

量子エコシステム構築に 向けた推進方策

令和7年5月30日
量子技術イノベーション会議

目次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 1-1. 量子技術を取り巻く状況の変化 | 1 |
| (1) 量子技術の重要性 | 1 |
| (2) 技術的变化 | 2 |
| 1-2. 我が国の政府戦略 | 5 |
| 2. 目指すべき量子エコシステム | 7 |
| 2-1. 量子エコシステムとは | 7 |
| 2-2. 量子エコシステムの必要性 | 7 |
| 2-3. 量子エコシステム推進ワーキンググループ議論のポイント | 8 |
| 2-4. 量子エコシステム構築に向けた方向性 | 9 |
| 3. 量子産業の創出・発展のための量子エコシステム構築に向けた取組について | 11 |
| 3-1. 量子人材育成の裾野拡大と国際展開力の強化（ヒトの観点） | 11 |
| (1) 量子人材育成の裾野拡大 | 11 |
| (2) 国際展開力の強化 | 12 |
| 3-2. 量子技術の実装基盤と国際競争力を支える戦略的拠点の構築（モノの観点） | 12 |
| (1) テストベッド環境の充実化 | 12 |
| (2) 重要部素材の国産化・サプライチェーンの強靱化 | 13 |
| (3) ハードウェア・ソフトウェアにおける技術開発の推進 | 15 |
| (4) 標準化戦略の策定と支援 | 19 |
| 3-3. 量子エコシステムを支える持続可能な資金循環と市場創出戦略（カネの観点） | 20 |
| (1) マーケットの予見性を高めるユースケース創出 | 20 |
| (2) 投資環境の整備 | 22 |
| (3) アカデミアと産業界の連携と国際協調の強化 | 22 |
| 4. 量子技術イノベーション拠点（QIH）の連携強化に向けた取組について | 23 |
| 4-1. QIHの現状および課題 | 23 |
| (1) QIHの現状 | 23 |
| (2) QIHの強化・発展に向けた課題 | 24 |
| 4-2. 強化すべき具体的な取組 | 24 |
| (1) 拠点間連携強化 | 24 |
| (2) 国際連携強化 | 25 |
| (3) 人材育成 | 25 |
| 5. おわりに | 26 |

別紙. 量子エコシステム推進ワーキンググループ 成果報告

表紙の写真：量子暗号通信システム試験設備（情報通信研究機構提供）

<本方策の位置付け>

本方策は、現下の状況変化を鑑み、量子技術に関する既存の3戦略（量子技術イノベーション戦略」（2020年1月）、「量子未来社会ビジョン」（2022年4月）、「量子未来産業創出戦略」（2023年4月））を補完するものとして、量子エコシステム構築を目指すための諸課題を整理し、早急に対応の強化、具体化や追加が必要な方策を量子技術イノベーション会議において取りまとめたものである。国際連携を主な焦点とした「量子産業の創出・発展に向けた推進方策」（2024年4月）とは並列の関係にある。

1. はじめに

1-1. 量子技術を取り巻く状況の変化

(1) 量子技術の重要性

- AIの急速な進歩と波及等によってデータ活用の高度化と拡大が進む一方、従来の汎用プロセッサの性能がムーアの法則の限界で頭打ちになりつつある中、従来と異なる物理法則からなる量子技術は、将来のコンピューティング性能の飛躍的な向上をもたらすために不可欠なものである。また、量子技術により、絶対に安全な通信や従来よりも格段に高感度なセンシング検出等が可能となり、通信・センシングにおいても飛躍的な性能向上が期待される。つまり、量子技術は、次世代の産業基盤として次の産業革命を起こしうる技術であり、その発展と産業化は人類の進歩と繁栄に不可欠である。
- その応用範囲はエネルギー、材料・薬剤開発、金融、医療、輸送等、デュアルユース含めて多岐に渡り、様々な社会課題の解決が期待される。例えば、超高感度な量子センシング技術で検出された最初期のガンを治療するために、診断情報や個人のゲノム情報等をセキュアな量子通信を用いて量子コンピュータまで送り、これらの情報を用いて個々の患者に最適な薬剤の設計や治療計画の立案が可能になる。近年の急速な量子技術の発展を見れば、これはもはや夢物語とは言えない。
- 他方、量子コンピュータ及び量子通信の実現は、現在のサイバー空間における安全性を覆す革新技術となる他、量子センシング技術は軍事転用の可能性がある等、量子技術は今後の我が国の安全保障・経済安全保障に大きな影響を与え得る。したがって、量子技術における我が国の優位性、ひいては不可欠性の獲得・維持・強化を進めることが極めて重要となっており、量子技術を構成するソフトウェア及び部品のサプライチェーンの強化を含め、量子技術の保全及び促進を図る必要がある。
- このように、量子技術は単なる先端科学技術のみならず各国の国富の多寡、安全保障・経済安全保障を左右する重要産業になりつつある。そのため多くの国で重要開発対象として、例えば米国ではCETs¹として位置づけられている。
- このような中で、量子技術は基礎学理だけでなく産業化のための開発競争が加速している。主要国の多くが量子技術に対して、年間1,000M\$（約1,500億円）以上の政府投資をしている。各国とも自国の優位性を確保するために、量子研究センターやイノベーションハブの設立とその強化、産業界を含むコンソーシアムの設立とそれに基づく国際的競争力強化、国際連携の強化、中小企業支援やスタートアップ育成のためのプログラム、産学官連携と技術移転促進のためのプログラムやセンター設立、大規模テストベッドの構築等、量子エコシステムに係る取組を進めている。
- 知財における競争も激化しており、2024年11月17日付の日本経済新聞において、量子コンピュータの公開特許数で中国がアメリカを抜いて首位になったことが報道され

¹ CETs: Critical and Emerging Technologies. 重要振興技術。

ている。また、量子技術の国際標準化委員会である ISO/IEC JTC 3²も設置され、標準化をめぐる主導権争いも始まっている。

- 一方、量子技術の保全・促進に効果的に取り組むためには、同盟国・同志国と連携して進めることが不可欠であるため、2024 年より米国を始めとした同志国の間で QDG³が作られ、NATO のもとに TQC⁴が組成される等の取組が進められている。また米国 OSTP⁵の呼びかけにより MDQ⁶が開始され、2022 年より同志国 13 か国が半年に一度程度会合を実施している。他にも OECD⁷ GF-Tech⁸において量子技術の Focus Group が 2023 年 12 月より開催され、2025 年 1 月にレポート⁹も公開された。

(2) 技術的变化

a. 量子コンピュータ関係

- 量子コンピュータは計算可能領域の新しい地平を開く革新技术である。まずは量子アニーリング（疑似含む）方式の開発・商用化が先行し、実用ユースケースの創出も進んでいる。汎用計算が可能なゲート方式は、超伝導型が先行するも、近年になってイオントラップ型や中性原子型等の他技術も追随するようになり、百家争鳴の状況となっている。
- 2024 年度になっても複数方式の開発、量子ビットの高忠実度化、高集積化、論理量子ビットを構築するエラー訂正技術関連の技術を中心に技術革新は進んでいる。例えば、Google により超伝導方式の「Willow」チップによるスケラブルな量子誤り訂正手法の実証、これとほぼ同じ性能を持つとされる中国科学技術大学による「祖冲之 3 号」の発表がなされた。更には Microsoft による「Majorana 1」チップの発表等、新規方式の可能性も探られている。加えて Amazon Web Services による超伝導ボソニック量子ビット (cat qubit) を実装したチップ「Ocelot」、PsiQuantum 社によるフュージョンベースの光量子チップ「Omega」の発表等が相次ぐ等、ビッグテック含めた開発競争は激化の一途である。他にも Quantinuum と Microsoft による論理量子ビット化によるエラー率の大幅な改善、IBM 等においても論理量子ビットの作成とエラー率の低減に関する発表も相次いでいる。
- 我が国においても、大阪大学と富士通が共同でより少ない量子ビットで量子誤り訂正を実現する技術の発表や、東京大学・理化学研究所らによる世界初の汎用計算可能な光量子コンピュータの開発、富士通による 256 量子ビットの超伝導量子コンピュータの開発といった成果が創出され、光型、イオントラップ型や中性原子型のハードウェア開発を行うスタートアップも設立された。

² ISO/IEC JTC: International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission Joint Technical Committee. 国際標準化機構と国際電気標準会議の合同技術委員会。

³ QDG: Quantum Development Group.

⁴ TQC: Transatlantic Quantum Community.

⁵ OSTP: Office of Science and Technology Policy. 米国科学技術政策局。

⁶ MDQ: Multilateral Dialogue on Quantum.

⁷ OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development. 経済協力開発機構。

⁸ GF-Tech: Global Forum on Technology.

⁹ OECD (2025), “A quantum technologies policy primer”, OECD Digital Economy Papers, No. 371, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/fd1153c3-en>.

- 理化学研究所（理研）においては国産量子コンピュータ初号機「叡」を開発し、2023年3月にクラウド利用を開始した。また、量子コンピュータとスーパーコンピュータによる新たな計算可能領域を開拓すべく、同研究所のスーパーコンピュータ「富岳」と「叡」の連携利用の取組も進められている。
- 産業技術総合研究所（産総研）G-QuAT¹⁰においても、ユースケース創出のためのテストベッドとして超伝導方式、冷却原子方式、光方式の量子コンピュータの導入・設置が決まる等、利用環境の整備も進んでいる。また多くの国外の研究機関、企業とのMOU¹¹締結がなされる等、グローバル拠点としての活動も活性化している。
- 量子コンピューティング活用に不可欠なアルゴリズム・ソフトウェアという観点から実用的なユースケースの創出に向けた取組も着実に進行している。例えば我が国では半導体製造工程、配車等の物流、流動資産ポートフォリオの最適化等への実用化が、疑似含むアニーリング方式の量子コンピュータを用いて進められている。更なる量子コンピュータ技術の発展により、GPU代替によるAI演算の低消費電力化といった近年明らかになった課題解決への貢献も期待できる。こうした中で、慶應義塾大学や東京大学におけるIBM社との連携による研究拠点の整備、大阪大学における国産量子コンピュータによるクラウドサービスの提供開始等、アカデミアにおいてもユースケース創出等に貢献すると期待される取組も進められている。また、各国が大型投資を行い、量子コンピューティングの拠点形成を進める等、グローバル競争が激化してきている。

b. 量子セキュリティ・量子ネットワーク関係

- 量子コンピュータの実現により、現在インターネット上で広く利用されている公開鍵暗号アルゴリズム（RSA暗号、楕円曲線暗号等）の危殆化の懸念が指摘されている。攻撃者は、実用的な量子コンピュータの実現を見越して、暗号化されたデータを傍受し保存しておき、時間をかけて解読する「Harvest Now, Decrypt Later 攻撃」を始めているとも言われており、量子暗号通信技術等の研究開発・社会実装を加速する必要がある。
- 我が国企業は、量子の特性を用いて暗号鍵の配信を行うQKD¹²装置について暗号鍵生成速度や伝送距離等の観点から世界トップレベルの技術を有しており、商用化も実現している。各国においても、技術検証のためのテストベッドを構築し、商用化を見据えた実証実験を行う等国際的な開発競争が激化している状況にある。
- 中国では、総延長1万km以上ともいわれる広域の量子暗号通信網が構築され、政府、金融、医療、インフラ分野等での活用や、衛星を介した量子暗号通信の実証試験等の取組が進められている。また、欧州では、EUにおける量子技術力の向上、サイバーセキュリティ、産業競争力強化のため、欧州域内に量子通信インフラを構築する「EuroQCI¹³イニシアチブ」が開始され、2021年7月にはEU全加盟国がEuroQCI宣言に署名

¹⁰ G-QuAT: Global Research and Development Center for Business by Quantum-AI technology. 量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター。

¹¹ MOU: Memorandum of Understanding. 基本合意書、もしくは了解覚書。

¹² QKD: Quantum Key Distribution. 量子鍵配送

¹³ QCI: Quantum Communication Infrastructure.

し、欧州全域で量子暗号通信網の構築が進められている。その他、韓国やシンガポール等でも、同様に量子暗号通信網の構築と、様々な分野での活用を想定した実証試験が実施されており、世界各国において量子暗号通信の社会実装に向けた取組が加速している。

- 量子インターネットでの活用を想定した量子中継技術は、量子状態の長距離伝送等、量子技術の発展に不可欠な技術である。諸外国では短距離ながらも拠点間のフィールド実証成功の報告がなされており、複数拠点間を量子中継により接続する研究開発計画が政府主導で打ち出される等、取組が加速している。
- 我が国では、量子セキュリティ拠点である情報通信研究機構(NICT¹⁴)を中核として、量子暗号通信テストベッド「東京 QKD ネットワーク」を構築し、政府系・金融系ユーザと連携した実証試験を行い、社会実装に向けた課題の明確化やアーリーアダプタへの利用促進等を進めている。
- また、安全な衛星通信ネットワークの構築に向け、2018年度から超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術の研究開発に取り組んでおり、2023年度には国際宇宙ステーションと地上間における暗号鍵共有技術の実証試験に成功した。

c. 量子計測・センシング／量子マテリアル関係

- 量子計測・センシングは、磁場、電場、温度、加速度等を従来技術よりも格段に高精度・高感度に計測することができることから、そのユースケースは多岐に渡る。そうした中で、ダイヤモンド NV センター¹⁵を利用した固体量子センサの工業やライフサイエンスへの活用や、医療への活用を見据えた超偏極技術の進展等により、民間企業が事業化に向けた体制を構築しはじめる等の動きが生まれつつある。
- 例えば磁場や温度等の複数の物理量を室温環境や生体内で高感度に測定できる利点から、大学や研究機関だけでなく、自動車メーカー等の企業からもこの分野への参入が広がりつつある。また、我が国が世界に先駆けて開拓した量子生命科学分野は、海外の研究機関からも高い関心が寄せられている。この分野では、生体ナノ量子センサを用いた生命現象の量子力学的な理解のための研究や、脳磁測定等のライフサイエンスや臨床医学への応用が期待されている。
- そうした中で、東京科学大学らのグループが、高品質なダイヤモンドの合成とセンサのノイズ低減により、ダイヤモンド量子センサによる低周波磁場の測定で世界最高の磁場感度を達成した。また、同大学では GPS が届かない環境下においても高精度の位置推定が可能となると期待されている、量子技術を用いた革新的な航法技術の研究開発も進められている。
- 理研・東京大学らのグループでは、18桁の精度（百億年に一秒のずれに相当）をもつ可搬型光格子時計の開発に世界で初めて成功した。また、大阪大学と量子科学技術研究機構(QST¹⁶)が試料を室温に保ったまま核スピンを揃える量子技術「室温超偏極」を

¹⁴ NICT: National Institute of Information and Communications Technology.

¹⁵ NV center: Nitrogen-Vacancy Center. 窒素-空孔中心。

¹⁶ QST: National Institutes for Quantum Science and Technology.

用いて、核磁気共鳴信号を 700 倍以上に増大した。さらに、京都大学が波長 2~5 μm という広い波長域で赤外光子を発生する超広帯域量子もつれ光源を開発した。

- これらの事例が示すように、量子センサ分野において、従来の計測技術を感度や分解能等の面で凌駕する成果が創出されている。これらの成果は、健康・医療、エネルギー、自動運転、防災、資源探査等の多様な分野での活用が期待されている。
- 量子マテリアルに関しては、前述のセンサ利用される高品質なダイヤモンド材料のほか、内部が絶縁体でありながら表面が金属的な電気伝導性を持つトポロジカル絶縁体や、炭素原子がシート状に結合したグラフェン等の 2 次元物質を積層させて新規機能性材料をデザインするツイストロニクス等が、近年では注目を集めている。
- 一般的にトポロジカルな状態は外乱に対して強く、量子コンピュータの高性能化や誤り耐性への寄与等も期待されている。また、ツイストロニクスについては 2 次元物質を特定の位置や角度で積層することで、単層 2 次元物質では実現できなかった特性をもつ材料を創り出すことができ、様々な応用に向けた研究が進んでいる。
- 量子コンピューティングの効率的なアルゴリズムが新規量子マテリアルのデザインや、さらに量子コンピューティングにおける量子状態操作技術が量子センシングの高度化に寄与することも期待できる。

1-2. 我が国の政府戦略

- 我が国は、第 6 期科学技術・イノベーション基本計画において、Society 5.0 という未来社会の実現を目指し、戦略的に研究開発を推進している。この計画は、科学技術の進歩とイノベーションを通じて、社会課題を解決し、日本の経済と産業競争力を強化し、国際社会に貢献することを目指すものである。この中で、量子技術は、科学技術イノベーション政策における重要分野として位置づけられている。
- 量子分野では、これまでに統合イノベーション戦略推進会議において、「量子技術イノベーション戦略」(2020 年 1 月)、「量子未来社会ビジョン」(2022 年 4 月)、「量子未来産業創出戦略」(2023 年 4 月)の 3 つの国家戦略が策定・決定され、2030 年目標として「国内の量子技術の利用者を 1,000 万人」「量子技術による生産額を 50 兆円規模」「量子ユニコーンベンチャー企業を創出」が示された。これらの戦略を強化、補完するため、量子技術イノベーション会議で 2024 年 4 月に取りまとめた「量子産業の創出・発展に向けた推進方策」で「Globalization」をさらに強化すべき視点として掲げている。
- このような政府戦略と連動し、様々な研究開発プログラムが実施されている。例えば、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP¹⁷) 第 3 期では「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」課題にて、グローバル市場への展開を目指し、多くの大学・研究機関・企業が利用でき、社会実装に向けた取組を加速させられるような共通基盤 (テストベッド等) やシステムの構築、具体的なユースケースやそれに必要なソフトウェア開発を中心に取り組んでいる。また、SIP では量子技術に関する教育プログラムの開発及び実践も進めており、全国の大学においてセミナーやワークショップを開催するなど、幅広い研究人材の育成に取り組んでいる。

¹⁷ SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program.

- ムーンショット型研究開発事業では、2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現させることを目標に、ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク及び関連する研究開発を推進している。
- 内閣府主導のもと創設された「経済安全保障重要技術育成プログラム」（通称 K Program¹⁸）では、「量子技術等の最先端技術を用いた海中（非 GPS 環境）における高精度航法技術・量子技術等の最先端技術を用いた海中における革新的センシング技術」等の量子技術関連テーマが採択されている。
- また、文部科学省が進める「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP¹⁹）」では、量子情報処理（主に量子シミュレータ・量子コンピュータ）、量子計測・センシング、次世代レーザーの分野で、それぞれネットワーク型研究拠点を形成し、技術領域毎に Flagship プロジェクトと基礎基盤研究を実施するとともに、量子技術の次世代を担う人材の育成を強化するために人材育成プログラムを設置し、共通的な教育プログラムや、教育機関ごとの特色や独自性を生かした各種プログラムの開発を推進している。
- 同志国との戦略的な連携も積極的に進めており、我が国と米国政府は、2023年5月の日米首脳会談において、量子技術分野を含む先端技術に関する協力の重要性を共有し、2024年2月の首脳会談においては、量子コンピューティングをはじめとする重要技術の開発において、世界をリードするための連携を強化する旨を共同声明として発出した。さらに、2024年11月の日米韓首脳会談においては、人材育成および国立研究機関間の協力を促進することについても共同声明が発出されており、三国間の連携体制の深化が図られている。さらに、令和6年12月には、内閣府は欧州委員会通信ネットワーク・コンテンツ・技術総局と共同で「日 EU 量子コンピューティングワークショップ」を開催し、量子コンピューティングに関する日 EU 共同研究プロジェクトの具体化を図り（日本側は SIP にて研究実施）、令和7年5月には EU との間で量子連携推進に係る意向表明書への署名を行っている。そのほか、令和7年1月にはデンマークとの間で、令和7年4月には英国との間で、それぞれ量子科学技術分野における協力覚書への署名を行っている。

ここまで量子技術を取り巻く最新状況を概観してきた。多くの量子技術で TRL²⁰が低い段階から、ビジネス化への展開が急速に進んでいる状況が見てとれる。グローバル競争が激化する中、我が国としていち早く産業化を実現し、「技術で勝って、ビジネスで負ける」という失敗を繰り返さないようにする必要がある。そのためには中長期的な視野に立った基礎研究を強力に推進することに加え、ビジネス上のステークホルダーを考慮し、グローバル市場で勝利するための、より積極的な量子エコシステム構築に向けた施策が重要となる。そこで本方策では量子技術イノベーション会議および、その下に設置した「量子エコシステム推進ワーキンググループ」での議論を元にして、エコシステム構築のために早急に成すべき施策等を取りまとめた。

¹⁸ K Program: Key and Advanced Technology R&D through Cross Community Collaboration Program.

¹⁹ Q-leap: Quantum Leap Flagship Program.

²⁰ TRL: Technology readiness levels. 技術成熟度レベル。

2. 目指すべき量子エコシステム

2-1. 量子エコシステムとは

- 一般的にエコシステムとは「生態系」と訳され、生物とその生物が生息する環境との相互作用を指す言葉である。転じてビジネスにおいて、「企業や組織が相互に関連し合い、共存・共栄する状態」を指す。
- 現在、国内の量子技術に関わる一部のプレイヤーは多様に拡がりながら、個別の取組を進めている。量子技術の利用者、市場、産業界、アカデミア、政府、金融市場等がダイナミックに動く国内外の環境下で、人材や計算基盤、資金等のリソースに制約がある中、日本として強みを発揮し、優位なポジションを占め、継続的な発展を図っていくためには、量子技術に関わる企業や組織が相互に関連し合い、自然に育つ自立的なネットワークを構築することが重要である。
- そのような「量子技術に関わる企業や組織が相互に関連し合い、自然に育つ自立的なネットワーク」を目指すべき「量子エコシステム」と定義する。

2-2. 量子エコシステムの必要性

- 我が国の過去のビジネスモデルの成功例の多くは、高性能の製品を高品質かつ安価に供給する垂直統合されたサプライチェーンによって支えられた。これも一種のエコシステムであるが、特定のソリューションのみを提供するモデルである。
- デジタル・ITの時代では水平展開される全く異なるエコシステムがグローバルに形成され、我が国はその対応に遅れた。経済産業省によれば、我が国のデジタル競争の敗因は、ユーザ企業はコスト削減を追求し、ベンダ企業は低リスクのビジネスを享受するという「低位安定」な関係に落ち込み、グローバル市場を意識したプラットフォーム（世界的な共通基盤）によるビジネス展開ができなかったことによる²¹。ベンダはユーザの要求通りのシステムを開発するだけの受け身態勢になり、グローバル市場で通用するサービスを育てられなかった。その結果、海外のデジタルサービスに支配され、デジタル赤字は2024年には6.85兆円に達している²²。
- このような失敗を繰り返さないためにも、量子技術のビジネルモデルとそのためのエコシステムを戦略的に構築していく必要がある。量子技術は、非常に応用範囲が広く、特定のソリューションでは無く、デジタルもしくはプラットフォーム型のモデルへと集約されていく事が予想される、今現在は黎明期であり、プラットフォーム型に到達するアーキテクチャーは存在していないため、今から戦略的に開発を進めるべきである。
- 例えば量子コンピュータの場合、量子コンピュータや古典コンピュータによる最先端の計算プラットフォームやテストベッドをクラウドウェア・ミドルウェア・ソフトウェア含めて整備し、そこから生まれるユースケースや抑えるべき国際標準化等を合わせたビジネスモデルが考えられる。更にこの基礎となる量子コンピュータシステムや

²¹ 経済産業省商務情報政策局「半導体・デジタル産業戦略」令和5年6月。

²² 経済産業省 「デジタル経済レポート：データに飲み込まれる、聖域なきデジタル市場の生存戦略」
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/statistics/digital_economy_report.html

部素材といったものづくり分野、すなわち従来の垂直型のエコシステムが必要となることも量子コンピュータの特徴である。このようなソフトウェア・プラットフォームとハードウェアが融合したビジネスモデルは、我が国の大きな勝ち筋と考えられる。

- 一方で、経済安全保障上、量子技術に関する重要な構成要素・技術を他国に依存する事は、可能な限り避けなければならない。ハード、ソフト含めた構成部品におけるサプライチェーンをしっかりと確保する事は、戦略上きわめて重要となる。
- また国際標準化も重要である。このときソフトウェアやプラットフォームとサプライチェーンにおける標準化のアプローチは異なることに注意する必要がある。
- 各量子技術において、分断的開発から脱却し、「共進化」する産業構造を作るべく、垂直型と水平型が融合した日本独自のエコシステムこそが、量子技術分野での持続的な競争力と成長を支える鍵であり、経済的自立性を担保するためのトータルな技術開発と、グローバル市場で勝利するための焦点を絞った技術開発や標準化を並立するための戦略が求められている。そしてこのためのエコシステムを早急に構築することが必要である。
- そこで量子技術イノベーション会議の下に「量子エコシステム推進ワーキンググループ(以下、当該WG)」を設置し、スタートアップ/ベンチャー企業の経営者やベンチャーキャピタル、海外量子団体等の量子関連の有識者からヒアリングを行う等して、議論を深めた。
- また“科学とビジネスの近接化”の時代²³において、我が国の量子技術の基礎研究開発の中心となるべき量子技術イノベーション拠点の連携を更に強化させ、エコシステムの土台を強固にする必要がある。
- 本方策では、グローバル市場を獲得できる量子エコシステム構築に向け、第2章で「目指すべき量子エコシステム」を、第3章および第4章で、それぞれ「量子産業の創出・発展のための量子エコシステム構築」と「量子技術イノベーション拠点(QIH²⁴)連携強化」という観点から課題と強化すべき施策を提示する。

2-3. 量子エコシステム推進ワーキンググループ議論のポイント

- 当該WGでは、量子エコシステム構築のために検討が必要な観点として、以下a~dの4点を挙げ、量子分野に留まらない有識者の方と議論を重ねた。
 - a. 我が国が世界から注目される優れた技術を創出し、技術を継続して育成していくための方策等
 - b. 我が国が世界のクラブメンバーに参画し、グローバルサプライチェーンの中でイニシアチブを発揮していくための方策等
 - c. スタートアップ/ベンチャー企業や新事業の創出、これらを成長させていく方策等
 - d. 日本の企業の海外進出や、海外の企業を誘致して量子産業を拡大する制度改革等

²³ 産業構造審議会イノベーション・環境分科会イノベーション小委員会 中間とりまとめ～「科学とビジネスの近接化」時代のイノベーション政策～(令和7年4月17日)

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/innovation/20250417_report.html

²⁴ QIH: Quantum Technology Innovation Hubs.

- 当該 WG の議論のポイントとして、量子エコシステム構築のためには、ヒト・モノ・カネといったエコシステムを構成する資源を整備するとともに、それぞれの資源が繋がる仕組みを形成することが重要であることが挙げられる。

【ヒト】

- 人材の流動性を強化する必要がある。特に、アカデミアと産業界の間で、双方向の人材流動（交流）が足りていないため、促進する必要がある。
- 日本の研究者・技術者、ビジネスを担う企業等が海外の量子技術ネットワークに入っていくための支援、海外の研究者・技術者が日本の大学・研究機関や企業で活躍できる環境の構築、QIH のプレゼンス向上、日本が得意とするビジネスユースケースの発信等が必要である。
- 人材の供給源となる大学・大学院での量子技術分野の人材育成を強化する必要がある。

【モノ】

- 量子技術への参入障壁を下げるためのインフラやテストベッド環境、国際標準化を政府が支援すること、およびこれら支援に関する発信、産学官の戦略を実行する体制の明確化が必要である。
- 国内製品育成に資する海外製品の取り込みが重要である。

【カネ】

- 国が率先してアーリーアダプタとなり、スタートアップ含む量子産業の創出を支援すべきである。購入した製品はテストベッド等にて、産学での利活用を推進すべきである。更に我が国の量子技術を海外に向けて積極的に売り込む必要がある。
- スタートアップ支援等、共通の予算も有効に活用すべきであり、一方で、他国のように自由度のあるお金の集め方、使い方も検討すべきである。

2-4. 量子エコシステム構築に向けた方向性

- 当該 WG において、産官学が密接に連携して、我が国ならではの産業エコシステムを作り、維持していく必要性が確認された。2-2 節に例示したような量子技術におけるビジネスモデルを成功に導くためのエコシステムを早急に構築し、マーケットの予見性を高め、大きく民間投資を呼び込むことが肝要である。加えて量子技術の産業化においては、今後もいわゆる“冬の時代”が到来する可能性も示唆されており、そのような状況において、国が如何に支えられるかも重要である。
- またエコシステムの自律的な成長には、常に最新の利用環境等を整備していく、新たなユースケース・産業を作り出していくことが必要であり、そのような戦略の策定が必要である。またこの中で次世代技術への投資と転換も不可欠である。
- ワーキンググループの議論も踏まえ、そのために重要なポイントは以下と言える。

- ・我が国技術の普及、特に国際標準化（デファクト・デジュールともに）、アーキテクチャーの共通化やプラットフォーム構築を進め、構築したプラットフォームモデルをユースケース含めて海外へと売り込んでいく。
 - ・「ヒト」の観点では、量子人材育成の裾野拡大と国際展開力の強化のため、裾野拡大、実践力強化、国際展開を支える人材循環の仕組みづくり等、
 - ・「モノ」の観点では、量子技術の実装基盤と国際競争力を支える戦略的拠点の構築のため、ハードウェアとソフトウェアを一体とした基盤整備、拠点強化、および国際連携による社会実装の加速等、
 - ・「カネ」の観点では、量子エコシステムを支える持続可能な資金循環と市場創出戦略のため、ユースケース創出、性能評価基盤、民間投資支援による市場形成と成長促進等、
- がポイントとなる。
- 更に上記の実現のためには、例えば以下のような取組が必要になる。
 - ・量子技術は単体ではその価値を発揮できないことが多く、古典技術とのハイブリッド等産業利用に必要な技術を開発していく。
 - ・知財化、標準化等のオープン・クローズ戦略を各技術要素で策定していく。例えばプラットフォーム型の標準の場合、デファクトを中心に考える事が重要である。デファクトの獲得には充実したユースケース、すなわち多くのユーザの利用が不可欠であり、ユースケース創出のための取組の重要性は更に高くなる。
 - ・エコシステム構築のための人材を、必要なレイヤーを特定しながら育成していく。
 - ・国内技術やプラットフォームの他国への導入を支援するために、政府や組織間の海外連携を更に活発化していく。
 - これらの取組は、エコシステムのグローバル化にも直結する。例えば、
 - ・ハードウェア・ソフトウェア・部素材等、我が国の技術を高度化、更には国際標準化していくことで、グローバルエコシステムの主要プレイヤーとしての立ち位置を更に強固にしていく。
 - ・充実したテストベッド、拠点や豊富なユーザ、サプライチェーンといった世界トップクラスの研究開発・ビジネス環境を整備することで、グローバルな人材・企業を呼び込んでいく、等である。
 - 今、産学官がこれまで以上に密接に連携し、上記の取組を進めることで、これまでの量子技術における我が国の技術的優位性を保ちつつ、民間投資の増加とマーケット構築を加速し、Quantum-Ready な日本を目指す。

3. 量子産業の創出・発展のための量子エコシステム構築に向けた取組について

3-1. 量子人材育成の裾野拡大と国際展開力の強化（ヒトの観点）

（1）量子人材育成の裾野拡大

＜現状・課題＞

- 量子技術の産業化に向けては、研究・開発・事業化に至るまで、技術をビジネスに結びつけるまでの各段階をフォローする人材が必要であるとともに、周辺技術である生命科学や材料科学、情報工学等の幅広い知識も必要である。
- 計測機器が単純な使用部品のモジュール化による小型化から MEMS²⁵や FPGA²⁶を使用した小型化や集磁、集光方法も多岐にわたり高度化する等の状況にもあり、高度かつ多様な知識を適時にキャッチアップしていくことが必要である。
- 日本国内においては、「研究」領域で競争力を持つ人材は一定数存在するものの絶対数として不足している。さらに要素技術を機器やデバイスとしてインテグレートする人材や、技術の製品化に向けた開発人材・産業人材が不足している。
- また、事業化・海外進出に向けて量子技術の特徴や有用性・優位性を理解した経営、マーケティング、技術マネジメント、戦略企画立案を行えるグローバルビジネス人材も不足している。
- こうした多様な人材を人材育成や異業種からの人材流動性の向上を図りながら整備することが必要である。
- しかし現時点で、育成すべき人材層や人数の目標が明確に設定されておらず、一貫した育成戦略やキャリアパスも不十分である。
- また、量子技術の裾野を広げる上で重要な大学生・高専生向けの教育について、SIPでは「産学連携による量子人材育成プログラムの開発と実践」や「量子コンピュータを活用した新事業を共創する研究開発基盤」という人材育成のための取組が進められ、一定の成果が出ているものの、今後さらに標準カリキュラムの普及を広げ、産業界のニーズを反映して更新していく体制を構築することが課題である。

＜具体的な取組＞

- 【短～長】²⁷QIHに指定された国研・大学を中心として量子技術に関する量子人材の育成を強化する。また、量子コンピュータ、量子通信・ネットワーク、量子センシング／量子材料といった各領域の枠を超え、また、量子以外の分野からの参入ができる、量子技術を学ぼうとする学生や産学の研究者が参加できるサイエンススクール等の機会の持続的な開催、持続的な量子技術分野の人材層の強化に役立てることを目的とした、主に高等教育段階における、量子技術を体系的に学習できる教育コンテンツ作成といった教育環境整備の拡充、こうした取組を通じた量子技術の研究開発等に携わる専門

²⁵ MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems.

²⁶ FPGA: Field Programmable Gate Array.

²⁷ 【短】、【中】、【長】:それぞれ短期的（1～3年）、中期的（～5年）、長期的（～10年）な対応が必要な取組であることを示す。

的な研究者・技術者や複数の分野に長けた人材の育成、さらには分野融合的な研究開発を促進する。

- 【短】コンピュータ分野においては、NEDO 懸賞金活用型プログラムにおける量子分野以外の専門家や基礎知識を有する学生等を対象とした教育プログラムの提供、情報処理推進機構の未踏ターゲット事業におけるソフトウェア人材の育成とキャリアパス形成支援、さらには大学や国研等におけるコンピュータを扱うことのできる人材育成プログラム等を活用して、量子コンピュータ分野における産業人材含む人材の裾野を拡げるとともに、専門性の向上に取り組む。産業人材に関しては、例えばAI 含むデジタル分野等の他分野の人材の活用が企業にて積極的に取り組まれるように量子分野のビジネス価値を向上させていく取組を促進していく。
- 【短～長】セキュリティ・ネットワーク分野においては、NICT の量子 ICT 人材育成プログラム「NICT Quantum Camp」による、日本の量子通信に関する研究や技術開発を担う量子ネイティブ人材の育成に取り組む。
- 【短】量子技術の次世代を担う人材を育成するため、Q-LEAP により共通的な教育プログラムや、教育機関ごとの特色や独自性を生かした各種プログラムの開発を推進する。
- 【短～中】国研や大学所属の研究者によるスタートアップ創業・兼業をやりやすくするための制度や、アカデミアと産業界間の人材の流動性を向上させる制度を検討する。
- 【短～中】産学官の連携により、今後必要となる量子人材の層別と育成目標（人数・スキル領域）を早急に明確化するとともに、育成に向けた施策（教育・実践機会・支援制度等）を体系的に展開し、育成後のキャリアパスも含めた環境整備を進める。
- 【中～長】大学生・高専生向けの標準カリキュラムを全国に普及させ、量子教育の裾野を広げるとともに、技術動向や産業界の意見を反映した継続的なカリキュラム改訂に取り組む。

（2）国際展開力の強化

＜現状・課題＞

- 量子人材は各国で奪い合いの状況である。海外諸国と比較して待遇面や市場としての魅力度で一部見劣りする我が国では、人材育成・採用した後の人材維持（人材流出）の懸念も大きい。また海外人材の獲得や、流出する海外人材の我が国への取り込みも重要である。

＜具体的な取組＞

- 【短～長】国内人材の確保と海外人材の取り込みのために、人材育成・採用の基盤として日本における研究開発環境および市場のグローバル価値を向上し、研究開発環境および市場としての魅力を高めていくとともに、その魅力について海外へ積極的に売り込み・発信をしていく。

3-2. 量子技術の実装基盤と国際競争力を支える戦略的拠点の構築（モノの観点）

（1）テストベッド環境の充実化

＜現状・課題＞

- ハードウェアや部素材、ソフトウェアの開発およびユースケースの創出に向けては、大企業だけではなく中堅企業やスタートアップ等も含めて多様なプレイヤーの参画が重要である。かつ、これらの開発には量子コンピュータ関連設備の使用が必須であるが、特にスタートアップにとってはそのための大きな投資が事業者にとってのハードルとなっている。
- この開発環境への投資ハードルを下げるために、常に最先端のスペック・種類を持った計算基盤（テストベッド）の提供が重要である。またその際、国内外の産学からの要望の聞き取りや技術開発動向の検証等を行った上で、整備するテストベッドの性能を決定することが重要である。
- 量子暗号通信の早期実用化のために、重要秘匿データを保有する首都圏以外の拠点のユーザーも接続可能な QKD テストベッドを整備し、ユーザーニーズに応じた多様なケースの実証検証により運用法や利活用法の知見を蓄積することが重要である。

<具体的な取組>

- 【短～長】産総研 G-QuAT について、量子コンピュータの産業化・大型化等のための技術開発の国際拠点として、計算資源を拡充するとともに、評価設備や計測施設、インキュベーション等の周辺施設の拡充を更に進めて行く。特に計算資源に関しては、複数の量子コンピュータと大規模 GPU 等の古典コンピュータから成る大規模ハイブリッド計算環境を整備し、世界に先んじてビジネスユースケースを創出していくとともに、アジアやグローバルサウス等の新規市場開拓の橋頭堡としていく。またスタートアップ含む産業界、アカデミア問わずに、各装置・施設のビジネス利用を含めた利用が容易にできる体制構築を進めていく。例えば令和6年7月に結ばれた G-QuAT と量子技術による新産業創出協議会(Q-STAR²⁸)との間で本拠点を活用する共同研究契約や、海外の量子関連企業との MOU の締結等産業利用に向けた動きが進んでいるが、このようなグローバルな産学連携を更に活発化させていく等、民間による活用と投資を呼び込んでいく。これらにより世界有数のグローバル拠点として、グローバルネットワークを形成し、人・企業の流れを促していく。
- 【短～中】SIP 第3期量子課題で開発中の理研、QST 等のテストベッド環境の拡充やユーザーフレンドリーな利用体制の構築を引き続き進めるとともにインフラ（基盤施設）の整備も進めていく。
- 【短～長】NICT（小金井）を中核とした量子暗号通信テストベッドである東京 QKD ネットワークを活用し、引き続き実証実験を実施するとともに、我が国における量子暗号通信網の早期社会実装を目指し、機密度の高い情報を保有する機関の拠点間（本店・支店等）で秘匿通信の有効性を検証するためテストベッドを拡充・高度化する。さらに、データを長期間安全に保管・利活用するための量子セキュアクラウド技術の研究開発を推進する。

(2) 重要部素材の国産化・サプライチェーンの強靱化

<現状・課題>

- 総じて、重要部品の国産化、サプライチェーンの強靱化等が共通した課題である。

²⁸ Q-STAR: Quantum Strategic industry Alliance for Revolution.

- 量子コンピュータに関しては、方式別にハードウェア構成や動作原理、動作環境等が異なることから、使用される部素材も基本的には方式毎に異なっているが、①チップ上に量子ビットを作りこむ超伝導方式とシリコン方式、②原子や光、イオン等の自然の仕組みを量子ビットに利用する冷却原子方式、イオントラップ方式や光方式では一部汎用的な部素材も存在する。
- 有力サプライヤがグローバルに散在しており、米国等の海外諸国においても一国だけでサプライチェーンが成立する国は皆無である。
- こうした中、チョークポイントとなり得る重要部素材の技術開発・製造の一部において日系サプライヤが高いシェアを占めている一方で、制御装置や冷凍機等の中核機能をなす装置群はさらに重要度が高いと考えられるが、冷凍機では海外メーカーが独占している状況で、制御装置では海外市場への展開はまだこれからという状況である。限られた少数のサプライヤに依存している重要部素材もあり、サプライチェーンの強靱化やコスト高の観点から産業化の障壁となり得る。
- 汎用性が高く、かつ日本として強みを有する部素材の開発を重点化しつつ、希少性の高い原材料（例：冷媒のヘリウム3）や地政学リスクのある原材料（例：中国のガリウム）等については、同志国からの調達を確保する必要がある。
- 量子暗号通信に関しては、装置の性能に大きな影響を与える重要部品（光子検出器等）の国産化が重要である。
- 量子センシングに関しては、一部の技術に重要な材料（炭素同位体等）の地政学リスクを含めたサプライチェーンの調査が必要である。例えば量子センシングについては、高品質なダイヤモンドの供給や、高精度な計測装置類の供給が課題となる可能性がある。
- 量子センサの材料となる人工ダイヤモンドについては、高温高压法、化学気相成長法、爆轟法等によって国内製造が行われている。ただし、現時点で原料または製品の多く（例：高純度の種結晶や特定の爆轟法ナノダイヤモンド）を米国、ロシア、中国からの供給に依存している。
- 量子センシングデバイスの製造に必要な計測装置類として、レーザー、光検出器、マイクロ波発生器等は国内でも製造されている。一方で、低ノイズのレーザーや単一フォトン検出器といったハイエンドの計測装置類については、ドイツや米国からの輸入に依存している現状がある。これらの装置は、極限レベルの高感度量子計測においては不可欠であり、その供給が制約されると量子センサの開発全般に影響を及ぼす可能性が高い。
- 量子材料に関するの大部分はまだ基礎研究の段階であるが、そのポテンシャルは高い。しかし、中国等の技術の追い上げは脅威であり、古くから主張されている我が国の材料研究に関する優位的な地位が危惧されている。

<具体的な取組>

- 【短～中】次世代の大規模量子コンピュータ開発に向けて、方式間の汎用性や日本が強みを有している部素材の開発について、国内サプライヤへの重点支援を行い、サプライチェーンの中で我が国技術の戦略的不可欠性と戦略的自律性を確保する。
- 【短～中】特に現在の量子コンピュータだけでなく、2030年頃の産業利用可能な次世代量子コンピュータに向けた部素材開発を、ある程度の予見性の中で支援対象を選定して進めて行く。支援対象の例として、冷凍機および冷凍機内の電子部品・ケーブル、レ

ーザーや非線形光学デバイス等の光学システム、光検出器、制御システム等が挙げられる。これら以外にも、我が国企業が有している技術を活用した部素材や製造装置等の開発・産業化に向けた調査や検討を進めていく。

- 【中～長】また単なる部素材の開発にとどまらず、ハードウェアベンダとも協力して、複数の部素材を一体化したコンポーネントの構築技術の開発や、量子チップから量子コンピュータを組み立てていく技術の開発等、日本が得意とするモノ作り技術を活用できる領域における技術開発や産業化の支援を検討する。
- 【短～長】日本単独ではサプライチェーンが成立しない領域の補完をするべく、海外サプライヤからの技術移転やライセンス供与、共同開発、人材交流等の連携を図る。そのため、例えば QDG、OECD GF-tech 等の国際枠組等を通じて、各国との連携を強化していく。この連携を有利にするためにも、戦略的不可欠性の確保は重要である。
- 【中】量子暗号通信に関しても、装置メーカーや部材メーカーの連携による重要部品の国産化に向けた研究開発を推進する。
- 【短～中】量子センシングに関して、重要部素材の継続的・持続的な確保が重要であり、供給の安定性の確保に資するため、着実な研究開発の実施やユースケースの拡大に取り組むとともに、地政学リスク含めたサプライチェーンの調査や、強靱なサプライチェーン構築に向けた施策の検討や最適なサプライチェーンマネジメントの検討に取り組む。
- 【短～長】経済安全保障等に関する戦略やガイドライン（国際連携・協力のあり方、輸出管理とクリアランス、支援すべき・保持すべき部素材・関連技術、研究インテグリティの確保等）をわかりやすい形で明らかにしていく必要がある。政府だけでなく、民間含む有識者の知見や Q-STAR 等からの提言等を取り入れつつ、その決定方法・普及策等に関する検討を早急に進めていく。また QDG 等の政府間の国際枠組や各国・地域の産業団体で構成される ICQIA²⁹等において、各国の強みを踏まえたサプライチェーンマッピングを作成し、チョークポイントを分析し、上記の安全保障や部素材支援の戦略作成等に活用する。

（3）ハードウェア・ソフトウェアにおける技術開発の推進

a. 量子コンピュータ

<現状・課題>

- 量子コンピュータのハードウェアについては、近年、誤り訂正に関わる重要な成果の報告が相次ぐ等、誤り訂正技術を実装した FTQC³⁰の早期実現を目指す動きとなってきた。
- 海外ハードウェアベンダは 2030 年頃での初期段階の FTQC(アーリーFTQC)実現に向けて野心的な技術開発ロードマップを示している。
- 日本のハードウェアベンダは一定の技術力を有しており、今後の FTQC 時代において優位なポジションを確立できる可能性がある。

²⁹ ICQIA: International Council of Quantum Industry Associations.

³⁰ FTQC: Fault Tolerant Quantum Computer. 誤り耐性量子コンピュータ。

- ソフトウェアについては、今後のハードウェアの性能向上と、それに対応するユースケース拡大に伴って、ソフトウェア市場も今後拡大することが見込まれており、国内外で開発が進められている状況である。大手企業における量子システムアーキテクチャの垂直統合だけでなく、水平分業も進んでいくと想定する。
- これまで方式・プロセス毎に開発していたソフトウェア製品については、「汎化（方式依存の脱却）」と「統合（プロセスの統合）」へと向かっていくことが想定されている。ミドルウェア含むソフトウェアには、誤り訂正含む量子ビット制御やジョブスケジューラ等の多くのレイヤー・領域がある。国内には有望なソフトウェア企業が一定数存在するものの、リソースは有限である。
- また量子コンピュータは単体では能力を十分に発揮しないため、AI 含めた古典コンピュータとのハイブリッド利用を進める必要がある。また量子コンピュータの高度化には半導体やフォトニクスといった他分野との連携・融合が不可欠である。

<具体的な取組>

- 【短～長】 課題解決のため、ハードウェア、システムレイヤーとの連携・領域横断的な取組が求められる。
- 【短～中】 物理量子ビットから論理量子ビットへの転換を見据えた研究開発体制を強化し、国際的に進む技術開発の潮流に対応するため、理研を中核とする QIH のリソースと知見を結集し、量子チップの大規模化や誤り訂正を含む中核技術の確立を目指したフラグシッププロジェクトを新たに創設する。
- 【短～中】 産業利用可能な次世代量子コンピュータの実現に向けた、主要ハードウェアベンダへの支援とサプライヤとの協業を容易とする場や機会を形成し、国内事業者の技術開発力の向上および製造体制の構築を図る。開発すべき技術としては、物理量子ビット数の大規模化、計算操作時等のエラー率低減および論理量子ビット作成・高度化等によるゲート数増加に関するものが例として挙げられる。アカデミアが培ってきた技術を産業界に移転していくこと等で、これらを可能にする。
- 【短～中】 ハードウェア性能だけでなく、事業化に求められる低コスト、高品質、安定性等に加え、経済性や低環境負荷といった観点から、既存のサプライヤやシステムベンダとの共同による部素材やハードウェアシステムの開発に取り組む。産業化支援を行う方式は、技術開発の動向と我が国技術の習熟度等より決定する。
- 【短～長】 ハードウェア方式に依存しない各方式共通基盤となるソフトウェア開発に取り組む。ユーザが古典と量子を気にすることなく利用できるユーザビリティとアクセサビリティを実現するために、疑似アニーリング等を含む複数の量子コンピュータや古典コンピュータのハイブリッド利用を可能にするソフトウェアを開発する。これらや上述のテストベッド環境を活用して、様々な産業ユースケースを世界に先駆けて作り込んでいく。有限なリソースを有効利用するためにも、最新の国際的な開発動向を常に調査し、開発すべきレイヤー・領域を特定していく。国際標準化活動とも連動させることで、我が国技術の国際標準化（デファクト化含む）も目指していく。
- 【短～中】 このとき、産業利用可能な量子コンピュータが利用できるようになった時に備えるために、計算を行うコンピュータの性能や種類（古典、量子含む）が変化した場

合でも、これまでのプログラム技術を可能な限り継続して利用できるソフトウェア・計算環境を開発する。

- 【短】様々なプログラムやソリューションが選択肢としてある中、それらを可能な限り比較検証できる産総研 G-QuAT 等の計算プラットフォームを実現し、産学に広く開放する。
- 【短～長】量子コンピュータの産業化に我が国が先んじ、高いプレゼンスを得るために、ハードウェア・ソフトウェア・部素材開発が連携して産業化に向けた技術開発を加速させるための支援を行う。
- 【短～長】量子・古典ハイブリッド計算環境の構築や、量子コンピュータ用の半導体やレーザー等のフォトニクス技術開発を引き続き強力に支援していく。また AI や半導体の産業戦略とも連動した量子コンピュータの産業化の議論を深化させていく。

b. 量子セキュリティ／量子ネットワーク

<現状・課題>

- 量子暗号通信のハードウェアの開発や導入に向けた検証が国際的に進展する中で、量子鍵配送装置については、鍵生成速度や最大伝送距離等の観点から我が国のベンダが世界トップレベルの技術を有しており、装置の商用化も実現している。しかしながら、社会実装に向けては、通信距離及び通信速度の更なる向上や、広域網を中継・制御するネットワーク化技術の確立のほか、データ通信回線との統合や相手認証技術等の技術開発が必要である。また、量子暗号通信の社会実装を加速化するため、大規模な量子暗号通信ネットワークの運用管理技術や、量子暗号通信サービスを円滑に利用できるようにするためのアプリケーション等の開発が必要である。
- また、衛星に搭載可能な QKD 装置等の研究開発と軌道上実証、さらに打ち上げ後は、地上系・衛星系のそれぞれの QKD ネットワークの連携技術を確立する必要がある。
- 量子インターネットの実現に不可欠となる量子中継については、我が国における量子中継技術等を世界トップレベルに引き上げるため基礎技術の研究開発を着実に推進することが重要である。

<具体的な取組>

- 【中】世界トップレベルの技術力の優位性を維持するために必要な、量子暗号通信の高速化、長距離化・広域化技術の研究開発を推進する。量子鍵管理ネットワーク高度化技術や多様なベンダの装置を相互接続する技術等の研究開発・国際標準化を進めるとともに、これら技術を検証するためにテストベッドを拡充・高度化する。通信インフラの共通化に向けて、次世代光ネットワークを含む古典データ通信網と量子鍵配送網の統合技術を確立するための研究開発を推進する。
- 【短～中】長期的な秘匿性を必要とするデータの利活用基盤とした量子セキュアクラウド³¹を用いた高精度情報処理基盤を開発する。秘密分散・ネットワークの符号化による秘匿通信の信頼性を向上する。

³¹ 量子セキュアクラウド：量子暗号技術と秘密分散技術を組み合わせることで、データの安全な分散保管を可能とするクラウドシステム。

- 【短～長】量子インターネット実現に向けて、量子もつれ光源、量子メモリ等の技術開発を推進する。また、光時計等による高精度な位相同期技術と量子ネットワークの融合、多者間量子通信、量子通信プロトコル等の基礎・基盤技術を確立するための研究開発を推進する。
- 【中～長】また、グローバル規模での量子暗号通信網構築のため、今後、宇宙戦略基金事業³²において、小型衛星に搭載可能な量子暗号通信装置等の開発を進めるとともに、実運用も含めた宇宙実証を行うことにより、距離によらない堅牢な量子暗号通信網の早期の実現を図る。

c. 量子計測・センシング／量子マテリアル

<現状・課題>

- 量子計測・センシングや量子マテリアルは様々な応用の可能性があるものの、多くの企業にとっては技術的なハードルが高く、新規参入が容易ではない。また、量子計測・センシング技術の特徴を生かすことで新規用途の潜在的なニーズが見込まれるが、ニーズとシーズのマッチングが十分ではない。加えて、既存技術により一定の市場ニーズが満たされている中で量子計測・センシングや量子マテリアルの優位性が十分に示すことができていない、あるいは既存の製品に対する優位性についての認知度が低い傾向にあることから、ユーザ企業を発掘しきれていないのが現状である。

<具体的な取組>

- 【短】超高感度電流計測、超高精度時計、脳磁・心磁計測、超高感度MRI³³、高精度加速度計、新機能イメージング等の多様な応用を目指した研究開発を推進する。
- 【短】幅広い産業界に対し量子計測・センシング技術の利活用を広めるため、技術開発と合わせ、これらの技術の活用・実証を進めるためのテストベッド整備等を進める。また、テストベッドの利用機会を提供することで、機器の利用に係る技術やノウハウを広める。
- 【短～中】技術の普及に向けて、性能を追求する基礎研究に加え、小型モジュール化やチップ化等、実用化に落とし込むためのインテグレーション技術の開発を推進する。
- 【短～長】量子センサの製造に強みを持つ機関や、その利用・実用化に向けた研究開発に強みを持つ機関が分散している現状を踏まえ、上述の取組を加速させるため、機関間連携を促し分野全体での研究開発を強力に推進する中核的な機能を構築する。
- 【短～長】量子マテリアルは量子技術領域全般を下支えする極めて重要な領域であるとともに、各領域のサプライチェーンの最上流に当たる可能性があるため、チョークポイントとなりえる研究分野である。トポロジカル材料やツイストロニクス等量子マテリアルの研究成果を量子研究に活用する応用研究も萌芽してきている中で、計測技術まで含めた継続的な材料研究への支援を行う。

³² 宇宙戦略基金事業：産学官による宇宙活動を加速するため、民間企業や大学等が複数年度にわたって大胆に技術開発に取り組めるよう、令和5年度に宇宙航空研究開発機構に創設された基金事業。

³³ MRI: Magnetic Resonance Imaging. 核磁気共鳴画像法。

(4) 標準化戦略の策定と支援

<現状・課題>

- 我が国技術の優位性を確保するための標準化戦略の策定と実際の標準化を担う標準化人材が不足している。
- 量子コンピュータに関しては、前述した通り、対象に応じた異なるアプローチ・戦略が必要である。部素材やハードウェアにおける標準化は、従来型の品質基準・評価手法・ベンチマーク等が中心となり、デジュール化を目指していくことが基本となる。他方、ソフトウェア、ミドルウェアやプラットフォームにおいては、ベンチマーク等のデジュール化と並行して、多くのユーザ利用等に依拠するデファクト化を目指すことが重要である。技術開発を連動した標準化を狙うレイヤー・領域等の選定や、デファクト化を実現するためのユースケースの充実化と実機によるその実現の支援がこれまで以上に必要である。
- センシングに関しては、IEC TC113（ナノエレクトロニクス専門委員会）における国際標準化活動の動向把握や、ISO/IEC JTC3 国際委員会への参画が重要である。産業技術総合研究所と量子科学技術研究開発機構等の連携による国際標準化活動への取組が必要であり、こうした動きも生まれつつある。特に、統一したルールで品質の評価が実現できる、量子計測やセンシングの性能等の評価手順等の国際標準化は重要である。また国際標準化を進めるうえで、量子センサや量子材料の供給体制の整備も重要である。
- 量子暗号通信のグローバル市場への展開に向けて、我が国では、デジュール標準を策定する ITU³⁴等における国際標準化活動を積極的に推進してきており、引き続き国際標準化をリードすることが重要である。
- また、量子暗号通信装置のグローバルな社会実装を加速するため、QKD 装置の信頼性を高めるための実装安全性認証について、関係者が集まるフォーラム活動等を通じて、ユーザ企業やベンダ、研究機関、認証機関等の関係者間で議論を進め、QKD 装置の認証に必要な評価基準や評価方法等の策定に向けた作業を進めていくことが必要である。
- グローバルな実用化に向けては、量子暗号通信装置の調達先を自国・自地域内の企業に限定する措置をとる国・地域がありグローバル展開の課題となっている。

<具体的な取組>

- 【短～長】国際標準化活動（ISO/IEC JTC3 への対応、アルゴリズムのベンチマーク含めた日本の強みのある領域の標準化活動の推進等）による市場形成の加速と日本企業の市場占有率の向上を支援する。
- 【短～長】部素材、ハードウェア、ミドルウェア等各レイヤーにおいて、我が国技術と開発ロードマップ等を元にした標準化戦略の策定、および若手の標準化人材育成（エキスパートのみならず交渉を主導するネゴシエータも）の支援を行う。その際に、技術開発、知財化、標準化の連動とそれによるビジネス化を念頭においた戦略の策定等を行う。プラットフォームのデファクト化にも貢献する実機によるユースケース創出を支援する。

³⁴ ITU: International Telecommunication Union. 国際電気通信連合。

- 【短～長】国際競争力の強化に向けた ITU-T³⁵における量子暗号通信の国際標準化活動のイニシアチブを維持するための活動を推進する。また、量子暗号通信装置の社会実装および国際展開を加速するため、実装安全性認証に必要となる評価基準や評価方法等の策定に向けた取り組みを推進する。
- 【短～中】我が国の製品の国際市場への円滑な展開等を可能にするため政府間の対話を適時実施するほか、導入が見込まれる国に対する調査等を実施すること等を通じて国際展開を後押しする。具体的には、各国での量子暗号通信ニーズ、日本企業が展開する場合の要件調査・対応、ビジネスモデル検討、現地パートナー調査・育成等の事業展開のフィージビリティスタディを行う。

3-3. 量子エコシステムを支える持続可能な資金循環と市場創出戦略（カネの観点）

(1) マーケットの予見性を高めるユースケース創出

a. 量子コンピュータ

<現状・課題>

- 古典コンピュータに対するアニーリング方式や NISQ³⁶量子コンピュータの優位性／有用性や FTQC の実現時期といった実用性の証明が現状不十分であり、ビジネスインパクトや応用領域等が不明確である。特に耳目を引きやすいユースケースの創出は宣伝という面でも重要である。
- インパクトを図るための指標、ベンチマーキングの手法が確立されておらず、技術面のみならずビジネス性や社会的受容性の観点からの有用性・優位性を図ることができない状況である。

<具体的な取組>

- 【短～中】多様なユーザ企業が利用できる量子／古典コンピュータのハイブリット環境の整備を行い、ユーザが様々な量子コンピュータ、アルゴリズムやライブラリ等にアクセスすることで、高度なユースケースを開発する。また CAE³⁷等のユースケース創出が期待されているが、アルゴリズム・ソフトウェア開発が不十分な分野の特定や支援を検討する。
- 【短～長】同時に、技術課題等をハードウェアベンダやソフトウェアベンダにフィードバックするにあたり、ハードウェア等の性能（TRL）やユースケースの価値（BRL³⁸等の XRL³⁹）を評価するためのベンチマークを確立することで、競争原理を誘発しつつ、次の開発につながるエコシステムを形成する。

³⁵ ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector. 国際電気通信連合電気通信標準化部門。

³⁶ NISQ: Noisy Intermediate-Scale Quantum Computer.

³⁷ CAE: Computer-Aided Engineering.

³⁸ BRL: Business Readiness Level. ビジネス成熟度。

³⁹ XRL: X Readiness Level. TRL、BRL だけでなく、ガバナンス成熟度レベル（GRL: Governance Readiness Level）、社会成熟度レベル（SRL: Social Readiness Level）、人材成熟度レベル（HRL: Human Resource Readiness Level）の 5 つを指す用語。

- 【短】また、既存産業のプレイヤーやユーザ企業、ソフト・ミドルウェア企業等の新規プレイヤー獲得のために、これまで量子技術に無縁であった層への普及啓発活動（例えば懸賞金事業）、集積の場の設定（コミュニティ形成、ワークショップ開催等）等を行う。これにより、これまでとは異なる分野でのユースケース事例を創出する。

b. 量子セキュリティ／量子ネットワーク

<現状・課題>

- 民間企業による自立的なビジネス開始に向けて、想定される QKD 等の量子暗号通信のサービス利用者（金融、創薬、製造、政府・地方公共団体等）やサービス提供者（装置メーカー、通信事業者、クラウド事業者等）が連携し、ユースケースや社会実装に向けた課題を明確化するとともに、国際的な動向も踏まえ、課題等を検証するためテストベッドを拡充・高度化し、サービスの具体的な絵姿、ビジネスモデル等の具体化を進める必要がある。また、耐量子暗号（PQC⁴⁰）技術の相補的な利活用の検討も重要である。

<具体的な取組>

- 【短～中】量子暗号通信の早期実用化に向けた政府（安全保障・行政）、創薬、金融、製造等の分野におけるアーリーアダプタの取り込み、量子暗号通信により保護すべきデータ、ユースケースや社会実装に向けた課題を明確化するとともに、ビジネスモデルの創出・実証のためのテストベッドの高度化・拡充により社会実装に向けた取り組みを加速する。
- 【短～中】市場拡大の観点から量子暗号通信装置の安全性認証制度の確立を進めるほか、機敏な情報を扱う分野における導入を円滑にするため、利用の拡大を促す仕組みの検討を推進する。

c. 量子計測・センシング／量子マテリアル

<現状・課題>

- 研究開発の進展により、健康・医療、エネルギー、自動運転、防災、資源探査等の様々な領域における利活用の可能性が広がっている。こうした中で、産業化に有効なユースケースの探索および、現場へ導入しようとする民間企業やアカデミア等が実環境に近い状況で機器の機能や性能を評価し、また、運用のノウハウを獲得するといった機会の提供等が重要である。

<具体的な取組>

- 【短～中】ユースケースの創出に向けて新規デバイスの開発に取り組むとともに、効果的な開発に資するためセンサ技術や部素材技術に強みを持つ研究機関・大学の連携強化を促進する。
- 【短～中】開発したデバイスの利用可能性を広げるため、国立研究開発法人等へのテストベッドの整備を進めるとともに、これを通じたユースケースを開発し、社会実装に向けた取り組みを加速する。

⁴⁰ PQC: Post-Quantum Cryptography.

(2) 投資環境の整備

<現状・課題>

- 日本の量子技術系スタートアップは、世界に先駆ける高度な技術を有しているものの、外部資金の獲得が難しく、成長の足かせとなっている。特にマネタイズまでの時間が長期に及ぶことや、海外を含む投資家ネットワークとの接点が乏しいことから、ベンチャーキャピタル（VC）等による積極的な投資が十分に行われていない。このことは、我が国の技術のグローバル価値を高める上でも大きな課題である。
- 大企業とスタートアップとの連携や、大企業によるスタートアップへの戦略的投資が進んでいないことも、課題である。

<具体的な取組>

- 【短～中】グローバル含めた VC 関与による量子インキュベーションプログラム（量子ビジネス立ち上げ支援等）を行う。
- 【短～中】予算支援だけでなく、政府調達等売りに寄与する支援策（例えば研究開発調達に類する制度）や、SBIR⁴¹制度の活用、政府や地方自治体、公的研究機関等がアーリーアダプタとして利用を推進し初期需要の喚起や事業拡大を支援すること等を検討する。
- 【短～長】大企業とスタートアップとの連携や、大企業によるスタートアップへの戦略的投資を促進するため、インセンティブ設計（税制・補助等）の導入、実証フィールドの整備等を進める。

(3) アカデミアと産業界の連携と国際協調の強化

<現状・課題>

- 基礎科学研究、応用技術開発、そしてビジネス化の距離が近接化するなかで、基礎科学と産業界の連携と協調がこれまで以上に必要である。
- 次世代技術の基礎的な研究開発およびそのための人材育成は、産業界の資金の多寡に関係なく継続的に続ける必要がある。
- またその際、同志国との国際的な協力体制の構築は不可欠であり、産学官それぞれのレイヤーで活動を推進する必要がある。

<具体的な取組>

- 【中～長】国プロジェクトの共同実施等による成果の産業界での早期活用とその利益のアカデミアへの再投資等を促進する。
- 【短～長】次世代技術の研究開発について、安定的・継続的な支援を行う。
- 【短～長】同志国との協力覚書の締結を一層推進し、国際的な量子技術分野における協力関係の構築・拡大を着実に進める。

⁴¹ SBIR: Small/Startup Business Innovation Research.

4. 量子技術イノベーション拠点 (QIH) の連携強化に向けた取組について

4-1. QIH の現状および課題

(1) QIH の現状

- 2015 年頃を皮切りに欧米が立て続けに量子国家戦略を策定し、その中で量子技術に関する拠点形成が急速に進展し、優れた研究者を惹きつける舞台として機能し始めた。
- 我が国においては量子技術に関する研究活動が比較的少数の研究者が大学・研究機関・企業等に分散している、というのが当時の状況認識であった。これを踏まえ、国内の拠点形成が必要との認識のもと「量子技術イノベーション戦略」において「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）」形成の必要性が謳われた。
- 同戦略では拠点の要件の例として①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、②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発展が期待される技術領域、③国内外の企業等から大きな投資が期待される、また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、④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、の4点を挙げ、これに適合すると考えられる研究機関や大学を QIH として認定した。
- 当初は8拠点で活動を開始した QIH は、現在では11拠点（国立研究開発法人5、大学6）にまで発展し、各拠点を中核とした研究活動に加え、理研をヘッドクォーターとする連携体制のもとで、国際連携や産官学連携、知財・国際標準化や人材育成等の共通課題の共有等の取組を進めている。
- また、技術の社会実装を進めるうえで重要となる産学の連携において、QIH と同時期に創設された量子技術に関する産業団体である Q-STAR や産学連携団体である量子フォーラム等との協力体制が構築されている。
- さらに、国際連携活動においては QIH が主催する国際シンポジウム「Quantum Innovation」が主要国の量子技術に係る産官学の情報共有やネットワーキングとしての場としての役割を果たす等、当初期待された拠点としての機能が発現している。
- 一方、「量子産業の創出・発展に向けた推進方策」が示すとおり、量子技術の著しい進展や、量子により駆動される新産業を目指した国際競争の激化等、情勢が大きく変化している。
- 米国のイリノイ量子マイクロエレクトロニクスパーク（IQMP⁴²）の新設や、英国の国立量子コンピューティング・センター（NQCC⁴³）整備や EU における高性能コンピューティング共同事業（European High-Performance Computing Joint Undertaking）の推進等、主要国が研究開発や産業化の体制強化を急速に進めており、日本もその波に乗り遅れることなく、競争力を継続的に向上させていかなければならない。
- そのような中で、我が国の量子技術の研究開発・産学連携・人材育成・国際連携の中核的な役割を担う QIH への期待は大きく、その機能の持続的な強化を図っていく必要がある。こうした認識のもと、各拠点の強みを核とし、それぞれの自主性・自律性を活かし

⁴² IQMP: Illinois Quantum and Microelectronics Park.

⁴³ NQCC: National Quantum Computing Centre.

ながら活動を発展させ、国内外のゲートウェイとしての役割を十全に発揮せしめるために、これまでの約5年間のQIHの活動を通じ認識された課題を整理のうえ、今後特に重点的に取り組むべき課題を以下に示す。

(2) QIHの強化・発展に向けた課題

- QIHでは理研のヘッドクォーター機能のもとで「量子技術イノベーション拠点推進会議」および4つの分科会（国際連携分科会、知財・標準化分科会、産官学連携分科会、人材育成分科会）を設置し、そこでの議論を通じ共通課題についての協力体制を構築しているが、今後さらにその活動を広げていくことが必要である。
- 分科会の活動に取り組むための人的リソースや活動費用は拠点それぞれの財源が主となっており、安定性や発展性の制約となっていることに留意が必要である。
- 拠点間の連携促進や、拠点も含めたオールジャパンの量子技術の発展のために、QIH全体として取り組むべきテーマや、これを踏まえた各拠点の役割分担の明確化、保有する研究設備についての情報共有や相互利用の推進、拠点内外の様々なユーザを念頭に置いたテストベッドの整備等、研究ネットワークとしての有機的な連携を一層進めていくことが必要である。また、量子技術の発展や実用化促進のため、拠点以外のアカデミア・研究機関や民間企業との連携や、量子以外の分野との連携を広げていくことも重要である。
- 研究活動における拠点間連携も重要である一方で、研究拠点のマネジメントや官民コンソーシアムの形成等、拠点を持続的に運営・発展させていくことが必要。そのための拠点ごとの工夫やノウハウ等についてはオープン化が図られることが望ましい。
- 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。一方で、量子技術を学ぶことのできるアカデミアも数が限られていることから、異分野からの人材の取り込みやリスクリング環境整備等、QIH各拠点の連携による効果的な人材育成方策の検討が必要である。
- 量子技術の発展や市場開拓・市場参入のためには産官学のあらゆるレベルでの国際連携や国際的な情報発信が重要。我が国において毎年度開催している「Quantum Innovation」もその重要な機会であり、これを有効に活用していくことが必要である。
- 上述のようなことに取り組むために、重要技術の核となる機関をQIHに取り込むことが必要。その観点から現行の11拠点に不足する機能があれば、拠点の追加が必要である。

4. 2. 強化すべき具体的な取組

(1) 拠点間連携強化

- 【短～中】拠点間の連携を強化していくためには、目指すべき方向性や、それを実現するための各拠点の強み等について、QIH全体として共通認識を持つことが重要である。このため、QIH全体のミッション策定、拠点のミッションの明確化・共有、保有する研究リソース、運営ノウハウ等の共有に取り組む。
- 【短～中】また、拠点間の研究活動の連携やアライアンス構築を進めるために、その核となる設備の整備・共用化や、これを通じた共同研究を促進する。

- 【短～中】こうした活動に安定的に取り組んでいくために、拠点の活動の維持・発展のための人的リソースや活動経費を確保する。
- 【短】QIHの強化を図るため、量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスや、光を駆使した中性原子による量子情報処理技術等の光量子技術をはじめとした量子技術に強みを持つ京都大学を、新たに拠点に認定する。

(2) 国際連携強化

- 【短～長】我が国の量子技術の発展のためには、国際動向を把握するとともに、国際的な人材流動を促進するため、同志国の大学・研究機関、企業と戦略的な共同研究を実施する等、国際連携を積極的に推進する必要がある。こうした観点から、主要国の量子関係者が一堂に会する国際シンポジウム「Quantum Innovation」が外交の場として貴重な機会となり、これを積極的に活用し国際連携を進める。

(3) 人材育成

- 【短～長】量子産業の創出に向け、人材の需要は一貫して増加傾向にある。こうした需要に対応する量子人材の増加のための方策として、異分野からの参加も念頭に置いた学部生・院生向けサイエンススクールや、社会人へのリスキリング機会を提供する。

5. おわりに

本方策は、量子技術に関する既存の3戦略を補完するものとして、特に量子技術のエコシステム構築に関する内容を中心に、量子技術イノベーション会議において取りまとめたものである。

本方策では、目指すべき「量子エコシステム」を、「量子技術に関わる企業や組織が相互に関連し合い、自然に育つ自立的なネットワーク」と定義した。この実現に向けて、量子技術イノベーション会議の下に量子エコシステム推進ワーキンググループを設置し、量子技術の産業化等に関する有識者とのインタビューや議論を実施した。その結果、ヒト・モノ・カネといったエコシステムを構成する資源の整備と、それぞれが繋がる仕組みの形成が、量子エコシステムの構築に重要であるとわかった。またマーケットの予見性を高め、民間投資を誘発するには、最終的に量子技術のユースケース創出が不可欠である。これに基づき、これら資源の整備とユースケース創出における現状・課題と必要な取組、ならびにエコシステムの基礎となる QIH 間の連携を強化する方策に関してまとめた。QIH を中心とした基礎技術開発と、ユースケース創出等の産業化に向けた取組はエコシステムの両輪である。

またエコシステムの成長期以降を見据え、古典コンピュータ等の計算資源だけでなく、バイオや AI、半導体、フォトニクス、マテリアル、GX といった他分野のエコシステムとの親和性にも着目しながら、エコシステムの裾野を拡げていくことも必要である。

もう一つ重要な視点は、経済安全保障である。本年度は、エコシステムの構築に関する議論を重ねてきたが、その中でも経済安全保障に関する意見も多くあった。量子技術が将来の国富を左右する重要技術であることを鑑みると、輸出管理や国際連携のあり方等、経済安全保障に関する国家としての戦略・ガイドラインは不可欠である。その決定方法・普及等に関しては、引き続きの議論と方策をまとめる必要がある。エコシステムの自由な発展と経済安全保障の確保とは相反する点もあるが、秩序あるエコシステムの構築には欠かせない要件である。

上述の議論等を受け、ユースケース創出に関しては、特に産業化に向けた技術開発競争が激化している量子コンピュータや量子暗号通信について、事業者のみならず制度等を所管する官庁も交えた議論が必要である。このため、産学官で構成する会議体を量子技術イノベーション会議内に新たに設置し、金融や創薬をはじめとする量子技術の利活用が期待される分野のユースケース創出に向けた活用方策の具体化等について検討し、量子コンピュータや量子暗号通信の社会実装を早急に進めていく。

量子技術に対するエコシステムの自発的な成長は、「量子未来社会ビジョン」で掲げた 2030 年目標の実現に向けた量子産業の創出を、世界に先駆けて成し遂げるために不可欠であり、これにより量子技術による社会変革の恩恵を得ることができる。目まぐるしく変動する世界の量子業界の中で、我が国のイニシアチブを確保するには、戦略含めた我が国の方向性が常に適切なものでなければならない。

本年は国連が定める「国際量子科学技術年」である。まさに本年を「量子産業化元年」と位置づけ、産業化に向けた取組を大きく加速化すべきである。本方策はこれまでの戦略を抜本強化するとともに、産業化に向けた最初の第一歩を踏み出す一助となるべく作成した。今後も量子産業の創出と発展に向け、最新かつ適切な戦略・方策の改定・策定に関する議論を引き続き進めていく所存である。

本方策はその最初の第一歩を踏み出す一助となるべく作成したが、量子産業の創出と発展に向け、最新かつ適切な戦略・方策の改定・策定に関する議論も引き続き進めていく所存である。

【スケジュール】 * 敬称略、所属等は当時のもの。

- ・ 第1回 令和6年8月30日（金）
（議題）量子エコシステム推進ワーキンググループのキックオフについて
- ・ 第2回 令和6年9月18日（水）
（議題）量子エコシステムの定義、本WGが対象とする範囲の議論
- ・ 第3回 令和6年9月19日（木）
（有識者ヒアリング）
 - 草薙 尊之 クオリップス株式会社 代表取締役 社長
- ・ 第4回 令和6年10月10日（木）
（有識者ヒアリング）
 - 新関 和哉 LQUOM 株式会社 代表取締役
 - 廣瀬 雅 株式会社 Nanofiber Quantum Technologies CEO
 - 高瀬 寛 OptQC 株式会社 代表取締役
 - 綿貫 竜太 Qubitcore 株式会社 代表取締役 CEO
 - 松下 雄一郎 株式会社 Quemix 代表取締役 CEO
 - 神長 輝一 株式会社 Type-I Technologies 代表取締役
- ・ 第5回 令和6年10月16日（水）
（有識者ヒアリング）
 - 鮫島 昌弘 ANRI 株式会社 ジェネラルパートナー
 - 山城 悠株 株式会社 Jij CEO
 - 千先 拓志 Softbank Investment Advisers UK Limited Investment Director
 - 蔭山 裕行 Beyond Next Ventures 株式会社 ベンチャーキャピタリスト
 - 太田 裕朗 早稲田大学ベンチャーズ株式会社 ジェネラルパートナー
 - 岡崎 裕介 住友商事株式会社 デジタル戦略推進部 QX チームリーダー
- ・ 第6回 令和6年10月22日（火）
（海外量子団体代表インタビュー【Q-STAR 主催】）
 - Lisa Lambert QIC
 - Thierry Botter QuIC
 - Celia Merzbacher QED-C
- ・ 第7回 令和6年10月28日（月）
（海外有識者インタビュー【Q-STAR・G-QuAT 主催】）
 - 田中 晃 Classiq General Manager
 - Hanhee Paik IBM Quantum Japan
 - 野口 倫稔 Zurich Instrument

⁴⁴ 第22回 量子技術イノベーション会議（令和6年12月23日）資料2-1 量子エコシステム推進WG活動報告より抜粋して作成。

<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/22kai/22kai.html>

○Hari Ramachandran Xora Innovation

○杉浦 敦 Oxford Quantum Circuits カントリー・マネージャー

・第8回 令和6年11月7日(木)

(海外有識者インタビュー【Q-STAR・G-QuAT 主催】)

○Olivier Tonneau Quantonation

○Anca Albu QAI Ventures

○中原 幹夫 IQM Quantum Computers

○Jason Lynch、Niall Keegan Equal 1 Laboratories

・第9回 令和6年11月28日(木)

(有識者ヒアリング)

○山田 昭雄 日本電気株式会社 Corporate SVP 兼 AIテクノロジーサービス事業部門
兼 AI Technology Officer

○佐藤 三久 理化学研究所 計算科学研究センター
量子HPC連携プラットフォーム部門 部門長

○寺部 雅能 デロイトトーマツコンサルティング合同会社 量子技術統括

○嶋田 義皓 ソフトバンク株式会社 先端技術研究所 担当課長

○小西 哲之 京都フュージョニアリング株式会社 CEO

○木村 紋子 株式会社天地人 執行役員 CEO オフィスマネージャー

・第10回 令和6年11月28日(木)

(有識者ヒアリング)

○松尾 正克 デロイトトーマツサイバー合同会社 マネージングディレクター

○伊藤 陽介 キュエル株式会社 代表取締役

○水野 弘之 株式会社日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 主管研究長

○平岡 卓爾 株式会社 Fixstars Amplify 代表取締役社長 CEO

・第11回 令和6年12月10日(火)

(有識者ヒアリング)

○竹森 祐樹 株式会社日本政策投資銀行 業務企画部イノベーション推進室長

(議題) 量子エコシステム構築に係るまとめの議論

・第12回 令和6年12月10日(火)

(議題) 構成員からのひと言

【成果まとめのポイント】

エコシステムを自然に育つネットワークと捉えた。その為には人、場所(物)、お金が必要

■人

(国内)

- ・ 人材の流動性を強化、特にアカデミア⇄産業界の双方向性

(国外)

- ・ 実際に海外に出てネットワークを作る、クラブメンバーに入る支援が必要
- ・ 量子産業団体や大使館を通じた、海外への積極的な売り込みが必要
- ・ 量子技術が実際に産業で使われていることを発信する(ビジネスユースケース)

- ・ 日本の量子エコシステム一体としてプレゼンスを出す

■場所（物）

- ・ 量子コンピュータが不自由なく使えるインフラ、を国が支援する事を示す
- ・ 標準化については、国全体、政府が支援する、アーキテクチャーを先に示す
- ・ 拠点を一か所に集めることについては、継続議論。それよりもガバナンス
- ・ 産学官の戦略を実行する、ガバナンス体制の明確化、産業界はQ-STAR
- ・ 海外製品の幅広い取り込みと国内製品育成のバランス

■お金

- ・ 国が率先して最初のユーザになる
- ・ シンガポール Temasek のような自由度のあるお金の集め方、使い方を検討
- ・ 国の予算の縦割りを打破し、関連して使える様にする
- ・ 量子以外の予算を連携させる、例：スタートアップ支援
- ・ 規制により市場を形成させる

【有識者ヒアリングでの主な意見（抜粋）】

1. 量子エコシステム

- ・ 量子エコシステムは包括的な言葉であり、量子エコシステムの定義に合意することは重要
- ・ 日本として目指すべき姿は、量子技術をうまく使える国にしていく、量子産業を日本国内で作っていくこと。最終製品に近いものを押さえていくことが非常に重要
- ・ 各国が自国だけで閉じた量子エコシステムを構築しようとする、世界の進歩から遅れをとる量子エコシステムの発展のために政府は官民のパートナーシップを行うべき
- ・ グローバル・ハブが重要。インフラを整備し、スタートアップ企業やサプライチェーン全体、エコシステム全体が協力し合える環境を作る。グローバルな製造サプライヤとの協力関係が重要
- ・ 基盤を作り、そこで学んだユーザが次の研究ができるようにステップアップするロードマップを敷く。オープンソースソフトウェアに貢献する機会を作り、入るだけではなく、戻ってくるよう設計して、ずっと貢献し続けられる仕組み、量子エコシステムの中に留まり続けてもらう仕組み
- ・ 人材マッチングの機会をメカニズムとして作ることが重要
- ・ 有機的に繋がるには何が要るのか、どういうプロセスが要るのかが非常に大切
- ・ より広範な統合が行われな限り、業界が成長・発展するのはかなり難しい
- ・ 他のエコシステムとの連携がないと、実際に使えるエコシステムとして成り立たない
- ・ 安全保障上の観点からも事業継続の観点からも日本でエコシステムを作ることが大事
- ・ 量子エコシステムは、最低限、フルスタックで主要部品、技術が日本の中にある状態を目指さなければいけない。将来、10年後に向かってより良いものをどう作っていくかという視点で、うまく育成することをやっていただきたい
- ・ エコシステムの中で、それぞれがそれぞれの役割をうまく果たすことが、全体として非常に強いモデルを作る

2. 戦略

- ・ グローバルサプライチェーンでイニシアチブを取るためには、オープンな国際協力の促進が鍵。多様な専門知識とリソースを活用するために、国境を越えたパートナーシップを確立が重要
- ・ 日本は欧米だけを見るのではなく、アジアや他の地域を見ていくことが一つ重要
- ・ 初期段階から国産のものを少しでも買っていき、作っていき、お金を出していくのは大事
- ・ 自国で全部をやらないが、幅広く考えるためにも一定程度は手をつける必要がある
- ・ 量子の世界、スタートアップの世界はえこひいきが大事
- ・ ソフトウェア基盤とユーザーコミュニティを作れば、強いユースケースが集まる。強いユースケースがあれば、海外の技術が日本に集まってくる
- ・ あるカテゴリー、ある分類のユースケース、用途は数が揃ってくることでビジネスとして成立するので、分類を増やすことと、ある分類の中で横展開していくことも重要
- ・ 国の課題を実際に解かせて、スタートアップと組む企業が実務経験を積んでいくのがよい
- ・ 日本ならではのソリューションで問題解決を先にしていくことで、日本のエコシステムが世界に比べて非常に先進的なものに発展していく
- ・ 瞬間、瞬間でデファクトを取るための戦略として、どのレイヤーを OSS 化するかが重要
- ・ ハードウェアへの投資とアプリケーション、ソフトウェア開発、アルゴリズム、人材開発のバランスを取り続ける必要がある
- ・ 基礎研究とシステム研究のギアチェンジが非常に重要。スムーズなギアチェンジができれば、産業になる。ギアチェンジをうまくやっていかないと、1つのスキームだけで市場、産業まで形成するのは難しい
- ・ 日本はコンピューティングと通信を統合した世界観をあまり打ち出せていない
- ・ 海外企業も利用しながら、海外企業とは違う勝ち方、日本的な勝ち方をしていく

3. 規制・制約・標準化・ベンチマーク

- ・ 輸出規制について、同志国間の基本的方針がより具体的になると計画が立てやすい
- ・ エンドユーザーは規格や標準化が進むことで技術が一定の成熟度に達していると感じ、市場に安心して参入できるようになる
- ・ 標準化は短期的に今の段階では採用、不採用における重要なポイントになる
- ・ 今すぐ規定的な要件を設定することには慎重であるべき。バランスと配慮が必要
- ・ 世界中のエンドユーザーに量子コンピュータを使ってもらうためには、共通のベンチマークに照らしてその進歩を測定できるようにする必要がある。エンドユーザーにとって有益なものでなければならない
- ・ 日本の研究装置等が国際標準に適合していて、ベンチマーク、ラウンドロビン、結合実験が可能であることが非常に重要なポイント
- ・ 量子暗号通信等は一部規制をかけることによってニーズを喚起することも検討してほしい
- ・ 量子暗号、セキュアクラウドを使えばもっとコストダウンできるが、規制に入っていない。オプションに入れることも考えられるが、選択肢にあるだけでも大きく違う
- ・ 研究発表や論文、特許を読んで、応用特許や利用特許を積極的に出してくる国もある。ベンチャーにパテントプールの特許が使える安心感を持たせることが国としては重要

- ・ 調達に際して、何がキーとなるファクターで、それをどう比較するかという基準、標準化が重要ではないか。その上で開発のロードマップがあって、どう取り組んでいけるのか、コラボレーターがどこにいるのかが重要
- ・ ユースケースは話す相手によって基準が違うので、価値として出そうと思ったときに、SIPでも設定されているXRLの考え方、物差しが大事

4. 情報発信・プレゼンス

- ・ 国レベルで自国のスタートアップや産業界を海外に発信していくことを引き続きやった方がいい
- ・ ヨーロッパの在日大使館は色々な技術を日本企業や日本の大学等に売り込むのに積極的。日本も、政府や量子団体が大使館を通じて、日本の量子を売り込んでどうか
- ・ 過度な楽観的情報や過度な悲観的情報をより分け、技術進歩について冷静な情報を伝えて、社会が正しい期待値を持つことが重要
- ・ 情報発信において、研究・開発と事業は分けて考える必要がある。事業は顧客に対して、方便、説明の仕方はある。一方で、研究・開発は何の話かを正確に区別する必要がある
- ・ 信頼できる団体がガイドラインを提示していくと、アカデミアからも国民からも信用される
- ・ 政府や国研が出す調査報告は、今出ている色々なものをどう解釈したらいいのかというガイドダンスになる
- ・ 国際会議、国際学会等パブリック中心に情報交換チャンネルが機能していることが重要
- ・ 量子コミュニティと事業との間の距離が非常に遠いので、研究としては優れているものの事業としては力強いスタートアップが育ちにくい。ビジネス側の知見が研究会としても広がる取組を進めていくのがいい

5. 人材・マインド・認識

- ・ 人材の流動性が足りていない。パートタイムは有効ではないか
- ・ 日本はジョブモビリティが低い。企業側ももっとおおらかに「戻ってきてもいい」「行ってもいい」「半分だけ仕事していてもいい」という仕組みを整えないと難しい
- ・ 大学の人が企業に行きたがらない理由の1つは評価されないから。相変わらず昔ながらの大学の評価システムのままなので、モビリティが上がらない
- ・ 人材の多様化、流動性を組織の壁を越えてやることが大事
- ・ エンジニアリングとの協調や、色々な壁を越えて協調する考え方、協調する姿勢が大事
- ・ 技術を価値に転換する人、EQ人材が足りていない
- ・ 国レベルでエバンジェリストを養成し、宣伝をしていく人が必要
- ・ 物理学的なことが分かる人だけではなくて、ソフトウェアまで含めた総合的な戦いになっていくので、全体が分かる人の育成が必要
- ・ 人材の質に関してエンジニアリングまでカバーできる人が日本にはなかなかいない。海外展開をしなければ人材で負ける可能性が高い
- ・ グロース、マネタイズのバランスについて、ビジネスプランニング、ビジネスアカウンタビリティを持つ人が必要

- ・ 人材の課題の中でもディープテックのビジネスデベロップメントは難しい
- ・ グローバルの情報は目まぐるしく変わっている。現地インナーサークルに入って、粒度の細かい情報を集める必要がある。補助金制度が使えるか
- ・ 実際に開発しているから具体的に分かるニーズがある。それがあから、スタートアップや他の企業の強いものと結び付けることができる
- ・ 量子技術を研究する博士課程の学生のために多額の奨学金等、留学支援プログラム

6. 資金調達・投資環境

- ・ アーリーステージの投資を支援する公的制度や、non-dilutive 融資、助成金、補助金等があれば有効。公的機関、大企業、投資家、そしてアカデミアとのエコシステムを構築することが非常に重要
- ・ 海外 VC がアーリーの段階から入ることによって、海外市場をどんどん作っていきこうという仲間が海外に生まれることになるので、そういったところでスケールすることができる
- ・ 差別化要因があってこそ初めて海外でも投資してもらえる
- ・ 国が何らかの契約を提供してくれるのであれば、起業希望者のリスクを緩和することにもなる
- ・ 政府は初期段階だけでなく、スケールアップにも支援する必要がある
- ・ 集中的に投資を行っていくことが必要
- ・ 量子技術を使うことに対する補助金がマーケットを自主的に育てていく
- ・ 政府調達はスタートアップを発展させる上で非常に重要
- ・ みんなの動きの整合を取りながら、必要なところにお金が回るようにするのが大事
- ・ 個々の企業にとってリスクが大き過ぎる面に対して税制優遇等の支援が必要
- ・ ハードウェアが不自由なく使える、スタートアップを支援するインフラが揃っていることも投資環境の良し悪しの一つの指標になっている
- ・ すばらしいエコシステムは経営者がここに投資しようと思う最大のモチベーションになる

7. インフラ・連携環境

- ・ 量子特区。集積化した大きい拠点で全ての情報や物、人材が集まっている状況が理想的
- ・ 量子タウンのような実証都市、一大拠点を作り上げることで、皆が集まって相互作用しながら技術と産業を作っていくべき。特区化して、補助金の仕組みを色々と緩和する
- ・ 分散している拠点を1か所に集め、集中投資する
- ・ Quantum Deltaのような中間組織体を作り、研究者が研究に専念できるようにする
- ・ 最終的にはコンペティションしながらも、初期段階はコーポレーション、コラボレーションする発想が大事
- ・ 大企業のリソースを活用し、スタートアップがやるべきところはスタートアップに任せながらユースケースを作っていく。一例として、大企業との連携を前提としてプロポーザルを書き、大企業側のニーズを吸い出した上でそれを基に公募し、スタートアップに応募してもらおう。日本中の色々な企業とのコラボレーションを促す形でユースケースの探索を進めていく

- ・ 技術組合を組んで、民間側を一元化した上でそれと政府側が対になってコミュニケーションを一元化、連携の隙間を埋める
- ・ 大企業間、大企業とスタートアップ、研究機関との連携、国の産業政策を総動員して、もう少しオープンにできる仕組みを再構築しないと海外に対して勝つことはできない
- ・ 産学連携できる一定の仕組みを、国主導、産業界主導でやるべきではないか。受入態勢を作って、会社に入ってもらい、仕事をして大学に戻れる仕組み。知財部門等民間活用
- ・ 産総研以外の他の国研設備もビジネス利用できると大変ありがたい
- ・ キラーアプリと、色々なものが他にも載せられるプラットフォームがポイント。どのレイヤーでどうやるかがエコシステムを進める上で非常に重要

8. サプライチェーン

- ・ 拡張性のあるインフラに投資し、国境を越えたデータ共有や知的財産協定を奨励する政策を支援することで、イノベーションを加速させ、努力の重複を減らす強固で活気のあるサプライチェーンを構築できる
- ・ サプライチェーンは競合他社に情報が漏れてしまうリスクがあるので共通化が難しいが、ベンダがサプライヤを囲い込むと数が出ないのでコストが下がらないというジレンマもある
- ・ 安全保障上シングルサプライヤになっていることのリスクがある。サプライチェーンのレジリエンスをいかに高めるかというクオリティコントロールも含めて、これからもっとたくさん出てくるとコストも大事になる。サプライチェーンの産業化がポイント
- ・ 時間の経過とともに、バリューチェーンのプレイヤーの数は減少し、幾つかの統合が起こる
- ・ システム研究、エンジニアリングがグローバルサプライチェーンの中での存在感を出す一つのキーポイントになる

9. スタートアップ／ベンチャー企業

- ・ 第三者機関、特に官に近い組織が用意した設備や基盤を借りながら、共有しながらやっていくのは極めて重要
- ・ スタートアップを増やすには、大学がスピノフを奨励し、スピノフを行うための枠組みを定義
- ・ 大学や研究所の知的財産がどのように企業に引き渡されたかが非常に重要。外部投資家にとって魅力的な企業とそうでない企業の分かれ目になる
- ・ 友好的な技術移転政策を持っていることが、スタートアップ企業を誘致する上で重要
- ・ 21世紀のイノベーションは最初から民間、特にスタートアップが挑戦し、うまくいったものをそのまま産業化するスタイルに変わっている。ベンチャー企業、スピノアウト企業は今うまく発生しているが、今後これを育てていくところに課題がある。まだまだ大学のサポートが乏しい、不完全

10. その他政府支援

- ・ 市場のリスクを下げることに特化した政策、企業を刺激する取り組みが求められる。市場形成の観点を意識して課題を設定して方策を打つことが重要
- ・ ベンチャーに格安で設備や基盤を使わせて、ベンチャーがどんどんユースケースを発表する
- ・ 1社当たりの金額を大きくして、少しターゲットを絞ってやっていく政府方針も必要
- ・ 企業側のコミットメントをもう少し強くさせ、政府も収益性を見ながらお金を出していく
- ・ 政府の予算づけもしっかりデューデリジェンスした方がよい。同様にインテンシブな応募審査
- ・ スタートアップ設立と社会実装を実現することに対しても多少の流用が認められる制度
- ・ 研究センターや大学が企業を立ち上げやすく、より受容されやすく、投資を受け入れやすくするための知的財産フレームワーク
- ・ 経験豊富なビジネスパーソンとスピンアウト企業を目指す大学技術者をマッチング

以上