

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・ спин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）

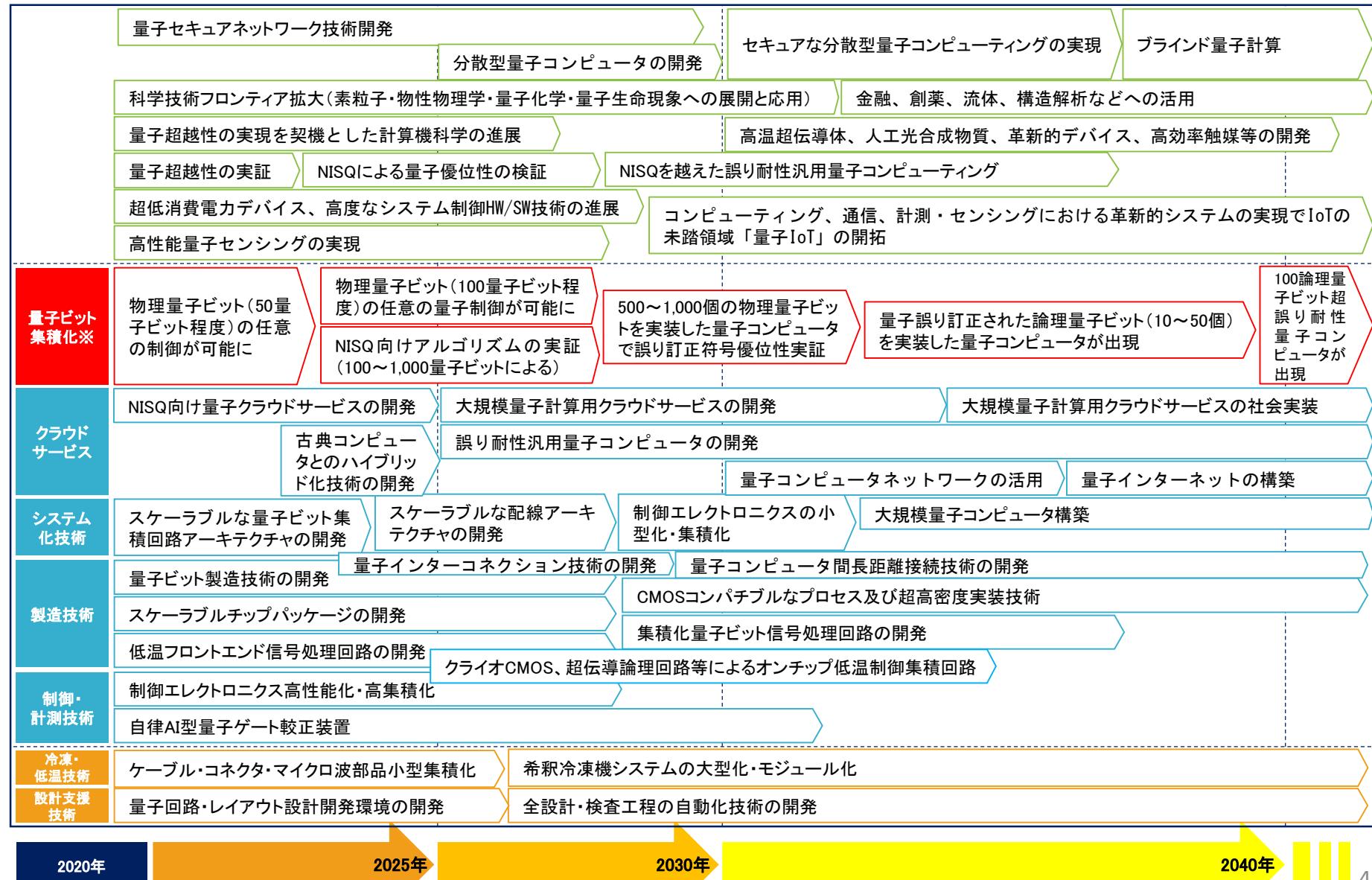
2. 融合領域ロードマップ

- (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

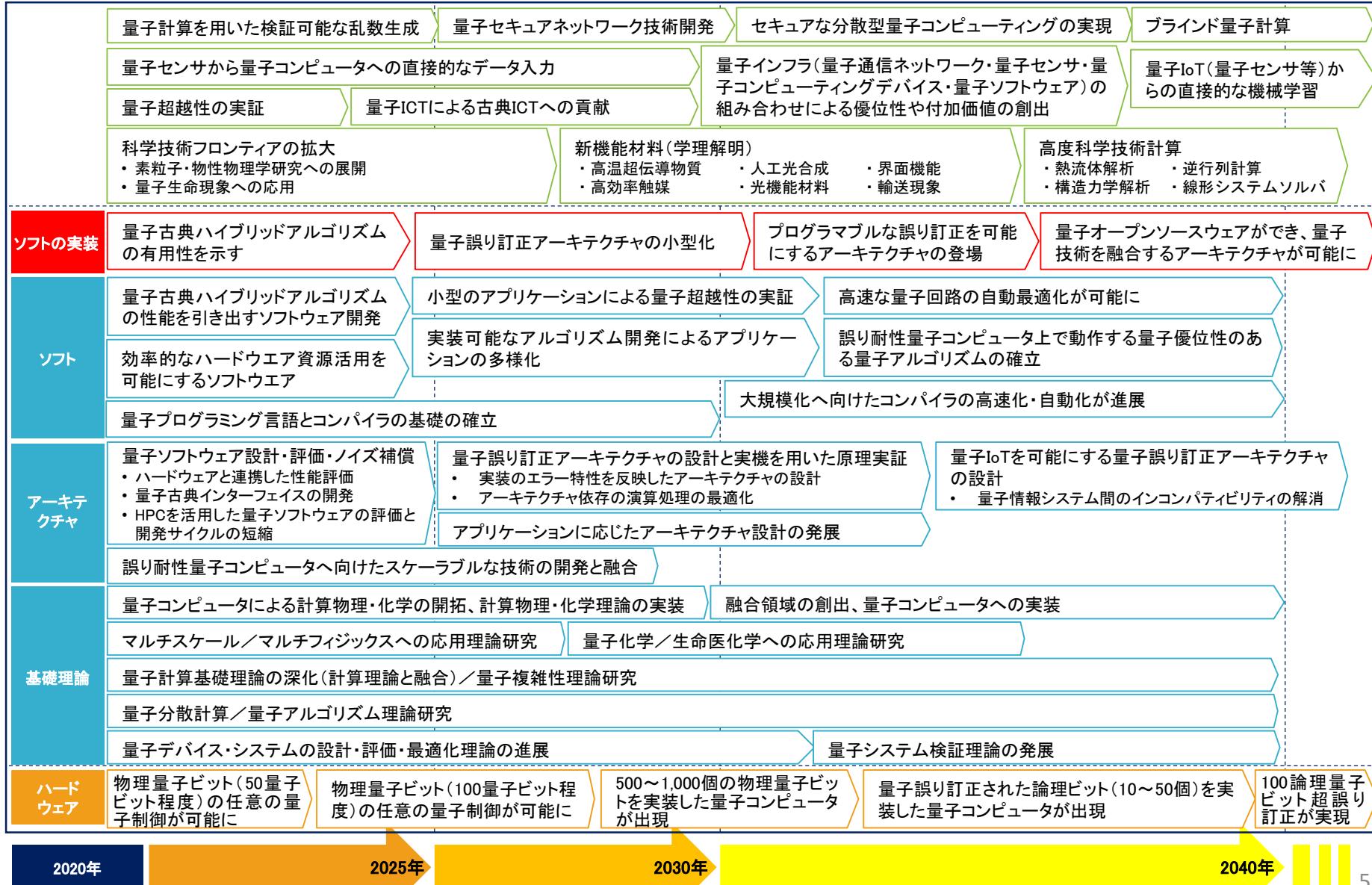


※国際競争の状況を踏まえながら、世界水準と同程度の量子ビット等の実現を目指していく。

1. (1)②量子ソフトウェア(ゲート型)

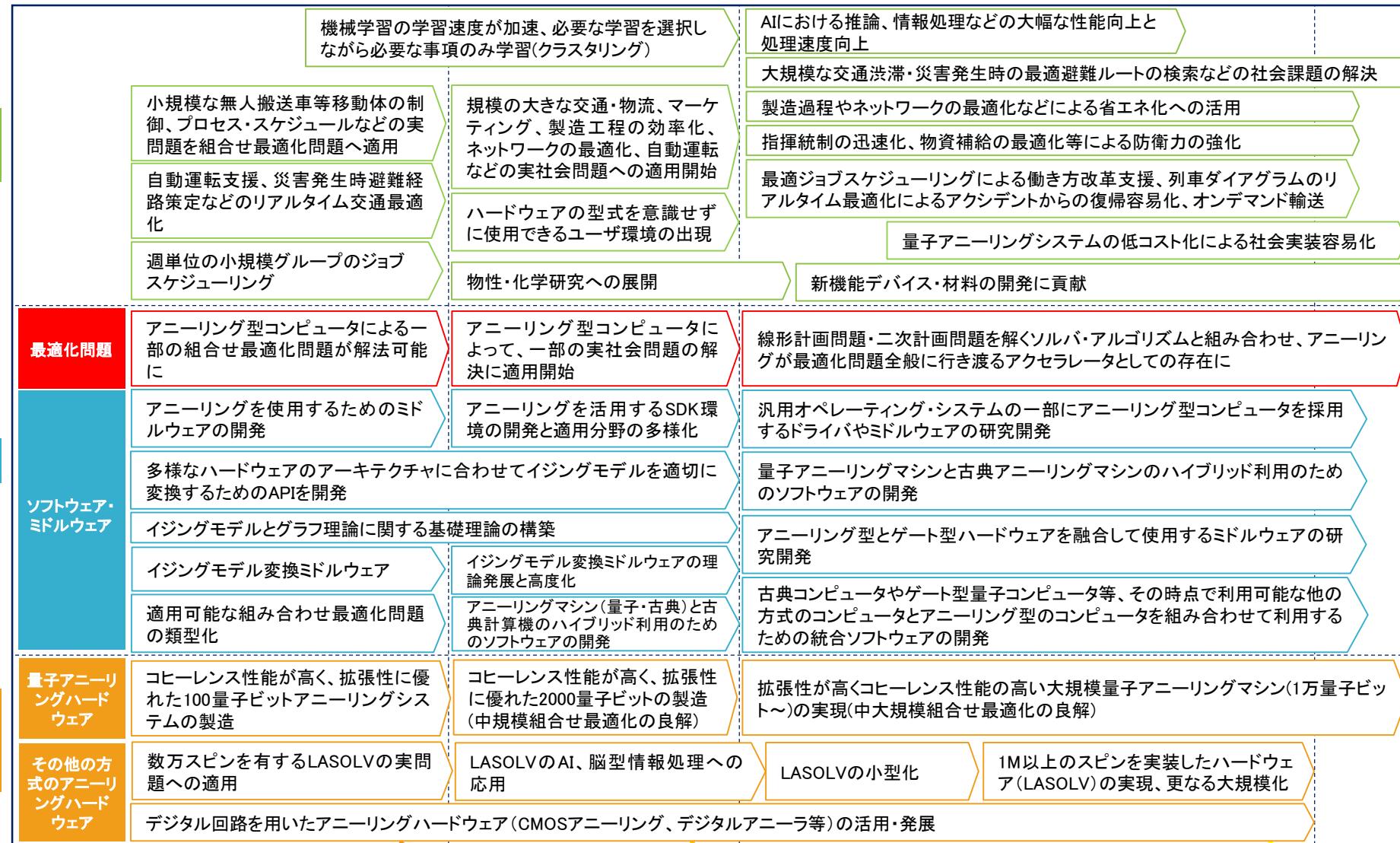
- 大きな原子・分子系の物理・化学計算が実現し、材料・医学・創薬・機械学習、金融、セキュリティなど幅広い応用が可能に
- 1,000個以上の量子ビットを実装した量子超越性の実証、誤り訂正量子コンピュータに実装
- 物理・化学・計算科学の基礎理論に基づき量子計算に適したアルゴリズムの創出、融合領域を開拓

経済・社会インパクト



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



2020年

2025年

2030年

2040年

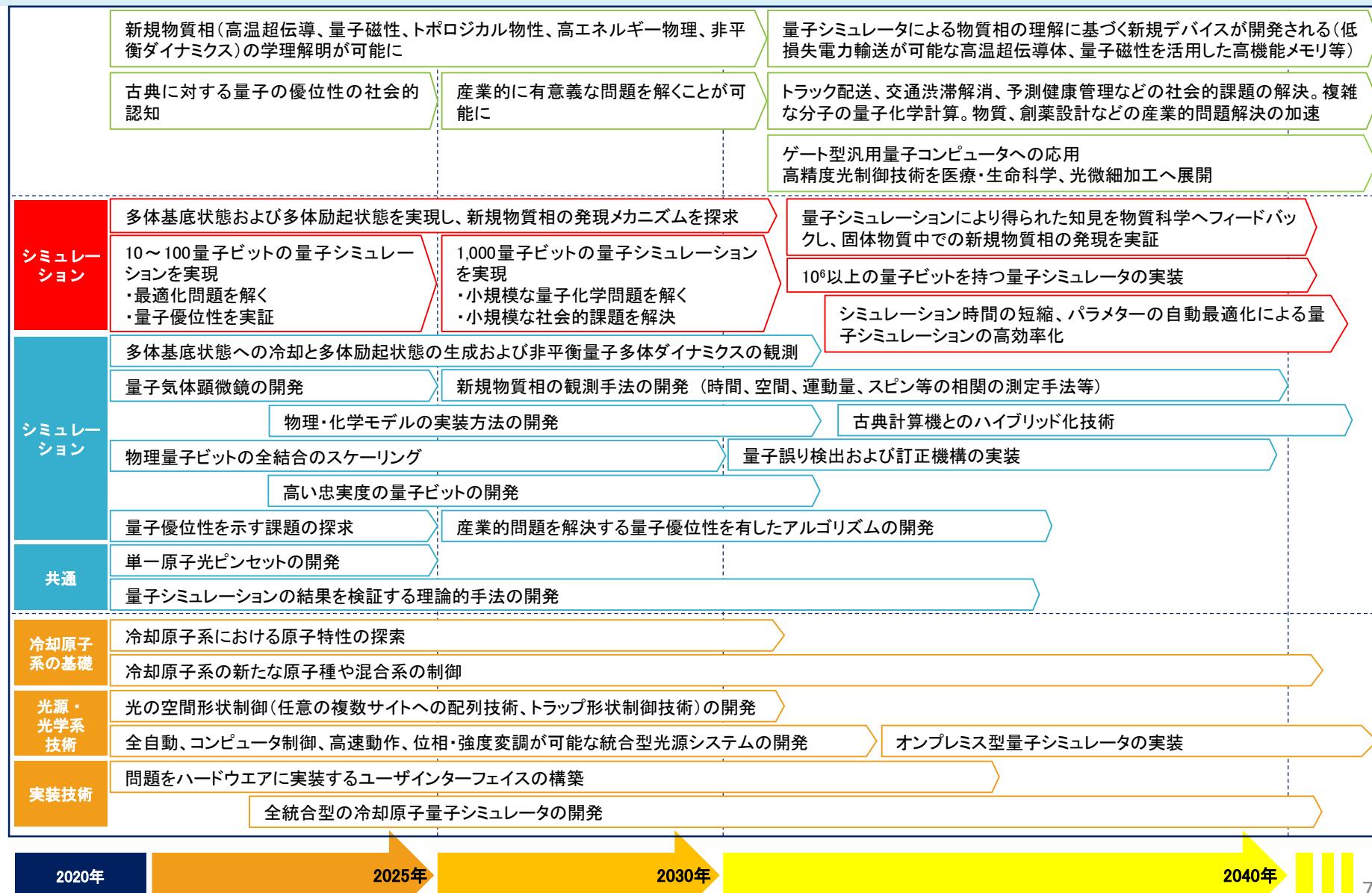
1. (1)④量子シミュレーション(冷却原子)

- 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

技術の進展

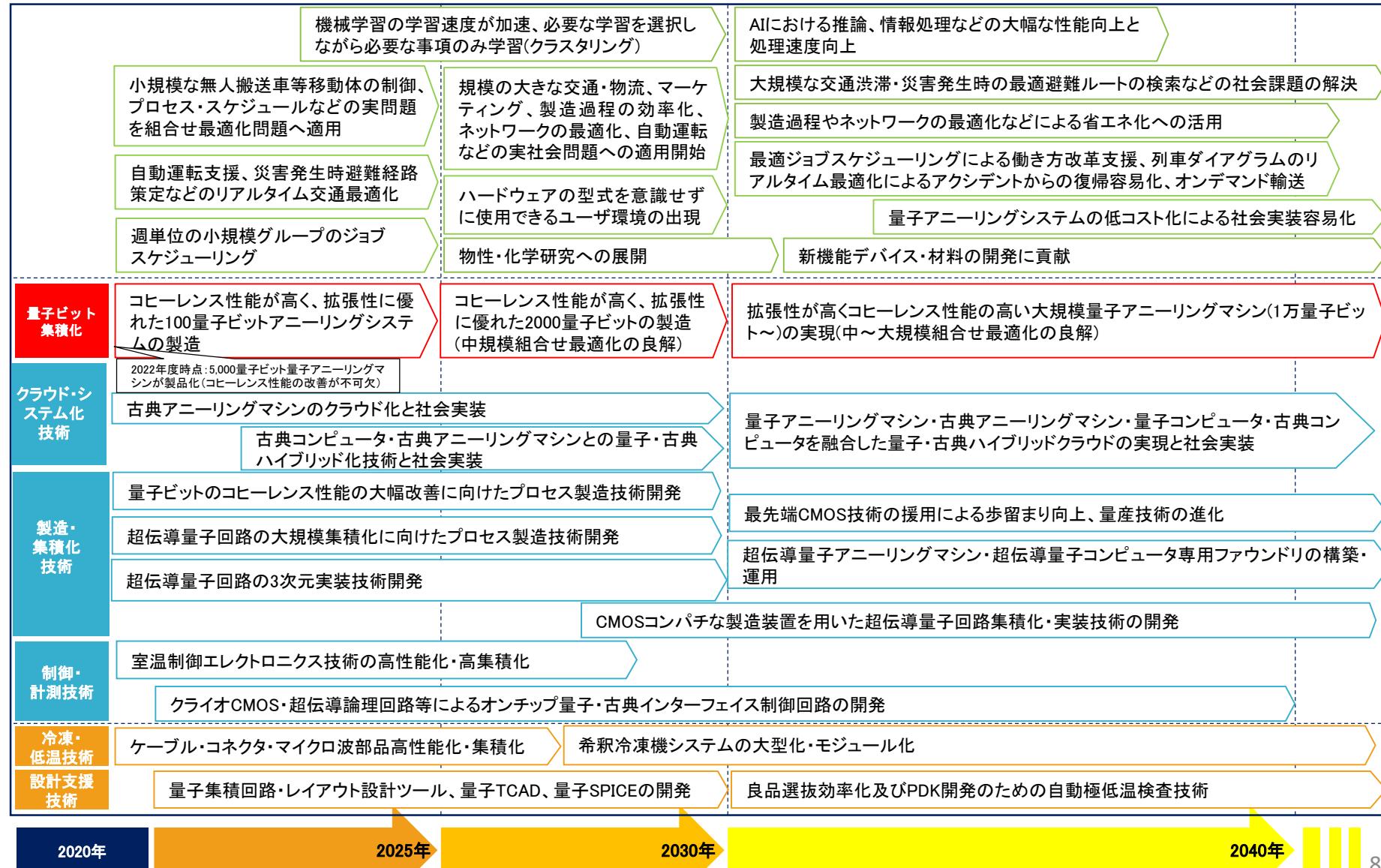
本技術を支える周辺技術の進展



1. (1)⑤量子アニーリングマシン(超伝導量子ビット)

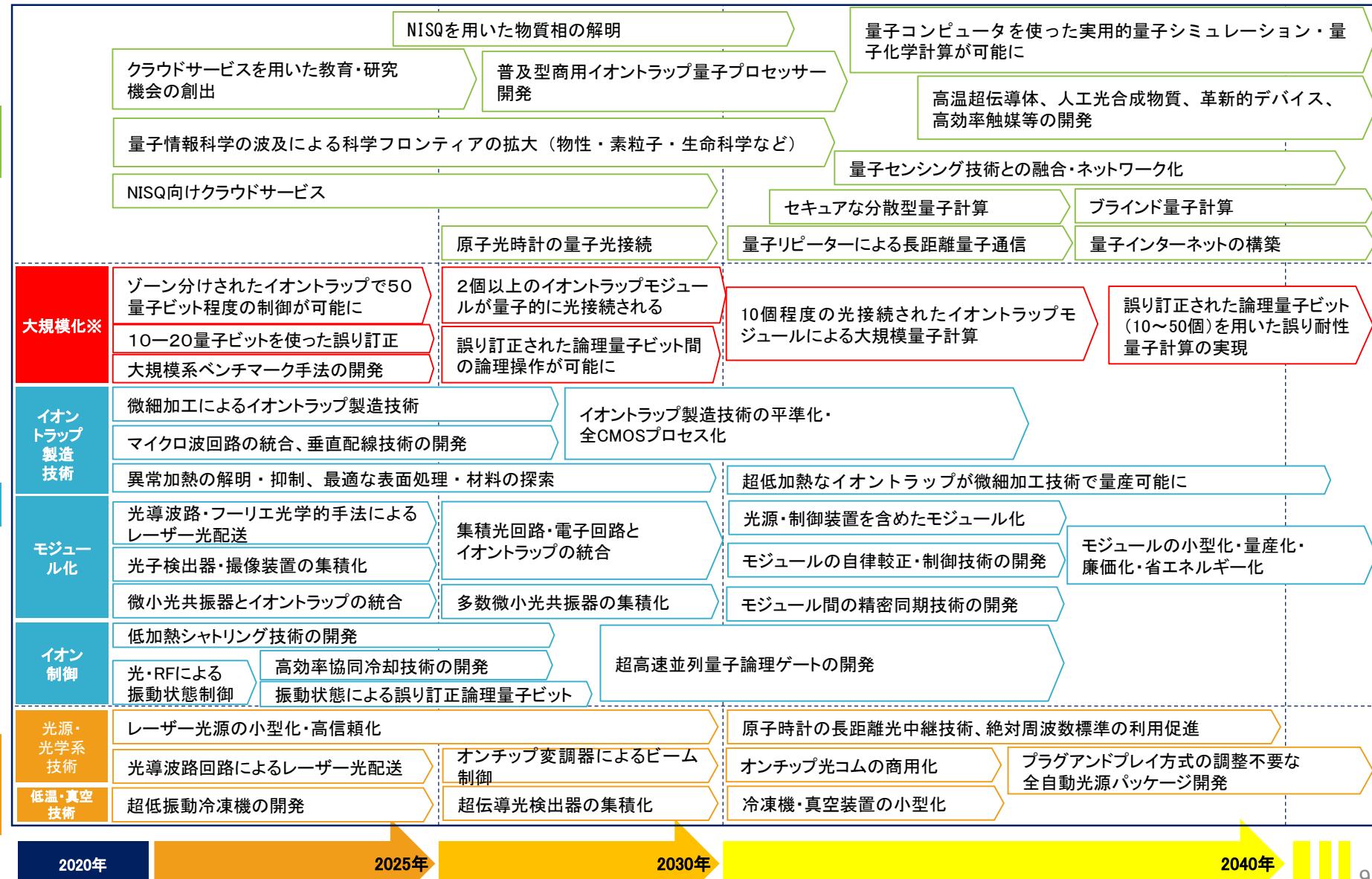
- 2030年以降、高いコヒーレンス性能の1万量子ビット級の量子アニーリングマシンの実用化により、物流・交通流最適化、金融、機械学習、レコメンデーション等のリアルタイム性向上
- 低温エレクトロニクス及び3次元実装技術の開発により、量子アニーリングマシンの大規模集積化を進める
- 長期的には、量子コンピュータ及び古典コンピュータとのハイブリッドクラウド化による社会実装を追求していく

経済・社会インパクト



1. (1)⑥量子コンピュータ(イオントラップ量子ビット)

- イオントラップモジュール間の光接続技術を確立し、大規模誤り耐性量子計算を実現
- イオントラップ製造技術を確立、それをベースにしてイオントラップモジュール製造・制御技術を確立し、小型化・量産化を実現
- 量子計算の大規模化に必要なレーザー技術・低温技術・真空技術を発展させ、広い理学・工学分野研究領域、産業へ応用



※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. (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	量子ビット 集積化※	量子極限半導体技術の発展・派生技術の活用	クラウドコンピューティング型の利活用 材料開発・創薬・流体・構造解析・AI、最適化問題(金融・流通・交通・製造など)
		研究開発実施に伴う高度半導体技術人材の輩出	エッジコンピューティング型の利活用 生活に近い最適化問題(自動運転車制御など)
	量子ビット 集積化※	5~10量子ビットの集積が実現、教科書の量子演算のデモンストレーション	100量子ビット程度の集積が可能になり小規模な実用的演算が実現
		大規模集積化に適した量子ビット素子及び周辺要素の構造最適化	100万量子ビットに向けた連続的な集積度向上、量子誤り訂正機能を搭載した実用的量子コンピュータの実現
		製造プロセスに求められる要件の明確化	量子ビットの集積度向上と連動した量子ビット素子及び周辺要素の特性改善
	製造技術	製造プロセス技術の探求的研究開発	量子極限精度の加工を実現するフロントエンドプロセス技術・装置・材料の開発(リソグラフィ・エッチング・レジストなど)
		高温量子ビット技術(1K)の開発	マイクロ波帯高周波に対応した量子回路と制御回路とを接続するバックエンドプロセス(配線)技術の開発
	極低温 回路 技術	低温(<100mK)量子ビット技術の開発	1K以上で動作する高温量子ビット技術の開発
		クライオCMOS素子の動作原理解明	低ノイズ・低消費電力を実現するクライオCMOS素子・回路の開発
		クライオCMOS制御回路設計手法の探求・初期的簡易制御回路の実現	100~1000量子ビット程度の制御を実現するクライオCMOS回路の実現、量子ビットとの連絡動作の実現 量子ビットの集積度向上と連動した制御回路の継続的研究開発(対象ビット数増加を実現する消費電力の削減)
本技術を支 える周辺技 術の進展	システム 化技術	ユニバーサル量子ゲートセットの確定	命令セット・マイクロアーキテクチャの開発、量子ビットの集積度向上と連動した継続的改善
		最適なアーキテクチャの検討・初期的試作機による試験的運用	
		希釈冷凍機内の高密度・スケーラブルワイヤリング技術の開発	
		高放熱・高密度チップパッケージ技術(アクティブインターポーラー含)	超高密度実装
	冷凍・ 低温技術	量子誤り対応向けエレクトロニクス技術の開発(希釈冷凍機へ実装)	
		量子ビット制御LSIの開発(高周波、任意波形発生)	量子ビット制御LSIの低電力・多チャンネル化技術の開発
		量子ビットアレイ化技術の開発	量子インターフェクトによる量子ビットアレイ間通信技術の開発
	設計支援 技術	量子ビットアレイ化へのCMOS回路混載技術の開発	
		²⁸ Siベースのシリコン基板の低コスト化技術の開発	
	評価技術	ケーブル・コネクタ・部品小型集積化・低温動作	高温シリコン量子ビット(>1K)向け冷却機技術の開発
		量子ビット素子シミュレーション技術の開発	素子・プロセス一体型シミュレーション技術の開発・活用(量子版TCAD)
		クライオCMOS素子モデリング技術の開発・標準化	量子ビット素子・クライオCMOS集積回路の一体設計技術の開発・活用
		極低温オートローバー測定装置の開発(セミオート含む)	
		量子ビットの簡易評価システムの開発(量子版パラメータアナライザ)	量子演算回路の特性を評価する技術の開発
		極低温電気特性評価技術の確立(ノイズ・容量など)	故障解析技術・信頼性評価技術の開発

2020年

2025年

2030年

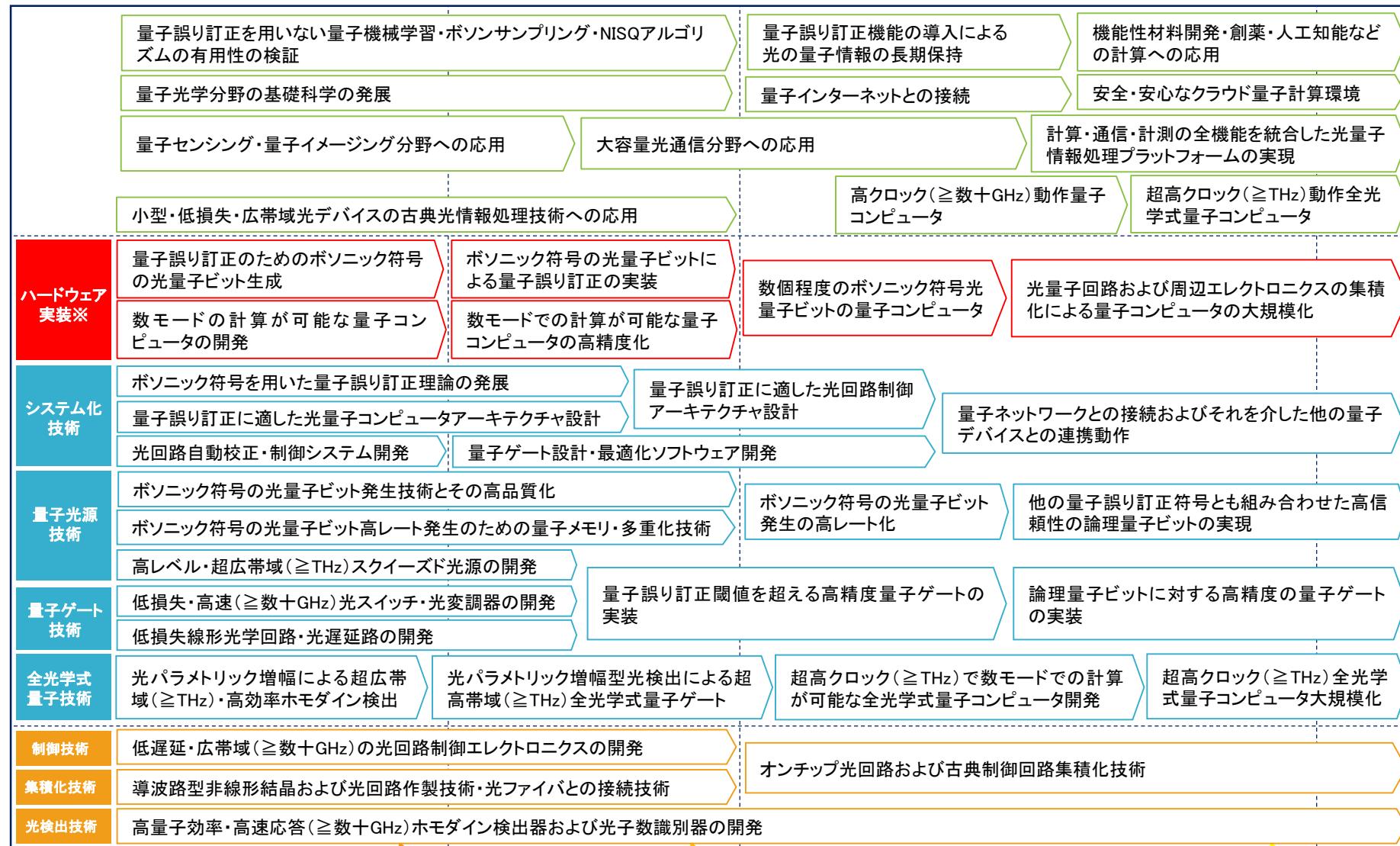
2040年

10

※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. (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

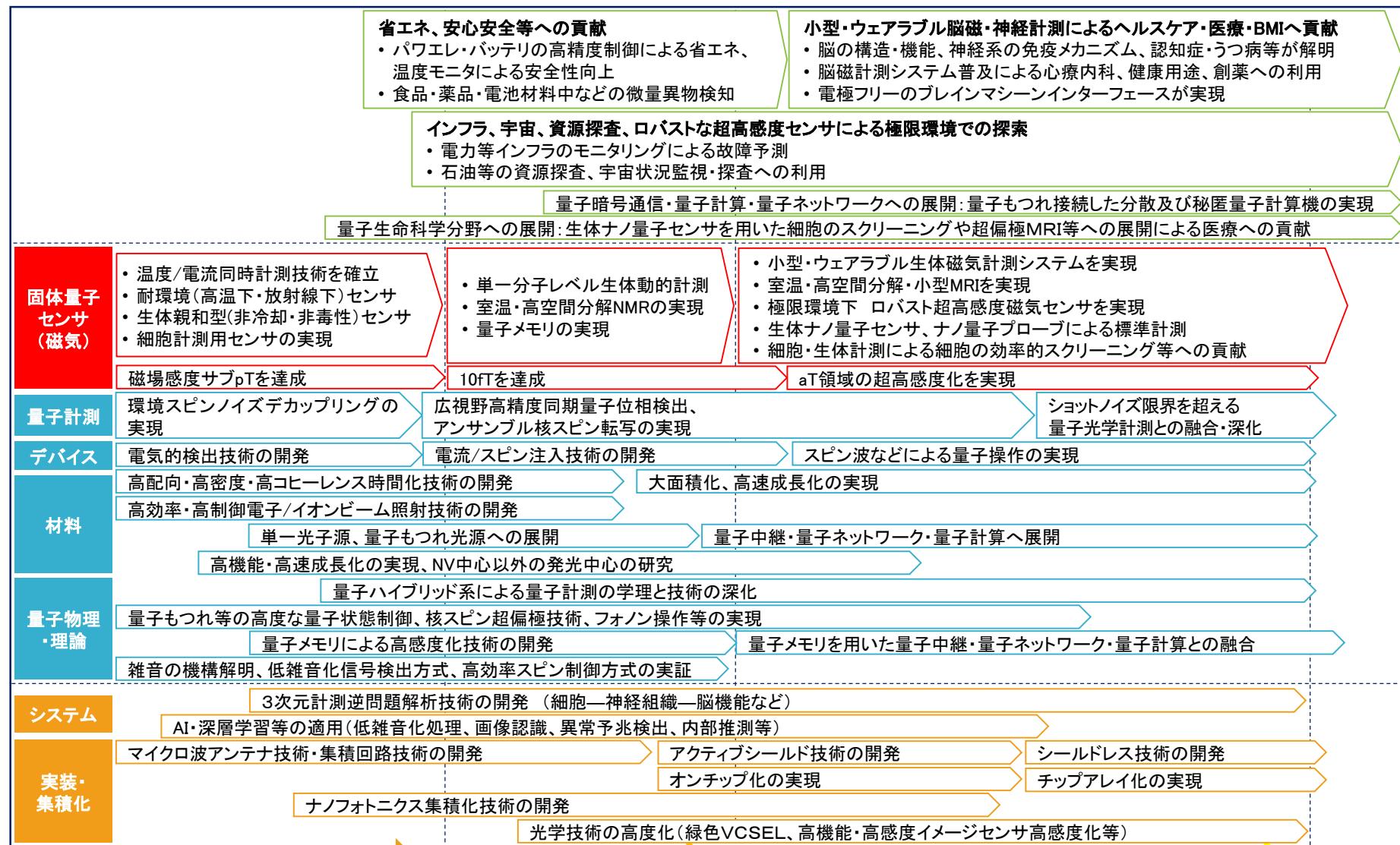


※国際競争の状況を踏まえながら、世界水準と同程度の量子ビット等の実現を目指していく。

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



本技術を支える周辺技術の進展

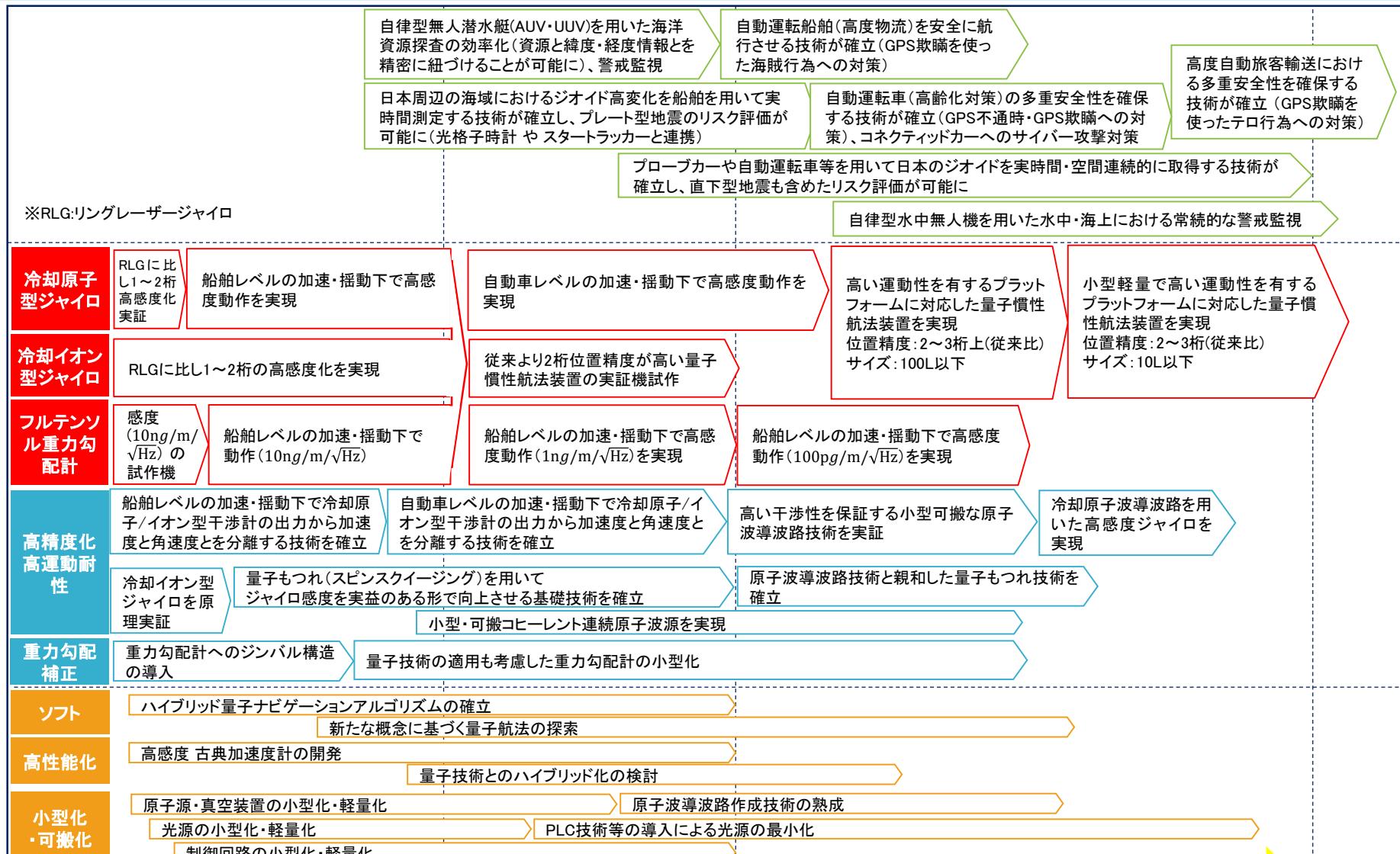
1. (2) ⑩量子慣性センサ

- 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



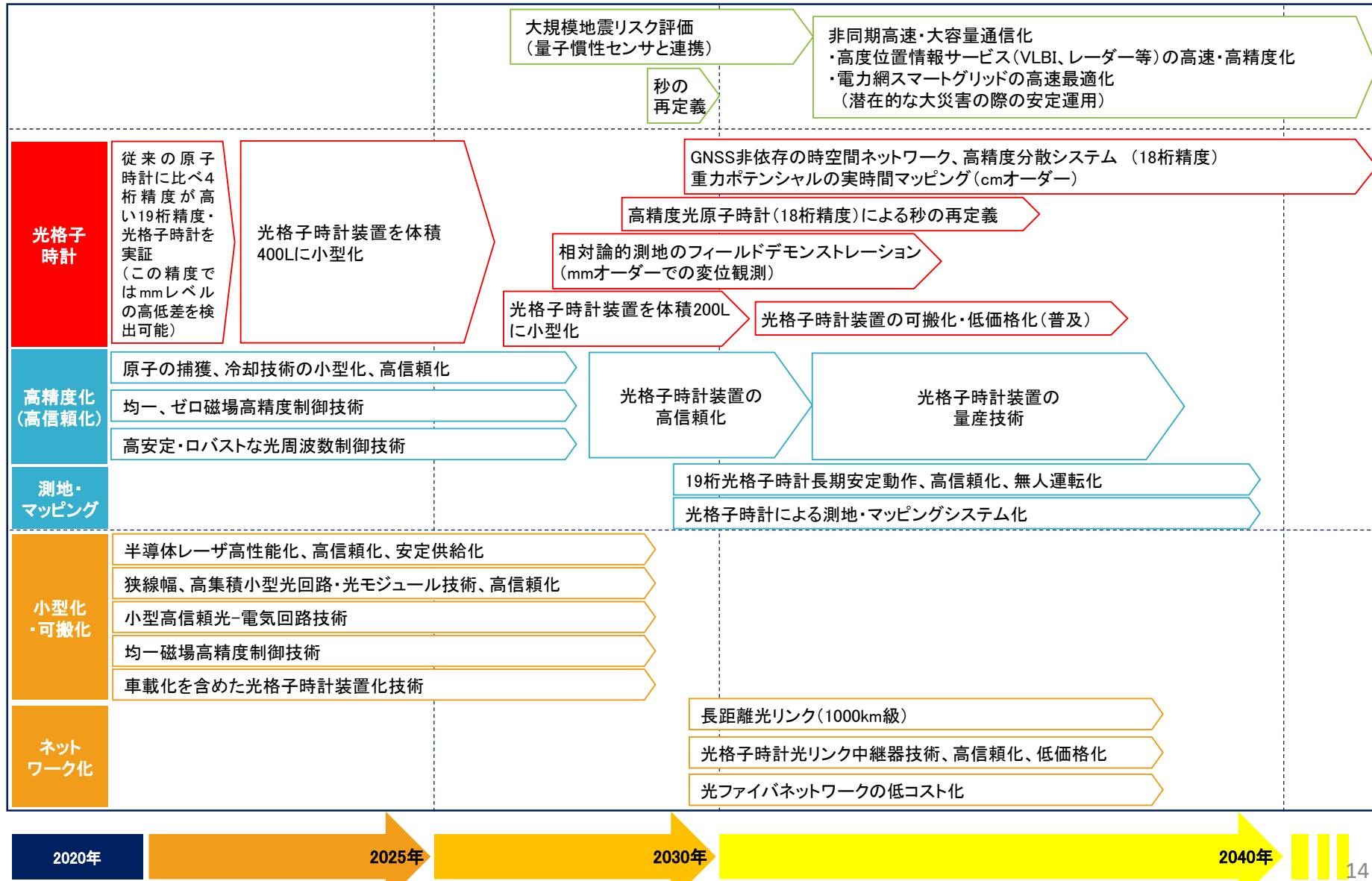
1. (2)⑪光格子時計

- 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

技術の進展

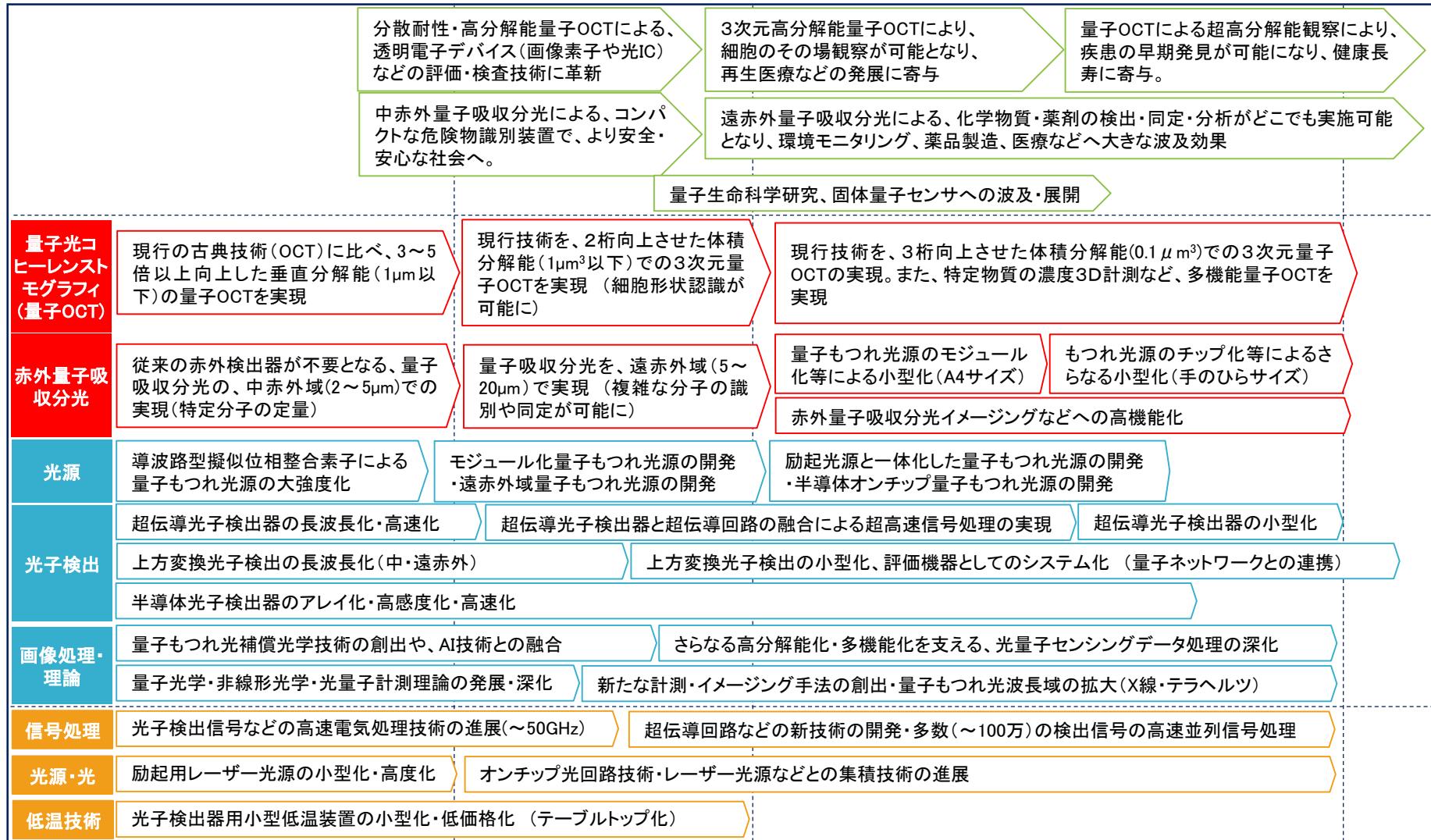
本技術を支える周辺技術の進展



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



2020年

2025年

2030年

2040年

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・スピンドル流センサ)

- 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
- スピンドル流センサ：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ドル流センサが実現
- 強磁性トンネル接合作製技術の向上、スピンドル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

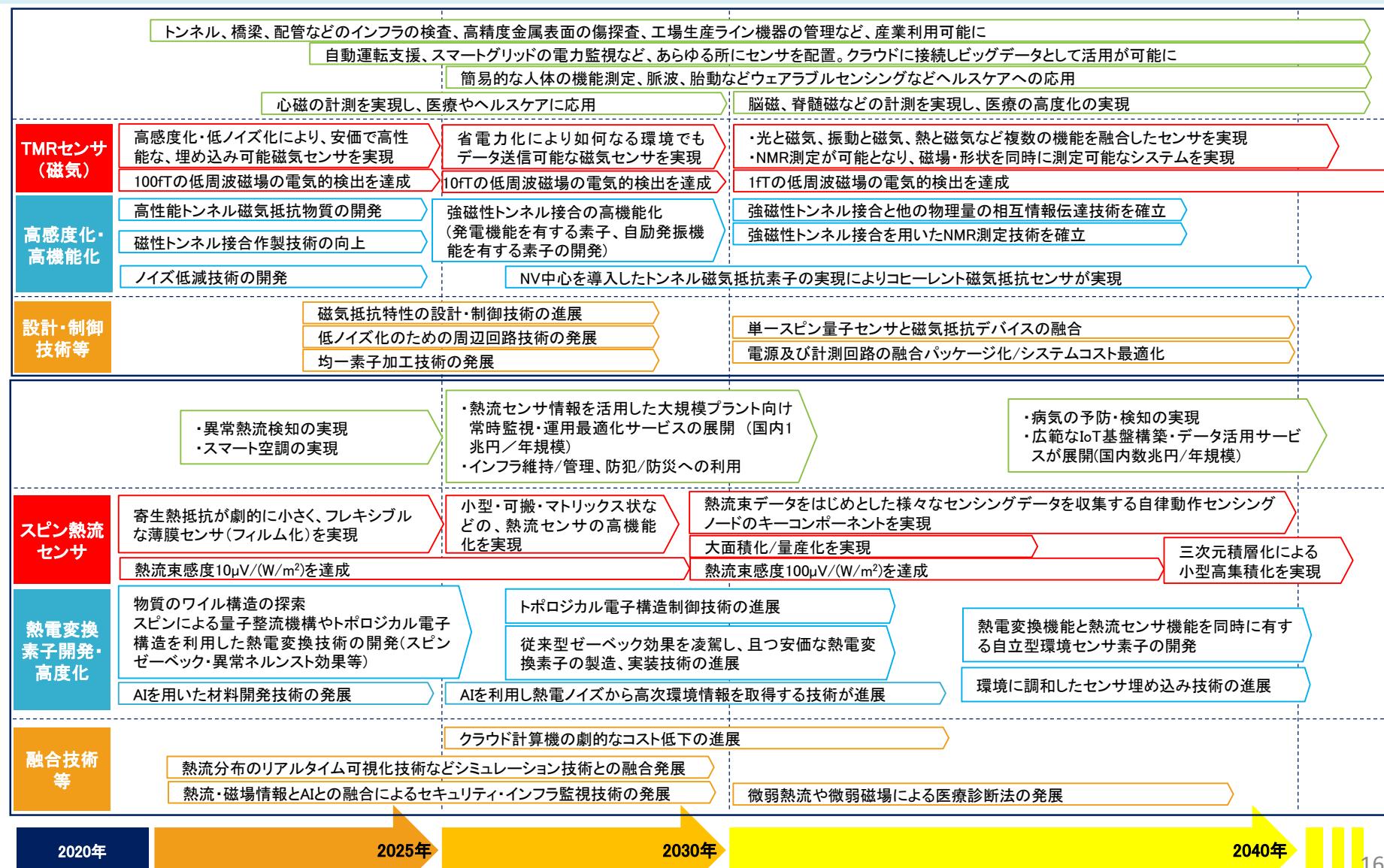
技術の進展

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

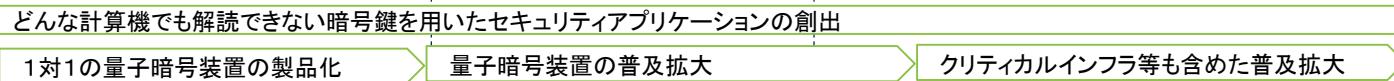
本技術を支える周辺技術の進展



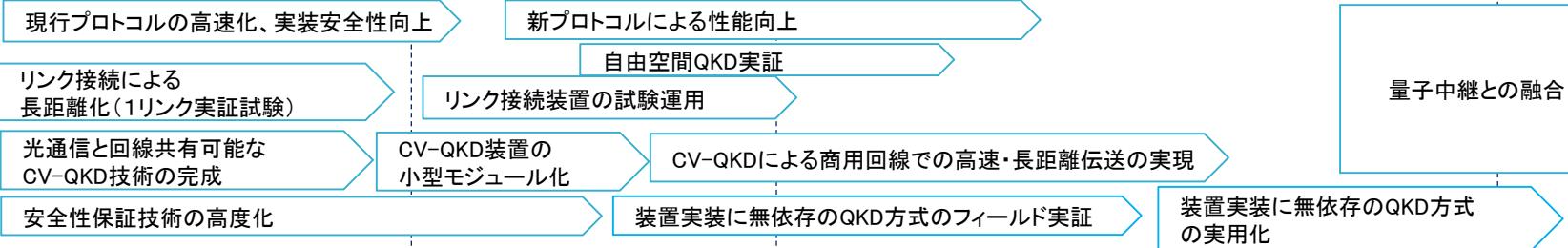
1. (3)⑯量子通信・暗号リンク技術

- 量子暗号装置の商品化によって、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



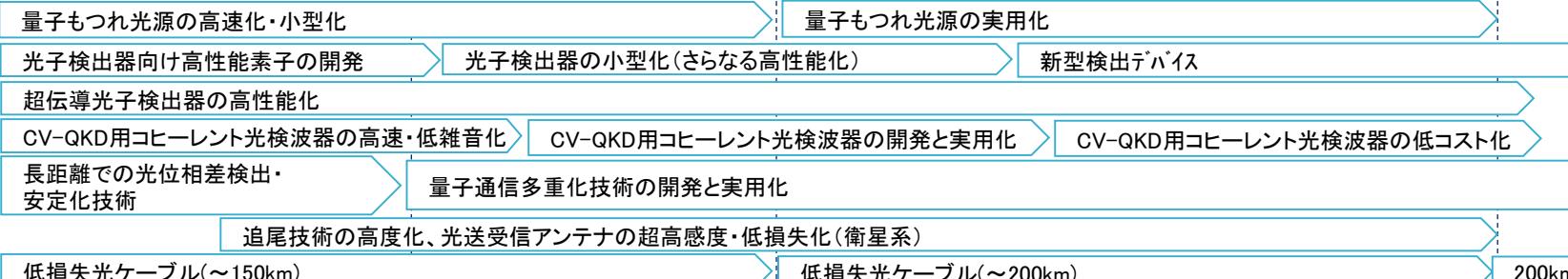
地上系 リンク



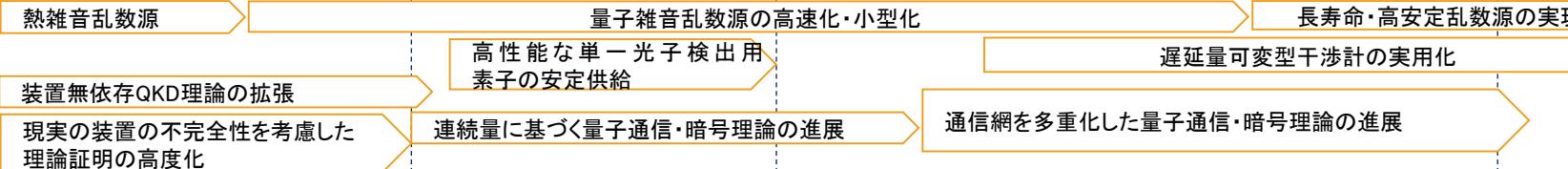
衛星系 リンク



量子通 信デバ イス



本技術を支 える周辺技 術の進展



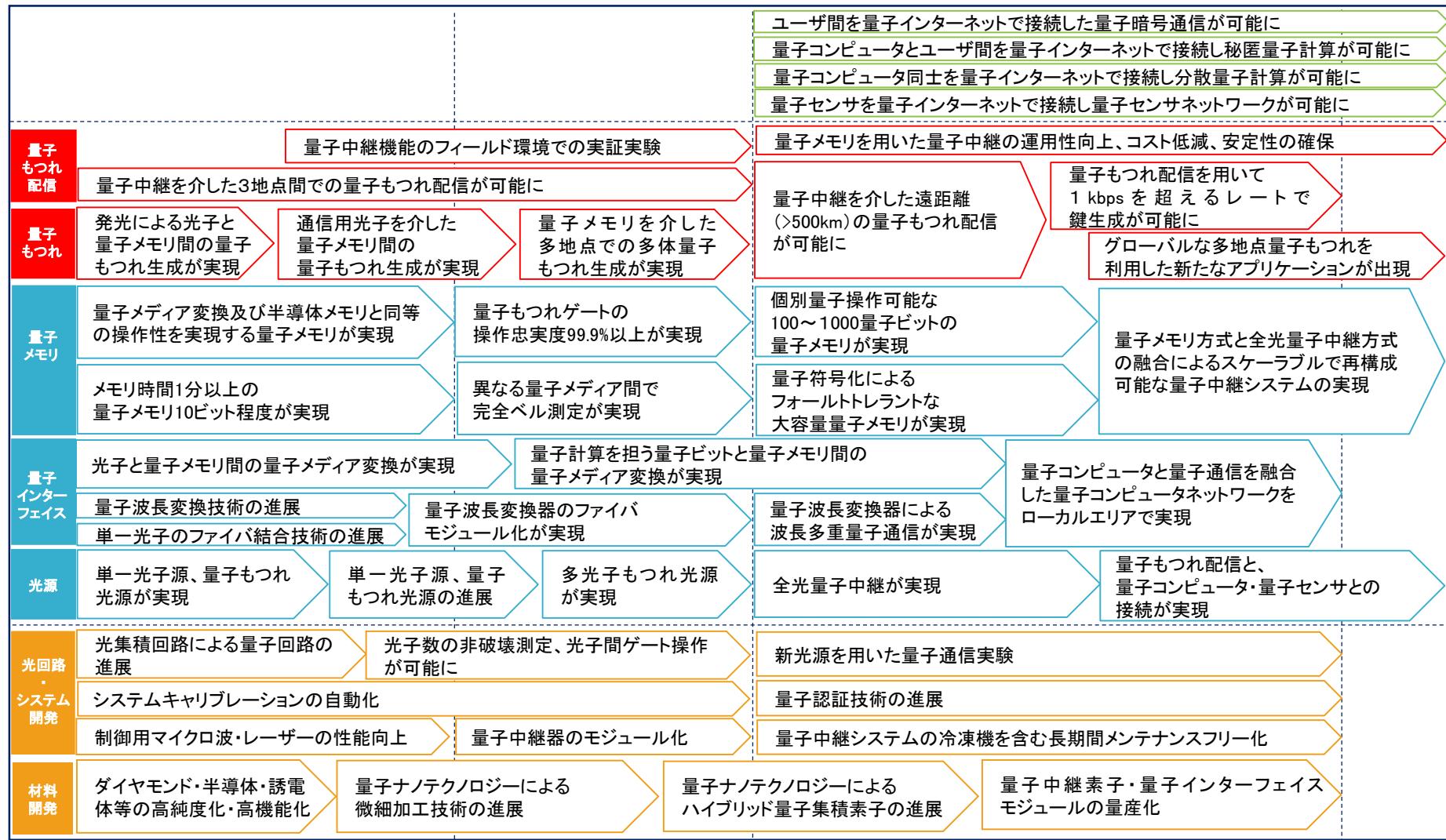
1. (3)⑯量子中継技術(量子メモリ・量子もつれ等)

- 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

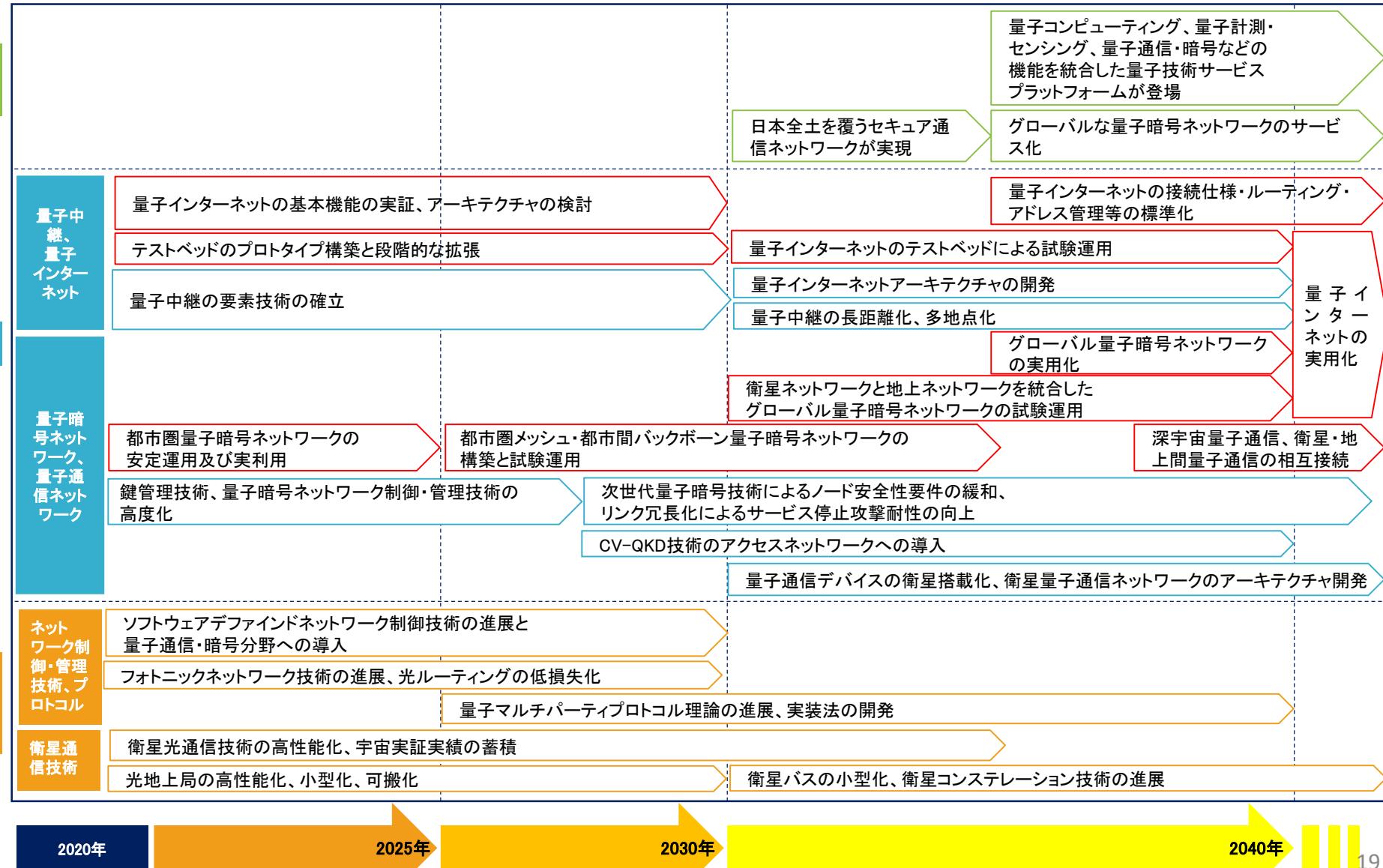
本技術を支 える周辺技 術の進展



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

経済・社会 インパクト



2. 融合領域ロードマップ

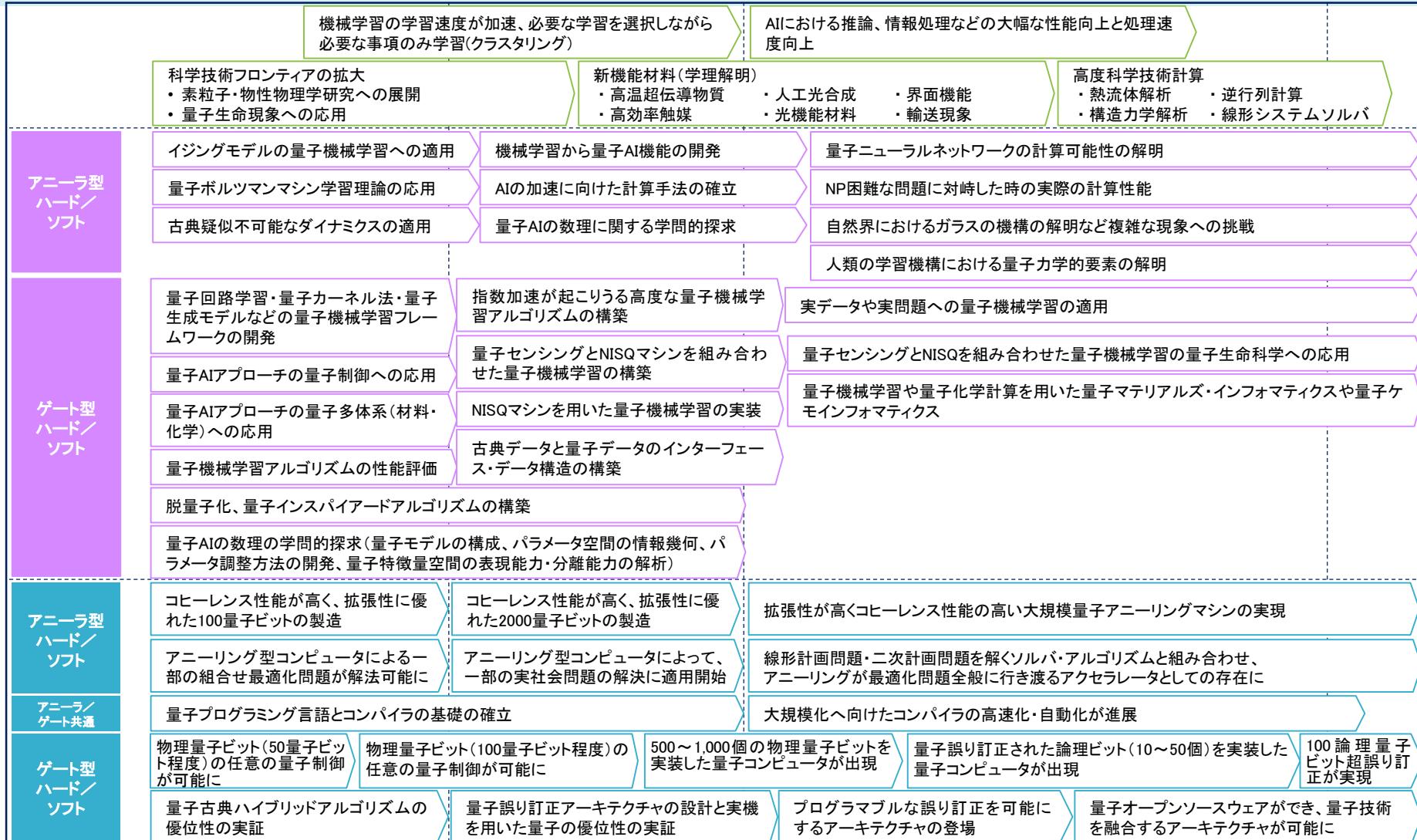
2. (2)①量子AI技術

- 将来的なニューラルネットや人類の学習メカニズムにおける量子力学的因素の解明、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

21

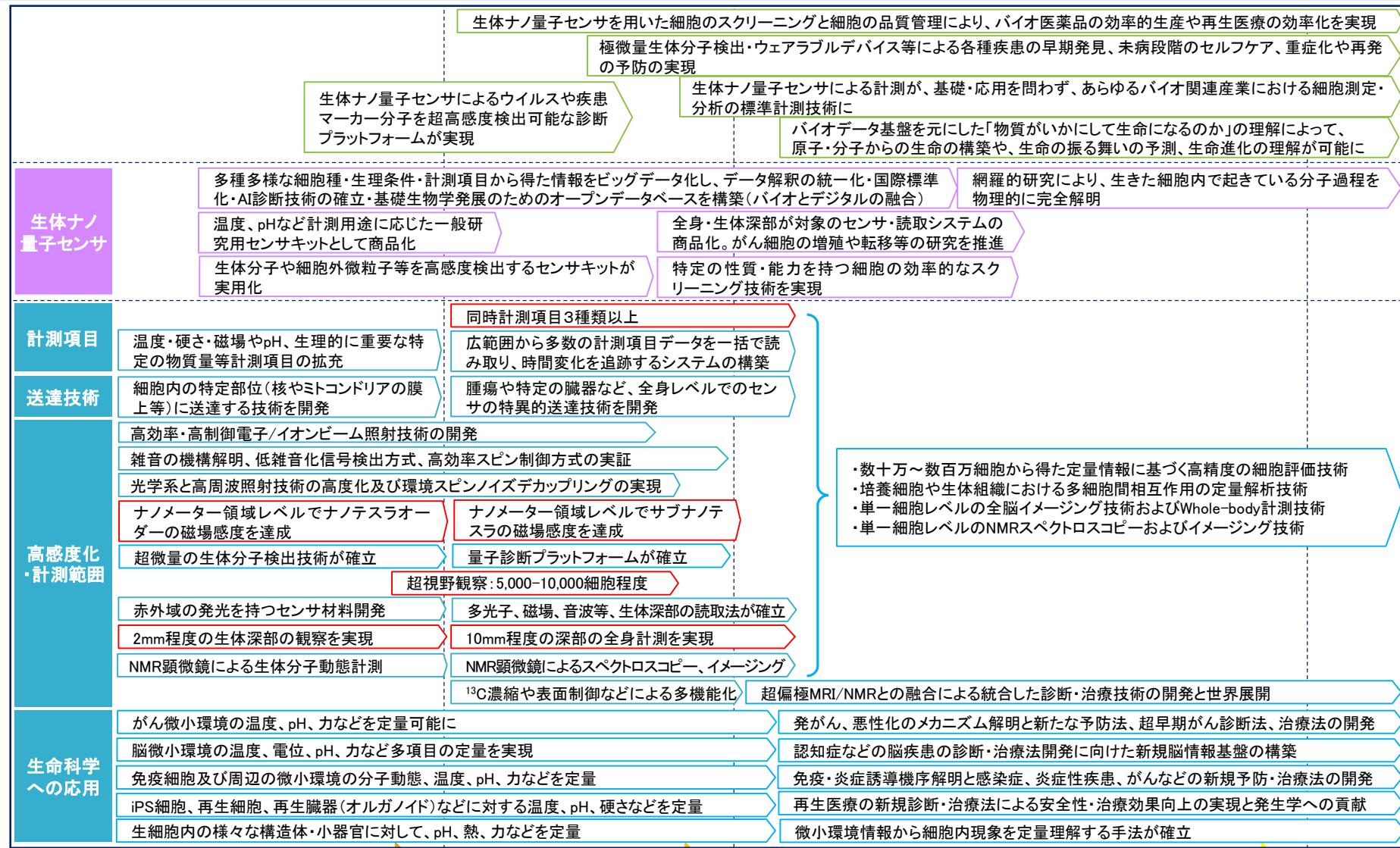
2. (2)②量子生命科学(生体ナノ量子センサ)

- 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



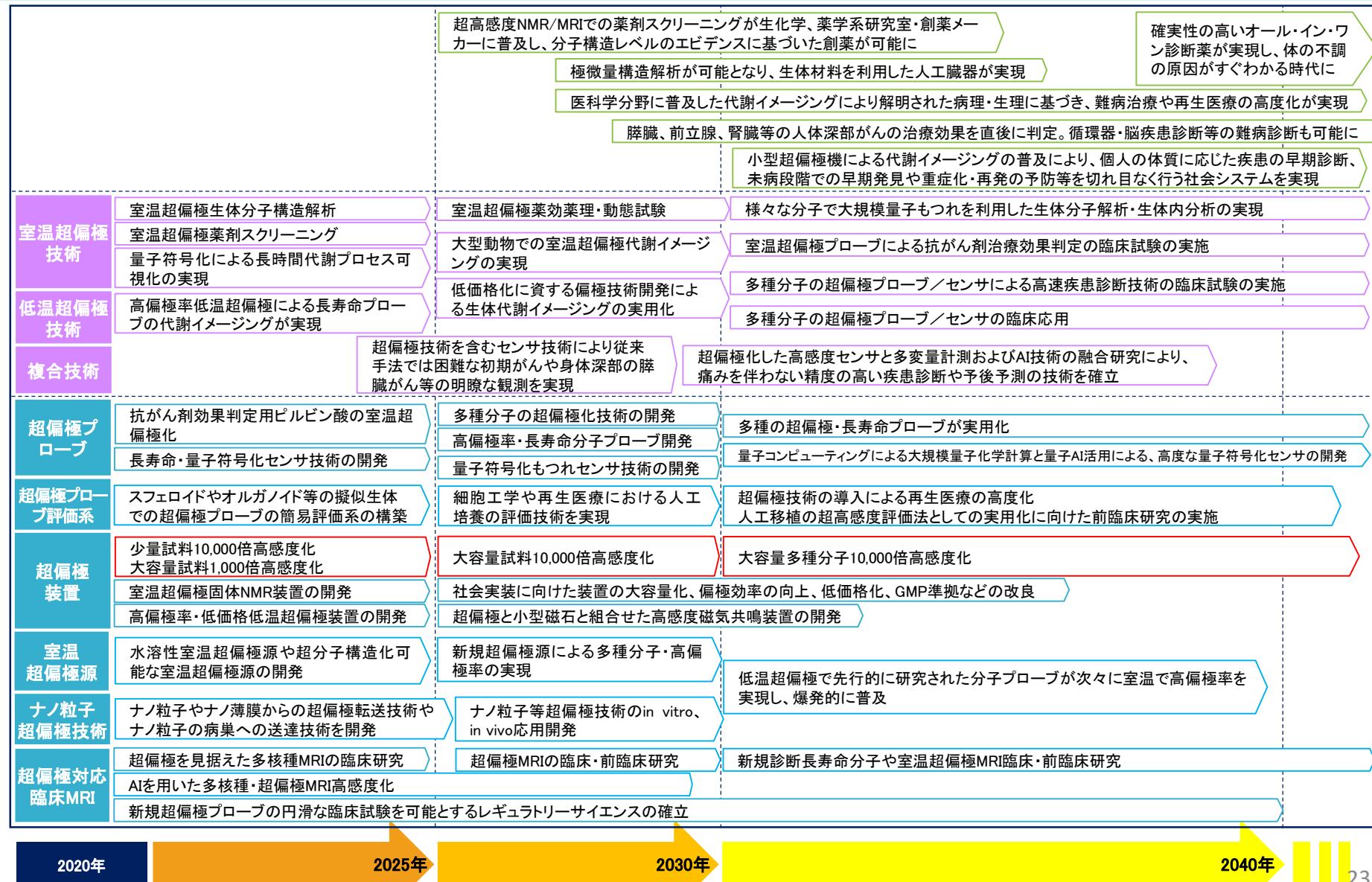
2. (2)③量子生命科学（量子技術を用いた超高感度MRI/NMR）

- 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



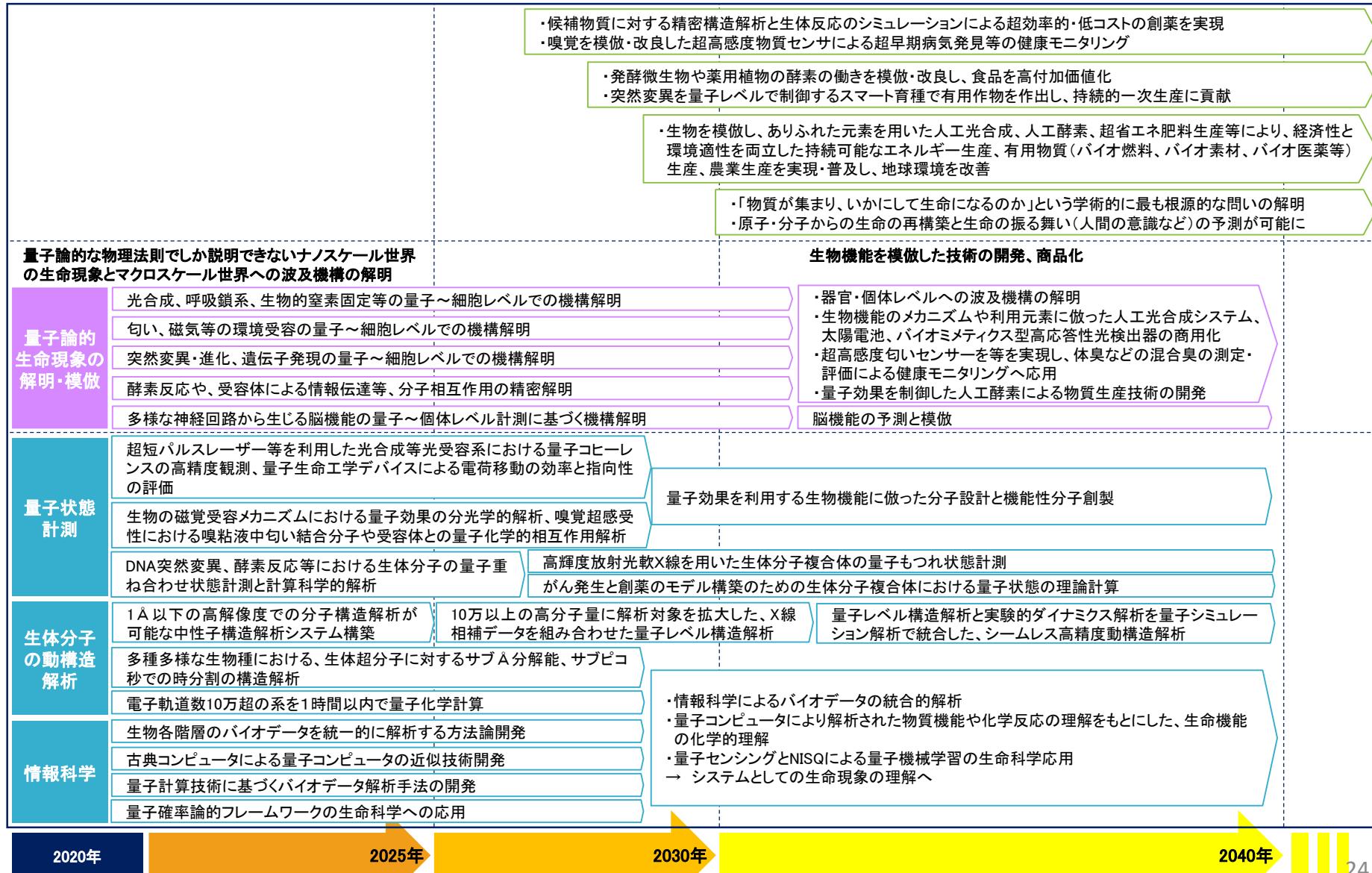
2. (2)④量子生命科学（量子論的生命現象の解明・模倣）

- 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

領域の進展

本領域を支える技術の進展



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

