

量子技術イノベーション戦略 ロードマップ改訂

令和4年4月22日

統合イノベーション戦略推進会議

目次

1. 技術ロードマップ

(1) 量子コンピュータ・量子シミュレーション

- ①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量子アニーリングマシン（超伝導量子ビット）
- ⑥量子コンピュータ（イオントラップ量子ビット）
- ⑦量子コンピュータ（シリコン量子ビット）
- ⑧量子コンピュータ（光量子ビット）

(2) 量子計測・センシング

- ⑨固体量子センサ（ダイヤモンドNV中心等）
- ⑩量子慣性センサ
- ⑪光格子時計
- ⑫量子もつれ光センサ
- ⑬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

- ⑭量子通信・暗号リンク技術
- ⑮量子中継技術（量子メモリ・量子もつれ等）
- ⑯ネットワーク化技術（構築、運用、保守等）

2. 融合領域ロードマップ

(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

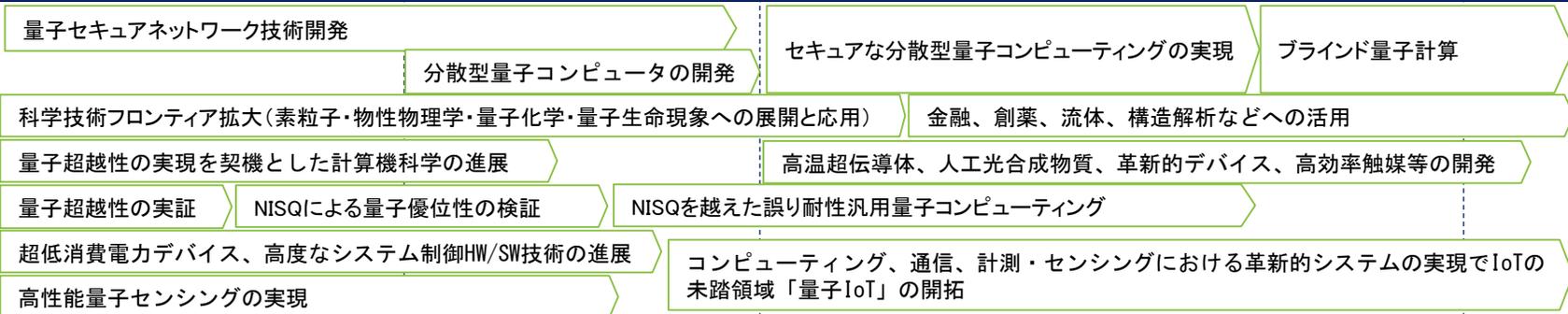
- ⑤量子セキュリティ技術

1. 技術ロードマップ

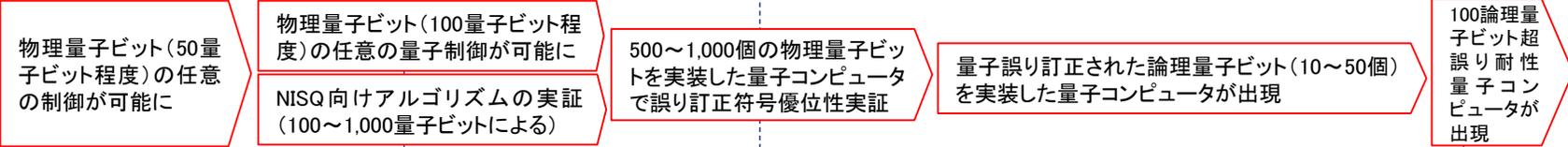
1. (1)①量子コンピュータ(超伝導量子ビット)

- 大規模で複雑な計算を高速・高精度で実行可能な誤り耐性汎用量子コンピュータを実現
- 2030年以降、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個程度の論理量子ビットを実装
- 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

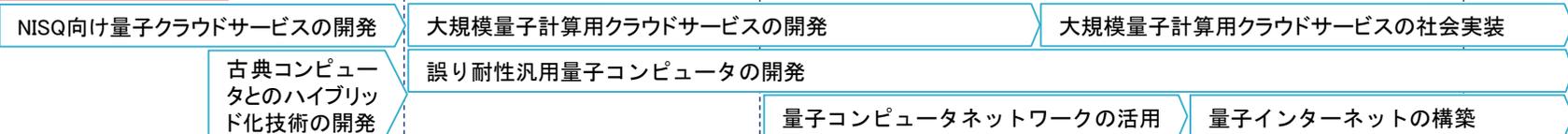
経済・社会 インパクト



量子ビット 集積化※

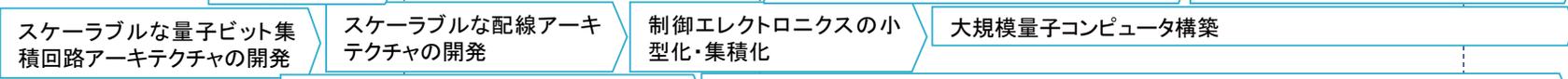


クラウド サービス

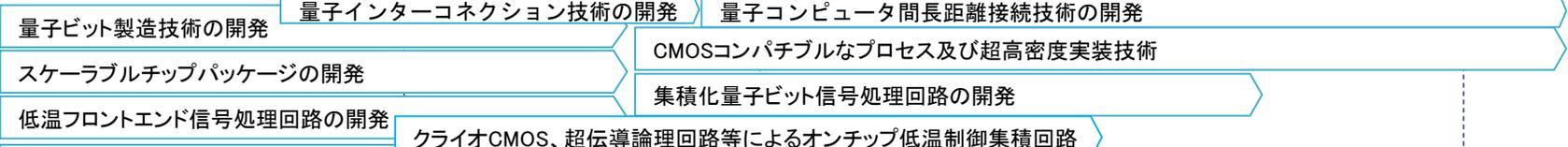


技術の進展

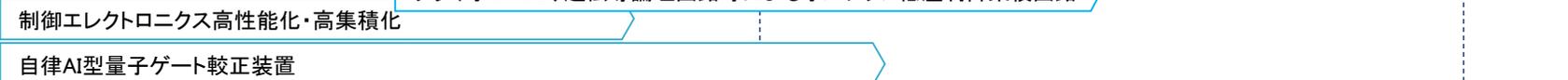
システム 化技術



製造技術

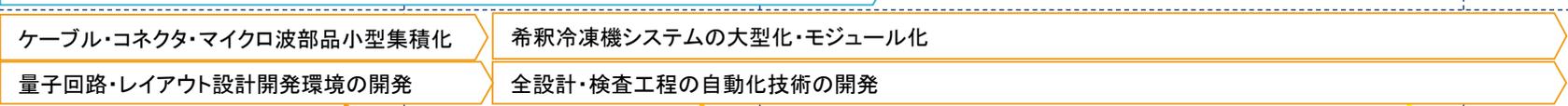


制御・ 計測技術



本技術を支 える周辺技 術の進展

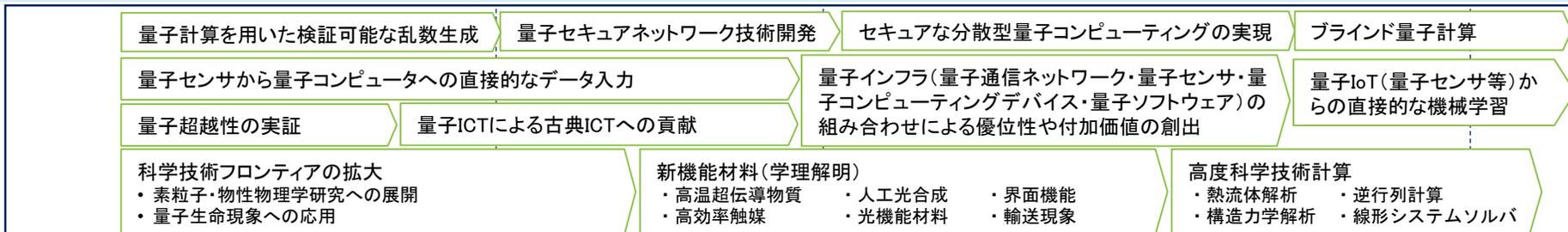
冷凍・ 低温技術 設計支援 技術



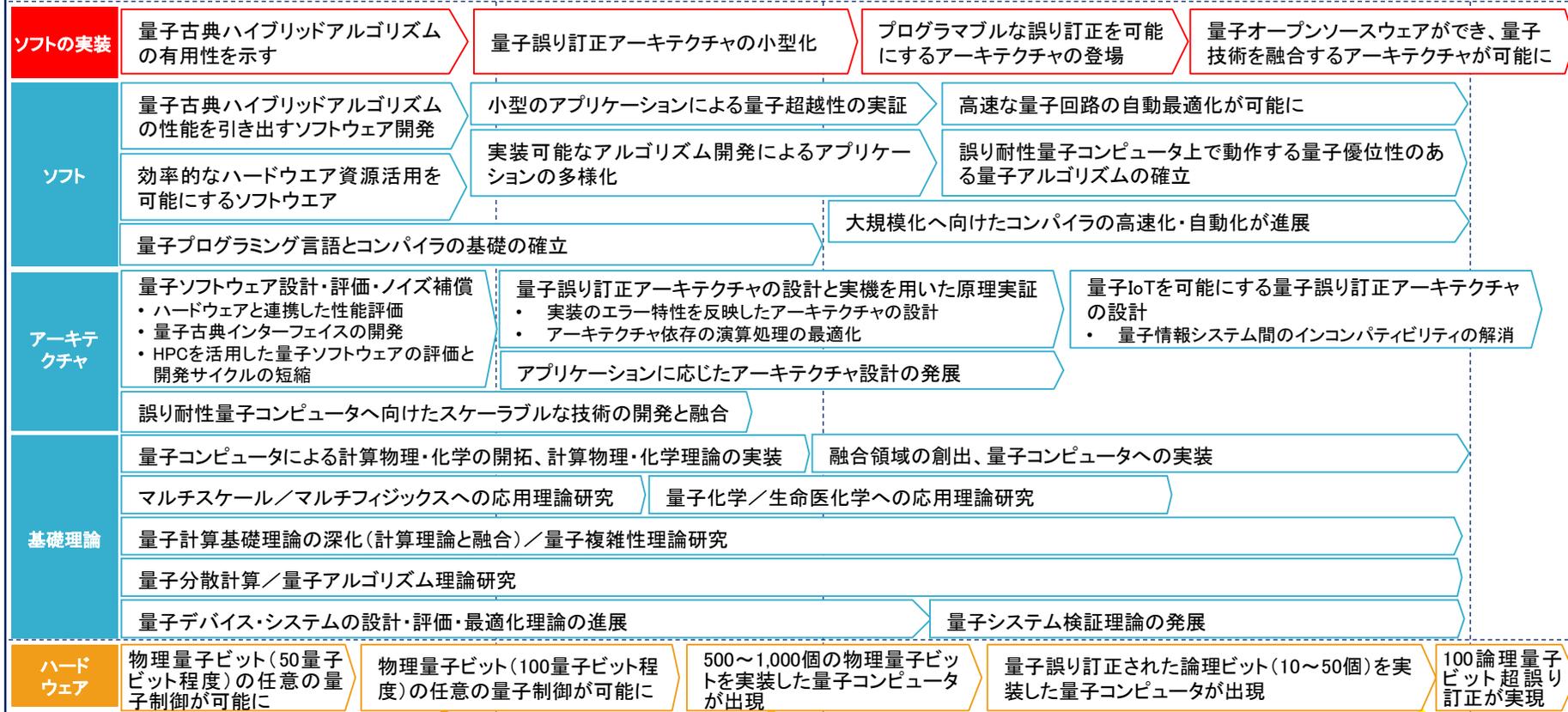
1. (1)②量子ソフトウェア(ゲート型)

- 大きな原子・分子系の物理・化学計算が実現し、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



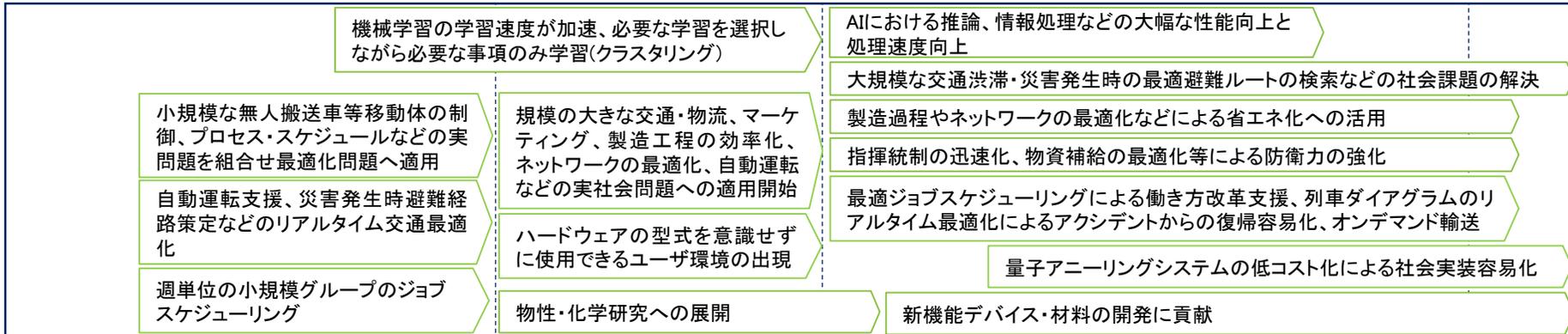
本技術を支える周辺技術の進展



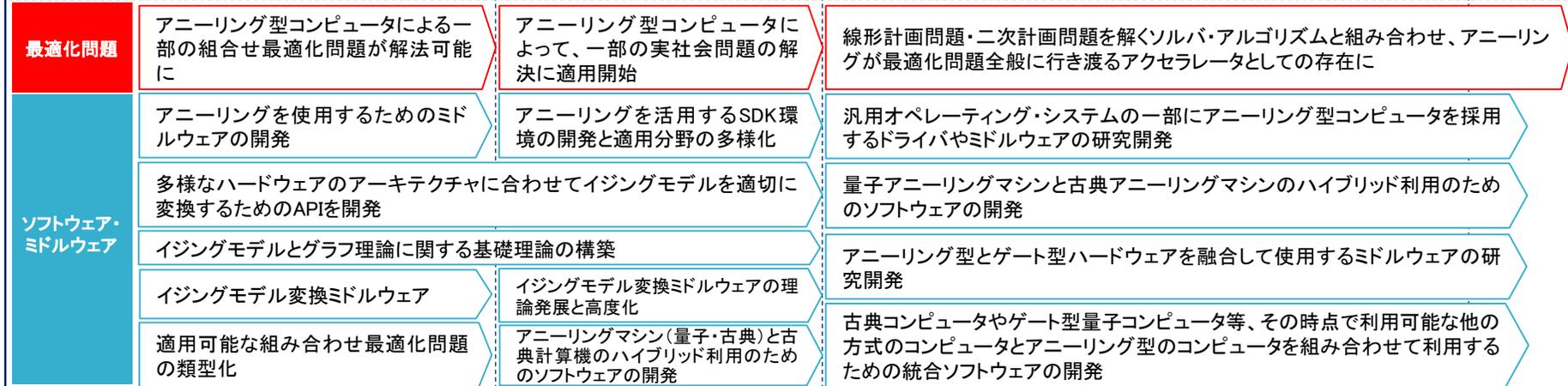
1. (1)③量子ソフトウェア(アニーリング型)

- 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
- 2025-2030年以降、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

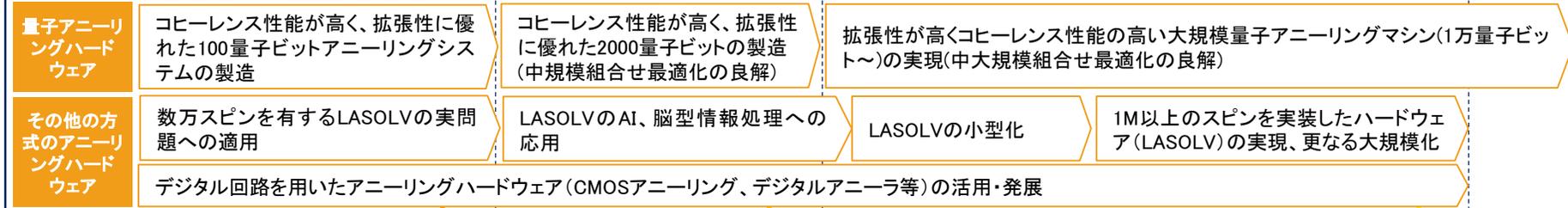
経済・社会インパクト



技術の進展



本技術を支える周辺技術の進展



1. (1)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、2030年以降、 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

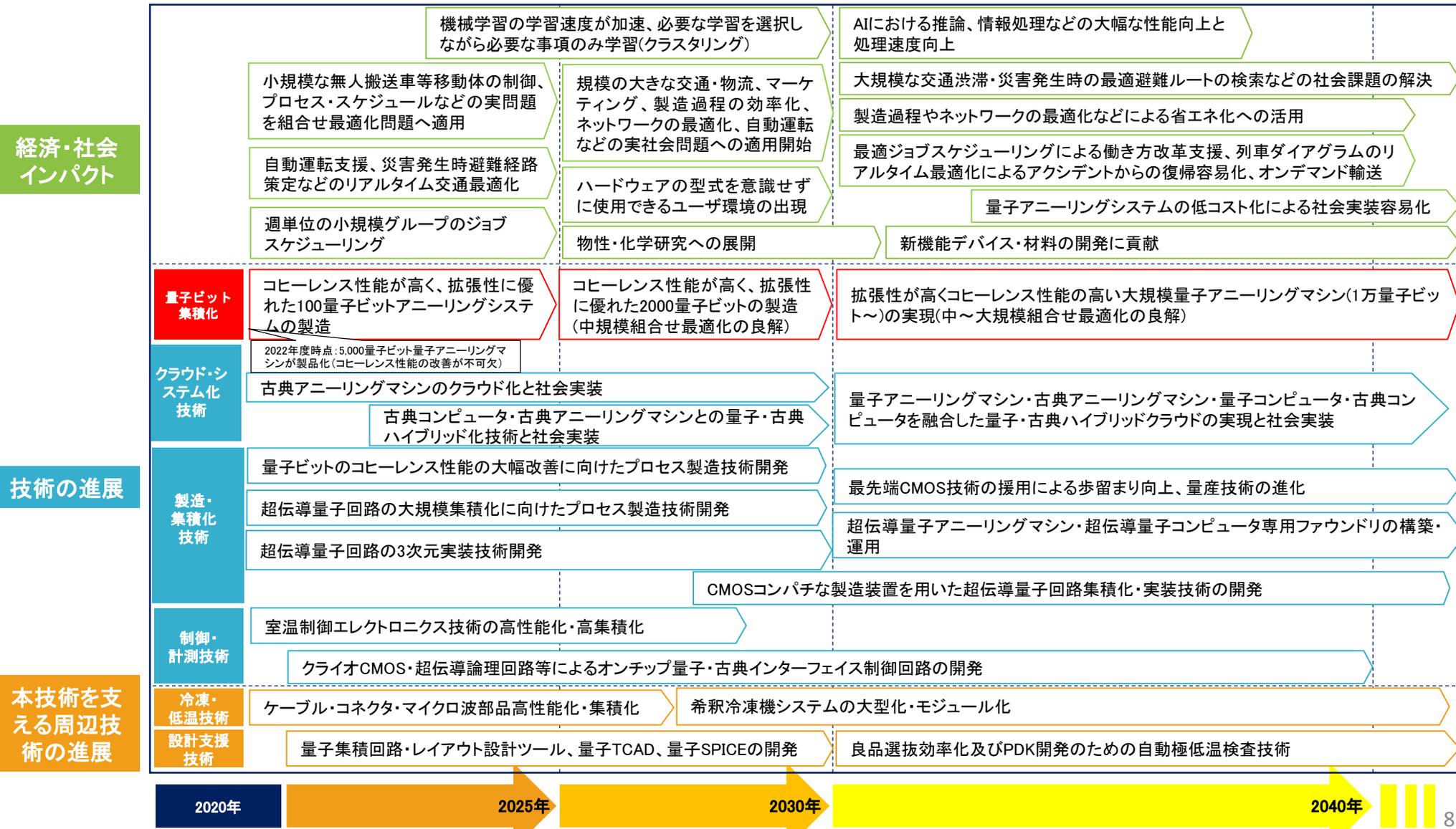
問題をハードウェアに実装するユーザインターフェースの構築

全統合型の冷却原子量子シミュレータの開発



1. (1)⑤量子アニーリングマシン(超伝導量子ビット)

- 2030年以降、高いコヒーレンス性能の1万量子ビット級の量子アニーリングマシンの実用化により、物流・交通流最適化、金融、機械学習、レコメンデーション等のリアルタイム性向上
- 低温エレクトロニクス及び3次元実装技術の開発により、量子アニーリングマシンの大規模集積化を進める
- 長期的には、量子コンピュータ及び古典コンピュータとのハイブリッドクラウド化による社会実装を追求していく



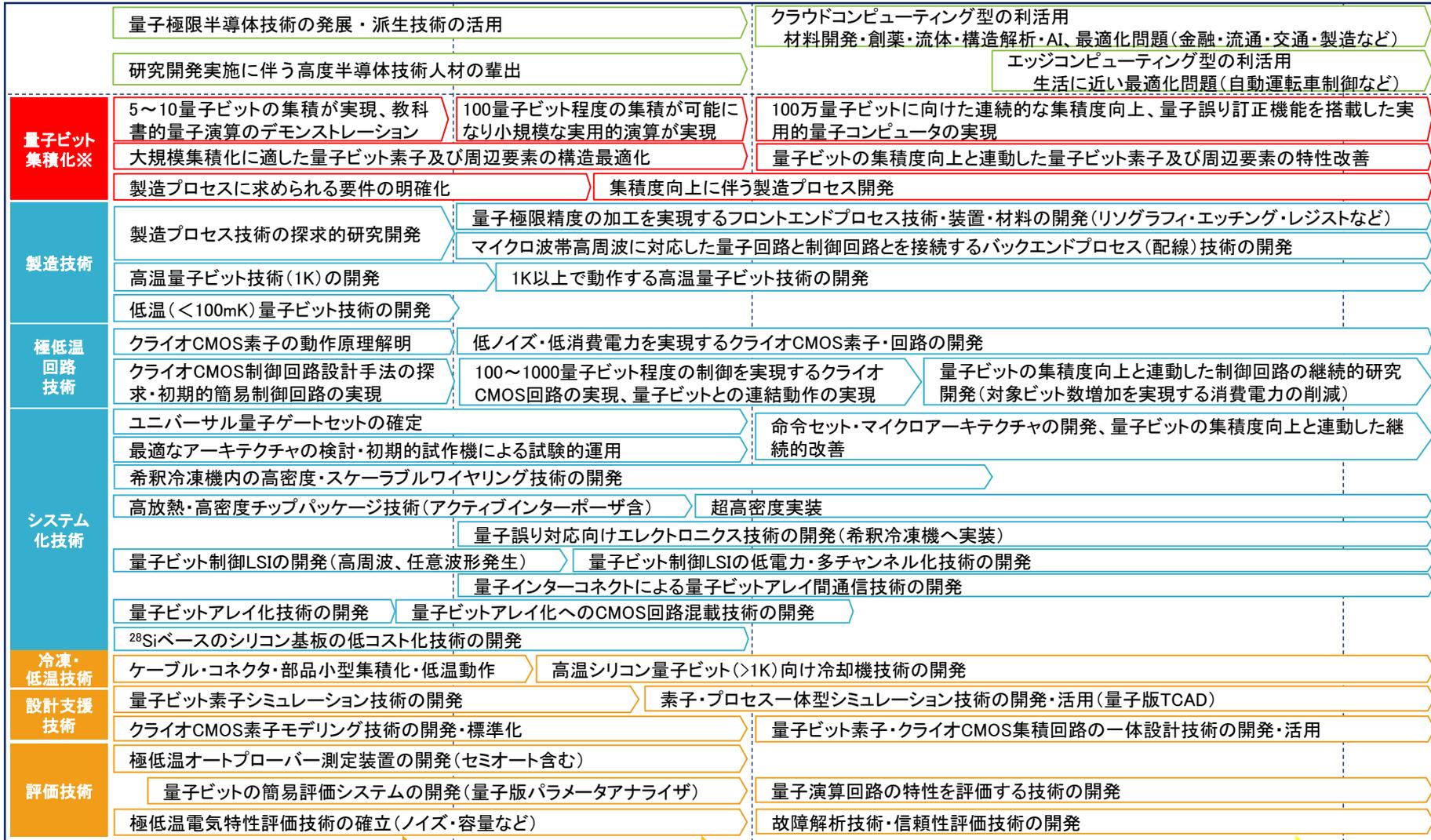
1. (1) ⑦量子コンピュータ(シリコン量子ビット)

- シリコン量子ビットアレイ集積化技術を確立し、大規模量子演算を実現できる小型な量子コンピュータを実現
- 2030年以降、量子コンピュータ処理ニーズの拡大に対応し、小型の強みを生かしたエッジコンピューティング(※ユーザエンドに近いネットワーク位置での処理)等の分散処理にユースポイントを拡大
- シリコン量子コンピュータの開発は半導体技術を高めるものであり、研究開発実施に伴って高度半導体技術人材が輩出される副次的効果も得られる

経済・社会インパクト

技術の進展

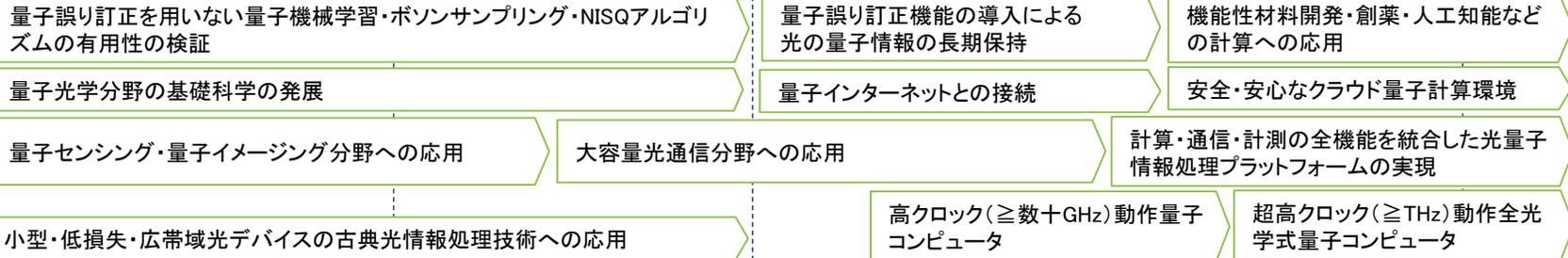
本技術を支える周辺技術の進展



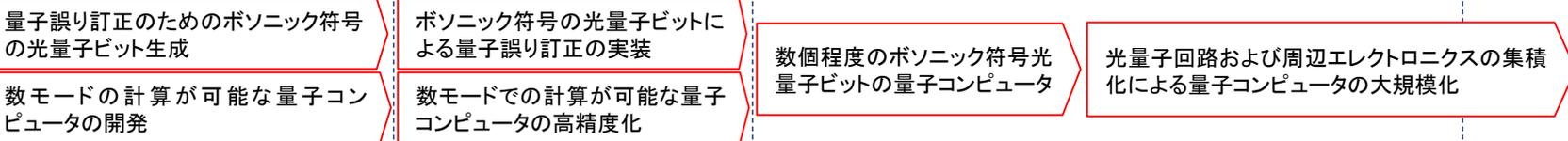
1. (1)⑧量子コンピュータ(光量子ビット)

- ボソニック符号光量子ビットと連続量量子ゲートを用いて大規模光量子コンピュータを実装、さらに超高速動作可能な全光学式量子コンピュータも狙う
- 光を用いた他の量子情報処理技術(量子インターネット・量子センシング・大容量通信など)にスムーズに応用・接続
- 高効率・高速動作の量子光源・光回路・光検出技術と、低遅延・高速動作エレクトロニクスにより高速化・大規模化を進める

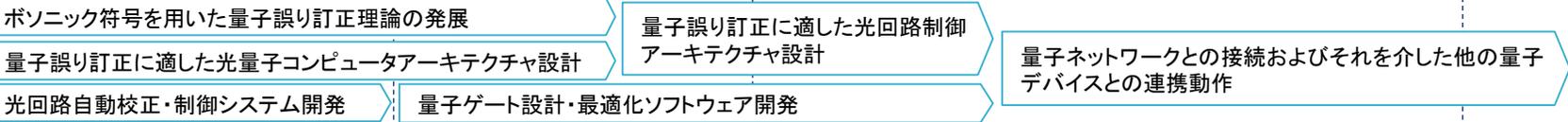
経済・社会インパクト



ハードウェア実装※



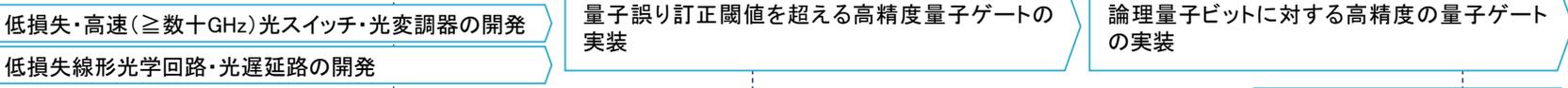
システム化技術



量子光源技術



量子ゲート技術



全光学式量子技術



制御技術



集積化技術



光検出技術



本技術を支える周辺技術の進展



※国際競争の状況を踏まえながら、世界水準と同程度の量子ビット等の実現を目指していく。

1. (2)⑨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
- 2025年に 10^{-12} T(テスラ)、2030年に 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

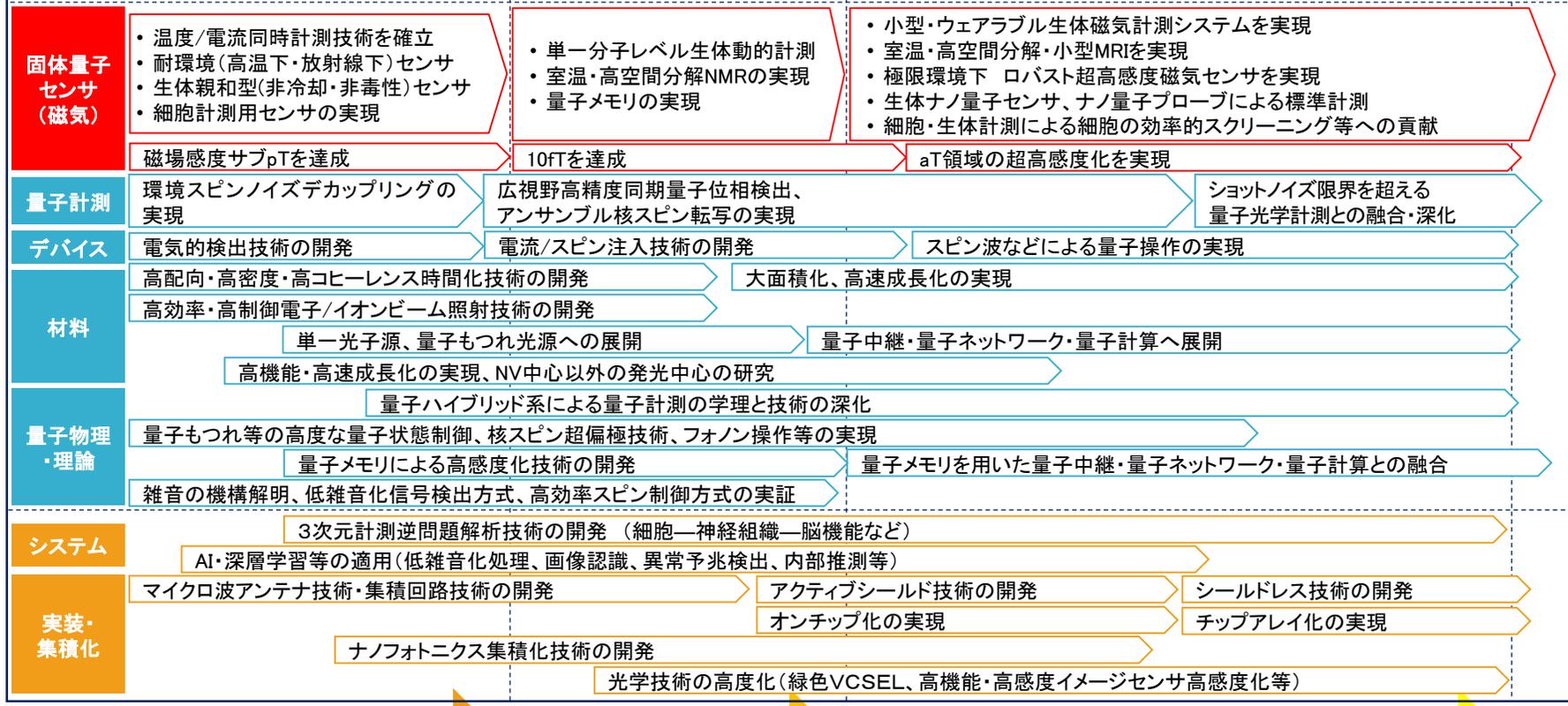
インフラ、宇宙、資源探査、ロバストな超高感度センサによる極限環境での探索

- ・ 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



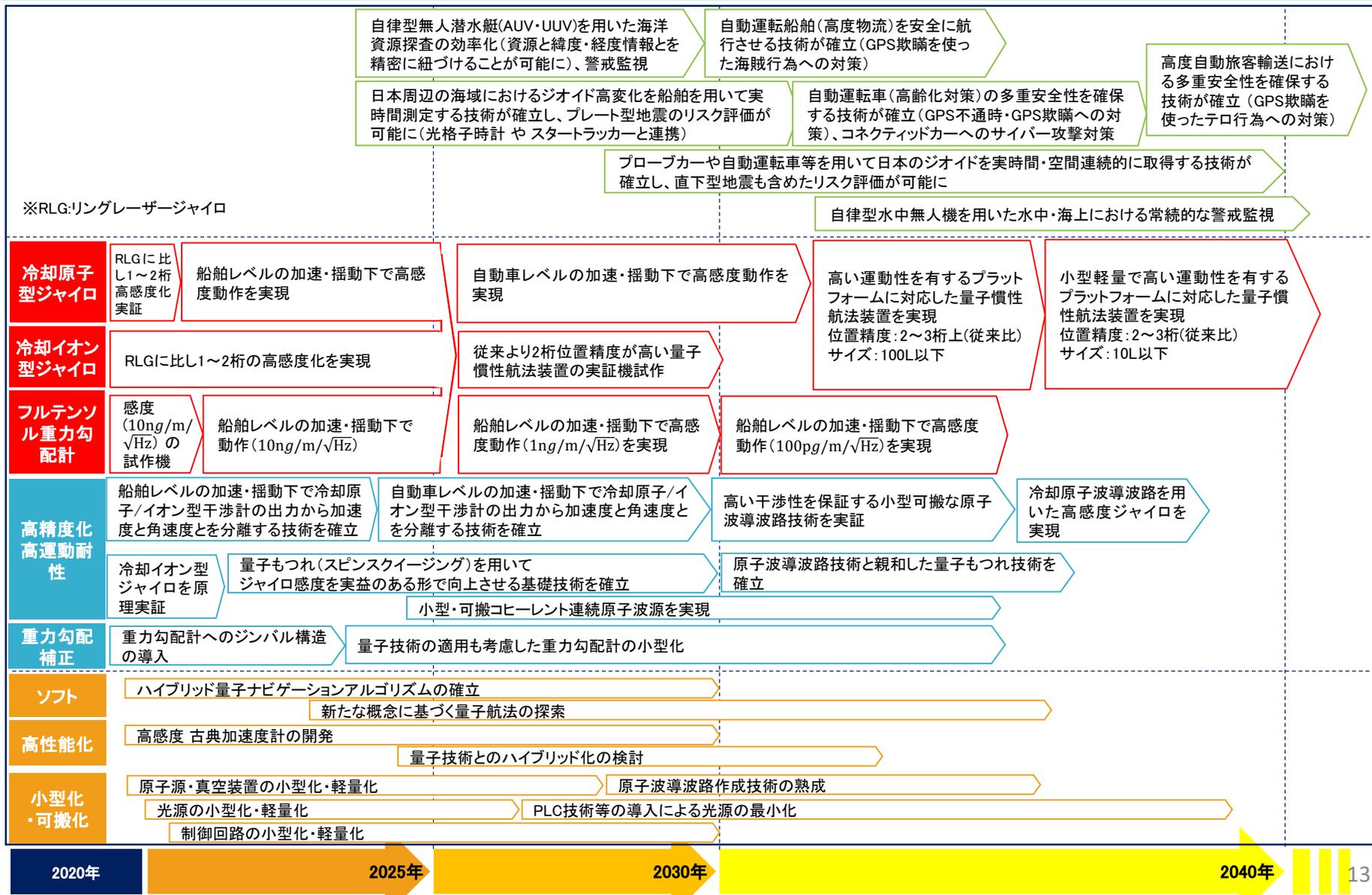
1. (2) ⑩量子慣性センサ

- 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
- 2025年に船舶環境下でのジャイロの高感度動作を実現、2030年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



1. (2) ⑪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)

秒の
再定義

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

半導体レーザー高性能化、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

2020年

2025年

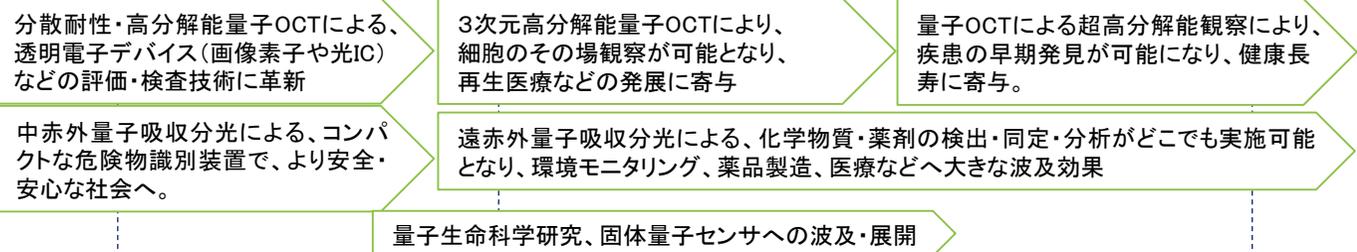
2030年

2040年

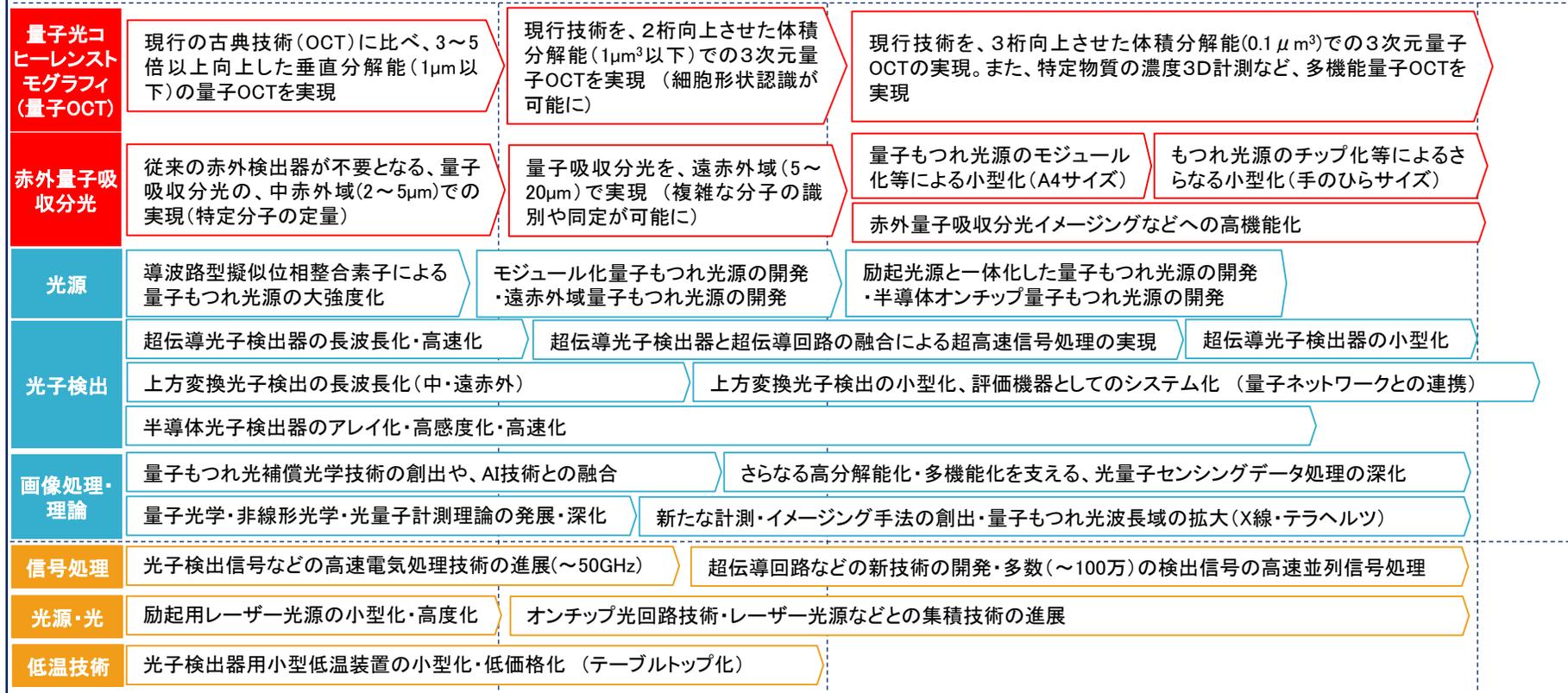
1. (2) ⑫量子もつれ光センサ

- 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
- 2030年に量子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

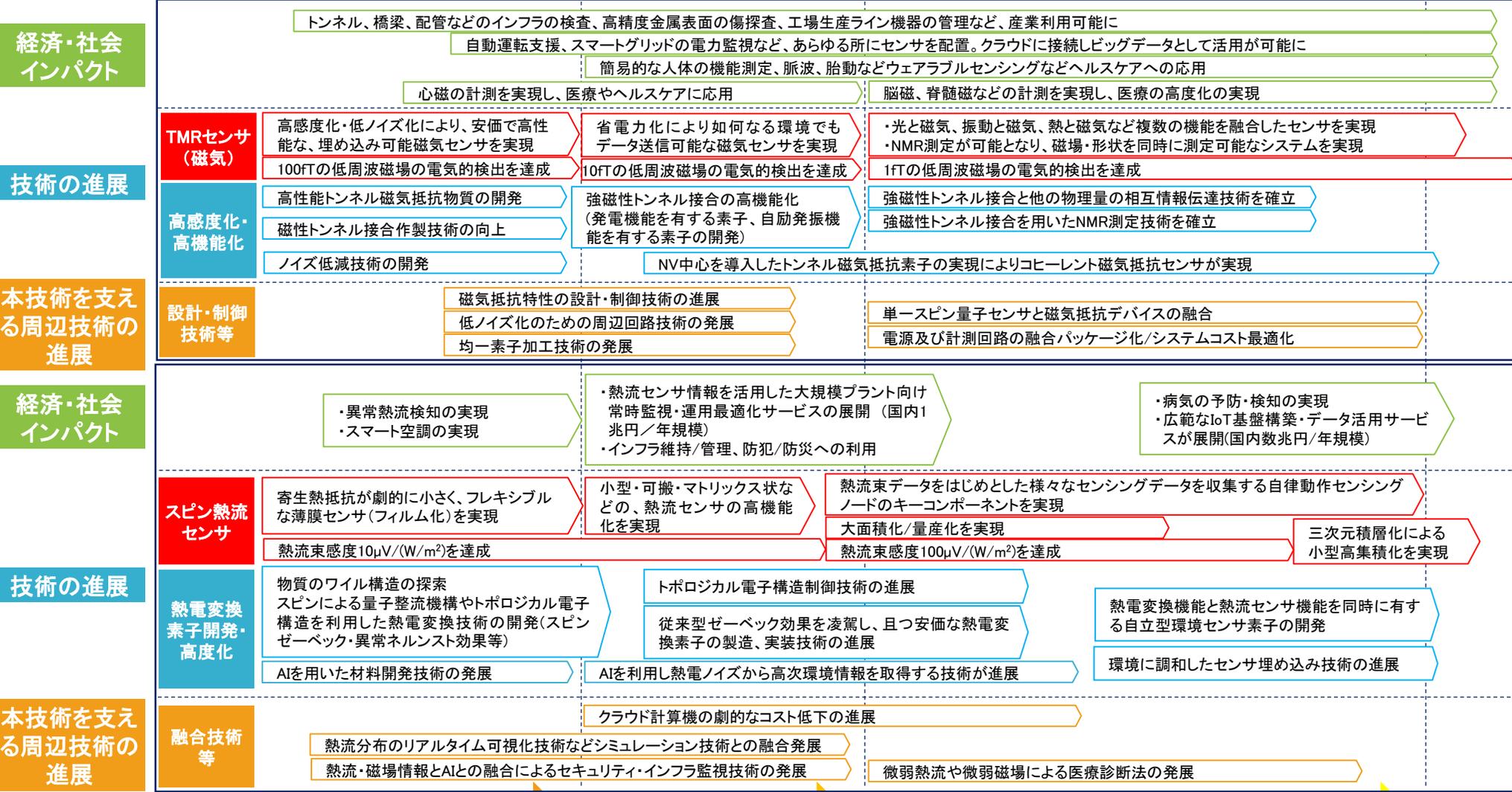


本技術を支える周辺技術の進展



1. (2) ⑬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か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
- 2030年には省電力かつ自励発振可能なTMRセンサ、小型、可搬、マトリッ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



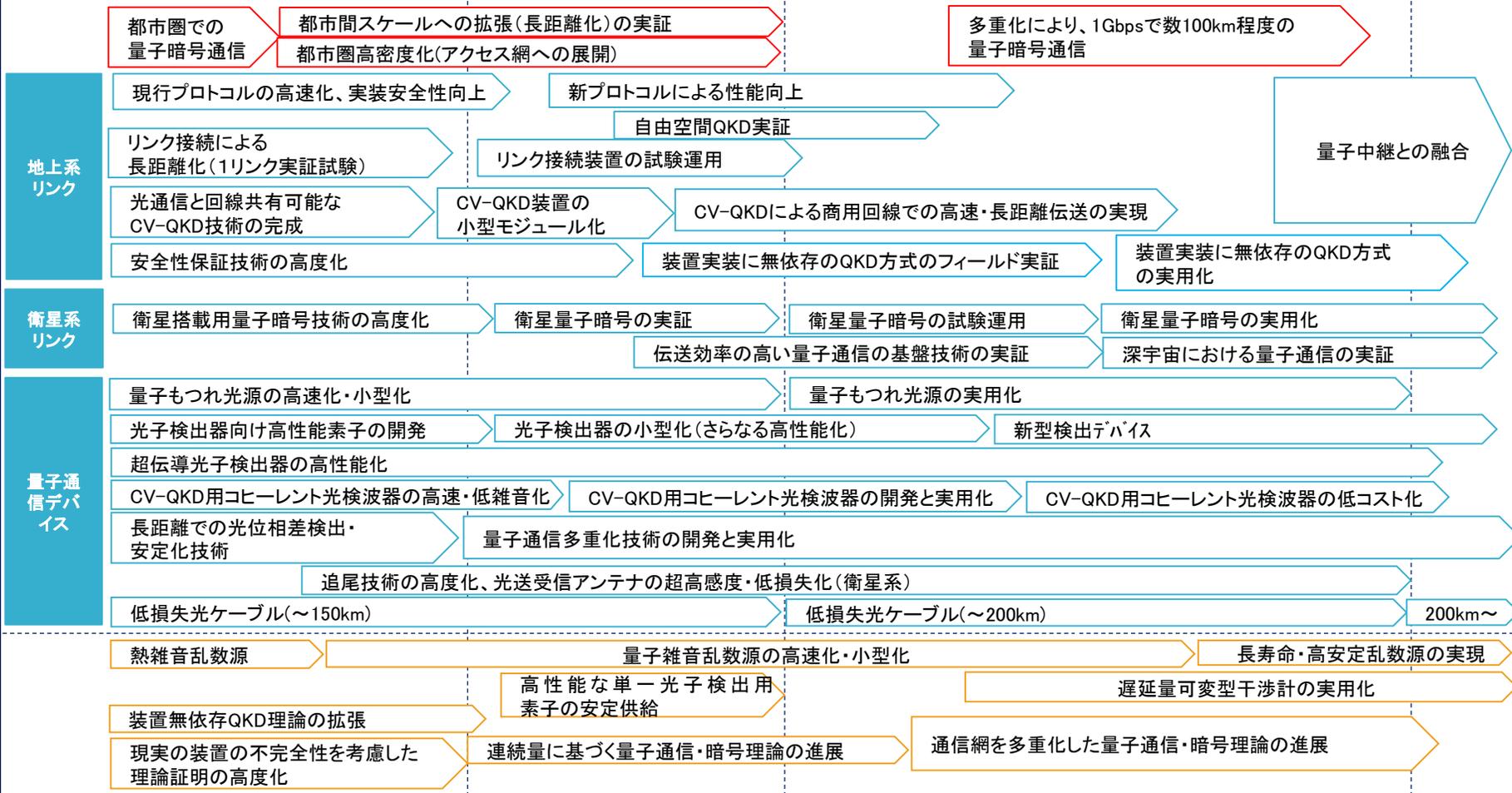
1. (3) ⑭量子通信・暗号リンク技術

- 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
- 2025年までに都市圏で10Mbpsの量子暗号通信、2030年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



2020年

2025年

2030年

2040年

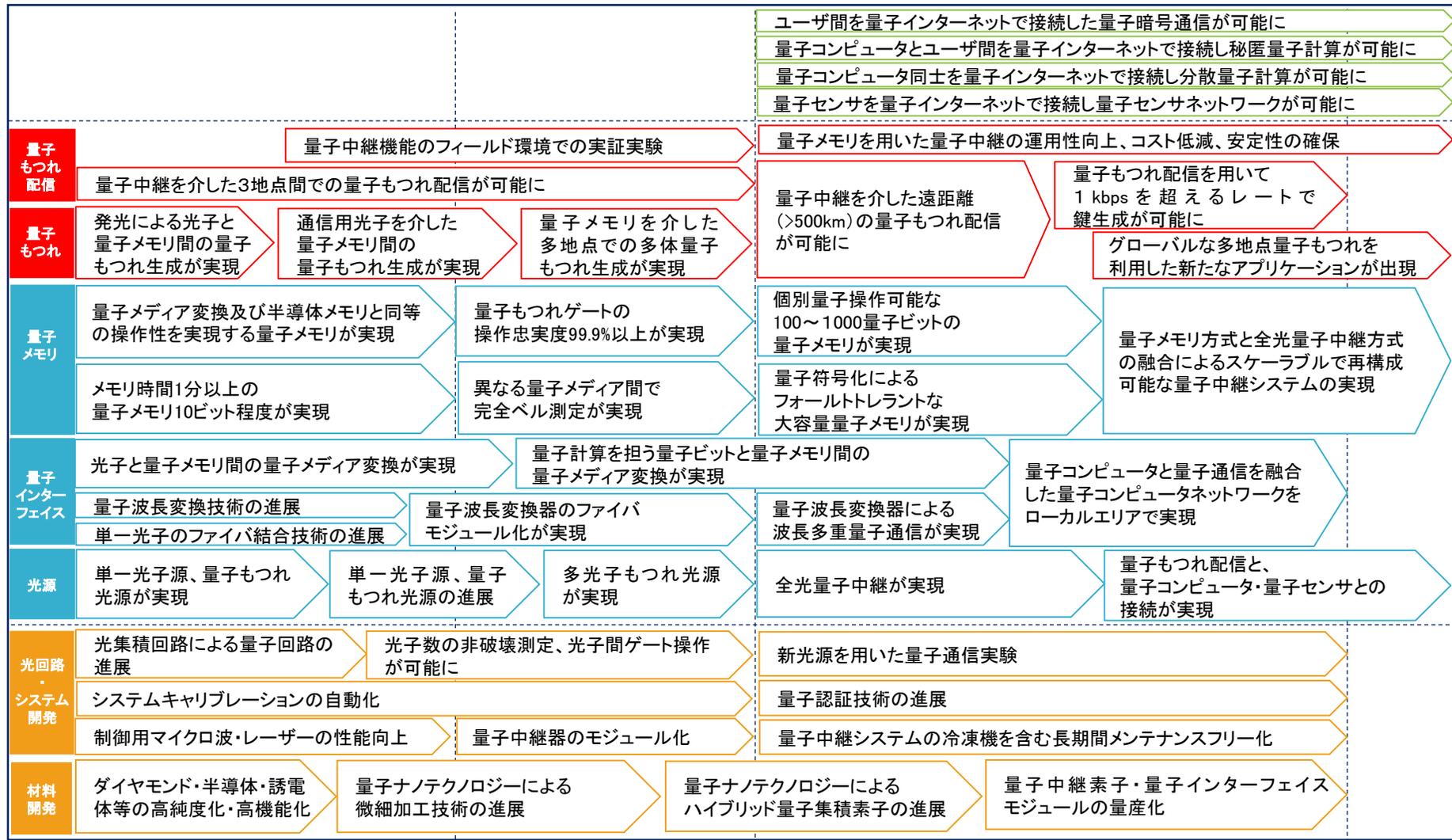
1. (3) ⑮量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)

- 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
- 2030年までに3地点間量子もつれ配信、2040年までに量子もつれ配信を用いた 1 kbps を超える鍵生成、量子コンピュータネットワークを実現
- 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

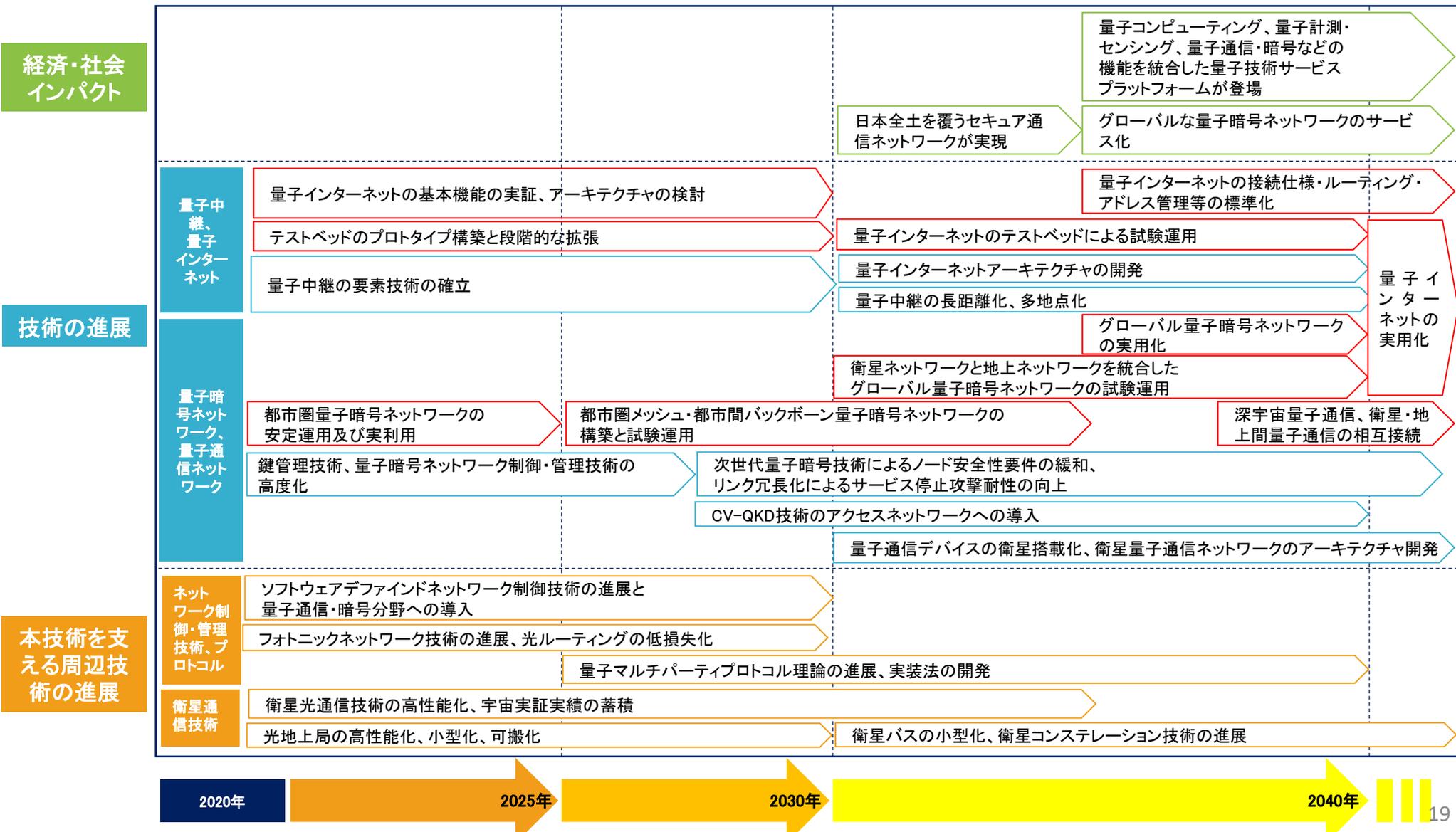
技術の進展

本技術を支える周辺技術の進展



1. (3)⑯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
- 2030年までに都市圏メッシュ、2040年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現
- 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古典NWとの融合を含む量子インターネット基盤技術等に関する研究開発



2. 融合領域ロードマップ

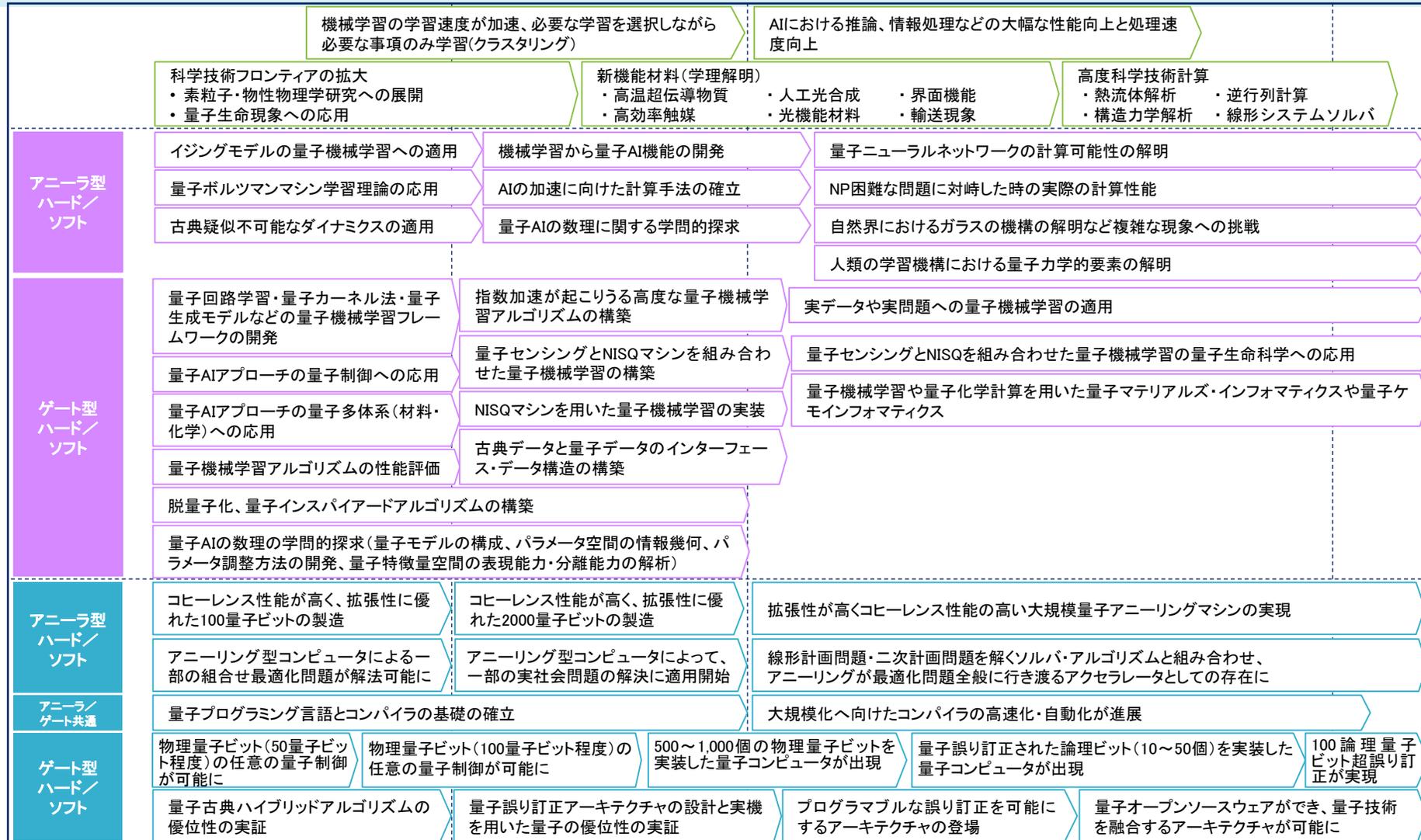
2. (2) ①量子AI技術

- 将来的なニューラルネットや人間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



2020年

2025年

2030年

2040年

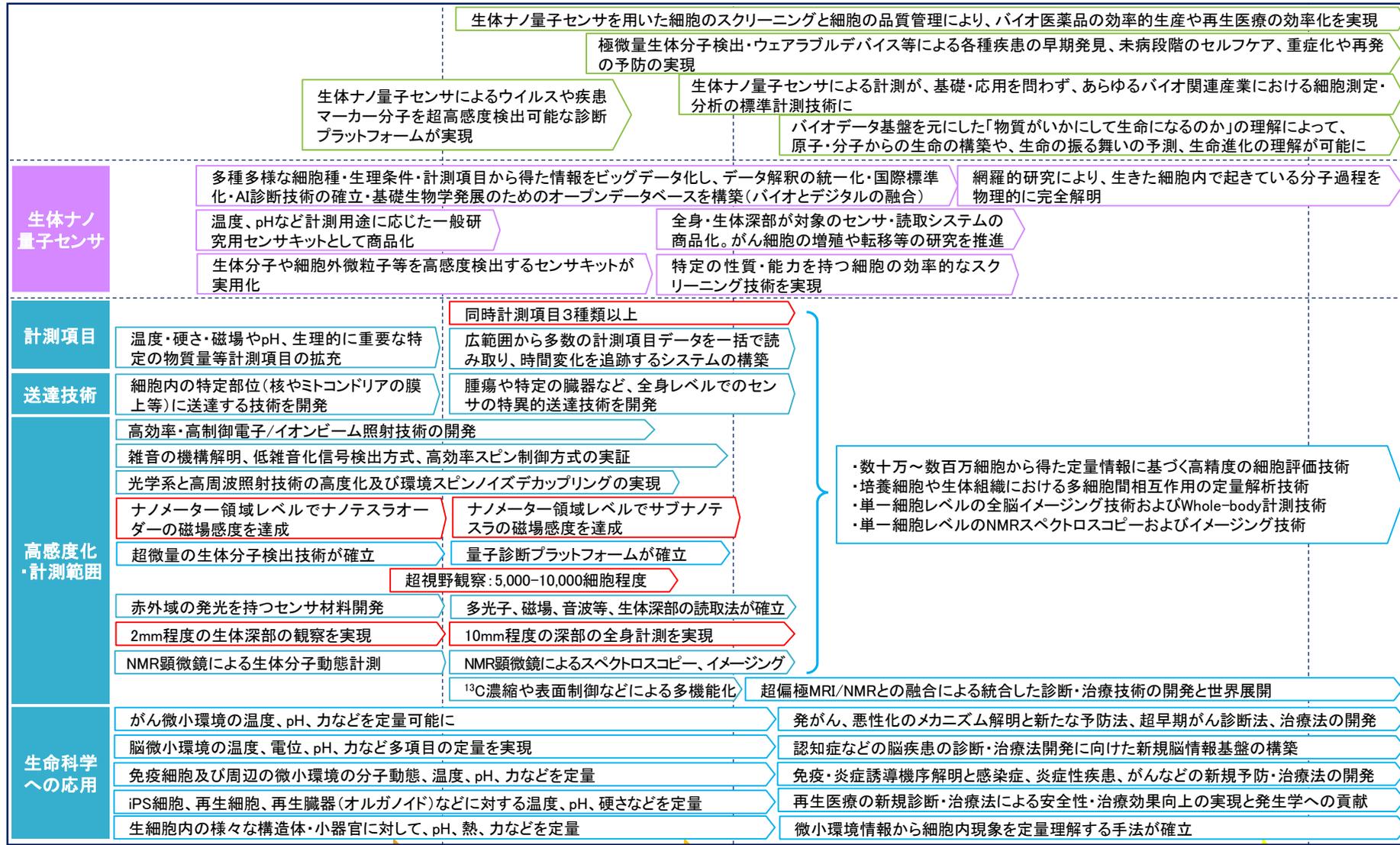
2. (2)②量子生命科学(生体ナノ量子センサ)

- 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
- 2025年には個々の細胞レベル、2030年に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



2020年

2025年

2030年

2040年

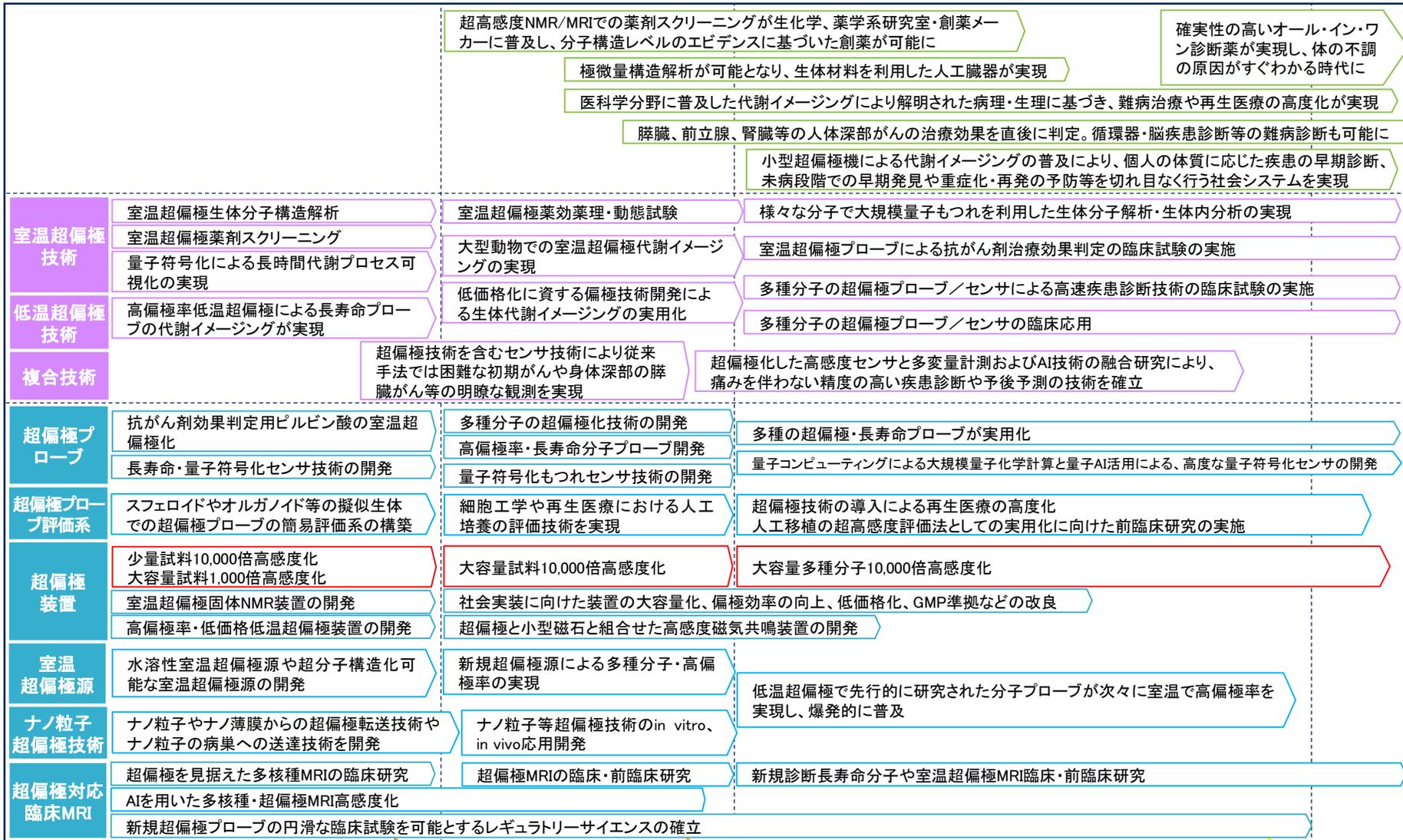
2. (2)③量子生命科学（量子技術を用いた超高感度MRI/NMR）

- 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
- 2025年、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。2030年、医療診断が実現、臨床治験が開始
- 室温超偏極化、長寿命化、量子符号化、ナノ粒子超偏極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

領域の進展

本領域を支える技術の
進展



2. (2)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
- 2025年には分子レベルで量子効果の機能性を解明、2030年に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

- ・候補物質に対する精密構造解析と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等の健康モニタリング
- ・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
- 匂い、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、バイオミメティクス型高応答性光検出器の商用化
- ・超高感度匂いセンサー等を實現し、体臭などの混合臭の測定・評価による健康モニタリングへ応用
- ・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

脳機能の予測と模倣

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等光受容系における量子コヒーレンスの高精度観測、量子生命工学デバイスによる電荷移動の効率と指向性の評価
- 生物の磁覚受容メカニズムにおける量子効果の分光学的解析、嗅覚超感受性における嗅粘液中匂い結合分子や受容体との量子化学的相互作用解析
- DNA突然変異、酵素反応等における生体分子の量子重ね合わせ状態計測と計算科学的解析
- 高輝度放射光軟X線を用いた生体分子複合体の量子もつれ状態計測
- がん発生と創薬のモデル構築のための生体分子複合体における量子状態の理論計算

量子効果を利用する生物機能に倣った分子設計と機能性分子創製

生体分子の動構造解析

- 1Å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構築
- 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
- 多種多様な生物種における、生体超分子に対するサブÅ分解能、サブピコ秒での時分割の構造解析
- 電子軌道数10万超の系を1時間以内で量子化学計算

情報科学

- 生物各階層のバイオデータを統一的に解析する方法論開発
- 古典コンピュータによる量子コンピュータの近似技術開発
- 量子計算技術に基づくバイオデータ解析手法の開発
- 量子確率論的フレームワークの生命科学への応用
- ・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解析された物質機能や化学反応の理解をもとにした、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



2. (3)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
- 2025年までに量子セキュアクラウドを実現、2035年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

