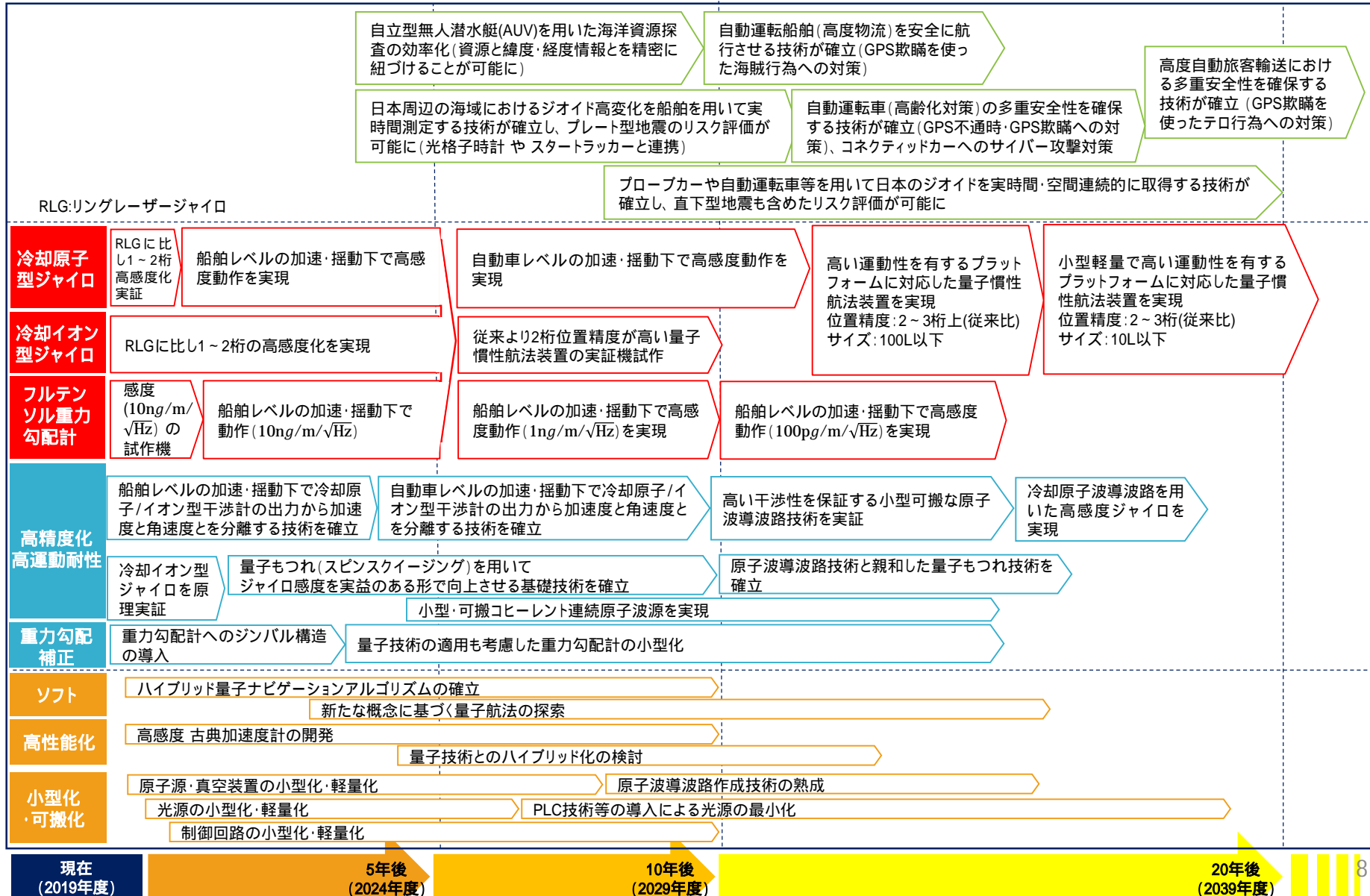
# 量子慣性センサ

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

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)

高精度光原子時計(18桁精度)による秒の再定義

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)

光格子時計装置を体積200L  
に小型化

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

## 本技術を支 える周辺技 術の進展

### 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

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

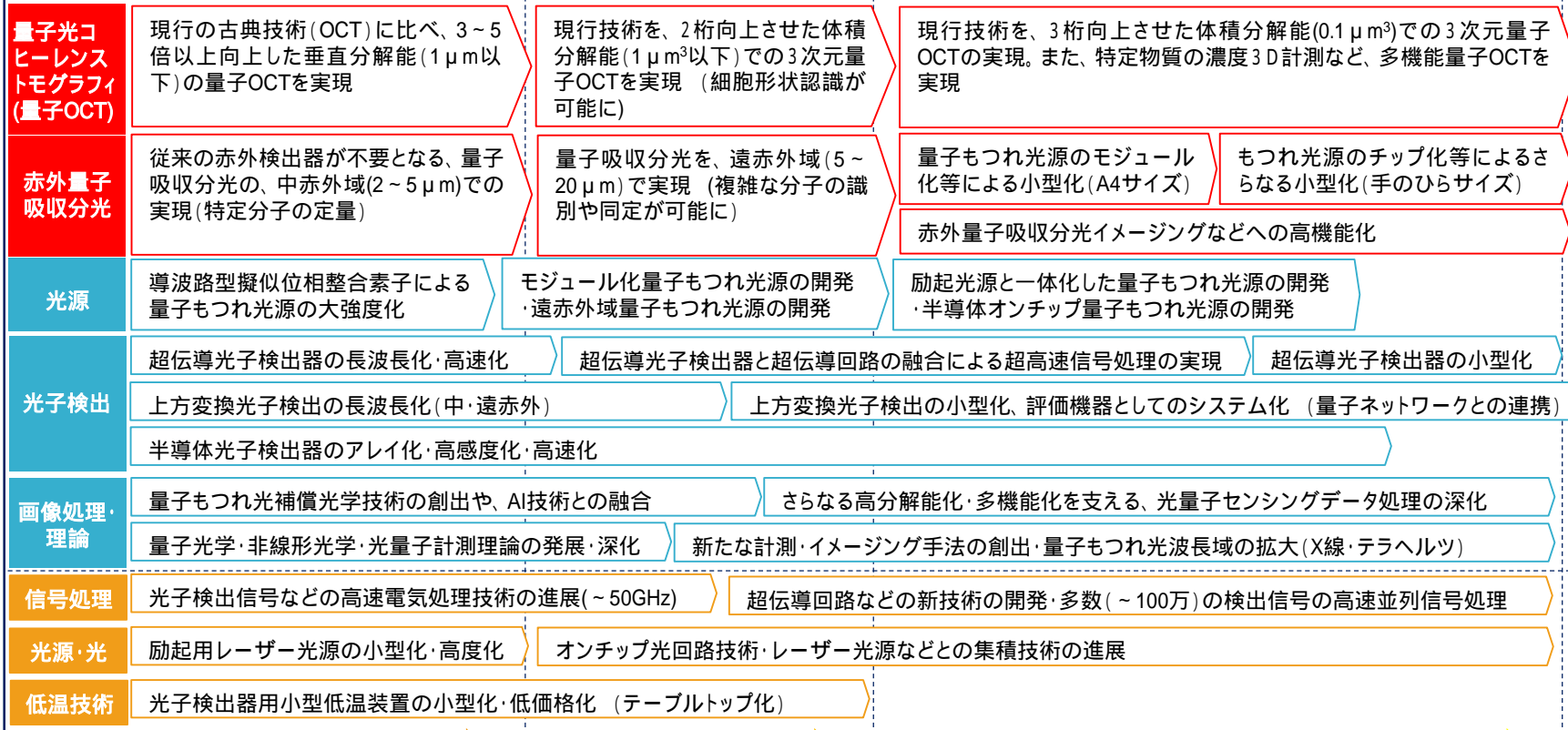
量子OCTによる超高分解能観察により、疾患の早期発見が可能になり、健康長寿に寄与。

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ー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

トンネル、橋梁、配管などのインフラの検査、高精度金属表面の傷探査、工場生産ライン機器の管理など、産業利用可能に  
 自動運転支援、スマートグリッドの電力監視など、あらゆる所にセンサを配置。クラウドに接続しビッグデータとして活用が可能に  
 簡易的な人体の機能測定、脈波、胎動などウェアラブルセンシングなどヘルスケアへの応用  
 心磁の計測を実現し、医療やヘルスケアに応用  
 脳磁、脊髄磁などの計測を実現し、医療の高度化の実現

## 技術の進展

**TMRセンサ(磁気)**  
 高感度化・低ノイズ化により、安価で高性能な、埋め込み可能磁気センサを実現  
 100fTの低周波磁場の電気的検出を達成  
 10fTの低周波磁場の電気的検出を達成  
 1fTの低周波磁場の電気的検出を達成

**高感度化・高機能化**  
 高性能トンネル磁気抵抗物質の開発  
 磁性トンネル接合作製技術の向上  
 ノイズ低減技術の開発  
 強磁性トンネル接合の高機能化(発電機能を有する素子、自励発振機能を有する素子の開発)  
 NV中心を導入したトンネル磁気抵抗素子の実現によりコヒーレント磁気抵抗センサが実現  
 強磁性トンネル接合と他の物理量の相互情報伝達技術を確立  
 強磁性トンネル接合を用いたNMR測定技術を確立

## 本技術を支える周辺技術の進展

**設計・制御技術等**  
 磁気抵抗特性の設計・制御技術の進展  
 低ノイズ化のための周辺回路技術の発展  
 均一素子加工技術の発展  
 単一スピン量子センサと磁気抵抗デバイスの融合  
 電源及び計測回路の融合パッケージ化/システムコスト最適化

## 経済・社会インパクト

異常熱流検知の実現  
 スマート空調の実現  
 熱流センサ情報を活用した大規模プラント向け常時監視・運用最適化サービスの展開(国内1兆円/年規模)  
 インフラ維持/管理、防犯/防災への利用  
 病気の予防・検知の実現  
 広範なIoT基盤構築・データ活用サービスが展開(国内数兆円/年規模)

## 技術の進展

**スピン熱流センサ**  
 寄生熱抵抗が劇的に小さく、フレキシブルな薄膜センサ(フィルム化)を実現  
 熱流束感度10mW/(W/m<sup>2</sup>)を達成  
 小型・可搬・マトリクス状などの、熱流センサの高機能化を実現  
 熱流束データをはじめとした様々なセンシングデータの収集する自律動作センシングノードのキーコンポーネントを実現  
 大面積化/量産化を実現  
 熱流束感度100mW/(W/m<sup>2</sup>)を達成  
 三次元積層化による小型高集積化を実現

**熱電変換素子開発・高度化**  
 物質のワイル構造の探索  
 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(スピントロニクス・異常ネルンスト効果等)  
 AIを用いた材料開発技術の進展  
 トポロジカル電子構造制御技術の進展  
 従来型ゼーベック効果を凌駕し、且つ安価な熱電変換素子の製造、実装技術の進展  
 AIを利用し熱電ノイズから高次環境情報を取得する技術が進展  
 熱電変換機能と熱流センサ機能を同時に有する自立型環境センサ素子の開発  
 環境に調和したセンサ埋め込み技術の進展

## 本技術を支える周辺技術の進展

**融合技術等**  
 クラウド計算機の劇的なコスト低下の進展  
 熱流分布のリアルタイム可視化技術などシミュレーション技術との融合発展  
 熱流・磁場情報とAIとの融合によるセキュリティ・インフラ監視技術の発展  
 微弱熱流や微弱磁場による医療診断法の発展

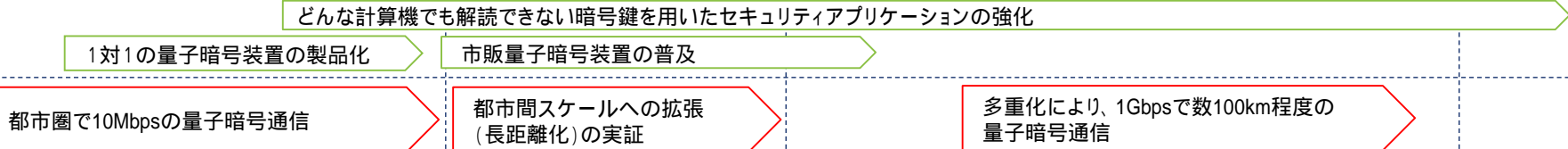




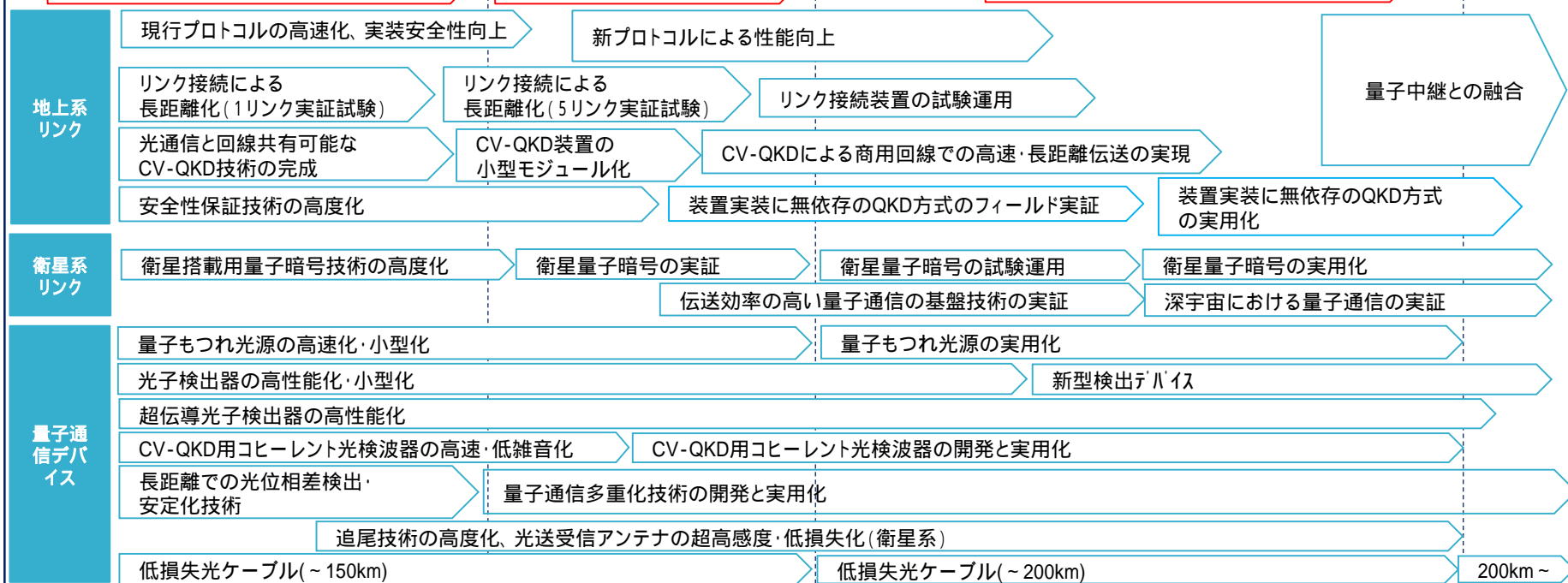
# 量子通信・暗号リンク技術

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。

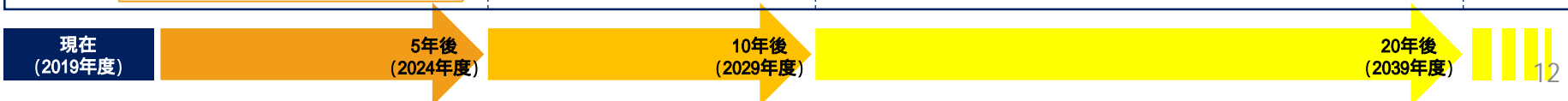
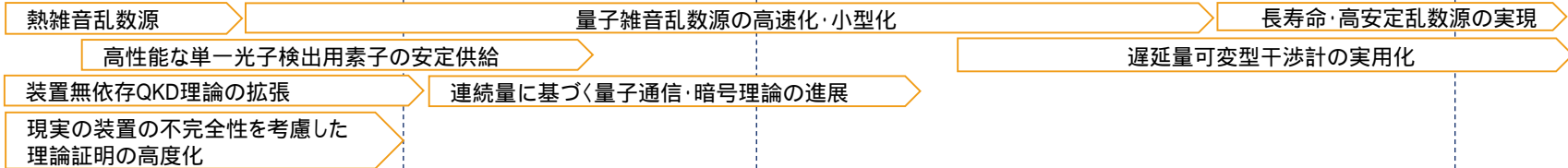
## 経済・社会 インパクト



## 技術の進展



## 本技術を支える周辺技術の進展





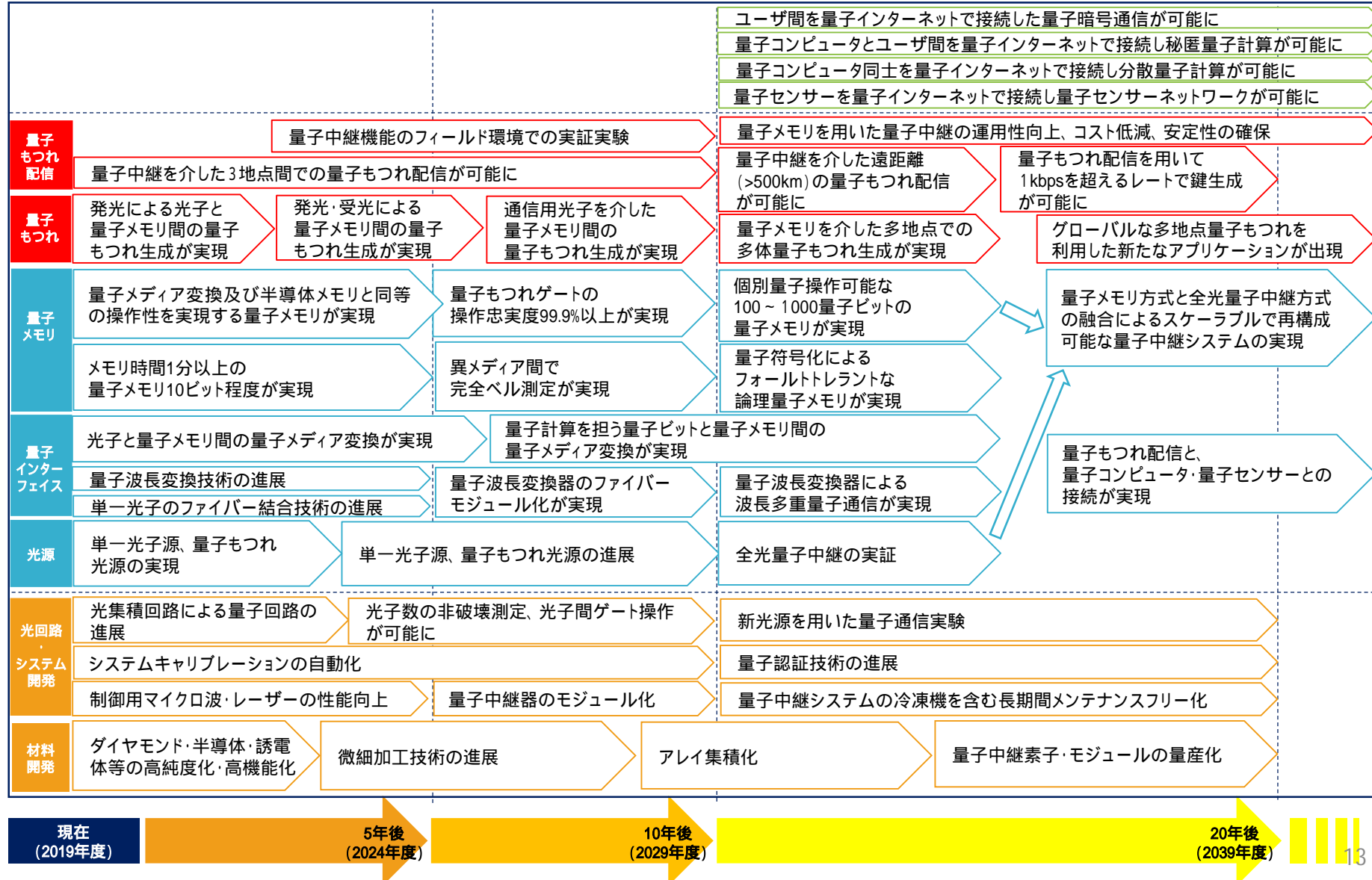
# 量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)

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



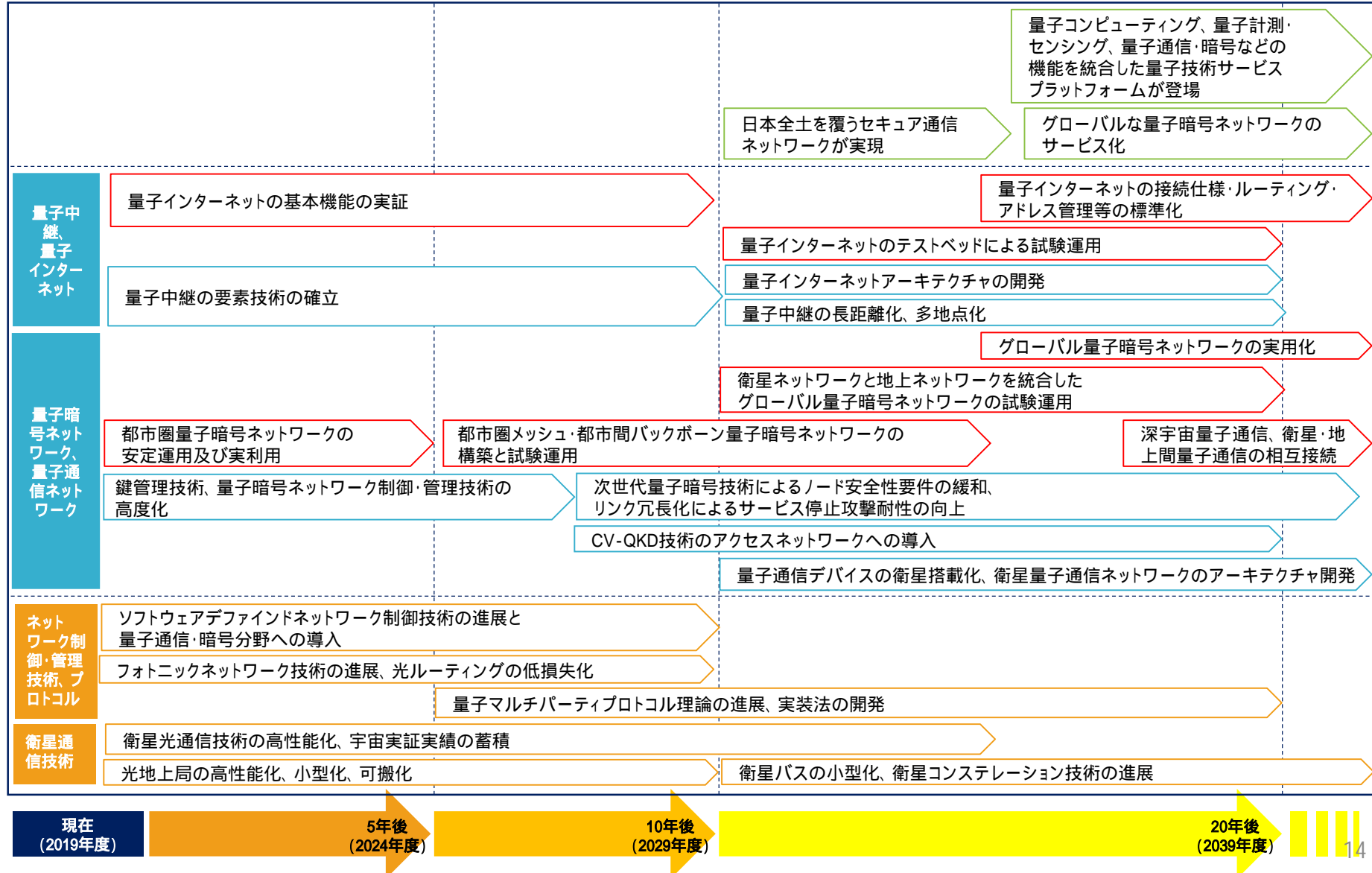
# ネットワーク化技術(構築、運用、保守等)

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、量子センサー、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





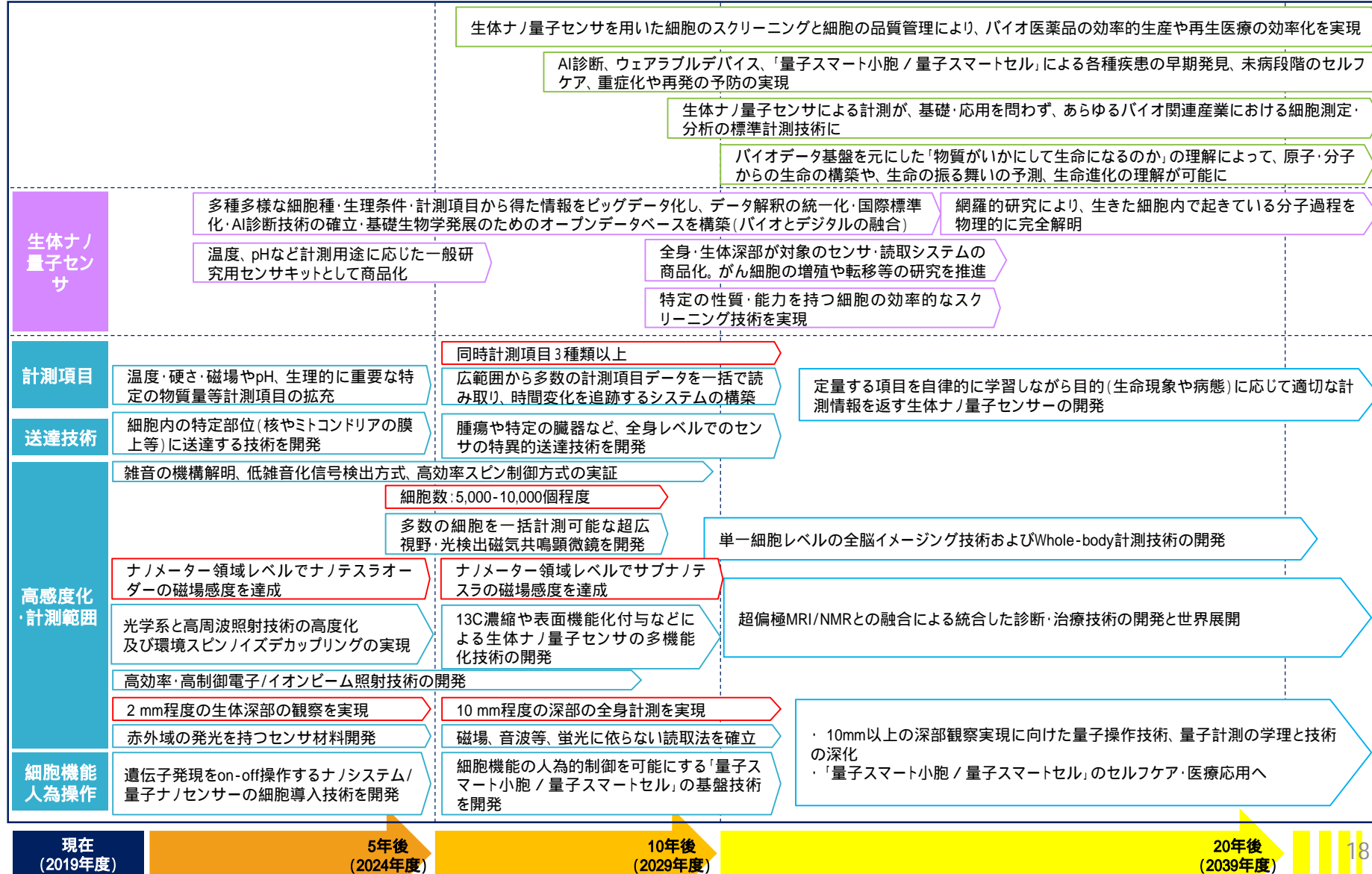
# 量子生命科学 (生体ナノ量子センサ)

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

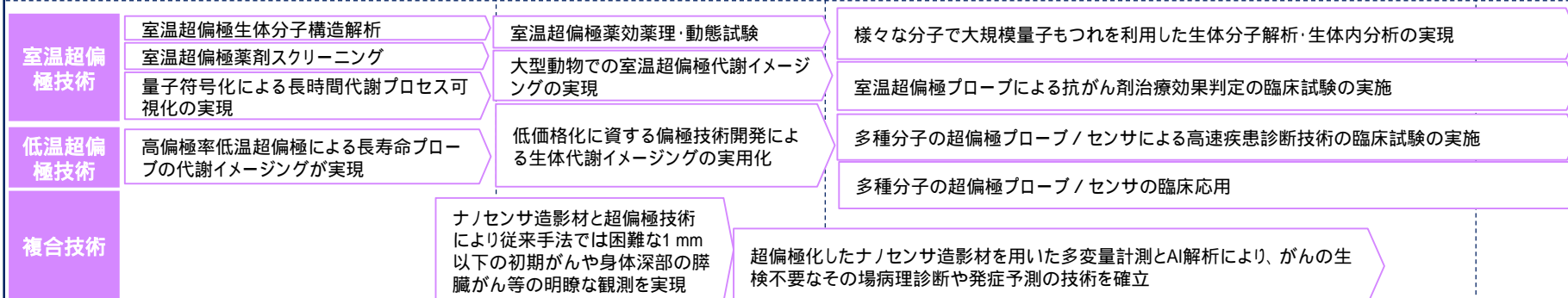
代謝イメージングが生命医科学系研究室に普及し、生命現象・病理の解明に大きく貢献

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

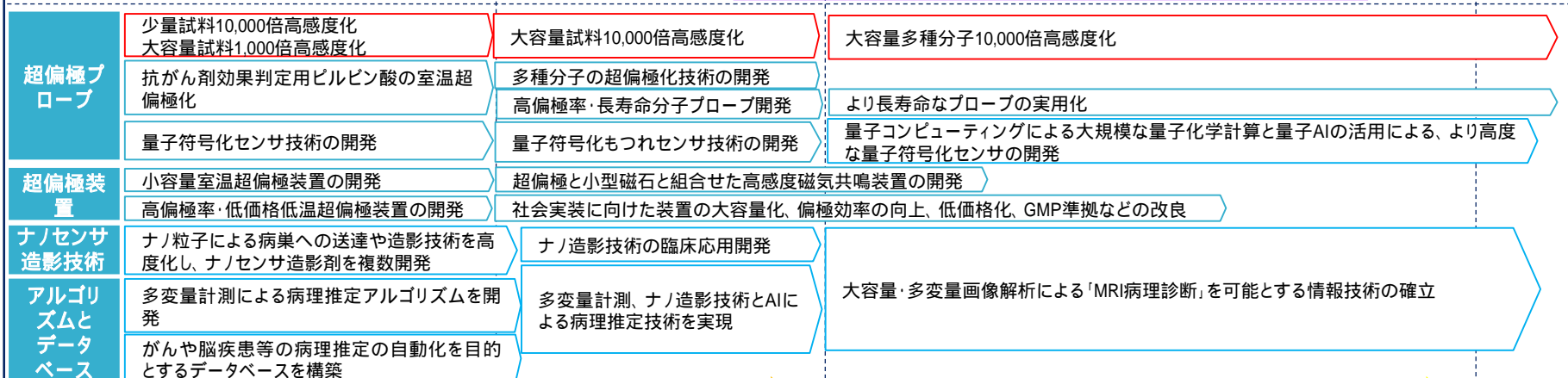
安全かつ環境に優しいナノ造影技術が、造影剤として実用化

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



## 本領域を支える技術の進展



# 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ー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**

**量子論的生命現象の解明・模倣**

- 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
- 嗅覚センサーを開発、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

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

ブリュア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化

耐量子-公開鍵暗号の国際標準化

耐量子-公開鍵暗号への移行とサービス開始、本格普及

現在  
(2019年度)

5年後  
(2024年度)

10年後  
(2029年度)

20年後  
(2039年度)