

(案)

提 言

量子未来社会の健全な発展へ向けた課題と展望



令和8年（2026年）〇月〇日

日 本 学 術 会 議

この提言は、日本学術会議情報学委員会が中心となり審議を行ったものであり、日本学術会議として公表するものである。

日本学術会議情報学委員会

委員長	下條 真司※	(第三部会員)	青森大学ソフトウェア情報学部教授／大阪大学名誉教授
副委員長	高田 広章	(第三部会員)	名古屋大学未来社会創造機構教授
幹 事	黒橋 禎夫	(第三部会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所所長／京都大学名誉教授
幹 事	佐古 和恵※	(第三部会員)	早稲田大学理工学術院教授
	浅川智恵子	(第三部会員)	慶應義塾大学大学院理工学研究科特任教授/日本科学未来館館長/Carnegie Mellon University IBM 特別功労教授
	有村 博紀	(第三部会員)	北海道大学大学院情報科学研究院教授
	内田 誠一	(第三部会員)	九州大学理事、副学長
	大場みち子	(第三部会員)	京都橘大学デジタルメディア学部デジタルメディア学科教授
	田浦健次朗	(第三部会員)	東京大学執行役、副学長

上記※の者と以下の者は、本提言の作成チームメンバー

根本 香絵	(連携会員)	沖縄科学技術大学院大学量子アーキテクチャ・ユニット教授、OIST 量子技術センターセンター長/大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所特任教授、量子情報国際研究センターセンター長/国立研究開発法人理化学研究所主任研究員
村尾 美緒	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
北川 勝浩		大阪大学量子情報・量子生命研究センターセンター長、特任教授、大阪大学名誉教授
藤井 啓祐		大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻教授、量子情報・量子生命研究センター副センター長

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

新田 浩史	参事官(審議第二担当)(令和8年8月まで)
渡邊英一郎	参事官(審議第二担当)(令和8年7月から)
角田美知子	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
櫻井 碧	参事官(審議第二担当)付審議専門職
辻 政俊	上席学術調査員

要 旨

1 作成の背景

量子技術は、この10年間に大きな発展と変動を見せてきた。世界的に開発競争が激化する中において、日本においては特に研究・産業面における競争力の低下と深刻な人材不足が強く懸念されている。

本提言は、これらの量子技術開発を取り巻く状況が生み出す様々な研究開発、教育及び社会実装上の懸念を見据え、学術の立場からその解決の糸口を探るものである。また、量子技術を社会経済システム全体に取り込み、既存の技術(古典技術)と融合させることで、経済・社会・環境が調和した発展を遂げる社会である量子未来社会の健全な発展のために、技術の発展段階を共有し、今なすべきことを提言としてまとめ発出するものである。

2 現状及び問題点

量子技術は多岐にわたり、その応用分野までを含めると広大な学問・産業領域となる。現在の高度情報化社会基盤と融合することで、インフラ、エネルギー、輸送、農業、医療など様々な分野と融合して発展することが期待される。一方で、これらの取り組みは先進諸外国と比較して立ち遅れている。量子技術は全体としては、まだ萌芽的な技術であるが同時に、量子鍵配送などの一部の技術では社会実装が進められるレベルに到達するもの、量子コンピュータなど社会的な競争力を持つ技術レベルに至っていない段階から社会実装が強く求められている分野も存在する。いわゆる基礎・応用研究と、社会への実装を念頭においた開発研究の間には大きな幅があり、基礎研究と開発研究とを安易に分離して位置付けることはできないことを量子研究推進の立案においても念頭に置く必要がある。特に、量子技術は長期的な発展が期待される分野であり、現在のような技術開発初期の段階において、過度に社会実装を強調することは、量子技術の健全な発展を阻害する可能性もあることに留意する必要がある。研究力の強化と、それによる人材の育成には長期的視点での研究への投資が重要であることを十分に踏まえた取り組みが求められる。

これらの背景のもと、主な量子技術の現時点の発展段階を把握、共有し、政策、教育、産業化の3つの側面から、量子未来社会の健全な発展に向けて、次の2項目を提案する。

3 提言の内容

本提言では、量子技術及びその取り組みの現状と課題を踏まえ、量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略と量子未来社会実現へ向けた構造的な課題への取り組みの2つの観点から以下を提言とする。

(1) 量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略について

① 基礎研究と研究力強化

量子技術は、技術の幅、深さともに幅広い領域を持つ技術であり、特に基礎研究から生まれる新しく多様なアイデアは、今後の量子技術開発を牽引するものである。社

会実装に偏重することによる過度な期待や誇張を生み出すことなく、長期的かつ継続的に研究の社会還元が可能となるように、戦略を設定することが必要である。

② 学術との協働による大規模開発への取り組み

量子技術の中には、大規模な量子コンピュータの実装や量子科学技術の社会実装において大規模な取り組みを必要とするものなど、将来的には大規模な研究開発を必須とするものがある。量子技術における大規模開発は、本質的にこれまでとは違う開発構造を必要とするため、すべてのステークホルダーでの対話を通して、日本型の開発体制を生み出すことが求められる。

また、学術における新しい知見を社会へ還元し、量子産業の競争力を維持するための仕組み作りとその運用設計が重要であり、国家レベルでの取り組みが不可欠である。

③ 人材育成における戦略

大学における高等教育を機能的なものとするためには、日本の教育費への公的援助を欧米諸国程度までに高める必要がある。地域によらず最先端知見に基づいた教育が提供されるための基盤整備の必要と、次世代の高等教育政策の戦略とその実施について官学が共に考え、協働して推進する必要がある。

社会基盤技術の高度化により重要性を増す大学院教育においては、研究力強化が重要であり、中でも流動性や多様性を確保した教員や研究者数の増加や雇用の質の向上などの人件費への投資が最も重要で、長期的な政策に基づいた戦略が必須である。

技術分野の総労働力に対しては、常にリスクリングやリカレント教育を念頭に設計する必要がある。産業界の積極的な関与や公的資金の投資などによるリスクリングやリカレント教育の仕組みを学术界を中心に早急に構築する必要がある。

これらの戦略を立てる上では、専門分野人口の絶対数の大幅な不足や、高度スキル人材の偏りなど、量子技術分野特有の課題を解決する立案であることが不可欠である。

(2) 量子未来社会実現へ向けた構造的な課題への取り組みについて

① 国際戦略とイノベーションへの取り組み

これまでの競争的資金による縦割りの国際化への取り組みの弊害を取り除き、構造的な問題を生み出さないような政策的な支援の方法を検討する必要がある。また、海外からの優秀な人材の流入は日本の技術開発とイノベーションに必須であり、世界情勢の急速な変動の影響など、危機管理の観点も含めた立案により戦略的な政策を必要とする。

急速に発展する量子技術と変化する国際情勢は、秘密特許、輸出管理などの新しい課題を生み出している。大学等（大学及び国立研究開発法人、大学共同利用機関法人等を含む）における専門的な支援体制を早期に構築するための政策的な取り組みが必要である。

日本の産業基盤とその強みは、海外の量子技術企業にとって十分に魅力的であり、今後の政策的な取り組みによるスタートアップ企業を中心としたイノベーションの加速化が期待できる。

② 量子技術とイノベーション

量子技術の既存技術への統合を積極的に牽引していくための基盤と取り組みが必要である。官学が協働し、それぞれの役割の明確化と、その役割に応じた投資が必要である。

③ 現代社会の複合的課題解決へ向けた技術的アプローチ

量子技術の多様な優位性に着目した量子技術の開発を促し、その社会実装へ向けて産官学が連携して、様々な現代社会の複合的課題へ技術的な解決をはかる具体的な取り組みが望まれる。

④ 産業人材構造変革とイノベーションエコシステムの強化（人材の流動性）

量子未来社会の健全な発展へ向けては、個人の尊厳・権利の保障を大前提とし、性別や属性に関わらず能力を最大限に発揮できる包摂的（インクルーシブ）な自律型人材の活用を目指した 21 世紀の世界的価値観に合致した社会構造への変革への取り組みが求められる。産業界における博士人材の採用、国際的な人材流動性の観点からの労働環境の改善、多様な人材の活躍、それぞれのセクターにおける人材評価のあり方などの諸課題を迅速かつ調和的に解決する必要がある。

⑤ 持続的な量子未来社会の実現

量子未来社会を構築するには、社会における量子技術の受容性を促進することが不可欠である。研究成果や教育を社会に還元するための専門性の高いサポート体制が必要である。また、量子科学技術の基礎概念に関する誤解や不正確な情報が社会に広まりやすい現状を踏まえ、正確な情報が伝わる専門的な仕組みを整えることが求められる。

目 次

1	はじめに：量子技術の発展と社会の変革の歴史と現状	1
2	量子技術の現状と課題	2
	(1) 量子技術の現状と特性（技術の現状分析）	2
	① 量子コンピュータ	3
	② 量子アルゴリズム・アプリケーション	4
	③ 量子計測・センシング	5
	④ 量子暗号・量子通信	6
	⑤ その他の量子技術	7
	(2) 量子技術研究開発を取り巻く状況	7
	① 量子技術研究開発における政策	7
	② 量子技術教育における取り組み	9
	③ 量子産業の発展（産業界の取り組み）	11
3	量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略（研究力）	12
	(1) 基礎研究と研究力強化	12
	(2) 大規模開発と学術	13
	(3) 人材育成における戦略	14
	① 教育機関	14
	② 産業界と人材育成	15
	③ リスキリング・リカレント教育	16
4	量子未来社会実現に向けた構造的な課題への取り組み	17
	(1) 国際戦略とイノベーション	17
	(2) 量子技術とイノベーション	18
	(3) 地球規模の課題解決に向けた技術的アプローチ	19
	(4) 産業人材構造変革とイノベーションエコシステムの強化（人材の流動性）	19
	(5) 持続的な量子未来社会の実現	20
	① 社会における量子技術の受容性の促進	20
	② 学術コミュニティにおける新しい課題	21
5	提言と今後の展望	22
	<参考文献>	23
	<用語集>	26
	<参考資料1> 審議経過	27
	<参考資料2>	28

1 はじめに：量子技術の発展と社会の変革の歴史と現状

20 世紀初頭に「量子」の概念が誕生すると、その後 25 年の歳月をかけてその学問的基礎である量子力学が完成する。この新しい学問を基礎に、科学と技術開発とが結びつき、20 世紀を通して半導体産業や光産業などそれまでには存在しなかった産業が生み出されていった。これらの中には 20 世紀を代表する技術となるコンピュータやインターネット、携帯電話などの情報通信技術はもとより、医療やエネルギー等における新しい技術も含まれる。さらに 21 世紀に入ってから、物流やインフラ、また、農業などの一次産業などとも融合し、高度情報化社会を迎えるに至る。この技術の変革は、私たちの日常生活や行動様式に大きな変化をもたらし、社会は大きな変容を遂げてきたと言える。この社会的な革命的変容を可能にした量子力学を基礎にした技術変革は、第一次量子革命と呼ばれる。

第一次量子革命で生まれた技術は半世紀以上の発展の中で成熟し、高度な制御技術、加工技術など先端的な技術を生み出すことで、1990 年代後半には量子力学の世界を直接的に制御すること（量子状態制御）が可能となる。1990 年代後半には、この技術的な進歩と、量子力学の学問的発展とが融合することで、1970 年から 1980 年代に示唆された量子技術の可能性が理論的に大きく発展することになる[1][2]。量子状態制御に基づく量子技術は、第一次量子革命の技術との違いを陽に区別するときは量子情報¹技術と呼ばれる。量子情報に基づく量子技術は、これまでの第一次量子革命までの技術を原理から変革するもので、この技術革新の達成により、第二次量子革命を迎えると考えられている。

第二次量子革命では、これまで達成が不可能であった複雑な計算に対して原理的な高速化を可能にする量子コンピュータや、長期にわたり安全性を保証する暗号システム、現在の測定技術が持つ原理的な限界を突破する量子計測や量子センシングなど、既存技術の限界を破る技術の確立に加え、低エネルギーや低電力、低発熱や高効率など広大な分野にわたる既存技術の 21 世紀的な課題を解決する技術としての発展も期待されている。

これら第二次量子革命で期待されている技術の実現には、従来とは異なる理論及び技術体系が必要であり、その開発は長期的となる。また、第二次量子革命へ向けた革新的技術の中には、量子コンピュータなど量子情報に基づいた技術と、量子的な性質がそれほど顕著ではないが、量子的性質の技術への応用が先進的であるものも含まれる。量子技術の発展の現状を把握し、課題を整理して技術の将来を展望するには、量子的性質の程度に幅広い領域をもって議論することが必要である。本提言ではこれら技術の総体を量子技術として扱い、主な量子技術について現状を共有した上で、量子未来社会[3]の健全な発展へ向けた課題と展望をまとめる。

¹ 量子情報（Quantum Information）：量子力学の原理（重ね合わせや量子もつれなど）に基づいて処理・伝送される情報のこと。従来の「ビット（0 または 1）」に対し、「量子ビット」を基本単位とし、計算、通信、計測などの分野で従来技術の限界を超える性能を実現する基礎となる概念。1990 年代より量子力学と情報理論の概念の融合が急速に進み、量子力学の新しい理論体系として量子情報が確立した。

2 量子技術の現状と課題

本章では、量子技術の特性に基づき、量子科学技術の研究開発の現状と各量子技術の技術レベルについてまとめ、それぞれの技術的及び社会的課題について概観する。

(1) 量子技術の現状と特性（技術の現状分析）

量子技術開発は1990年代後半から、量子コンピュータ、量子通信、量子計測・センシング、量子シミュレーション、量子鍵配送の5つを柱として、その研究動向が記述されてきた[4]。当初、量子コンピュータは最も大規模であることから最も実現が困難であり、一方量子鍵配送は最も実装及び社会実装に近いと考えられていた。1990年代後半より30年近くが経過した現在では、量子技術の発展はこのような規模に比例した発展ではなく、それぞれに対して個別に技術的課題が理解されるようになり、また、技術の発展のあり方も、それぞれの分野で異なることが理解されつつある。このことは、最近の科学技術政策には反映されている[5]。

量子技術の特徴は第一に、その対象となる分野、産業が広いことが挙げられる。量子技術はこれまでの技術革新と基本的に異なり、従来の技術の基礎となる原理から変革するものであるため、その対象は情報技術にとどまらず、通信、計測、イメージング、制御、輸送など多岐にわたる。また、現在の高度情報化社会基盤と融合することで、インフラ、エネルギー、モビリティ、農業、医療など様々な分野において従来の技術では解決が困難であった課題に対して非連続的な発展をもたらすことが期待される。

第二に、量子技術は全体としては萌芽的な段階にあるが、一様な発展を示すものではなく、基礎研究段階にあるものから、社会実装が進みつつあるものまで、技術ごとに成熟度や課題が大きく異なる点に注意が必要である。したがって、量子技術を一括りに論じるのではなく、個々の技術が置かれている発展段階、到達水準、今後の課題や将来性を的確に把握することが重要である。例えば、量子鍵配送のように、すでに社会実装が進められる水準に到達している技術がある。一方で、量子コンピュータのように、現時点では社会的競争力を有する水準に至っていないものの、将来的な影響の大きさを背景として、早期の社会実装が強く期待されている分野も存在する。さらに、現在は基礎研究の段階であっても、将来的に重要な量子技術として発展する可能性が少なくないことも重要な観点である。これらの中には既存の技術概念を新たな形で発展させるものである場合もあれば、現時点では発見されていない機能や性能である可能性もある。量子技術は長期的な発展が期待される分野であり、技術開発初期の段階にある現在において、社会実装のみを過度に強調することは、基礎研究や将来技術の芽を損ない、健全な発展を妨げるおそれがある。この点に留意しつつ、基礎研究の充実と社会実装の推進を両立させ、量子科学技術全体の持続的な発展を図ることが必要である。

以下に主な量子技術についての現状と特徴をまとめる。

① 量子コンピュータ

量子コンピュータの実装には、ハードウェアとソフトウェアの双方の開発が必要である。ここでいうソフトウェアは、現在のコンピュータ科学・工学上の分類ではなく、ハードウェアではない要素を指し、ミドルウェアなども含まれる。この分類が曖昧であるのは、量子ハードウェア技術が未発達であり、既存のコンピュータと比較して技術レイヤーの独立性が低いことに起因する。

主たるハードウェアとしては、成熟した制御技術を基礎とするイオントラップ、世界的に取り組みが進む超伝導量子ビット、量子ビットの可動性が高い中性原子、将来的な集積化が期待されるシリコン量子ドット、様々なアーキテクチャが可能とされる結晶欠陥スピン、損失は大きい一方で他の実装にはない実用上の利点が期待される光によるもの等が挙げられる。それぞれの技術において解決すべき課題が異なっており、どの実装系が最も進んでいるかという議論は現時点では生産的ではない。また、どのような計算をターゲットにするかによってもハードウェアの優劣は異なる。例えば、データセンターなど環境の安定した場所で使用するのか、それとも住宅や工場内、また、車載など一般的な環境での動作を要求するのかによっても、ハードウェアの優位性は変化する。

量子コンピュータが実行する量子計算では、その高速性が最も注目される。その高速性を活かし、既存計算技術では計算困難な問題を解くことが期待されている。しかしながら現時点では、高速性において優位性を示すには、制御精度及び量子ビット数の双方において技術的に十分ではない。量子制御精度の継続的な改善は技術的に難しいだけでなく必ず限界がある。必要となる精度を達成するためには、量子誤り訂正符号を用いて誤りに対して耐性を持つように量子計算を実装（以下、フォールトトレラント実装²⁾）する方法が知られている。フォールトトレラント実装によって有限の精度を持つ量子コンピュータハードウェア上でも量子計算を任意の精度で実行できる。しかしながらフォールトトレラント実装はハードウェア上で大きなコストがかかることが知られている。このコストの大きさはハードウェアの基本技術の性能だけでなく、量子コンピュータアーキテクチャや量子アルゴリズムの実装量子回路などによっても大きく変化する。例えば、ソフトウェア層での技術開発によりフォールトトレラント実装のコストが大きく改善される可能性は理論的にも示されている。量子コンピュータのフォールトトレラントな制御を担うのは従来の計算機技術（古典計算機³⁾技術）であり、フォールトトレラント量子コンピュータの実現には、様々な既存技術との融合が必要である。また、量子誤り訂正符号の実装・制御、論理量子ビット上での演算等を担う制御系、及びデータの入出力において、既存コンピュータとの融合が不可欠と

²⁾ フォールトトレラント実装：量子誤り訂正符号を誤りが伝播しないように実装する方法はフォールトトレラント実装と呼ばれる（量子誤り耐性実装と呼ばれる時もある。）。任意の精度で誤りを制御するための方法としては現時点においてはフォールトトレラント以外の方法は発見されていない。

³⁾ 古典計算機：量子計算の原理を実行するハードウェアを量子計算機、それ以外は古典計算機と呼ばれる。従来の計算技術はこの意味で古典計算技術となる。

なる。その結果、フォールトトレラント量子コンピュータの実装には、大規模な計算システムとなることを前提とした研究開発が必要となる。

フォールトトレラント量子コンピュータでは、量子誤り訂正符号を用いた論理量子ビットで量子計算を進めるのに対し、符号化されていない物理的な量子ビットを情報担体として用いるのが小規模の量子プロセッサ (NISQ (noisy intermediate-scale quantum) [6] プロセッサとも呼ばれる) である。フォールトトレラント量子計算と比較して量子計算に必要な量子性を保つことができる時間が圧倒的に短いという欠点がある。一方で、計算そのものは数桁高速であるという利点がある。また、直接量子データ (量子状態) を量子プロセッサに取り込むことが可能である。この性質は量子プロセッサと他の量子技術との融合に有利となる。例えば、量子センサーや量子エミュレータは量子状態をアウトプットとして出力する。この量子状態を測定する前に量子プロセッサが処理することで、より多くの情報を取り出すことが原理的に可能であり、既存 (古典) 計算技術では不可能な優位性となり得ることも期待されている。また、小規模の量子プロセッサにおいては、量子ビットに限らない量子情報を扱うことができる。また、量子誤り訂正を前提としないために量子アナログ計算や多様な量子プロセッサアーキテクチャが可能で、独自の優位性を発揮することも期待できる。

フォールトトレラント量子コンピュータは、多様な量子アルゴリズムを実行できる。しかし、量子コンピュータが得意とする計算と既存コンピュータが得意とする計算は異なることも考えられることから、これら異なる計算原理を融合して有効に用いる方法も必要であると考えられる。また、小規模の量子プロセッサにおいては、すべての計算過程を量子系が担うことは、あまり期待できないことから、量子計算と古典計算の融合はより重要な課題となる。

② 量子アルゴリズム・アプリケーション

量子アルゴリズムは、基本的に量子力学が許す量子状態操作をもとに構築される。これまでに様々な量子アルゴリズムが発見されており、どのような高速化が期待されるのかは個々のアルゴリズムによる。量子アルゴリズムでは指数的な高速化が目されるが、社会実装においては、必ずしも指数的な高速化のみが重要な要素ではない。量子アルゴリズムは基本的にフォールトトレラント量子コンピュータ上に実装可能である。しかしながら、フォールトトレラント量子コンピュータ上に実装できる量子操作は非常に限られており、量子アルゴリズムが必要とする量子情報操作を、フォールトトレラント量子コンピュータ上で許される量子情報操作 (量子ゲート⁴) のみで記述する必要がある。このような量子ゲートのフォールトトレラント実装には、計算時間に一定のオーバーヘッドがかかることが数学的に示されている。

⁴ 量子ゲート (Quantum Gate) : 量子コンピュータにおいて、量子ビットの状態を変化させる基本操作のこと。従来のコンピュータにおける論理ゲート (AND、OR、NOT など) に相当するが、量子重ね合わせ状態を保持したまま演算を行う点が異なる。

一方、小規模量子プロセッサへの実装では、量子情報を保つことができないので、一定以上の計算の深さを持つ量子計算は、ノイズの影響によって優位性を発揮することができない。生じたエラーを補正する理論的な方法が提案されているが、その（古典）計算には指数的なコストが避けられないことが指摘されている。2019 年の 53 量子ビット量子プロセッサの発表[7]から、これら小規模量子プロセッサのアプリケーションの探索に世界的に多大な研究努力が払われた。しかしながら、現在のところ小規模量子プロセッサを用いた量子アルゴリズムの実装で、実用的な計算高速優位性を示した例はまだないと考えるべきである。

最近の新しい小規模量子プロセッサのアプリケーションとして量子機械学習（量子 AI）の研究が始まりつつある。小規模な量子プロセッサであっても、高精度で処理できることが理論的に示唆されているタスクがあり、将来的な発展が期待されている。ただし、これらの例は比較的簡単な問題にとどまっており、その有用性については今後の研究を待つ必要がある。これら新しい発展については、萌芽的な段階にあることに十分に留意し、過度な期待によってその発展が阻害されないようにすることも必要である。また、量子計算に対して高速性以外にも、例えば、量子センサー等から得られる量子データの直接的な処理、低エネルギーや低電力、小型軽量デバイスなどでの可能性を見逃すべきではない。これら様々な優位性を考慮することが社会実装に有益である。

③ 量子計測・センシング

量子計測、量子センシングは、計測におけるプローブに量子状態を用いることで、古典的な限界を超えた精度・感度を達成するものである。古典的な限界は原理的に取り除くことができない量子ノイズからくるもので、標準量子限界（SQL）と呼ばれる。この限界を破るためには、量子状態を操作することが必要で、1980 年代にまず光の状態を用いて提案され[8]、さらにエンタングルメント（量子もつれ）⁵を用いた量子計測などより一般的な量子計測の設計と理解が 1990 年代後半発展した[9-11]。量子計測・センシングでは必要とされる量子系の規模が小さいことから、量子コンピュータなどの技術と比較して、より早い実現が可能であると予測された。しかしながら、量子プローブは信号に敏感であると同時にノイズにも敏感であるという原理的な課題があり、量子領域で動作する量子計測・センサーの開発はかなり難しいことがこれまでの研究で明らかになってきた。量子領域で動作する量子計測としては、重力波検出などの研究分野での応用が見られる。一方で、社会実装はまだ難しい段階である。量子領域で動作することを将来的な目標としながらも、量子制御や量子計測から出てきた新しい知見や技術を用いて、現時点の技術で実装可能なセンサーの開発といった社会実装へ向けた開発も進められている。これらのセンサー技術では量子性の程度も様々であり、

⁵ エンタングルメント（量子もつれ / Entanglement）：2 つ以上の量子（粒子）の間に存在する特殊な相関関係のこと。一方の粒子の状態を測定すると、もう一方の状態も瞬時に確定するという性質を持ち、量子通信や量子計算の高速化において重要なリソースとなる。

その程度に関わらず量子センシング技術として広く認識されている。応用先としても医療、バイオ、インフラ、マテリアルなど多様である。社会実装に向けた開発では、このような量子計測・センシング技術の多様性がその優位性とともにより重要であり、既存の技術体系との融合的な発展について考慮する必要がある[12]。

④ 量子暗号・量子通信

量子暗号、量子通信の分野では、量子技術の中でも最も成熟した技術である量子鍵配送と、それ以外の技術との間には、技術成熟度に大きなギャップがある。まず、量子鍵配送は、量子状態を用いて秘密鍵を共有するプロトコルで、情報理論的な安全性を特徴とするため、理論上は長期間にわたり情報の安全性を証明することが可能である。実装には光が用いられるが、その実装方法は様々なものが提案されている。中でも BB84[13]はエンタングルメントを用いず、量子状態の非直交性を用いたプロトコルで、最も実装が簡易である。BB84 の実証は 2000 年代に大きく進み、単一光子を用いる方法に加えコヒーレント光を光源とする方法もあり、現在も複数の方法で研究開発及び社会実装が国立研究開発法人や企業などで進められている。また、世界的には技術の標準化の動きもある。

光信号の届く距離には限度があることから、量子鍵配送の長距離化には通信経路にノードを設けて通信距離を伸ばすことが必要である。現在の実装においてはノードで秘密が漏れないとする、信頼できるノード(トラステッドノード)を仮定している。一方でトラステッドノードを介さない実装や、一般的な量子暗号及び量子通信では、エンタングルメントを必要とする。距離を隔てた 2 点間にエンタングルメントを生成するエンタングルメント配信が基本となる。通信距離を伸ばすためには、配信されたエンタングルメントを中継点でスワップし、エンタングルメントの距離を伸ばす。この中継点の技術、即ち量子中継技術が必須となる。したがって、量子中継技術は量子デバイスや量子コンピュータを量子的に繋ぐ将来的な技術である量子インターコネクタや量子インターネットの基礎技術でもある。エンタングルメント配信にはデコヒーレンス⁶の小さい光を用いる必要があるだけでなく、距離を隔てた 2 点間を光が進む時間が必要となるので、その間に量子状態を保つための量子メモリが必要であるとされる。量子メモリとなりうる電子スピンなどの量子ビットのコヒーレンス時間はこの 20 年間に劇的に伸びたが、量子通信で使用するには、量子メモリと光の間の量子インターフェースの実現が必要であると考えられている。量子メモリを必要としない量子中継の方法も提案されており、これらの方式ではエンタングルした光を用いるため、研究開発としては光量子コンピュータの開発と重なる部分が多い。

量子中継システムは量子コンピュータより数桁システム規模が小さい(少ない量子ビット数で構成可能)と考えられるため、2000 年代初頭には実装までの開発期間が短

⁶ デコヒーレンス (Decoherence) : 量子系が外部環境と相互作用することで、量子力学特有の「重ね合わせ状態」や「量子もつれ」が壊れてしまう現象。量子コンピュータや量子通信の性能を維持する上で、デコヒーレンスの抑制が最大の技術的課題のひとつとなっている。

いと考えられていた。しかしながら、量子メモリと光の間の量子インターフェースは当初考えられていたより実現が難しく、まだ十分な効率で実現した例はない。しかし、エンタングルメントを配信できるようになれば、量子暗号以外の量子通信プロトコルを実装できるようになるため、量子メモリ、インターフェース研究開発は世界的に活発化している。量子通信を用いる量子アルゴリズムや、量子センサーを量子的に繋いで用いるグローバル量子計測などへの応用も提案されている。将来的には、量子通信の発展により量子コンピュータをはじめ様々な量子技術デバイスやシステムが量子的なネットワークに繋がり、繋がることで初めて可能となる性能や機能を発揮する量子インターネットの実現が期待される。

⑤ その他の量子技術

これらの量子技術の他にも、原子時計や量子バッテリーなど様々な量子技術がこれまでに提案されている。これらの技術の実装のレベルも様々である。今後も様々な技術提案や新しい機能の発見などが予想される。例えば、生命現象との融合や、量子熱力学的な限界を実現する量子エンジン、デバイスとしての量子輸送などがある。基礎科学としての研究領域や、機能的な量子デバイスなどの技術原理領域、また、複数の量子技術を融合する融合領域など、各技術の発展、社会実装までの時間的距離感は様々である。量子技術全体の理解においては、これらの点についても十分留意する必要がある。

(2) 量子技術研究開発を取り巻く状況

① 量子技術研究開発における政策

量子技術研究開発は、欧米諸国を中心として基礎研究における萌芽的研究への取り組みが進み、1990年代後半においては実験研究を主に米国と欧州諸国が、理論研究では主に英国が主導しながら、1990年代後半から2000年代にかけて量子情報技術の重要な諸概念の形成とその原理実装が急速に進められた。また、豪州、シンガポール、カナダにおいては量子技術の研究センターがいち早く立ち上がることとなった。日本では、量子情報研究では欧米の研究動向に一步遅れ、1990年代は科研費やJST-CRESTなどをはじめとした量子物理に関する優れた基礎研究にとどまった。その後、2000年に今井量子計算機構プロジェクトが、2003年には、JST さきがけとJST-CRESTが量子情報を中心に立ち上がることで、量子情報研究が本格的にスタートした。また、量子鍵配送に特化した研究開発では、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）を中心に継続的研究支援がなされ、2010年には東京QKDネットワークとして量子鍵配送のテストベッドの形成と運用が始まった。

この後、欧州・米国が先行する形で政策的な盛り上がりが何度か繰り返されることになるが、2010年代半ばから、一斉に国家戦略の立ち上がりが見られた。日本においては2010年頃までは、基礎研究の重点分野として内閣府FIRSTプログラムなどの大規模なプロジェクトが立ち上がり、量子情報理論、量子コンピュータアーキテクチャ

等実装理論、超伝導量子ビット素子や量子ドット等の実験研究で世界的にプレゼンスを示したことは注目に値する。しかし、2012 年以降は量子技術に関する政策が立ち上らず、JST-CREST 及び JST さきがけが 2016 年に立ち上がるまでの数年間に研究が停滞することとなった⁷。この間に、人材的にも他分野や海外への流出が起これ、日本における研究の世界的な優位性やインパクト、また、人材の確保という点で、現在まで大きな影響を残している。この時期海外では、米国を中心とした産業界での量子コンピュータ実装が活発化し、2016 年 IBM 量子エクスペリエンス（5 量子ビットのオンライン利用開始）、2019 年の Google 社の 53 量子ビット実装の発表へと繋がる。

日本においては、これら欧米諸国の動きに遅れて 2018 年に Q-LEAP と NEDO プロジェクト立ち上がり、これに続いて 2020 年に大規模量子コンピュータの実装を最終目標とするムーンショット型研究開発事業、また、JST の COI-NEXT や 2023 年には内閣府の第 3 期 SIP が量子技術課題で開始されるなど、結果的に欧米諸国に 5 年程遅れて量子技術戦略が始動した。政策としての研究体制は一気に活性化したが、研究停滞期後の戦略開始となったことで、深刻な人材不足に直面している。また、我が国では、実用化を焦るあまり、プロジェクトが実社会の課題への応用例（以下ユースケース）の創出などに集中し、時期尚早な技術目標が量子技術の健全な発展に影を落としている。今後の日本における政策立案においては、米国の大企業をはじめとした産業界からの大規模な投資の下で社会実装へ向けた大規模な取り組みがなされていることも踏まえる必要がある。各量子技術の開発の現在のレベルに加え、その技術の発展に必要とされる開発期間を考慮した研究開発の指針と評価が求められる。

さらに最近では、中国などアジアにおける量子技術発展も急速に進んでいる。中国はすでに大学研究において 100 量子ビット以上の量子プロセッサを開発しており、また、量子鍵配送においても衛星を用いた実装や国際的な技術標準化においてリーダーシップを発揮している。韓国においても、2023 年に『量子科学技術戦略』を策定し、2035 年までに官民合わせて 3 兆ウォン以上を投資して量子経済の中心国を目指す目標を掲げている。インドは最近量子技術の研究センターを開設するなど、政策的に力を入れている。このように、諸外国ではそれぞれの強みを持った国際連携も取られていることから、今後の技術発展が期待できる。一方、これら諸外国と比較すると、日本における量子技術開発への投資規模はそれほど大きくなく、十分ではないことが懸念される[14]。

また、日本における国家戦略のあり方においては、その目的及び目標が欧米諸国と比較して柔軟にアップデートされてきたことが特徴である。目標や目的が柔軟であることは、10 年という比較的長い実施期間の間に臨機応変な対応を可能にするという側面がある一方で、長期的な目標設定に基づく技術開発を困難にすることは見逃せない。今後日本の量子技術の国際的なプレゼンスと長期的な発展には、大学における基礎研

⁷ 日本では、先行していた大規模プロジェクトが終了を迎える 2014 年から 2016 年の JST プロジェクトの開始まで、量子技術研究開発はほぼ凍結されたかたちとなり、「量子の冬」を迎えたと言われる。[15]

究力の強化に並行して、客観的分析に基づく量子科学技術の研究開発の指針の制定が課題である。

② 量子技術教育における取り組み

研究開発の萌芽的段階から海外での民間投資が活発であったことは、量子技術分野の人材育成へ一定の貢献があった[16]。一方、2019年以降の量子技術研究への期待は過度に高くなり、大規模な投資が国策として行われたことに加え、これまでにない規模での雇用の機会が大企業やスタートアップ企業で生まれたために、世界的に研究人材の不足が問題化している。欧米諸国においては、大学や研究機関のステータスや高待遇により必要な人材を世界中から集めることで必要数を確保できている研究機関もある。また、産業界のニーズに対応するために、量子技術を専門にした修士課程の新設が進んでおり、独国ではすでに12の量子技術に関する修士課程が提供されている[16]。英国や豪州などでは、量子情報分野の博士課程学生の増員が行われている。

日本においては国内の研究者数が限られていることに加え、コロナ禍中に海外との連携が弱体化し、さらにコロナ禍後の円安や研究者待遇の改善の遅れなどから海外からの優秀な人材の流入が期待されるほど進んでいない。人材育成のための研究者の絶対数が足りていないということがまず挙げられる。

人材活用の観点からは、長い間進まなかった博士人材の産業界での登用が進みつつあり、国内外の主にスタートアップ企業での大規模な研究人材の比較的高待遇での雇用がみられる。従来においては、日本のICT産業では約4%の労働人口が博士人材であるのに対し米国は10%を超えていたことから[17]、量子産業における博士人材の活用が産業界全体の博士人材活用に向けた産業構造の変革を後押しすることが期待される。一方で、2021年の米国での量子産業を対象とした調査報告にみられるように、セールスから研究者まで多様な職種についての量子産業を支える総労働力の調査で約40%の総労働力が博士、または博士相当という結果が示されているなど、これまでとは異なる規模の需要が予想される[18]。

このような急速な需要の増加は、大学等（大学及び国立研究開発法人、大学共同利用機関法人等を含む、以下大学等）が供給できる量とスピードを逸脱しており、大学等の量子技術教育には大きな負荷がかかっていることが推察される。大学等からの人材の供給が追いつかないことで、高等教育の場で人材の確保がさらに困難になると、人材不足の負のスパイラルが形成される。

日本の大学院教育においては、大学院課程に定員が厳しく設定されていることや、課程の新設には長い時間がかかるなど、構造的に学問の継続的な発展に重点が置かれており、社会的ニーズへの臨機応変な対応が難しいという状況がある。結果的に、「量子技術イノベーション戦略」[5]で目標とされた「5年以内に大学等における量子技術に関する講座・専攻等の設置」が達成されていないなど、量子技術に関わる広い分野を量子情報・量子技術を横串とした統合的かつ体系的な教育体制の構築が大きく遅れている。代わって、3年から6年程度の競争的研究資金による研究プロジェクトによ

る人材育成への取り組みが進められている。これらの取り組みは一定の成果が期待できるものの、効果・評価ともに長期間となる人材育成に対して、数年間の競争的研究資金プロジェクトというアプローチの有効性については今後適切な時点で検討する必要がある。他方、人材不足が深刻化している現状を踏まえ、継続的な人材育成事業のあり方や量子科学技術分野の体系的な教育体制の構築については、喫緊の政策的な取り組みが求められる。

量子科学技術の発展を支えるのは、博士人材や研究人材に留まらない。量子産業の発展には多様な職種が必要とされている[18]。この産業界の需要には、短期的及び長期的に对应していく必要がある。短期的には、産業界の人材を対象として、リスクリソグやリカレント教育により産業界の総労働力を強化することが考えられる。他の先端技術分野である DX 推進では、日本の産業界における企業内の人材のスキルレベルの把握やリスクリソグの機会提供は、米国産業界と比較して遅れていることが報告されている[19]。先端分野においては、技術のリスクリソグは、産業界に必要な人材の育成の観点からは必須であり[20]、また、リスクリソグは、日本においては少子化に伴う労働人口の減少とも関係が深い。高度スキル人材の育成には一定の期間が必須であるため、若手人材のみならず中堅、シニア人材についても積極的なリスクリソグを取り入れることで従来技術から最先端技術への転換を促すことができる。最先端技術が生み出される大学の研究現場と産業界との間に人材の流動性を生み出すことも人材育成として有効である。

一方で長期的な取り組みとは、若年層における量子技術への関心の喚起と進路選択としての量子技術に関わる。欧米ではすでに若年層への働きかけが産官学で多様に進められている[21-23]。若い世代の量子科学分野へのキャリア選択を支援し、多様な興味やキャリア志向に幅広く対応する必要がある。量子技術分野の産業基盤はまだ薄いため、日本においては将来的な研究者・技術者数の大きな変動、いわゆる量子冬の時代の到来に対する憂慮も認められる。また、量子技術分野を専門として選択することへの一定の躊躇も一部には根強くある。そのため、キャリア選択の支援においては量子技術がより広く社会へ受容されるための取り組みも必要となる。

これらの人材育成の取り組みの推進においては、そのための人員についても考慮する必要がある。量子科学技術人材は現在のところ大学等に偏っているため、人材育成の取り組みにおいても大学等に期待されるところが大きい。一方で、量子科学技術を取り巻く状況の急速な変化は、大学における従来の教育サイクルのみでは必要とされる人材を十分に輩出できていない。具体的には、ポスドクなどの若手研究者、量子分野の専門教育のための人材、リカレント教育など多様な教育に対応するための人材、大型研究を推進するためのサポート人材など、研究教育の全般にわたって人材や財源が不足している。

これまで量子科学技術を取り巻く人材育成の現状と課題について概観してきたが、これらの課題は学術を取り巻くより大きな流れと無関係ではない。大学等における高等教育の役割は、21 世紀に入り大きく変化してきたにも関わらず、大学の役割の増大

に対して、人員は増えていない。さらに量子技術分野などの新しい分野における増員は容易ではない。量子技術開発の世界的な競争が激化するなかで、教育・研究ともに社会的要請が一気に高まり、業務の質が変化し、量・種類が急増する中で大学等における処理能力の限界に達していると考えられる。日本の教育費への公的援助は諸外国と比較して相当低く[24]、日本政府が支出する大学研究費（人口当たり）では先進国の中で最下位となっている[25]。イノベーションにおいては、人的リソースは最も重要であり、日本の高等教育はその根幹を担うことから、大学の財政的支援の改善は今後の大きな課題である。

③ 量子産業の発展（産業界の取り組み）

量子産業の発展の観点からは、量子技術の持つ可能性とその社会的な高いインパクトへの期待感から、技術の原理実証の段階から民間における研究投資が行われた点に特徴がある。その中には、量子鍵配送やランダム数生成器など比較的通常の発展段階を経たものと、例えば量子アニーラー研究開発のように、新たな技術分野を生み出しながら発展したものもある。さらに、研究分野そのものを牽引する役割を一部スタートアップ企業が担ったことは、量子技術発展の上で特徴的な点である。

2019 年からは、産業界における量子コンピュータを中心とした研究開発が大規模に展開されるようになり、特に、ハードウェアの開発を米国 IT 大企業が牽引し、そこに欧米のさまざまなスタートアップ企業が競合する形になっている。その中で、世界的に強豪の寡占の危機感を生みつつも、産業界と学術機関も含めて競争の要素に加えて、協力的な枠組みも育っており、長期的な課題に対して一定の協力体制が構築されつつある。

量子技術に過度な期待が高まる中、欧米では量子産業への投資が活発である。量子産業への投資には短期間で大きな波が生ずると予想される向きもあったが、これまでのところはその兆候は見られず堅調である。一方で、日本においては大学発の起業は増加傾向にあるものの産業界における量子技術への取り組みはそれほど進んでおらず、政府主導による取り組みが目立つ。これらは、主に学術界を巻き込む形で行われており、大学に対して従来の役割を超えた取り組みが要請されている。このことは、大学における研究推進の活発化に一定の貢献が見られる一方で、学生や若手研究者がプロジェクトに追われ、本来必要とされる基礎研究や体系的な学習に十分時間を充てられないという弊害を生んでいる。学術の担い手である大学教職員の負荷を軽減するとともに、若手教育や研究のあり方に生じた歪みを是正する施策が必要である[26]。

3 量子科学技術政策立案に向けた具体的な推進戦略（研究力）

第2章で概観した量子科学技術の現状とその社会的状況を踏まえて、本章では今後の量子科学技術政策の立案へ向けた具体的な研究戦略について、主に研究力強化の視点から議論し、提言としてまとめる。

(1) 基礎研究と研究力強化

国際的な学術的成果及び研究開発における日本の優位性やインパクトが、この20年間にわたり衰退の道を辿っていることは昨今様々に報告されているところである[27]。量子科学技術においてもこれまでの研究推進の背景を踏まえて今後の政策的立案を行う必要がある。

量子科学技術政策においてまず考慮しなければならないことは長期的視点の重要性である。特に基礎研究から生まれる新しく多様なアイデアは、今後の量子技術開発を牽引するものであり、日本の研究力の要であるとともに、将来の量子技術を形作る上で必須である。したがって基礎研究において日本のプレゼンスを欠くようでは、必然的に日本の量子技術の優位性を保つのは困難である。量子技術のように黎明期にある技術開発では、いわゆる研究者の好奇心による研究と、社会への実装を念頭においた研究の間には、広大な研究の幅があり、一概に基礎研究と応用研究と分離して位置付けることはできないことを研究推進の政策に反映させることが是非とも必要である。

まず、科研費が継続的な役割を担った上で、戦略的なプロジェクト研究とのバランスをとることにより、長期的で多様かつ先進的な研究を継続的に生み出すことが可能となる。ボトムアップの研究を重視する科研費を新しく多様なアイデアの源泉とするには、量子科学技術分野の発展に科研費の仕組みが遅れをとらないように適時調整する必要がある。現在、日本学術振興会では科研費のキーワードの見直しが進められているが、より専門的でかつ柔軟なキーワード及び審査区分改訂が求められる。例えば、量子情報や量子計算といった基本的なキーワードに加え、デバイス分野における量子インターフェースや量子計測、システム領域での量子コンピュータアーキテクチャや量子通信システム、量子性能評価など、量子機能の分野では、量子プロトコル、量子誤り訂正や量子計算モデルなど、アルゴリズム分野における量子アルゴリズムや量子機械学習などが挙げられる。また、量子技術は横断的な分野であり、科研費の横断的な分野のための枠組みを活用することで、量子科学技術分野の発展の礎を成すことが期待される。

次に、日本における戦略的な量子技術研究推進政策においては、複数の研究プロジェクトが同時進行することを念頭に、全体的な研究推進政策と個々の戦略目標を立てる必要がある。全体的な研究推進政策としては量子技術全体を俯瞰し、開発のレベル（TRL）に加え開発にかかる時間も技術ごとに異なることを踏まえ、従来の線形的なTRL開発モデルとは異なる開発の過程を経ることを理解して政策立案することが必要とされる。戦略目標の設定においては、国内の研究及び産業上の強みを把握し、より専門的な視点から戦略領域を設定することが求められる。プロジェクトの規模を適切に設定することは、効率的な研究推進につながる。また、プロジェクトごとに、専門家の意見を踏まえた評

価値基準を設け、それを尊重することが求められる。例えば、技術応用は重要な研究テーマのひとつであるが、多くのプロジェクトで技術応用へ偏重することは、量子技術の長期的な発展上、研究成果のインパクトと人材の確保の双方にネガティブな影響をもたらす[28]。

具体的には、萌芽的技術開発やハイリスク・ハイリターンな研究開発においては、研究の発展的な継続が計画できるよう、終了後の次の段階を見通せる研究開発制度の設計が求められる。課題の選択、評価にあたっては、学術的な独創性や将来の波及効果を重視した長期的な評価軸を設定することも必要である。ムーンショット型研究開発制度で取り入れられている PD（プロジェクトディレクター）によるポートフォリオ運営制度⁸やそれに類する制度においては、ポートフォリオ設計と運営について該当分野の専門家が評価する仕組みの導入が求められる。また、量子技術のように多くの分野にまたがる研究開発では、ポートフォリオ運営に必要とされる専門分野を適切にカバーできる人員を配置する制度を早急に整備すべきである。PD に代わり各分野の専門家からなる PD チームを設定したり、ポートフォリオ運営を PD とともに担う専門家を共同 PD としておくなどにより、個々のプロジェクトの専門性を目標に向けて十分に発展させることができると考えられる。

また、研究者の研究時間の確保は引き続き課題である[25]。研究者数が限られているために、プロジェクトの選定、評価における利益相反の管理が困難になっており、早急な対策が求められる。例えば、プロジェクトの選定及び評価を国際的に行うなど、諸外国と同様な制度の導入も検討の余地がある。政府及び研究資金配分機関に対しては、研究開発制度間のバランスや適正な規模、個々のプロジェクト実施期間を超えた研究分野の発展の継続性や社会実装へ向けた開発の道筋などを科学的に議論し、長期的な発展のための研究推進政策を明示することが求められる。

(2) 大規模開発と学術

量子技術の中には、将来的には大規模な研究開発を必須とするものがある。大規模な量子コンピュータの実装はその具体的な例で、現在はムーンショット型研究開発事業として学術機関を中心に進められている。プロジェクト最終目標への重要な通過点となる 2030 年には、プロジェクトの研究成果を大規模開発へと発展的に繋げることが期待されている。大規模な量子コンピュータ開発において、その開発の主体が学術から産業へと移行することは必須かつ自然な流れである。一方で、移行には時間がかかることが予想され、また、移行後の産業主体の開発においても、産学の協働が今まで以上に重要になることが予想される。このために産学が長期的に協働できるような新しい仕組み作りを今から始めておく必要がある。その際、産業界には中長期的な視野に立ち、学術界への投資も含めた量子技術大規模開発への取り組みが求められる。例えば独国においては、

⁸ ムーンショット型研究開発制度におけるポートフォリオ運営とは、複数の研究プロジェクトを戦略的に組み合わせ、進捗に応じて柔軟に見直しや再編を行うマネジメント手法を指す。

大学における試作・製造機能の限界を見据えて、大学における研究に企業が積極的に参加して研究開発を推進する例も出てきている[29]。これまで日本において行われてこなかった大規模開発を行うためには、産官学での議論と同意が必要となる。大学制度や社会構造を踏まえた上で、効率的で実施可能な開発体制を早急に見出す必要がある。

また、大規模開発に限らないが、海外では研究者と技術者が効率よく協働するチームがあり、このような連携も強化していく必要がある。例えば、大規模開発を担う国の研究機関、産業界、大学等の間で人材の流動を起こすことで、研究者と技術者が協働する枠組みが生まれる。従来のクロスアポイントメント制度を発展的に拡充する仕組みを整えることで、様々な形で人材の流動を起こすことができるようになる。このような相互の人材交流は研究者や技術者のスキルアップにつながるという利点もある。一方で、このような取り組みは大学等の運営に一定の負担を課すことになるため、大規模開発への協力を行う大学等には、恒常的な予算の増額等の支援を行うことが必要である。量子技術の大規模開発に必要な人材の流動性の確立に向けて、既存の枠組みをもとに制度を拡張・補強して対応することは、高い実施可能性が期待できるひとつの方法である。

また、量子科学技術の社会実装において大規模な取り組みを必要とするものもある。ビッグデータや AI など情報技術の発展と融合した社会実装は、大規模となることが予想される。例えば英国の国家戦略ミッションにある量子センサーの社会医療制度への融合などが具体例として挙げられる[12]。このような大規模開発では、政府主導の取り組みが不可欠であり、産業界は新しい技術分野での産業化を主体的に推進することが求められる。一方、学术界はこれらの取り組みにおいて積極的に参加することが期待され、これら産官学の協働により社会実装を効率的に進めることが重要である。同時に参画する大学等への安定的な支援が不可欠である。

(3) 人材育成における戦略

① 教育機関

大学における高等教育を機能的なものとするためには、まず、諸外国と比較して相対的に低い日本の教育費への公的援助を欧米諸国程度までに高める必要がある。また、量子科学技術分野においては多くの大学で専門の教員を欠いていることから、地域によらず最先端知見に基づいた教育が提供されるための基盤整備が必要である。一方で、これまでの大学教育においては、学問領域の伝統を重視する傾向が強く、その傾向は高等教育政策により強化されてきた側面がある[30]。学問体系の継続性という点を考慮しながらも、新しく急速に発展する分野の体系的な教育を大学において可能にする仕組みが戦略として必要である。

第2章で言及した海外の動向を参照するまでもなく、日本においてもすでに2020年に「5年以内に大学等における量子技術に関する講座・専攻等の設置」が量子技術イノベーション戦略において定められていることから、その重要性は広く認識されており、政策上見過ごされてきたわけではない[5]。しかしながら、設置目標の最終年度となる2024年度においてほとんど実現されていないことを踏まえると、設置目標へ向

けた具体的な推進においては、これまでの高等教育政策の指針と合わせて、量子科学技術分野に適した高等教育政策の戦略とその実施について官学が協働して早急に実施することが強く求められる。

さらに、社会基盤技術が高度化する現代にあつては、大学院教育は益々重要であり、その中でも量子科学技術は広く多様な分野に大きな波及効果を生むことが予想され、また、最先端科学とイノベーションが密接につながる点で、基盤研究力の強化は特に重要である。日本や独国においては研究開発法人や大学共同利用機関などが大学院教育の一端を担っており⁹[5]、大学院教育及び基礎研究力の強化はこれらの機関も含めた大学等全体で設計・実施するべきものである。

研究力強化においては、最も重要なものとして人件費への投資であることが指摘されている[25]。教員や研究者数の増加や雇用の質の向上などの人件費的投資はその性質上、長期的な政策に基づいた戦略が必須である。これまでの政策においてはむしろ競争的研究費による競争的效果に重きが置かれてきたことから、今後の量子技術政策においては、大学院生・研究者・教員の雇用や研究環境の質の向上などを目的とした人件費への投資の重要性と継続性を十分に踏まえる必要がある。

加えて、人材の流動性と多様性の確保は、量子技術の発展において極めて重要である。物理学、情報学、工学など多岐にわたる知見の融合が量子分野の発展には必要である。異なる背景を持つ研究者が交わり、新たな発想を生み出す環境はイノベーションの源泉としても重要である。大学においては、育成した人材を自大学にとどめるだけでなく、これまで以上に人材を大学外へ輩出することが求められる。したがって、単なる雇用の安定化にとどまらず、国内外や産学間の人材循環を促進し、多様な視点を取り入れるための仕組み作りへの投資も同時に不可欠である。

以上を踏まえると、量子技術政策を大学に導入する際には、個別分野の振興策としてではなく、学術全体の研究力強化に資する政策として位置づける必要がある。教育体制の整備、大学院教育の強化、人件費への長期的投資、人材循環の促進を一体的に進めることが、量子科学技術分野の持続的な発展に不可欠である。

② 産業界と人材育成

日本の産業界においては、人材の重要性の認識は広くあるものの、自前主義的で社内教育に長らく重きが置かれてきた。このことは、博士人材の消極的な雇用だけでなく、欧米諸国と比較して、高度スキル人材活用のノウハウを育てる機会を失ってきたとも言える。また、大学卒採用においても、大学の教育課程に対する期待が薄く、学術界と協働してきたとは言い難い。

量子技術分野においては、企業内に技術的ノウハウのある企業数は限られており、量子未来社会の実現に向けて必要とされる量子技術の社会実装への取り組みに必要な

⁹ 例えば独国マックスプランク研究所は博士号の授与権を持たないが、大学と共同で博士を育成している。2023 年現在で 120 カ国以上から集まった 3000 名以上の博士課程学生が博士研究に取り組んでいる。

人材と企業内人材のあり方の間にミスマッチを起こしている。また、量子技術では基礎研究と応用研究の関係性が従来と異なり、非線形な発展過程が産業界における人材確保・育成に新しい課題を生み出している。

産業界における量子技術への取り組みを効率的に進めるためには、大学との協働のあり方を見直す必要がある。大学における自立した学術教育を尊重しながらも、人的・資金的に高等教育へ参画することには有効性があると考えられる。また、大学等は学術教育の質の向上と維持にこれまで以上に努力を払う必要があり、長期的な視点から社会に資する人材の育成が要請される。

③ リスキリング・リカレント教育

最先端技術分野においては、常に人材不足が生ずる一方、既存技術を担う人材は技術がコモディティ化するとともに人員が余剰となることはよく知られている。量子技術においては、その新しさから企業内に十分な人材がなく、人材不足となっているが、これを若手人材だけで補うことは難しい。日本においては少子化、また、低い博士課程進学率により、即戦力としての新しい産業の担い手を確保することが構造的に難しくなっている。この不足を学術界における人員と教育努力だけで補うことは不可能であり、また、非効率である。技術分野の総労働力は、常にリスキリングやリカレント教育を念頭に設計する必要がある。日本企業においては、自社の人材の技術スキルレベルの把握や学び直しの機会の提供が遅れていることから、産業界における専門人材をリスキリングやリカレント教育を通して、先端分野の即戦力として迎えることが必要である。しかしながら、量子技術分野においては、リスキリングやリカレント教育を担うことができる人材は学術界に集中しているという事情がある。量子技術の長期的な発展を念頭に、リスキリングやリカレント教育の仕組みを学術界を中心に早急に構築する必要がある。それには、産学が連携し産業界が積極的に関わること、また、公的資金の投資も必要である。

4 量子未来社会実現へ向けた構造的な課題への取り組み

本章では、現在の日本において、研究力を社会に還元するためには社会構造的な改革が必要であり、産業・社会の変化に対応した産官学の連携が重要であることを踏まえ、構造的な課題へ向けた取り組みについて提言をまとめる。

(1) 国際戦略とイノベーション

主に欧米諸国が主導する形で進んできた量子技術開発は、最近中国やインド、韓国においても重点分野として研究開発が活発化していることは第2章にまとめた通りである。これまで日本が目指してきた国際化の方向は、今後さらに重要となることが予想される。学術においては、これまでに国際共同研究や国際協力、留学生の増加が取り組まれてきた。これら取り組みのほとんどは競争的資金等による官主導の取り組みであり、科学外交的なパートナーシップに基づく個別事業として実施されてきた。その結果、国際化への取り組みが個別の競争的資金の枠内にとどまり、他の競争的資金での取り組みや大学全体の戦略と切り離されやすい。このような縦割りの構造は、高等教育や研究推進の国際化を進める上で大きな制約となる。今後、政策的な研究推進や高等教育における国際化の重要性を十分に認識し、このような構造的な問題を生み出さないような支援の仕組みを設計・実現することが要請される。

また、海外からの優秀な人材の流入は特に重要で、日本の技術開発とイノベーションにとって必須であり、戦略的な政策が求められる。2020年に始まったコロナ禍における入国制限が長期的な人材の流出につながったことや、世界情勢の急速な変動の影響など、危機管理の観点も踏まえた国際人材政策が必要とされる。研究推進、高等教育、国際人材受け入れを一体的に捉えた戦略的政策が求められる。

最近の量子技術の発展は、急速に変化する国際情勢と相まって、秘密特許、輸出管理などの新しい課題にも直面しているのが現状である。大学等にとっては新しい仕組みも多く、大学内に十分な支援体制ができていない一方で、研究者個人の責任の問題として片付けられない課題である。これらの課題がイノベーションの足枷とならないためには、イノベーションの担い手に責任を押し付けることなく、大学等における専門的な支援体制を早期に構築するための政策的な取り組みが待たれる。例えば、量子イノベーション拠点の理化学研究所HQ（ヘッドクォーター）が中心となって管理の枠組みの雛形を作成し、全国の大学で実施するなどの即効性のある取り組みが期待される。

スタートアップ企業は量子技術分野においてもイノベーション推進に重要な役割を持つと考えられる。欧米ではすでに成長したスタートアップ企業が誕生しており、海外展開にも成功している。アジア・オセアニア地域では特に欧米のスタートアップ企業を自国に誘致するための政策的な取り組みが見られる。日本においては、日本発のスタートアップ企業が少ないだけでなく、海外から進出してくるスタートアップ企業も限られている。産業的にも学術的にも量子技術開発における世界的なリーダーとしてのプレゼンスは、起業や投資を活性化する上で必須であり、その向上には長期的な取り組みを必要とする。世界に主導的なプレゼンスを発揮する研究力、大学発の起業に適した制度や

環境、産業界の量子技術イノベーションへのコミットメントなどで産官学がそれぞれの役割を果たすことが求められる。また、産業育成の長期的な観点から国際研究開発協力を戦略的に進め、海外のリソースや機会も利用してイノベーションを推進し、日本の量子産業を活性化することが期待される。

一方で、日本の産業基盤とその強みは、海外の量子技術企業にとって十分に魅力的である。OQC（英）がアジア初の拠点を東京のデータセンターに置いたことや、Quantinuum（米英）が日本の材料メーカーらと深い提携関係にあることは、その一例である[31][32]。今後のこのような発展を政策的にも支援することで、スタートアップ企業を中心としたイノベーションの加速化が期待できる。

(2) 量子技術とイノベーション

量子技術を核としたイノベーションのシナリオは各国の特色はあるものの、その中心となっているのは量子コンピュータ技術、量子計測・センサー技術、量子通信デバイス技術と既存技術基盤へのインテグレーション技術である。日本における量子技術イノベーションにおいては、既存の技術基盤への統合の具体的な方向性において、諸外国の戦略（例えば英国の量子国家戦略[12]）と比較して明確さを欠く。一方で、日本においては量子コンピュータ等のユースケース創出にかなりの投資がなされ、産業界の量子技術への進出を促してきた。しかしながら、これらの現段階の技術でのユースケース創出が量子技術の産業的なイノベーションの基礎になるとは考えにくく、むしろ第二次量子革命で起こると予想されているさまざまな技術体系をイノベーションへ繋げていくことが求められると考えるべきである。そのためには、量子技術の既存技術への統合を牽引していくための基盤と取り組みが必要である。官学が協働し、それぞれの役割の明確化と、その役割に応じた投資が必要とされる。

既存技術基盤の統合において、学術の観点から特に重要とされるのは、ビッグデータサイエンスやDX、AIなどとの融合であると考えられる。これは、量子技術のアプリケーションが拓く学術諸分野との融合とは異なる視点での融合であり、研究のあり方や発展も異なることが期待される。また、冒頭に述べたように、第二次量子革命へ向けた革新的技術の中には、量子計測・センシングや擬似量子コンピュータに見られるように量子性の程度が低い技術も含まれている。これら多様な量子技術が既存技術基盤へ統合されることが期待されている。量子技術の社会実装の主体的な担い手は産業界であり、量子技術開発が既存の技術基盤を巻き込んだイノベーションの起爆剤となりうるためには、産業界が中長期的視野に立って学術界とも協力して量子技術へ取り組むことが必要である。

今後様々な形で起こってくると予想される量子技術を中心とした分野融合的発展には、このように多様性がある。それぞれの目的と指針を明らかにした政策が必要とされる。

(3) 地球規模の課題解決へ向けた技術的アプローチ

量子技術も他の科学技術開発と同様に、地球温暖化、地球規模の環境保全、高齢化社会での課題などの現代社会の課題への貢献が期待されている。例えば、量子コンピュータではその高速性を材料、化学反応や創薬などの開発に活かすアプリケーションの道が模索されているが、これらはサステナブルで優位性のある技術を作り出すものとして期待される。さらに、イメージングやセンサー技術、通信やセキュリティ技術など量子技術の持つ多様な優位性により高度な技術が可能になる例もある。今後、これらにとどまらず、量子技術の開発を促し、その社会実装へ向けて産官学が連携して推進する具体的な取り組みが望まれる。

(4) 産業人材構造変革とイノベーションエコシステムの強化（人材の流動性）

日本の産業規模はGDP 世界4位（2024年）であり、様々な技術的な強みを持つ一方で、近年においては生産効率の低さが指摘されてきた。現代の社会基盤は高度に技術的であり、その中で高等教育はより大きな役割を担うようになってきている。日本においては、近年高い大学進学率を維持する一方で、大学院進学率は低く、また、産業界における博士人材の雇用も進んでいない。また、コロナ禍を経て、産業界において働き方が変化した一方で、世界における価値観の変化に日本の産業界が十分に対応できていないことも指摘された[33]。

量子未来社会の健全な発展へ向けては、個人の尊厳・権利の保障を大前提とし、性別や属性に関わらず能力を最大限に発揮できる包摂的（インクルーシブ）な自律型人材の育成と活用を目指した21世紀の世界的価値観に合致した社会構造への変革への取り組みが求められる[34-36]。人材の多様性や専門性の高い人材の多様な活躍は、欧米諸外国と伍するために必要となる社会構造であり、その阻害要因の分析に基づいた実現に向けた政策が強く求められる。量子技術への取り組みによる政策が、産業人材構造の変革を牽引することで、人材活用の良い流れを生み出し、日本の産業全体が人材活用の観点で、21世紀の価値観に合致した、効率の良い社会構造を生み出す原動力のひとつとなることも期待できる。

しかしながら、人材構造の変革を可能にするためには、大学における教育のあり方や企業のリスキリングをはじめ、学生の就職活動や企業研修のあり方、企業内の学位やスキルの評価制度など、様々な側面について、産学が対話の場を持ち、継続的に議論を行いながら、新しい社会的な仕組みを整えていく必要がある。ここでもまた、日本の産業界が高等教育に対してより多くの関心と期待を持ち、高等教育を尊重しながらも主体的にそのあり方に関わっていくことが必要とされる。人材構造の変革を通じた量子産業のエコシステムが十分に機能するためには、学術界においては、従来の人材評価軸に加えて流動する人材の評価の構築、産業界においては自社開発に閉じることのない、様々なセクターとの協働の促進が必要であり、官庁においては、これらの流動性を確保、促進するための仕組みや財政的な補助を早急に具体化し、実装する必要がある。

また、日本の量子産業エコシステムが国際的に十分なプレゼンスを発揮するためには、国際的な人材流動の確保が不可欠である。国際的な人材流動の確保は、研究やイノベーションの質の向上と維持に不可欠であるだけでなく、長期的に産業界全体が活性化し、イノベーションに適した環境を維持するための重要な要素であると考えべきである。そのためには、学术界及び産業界において、国際的な人材が十分に活躍できる環境を整えることが必要である。その実現には、研究の環境のみならず、研究の支援や家族に対する支援も含めて、国際的な水準を実現する必要がある。海外の優れた人材が日本において活躍するためには、英語を共通言語とした労働環境の実現が必須である。量子技術への取り組みにおける様々な職種において、国際的な環境が達成できることで、量子技術分野のエコシステムを国際的に機能させることができ、日本を量子イノベーションの魅力的な市場とすることができる。日本において国際的な労働環境の実現には、サポート人材の不足、コスト高、従来型の給与体系など特有の課題がある。これらの課題は解決へ向けた迅速な施策が必要である一方で、同時に雇用にかかる課題であり長期的な視野を持って行う必要がある。量子未来社会の実現に向けてそのような環境を産業界及び学术界で構築することは、21世紀の国際的な価値観に合致した社会構造を生み出す原動力のひとつにもなり、他の分野の同様な動きと連動することで、効果的に進めることが期待できる。

(5) 持続的な量子未来社会の実現

① 社会における量子技術の受容性の促進

量子技術は技術の原理から変革を起こすものであるため、これまで一般に科学的と考えられてきた考え方にも変革を起こす可能性がある。例えば、量子性のひとつである非局在性や重ね合わせ状態、また、因果律にも新しい側面をもたらすことが知られている。現状の科学や社会制度の多くが因果律に基づいて構成されていることから、このことは社会全体に大きな影響を及ぼす。今後、これらの概念が技術として社会に入っていく時に、人々がこの新しい技術について受け入れるためには、量子的な考え方の社会への浸透が必要とされる。また、法制度においても量子技術の捉え方を法的にも整備する必要があると考えられる。例えば、量子コンピュータによる暗号解読リスクに伴う「電子署名法」における署名の法的効力のあり方や、量子鍵配送の社会実装によって情報理論的に解読不可能な暗号技術を利用する上での法的課題、また、超高感度な量子センシング技術がもたらす新たなプライバシー侵害のリスクへの法的対応、さらにデュアルユース技術としての輸出管理規制の明確化など、技術の進展に法制度を適合させるための議論が不可欠である。

量子技術の受容性の促進には、従来考えられてきたように教育及びアウトリーチ活動が重要であることはいまでもない。例えば、量子力学の原理を直感的に理解できるゲーム教材の開発や、クラウド実機を用いた体験教室、さらには技術的リスクや倫理的課題について市民と研究者が双方向に議論するサイエンスカフェのような対話活動などが挙げられる。これらの活動は主に官主導で行われてきた[37]が、今後必要と

される活動の規模を考えると、産業界の支援や公益活動など、これまでとは異なる形の投資による活動も必要となってくることが予想される。また、量子科学技術分野では、基本概念が捉えにくく、間違った説明や誤解を助長する記述が社会に広まっているという特別な事情がある。産業界主体のアウトリーチ活動や初等中等教育へのアプローチにおいては、量子科学技術の基本概念が正しく伝わるよう、専門的な人材の育成と活躍が必須となってくる。ここでも学術研究の成果や教育を社会に還元するための専門性の高いサポート体制が必要とされており、求められている社会の仕組みの再構築の中のひとつの取り組みとして位置付けられる。

② 学術コミュニティにおける新しい課題

学術界においては、大学の役割が増大するなか、また、国際的な情勢の変化も伴い、輸出規制や秘密特許などに対応する新しい仕組みが必要とされていることはすでに述べた。これらは、大学等における既存の枠組みでの対応能力を超えており、早急に官主導での支援作りが必要である。必要となる人材の育成と大学等への派遣や、ガイドラインの作成などが求められる。また、これらの事情が国際的なイノベーションエコシステムの構築や人材の流動性の実現と矛盾することがないように、国際化の政策と並行して実施されるように仕組み作りを進めることが必要である。

また、量子技術分野は最近急速に成長したことで、学術界内にも新たな課題が生まれている。例えば、量子技術分野はこれまで学術界が中心となって発展してきた分野であるが、最近産業界における研究が活発化し、ジャーナルへの投稿論文数が急増している。一方で学術界における研究者の規模はそこまで変化していないので、査読者を主に学術界に頼らざるをえない状況により、査読者が不足している等の問題が生じている。このような学術界における新たな負担は、従来の研究成果のオープン化の議論の中だけでは解決されない。例えば、投稿費を導入することで学術論文出版経費をより公平に分担する仕組みや学術研究の執筆者でもある産業界の研究者が論文審査に参加する仕組み、ピアレビューの仕組みの見直しなど、学術界全体の課題として議論し、早期に解決へ向けて前進することが要請される。

5 提言と今後の展望

本提言では、量子未来社会の実現に向けて、現在の課題から長期的な課題も含めて、量子未来社会の実現の課題として整理し、それらの課題に対して必要とされる指針と具体的な取り組みについてまとめることで、その将来を展望した。量子技術の研究開発における課題の本質は、量子技術の持つ広がり、インパクト、そして長期性といった量子技術の特質に根ざしており、その特性を理解し、科学的な分析をもとにした指針や取り組みが必要とされる。その際、量子技術の現在の発展段階と技術的課題について社会全体が科学的根拠に基づいた正確な認識を共有することが、量子未来社会の健全な発展の前提となる。特に量子技術の実現においては、基礎的な研究における研究力の強化が、国際的なインパクトや将来の日本の産業的な強みに直結することを踏まえ、投資や政策作りが行われるべきである。量子技術の革新性とその広がりから、量子未来社会実現へ向けた社会の構造的な変革は必須であり、様々な領域で専門性の高い人材が活躍できる仕組みを構築することは、量子技術のイノベーションエコシステムの実現に不可欠である。その際、国際的な人材の流動性や国際社会状況の変化への対応なども重要な要素である。量子未来社会へ向けた諸課題は、産官学が協働して初めて解決できる課題であり、すべてのステークホルダーが議論する場を持ち、それぞれの役割を再定義して、量子未来社会に適した新しい社会構造を構築することが求められている。

<参考文献>

- [1] R. P. Feynman, “Simulating physics with computers,” *Int. J. Theor. Phys.* 21, 467-488 (1982)
- [2] C. H. Bennett and G. Brassard, “Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing,” *Proc. IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, p. 175 (1984)
- [3] 統合イノベーション戦略推進会議、「量子未来社会ビジョン」、2022年4月22日
- [4] 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）、「戦略プロポーザル 量子2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」、2020年
- [5] 統合イノベーション戦略推進会議、「量子技術イノベーション戦略」、2020年1月21日、https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku_r.pdf
- [6] J. Preskill, 《Quantum Computing in the NISQ era and beyond》, *Quantum* 2, 79 (2018)
- [7] F. Arute et al., 《Quantum supremacy using a programmable superconducting processor》《*Nature* 574, 505 (2019)
- [8] C. M. Caves, Quantum-mechanical noise in an interferometer, *Phys. Rev.D* 1693 (1981)
- [9] S. F. Huelga, C. Macchiavello, T. Pellizzari, A. K. Ekert, M. B. Plenio, and J. I. Cirac, “Improvement of Frequency Standards with Quantum Entanglement,” *Phys. Rev. Lett.* 79, 3865 (1997).
- [10] S. L. Braunstein and C. M. Caves, “Statistical distance and the geometry of quantum states,” *Phys. Rev. Lett.* 72, 3439 (1994).
- [11] J. J. Bollinger, W. M. Itano, D. J. Wineland, and D. J. Heinzen, “Optimal frequency measurements with maximally correlated states,” *Phys. Rev. A* 54, R4649 (1996)
- [12] Policy paper: National Quantum Strategy Missions, Department for Science, Innovation & Technology, UK, Nov. 2023.
- [13] Bennett, C. H.; Brassard, G. (2014). “Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing”, *Theoretical Computer Science* Volume 560, Part 1, 4 December 2014, Pages 7-11.
- [14] 株式会社日本総合研究所、「量子コンピュータの動向と展望」、スライド19、2024年10月29日、<https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/advanced/advanced-technology/pdf/15330.pdf>
- [15] 藤井啓祐、essense「量子の世界にはファンタジーがある。量子コンピューターの進化と共に歩んできた研究者人生」、2025年7月1日、<https://essense.com/articles/152>

- [16] Ruane, J., Kiesow, E., Galatsanos, J., Dukatz, C., Blomquist, E., Shukla, P., "The Quantum Index Report 2025", MIT Initiative on the Digital Economy, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, May 2025.
- [17] 株式会社富士通総研、「経済産業省令和2年度産業技術調査事業（産業界と大学におけるイノベーション人材の循環育成に向けた方策に関する調査）報告書」、2021年3月
- [18] Ciaran Hughes, Doug Finke, Dan-Adrian German, Celia Merzbacher, Patrick M. Vora, H. J. Lewandowski, "Assessing the Needs of the Quantum Industry", arXiv:2109.03601, Aug 2021
- [19] 独立行政法人情報処理推進機構（IPA）、「DX 白書 2021」、2021年12月1日
- [20] みずほ情報総研株式会社、「平成30年度我が国におけるデータ駆動型社会に係る基盤整備（IT人材等育成支援のための調査分析事業）-IT人材需給に関する調査-調査報告書」、2019年3月
- [21] Enzo Bonacci, "On Teaching Quantum Physics at High School", Athens Journal of Education, 7(3), 313-330, (2020).
- [22] Girls in Quantum, <https://www.girlsinquantum.com>
- [23] Quokka Quantum, <https://www.quokkacomputing.com>, Australia
- [24] OECD Education at a Glance 2024, country note (Japan)
- [25] 豊田長康、「研究力強化と学術会議への期待」、日本学術会議第191回総会資料2-1、2024年4月22日
- [26] 日本学術会議科学者委員会研究評価分科会、提言「学術の振興に寄与する研究評価を目指して」、2021年11月25日
- [27] 文部科学省科学技術・学術政策研究所、科学技術予測・政策基盤調査研究センター、西川開、黒木優太郎、伊神正貫、「科学研究のベンチマーキング 2021」、2021年8月
- [28] Michele Mosca, and Marco Piani, Quantum Threat Timeline Report 2023, Global Risk Institute, <https://globalriskinstitute.org/publication/2023-quantum-threat-timeline-report/>、米国 NQI, <https://www.quantum.gov/science/>
- [29] エンジニアリング日本、量子コンピューティング研究プロジェクト：インフィニオンが工業化の専門知識を提供、2021年2月9日、<https://www.engineering-japan.com/news/36461-%E9%87%8F%E5%AD%90%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%94%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%82%B0%E7%A0%94%E7%A9%B6%E3%83%97%E3%83%AD%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%82%AF%E3%83%88%E3%82%9A%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%95%E3%82%A3%E3%83%8B%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%81%8C%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E5%8C%96%E3%81%AE%E5%B0%82%E9%96%80%E7%9F%A5%E8%AD%98%E3%82%92%E6%8F%90%E4%BE%9B>
- [30] 2040年に向けた高等教育のグランドデザイン（答申）（中教審第211号）
- [31] 日本経済新聞、2023年4月、<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UC135A80T10C23A3000000/>

- [32] <https://quantinuum.co.jp/20220524-2/>、2025 年 4 月
- [33] 経済産業省未来人材会議、「未来人材ビジョン」、2022 年 5 月
- [34] 国連社会権規約委員会勧告（2013 年）
- [35] 国連女性差別撤廃委員会勧告（2024 年）
- [36] 国連ミレニアム宣言（United Nations Millennium Declaration）、2000 年、
<https://www.unic.or.jp/files/millen.pdf>
- [37] 文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）人材育成プログラム、「量子スマート社会の実現に向けた高度人材育成」、2018 年開始

＜用語集＞

量子情報 (Quantum Information) : 量子力学の原理 (重ね合わせや量子もつれなど) に基づいて処理・伝送される情報のこと。従来の「ビット (0 または 1) 」に対し、「量子ビット」を基本単位とし、計算、通信、計測などの分野で従来技術の限界を超える性能を実現する基礎となる概念。1990 年代より量子力学と情報理論の概念の融合が急速に進み、量子力学の新しい理論体系として量子情報が確立した。

フォールトトレラント実装 : 量子誤り訂正符号を誤りが伝播しないように実装する方法はフォールトトレラント実装と呼ばれる (量子誤り耐性実装と呼ばれる時もある。)。任意の精度で誤りを制御するための方法としては現時点においてはフォールトトレラント以外の方法は発見されていない。

古典計算機 : 量子計算の原理を実行するハードウェアを量子計算機、それ以外は古典計算機と呼ばれる。従来の計算技術はこの意味で古典計算技術となる。

量子ゲート (Quantum Gate) : 量子コンピュータにおいて、量子ビットの状態を変化させる基本操作のこと。従来のコンピュータにおける論理ゲート (AND、OR、NOT など) に相当するが、量子重ね合わせ状態を保持したまま演算を行う点が異なる。

エンタングルメント (量子もつれ / Entanglement) : 2 つ以上の量子 (粒子) の間に存在する特殊な相関関係のこと。一方の粒子の状態を測定すると、もう一方の状態も瞬時に確定するという性質を持ち、量子通信や量子計算の高速化において重要なリソースとなる。

デコヒーレンス (Decoherence) : 量子系が外部環境と相互作用することで、量子力学特有の「重ね合わせ状態」や「量子もつれ」が壊れてしまう現象。量子コンピュータや量子通信の性能を維持する上で、デコヒーレンスの抑制が最大の技術的課題のひとつとなっている。

＜参考資料 1＞審議経過

2024 年

- 4 月 22 日 情報学委員会（第 26 期・第 8 回）
 - ・テーマについての議論
- 7 月 5 日 情報学委員会（第 26 期・第 9 回）
 - ・意思の表出の検討状況について
- 10 月 22 日 第三部会（第 26 期・第 4 回）
 - ・委員会等からの活動報告（意思の表出検討中の委員会等）
- 情報学委員会（第 26 期・第 10 回）
 - ・提言骨子案について

2025 年

- 4 月 15 日 情報学委員会（第 26 期・第 11 回）
 - ・提言案について
- 7 月 18 日 情報学委員会（第 26 期・第 12 回）
 - ・提言案について
- 10 月 27 日 情報学委員会（第 26 期・第 13 回）
 - ・提言の進捗状況について

2026 年

- 1 月 14 日 情報学委員会（第 26 期・第 14 回）
 - ・量子提言の進捗と今後について
- 4 月 10 日 情報学委員会（第 26 期・第 15 回）
 - ・提言の進捗について
- 8 月 6 日 情報学委員会（第 26 期・第 16 回）
 - ・提言の進捗について

＜参考資料 2＞

本提言の作成にあたり、以下の方々に意見聴取にご協力いただいた。（肩書はヒアリング当時のもの）

第三部会員	伊藤 公平	学校法人慶應義塾塾長
第三部会員	腰原 伸也	東京科学大学教育本部特命教授／筑波大学数理物質系客員教授
第三部会員	佐田 豊	株式会社東芝執行役上席常務 CTO
連携会員	荒川 泰彦	東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構特任教授
連携会員	五神 真	国立研究開発法人理化学研究所理事長
連携会員	波多野睦子	東京科学大学理事・副学長
連携会員	馬場 嘉信	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子生命科学研究 所所長／名古屋大学未来社会創造機構教授
	青木 隆朗	早稲田大学先進理工学部応用物理学教授
	井元 伸之	東京大学特命教授室特命教授
	上田 正仁	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻教授
	大島 武	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤 研究所センター長
	大森 賢治	大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所光分子 科学研究領域教授
	岡田 俊輔	株式会社東芝上席常務執行役員
	川畑 史郎	法政大学コンピュータ基礎分野量子コンピュータ研究室教授
	岸本 哲夫	電気通信大学量子科学研究センター准教授
	北野 正雄	京都大学高等教育研究開発推進センター教育担当理事・副学長
	小芦 雅斗	東京大学光量子科学研究センター教授
	小坂 英男	横浜国立大学大学院工学研究院教授
	上妻 幹旺	東京科学大学総合研究院量子航法研究センター教授
	小林 和淑	京都工芸繊維大学電気電子工学系教授
	小安 重夫	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構理事長
	佐々木雅英	国立研究開発法人情報通信研究機構未来 ICT 研究所主管研究員
	寒川 哲臣	NTT 先端技術総合研究所所長
	高橋 優樹	沖縄科学技術大学院大学量子情報物理実験ユニット准教授
	竹内 繁樹	京都大学大学院工学研究科電子工学専攻教授
	樽茶 清悟	国立研究開発法人理化学研究所創発物性科学研究センター量子 機能システム研究グループグループディレクター
	豊田 健二	大阪大学量子情報・量子生命研究センター教授
	中村 泰信	国立研究開発法人理化学研究所量子コンピュータ研究センター センター長
	永山 翔太	慶應義塾大学政策・メディア研究科特任准教授

平山 祥郎	東北大学大学院理学研究科物理学専攻教授
古澤 明	東京大学工学部物理工学科・大学院工学系研究科物理工学専攻教授
堀部 雅弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター副センター長
森 貴洋	国立研究開発法人産業技術総合研究所量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター量子デバイス研究チーム
山下 茂	立命館大学情報理工学部教授
山本 俊	大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻物性物理工学領域教授
山本 直樹	慶應義塾大学理工学研究科基礎理工学専攻教授