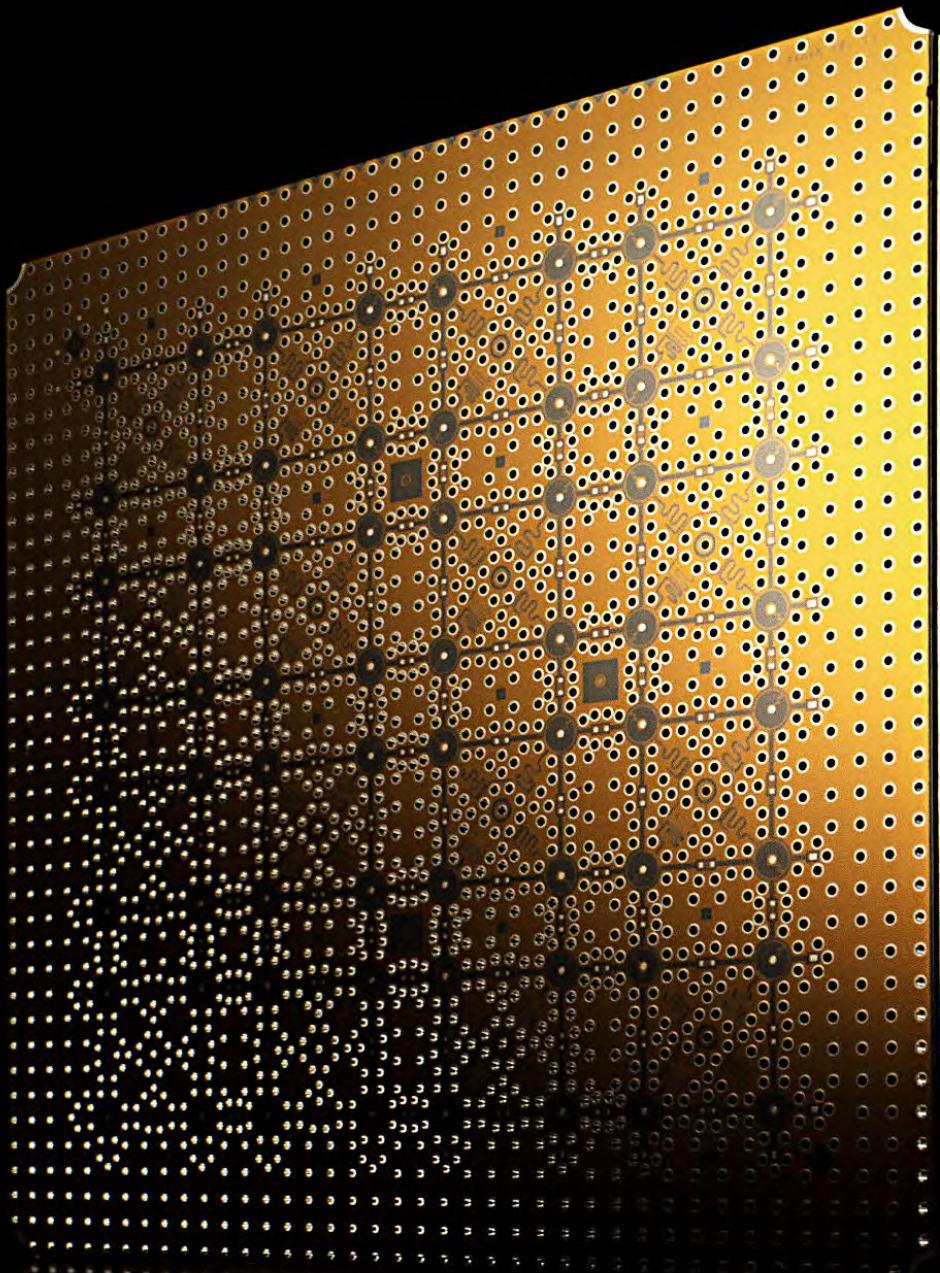


量子未来産業創出戦略



令和 5 年 4 月 14 日
統合イノベーション戦略推進会議

目次

1. はじめに	1
2. 本報告書の位置づけ	3
3. 目指すべき未来の産業の方向性	4
4. 実用化・産業化の取組を進める上での3つの視点	7
5. 産業上の主な課題や基本的対応方針	9
6. 取組の方向性	13
(1) 量子コンピュータ（ソフトウェア、利用環境整備等）	13
(2) 量子コンピュータ（ハード、基盤技術等）	17
(3) 量子セキュリティ・ネットワーク	21
(4) 量子計測・センシング／量子マテリアル	24
(5) イノベーション基盤	27
7. さいごに	33

表紙の写真：量子コンピュータチップ（理化学研究所提供）

1. はじめに

- ✓ 「量子未来社会ビジョン」（令和4年4月22日 統合イノベーション戦略推進会議）においては、量子技術の利活用により持続可能な社会・経済・環境を目指していくビジョンを示し、3つの目標（2030年に、国内の量子技術の利用者を1,000万人に、量子技術による生産額を50兆円規模に、未来市場を切り拓く量子ユニコーンベンチャー企業を創出）を掲げている。
- ✓ 本目標の実現のためには、量子技術の実用化・産業化に取り組み、量子技術を生産性向上、新産業創造、社会課題解決等の価値の創出につなげていくことが重要である。特に、目標に掲げる利用者、生産額の実現を図っていくためには、多様な分野の産業が、自社の事業・サービスに量子技術を活用し、裾野が広い市場を形成していくことが重要となる。
- ✓ 多様な分野の産業における量子技術の活用を促進していくためには、各産業にとって価値のあるユースケースの創出に向けて取り組むことが重要である。例えば、産業分野（例、材料、化学、金融、健康・医療、製造、物流・交通、AI、情報通信等）や社会課題（例、環境、水、食料、エネルギー、まちづくり、防衛等）におけるユースケースが挙げられる。また、ユースケースの成果や価値について積極的に情報発信していくとともに、経営者等がその価値を理解して事業活動に量子技術を活用できる環境づくりも重要となる。さらには、多様な分野の産業が量子コンピュータ等を利活用できる環境づくりも重要となる。
- ✓ 量子技術の利活用によって創出される価値市場は、将来、巨大な市場規模が見込まれることから、海外では官民の投資が活発化し、民間企業が積極的かつ迅速にグローバル展開するなど国際競争が激化している。さらには、高度な技術力を必要とする産業であることから、民間企業が大学・研究機関等と密接に連携してビジネスを展開するケースが多く、基礎研究と産業応用が従来よりもさらに近接しつつある領域と言える。
- ✓ このため、実用化・産業化に当たっては、产学研が一体となり、基礎研究と同時並行で、早期の段階から将来のビジネス展開も戦略的に検討しながら、グローバルな連携・展開も見据えて、これまで以上に取組を加速していくことが重要である。
- ✓ 量子技術によって新しい価値が生まれる新興市場では、これまでにない新たな事業・サービスを開拓するスタートアップ／ベンチャー企業も重要なプレイヤーとなり得る。一方で、量子技術の多くは実用化・産業化までに長期的な投資を必要とすることから、長期の投資を必要とする量子技術分野の市場の特徴を踏まえながら、長期的な視点でスタートアップ等への投資や人材を惹きつけて、ベンチャーエコシステムを形成していくことが重要である。
- ✓ 将来、AI技術、Beyond5G、半導体等の技術革新や市場が目まぐるしく変化する中で、これらと量子技術を組み合わせながら社会経済を発展させていく

ことが期待される。さらには、SDGs、脱炭素社会など持続可能な社会経済の実現に向けた取組がこれまで以上に求められ、量子技術が大きく貢献していくことも期待される。量子技術の実用化・産業化に当たっては、このような技術革新や経済社会の将来の変化に対して柔軟に対応していく視点も重要となる。

- ✓ これらを踏まえ、量子未来社会ビジョンで掲げられた目標を実現していくため、産学官の連携の下、量子技術の実用化・産業化に向けて目指すべき方針や重点的・優先的に取り組むべき具体的な取組を示す。

2. 本報告書の位置づけ

量子技術の研究開発や周辺領域を主とする「量子技術イノベーション戦略」（令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議）（いわば“量子技術の研究開発戦略”）に対して、量子未来社会ビジョンは、我が国の産業の成長機会の創出や社会課題の解決のために量子技術を活用し、社会全体のトランスフォーメーションを実現していくため、量子技術により目指すべき未来社会ビジョンやその実現に向けた戦略、いわば“量子技術による社会変革に向けた戦略”として策定された。

本報告書は、量子未来社会ビジョンで掲げられた目標を実現していくため、产学研官の連携の下、量子技術の実用化・産業化に向けて目指すべき方針や、当面の間、重点的・優先的に取り組むべき具体的な取組を示した戦略、いわば“量子技術の実用化・産業化に向けた方針や実行計画を示した戦略”として策定するものである。

3. 目指すべき未来の産業の方向性

(1) 多様な産業（ソフト・ハード）の参画・協働・共創

(i) 多様なユーザの参画によるサービスの創出・展開

- ✓ 将来の量子産業¹の市場／バリューチェーンの大半は、サービス部門となることが見込まれる。このため、将来、様々な分野のサービスを提供するユーザ産業が量子技術分野に参画し、产学官の多様な関係者の協働・共創の下で、各分野において量子技術を活用した新たなサービスを創出・展開していくことが期待される。この結果として、サービスからハードに資金循環するモデルを形成していくことが期待される。
- ✓ また、ユーザ産業にとって、量子技術は、事業活動を進める上でのツールの一つに過ぎない。この視点で、経営者等が、他の技術と比較して量子技術を導入するメリットを十分に理解し、それぞれの事業活動に量子技術を生かして、生産性向上や新産業創出等を実現できるようにする環境づくりも期待される。
- ✓ さらに、このような量子技術を事業活動等に有効に活用している企業に対して、投資家が積極的に評価して投資していく仕組みづくりも重要である。

(ii) 補野が広い産業の参画・共創によるハードウェア・システム製造

- ✓ 量子コンピュータ等のハードウェア・システムを製造する際には、デバイス・部品・材料、エレクトロニクス、半導体、アーキテクチャ・システム、冷凍機、製造プロセス装置まで、中小企業を含めて補野が広い産業が参画・共創していくことが期待される。さらには、早期の段階からユーザとの共創もしながら、ユーザニーズをハードウェア・システムにフィードバックしていくことも重要である。
- ✓ また、材料・デバイス分野など我が国の産業が強みを生かせる分野や、戦略的に重要な技術分野（チョークポイント分野）において、グローバル市場を戦略的に獲得していくことも期待される。さらに、有志国の企業とのグローバルな連携をしつつ、強靭かつ安定的なサプライチェーンを構築していくことも期待される。
- ✓ 将来、ハードウェア・システム関連のビジネスについては、ソフトウェアやサービスと組み合わせたビジネス（クラウドによる計算リソース提供サービス、計算・ソリューション提供サービス等）から、ハード売り（オ

¹ 本報告書では、量子技術による製品・サービスを提供する産業、ユーザとして量子技術を利活用する産業、これらの利活用をサポートする産業など、量子技術の利活用によって価値を創出する補野が広い産業を指す。

ンプレミスなど量子コンピュータ提供、部品・コンポーネント製造、ファウンダリー、回路設計サービス、製造プロセス装置等)まで、様々なビジネスモデルの選択肢がある。

- ✓ 現時点では、黎明期の市場であるため技術方式やビジネスは定まっていないが、将来の進展状況を見据えながら、勝ち筋を最大限にすべく、いつでもピボットできるように柔軟(レジリエンス)かつ迅速(アジャイル)に対応していくことが重要である。さらに、各社が協力して、複数の技術方式に共通の部品・材料等を設定して製造する、あるいは汎用品と互換性のある部品・材料を採用するなど、事業リスク低減や安定的なサプライチェーン構築等に向けて戦略的に取り組むことも期待される。

(2) 多くの産業が量子技術にアクセスし、利活用できる環境

- ✓ 現時点では、量子コンピュータ等の量子技術を利用する場合には、専門的知識が必要となる、あるいはコンピュータ毎に開発環境が異なるなど、ユーザ企業にとってハードルが高い状況とも言える。
- ✓ このようなハードルを下げるためにも、ユーザにとって利便性の高い量子コンピュータ等の利用環境を提供する企業や、ユーザ企業の量子技術の利活用を支援するサービス(教育サービス、コンサルティング等)の発展が期待される。
- ✓ 将来は、誰もが意識することなく、量子技術を利用できるようにしていくことが重要である。このためにも、従来のユーザインターフェイスをなるべく維持しながら、ある計算課題に対してバックグラウンドで自動的に従来型(古典)技術と量子技術に振り分けて計算するなどユーザビリティのあるサービスの構築が期待される。
- ✓ また、全てを量子にするのではなく、従来型(古典)技術と量子技術の得意な能力を補完していく量子・古典ハイブリッドを構築・活用していく視点や、技術の進展状況に応じて、サービスの一部の従来技術を徐々に量子に置き換えるなどマイグレーション(システム移行)をしていく視点も重要である。

(3) スタートアップ/ベンチャー企業・新事業の創出・成長

- ✓ 量子技術分野の市場のような新興市場においてはスタートアップ/ベンチャー企業は重要なプレイヤーとなる。その迅速性・柔軟性を生かして、激変する市場に追従して、国内外の市場を獲得していくことが期待される。そして、将来、事業化の利益が次のビジネス開発やスタートアップ等の創出・育成に再投資されるベンチャーエコシステムが形成されることも期待される。
- ✓ スタートアップ企業等の成功のためには、研究者・技術者のみならず、デ

ィープテックを駆使してビジネスをデザイン・展開できる起業家・経営者の育成・確保も重要となる。さらには、長期的な視点で資金面のサポートをするディープテックに理解のある投資家の育成・確保も必要である。

- ✓ また、大企業等の既存企業においても、総合力や資本力も生かしながら強みを発揮し、新事業部門／カーブアウトベンチャーを立ち上げていくこと（イントレプレナー）が期待される。

（4）グローバル連携・展開

- ✓ 量子技術分野の市場は世界的にも投資が活発で、今後のグローバル市場の飛躍的な成長が見込まれる。将来の技術やビジネスが定まっておらず、いまだに勝者が決まっていない中、我が国の産業も今後の戦略次第ではグローバル市場を獲得できるチャンスは大いにある。
- ✓ このため、サービスや技術の面で水平・垂直ともに有志国の企業とも積極的に連携しつつ、グローバルに事業展開していくことが期待される。さらに、各サービスの特徴に応じて、欧米やアジア等においてサービス実証するなどして戦略的に海外展開をしていくことも期待される。
- ✓ また、グローバル市場を確保する上でも、標準化の獲得に向けて積極的な活動も重要となる。知的財産については、長期的な技術分野でもあることから権利化期間も見据えつつ、ノウハウも含めて権利化すべきものやしないものを峻別しながら、オープン・クローズ戦略を徹底していくことも期待される。

（5）産学官連携による産業化推進

- ✓ 量子産業においては、高度な技術を必要とするため、大学・研究所等の基礎研究の成果を生かして産業化するケースが多く、近年、基礎研究と産業応用が近接する動きが加速しつつある。
- ✓ このためにも、一般社団法人量子技術による新産業創出協議会（Q-STAR）や量子技術イノベーション拠点（QIH）が組織的に連携するなどして、ビジョンや価値観を共有し、共同研究、人材交流、情報交換等のあらゆる面で産学官が連携する体制や仕組みを構築していくことが期待される。
- ✓ 国のプロジェクトにおいても、このような産学官が連携する体制づくりを行いながら、研究開発から産業応用までの取組の充実・強化を図っていく。

4. 実用化・産業化の取組を進める上での3つの視点

前章の目指すべき未来の産業の方向性や量子未来社会ビジョンの基本的考え方²も踏まえ、量子技術の実用化・産業化の取組を進める際には、以下の3つの視点を基本として取り組む。この際には、国際競争の激化等を踏まえ、これまで以上に加速（Acceleration）しながら取り組む。

■Collaboration 「多様な産業の量子技術分野への参画・協働・共創、グローバル連携・展開、産学官連携」

量子未来社会ビジョンの目標に掲げるようすに、量子技術の利用者、生産額の拡大を図っていくためには、幅広い産業界による量子技術分野への参画を得ながら、量子技術を様々な分野で活用して市場の裾野を広げていく視点が重要となる。

このためには、材料、化学、金融、健康・医療、製造、物流・交通、環境、農業、エネルギー、まちづくり、防衛、AI、情報通信等の多様な分野のユーザ企業による参画の下で、多様な企業が協働して新しい価値を創造・共創していくことが必須である。また、量子コンピュータ等を実社会へ実装していくためには、量子技術分野のみならず、従来型（古典）のデバイス・部品・材料、エレクトロニクス、半導体等の企業による参画（量子・古典ハイブリッド）も必須となる。

このような多様な企業の参画を促進するため、ユーザ企業にとって訴求力のある魅力的なユースケース（キラーアプリケーション）づくりに向けた支援とその効果の明確化や、多様なユーザ企業や従来型（古典）の技術領域の企業を含む多様な企業が参画・協働・共創できる仕組みを構築していくことが重要となる。

さらには、有志国の企業と水平・垂直ともにグローバルな連携も図りながら、安定的かつ強靭なサプライチェーンの構築や、グローバル市場の開拓を行っていくことも重要である。

また、基礎研究と産業応用がますます近接する中で、組織・個人レベルで、産学官連携を一層強化していくことも重要となる。

■Accessibility 「産業界に開かれた量子技術の利用環境の実現」

幅広い産業界による量子技術分野への参画を促していくためには、多様な分野のユーザ企業が量子技術を利用し、新たな価値を創造できる環境（量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子セキュリティ・ネットワーク等）を整備し

² 「量子技術を社会経済システム全体に取り込み、従来型（古典）技術システムとの融合により（ハイブリッド）、我が国の産業の成長機会の創出・社会課題の解決」、「最先端の量子技術の利活用促進（量子コンピュータ・通信等のテストベッド整備等）」、「量子技術を活用した新産業／スタートアップ企業の創出・活性化」

ていくことが必要である。

また、量子技術は一般の企業にとっては敷居が高く、未来の技術との意識が強いとの指摘もあることから、これらの企業が容易に量子技術を利活用できるようには必要な支援（利用支援・技術支援・教育支援等）を行っていくことも重要である。

さらに、様々な分野で量子技術を活用するに当たっては、既存技術に対する優位性・有効性（性能、コスト、利便性等）などの情報についても積極的に開示・提供していくことが重要である。

■Incubation 「積極的なスタートアップ／ベンチャー企業・新事業の創出支援」

量子技術分野の市場のような新興市場では、これまでにない事業・サービスを開拓するスタートアップ／ベンチャー企業も重要なプレイヤーとなり得る。

このため、長期的かつ安定的な投資を喚起して、市場開拓を後押しするなどして、新たな市場を切り拓くスタートアップ企業等を創出・支援するとともに、将来のベンチャーエコシステムを形成していくことも重要となる。さらには、既存企業からも新事業部門やカーブアウトベンチャー等を生み出していくことも重要となる。

我が国においても、ソフト・ハードとともにスタートアップ／ベンチャー企業が出現しており、金融機関等とのマッチング、若手起業人材育成、ビジネスアイデア発掘・創出、海外展開支援など、産学官の緊密な連携の下で、それぞれのステージ・特徴に応じて、スタートアップ企業等を創出・支援する総合的なイノベーション基盤を形成していくことが重要である。さらには、海外からの投資促進やグローバル市場を見据えた、有志国を含むグローバルなエコシステムを形成していくことが重要である。

5. 産業上の主な課題や基本的対応方針

(1) 量子技術分野への参入のきっかけとなる優れたユースケースが少ない (課題)

- ✓ 量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子セキュリティ・ネットワークにおいては、量子技術の活用による効果的なユースケースが少ないのが実態である。
- ✓ 特に、ユーザ企業にとっては、量子技術が既存技術と比べて、性能、コスト、利便性も含めてどの程度便益があるのかについて関心があるが、技術が発展途上でもあるため、既存技術に対する優位性を明確に示すユースケースは少ない。
- ✓ さらに、量子技術の活用による効果（ユーザ企業にとっての経営視点等でのメリット）について、現状や将来の見通しも含めて、ユーザ企業が事業化判断に必要となる正確な情報が不足している。

(基本的対応方針)

- ✓ 将来の量子技術の発展も見据えて、市場の裾野を広げるべく様々なユーザ産業の参画を促進し、ユーザにとって訴求力のあるユースケースづくりに向けた支援や情報発信を積極的に行っていく。ユースケースづくりの際には、多様なユーザ企業やベンダー企業、大学・研究機関等が、情報交換・意見交換、人材交流をしながら共創をしていく体制づくりが必要となる。このため、協調・競争領域や各ユースケースの特徴も踏まえながら、産学官が一体となってユースケースづくりができる体制を構築する。
- ✓ さらに、性能のみならず、コスト、利便性等も含めて、既存技術に対する優位性・有効性なども含めて、経営視点等で量子技術の活用による効果に関して正確なベンチマークを設定し、広く情報提供を行っていく。この際には、量子コンピュータ等の技術が発展途上であることも含めて、現状や将来の見通しも含めて、ユーザにとって事業化判断に必要となるTRL (Technology Readiness Level)、BRL (Business Readiness Level) といった情報も提供していく。
- ✓ また、ユーザにとっては、量子技術はあくまで手段の一つであり、特別視はしていない。そのため、従来型（古典）技術システムに量子技術を取り込み（従来型（古典）技術から量子技術へのマイグレーションも含む）、量子・古典ハイブリッドシステムにおいてユースケースづくりをすすめるとともに、既存技術とのベンチマーク比較を実施して、量子技術の活用による効果を明確にする視点も重要である。

(2) 量子技術に対する技術的なハードルが高い

(課題)

- ✓ 量子技術の事業化・産業化に当たっては高度な知識・技術を必要とする場合が多く、量子技術分野以外の企業からは参入障壁（ハードル）が高いと捉えられる傾向にある。
- ✓ ソフト面については、多様な分野のユーザ企業の参画が期待されるが、多くの企業では、量子技術に利活用できる設備等の環境がなく、量子技術に関する知見・人材も有していない。
- ✓ ハード面についても、従来型（古典）のデバイス・部品・材料、エレクトロニクス等のステイクホルダーの参画が必須であるが、どのような領域で参入機会や市場性があるかについて情報が不足している場合が多い。

(基本的対応方針)

- ✓ 幅広い産業界の量子技術分野への参画を促していくため、多様な分野のユーザ企業が量子技術を利活用できる環境（量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子セキュリティ・ネットワークなど）を整備する。
- ✓ また、量子技術分野以外の産業においては、量子技術に関する知見・人材を有していない場合が多いことから、量子技術分野の研究者・技術者等との交流や協働の機会の拡大等も通じながら情報・技術・人材の面での参画支援を行っていくとともに、教育プログラムの提供も積極的に行っていく。
- ✓ 将来の量子技術の実用化・産業化に向けて、必要となる従来型（古典）のデバイス・部品・材料、エレクトロニクス、情報通信技術等を整理・明確化するなどして、どのような領域で新規参入機会や市場性があるかについて情報提供をしていく。

(3) 将来の技術・市場が不透明で事業リスクが高い

(課題)

- ✓ 将来、量子技術分野の産業は、巨大な市場が見込まれるもの、現時点では技術・産業の勝ち筋が決まっておらず、将来の技術・市場の見通しを立て難く、さらには長期的投資も必要とすることから、現状では他分野の産業と比べて事業リスクが高い領域であると言える。
- ✓ 特に、我が国の産業界では、このような長期的投資を必要とする分野に対して投資が低調といった傾向がある。
- ✓ さらには、将来の技術・市場の見通しが立て難い中で、単独企業において不透明性の高い基礎研究や巨額の製造設備への投資をしていくことはリスクが高いとの意見もある。

(基本的対応方針)

- ✓ このような事業リスクを少しでも低減するため、官民が連携しながら、複数の企業が共有できる試作・試験・評価設備を整備し、官民のリソースを効果的・効率的に活用できる仕組みを構築していく。
- ✓ また、共創領域（共通部品等）において複数の企業が共創するオープンイノベーションの体制の構築や活動を支援していく。
- ✓ 基礎研究段階においても、産業ニーズ等に応じながら、官民の役割分担を明確にした上で、国が積極的に必要な支援を行っていく。

(4) スタートアップ／ベンチャー企業・新事業の創出・成長の環境が不十分（課題）

- ✓ 量子産業のような新興市場では、これまでにない事業・サービスを開拓するスタートアップ／ベンチャー企業（既存企業の新事業部門やカーブアウトベンチャー等も含む）が重要なプレイヤーとなり得る。
- ✓ 海外においては、ソフト・ハードともに多くのスタートアップ企業等が立ち上がり、VC 等から巨額の資金調達を行うなど動きが活発化している。一方で、資本力の乏しいスタートアップ企業等にとって、長期的な投資や技術開発、市場開拓といった、いわゆる長期戦を必要とする量子技術分野のビジネスは、民間のみの市場メカニズムではリスクが高い領域と言える。
- ✓ また、国内の投資環境においては、スタートアップ企業等への投資総額が少ないことや、金融機関等は投資回収期間が長期の投資を忌避する傾向にあるなど、スタートアップ企業等の創出・成長のためのビジネス環境・機会が不十分であるとの指摘もある。さらには、資本力や体制、情報発信力等が乏しいスタートアップ企業等においては、海外展開を円滑に進めることが困難な場合もあるとの意見もある。

(基本的対応方針)

- ✓ 量子技術分野は長期的な投資や技術開発が必要である分野のため、積極的に国のプロジェクトを呼び水として、民間投資を促しながら、産学官が一体となって、長期的な視点での支援を通じてスタートアップ企業等の創出・育成を支援する。
- ✓ 金融機関やパートナー企業等とのマッチング等を通じたスタートアップ企業等の創出・支援、担い手となる若手起業人材育成、量子技術を活用したビジネスアイデアを創出する仕組み（ピッチコンテスト、アイデアソン／ハッカソン等）を推進する。
- ✓ さらには、既存企業との連携やベンチャー企業同士の連携、ベンチャー

エコシステム形成、事業活動の国内外への情報発信や海外展開支援など、スタートアップ企業等を総合的に支援するイノベーション基盤を形成していく。

(5) 産業人材が不足

(課題)

- ✓ 量子技術分野においては世界的に産業人材が不足し、人材獲得競争も激化している。量子技術を実用化・事業化していくためには、量子技術分野の研究・技術人材のみならず、多様な技術分野（デバイス・部品・材料、エレクトロニクス、半導体、アーキテクチャ・システム、ソフトウェア、情報通信等）の人材も必要となる。
- ✓ さらには、経営・知財・法律人材等の事業化・産業化をサポートするビジネス人材とともに、ユーザ分野の人材も育成・確保していくことが重要である。
- ✓ ベンダー企業・ユーザ企業ともに、人材不足が深刻な課題となっており、長期的かつ戦略的に量子技術分野の産業人材を育成・確保していくことが必要である。

(基本的対応方針)

- ✓ 大学・研究機関等や産業界など产学研が一体となって、産業人材や学生を含む様々な分野の人材向けの教育プログラムの構築・提供を図っていく。さらに、産業界と学術界の人材マッチング（インターン制度等）や異分野間の人材交流など、国内外を含む产学研官の人材交流・流動も推進していく。
- ✓ また、国の研究開発等のプロジェクトにおいても、様々な分野の人材が参画できるような仕組みの形成やテーマの設定等を積極的に行っていく。
- ✓ さらには、産業人材等の供給源である中学・高校等の若年層向けの教育プログラムや科学館展示等を通じたアウトリーチ活動等の充実・強化を図っていく。

6. 取組の方向性

(1) 量子コンピュータ（ソフトウェア、利用環境整備等）

- ✓ 多くのユーザ企業の参画の下での訴求力のある魅力的なユースケースづくりを支援し、ユーザ産業の拡大・振興を図る。さらに、経営視点や ESG 視点などユーザ企業視点での量子技術利用の性能・効果指標（性能、コスト、利便性、低炭素化等）の検討を進め、経営者・投資家がこれらの指標を経営・投資に活用できる仕組みの構築に向けて検討する。
- ✓ ユーザが量子・古典ハイブリッド計算環境を容易に利用できる環境（アプリケーションやミドルウェア、開発環境等）の整備・提供を進めるとともに、これを通じたソフトウェア・利用支援サービス事業者の育成・振興を図る。
- ✓ 国産実機を産学官で多様な用途で活用していくとともに、国内外の量子コンピュータと従来型（古典）コンピュータと連携して、産業化をリードする実利用環境構築、産業・科学のフロンティアを開拓する最先端の量子・古典ハイブリッド計算環境を構築・提供する。

①ユーザ産業の創出と振興

○ユースケースづくり支援等

- ✓ 量子コンピュータを活用したサービス市場を創出・拡大していくためには、様々な分野のユーザ企業が主体となって、産業視点で訴求力ある価値やニーズを発掘し、新たなサービスを創出していくことが重要である。このため、多くのユーザ企業の参画の下で、訴求力のある魅力的なユースケースづくりを行う取組を支援し、ユーザ産業の拡大・振興を図っていく。この際には、実際の産業現場で進展している AI 技術活用を含む DX 化の潮流に、量子コンピュータを融合させていく取組も通じながら、新たなユーザ企業の参画促進やユースケースづくり支援を行っていく。
- ✓ 持続可能な産業の発展のためには、短期・中長期において、産業利用による利益を、新たな技術の研究開発や製品・サービスの開発への投資につなげる持続可能な資金循環（エコシステム）を実現していくことが重要である。
- ✓ このため、短期的には量子アニーリングマシンやシミュレーテッドアニ

ーリングマシンを活用して、喫緊に解決すべき課題³に対応し、早期に新市場の創出と事業の拡大を図る。中長期的には、産業実利用が見込まれるゲート方式の大規模な量子コンピュータを利用することで、従来型（古典）コンピュータや量子アニーリングマシン等では現実的な時間で求解できない課題等を解決し、量子コンピュータの適用範囲・規模を拡大して、さらなる市場の拡大・振興を図る。

- ✓ また、バイオやマテリアルなど有望領域において量子コンピュータを活用していくためにも、「バイオ戦略 2020」（令和 2 年 6 月 26 日（基盤的施策）、令和 3 年 1 月 19 日（市場領域施策確定版）統合イノベーション戦略推進会議）や「マテリアル革新力強靭化戦略」（令和 3 年 4 月 27 日（統合イノベーション戦略推進会議）等と連携した、バイオ×量子、マテリアル×量子といった産業領域間の融合を促進していく。
- ✓ さらに、各ユースケース分野において複数の企業が参画する Q-STAR などのコンソーシアム等の場で、複数のユーザ企業が情報交換や意見交換をしながら、必要に応じて、協調領域においてユースケースづくりを進めていく取組も支援する⁴。

○ユーザ企業視点での量子技術利用の性能・効果指標の検討

- ✓ 幅広い産業の量子コンピュータの利用や投資行動を促進するためには、既存技術との性能的な比較とともに、ROI 等の経営視点や、SDGs・脱炭素等を含む ESG 視点で、量子コンピュータの利用が事業活動にどのような効果を生み出すのかについて、ユーザ企業の経営者や投資家に対して示していくことが重要である。
- ✓ このため、ユーザ企業にとって、量子コンピュータが既存技術と比較して性能的に優位性があるのかを理解・判断できるようにするため、ユースケースの結果等も踏まえつつ、量子コンピュータやソフトウェア（アルゴリズム）、量子・古典ハイブリッドシステムの性能指標（既存技術に対する優位性、実利用でのベンチマーク等）を検討する。
- ✓ さらに、経営視点や ESG 視点で、性能のみならず、コスト、利便性、低炭素化も含めて、量子コンピュータの利用による事業活動への効果

³ 例えば、人員不足が課題となっている物流・交通や人員配置の最適化、エネルギー問題を解決する再生可能エネルギーの有効活用や仮想発電所（VPP）における需給予測とネットワーク制御、5G 通信ネットワークのトラフィック制御と低消費電力化、創薬におけるシミュレーションの効率化、大規模言語モデルの学習時間の短縮や高精度化などが想定される。

⁴ 協調領域においては、例えば、社会課題を解決するまちづくりなど対象として総合的に様々な分野のユースケースづくりを行うことによって、分野・組織横断的に取組を進め、自治体等の公的機関も巻き込んで将来の公共調達（自治体利用等）につなげていくことも有効である。

(将来の効果も含む) を適切に評価できる効果指標も検討する。また、この効果指標を活用し、経営者や投資家等が、量子コンピュータ等を利用する事業活動を正しく評価し、経営・投資に活用できる仕組みの構築も併せて検討を進める。

- ✓ さらには、ユーザ企業が複数の量子コンピュータやソフトウェア等の性能を比較できるようにするための仕組みの構築(性能を比較できるソフトウェアの開発等)を進めていく。なお、性能指標の検討の際には、現時点での量子コンピュータの性能は限界があることから、将来的技術発展による性能指標の向上の見通しも含めて検討する。

②ソフトウェア産業の振興

○ソフトウェア・利用支援サービス事業者の育成・振興

- ✓ 量子コンピュータは、実機・プラットフォーム毎に、アプリケーションと量子コンピュータをつなぐミドルウェア、ソフトウェア開発環境(ソフトウェア開発キット(SDK: Software Development Kit)等)が異なる場合が多く、さらには、一定程度の専門知識が必要となるなど、一般のユーザにとっては敷居が高い状況にある。
- ✓ 将来、量子コンピュータの利用拡大のためには、ユーザが多様なマシンを意識せずに使い分けができるような環境づくりが重要となる。さらには、将来の実用化の観点では、ある計算課題に対して、バックグラウンドで量子コンピュータや従来型(古典)コンピュータを上手く選択・利用する統合的な計算環境(量子・古典ハイブリッド計算環境)も期待される。
- ✓ このため、複数の量子コンピュータを従来型(古典)コンピュータとも組み合わせて取り扱うことができる共通のアプリケーションやミドルウェア、SDK等の開発環境を整備するなど、ユーザが量子・古典ハイブリッド計算環境を容易に利用できる環境を構築・提供していく。
- ✓ さらに、量子コンピュータの性能向上に伴い、その制御に用いられる従来型(古典)コンピュータ側の処理も急速に高度化していることを踏まえれば、量子コンピュータとハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)の統合利用も必須であることから、量子・HPC連携プラットフォームを実現するためのソフトウェアを開発する。
- ✓ 近年、ユーザの利用を支援するため、アプリケーションやミドルウェア、開発環境等を提供するソフトウェアサービスとともに、コンサルティングや教育を含む総合的な利用支援サービスを提供する民間企業の動きが活発化している。我が国においては、これら民間企業の多くはベンチャー企業であり、量子コンピュータのユーザビリティ向上に貢献し、さらにはユーザと量子コンピュータ利用をつなぐハブとなるキープレイ

ヤーでもある。国が前述のような量子コンピュータの利用環境整備等を進めていく際には、このような民間企業を最大限に活用しながら、ユーザにとって利便性の高い利用環境を整備・提供し、ソフトウェア・利用支援サービス事業者の育成・振興を図っていく。

③ソフトウェア開発のための量子コンピュータ利用環境の整備

○フロンティアを開拓するフラッグシップ計算環境の整備

- ✓ 令和5年3月に、国立研究開発法人理化学研究所(以下「理研」という。)において国内初の国産実機(超伝導量子コンピュータのテストベッド)を発表し、運用を開始した。
- ✓ 本テストベッド機は、国産実機の特性を生かしてハードウェアの深い層まで制御可能であることから、運用開始後は、ソフトウェア(誤り抑制・訂正等)からミドルウェア(アーキテクチャ・システム)、ハードウェア(制御装置等)までのコア技術の育成・高度化、量子・古典ハイブリッド技術開発など、産学官が多様な用途で活用できる環境を構築する。
- ✓ さらには、理研において、本テストベッドを含む最先端の量子コンピュータの実機と富岳等の従来型(古典)コンピューティングと連携させて、量子技術のみならず、計算科学、数理科学のコミュニティも巻き込み、産業・科学のフロンティアを開拓していく最先端のフラッグシップとなる量子・古典ハイブリッド計算環境等を提供するアドバンスト・コンピューション拠点の整備を進める。

○産業化をリードする実利用計算環境の整備

- ✓ 量子コンピュータを活用したユースケースの創出と産業利用を促進していくため、幅広いユーザが容易にアクセスできる、産業化をリードする量子・古典ハイブリッドの実利用計算環境を整備する。
- ✓ 直近では、シミュレーテッドアニーリングマシンなどを活用し、その後は量子コンピュータ(アニーリング方式)も活用する。さらに、将来、量子コンピュータ(ゲート方式)についても、中長期的な視点で産業利用を想定する。
- ✓ なお、商用化で先行する海外製の多様な種類の量子コンピュータ⁵の活用も有益であり、ユースケースの創出に必要な実機をユーザニーズや有効性等の観点から精査・選定して柔軟に活用する。

⁵ 海外製の量子コンピュータ(ゲート方式)については、超伝導型、イオントラップ型、冷却原子型、光量子型などがクラウド等を通じた商用利用が可能となっている。

(2) 量子コンピュータ（ハード、基盤技術等）

- ✓ 量子コンピュータ（ゲート方式）の技術方式として先行する超伝導型については技術開発・事業化を強化・加速する。さらに、運用の経験・ノウハウ蓄積やその担い手となる人材を育成していくとともに、運用等の結果をハード開発にフィードバックできる仕組みを構築する。その他の方式については、スタートアップ企業を含む民間企業の参画・活動の促進に努める。
- ✓ 量子コンピュータ（アニーリング）については、性能面での定量的な優位性を明確化し、早期の実機実証を進めるとともに、HPC やシミュレーテッドアニーリングマシンなど多様なコンピュータ資源と一体的に運用し、産業利用をリードする実利用計算環境として活用することで、産業利用において競争優位性の向上を図る。
- ✓ 安定的かつ強靭なサプライチェーンの構築のため、有志国とも連携して、将来の量子コンピュータシステムに必要な装置、部品・材料等の特定と技術内容の明確化を行い、その担い手となる中小企業を含む企業の参画を促進する。併せて、我が国の産業が強みを発揮できる優先すべき技術分野や、これも踏まえて choke point となる技術分野を特定し、これら技術分野の装置、部品・材料等や必要な技術の確保・高度化を図っていく。
- ✓ 量子チップ等の要素技術の基礎研究や、大規模化に向けた試作・試験・評価等プロセスにおいて、民間企業の活動を支援できるような環境づくりを進めていく。

①量子コンピュータ（ゲート方式）

＜超伝導量子コンピュータ＞

○量子コンピュータの技術開発支援

- ✓ 量子コンピュータの技術方式としては超伝導型が先行しており、海外が活発に技術開発・事業化を進めている中、我が国においても、产学研官が一体となって国産実機の開発を進めている。国産実機の開発は、ソフトウェアからハードウェアまでの要素技術やシステム全体の様々な関連技術の育成・高度化とともに、量子・古典ハイブリッド技術開発のためのハード、アーキテクチャの設計に貢献するなど大きな意義を有する。
- ✓ 令和5年3月に理研において国内初の国産実機の運用を開始し、その後も国内ベンダー企業が理研と連携して実機を令和5年度に公開予定であり、今後、海外と伍していくためにも、引き続き、技術開発を強化・加速していく。なお、量子コンピュータの制御には、量子多体系や散逸系の制御など基礎科学の知見を必要とすることから、理研が学理に基づく量子状態制御技術等のコア技術の研究開発を担い、ベンダー企業がこ

これらのコア技術を活用した大規模化・システム化を担っていくことが期待される。

- ✓ さらには、国産実機については、今後は運用フェイズに入ることから、運用の経験・ノウハウ蓄積やその担い手となる人材を育成していくとともに、運用やユーザエクスペリエンス等の結果をハードの研究開発にフィードバックできる仕組みも構築する。

○民間商用機の事業化支援・国際競争力強化等

- ✓ 超伝導量子コンピュータについては、民間商用機がリリースされているものの、超伝導方式は他の方式と同様に技術として確立しておらず、長期にわたる研究開発を必要とし、さらには実用化・大規模化等のために莫大な費用を要する。このため、民間企業のみで研究開発や実用化・産業化していくことはリスクが高いとの指摘もあるが、量子コンピュータのベンダー企業や関連部品・材料等のサプライヤー企業にとっては新たな市場創出の商機ともなる。
- ✓ このため、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下「産総研」という。）において、量子チップ等の要素技術の基礎研究や、大規模化に向けた試作・試験・評価等プロセス（量子チップの試作・試験・評価、周辺部品の極低温下でのテスト等）において、民間企業の活動を支援できるような環境づくりを進めていく。
- ✓ また、主要拠点である理研・産総研において、理研は基礎的な段階での研究開発を支援し、産総研は大規模化に向けた試作・試験・評価等プロセスで産業界を支援するといった役割分担を明確化するなどして、双方が協力・連携して民間企業の活動を支援していく。

<その他のゲート方式（イオントラップ、光、シリコン、原子等）>

○産業界の参画促進、連携体制の強化

- ✓ 我が国においては、超伝導式とともに、イオントラップ、光、シリコン、原子等の方式についても、国のプロジェクト（ムーンショット型研究開発制度等）を中心に研究開発を強力に加速・推進している。
- ✓ 海外では民間企業を中心として、様々な技術方式において事業化を進めしており、我が国においても積極的に民間企業とパートナーシップを構築して、将来の実用化・産業化を見据えて、スタートアップ企業を含む民間企業の参画・活動を促進するための取組に努める。
- ✓ また、令和4年に量子コンピュータ（ハード）分野の国内初のスタートアップ企業が発足し、今後、量子コンピュータ／量子ネットワークを開発・リリースしていく予定である。長期的投資を必要とし、リスクも高い先進的な技術方式を進めるスタートアップ／ベンチャー企業にとつ

ては、国のプロジェクト支援を活用していくことも有効な手段である。このため、このようなスタートアップ／ベンチャー企業の活動の後押しを行っていくため、国のプロジェクトを通じた支援の充実や仕組みの構築を図っていく。

②量子コンピュータ（アニーリング方式）

○量子アニーリングマシンの技術開発・事業化支援等

- ✓ 我が国において、実用化・産業化が近い量子アニーリングマシンを開発し、これを活用した新市場の創出や事業の拡大をしていくことは、量子コンピュータの産業の市場をいち早く形成し、産業利用による利益を技術の研究開発等への投資につなげる持続可能な資金循環（エコシステム）を実現する観点で大きな意義がある。
- ✓ 国内企業が産総研と連携して、量子アニーリングマシンの開発を実施しており、令和6年度頃に実機の公開を予定しており、令和9年には1,000量子ビット級の実機の実現を目指すこととしている。
- ✓ 現在、カナダのD-wave Systems社が5,000量子ビットクラスの商用機のサービスで先行しているが、必ずしも量子ビットの規模が性能を決めるものではないため、性能面での定量的な優位性を明確化し、早期の実機実証の支援を進めるとともに、技術開発・事業化の支援を着実に進める。
- ✓ また、従来型（古典）コンピュータと連携させて大規模問題へ対応、HPCやシミュレーテッドアニーリングマシンなど多様なコンピュータ資源と一体的に運用し、産業利用をリードする実利用計算環境として活用することで、産業利用において競争優位性の向上を図る。

③共通基盤技術

○量子コンピュータのグローバルな事業化に必須となる部品等の確保・高度化とサプライチェーンの強靭化

- ✓ 量子コンピュータ等の研究開発・事業化を安定的に進めるためには、高性能なデバイス・部品・材料を安定的に供給する戦略的なサプライチェーンの構築が不可欠となる。量子コンピュータにおいては、各企業から2020年代中に大規模化に向けたロードマップが示されており⁶、そのシステムを実現していくためには、関連する装置や部品・材料等の安定的かつ強靭なサプライチェーンを構築していくことが必要となる。
- ✓ このため、将来の大規模量子コンピュータシステムを想定し、必要な装

⁶ 国内では富士通、海外ではIBM、Google、Rigetti Computing、IonQ、Quantinuumなどが開発ロードマップを公表。

置、部品・材料等の特定と技術内容の明確化⁷を行った上で、その担い手となる有力な産業分野や中小企業を含む企業を特定し、これらの企業の参画を促進する。併せて、我が国の産業が強みを発揮できる優先すべき技術分野や、サプライチェーンにおける戦略的に重要なチヨークポイントとなる技術分野を特定し、これら技術分野の装置、部品・材料等や必要な技術の確保・高度化を図っていくための戦略を検討・実行する。これにより、既存エレクトロニクス分野等の多くの企業の参画を促し、国内・有志国の企業の連携により、安定的かつ強靭なグローバルサプライチェーンを構築する。

- ✓ 量子コンピュータの実用化・大規模化等のためには、多岐にわたる部品・材料等の開発・製品化が必要である一方で、莫大な費用や人材が必要となることから新規企業の参入障壁となっている。そこで、産総研において量子チップ等の要素技術の研究開発や大規模化に向けた制御装置・周辺部品・材料等の試作や極低温下での評価等により、部品・材料等のサプライヤー企業や量子コンピュータのベンダー企業など民間企業の活動を支援することで、グローバルサプライチェーンの構築を推進する。

⁷ 一般社団法人量子技術による新産業創出協議会（Q-STAR）（日本）、Quantum Economic Development Consortium（QED-C）（米国）、Quantum Industry Canada（QIC）（カナダ）、European Quantum Industry Consortium（QuIC）（欧州）の4つの量子産業のコンソーシアムが、共同でサプライチェーンマップを調査・作成を行っている。

(3) 量子セキュリティ・ネットワーク

- ✓ 国内外のユーザ産業の発掘・拡大をしていくため、訴求力のあるユースケースづくりや公的機関によるアンカーテナンシー／アーリーアダプタとしての利用も促進する。
- ✓ 国内ベンダー企業の事業を後押していくためにも、広域テストベッドでの運用等を通じて、技術開発の支援を行うとともに、運用や利用（ユースケース）の実績を蓄積し、官民が一体となって海外展開していく。さらには、利用拡大・普及のための量子暗号通信機器の国内認証基盤の構築を推進する。
- ✓ また、量子・古典ハイブリッドによる総合的アーキテクチャの構築、量子暗号通信の広域テストベッドの充実・強化を図る。さらに、将来を見据えた量子インターネットの研究開発や導入口ードマップの検討を進める。

①量子セキュリティ・ネットワークの産業振興

○ユーザ産業の振興・拡大

- ✓ 国内外のユーザ産業を発掘・拡大していくため、量子暗号通信の広域テストベッド（QKD ネットワーク）等を活用し、新たなユーザを訴求する魅力的なユースケース（キラーアプリケーション）づくりの支援を行っていく。
- ✓ 特に、有望な事業領域である金融、医療、製造業、安全保障等において、利用促進等を行っていく。この際には、安全性、コスト、ユーザビリティのバランスに留意してユースケースづくりをしていく視点も重要なとなる。
- ✓ 将来の本格的な利用・普及に向けて、ユースケース等も踏まえながら、各分野のルール・ガイドライン等において量子セキュリティの利用を推奨するなど、ユーザの利用インセンティブ向上に向けた取組に努める。また、自治体等の公的機関においてアンカーテナンシー／アーリーアダプタとしての利用促進を支援していく。

○量子セキュリティ・ネットワークの事業化支援・国際競争力強化

- ✓ 国内ベンダー企業は、既に1社が量子暗号通信の商用機をリリースしており、国際展開も視野に入れて事業展開に積極的に取り組んでいる。さらには、令和5年度以降も新たに国内ベンダー企業1社が参入し、商用機をリリースする予定である。
- ✓ 国内ベンダー企業の事業を後押していくためにも、前述の広域テストベッドでの運用等を通じて、技術開発の支援を積極的に行う。さらに、運用や利用（ユースケース）の実績を着実に蓄積するとともに、これらの

実績を活用しつつ、官民が一体となって海外展開を支援していく。さらに、標準化・知財化を強力に進めるなどして、国内外に展開・普及していく。

- ✓ この際には、ハードベンダー企業だけではなく、将来の利用支援サービス（アプリケーション）を担う民間企業の育成も視野に入れて取り組んでいく。

○量子暗号通信機器の国内認証基盤構築の推進

- ✓ 近年、サイバー攻撃によって事業継続が困難になる深刻な国内事例も散見されており、ユーザにとってセキュリティ確保は極めて重要な課題となっている。このようなセキュリティ確保の重要性に鑑みると、ユーザが量子暗号機器を導入する際には、各機器が求める性能を確実に保証しているかどうかを判断できる仕組みが求められる。また、令和5年度以降、量子暗号通信機器の国内ベンダー企業が複数社となるが、ユーザにとっては客観的な指標で当該機器を性能比較できる仕組みも求められる。
- ✓ これらを踏まえると、量子暗号通信機器の利用拡大・普及のためには、第三者機関による機器認証制度の整備が必要であることから、認証制度の検討とともに、評価機関等の運用・管理体制をはじめとする国内認証基盤の構築に向けて取り組む。
- ✓ この際には、評価機関として民間企業を活用して認証制度をエコシステムとして自律化させていく仕組みの構築や、担い手となる人材の育成・確保を行っていく。さらに、認証制度の検討に当たっては、今後の海外展開を見据えて、制度面での国際連携・協調にも留意する。

②量子セキュリティ・ネットワークの利用環境整備と利用実証の拡大

○量子・古典ハイブリッドによる総合的アーキテクチャの構築・検証

- ✓ 量子セキュリティ・ネットワークを利活用・普及させていくためには、ユーザの利便性を確保しつつ、従来型（古典）アーキテクチャからのマイグレーション（システム移行）をしていくことが必要である。
- ✓ この際には、量子暗号、量子ストリーミング暗号、耐量子計算機暗号（PQC）、秘密分散、秘密計算等の多様な量子・古典暗号の強み・弱みを補完し合ってベストミックスを検討していく視点が重要である。
- ✓ このような量子・古典のベストミックスを検証できる環境を整備していくため、量子暗号、量子セキュアクラウド、量子コンピュータ等を含む量子統合アーキテクチャ（量子技術プラットフォーム）を構築・検証していく。

○量子暗号通信の広域テストベッドの充実・強化

- ✓ 総務省・国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が整備する量子暗号通信の広域テストベッド（QKD ネットワーク）は、幅広いユーザが量子暗号通信の用途で利用できる貴重なプラットフォームとなって いる。
- ✓ 今後も様々な利用実証拡大を図っていくため、衛星等の宇宙アセットまでを含む都市間の量子暗号通信ネットワークを構築するとともに、都市 間から全国規模に拡大していく。
- ✓ この際には、量子・古典をベストミックスさせたユースケースづくりに 貢献していくことにも留意して、テストベッドを構築・高度化していく。

③量子セキュリティ・ネットワークの高度化

○量子インターネットの研究開発等

- ✓ 量子状態で遠距離を通信する量子インターネットは、秘匿性の高い量子 暗号通信のほか、複数の量子コンピュータの接続による大規模な計算を 可能とする将来技術として期待されている。
- ✓ また、将来の量子インターネットの実現に向けて新たなスタートアップ 企業も出現している。
- ✓ このようなスタートアップ企業をはじめとして将来の産業の振興も視 野に入れつつ、デバイスやアーキテクチャ、プロトコルを含めて研究開 発や技術実証を推進していくとともに、量子インターネットの導入に向 けたロードマップの具体化に向けて検討を進めていく。

(4) 量子計測・センシング／量子マテリアル

- ✓ 量子計測・センシング産業の振興のため、幅広い産業界に対して量子計測・センシング技術・利活用について積極的な情報提供、技術開発・事業化の支援を行うとともに、産学官の関係者が情報共有・意見交換を行うことができる産学官のコンソーシアム等の体制づくりを行う。
- ✓ 多くの企業に対して、量子計測・センシングを容易に利用・開発できる環境の整備・提供や技術・利用面での支援を行う。さらに、ユーザにとって訴求力のある魅力的なユースケースづくりや事業化に向けた技術の開発・実証等の支援を積極的に行っていく。
- ✓ マテリアル分野の産業の参画の下、ハード・ソフトが一体となって技術開発・事業化を推進できる体制を推進する。さらに、産学官が一体となって、我が国として戦略的に確保すべき量子マテリアルを安定的に供給できる体制を構築する。

①量子計測・センシング産業の振興

○量子計測センシングの技術開発・事業化支援

- ✓ 量子計測・センシングについては、医療、エネルギー、通信、モビリティ、安全保障等の多様な分野における用途があり、多くの企業の参画の下、技術開発・事業化を進めていくことが重要である。
- ✓ このため、主要拠点である量子技術基盤拠点（仮称）・量子生命拠点（国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「量研機構」という。））や量子センサ拠点（東京工業大学）等が中心となり、ユーザ・ベンダー企業など幅広い産業界に対して、量子計測・センシング技術・利活用について、実用化の段階や既存技術に対する優位性も含めて積極的に情報提供していくとともに技術開発・事業化を支援していく。また、トップ性能を追求する基礎研究に加えて、小型モジュール化・チップ化など実用化に落とし込むためのエンジニアリング技術も含めて、産学官が一体となって技術開発・事業化を進めていく。さらには、既存システムに量子計測・センシングを融合した統合的な視点も留意して進める。
- ✓ また、多くの企業の参画の促進や複数企業が協働・連携する産業エコシステム（水平分業・垂直統合等）を実現していくため、多様な産学官の関係者が情報共有・意見交換を行うことができる産学官のコンソーシアム等の体制づくりも推進する。

○量子計測・センシングの利用・開発環境提供

- ✓ 量子計測・センシング技術については、多くの企業にとって技術的な障

壁が高く、さらには量子コンピュータと異なり、ハードウェアを必要とするものが多いことから技術・利用面での支援も重要となる。

- ✓ このため、量子技術基盤拠点（仮称）・量子生命拠点（量研機構）等の主要拠点が中心となり、ユーザ・ベンダー等の多くの企業に対して、量子計測・センシングを容易に利用・開発できるオープンな環境（特に、幅広い産業用途に活用できる固体量子センサ、超偏極技術、光格子時計ネットワーク等）を整備・提供するとともに、ユーザニーズに応じて必要な技術・利用面での支援を進めていく。
- ✓ また、量子計測・センシングの本格的な利用・普及のため、量子計測・センシング技術の標準化の取組や、量子計測・センシングを活用した計測標準に向けた取組も推進する。

○ユーザ産業の拡大・振興

- ✓ 量子計測・センシングの産業の振興のためには、量子計測・センシングを利用する様々なユーザ企業の発掘・拡大によってユーザ市場を拡大していくことが重要である。
- ✓ このため、量子計測・センシングの利用環境の提供等も通じながら、多くのユーザにとって訴求力のある魅力的なユースケースづくりや事業化に向けた技術の開発・実証等の支援を積極的に行っていく。
- ✓ この際には、ユーザが量子計測・センシング技術を採用しやすいように、量子計測・センシングの性能や既存センシングに対する優位性・有効性（性能、コスト、利便性等）も含めて、正確で分かりやすい情報提供を積極的に提供していく。

②量子マテリアル産業の振興

○量子マテリアルの技術開発・事業化支援

- ✓ 量子マテリアルは、量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子ネットワークの基盤となる技術である。さらには、量子マテリアルのような材料分野は、我が国の産業界が強みを発揮できる分野でもある。一方で、量子技術が確立していない、あるいはユースケースや市場が確立していないことから、現状では、売上予測や事業リスクの見通しが立てにくく、量子マテリアル分野の産業の参入障壁は高いとの指摘もある。
- ✓ このため、量子技術の研究開発やユースケースづくりの際には、早期に実現できる可能性のあるユースケースを発掘・実証するとともに、早期の段階から、将来の市場性の見通しや効果を明確化し、関係する産業界に広く情報発信していくことに努める。
- ✓ また、迅速に産業化の取組を進める観点からも、早期の段階から、量子マテリアル分野の担い手となり得る民間企業の参加も促進し、ハード・

ソフトが一体となって技術開発を推進する体制を構築する。

○量子マテリアルのサプライチェーン構築

- ✓ 量子マテリアルは量子技術の基盤となる技術であり、我が国として確保すべき重要な量子マテリアルについて安定的かつ戦略的なサプライチェーンを構築していくことが重要である。
- ✓ このため、主要拠点である量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル拠点（産総研）、量子技術基盤拠点（仮称）（量研機構）、量子マテリアル拠点（国立研究開発法人物質・材料研究機構）等が連携し、産学官が一体となって、ユーザニーズを踏まえながら、我が国として戦略的に確保すべき量子マテリアルを検討した上で、量子マテリアルを安定的に供給できる体制の構築を行う。
- ✓ さらに、将来の量子産業を見据えて、量子マテリアル（川上・上流）と量子デバイス関連産業（川下・下流）が協働・連携する産業エコシステムの形成に向けて取り組む。

(5) イノベーション基盤

○量子産業のグローバル連携・展開

- ✓ 将来、量子産業の巨大なグローバル市場が見込まれる中で、海外市場を獲得していくためには、量子産業団体間の基本合意（MoU）⁸や民間企業のグローバルネットワーク⁹を活用して、官民が一体となった産業間でのグローバルな連携（技術協力、事業提携等）や海外展開等を推進していくことが重要である。また、将来の海外展開を見据えて、海外（欧米・アジア等）でサービスを積極的に実証していくことも有効である。
- ✓ このため、先行しているQKDネットワークをはじめとして、量子技術の利用・技術実証で蓄積したノウハウ・実績を活用して、官民が一体となって、製品・サービス等の国際展開やグローバルな情報発信を推進していく。この際には、外国政府系機関（各国駐日大使館等）等を通じ、現地のネットワークも活用していく。また、スタートアップ／ベンチャー企業等の中小企業においては、海外展開の機会に乏しいケースが見られることから、海外見本市出展や情報発信の支援などきめ細かな支援をしていく。
- ✓ さらには、产学研官の様々な階層における国際協力・対話・交流等を通じて、グローバルな産業連携、海外市場展開、国際標準の獲得等に向けて取り組む。

○スタートアップ／ベンチャー企業・新事業等の創出基盤の整備

- ✓ 我が国において、ソフト・ハードともにスタートアップ／ベンチャー企業（既存企業の新事業部門やカーブアウトベンチャー等も含む）が増加している。
- ✓ 量子技術分野の市場は長期的な投資が必要である分野のため、それぞれのステージ・特徴に応じて、各種支援を充実させながら、将来のベンチャーエコシステムの形成に向けて、产学研官が一体となってスタートアップ・ベンチャー企業等を創出・支援していくことが重要である。
- ✓ このため、金融機関、インキュベーション事業者、パートナー企業等とのマッチング等を通じたスタートアップ企業等の創出・支援、スタートアップ企業等の担い手となる若手起業人材育成、人材マッチング（研究人材と経営人材とのマッチング等）、量子技術を活用したビジネスアイ

⁸ 一般社団法人 量子技術による新産業創出協議会(Q-STAR)(日本)、Quantum Economic Development Consortium(QED-C)(米国)、Quantum Industry Canada(QIC)(カナダ)、European Quantum Industry Consortium(QuIC)(欧州)の4つの量子産業のコンソーシアムが、世界の量子産業の成長促進を目的とした国際協議会発足に向けた覚書に調印（令和5年2月1日）。

⁹ 先行しているQKDネットワークをはじめとして、量子技術の利用・技術実証で蓄積したグローバル連携のノウハウ・実績を活用することも想定する。

デアを発掘・創出する仕組み（ピッチコンテスト、アイデアソン／ハッカソン等）、既存企業との連携やスタートアップ企業等同士の協働・連携などエコシステム形成、事業活動に関する国内外への情報発信や海外展開支援など、産学官の緊密な連携の下でスタートアップ企業等を創出・支援する総合的なイノベーション基盤を形成していく。

○産業人材の育成・確保

- ✓ 量子技術分野においては世界的に人材が不足し、人材獲得競争も激化しており、産学官が一体となって、有志国とも連携しながら、長期的かつ戦略的に量子技術分野の産業人材を育成・確保していくことが重要である。
- ✓ 将来の産業を見据えると、量子技術分野の研究・技術人材のみならず、関連する技術分野（デバイス・部品・材料、エレクトロニクス、半導体、アーキテクチャ・システム、ソフトウェア、情報通信等）の人材を育成・確保していくことが重要である。また、ユーナン分野の産業においても量子技術を使いこなすことのできる人材をリスキリング等により育成・確保していくことが必要となる。さらには、量子技術の事業化・産業化のためには、経営・知財・法律人材等のビジネス人材の育成・確保も必要となる。また、AI やクラウド、IoT 分野の DX 関連産業については、量子コンピュータ等との連携によるシナジー効果も期待されることから、これらの産業人材へのリスキリングも効果的であると考えられる。
- ✓ このため、これらの産業界の各層の人材にどのようなスキルが必要なのかを設定しながら、効果的な教育プログラムを検討・作成した上で、産業の様々な層の人材に対して教育プログラムを提供するなど、産業人材育成・確保のための教育支援を強力に推進する。さらに、将来の産業人材となり得る大学等の学生や中学・高校の生徒など若年層向けの教育プログラムや科学館展示等を通じたアウトリーチ活動等も充実を図るなどして、若年層から産業界までシームレスな教育機会を提供する。
- ✓ また、教育プログラムを受講した人材等に対する検定制度等により、人材の質を保証することで、雇用や起業等の機会を拡大する仕組みも検討する。
- ✓ さらに、産学間や異分野間での人材マッチング（例えば、産学の人材マッチングイベントや、経営者や技術者等の人材プールやマッチングの仕組み、産業課題等に取り組む学生のインターン制度等）、国内外を含む産学官の人材交流・流動も推進するなどして、人材育成のエコシステムを形成する。

○産学官の新たなパートナーシップ体制構築

- ✓ 産学官が連携を強化し、一体となって取り組むためには、産業界が中心となる組織 Q-STAR と、公的研究機関・大学等が中心となる組織 QIH が、これまで以上に情報共有・交流・連携していくことが期待される。
- ✓ このため、Q-STAR と QIH が組織的に情報共有・交換を行うための定期的な場の設置や人材交流等の新たなパートナーシップの体制（Q-Partnership（仮称））の構築など、産学官の連携体制を強化していくための取組を推進する。
- ✓ 国のプロジェクトの研究の進捗状況・成果についても、このような場で積極的に共有し、今後の産学官の連携による技術開発・事業化に向けた取組の充実・強化を図っていく。

○標準化・知財化・ベンチマーク設定等

- ✓ 将来、量子産業の巨大な市場が見込まれる中で、我が国が海外市場を獲得して、量子技術を経済成長の弾みとしていくためにも、国際競争力の強化に向けて標準化・知財化に戦略的に取り組んでいくことが重要となる。
- ✓ このため、産学官が一体となって、量子コンピュータ、量子センサ、量子通信機器等の量子デバイス（材料・部品等を含む）の標準化すべき技術を検討した上で、標準化の既存の枠組みや関係者とも連携しながら、強力かつ戦略的に標準化に向けた取組を推進し、市場におけるルール形成に強く関与していく。
- ✓ 量子技術イノベーション拠点等においても、「知的財産推進計画」等¹⁰の方針を参考しつつ、他の最先端技術と同様に積極的かつ戦略的に知財化を進めていくなど取組を強化する。
- ✓ また、ユーザにとって重要な量子デバイスの経営視点・技術視点での効果・性能（既存技術に対する量子技術の優位性も含む）に関するベンチマーク指標（性能、コスト、利便性、低炭素化等）に関する情報の検討・設定・提供も積極的に行っていく。

○戦略的サプライチェーンの構築に向けた取組

- ✓ 量子コンピュータ、量子計測・センシング・量子マテリアル、量子ネットワークの研究開発・事業化を安定的に進めるためには、高度なデバイス・部品・材料等を安定的に供給する戦略的なサプライチェーンの構築に向けた取組が重要である。
- ✓ このため、産学官が連携し、我が国として確保すべき重要なデバイス・

¹⁰ 「知的財産推進計画 2022」（令和4年6月3日 知的財産戦略本部）等

部品・材料等を検討した上で、サプライチェーンマップを検討し、戦略的視点でこれらの安定的なサプライチェーンの構築を行っていく。

- ✓ この際には、量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子ネットワークに固有・共通のデバイス等の開発や汎用品の活用等についても検討し、事業リスク低減や安定的なサプライチェーン構築、経済合理性等を踏まえた検討を行う。
- ✓ さらには、担い手となる企業（中小企業も含む）も発掘するなどして裾野が広い産業のエコシステムを構築し、経済波及効果の高い裾野が広い市場を形成していく。

○プラットフォーム戦略・共創環境構築

- ✓ 量子コンピュータ等の量子技術は未だに技術方式や勝ち筋は決定しておらず、将来の技術方式によらず共通的に必要となる基盤技術（プラットフォーム技術）を確保していくための戦略（プラットフォーム戦略）も重要となる。このため、产学研官が一体となって、前述のサプライチェーンマップの議論と並行して、我が国の産業として注力すべきプラットフォーム技術を検討した上で、これらの技術の開発・製造基盤の整備の在り方も含むプラットフォーム戦略を検討していく。
- ✓ また、将来の量子コンピュータの実用化・大規模化のためには巨額の投資を必要とし、さらには将来の技術方式が不透明な中では、単独の民間企業のみで取り組むのはリスクが高いケースもあることから、協調領域と競争領域を考慮した上で産業支援を積極的に行っていく視点も重要なとなる。例えば、半導体等の試作・試験・評価等プロセスの共有、共通技術の開発、共通部品等のサプライチェーン構築、ベンチマーク設定、標準化など、複数社で連携して取り組むことが効率的かつ効率的である領域も考えられる。
- ✓ このため、产学研官の連携の下、協調領域と競争領域で実施すべき取組を踏まえながら、協調領域については、複数社が連携してオープンイノベーションで取り組むことができるような体制・仕組みづくりや必要な支援を行っていく。

○量子技術イノベーション拠点の強化等

我が国の産業の強みを生かし、各産業分野と量子技術を融合・連携させながら、産業界における新産業創出、生産性向上、社会課題解決等といった新たな価値の創出を強力に支援していくため、以下のとおり、量子技術イノベーション拠点を強化する。

「量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル拠点（仮称）」（産総研）（強化）

- ✓ 我が国が量子技術の産業利用の国際的なハブ、とりわけアジアの拠点になることを目指し、欧米のベンダー企業に加え、東南アジアなどのユーザ企業といったグローバル企業やスタートアップ／ベンチャー企業の巻き込みも念頭に、産総研に量子技術の産業化に関するグローバルな開発拠点を創設する。具体的には、使用可能な量子コンピュータを活用しつつ、新たなビジネス創出に向けた量子・AI ハイブリッドの実利用計算環境をいち早く整備・提供し、ユースケース創出や人材育成等を図っていく。また、量子コンピュータのサプライチェーンに関して、低温テスト環境を世界に先駆けて整備・提供することで、国内外の量子コンピュータベンダー企業との連携によりニーズやノウハウを収集し、量子コンピュータ等のシステム化や部品・材料等の開発・評価を支援して、国内企業の国際競争力を向上する。さらに、量子コンピュータチップについて、研究開発のみならず、大規模商用機実現に向けて量子デバイス・集積回路の開発・試作機能を提供する環境やサービスを提供するなど、総合的に産業活動を支援する。

「量子コンピュテーション開拓拠点（仮称）（ヘッドクォーター拠点）」（理研）（強化）

- ✓ 量子コンピュータをはじめとする量子技術の最先端かつ広範な基礎学理研究を強力に推進し、研究成果の企業への技術移転を進める。また、最先端の量子コンピュータの実機と富岳等の従来型（古典）コンピュティングと連携させて、量子技術のみならず、計算科学、数理科学のコミュニティも巻き込み、最先端のフラッグシップとなる量子・古典ハイブリッド計算環境等を提供するアドバンスト・コンピュテーション拠点の整備を進めるとともに、これを活用して新たな産業・科学のフロンティアを開拓する。

「量子技術基盤拠点（仮称）」（量研機構）（強化）

- ✓ 高度な量子機能を発揮する量子マテリアルの開発・供給を引き続き行うこととに加え、量子マテリアルやこれを活用した量子計測・センシング等を産業界が利用・試験・評価できる環境の整備・提供や、産業界に対する量子マテリアル・量子計測・センシング等に関する利用支援・技術支

援を行う。さらに、光科学技術も駆使しながら、量子状態の高度な観測、制御等を実現する技術・デバイスの開発など、量子技術の基盤をなす研究開発や産業支援を推進する。

「量子フロンティア産業創出拠点（仮称）」（東海国立大学機構）（追加候補）¹¹

- ✓ 我が国の産業が強みを有する化学・材料等の分野の技術と量子技術の融合により、产学研官連携の下で、新たな切り口で化学・材料等の先導的な技術や新たな事業・サービスのフロンティアを開拓し、新産業の創出や産業活動の高度化を支援する。さらに、化学・材料分野と量子技術分野の双方に精通し、分野間の連携・融合の担い手となる人材の育成も推進する。

¹¹ 今後、量子技術イノベーション会議において、量子技術イノベーション拠点に必要な要件を満たしているかどうかを確認した上で、新たな拠点として正式に決定する。

7. さいごに

量子産業は、ハードからソフト、サービスまでの様々な分野が総力を結集して取り組むべき産業分野であり、いわば総合芸術とも言える。このため、様々な分野の产学研官の組織・人材が緊密に連携し、新たな価値を共創していくことが重要である。

さらに、多くの産業分野が関与することから、関連産業への経済波及効果が極めて高い領域であるとも言える。これを踏まえると、量子技術の成長を起爆材として、我が国の総合的な成長を実現していくことも期待できる。

将来、量子産業の巨大な市場が見込まれており、世界的に投資が活発化している。しかし、テクノロジーにはある程度の投資熱（ブーム）の波があり、今後、投資熱が低調になることもあるだろう。このためにも、現在のうちから产学研官が結束を高め、一喜一憂せずに、長期的な視点で地道かつ継続的に技術・人材を育み、将来の開花に向けて取り組んでいくことが重要である。また、持続可能な形で投資や人材を惹きつけていく観点から、科学的根拠に基づく正しい情報発信に努めていくことも重要である。

量子産業は新興市場であり、若手人材が起業し、自由な発想で大胆に新たなビジネスに挑戦できる環境を構築していくことも重要である。さらに、既存企業においても、経営者が率先して、若手人材がイントレプレナーとして新しい事業に挑戦できる環境づくりをしていくことが期待される。

将来、AI技術、Beyond5G、半導体等の技術革新や市場が目まぐるしく変化し、SDGs、脱炭素社会など持続可能な社会経済に対する取組がこれまで以上に求められることが予想される。量子技術の実用化・産業化に当たっては、将来の技術革新や経済社会の変化に柔軟に対応していく視点も重要なとなる。

量子技術誕生から約100年を迎える、量子技術は本格的な実用化・産業化の段階に移行しつつある。各産業が量子技術の活用をきっかけとして、将来の成長の勝ち筋を見つけ、経済社会を豊かにしていくことを期待する。