

Title	イギリス規制ホライズン委員会：量子技術応用を規制する（日本語訳）
Author(s)	規制ホライズン委員会；榎本，啄杜
Citation	ELSI NOTE. 2024, 48, p. 1-90
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98293
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University



イギリス規制ホライズン委員会： 量子技術応用を規制する (日本語訳)

Translator

榎本 啄杜

大阪大学 社会技術共創研究センター 特任研究員（常勤）（2024年10月現在）

本ノートの作成は、Regulatory Horizons Council (2024) 'Regulating quantum technology applications' を日本語訳したものに訳者解説を付したものである。また、大阪大学 社会技術共創研究センター（ELSI センター）と PwC コンサルティング合同会社（パートナー 大橋 歩）との共同研究の一環として行ったものである。

なお、本ノートを引用する場合の著者名は「規制ホライズン委員会」とする。

© [Regulating quantum technology applications, Regulatory Horizons Council], [2024]

[\[https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-horizons-council-regulating-quantum-technology-applications\]](https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-horizons-council-regulating-quantum-technology-applications)

目次

訳者解説	4
イギリスの量子関連政策.....	4
「量子技術の ELSI 入門」として読む.....	4
翻訳の方針.....	5
まえがき	7
エグゼクティブ・サマリー	8
量子制御経路.....	10
ドメイン特化の規制要件.....	10
提言.....	10
1. はじめに	12
1.1. 規制ホライズン委員会 (RHC).....	12
1.2. 量子レビューの背景とスコープ.....	12
1.3. レビューの目的.....	14
1.4. 人工知能 (AI) からの横断的な課題と教訓.....	16
2. 技術成熟度と量子技術の変革性	19
2.1. 技術成熟度.....	19
2.2. 漸進的イノベーションと破壊的／変革的イノベーション.....	20
2.3. 量子バリューチェーンへの影響.....	21
2.4. 量子技術の比例的かつ適応的なガバナンス.....	23
3. 責任あるイノベーションと規制の原則	26
3.1. 量子技術のための責任あるイノベーション.....	26
3.2. 量子技術の規制原則.....	29
4. 量子制御経路	31
4.1. プラットフォーム技術ではなく、応用を規制する.....	31
4.2. ガバナンス構造.....	33
4.3. タイミングを合わせる.....	36
4.4. 規制当局のサポート、トレーニング、リソース.....	39
4.5. テストベッドとサンドボックス.....	41
4.6. 標準開発における産業界との協働.....	43
4.7. 市場の創造—顧客としての政府.....	45
4.8. トランスレーショナル・ファンディング.....	47
4.9. 国際協働.....	49
4.10. 今後の規制に関する検討事項.....	52

5. ドメイン特化の規制要件	55
5.1. 量子センシング、タイミング、イメージング	56
5.2. 量子通信.....	63
5.3. 量子コンピューティング	70
付録	75
付録 A：方法論	75
付録 B：用語	76
付録 C：図表	78
付録 D：国際比較	81
付録 E：謝辞	87

訳者解説

イギリスの量子関連政策

セクション1でも詳細に述べられているように、イギリスでは他国よりも早く、2014年から「国家量子技術プログラム」を開始している。加えて、このプログラムには量子技術のELSIへと言及する項目も設けられており、量子技術に関する総合的な国家的なイニシアティブとしては先進的かつ特色があるものだと評価できるだろう¹。

この「国家量子技術プログラム」を直接的に推進する主体は科学イノベーション技術省内に設置された「量子室」であるが、他方で、量子技術に関する適切なガバナンスのあり方の検討については、独立専門委員会である「規制ホライズン委員会（以下、RHC）」へと委託されている²。RHCは2019年に設置され、「技術革新の含意を特定し、その迅速かつ安全な導入を支援するために必要な規制改革について、政府に公平かつ専門的な助言を行う独立専門委員会」として、数ある新興技術の中から優先順位をつけたうえで、政府向けの報告書を次々と公表している。本レポートは、このRHCによって作成された作業計画報告書である。その内容はイギリスの国益へと資する目的で書かれているが、より一般化した文脈においても適用可能なものであり、日本を含む他国においても取り上げる意義は大きい。

「量子技術のELSI入門」として読む

本レポートは、数少ない「量子技術のELSI」への入門として非常に有益である。榎本ら³は量子技術のELSIへと対応するプロセスとして【見据える】【紐解く】【手懐ける】という3要素のサイクルを提唱しているが、本レポートは（重きの置き方はやや異なるものの）まさにこのサイクルに対応する形で、首尾よく量子技術のELSIを整理している。

¹ 詳しくは、以下を参照。榎本啄杜・長門裕介・岸本充生, 2024, RRIを量子技術領域へ適用する: 政策レビュー, ELSI NOTE (38), <https://elsi.osaka-u.ac.jp/research/2738>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

² 詳しくは、セクション1および以下を参照。岸本充生, 2023, イノベーションに資する規制に向けて—英国とカナダの独立諮問委員会の取り組み, <https://www.tkfd.or.jp/research/detail.php?id=4176>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

³ 榎本啄杜・長門裕介・岸本充生, 2024, 量子技術のELSIを探る: 文献レビュー, ELSI NOTE (41), <https://elsi.osaka-u.ac.jp/research/2843>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

まず、量子技術の基礎的用語や問題意識を手際よく押さえたうえで、当該分野においてどのような課題があるのかを発見する作業（【見据える】）を行っている（セクション1; 付録B）。ただし、「量子技術」と一口に言ってもコアとなる「プラットフォーム技術」としての量子技術と、センシングやコンピューティングといった個別の「ドメイン特化技術」としての量子技術を区別して論じる必要があることに注意しておきたい⁴。この点は、【紐解く】【手懐ける】という後段のプロセスにおいても重要になる。

次に、量子技術には漸進的性質や破壊的性質があることを考慮し、「技術成熟度（TRL）」を軸としたガバナンスの下地作りの作業（【紐解く】）を行っている（セクション2）。技術成熟度は日本の量子戦略文書でも取り上げられているが、日本では量子技術を取り入れたい企業向けのユースケースを提示する際の指標として用いられている⁵。一方で、本レポートでは同じく技術成熟度を指標として用いながらも、課題へと対処するための規制設計を志向している点で特色がある。

最後に、技術成熟度により紐解かれた課題に対して、比例的かつ適応的なガバナンスをもって対応する策（【手懐ける】）が述べられる（セクション3~5）。ここで注意したいのは、本レポートにおける「規制」とは法的拘束力を伴うものばかりではなく、比較的柔軟で迅速な対応にも耐えうる「標準」や「ガイドライン」といったものも含まれるということだ。このように柔軟な仕方で規制を設計することにより、対応策を講じた後にも硬直化することなく再び前段のステップへと立ち返り、【見据える】【紐解く】【手懐ける】のサイクルを何度も回すことが可能になる。

翻訳の方針

本レポートを翻訳するにあたっては、いわゆる「直訳」「逐語訳」の方針を意図的に採用している。これは、「日本語訳を読むだけで、原文の構造をある程度予測できるべきだ」という訳者の信念を反映したものである。確かに、「自然な日本語であることを重視して、文構造を工夫すべきだ」「訳者独自の解釈が入り込んでいないと、その訳者本人が翻訳した意義が薄れる」とい

⁴ 長門は同じ趣旨で「総称としての量子技術」「個別領域としての量子技術」という区別を設けて論じている。前者が「プラットフォーム技術」、後者が「ドメイン特化技術」に対応する。長門裕介, 2024, 量子技術, 標葉・見上編『入門 科学技術と社会』, ナカニシヤ出版。

⁵ 詳しくは、以下を参照。内閣府, 2023, 量子未来産業創出戦略, https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai.pdf, (閲覧日: 2024年9月1日)。

った意見もあるだろう。訳者も、こうした方針のメリットを丸ごと否定するわけではない。しかし、こうした方針は往々にして原著者の意図から外れた誤訳へと繋がり、それでいて（自然な日本語であるがゆえに！）誤りの箇所が原文のどの部分と対応しているのかがわかりづらい、という欠点を持つ。

こうした事情を踏まえ、訳者は日本語の自然さをある程度まで犠牲にしたうえで、原文の持つリズムや意図をなるべくそのまま残すことのできる直訳を選択した。ただし、これは読者からの誤訳の指摘を免れるための言い訳ではない。むしろ、原文の構造をそのまま残すことで誤訳を発見しやすくなり、読者からのフィードバックを最も受け付けやすい方法なのではないかと訳者は考えている。

なお、本レポートは Open Government Licence 3.0 のもとでライセンスが付与されている。詳しくは、<https://www.nationalarchives.gov.uk/doc/open-government-licence/version/3/>を参照のこと。

まえがき

以下、イギリス政府の科学技術フレームワークから引用する。

イギリスは現在 [...] 技術標準の策定や国際規制の構築において最前線に立っている。これらの規制は、イノベーションを促進し、科学技術に対する需要を高め、投資を呼び込むものであると同時に、イギリスの価値観を表し、市民の保護に寄与するものでもある。イギリス政府は、科学技術における強みと国際的なネットワークを活かして、規制や技術標準に対する影響力を確保している。

量子技術は、センシング、イメージング、通信、そして計算において新たな能力を生み出す破壊的な技術であり、今後 10 年間で我々の世界を変革する可能性がある。世界中で、このエキサイティングな科学分野における研究や商業化、そして標準化を結びつける大規模なイニシアティブが進行している。各国は数十億ドルの投資を行い、量子経済の実現に向けた開発が加速している。

既存のインフラと安全に共存しつつ、技術が最適な成果を生むための効果的なフレームワークを開発することが、このレビューの目的である。

規制は、ユーザーや開発者に安心感を与え、導入の障壁を取り除き、特に行動が求められる場合と情報収集だけで十分な場合を把握するといったことを実現できるものとしてみなされるべきだ。

本レポートは、規制フレームワーク、標準、そして技術成熟度を関連付ける貴重な枠組みを提示している。倫理的配慮を確実にに行い、ユーザーや一般市民に必要な安心を提供するためには、責任あるガバナンスが不可欠である。この驚くべき技術の可能性を実現しようと取り組むすべての人々に、このレポートを推薦する。

ピーター・ナイト卿
国家量子技術プログラム戦略諮問委員会委員長

エグゼクティブ・サマリー

量子技術は、画期的な能力の転換をもたらす。古典的な計算能力を凌駕し、通信能力を強化し、測定精度を高める可能性を秘めており、ヘルスケアから国家安全保障に至るまで、多くの分野を再定義しようとしている。イギリスがその最前線に立ち、量子技術の変革力を理解し活用することは、国際競争力を維持する上で重要だ。先駆的な進歩により、社会的・経済的に莫大な利益がもたらされることが期待されている。

2023年のマッキンゼーの量子技術モニターによれば、量子エコシステムは活気に満ちており、成長している⁶。同モニターによれば、世界の量子コンピューティング市場は2040年までに930億ドルに達し、量子技術全体の潜在市場規模は1060億ドルに達すると予測されている。量子センシング、タイミング、イメージング、通信の各分野も、それぞれ2040年までに市場規模が10億ドルから70億ドルに達すると見込まれている。これらの予測は、量子技術がイギリス経済に与える潜在的な影響を浮き彫りにしており、こうした機会を実現するためには、適切な規制アプローチを確立することが重要になる。

量子技術はさまざまな発展段階にあり、多くの技術がまだ初期段階であることを踏まえると、法的根拠に基づく規制に飛びつくのは「時期尚早」という関係者の意見はよくわかる。しかし、規制に関する議論を進め、量子関連の製品やサービスを計画することは重要だ。規制の時期、範囲、形が明確でないことは、投資や長期的な事業計画の妨げになる可能性がある。本レポートでは、強固な量子エコシステムを醸成する目的で、イノベーションを促進する規制フレームワークの開発を提案している。イギリスには強力な学術コミュニティと活気あるスタートアップコミュニティがあり、このフレームワークの目指すところは、国内の人材と投資を維持するだけでなく、規制の明確化と責任あるイノベーション（RI）の実践にコミットする国際的な開発者や投資家を惹きつけることである。こうしたアプローチは、量子技術の恩恵がイギリス国内ではなく、国外で実現してしまうリスクを軽減することにも繋がる。

本レポートの提言は、比例性、適応性、責任、バランスの原則に基づいた規制アプローチを促進することを目指している。これらの原則は、量子エコシステム全体に浸透し、規制だけでなく

⁶ McKinsey & Company, 2023, Quantum Technology Monitor, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf>, (閲覧日：2024年9月1日)。

イノベーションのプロセスそのものを導く指針となるべきだ。RHCによる規制とガバナンスの定義には、標準、ポリシー、ベストプラクティス、行動規範、手続きなどが含まれ、単なる法規制には留まらない。責任あるイノベーション（RI）は、このような規制アプローチを通じて支えられるべきであり、社会的・倫理的・環境的な影響を考慮しながら、量子技術の開発に初期段階から組み込まれる必要がある。

とりわけ潜在的な応用が市場での実用化に近づくにつれ、責任ある開発を確保し、潜在的な倫理・安全・セキュリティ上の課題から保護するためには、そしてまた、投資家や開発者が求める確実性を担保することによってイノベーションが発展できるような環境を整えるためには、比例的かつ柔軟な規制フレームワークが必要である。潜在的な利益を最大化し、リスクを軽減するエコシステムを育むためには、協働が不可欠だ。量子技術の開発を取り巻く不確実性を考慮すると、今後10年間に多くの変革的なイノベーションが生まれると予想できる。このような将来のイノベーションの性質と影響力は、量子イノベーションの軌跡に沿った今日の初期段階でのガバナンスがどれだけ適切に管理され、エコシステムに関わるすべての人々の責任をどれだけ強調するかにかかっている。

- **学術界**は、責任あるイノベーション（RI）の文化を広めつつ、量子リテラシーの醸成を主導する役割を担う。
- **政府**は、資金援助やイノベーション促進政策を通じて、新しい技術をいち早く採用し、市場の信頼を高めるとともに、公共の利益の保護者としての役割を果たす。
- **イノベーター**は、規制当局と協力して最適なガバナンス手段（規制、標準、ベストプラクティスのガイダンス）を検討し、責任あるイノベーション（RI）を推進しつつ、技術の限界を押し広げ、新たな開発に挑戦しなければならない。
- **規制当局**や**標準化団体**は、量子技術の発展において、イノベーションを阻害せずに、消費者や公共の利益を保護する環境を整えるために重要な役割を果たす。

このレポートでは、適切なタイミングで適切な開発段階に介入することの重要性を強調しているのであって、量子に特化した規制や量子規制当局の設立を求めているわけではない。その代わりに、規制機関や政策立案者が量子技術に対応できるよう、より柔軟で繊細なアプローチを提案している。

量子制御経路

セクション4では、これまでの RHC レポートから得られた知見を整理し、量子技術に対する比例的かつ適応的なガバナンスのあり方について、具体的な提言を行う。量子技術の応用が多様かつセクターごとに特化したものであることを踏まえると、規制当局はプラットフォーム技術⁷ではなく、量子技術に関連する製品やプロセスに焦点を当てるべきだ。そして、これらの製品の特性や製造業者、流通業者、消費者のニーズに応じた多様な規制アプローチを取ることが求められる。

ドメイン特化の規制要件

セクション5では、量子技術の応用分野が多岐に渡ることを踏まえ、量子センシング、タイミング、イメージング、通信、コンピューティングといったものに特化したドメイン⁸について、市場成熟度、変革の可能性、具体的な規制上の課題などを分析し、各分野に応じた提言を行っている。

提言

セクション4とセクション5では、適応性があり、比例的で、バランスのとれた規制フレームワークの開発を導くことを目的とした一連の提言を概説している。これらは、イギリスの国家量子技術戦略で定められた広範な戦略目標に沿っており、イギリスを量子技術のイノベーションを促進する規制環境整備におけるリーダーとして位置づけるものだ。本レポートは、量子技術規制の中心において、より確実性を高め、責任あるイノベーション (RI) の実践を確立することを目的としている。提言は大きく3つのカテゴリーに分かれている。

● 規制フレームワークとガバナンス：

本レポートでは、量子イノベーションの独自の特性や開発段階に適応し、それに応じた応用

⁷ プラットフォーム技術：本レポートでは、他のアプリケーションや技術が開発される基盤となる基礎技術を指す。量子技術の文脈では、プラットフォーム技術とは、さまざまな分野における幅広い潜在的なアプリケーションを支える一連の量子能力またはシステムを意味する。これらは特定の最終用途向けに調整されたものではなく、特定の量子応用の開発を可能にするコア技術能力を提供する。

⁸ ドメイン：本レポートでは、量子技術における特定の応用分野または利用分野を指す。特定の実際的な応用または目的のために量子技術を利用する専門分野を意味する。たとえば、「ドメイン特化の量子技術」には量子コンピューティング、量子通信、量子センシング、量子イメージングなどが含まれ、それぞれ独自の規制および技術要件を持つ応用分野である。

に特化した規制フレームワークを開発する必要性を強調している（提言 1）。また、主要な提言として、量子規制フォーラムの設立（提言 2）、規制要件に対する先見のアプローチの導入（提言 3）、認知向上トレーニングの提供（提言 4）などがある。

- **標準と国際協働：**

量子技術における標準化と国際調和の重要性が強調されている。これには、イギリス量子標準パイロットネットワークの強化（提言 6）、国際規制フォーラムへのイギリスの戦略的関与の提唱（提言 9）などが含まれる。本レポートではまた、量子通信における相互運用性標準の確立（提言 11）、量子通信に関連するセキュリティ懸念への対応（提言 12）、量子コンピューティングに特有の規制上の課題への対応に重点を置き、標準化と責任あるイノベーション（RI）に基づくバランスのとれたアプローチを提唱している（提言 14）。

- **イノベーションの資金調達と市場開発：**

提言には、量子技術の開発に規制と責任あるイノベーション（RI）の実践を統合する必要性が含まれている。具体的には、規制要素を取り入れたテストベッドやサンドボックスの確立（提言 5）、量子技術市場の創出を目的とした調達戦略の活用（提言 7）、量子イノベーションを支援するためのトランスレーショナル・ファンディング環境の整備（提言 8）などがある。また、成熟した量子応用に対する規制政策と資金提供（提言 10）、オンライン安全法などの法的フレームワークの遵守（提言 13）の重要性も強調されている。

当委員会は、量子技術の規制に関するこれらの提言を採択するかどうかについて決定を下す立場にはないが、導入する場合には、その成功のために必要な支援を提供する用意はできている。

1. はじめに

1.1. 規制ホライズン委員会（RHC）

技術は急速に進歩しており、政府は新たな技術がもたらす影響を事前に見通す必要がある。そのためには、安全性を確保し、リスクを軽減しつつ、イノベーションを促進・支援する規制環境を整えることが求められる。こうした背景から、イギリス政府は2019年版白書「第4次産業革命のための規制」において、規制ホライズン委員会（Regulatory Horizons Council; RHC）を設立した⁹。同委員会は、科学イノベーション技術省（Department for Science, Innovation and Technology; DSIT）が後援する独立専門家委員会である。RHCの役割は、イノベーションの影響を特定し、その迅速かつ安全な導入を支援するために必要な規制改革について、公平かつ専門的な助言を政府に提供することである。RHCは、医療機器としての人工知能（AI）、ニューロテクノロジー、ドローン、核融合エネルギーなど、さまざまな分野のレポートを作成している。

1.2. 量子レビューの背景とスコープ

RHCは、イギリスの2023年国家量子戦略に基づき、量子室（the Office for Quantum）から「量子技術応用の規制レビューの実施」を委託された¹⁰。本レポートは、量子技術に関わる幅広いステークホルダーからの情報に加えて、委員会の集合的な専門知識、経験、そして他の新興技術の規制に関するこれまでの作業プログラムから得られた教訓を活用している。本レポートの作成方法および関係者の詳細なリストは、付録AおよびEを参照されたい。

このレビューが取り組む包括的な問いは次のようなものだ。

革新的な量子技術応用の迅速かつ安全な導入を促進するために、現在、そして近い将来、どのような規制やガバナンスのアプローチや対策が必要なのか？

RHCは、「規制」と「ガバナンス」を、法律、標準、ガイダンス、ポリシー、ベストプラクティス、業界または専門家の規範、要件、手続きといった要素を包括する広義の用語として定義して

⁹ Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2019, Regulation for the Fourth Industrial Revolution, <https://www.gov.uk/government/publications/regulation-for-the-fourth-industrial-revolution/regulation-for-the-fourth-industrial-revolution>, (閲覧日：2024年9月1日)。

¹⁰ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National quantum strategy, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>, (閲覧日：2024年9月1日)。

いる。

量子技術については、広義には「量子力学に依存して、『古典的』な機械では実現できない機能を提供する装置やシステム」と定義することができる¹¹。量子技術の進化を大まかに説明すると、次のようになる。

■ **量子 1.0 :**

この段階では、量子物理学の基礎に基づいた技術が登場する。スマートフォンのチップ、チェックアウトスキャナーのレーザー、光ファイバードブロードバンド、MRI スキャナーなど、今日のデバイスの多くは量子 1.0 製品の例である。

■ **量子 2.0 :**

本レポートでは、より高度な量子 2.0 技術に焦点を当てており、イメージング、タイミング、コンピューティング、重力や磁場の検出を行う各種センサー、通信技術など、さまざまな領域とその応用を網羅している。

これらの新技術は、非量子技術である古典技術では達成できないような能力を期待されており、社会や経済に大きな影響を与える可能性が高いことが指摘されている。これは、政府がイギリスの科学技術フレームワークにおいて、量子技術を 5 つの重要技術の 1 つに位置づけていることから明らかである¹²。しかし、こうした新しい量子技術は、古典技術に完全に取って代わるわけではない。両者の長所を活かし、最適な結果を出すためには、相互運用性が鍵となる。これには、既存の古典的ハードウェア（例：量子乱数生成器）に量子技術を組み合わせ、補完的なインフラを形成するハイブリッドアプローチも含まれる。

量子技術には、さまざまな技術領域や応用が含まれる。これらは、国家量子技術プログラム（NQTP）の 4 つの量子テーマ（量子コンピューティングとシミュレーション、量子通信、量子センシングとタイミング、量子エンハンスドイメージング）に沿って、4 つのカテゴリーに大別

¹¹ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, The UK Science and Technology Framework, <https://www.gov.uk/government/publications/uk-science-and-technology-framework>, , (閲覧日：2024 年 9 月 1 日) .

¹² Department for Science, Innovation and Technology, 2023, The UK Science and Technology Framework, <https://www.gov.uk/government/publications/uk-science-and-technology-framework>, , (閲覧日：2024 年 9 月 1 日) .

できる。本レポートには、**プラットフォーム技術**¹³としての量子技術や、**ドメイン特化**¹⁴の量子技術や応用に関する提言が含まれている。また、分野別のセクション（セクション5）では、量子センシングとタイミングに加え、量子イメージングを取り上げている。

量子技術の中には、その性質上「デュアルユース」技術、つまり民生と軍事の両方に応用できる技術もある。量子技術には国家安全保障上の重要性もあるが、レポートの完全な公表が制限されてしまうこと、そして国家安全保障に関する既存の作業プログラムがあることから、これらの分野は本レポートの対象とはしていない。

1.3. レビューの目的

イギリスの国家量子戦略の野望は、本レポートの提言が「量子技術セクターに対する適切でイノベーション促進的な規制の進化を導くための、作業プログラムの策定につながる」ことだ。これにより、国家戦略の目標である「イノベーションと量子技術の倫理的利用を支援し、イギリスの能力と国家安全保障を保護する国内的・国際的な規制フレームワークを構築する」ためのアプローチに貢献することが期待できる¹⁵。RHCが2022年に発表した「規制の原則と実践の間にあるギャップを埋める」という横断的なレポートでは、規制はイノベーションを阻害することもあれば、促進することもあると強調されている¹⁶。たとえば規制は、人々が安心してイノベーションを採用し、実行できる条件を整えるのに役立つ。

当委員会は、量子技術には大きな可能性がある一方で、拙速な法的規制がこうした技術の発展を妨げる可能性があることを認識している。しかし、今の段階で早期の規制を検討することで、将来的な障壁を取り除き、イギリスが責任ある迅速なイノベーションを実現する道を開くことが

¹³ プラットフォーム技術：本レポートでは、他のアプリケーションや技術が開発される基盤となる基礎技術を指す。量子技術の文脈では、プラットフォーム技術とは、さまざまな分野における幅広い潜在的なアプリケーションを支える一連の量子能力またはシステムを意味する。これらは特定の最終用途向けに調整されたものではなく、特定の量子応用の開発を可能にするコア技術能力を提供する。

¹⁴ ドメイン：本レポートでは、量子技術における特定の応用分野または利用分野を指す。特定の実際的な応用または目的のために量子技術を利用する専門分野を意味する。たとえば、「ドメイン特化の量子技術」には量子コンピューティング、量子通信、量子センシング、量子イメージングが含まれ、それぞれ独自の規制および技術要件を持つ応用分野である。

¹⁵ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National quantum strategy, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>, (閲覧日：2024年9月1日)。

¹⁶ Regulatory Horizons Council, 2022, Closing the gap: getting from principles to practice for innovation friendly regulation, <https://www.gov.uk/government/publications/closing-the-gap-getting-from-principles-to-practice-for-innovation-friendly-regulation>, (閲覧日：2024年9月1日)。

できる。また、量子技術をめぐる宣伝やプロモーションも盛んに行われており、その一部は正当化されており有益なものだ。しかし、こうした技術の能力を過剰に宣伝することは、投資家やステークホルダーの信頼を損ない、懸念やリスクの誇張に繋がり、結果として不釣り合いで過度に予防的な規制措置がとられ、イノベーションの障壁となる可能性がある。

最近、量子技術の規制に関する議論が活発化している。本レポートは、イギリスの国家量子戦略で示されたステップを踏まえつつ、適切な規制（標準やガイダンスを含む）を通じて量子技術の開発を支援する方法を提案することで、こうした議論に新たな視点を加え、より深い考察を促すことを目的としている。

過去 30 年間の規制の経験から、技術そのものを基準にして高度に革新的な技術プラットフォームを規制しようとする場合、そこから生まれる製品やプロセスの利点やリスクを考慮しないことが問題を引き起こすことが明らかになっている。特に、技術が開発の初期段階にあり、変革の可能性を秘めていて、新しい技術的能力を提供するために急速に進化している場合、この問題は顕著である¹⁷。

単一の包括的な規制アプローチや単一の規制当局が量子技術のすべての応用をカバーすることは、ある量子関連開発においてはイノベーションを阻害し、他の開発においては不十分なガバナンスを招く可能性が高い。さらには、量子関連研究から予期せぬ新しい能力が生まれた場合には、すぐに時代遅れになってしまうだろう。我々は本レポートを通じて、量子関連研究から生まれる多様な製品やプロセスを規制の対象とし、それらの特性や製造者、供給者、消費者のニーズに応じた柔軟な規制アプローチをとるべきだと強調してきた。

ステークホルダーは、量子技術の応用の中には既存の規制制度の範囲内に収まるものもあれば、開発の初期段階にあるものについては、法的根拠に基づく規制を検討するのが時期尚早であり、ガバナンスのためのソフトローアプローチを検討するのが適切であると強調した。このように、量子関連の研究開発から生まれる新製品やプロセスの規制について議論するのは「時期尚早」である一方で、新興技術に対する規制の時期、範囲、形が明確でないことは、投資を妨げ、事業計画をリスクなものにしかねない。革新的な規制フレームワークを構築することは、国内の開発者や投資家を引き留めるだけでなく、規制の確実性を求め、責任ある方法で製品を開発したいと

¹⁷ Regulatory Horizons Council, 2021, Regulatory Horizons Council report on genetic technologies, <https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-horizons-council-report-on-genetic-technologies>, (閲覧日：2024年9月1日)。

考える海外からの開発者を引きつけることにもつながる。これにより、イギリスの強力な学術・研究能力が商業化される一方で、海外にのみ拡大されることで経済的損失が生じたり、外部の量子イノベーションに依存することでイギリスの地政学的地位が弱まったりするリスクを低減することができる。

イギリスにおける量子

イギリスは、量子技術の開発と展開、そして規制に対して、よりスマートなアプローチを採用することで、先進国の仲間入りを果たすという野望を持っている。この野心を達成するためには、技術力だけでなく、量子技術の展開において倫理的で責任ある姿勢を取り、世界的に認められた標準を策定することが求められる。2014年から実施されているイギリスの国家量子技術プログラム（NQTP）は、その先見性と政府・学界・産業界の緊密な連携により、国際的に高く評価されている。同プログラムは、研究や開発、そして初期段階の商業化において大きな進歩を遂げてきた。2023年にはNQTPがさらに拡大され、展開、規模拡大、国際協力に一層の重点が置かれるようになり、今回の規制見直しはこうした進展を支援するために委託されたものである。適切な規制フレームワークを整えることで、投資家が自信を持ち、企業がグローバル市場に適したソリューションを開発し、商業的なスケーリングやサプライチェーンの課題が解決される状況を作り出すことが期待される。

1.4. 人工知能（AI）からの横断的な課題と教訓

量子技術は有望ではあるものの、まだ初期段階にあり、これらの応用に対する規制要件を検討する際には、量子特有の課題を理解することが不可欠だ。本セクションでは、さまざまな応用、分野、領域にまたがる「横断的な」課題を概説し、ステークホルダーの参画を通じて明らかになった規制制度への影響を強調する。

多くの技術的課題は、特に量子コンピューティングのハードウェア、ソフトウェア、アルゴリズムに関連している。しかし本レポートでは、量子技術が直面する技術的課題に明確に焦点を当ててではなく、量子技術の商業化を加速するための規制環境に焦点を当てている。広い意味での規制は、これらの課題を軽減しつつ、イノベーションの責任と安全を確保し、量子技術の確実な発展を支えるフレームワークを提供することができる。

AIの急速な発展と実装は、量子技術の進化に対しても有益な示唆を与えてくれる。量子技術は、AIを強化する可能性を秘めているからだ。たとえば、量子コンピュータはAIの処理能力を大幅に向上させる可能性がある。量子とAIのハイブリッドに対して、どのような規制の前例に従うべきかについては、慎重な判断が求められる。しかし、量子技術とAIを区別することは重

要であり、量子技術特有の利点と課題を理解し、両者が発展してきた経緯が異なる可能性があることを認識する必要がある。

- **積極的なガバナンス：**

AI は、倫理的かつ責任あるイノベーション (RI) に関する懸念を提起しているが、これらに迅速に対処することは難しく、高コストで逆及的な軌道修正が必要となる場合がある。そのため、潜在的な社会的・環境的・その他懸念について早期に対話を行うことが重要になる。

- **規制モデル：**

本レポートでは、プラットフォーム技術そのものではなく、量子技術に関連する製品やプロセスを対象とした規制アプローチを提唱している。イギリスの AI 規制モデルは、白書「AI 規制へのイノベーション促進アプローチの確立」に詳述されているように、AI 特有の特性に合わせた一連の分野横断的な原則に支えられている¹⁸。我々のレポートでも量子技術特有の特徴を探っているが、この白書の目的のいくつかは我々のものと一致する。たとえば、比例的で適応的な規制（セクション 3.2 で示した原則のうちの 2 つ）、文脈に特化した規制（セクション 4.1 で示した提言 1 と同じ）、首尾一貫した規制（セクション 4.4 で示した提言 4 と同じ）などがそうだ。

- **標準化、ベンチマーク、測定：**

量子技術の性能を評価するためのプロセスやベンチマークを標準化することは、センシング、イメージング、コンピューティング、タイミングの各分野における開発を比較可能なものとし、業界標準を満たすために不可欠である。

- **倫理、プライバシー、セキュリティに関する懸念：**

量子を利用した製品やプロセスには問題が生じる可能性があり、変化のスピードが速いため、事前予防措置の必要性が高まっている。

- **アクセス：**

量子技術に必要なハードウェアは、複雑な構造と高コストを伴うため、その普及が制限される可能性がある。これらの技術の潜在的な能力を考えると、公平なアクセスを確保し続けることが重要になる。イギリスの国家量子戦略ミッション 1「2035 年までに、1 兆回の演算が

¹⁸ Department for Digital, Culture, Media and Sport, 2022, Establishing a pro-innovation approach to regulating AI, <https://www.gov.uk/government/publications/establishing-a-pro-innovation-approach-to-regulating-ai/establishing-a-pro-innovation-approach-to-regulating-ai-policy-statement>, (閲覧日：2024 年 9 月 1 日)。

できて、アクセス可能なイギリスベースの量子コンピュータが存在する」では、アクセスの重要性が強調されている。

- **暗号化：**

量子コンピュータは現代の暗号化技術を弱体化させ、データ保護とセキュリティに重大な脅威をもたらす可能性がある。プライバシー保護のためにはどのようなフレームワークが必要なのか？量子技術自体がどのようにして対策を提供できるのか？

- **持続可能性：**

AIと同様に、量子技術にも持続可能性に対する懸念と、持続可能性の目標達成に役立つ能力の両側面がある。量子技術は、ガス漏れの検知、データ処理や創薬の加速、資源消費の最適化などの応用に貢献することで、持続可能性に向けたソリューションを提供することができる。

- **プライバシー：**

量子イメージングは壁や角を見通すことができる可能性があるため、その使用に関する明確な倫理的ガイドラインの確立が必要となる。

- **説明可能性：**

AIと同様に、あるいはそれ以上に、量子コンピュータの出力は確率論的な量子アルゴリズムに基づくため、説明が困難、あるいは不可能でさえある場合があり、普及や規制整備における課題となっている。

量子技術規制の包括的な目的は、社会的価値観や倫理規範と調和しつつ、量子イノベーションが発展することを保証することだ。そのためには、慎重な目配り、国民との対話、バランスのとれた、比例的かつ適応的な規制の枠組みを含む強固なガバナンスが必要なのである。

2. 技術成熟度と量子技術の変革性

2.1. 技術成熟度

量子イノベーションは、量子力学を活用して幅広い技術や応用を生み出す。これらの技術は、基礎的な基盤研究から商業市場での利用まで、さまざまな開発段階にある。本レポートでは、特定の技術が特定の応用に適しているかどうかを判断する指標として「技術成熟度（Technology Readiness Levels; TRL）」を用い、規制はプラットフォーム技術そのものではなく、量子関連の製品やプロセスを対象とすべきだと提案する。したがって、TRL は、さまざまな規制介入の適切性や適時性に関する政策決定に対して有益な情報を提供する上で重要である。異なる量子技術領域に適用される TRL を特定する際に、経済協力開発機構（OECD）が提案した通常の 9 段階の TRL スケール¹⁹を、大きく 4 つのレベルに分類するカテゴリー化²⁰を使用した。具体的には、基礎研究レベル（TRL1-3）、技術開発レベル（TRL4-5）、技術実証レベル（TRL6-7）、初期展開レベル（TRL8-9）である。

TRL とともに、その他の重要な要素として、これらの技術の現在の能力と将来の能力の差異（その一部は新しいもの）や、商業的または社会的な観点からそれらがどの程度変革的または破壊的であるか、という点が挙げられる²¹。さまざまな最終用途分野における TRL 開発の速度が異なることを踏まえると、規制上の決定を行う際には、これらの技術の文脈に特化した性質を考慮することが不可欠だ。

技術政策の意思決定を支援する手段として TRL が広く採用されていることを踏まえて、たとえば規制成熟度、投資成熟度、市場成熟度など、「成熟度（Readiness Level）」という概念がイノベーションに関連する他の文脈でもますます提唱されるようになってきている²²。しかし、

¹⁹ European Association of Research & Technology Organisations, 2014, The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations, https://www.earto.eu/wp-content/uploads/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf, (閲覧日：2024年9月1日)。

²⁰ Paul Ekins, 2010, Eco-innovation for environmental sustainability: Concepts, progress and policies, <https://ideas.repec.org/a/kap/iecepo/v7y2010i2p267-290.html>, (閲覧日：2024年9月1日)。

²¹ 本レポートでは、技術の能力に著しい変化をもたらすことを指す場合、「変革的」という用語を主に使用している。一方、「破壊的」という用語は、主にこれらの技術が産業に与える影響を指す。

²² たとえば、Emily Sotudeh, UKRI, 2022, Understanding market readiness level: From idea to IP, <https://iuk.ktn-uk.org/perspectives/understanding-market-readiness-level/>, (閲覧日：2024年9月1日) や、Abhishek Purohit and others, 2023, Building a quantum-ready ecosystem, <https://arxiv.org/pdf/2304.06843>, (閲覧日：2024年9月1日) などがある。

商業的な文脈における TRL の達成には、これらの成熟度の側面がすでに本質的に組み込まれている。そのため、量子技術に関する一部のレポートや論文ではさまざまな成熟度が取り入れられ始めているが、本レポートではその傾向に従わないことにした。

RHC は、量子技術の商業化に向けたスケジュールについて、ステークホルダーの意見を求めた。各分野の量子関連製品およびプロセスは、TRL のスペクトラム全体にわたっているものの、少なくともイメージング、タイミング、センシング、および通信の各分野における最先端の応用は、技術実証レベル (TRL6-7) および初期展開レベル (TRL8-9) の段階にあり、一部の製品はすでに市場に出回っているという点では意見が一致した。一方で、量子コンピューティングは一般的に技術開発レベル (TRL4-5) にあると考えられており、一部のハイブリッド量子コンピューターはすでに実用化され、進展が頻繁に見られる。さまざまな量子製品の TRL については、各分野のセクション (セクション 5) でさらに詳しく説明されている。

量子技術は急速に進化しており、量子技術が開発されているすべての分野において、新たな驚くべき展開が予想されることに留意しなければならない。これらの一部は、イメージング、センシング、タイミングなどの分野で現在開発中の量子製品よりもさらに画期的なものとなる可能性があり、それに応じた規制の検討が求められる。そのため、規制当局がこうした進歩を予測し、適切な規制イニシアティブを決定・調整できるようにするため、セクション 4.3 の提言 3 で提案しているように、先見的なアプローチが必要となる。

2.2. 漸進的イノベーションと破壊的／変革的イノベーション

イノベーションそのものの性質と影響を考慮することが重要である (すなわち、既存企業のビジネスモデルや市場をどの程度破壊するのか?)。量子技術製品は、漸進的 (incremental) なものから破壊的 (disruptive) / 変革的 (transformative) なものまで、幅広いスペクトラムにわたっている。イノベーションが漸進的 (incremental) なものである場合、それは既存のビジネスモデルやバリューチェーンに適合し、企業の現在のイノベーションシステムを段階的に改善し、バリューチェーンに沿った既存のビジネスモデルに挑戦することなく、同じセクター内で競争優位性を生み出すことができる。これらの製品には、明確で効果的な規制上の前例が存在することが多い。

逆に、イノベーションが破壊的 (disruptive) / 変革的 (transformative) である場合、それは新たな応用や産業分野の創出、あるいは既存の産業分野の抜本的な再編につながる可能性がある。このような変革は、技術プロバイダからエンドユーザーに至るまで、量子バリューチェーン内のステークホルダーに異なる影響を与え、それぞれのビジネスモデルにおける新たな量子技術の統合と採用に取り組む際に、多様な課題を生じさせる可能性がある。このカテゴリーに属する技術

には、通常、明確な規制上の前例がなく、これが技術への投資を妨げる不確実性の原因となる可能性がある。

これは二分法的な分類ではない。技術や製品によって、混乱の度合いは異なる。また、新しい製品が、ある応用やセクター、あるいはバリューチェーンの一部のビジネスモデルを破壊する一方で、他の部分には影響を与えないこともある。混乱の度合いと、それが起こるセクターを理解することは、今後の規制に関する意思決定を導く上で重要である。これらのイノベーションが特定のセクターに与える影響を十分に理解し、強固かつ柔軟な規制フレームワークを構築するためには、バリューチェーンの多様なステークホルダーの視点を取り入れることが不可欠だ。

2.3. 量子バリューチェーンへの影響

量子イノベーションの本質とその影響を掘り下げるには、量子エコシステムに関わる多様なステークホルダーと、それぞれが持つユニークな道りを理解することが必要だ。この理解は、さまざまなセクターで量子技術がもたらす多様なレベルの混乱を文脈化するのに役立つ。また、進化する量子技術の状況に適応できる規制フレームワークの開発にも寄与する。

- **技術プロバイダ：**

エコシステムの中心には、新興企業から大企業までさまざまな技術プロバイダが存在する。それらは重要な役割を果たし、量子関連の開発を推進する上で、量子開発の基盤に深く組み込まれている。技術的な課題について深い理解を持っている一方で、包括的なソリューションを欠いている可能性がある。こうした「ディープテック」企業は、理論的な進歩と実用化の橋渡し役として機能している。

- **サプライチェーンの参加者：**

これらのステークホルダーは、レーザー、制御システム、真空システムなど、必要なコンポーネントを技術プロバイダに提供する。量子技術の技術的課題に対する認識と理解は、参加者によって大きく異なる。中には、量子技術がもたらす潜在的な役割や機会に気づいていない者もあり、量子エコシステムに対する認識と関与を高める必要性が浮き彫りになっている。

- **エンドユーザー：**

エンドユーザーは、さまざまな業界で量子製品やサービスを適用し、これらの技術の実用的な影響を形作っている。医療、サイバーセキュリティ、物流、エネルギーなどの業界は、量子技術の進歩により、大きな変革を迫られることになるだろう。量子技術のイノベーションを市場の需要に一致させるためには、これらのエンドユーザーのニーズと成熟度を理解することが極めて重要である。エンドユーザーの成熟度と受容性は、それぞれの分野における量

子技術の採用と統合に大きな影響を与える。

● **サポートサービス：**

特許弁護士、投資家、ネットワーキンググループ、トレーニング組織、イノベーションハブなど、量子エコシステムを支える幅広いサービスが必要とされる。これらのステークホルダーは、さまざまな支援手段を通じて量子技術の成長と発展を促進する上で重要な役割を果たす。

このエコシステム内の各グループは、量子技術について初めて認知してから全面的に支持するに至るまで、それぞれ異なる段階にあり、その段階に応じて量子技術に対する需要や量子技術を取り巻く環境との相互作用も変化する。たとえば、サプライチェーンやセクター別のエンドユーザーは、自社の立場が「認知」から「支持」へと移行するにつれて、サプライヤーに求める「量子保証」のレベルも変化する。「認知」の初期段階にある企業は、量子技術が自社ビジネスに与える潜在的な影響を理解することに重点を置くかもしれない。一方、「支持」段階に至った企業は、それぞれの分野で自らがトレンドや標準を設定するなど、率先して行動するようになる。

この関与のスペクトルは、規制フレームワークを開発する際に、量子エコシステムにおける多様な視点を取り入れることの重要性を示している。規制は、刻一刻と変化するイノベーションの破壊度合いやステークホルダーの準備度合いへに対応できるよう、適応的なものでなければならない。各ステークホルダーが量子技術の導入においてどの段階にあるかを理解することで、より的確で効果的なガバナンス戦略が可能となり、既存の市場セクターや新興市場セクターへの量子技術のスムーズな統合が促進される。

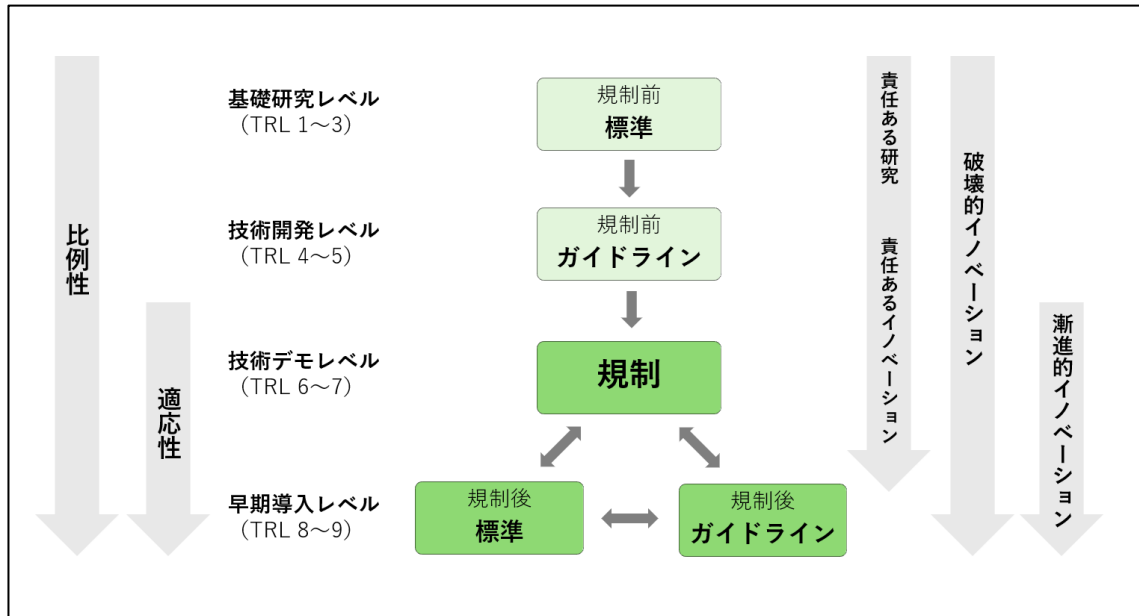


図1 汎用的なPAGITフレームワーク図

2.4. 量子技術の比例的かつ適応的なガバナンス

技術開発の文脈において、RHCは「革新的技術の比例的かつ適応的なガバナンス(Proportionate and Adaptive Governance of Innovative Technologies; PAGIT)」フレームワークが、量子技術開発のさまざまな段階において、標準・ガイドライン・規制を慎重に選択して採用するための詳細な青写真を提供していると考えている(図1)²³。

正式な法的規制の採用に関する決定は、TRL6-7程度まで遅らせるべきだ。つまり、技術の能力、用途、利点、リスク、そしてそれに伴う規制要件がより明確に把握できる段階まで待つべきである。それまでは、製品の特性がより明確になるにつれて、必要に応じて法的規制よりも柔軟に対応できる標準やガイドラインを採用することで、技術の効果的な管理を確保できる。ここで問われるのは、法的規制が必要かどうか、あるいは標準やガイドラインへ依存することが製品やサービスの今後の開発を管理するのに十分かどうか、という点だ。これは、規制に関する決定が、

²³ Joyce Tait, Geoffrey Banda, Andrew Watkins, Innogen Institute Report to the British Standards Institution, 2017, Proportionate and Adaptive Governance of Innovative Technologies: A Framework to Guide Policy and Regulatory Decision Making, https://www.innogen.ac.uk/sites/default/files/2019-04/PAGIT%20FrameworkReport-Final_170717.pdf, (閲覧日: 2024年9月1日)。

包括的な量子技術プラットフォーム全体ではなく、量子技術の特定の応用分野の特性に基づいて行われるべきだという一例である。

法的根拠に基づく規制システムが存在する場合、後期の TRL で定められる基準の一部は、規制への準拠を支援する役割を果たす。また、その他の技術基準は、相互運用性などの側面に焦点を当てる可能性がある。ガバナンスの取り組みが不必要にイノベーションを阻害しないよう、初期の TRL では比例性の原則を考慮することが重要だ。そして、後期の TRL では、製品特性の理解が深まる中で、それらの適応性を考慮すること（適応性の原則）が求められる。

量子技術の文脈では、規制のプロセスは次のような道のを辿るかもしれない。

- **TRL1-3（規制前-標準）：**

この段階では、コンセンサス標準に焦点を当てるべきである。これらの標準は、量子技術の特性の理解を支え、潜在的な利益とリスクを特定し、将来の最適な開発や管理戦略を決定する際に役立つ。

- **TRL4-5（規制前-ガイドライン）：**

初期の標準に基づき、より具体的で明確なガイドラインを策定する。これらは将来の規制システムの基礎を築くものとなる。重要なのは、意思決定者が量子製品またはプロセスの安全性、品質、有効性を確保するためには、これらのガイドラインだけでも十分であり、法的規制は不要だという考えを受け入れるべきだという点である。

- **TRL6-7（規制）：**

この段階での決定事項は、既存の規制システムとの関連性を識別すること、または極めて革新的な量子イノベーションに対して新たな規制アプローチを検討することである。法的根拠に基づく規制は、望ましい結果に焦点を当て、広範な用語で明確に規定し、その後の標準やガイドラインによって補強し、量子関連製品やプロセスに対する比例性と将来の変化への適応性を確保すべきである。

- **TRL8-9（規制後-標準・ガイドライン）：**

この段階では、量子製品開発に携わる者が規制システムに準拠しやすくなるよう、標準（技術や相互運用性に関する標準、そしてコンセンサスに基づく標準を含む）やガイドラインを策定することができる。

初期の TRL では、行動規範（責任あるイノベーション (RI) の原則を定義するものを含む）を活用して、技術の安全な早期開発を確保することができる。この段階では、製品の特性、その利点とリスク、そして対象市場に関する理解が変化するため、将来的に規制システムを適応させる

必要が生じる可能性がある。また、コンプライアンスを確保するために、初期段階で法的規制に頼らざるを得ない状況が生じる可能性も考えられる。ただし、これはあくまで最後の手段として用いるべきであり、時期尚早に法的規制を課すと、刻一刻と変化する状況へ適応するのが難しくなる可能性がある。一方で、標準やガイドラインは、初期段階で試験的に導入し、状況の変化に応じて柔軟に修正することができる。TRL6-7の段階での決定ポイントでは、規制手段に頼らずに技術の管理を継続する選択肢も考えられる。TRLが高くなったからといって、自ずと規制が必要になるというわけではない。その代わりに、応用のリスクとメリット、そして規制介入の影響を、より慎重に理解する必要がある。特定の応用については、技術的およびその他の不確実性が解消された段階で決定を下すことを視野に入れ、「情報収集を続ける」という対応が適切な場合もある。

3. 責任あるイノベーションと規制の原則

量子技術は、学术界や産業界、そして社会に多大な影響をもたらすパラダイムシフトである。この新しい時代を迎えるにあたり、初期段階の技術開発において、アカウンタビリティの精神に則った責任あるイノベーション（Responsible Innovation; RI）を奨励し、持続可能かつ倫理的な成果を目指した開発の指針となるようなフレームワークが必要とされている。

この進化する状況において、大企業と新興企業は、量子関連の開発を進める上で補完的な役割を果たしている。豊富なリソースと経験を持つ大企業は、責任あるイノベーション（RI）の実践を率先し、業界の模範となることができる。一方で、新興企業のアジャイルさと革新的な精神は、将来の製品をより革新的で画期的な方向へと導く力を持っている。小規模な企業は、迅速な開発文化に動機づけられることが多く、この分野に新たな視点と画期的な進歩をもたらす。これらの異なる視点に配慮し、すべてのイノベーターが成長と発展のプロセスに責任あるイノベーション（RI）を組み込めるよう支援することが重要だ。そうすることで、イノベーターのスピードと創造性が、倫理的基準や社会の利益と調和することを保証できる。

このセクションでは、量子技術エコシステムにおいて、責任あるイノベーション（RI）とその関連原則が果たす重要な役割について概説する。また、組織が社会的責任を明確にし、透明性、公平性、誠実性の原則と調和しながらイノベーションが進むことを保証するための概要を提供する。

3.1. 量子技術のための責任あるイノベーション

企業が自らの行動に責任を持つ必要性は、近年ますます広く認識され、受け入れられるようになってきている。国際標準化機構（ISO）の社会的責任規格（ISO 26000）は、営利企業や研究機関などの組織による責任ある行動が何を持って構成されているかを定義している。組織が行うべきことは、以下の通りである。

- 社会・経済・環境への影響に責任を持つ
- 社会・経済・環境に影響を与える決定や活動において透明性を確保する
- 誠実さ、公正さ、高潔さといった価値観に基づく倫理的な行動を示す
- ステークホルダーの利益を尊重し、考慮し、対応する
- 法の支配を尊重する
- 国際的な行動規範を尊重する

- 人権を尊重する²⁴

EUの「責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation; RRI）」イニシアティブも同様に、人権、労働慣行、オープン性と透明性、市民およびステークホルダーの関与、研究倫理、環境、公正な事業慣行、消費者問題、地域社会の関与についての要件を含んでいる²⁵。これらの原則は量子技術に限ったものではなく、高度に革新的な産業を含むあらゆる産業にとって不可欠なものである。責任あるイノベーション（RI）は、特定の分野に限定されるべきではなく、普遍的な考慮事項であるべきだ。量子技術の文脈において、本レポートでは、量子イノベーションがグローバルなRI標準に沿うように、責任あるイノベーション（RI）をどのように取り入れるべきかを概説する。

同様に、図3（付録C）に列挙されている原則のほとんどは、組織レベルでの責任ある行動の要素と見なすことができる²⁶。これらは、量子技術を開発する企業を含むすべての企業や組織が適用することが期待される一般的な慣行である。

本レポートでは、特にすべてのTRL（技術成熟度）にわたる量子技術開発に関連する、責任あるイノベーション（RI）に関する追加の行動に焦点を当てる。これらの追加行動は、社会的な利益をもたらす革新的な量子技術製品を提供する責任と、関連するあらゆる悪影響を排除するための行動を取ることに對する責任に関連している。標準を含む規制は、この利益の提供を支援し、悪影響を回避する上で重要な役割を果たす。

イギリス規格協会（BSI）の公開仕様書（PAS）440は、責任あるイノベーション（RI）へのガイドであり、主に技術に特化した追加要素に焦点を当てている²⁷。また、企業がすべてのステークホルダーに対して、責任を持ってイノベーションを行っていることを示す証拠を提示する必要性を強調している。

²⁴ International Organization for Standardization, 2017, ISO 26000 and OECD Guidelines: Practical overview of linkages, <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100418.pdf>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

²⁵ European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Responsible research and innovation, 2014, Europe's ability to respond to societal challenges, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/n/2be36f74-b490-409e-bb60-12fd438100fe>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

²⁶ 詳しくは、以下を参照。 <https://www.era-learn.eu/support-for-partnerships/governance-administration-legal-base/responsible-research-innovation>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

²⁷ British Standards Institution (BSI), 2020, PAS 440, Responsible innovation – Guide (2020), <https://pages.bsigroup.com/l/35972/2020-03-17/2cgcnc1>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

ここで、「誰が責任ある行動を取る必要があるのか?」という問いを検討することが重要だ。本レポートの議論の多くは、営利企業や研究機関、その他のイノベーション支援組織の行動に関わるものである。さらに、イギリスを含む各国政府は、規制当局、標準化団体、政策立案者に対して、革新的な技術開発に対する自らの行動の影響に対する責任を負うことを一層強く求めるようになっている。これは「量子戦略」でも強調されており、「規制フレームワークが責任あるイノベーションとイギリスへの利益の提供を推進し、また、経済とイギリスの量子技術力を保護し、成長させる」とされている²⁸。今日の革新的技術のガバナンスにおいては、イノベーターと規制当局における責任のバランスをとることが求められている。そうすることで、革新的技術のニーズに最も適した形で応答し、同時に期待される安全、品質、有効性の基準を保護するイノベーション・エコシステムを構築することができる²⁹。

3.1.1. 実践における責任あるイノベーション

BSIの「PAS 440:RIガイド」では、あらゆる技術分野における責任あるイノベーション(RI)の実施において企業が使用するテンプレートとして、図2(付録C)のフレームワークを提案している³⁰。考慮すべき要素には、「社会」「環境」「健康関連」「倫理」という見出しの下で、製品やプロセスがもたらすと予想される利益とリスク、そしてそれらの影響が主にどこで生じうるかについての情報が含まれる。これら要素の選定に関わる情報は、すべてのステークホルダーとの直接的な関わり合いから収集することができる。ステークホルダーとの直接的な関わり合いからは、二次的な情報源よりも多くの洞察が得られることが多いが、小規模な企業やリソースが限られている組織にとっては、こうした情報収集は難しい場合もある。その他の情報源としては、ステークホルダーのウェブサイト、会議や会合への参加、またはパブリックドメインで公開されている各種出版物が挙げられる。それでも、小規模な組織であっても、可能であれば、定期的なアンケートやオンラインのフィードバック・プラットフォームなどを活用して、ステークホルダーと直接やりとりする努力をすべきだ。企業の活動に関連する関心や懸念を示すすべての人々を、ステークホルダー・コミュニティの一部として考慮すべきである。

²⁸ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National quantum strategy, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>. (閲覧日: 2024年9月1日)。

²⁹ Andrew Bennett, The Entrepreneurs Network (TEN), 2023, Responsive Regulators, in Operation Innovation: how to make society richer, healthier and happier, <https://www.tenentrepreneurs.org/operation-innovation-1>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

³⁰ ESG(環境・社会・ガバナンス)やその他民間部門で開発された同様のフレームワークは、PAS 440のアプローチと互換性がある可能性が高い。

バリューチェーンの要素も重要である。それには、すべての開発段階における製品バリューチェーンに関与する他の企業が、どの程度において、責任をもってイノベーションを行っていることを示せるか、ということも含まれる。企業は、バリューチェーン内のビジネスパートナーに対して、定期的な監査や認証を実施することを検討し、全体として一貫した責任あるイノベーション（RI）の実践を確保することもできる。

規制に関する要素については、既存の関連規制への準拠が標準的な業務手順であり、規制当局との関係構築もまた優れた実践例となる。企業はまた、将来的に予想される規制イニシアティブの性質や、それが特定の革新的な量子技術製品のニーズにどの程度比例し、適応するものかについても考慮すべきだ。定期的な規制の見通しや業界協議への参加、政策立案者との対話は、将来的な規制変更の可能性についての洞察を得る手段となる。

企業の RI フレームワークは、責任ある行動を公に保証するためにも、一般に公開されるべきである。これは、企業独自のプロセスを公開せずとも、包括的な原則とコミットメントを公開することで達成できる。また、企業のリスク・レジスターの他の構成要素と同様に、製品が開発のさまざまな段階を経るにつれて、定期的に更新されるべきだ。さらに企業は、RI フレームワークを定期的に見直すために、専門家やステークホルダー、そして一般市民代表者で構成される独立した審査／諮問委員会を設置することも検討すべきである。

3.2. 量子技術の規制原則

量子技術に関する原則のいくつかのセットはすでに提案されている（図 3、付録 C を参照）。これら原則の多くは、量子技術がどのように開発されるかに関連しており、より適切には「目的」や標準的な業務手順として説明されるものであり、そのため効果的な規制政策の立案においてはあまり役に立たない場合もある。一方で、個々の技術における特定の特性とは独立して、一般的な優れたビジネス慣行に適用される「企業の社会的責任」の原則であり、責任あるイノベーション（RI）の社会的責任の要素でカバーされている原則もある。

量子戦略の原則（量子コンピューティングの利用を制御するための原則というよりも、規制に対する政府のアプローチを詳細に説明したもの）は、多くのステークホルダーから抽象的であるか一般的なものだとして説明されており、具体的なガバナンス関連の成果に結びつけるためには、より詳細な説明が必要である。我々が協議した一部のステークホルダーは「安定性」と「アジャイルさ」という潜在的には矛盾する 2 つの原則の適合性に疑問を呈しており、原則を共同で設計することの重要性についてはステークホルダーの意見が一致した。量子コンピューティングに特化した世界経済フォーラム（WEF）の原則については、その特異性と持続可能性への配慮が評価されたものの、倫理的責任に関する原則が欠如しているという指摘もあった。

これらの議論を踏まえ、RHC は、すべての企業、政府、規制当局に適用される一般的な社会的責任の原則と並ぶような、量子関連規制の策定に向けた 4 つの基本原則を提案した。すなわち、「**比例性**」「**適応性**」「**責任**」「**バランス**」である。これらの原則は、将来的に量子技術関連の幅広い応用をカバーできるよう十分に一般的なものとして設計されたもので、量子技術においてこれらをどのように実現できるかを強調するため、本レポート全体を通して参照されることになる。これらの原則は、量子技術関連の規制がアジャイルであり、技術や状況の変化に応じて進化でき、消費者や能動的な市民の要求を満たすものであることを保証するものであるべきである。

- **比例性 (Proportionality) :**

この原則は、特定の量子技術の応用に伴うリスクや利益のレベルに応じて、規制措置が適切であることを保証する。規制介入の種類とその程度を、潜在的な影響の規模と性質に見合ったものにし、リスクの低い応用に対しては過剰な規制を避け、リスクの高い応用に対しては十分な監督を行うことを目的としている。

- **適応性 (Adaptability) :**

量子技術のイノベーションは、その潜在的な用途や影響とともに急速に進化している。適応性は、技術の進歩に歩調を合わせる規制フレームワークの必要性を強調している。固定的な規制フレームワークはすぐに時代遅れとなり効果を失ってしまうが、適応的なフレームワークは将来の変化を予測し、それにに応じて調整することができる。

- **責任 (Responsibility) :**

企業やイノベーションのプロセスに適用される責任原則については、セクション 3.1 で議論されている。この原則は、規制当局自身とその責任にも適用される。すなわち、規制当局は、実施する規制が量子技術の特性に比例し、適応性があり、かつその実施においてバランスが取れていることを保証する責任がある。

- **バランス (Balance) :**

この原則は、公平かつ公正な妥協点を見出すことを意味している。商業的な実現可能性、倫理的な配慮、公共の安全といったような、多様で時には競合さえする数々のステークホルダーの関心事のバランスを重視する。バランスをとるためには、より広範な社会的な文脈を考慮し、量子産業の革新的成長がセキュリティ、倫理、社会の幸福を損なわないようにする繊細なアプローチが必要である。

4. 量子制御経路

規制は消費者保護を独占的に確保するための仕組みであると見なされることが多いが、うまく策定されれば、イノベーションを促進することもできる。そのためにはバランスのとれたアプローチが必要であり、単なる法規制の問題ではなくなる。RHCのアプローチでは、「規制」と「ガバナンス」という用語は、法規制、標準、ガイドライン、政策、ベストプラクティス、業界または専門家の規範、要件、手続きなどを含む幅広い概念である。これらを組み合わせることで、技術開発、市場力学、調達、資金調達戦略、国際協力といった目標に影響を与えることができる。期待される規制のタイミングや範囲、形が明確でない場合、投資が妨げられ、事業計画の策定が困難になる可能性がある。

セクション4とセクション5では、量子技術の規制に関する主要な結論と提言を提示する。これらの提言は、統合されたセットとして、量子技術の発展から期待される利益が適用分野全域で実現されるよう、連携して機能することも目論んでいる。

本セクションでは、これまでのセクションで得られた洞察をまとめ、量子技術製品やプロセスを規制するための包括的なアプローチに関する具体的な提言を提示する。特定の量子技術分野に関連する洞察と提言については、セクション5で検討する。

4.1. プラットフォーム技術ではなく、応用を規制する

セクション1では、規制はプラットフォーム技術³¹そのものではなく、その技術の応用に焦点を当てるべきだと提案した。たとえば、センシングや画像処理における比較的漸進的な量子技術のイノベーションには、より変革的な量子コンピューティング関連の開発を想定した厳格な規制ではなく、特定のユースケースや開発段階にフィットした規制を適用すべきである。これは、デジタル規制協力フォーラム（DRCF）の「技術中立的」なアプローチと一致する。規制当局は技術そのものを規制するのではなく、その技術を基盤とする製品やサービスを規制する。また、DRCFは「量子技術に対して、他の新興分野とは異なるアプローチはとらない」としている³²。

³¹ プラットフォーム技術：本レポートでは、他のアプリケーションや技術が開発される基盤となる基礎技術を指す。量子技術の文脈では、プラットフォーム技術とは、さまざまな分野における幅広い潜在的なアプリケーションを支える一連の量子能力またはシステムを意味する。これらは特定の最終用途向けに調整されたものではなく、特定の量子応用の開発を可能にするコア技術能力を提供する。

³² Digital Regulation Cooperation Forum (DRCF), Horizon Scanning and Emerging Technologies project team, 2023, Quantum Technologies Insights Paper, <https://www.drcf.org.uk/publications/papers/quantum-technologies-i>

RI 原則を組み込むことで、ISO 26000 や EU RRI 基準で概説されているように、あらゆる規制アプローチにおいて、これらの技術がもたらすより広範な社会的・倫理的影響が考慮されることが確実になる。しかし、不必要に細分化された規制環境を避け、AI など他の技術領域からの学びを活かすためには、異なる量子セクターや製品規制当局間の調整を確保する必要があるかもしれない（提言 2 を参照）。

提言 1

量子技術のガバナンスは、量子製品やプロセスの研究開発に関連する幅広い分野と、対象となる TRL（技術成熟度）の範囲を認識し、個々のイノベーションの特性と開発段階に対して適応的・比例的な応用特化の規制フレームワークの開発に重点を置くべきである。DSIT（科学イノベーション技術省）は、他の政府機関および規制当局と協力し、必要な連携を促進し、以下の提言で概説されている特定の応用クラスに焦点を当てたドメイン特化の規制を、タイムリーかつ効果的に開発することを確実にすべきである。

- A)** 初期の TRL における潜在的に変革的なイノベーションについては、規制フレームワークは比例的かつ柔軟であるべきであり、責任あるイノベーション（RI）が期待されるベストプラクティスとなることを保証すべきである。
- B)** 初期の TRL における漸進的なイノベーションについては、その性質に最も適した規制上の前例を見つけることに焦点を当てるべきである。
- C)** TRL が後期の段階にある漸進的／破壊的イノベーションの双方については、政府はさまざまな規制オプションの利用を支援し、その応用ごとに最も適切なドメイン特化の規制を選択すべきである。

4.2. ガバナンス構造

量子技術の急速な進化には、それに対応できるアジャイルで反復的なガバナンスのアプローチが必要である。すでに述べたように、たとえばイノベーションが漸進的または経路依存的である場合のように、明確で実行可能な既存の規制上の前例がある場合には、すべての量子技術を一律にカバーする大まかな規制アプローチは推奨できない。しかし、それらを調整することは依然として役に立つかもしれない。規制の断片化を防ぎ、ステークホルダーと規制当局間の円滑なコミュニケーションを確保し、ドメイン特化の専門知識を共有するためである。

規制当局や量子研究コミュニティ、そして政策立案者間の緊密な連携を促進するためには、ガバナンス構造が必要である。Ada Lovelace Institute の論文³³で提案されたものと同様の、特定の分野に特化した行動規範を提唱することは、国家量子標準パイロット・ネットワーク³⁴の委託条件で特定されたものと同様であり、量子産業分野の拡大に向けたロードマップを提供できる可能性がある。新興企業にとっては、関連する規制の経路を示す標識システムが存在することが重要である。量子室の設立はこの方向性の一步であり、一貫性のある量子技術のガバナンスに向けた専用の制度的な取り組みである。ただし、量子技術の分野は、協働的な規制の取り組みと集団的な専門知識の活用を確保するためのフォーラムから恩恵を受ける可能性がある。

量子技術に関する規制フォーラムを設置することで、断片化を回避し、協働と知識共有を促進し、作業の重複を最小限に抑え、潜在的な課題を予測し、法的根拠に基づく規制が存在しない場合でもガイドラインを提供することができる。我々とともに協議した規制当局は、このようなフォーラムが大きな価値を生み出す可能性がある」と指摘しており、こうしたフォーラムは責任あるイノベーション（RI）の原則と、加えて規制アプローチが比例的かつ適応的であることを確保する原則を取り入れるべきだと述べた。

前述（セクション 4.1）の通り、DRCF はすでにいくつかの量子関連の問題に取り組んでおり³⁵、DRCF 内の個々の規制当局は、ヘルスケア向けの量子センシングなど、量子技術の特定の側

³³ Ada Lovelace Institute, 2021, Regulate to innovate - A route to regulation that reflects the ambition of the UK AI Strategy, <https://www.adalovelaceinstitute.org/report/regulate-innovate/>, (閲覧日：2024年9月1日)。

³⁴ 詳しくは以下を参照。 <https://www.gov.uk/government/news/new-technologies-on-show-at-quantum-showcase-science-minister-drives-forward-uks-25-billion-quantum-strategy#%3A%7E%3Atext%3DQuantum%20Standards%20Network%20Pilot%2C-The%20National%20Physical%26text%3DIt%20will%20provide%20a%20focal%2Cthe%20potential%20of%20quantum%20technologies>, (閲覧日：2024年9月1日)。

³⁵ Digital Regulation Cooperation Forum (DRCF), Horizon Scanning and Emerging Technologies project team, 2023, Quantum Technologies Insights Paper, <https://www.drcf.org.uk/publications/papers/quantum-technologies-i>

面を調査している。しかし、量子技術は幅広い領域にわたるため（セクション5を参照）、量子ガバナンスシステム全体にわたって専門的な見識を提供できる、量子技術専用の規制フォーラムが必要である。

さらに、規制当局はしばしばリソース不足の問題に直面しているため、量子専門家へのアクセスが限られている場合、このフォーラムは量子専門知識を開発し共有する仕組みとなりうる。規制フォーラムは必然的にリソースの問題を伴うため、規制当局は、達成可能な成果がどのようなものであるべきかについて明確な考えを持つことの重要性を強調した。私たちはいくつかの主要な初期活動を強調し、既存のフォーラムとの相乗効果を活かす機会、範囲の絞り込み、最も価値の高い分野の優先順位付けを検討するための予備的な演習を行うことができる。また、長期的には不適切な規制決定とその後の決定の撤回作業を行うよりも有益であるため、現段階でフォーラムに投資することの価値を認識することも重要である。

[nsights-paper/ nocache](#), (閲覧日：2024年9月1日)。

提言 2

量子技術に関する規制フォーラムを設立し、短・中期的なガバナンスの問題に対処し、規制当局が量子技術に対応できるよう支援し、量子技術の規制システムが適切に統合されるようにし、量子技術の規制慣行の不必要な断片化を回避すべきである。同様のイニシアティブを認識した上で、我々は、DSIT（科学イノベーション技術省）が DRCF の知見を活用しながら、規制当局がこのフォーラムを設立できるよう支援すべきであると提案する³⁶。こうしたフォーラムの会員には、より多くの規制当局が量子対応できるよう拡大する余地を残しつつ、関連する規制当局の全分野が含まれるべきである。このフォーラムは、幅広い意見が反映されるよう、業界代表や責任ある量子産業フォーラム、そしてその他のステークホルダーからの意見を考慮すべきである。このフォーラムの主な活動には、以下のものが含まれるべきである。

- A)** DRCF の経験を基に、量子応用が現在の規制と相互作用するギャップや領域、あるいは複数の規制機関にまたがる規制当局の問題を量子応用が引き起こす領域を予測し、特定する。
- B)** 量子研究者、業界専門家、規制当局所属者によるシンポジウム、ワークショップ、座談会を企画し、効果的な情報交換と知識移転を確保する。
- C)** たとえば、国立量子コンピューティングセンター(NQCC)による既存の研究を基に、量子技術の進歩が規制に及ぼす可能性のある社会的・経済的・倫理的な影響を予測するための研究を委託する。
- D)** 国際的な同業者と協力し、量子ガバナンスと規制のベストプラクティスに関するグローバルな視点を獲得する。

³⁶ ICO は AI 規制に関する AI 規制当局ワーキンググループを、DRCF はデジタルに関する規制当局ラウンドテーブルを主導している。

4.3. タイミングを合わせる

量子技術は急速に進化する分野であり、規制環境を整えることが急務であると認識されている。イギリスの量子分野における現在の地位は先駆的なものだが、積極的な対話や戦略的なガバナンス関連のイニシアティブが欠如しているため、規制の不確実性により投資や進歩が妨げられる可能性がある。量子技術の規制におけるタイミングの重要性は強調しすぎることはなく、ほとんどの量子技術がまだ初期段階にあることを踏まえ、法的規制にすぐに移行するのは時期尚早であるという点については、ステークホルダーの間で広く同意が得られた。ここで作用している要因は2つある。

1. 検討中の特定技術のTRL（技術成熟度）に関連して、必要とされる比例的ガバナンス措置のタイミングを適切に把握すること。PAGIT フレームワークがTRLを重視していることは適切であり、TRL 6-7以前に法的規制を検討するのは時期尚早で、代わりにベストプラクティスへの業界の収束を支援する規制前の標準やガイダンス（図1参照）に焦点を当てるべきだと提言している。PAGIT フレームワークにおけるTRL4-5のガイダンス、ベストプラクティス、ソフトロー（規制前のガイダンス）は、製品やプロセスの責任ある開発を確保しながら、イノベーションの促進を可能にする。TRL6-7以上の技術については、正式な法的規制を導入する必要があるか、あるいは既存の標準・ガイドライン、または追加の標準・ガイドラインによって安全性、品質、有効性を維持できるかという点に議論の焦点を当てるべきである。RHCのレポート「ギャップを埋める」では、当委員会が検討すべき関連アプローチについても概説している。
2. 開発のペースが速ければ速いほど、規制当局は製品開発の変化に比例的かつ適応的なイニシアティブをもって迅速に対応する必要がある。

最近、AIに関する社会的な懸念が急激に高まっている（変革をもたらす製品の急速な成長に起因する）。EUのAI法や関連する注目度の高いテック業界の提唱が前例を作っている³⁷。量子技術とAIの類似性や直接的な関連性を踏まえると、不適切、非比例的、あるいは非適応的な規制の導入を回避するためにも、上記から得られた教訓は、イギリスにおける量子技術の将来的なガバナンスの要素として考慮されるべきである。

³⁷ Jillian Deutsch, 2023, Big Tech Wants AI Regulation — So Long as Users Bear the Brunt, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-06-27/big-tech-companies-fight-ai-regulation-in-europe-ask-us-lawmakers-for-oversight?leadSource=verify%20wall>, (閲覧日：2024年9月1日)。

ホライズン・スキャニング、ロード・マッピング、シナリオ・プランニング、モニタリングなどの予測手法は、革新的な技術製品やプロセスをいつ、どのように規制するか意思決定において、役割を果たすべきである。将来の量子関連の課題を予測し、潜在的な落とし穴、障壁、規制の交錯を特定することを目指す。科学政策室 (GO-Science) は 2017 年に「フューチャーツールキット」を公表し、その中ではホライズン・スキャニングを含むさまざまな手法が取り上げられている³⁸。ここで、ホライズン・スキャニングは、政策および戦略環境における変化の早期警告サインを見つけることを目的とした机上調査プロセスと定義されている。内閣府は 2013 年にレビューを委託し、ホライズン・スキャニングに関するいくつかのベストプラクティス提言も行っている³⁹。さらに、リスク評価に対する繊細なアプローチも重要である。より介入的な規制シナリオを検討する前に、あらゆる規制措置が比例的で、技術進歩を不必要に阻害しないことを確実にするために、これらのリスクと利益を十分に理解することが不可欠である。RHC の「ギャップを埋める」レポート⁴⁰で提言されているような、このバランスのとれたアプローチは、量子分野におけるイノベーションを促進するダイナミックな環境を維持するために不可欠である。

このような場合、規制当局は産業界や学術界、そして市民社会からの意見を取り入れたバランスのとれた協働的なアプローチから恩恵を受けられる。DRCF や国立量子コンピューティングセンター (NQCC) のような機関はすでにこのような先見性のある活動に取り組んでおり、その洞察は非常に貴重なものとなるだろう。金融行為規制機構 (FCA) は、量子セキュリティへの移行を検討している企業に対して、より多くの情報を積極的に要求している。一方、通信局 (Ofcom) のような規制当局は、既存のセクターと、競争を加速させるために規制をどのように微調整すべきかに関心を寄せている。

しかし、イギリスの量子技術セクターにとっては、次の要因によってホライズン・スキャニングを行ううえでの難しさが生じる可能性がある。

- 開発の多くが海外で行われているという事実 (また、イギリスの民間機関が歴史的に海

³⁸ Government Office for Science, 2017, The Futures Toolkit, Tools for Future Thinking and Foresight Across UK Government, <https://embeddingproject.org/resources/the-futures-toolkit-tools-for-futures-thinking-and-foresight-across-uk-government/>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

³⁹ Cabinet Office, 2013, Review of cross-government horizon scanning, <https://www.gov.uk/government/publications/review-of-cross-government-horizon-scanning>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

⁴⁰ Regulatory Horizons Council (RHC), 2022, Closing the gap: getting from principles to practice for innovation friendly regulation, <https://www.gov.uk/government/publications/closing-the-gap-getting-from-principles-to-practice-for-innovation-friendly-regulation>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

外へ目を向けてきたとは言えない事実)

- 量子技術から生じる問題は、一般化でき、遠くからでもよく見えるというよりも、むしろ個別的で微に入り細にわたるものになる可能性が高いこと
- 技術開発の一部は、防衛部門の開発から民間での応用へと移行する可能性が高く、したがってメインストリームの報告を回避する可能性があること

したがって、DSIT（科学イノベーション技術省）は、イギリスの量子規制および標準へのアプローチの策定に参与する機関へと追加の情報を提供するために、ホライズン・スキャンニングやその他の予測手法の活用を検討することが提言される。

提言 3

DSIT は、規制要件の予測を提供する手法を検討すべきである。これは、GO-Science、NQCC、国立物理研究所(NPL)、そして提言 2 で提案されている量子技術規制フォーラムとの連携により実現できる可能性がある。この能力は以下の通りであるべきである。

- A)** 製品開発サポートの一環として、将来の規制要件を予測するホライズン・スキャンニングを実施するために、既存のロード・マッピング活動を活用する。
- B)** TRL の技術デモレベルまたはそれ以上のレベルにおける量子技術の応用について、1~3年という短期に焦点を当てたホライズン・スキャンニングのメカニズムを確立し、より初期のTRL レベルにおける応用については、より長期的な視点で取り組む。
- C)** 技術領域の能力について客観的かつ現実的に捉え、利益とリスクを予測し、比例的な規制イニシアティブを調整するための現実的なスケジュールを基にすること。

4.4. 規制当局のサポート、トレーニング、リソース

新しい技術パラダイムである量子システムは複雑であり、理解するには協調的な取り組みが必要である。量子規制とは、他の技術と同様、消費者や環境の保護、そしてセキュリティや倫理的配慮、公共の利益を損なうことなく、イノベーションが繁栄するエコシステムを育むことである。これを効果的に行うには、規制当局および政策立案者は、量子力学とその応用に関する基本的な理解を持たなければならない。

規制当局や政策立案者によって量子技術に関する専門知識のレベルは様々であり、関連する学術的・技術的知識を有する者もいれば、経験がほとんどない者もいる。そのため、産業界や学界との協力により開発された量子技術の実地体験を含むトレーニング・モジュールや知識共有の機会が必要である。また、このトレーニングには、これらの慣行を既定の業務モードとして浸透させるための RI フレームワークも含まれるべきである。

量子技術は、その基盤的な性質と幅広い分野への適用可能性により、規制当局、政策立案者、および量子エコシステムに関わるその他の人々に対して、より円滑な商業移行を促進するための適切なリソースを必要とする。特に、より革新的な量子技術から得られると期待される大きな経済的利益は、これが経済に大きな影響を与える公共の利益であることを意味する。

規制当局にとって、当面のガバナンスの問題に対処すると同時に、将来の潜在的可能性を認識しておくことは不可欠である。こうした認識の向上は、規制上の障壁を予測し、他の関連規制当局やステークホルダーと協力して、ガバナンスプロセスが量子製品やサービスの特別な要求に適切に対応できるようにするために役立つ。

また、より幅広い一般市民、ジャーナリスト、オピニオンリーダー、企業が、量子技術の現状と潜在的な影響について適切に情報を得ていることも重要である。このステークホルダーグループが、技術の利点について十分に情報を得て、比例的かつ適応的なガバナンス手段の入手可能性について安心し、行き過ぎた誇張や誤った情報から守られるようにすることで、時期尚早で非比例的な規制を求める声が弱まる可能性がある。

提言 4

政策立案者、規制当局、企業、および一般市民に対して、量子技術の能力、応用、および限界に関する適切な量子技術の啓発トレーニングが提供されるべきである。これにより、比例のかつタイムリー、そして適応的な規制システムの構築と受容が促進され、量子技術に関する規制上の課題に対する一般市民の理解が深まる。DSIT（科学イノベーション技術省）は、量子コミュニティによりすでに提供されているトレーニング教材の質と有効性について、全体像を把握しておくべきである。必要に応じて、DSIT は、イギリス王立協会、イギリス王立工学アカデミー、その他の科学・工学専門機関、UKQuantumなどの産業団体、およびNQCCなどの関連機関がさらなるトレーニングを提供できるよう支援すべきである。さらに次のことも行う。

- A) 政策立案者および規制当局者向け：**出向プログラムを立ち上げ、個人が量子研究機関や業界パートナーのもとで時間を過ごし、量子技術に関する実践的な経験と理解を得られるようにする。また、専門家のワークショップ、座談会、専門家によるブリーフィング・セッションも、量子技術がもたらす能力、課題、機会について、より深い洞察を提供することになるだろう。
- B) 一般市民および企業向け：**デジタルメディア、ウェビナー、説明会、インタラクティブなプラットフォームなどを含む啓発キャンペーンは、幅広い聴衆にリーチすることができ、量子技術の現実的な能力、関連する潜在的な利益とリスクを説明し、比例のかつ適応的でタイムリーな規制を開発する継続中の取り組みを強調するために、イノベーションにおける責任とともに活用することができる。

4.5. テストベッドとサンドボックス

量子技術を実用化へと統合することは、政府政策や規制上の課題、そして社会・倫理・環境・福祉への配慮といった複雑なエコシステムに埋め込まれた技術的・商業的な取り組みである。責任あるイノベーション（RI）の原則を取り入れた量子技術の実証実験やサンドボックスは、この複雑な状況のナビゲーションを支援する強力な手段となり得る。たとえば、NQCC のために Innovate UK（IUK）が実施した SBRI（Small Business Research Initiative）コンペティションでは、量子コンピュータのテストベッドのプロトタイプ開発と提供に関する提案を募集した。このイニシアティブは多面的であり、技術的なボトルネックの調査、技術成熟度と性能の理解の向上、ベンチマークの支援などを行っている。こうしたイニシアティブは、規制当局が量子イノベーションを観察・評価するための管理された環境を提供し、技術の進歩を促進することにもなる。

量子戦略では、イギリスにおける量子技術の試験を主導するテストベッドおよびサンドボックスの設立が提言されている。サンドボックスとは、規制フレームワークの下で新技術の試験や開発を行うことを可能にする管理された環境である。しかし、これらのサンドボックスが孤立したシステムとならないようにすることも同様に重要である。サンドボックス環境からより広範な市場へと、成功したイノベーションが移行するための明確な経路を設計すべきである。この「出口戦略」は、技術の実用化と商業化を可能にし、サンドボックス実験のメリットが現実のシナリオで実現することを保証するものであり、極めて重要である。

本レポートのために連絡を取った一部のステークホルダーは、テストベッドやサンドボックスに現段階で規制要素を含めるべきかどうかについて確信が持てないようであったが、本レポートのセクション 2 とセクション 3 では、将来の規制上の決定を導くために、異なる TRL（技術成熟度）における潜在的なガバナンスアプローチの幅を早期に調査し理解することの必要性を論じている。その一例が、NQCC の量子コンピューティングテストベッドであり、これはイノベーターと規制当局のさらなる協力関係の先例となる可能性がある。

提言 5

RHC は、将来の規制上の決定にガバナンスの洞察を積極的に統合することを確実にするため、規制の要素を初期段階から含めたテストベッドやサンドボックスを確立するという量子室の野心的な取り組みを支援している。規制当局や標準化団体は、中核パートナーか利害関係のあるオブザーバーとして関与すべきである(規制当局の権限と重複するかどうか不明な場合もあることは認識している)。その目的は、潜在的なユースケースを明確に理解し、エコシステム全体で知識を構築することであるべきだ。後期の TRL では、規制当局は規制の実験を形作ることと潜在的な規制上の課題を評価することの両方において、重要な役割を果たすべきである。こうした規制の実験場やサンドボックスは、その中での量子イノベーションが市場に効果的に移行できるかという点を明確に意識して設計されるべきである。こうしたアプローチから恩恵を受ける可能性がある新たな分野として、暗号に関連する量子コンピューターがもたらすセキュリティ上の課題の特定と緩和策の実施が挙げられる。これには、ポスト量子暗号(PQC)の採用と移行に向けた業界の支援が含まれる。

4.6. 標準開発における産業界との協働

量子技術には、新たな標準の策定と既存の標準の適用が必要である。国家量子戦略では、この必要性を認識し、主要パートナーと協力して、国家の量子標準開発への関与を調整する取り組みを概説している。セクション 2.3 および 4.2 で議論されているように、標準はまた、量子技術の全体的なガバナンスにおいても重要な役割を果たすことが期待されており、製品やプロセスが初期の TRL（技術成熟度）段階にある間は規制システムのアジャイルな開発を可能にし、後期段階では規制の実施を支援する。

イギリス量子標準ネットワーク・パイロット(QSNP)のメンバーであるイギリス規格協会(BSI)、国立物理研究所(NPL)、およびその他のネットワークメンバーは、標準の開発とコンセンサスの形成に産業界が関与するよう促進する。この取り組みは、イギリス産業界が量子技術の開発と採用を行う際に責任あるイノベーション(RI)の原則を明示的に統合し、政策実施についてイギリス政府に助言するものである。QSNPが目指す、産業界への働きかけ、標準開発ロードマップの作成、国際的な関与の初期計画の策定は、前向きな一歩である。うまく実施されれば、イギリスのさまざまな組織にまたがる量子標準化の責任の分散化に対処できるだろう。

イギリスの量子分野における強みは、UKQuantumのような民間企業を含むネットワークや、欧州電気通信標準化機構(ETSI)のような国際標準化団体への参加を通じて見られる、量子コミュニティが示す協調精神である。量子技術開発の黎明期にあることを認識し、自主的かつ合意に基づくアプローチで標準化を進めることが適切である。BSIとNPLは、標準化の成熟度といった概念に関する専門知識を活用し、標準化の進展が技術の成熟度に適切に一致するよう、このプロセスを導いている。

協調的なアプローチにおける一つの課題は、特に国際レベルにおいて、標準規格の開発に中小企業(SME)が限定的にしか関与していないことである。標準規格の交渉への参入は、多くの場合、費用がかかる。また、国際標準規格の策定プロセスが長期化することは、時間とリソースの面から、多くの中小企業にとって現実的ではない。

このギャップを認識し、NPLとBSIは中小企業の声をもっと多く取り入れるための方法を模索している。

ステークホルダーのフィードバックに基づき、量子通信やポスト量子暗号(PQC)などの分野における現在の進捗は特に有望である。さらに、イギリス政府は、研究開発投資(RDI)の一環としてこれらのコストを助成し、中小企業の障壁を軽減し、これらの議論においてより幅広い意見が反映されるようにしている。QSNPは、中小企業の声を実際に反映させるための手段を模索し、より実質的な業界団体と交渉する際に必要な影響力を中小企業に与えるという野心的な構想

を積極的に打ち出している。このアプローチは、特定の領域、たとえば量子コンピューティングに偏るのではなく、バランスがとれたものでなければならない。これは、複数の異なる量子技術の関係者が、他の標準化フォーラムと共有している懸念事項である。

BSI は、量子標準規格を議論するための専門機関の設立を試みているが、このような議論を実行可能な成果に結びつけるには、戦略的な組織運営が不可欠である。こうした議論は、国際標準化活動の動向を追跡し、イギリスのプレゼンスを調整する上で有益である。しかし、こうした取り組みの有効性は、参加者の時間や専門知識の自主的な提供に依存する。QSNP の設立は、DSIT（科学イノベーション技術省）が支援し、NPL が主導する AI Standards Hub と同様、より体系的なアプローチに向けた一歩である。QSNP の性質、機能、規制プロセスにおける範囲を明確に定義することが重要である。

提言 6

RHC は、センシング、タイミング、イメージングなど、開発後期段階の製品に適用されるものも含めた標準の開発に向けた協調的アプローチとして、イギリス量子標準パイロットネットワークの立ち上げを歓迎する⁴¹。このパイロットネットワーク(および将来の展開)には、行動規範、特に責任あるイノベーション (RI) の実践も盛り込むべきである。これらは、早期に法的規制に頼ることなく、量子製品の効率的なガバナンスを確保するために、開発の初期段階で取り入れるべきである。このネットワークは、イギリスにとっての利益とリスクを特定するために、量子関連の業界団体、中小企業、多国籍企業と協力すべきである。そこから得られた洞察は、イギリスが国際規制フォーラムへ関与する際のアプローチに役立つはずである。

⁴¹ 詳しくは以下を参照。<https://www.npl.co.uk/quantum-programme/standards/network-pilot>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日)。

4.7. 市場の創造—顧客としての政府

過去 10 年間に量子技術が飛躍的に成長したことを受け、政府には、イノベーションに適した規制を支援し、革新的な技術を業務マトリックスに統合する役割がある。政府は責任あるイノベーション (RI) の原則を採用することで、量子技術の利用における倫理的・社会的な配慮の方向性を定めることができる。

新しい技術の商業化は、初期コストの高さや実証済みの利益の欠如により、しばしば困難に直面する。そのため、政府機関がアーリーアダプターの役割を担うことで、業界と市場の信頼を高め、技術の応用を支援し、将来的なサプライチェーンの開発を促進し、コスト削減につながる可能性があり、新たな市場を生み出すことにもなる。政府が顧客として、公共の利益と倫理基準に沿った責任あるイノベーション (RI) の実践を通じて、量子技術の開発を推進することができる。また、他の市場にも応用できる製品要件の再定義にも役立ち、企業が製品開発に投資する上でのさらなる信頼につながる。

カナダや米国のステークホルダーとの RHC の協議に基づくと、「顧客としての政府」モデルは北米では十分に確立されているように見える。このモデルの例としては、米国農務省 (USDA) のバイオ・プリファード・プログラムは、連邦政府機関による購入を義務付けることでバイオベース製品の購買と使用を増やし、経済発展を促し、新たな雇用を創出し、新たな市場を創出することを目的としている⁴²。このようなイニシアティブは、他の潜在的な顧客やステークホルダーに対して、その技術に対する信頼を伝えている。

国家量子戦略に基づく取り組みとして設立された「量子政府ユーザーグループ」は、省庁全体で意識を高め、量子応用に対する政府の要件を模索している。また、「量子カタリストファンド」は、これらの課題への対応方法を模索している。この「中小企業研究イニシアティブ (SBRI)」のコンペティションは、DSIT (科学イノベーション技術省) と IUK が資金提供しており、潜在的な応用を理解するための包括的な机上研究と、提案されたソリューションの実現可能性をテストするデモンストレーターの段階という 2 つのアプローチを取っている。関心のある分野には、輸送、医療、防衛、宇宙、そしてネットゼロの達成などが含まれるが、これらに限定されるものではない。このコンペティションは、あくまでも出発点に過ぎない。イギリス政府は、探索段階を越えて積極的な採用へと移行し、このようなコンペティションを通じて開発された応用やソリ

⁴² 詳しくは以下を参照。<https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/faces/pages/AboutBioPreferred.xhtml>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

ューションが公共部門の業務において実用的な場を見出すことを保証し、実用化へのギャップを埋める手助けをすべきである。

しかし、産業界からのフィードバックによると、すでに複数の大手メーカーが量子ベースの製品を製造しているにもかかわらず、イギリス政府は量子通信のアーリーアダプターとしての役割を担うことにためらいを感じているようだ。イギリスサイバーセキュリティセンター（NCSC）は、政府や軍事用途での量子鍵配送（QKD）の使用を推奨していない。RHC が関わった量子通信の関係者は、この姿勢と、この分野における成熟度に関するガイダンスの欠如を、そのより広範な受容と産業利用の障壁と捉えており、その結果、イギリスがこの分野での先駆者としての地位を失う可能性がある。この点については、セクション 5.2 でさらに詳しく検討する。

提言 7

政府機関は、適切に構築された調達戦略を通じて、量子技術の市場創出において重要な役割を果たす可能性がある。こうした戦略は、DSIT や Innovate UK などの機関からの資金援助により、量子カタリストファンドや量子政府ユーザーグループのリソースを活用することができる。

- A)** 政府は、既存のイニシアティブやコンペを拡張・強化するか、あるいは、試験的なプロジェクトを実行可能な調達戦略へと移行させる新たな道筋を開発すべきである。このアプローチは、公共部門における画期的なソリューションの迅速な適用を確実にすることを目的としている。これらの製品やサービスの調達は、責任あるイノベーション（RI）に関する声明に従って行われるべきであり、その際には、これらのガイドラインの主要原則を強調すべきである。量子システムに関しては、責任あるイノベーション（RI）の重視は、可能な限り、バリューチェーンに参加するすべての企業に拡大すべきである。
- B)** 政府は、アーリーアダプターとしての役割において、量子技術調達に関わるプロジェクトやプログラムに、関連する規制当局を組み込むべきである。この早期の規制関与により、規制上の考慮事項が当初から統合されることが保証される。このアプローチは、市場開発を支援するだけでなく、調達プロセスとともに規制フレームワークを進化させることも可能にする。

4.8. トランスレーショナル・ファンディング

一部の量子技術では、上述の他のイノベーション支援形態に加えて、移行期の資金援助が必要となる。本セクションでは、イギリス政府が最適な成果を達成するためにどのようなアプローチを採りうるかについて検討する。具体的には、公的資金を利用して企業が責任あるイノベーション（RI）の原則に準拠するよう促し、助成対象プロジェクトが社会的・倫理的な目標に確実に貢献できるようにすること、また、中小企業に不利益を与えないようにすることなどである。

国家量子技術プログラム（NQTP）は、基礎研究への資金提供を具体的な経済成長に結びつけるというギャップを埋めるための前向きな道筋を提供している。量子技術への投資に関わる関係者は、一部のスタートアップ企業が、商業資本よりも公的資金獲得を優先するビジネスモデルを採用する傾向があるかもしれないと指摘している。公的資金は現在も今後も重要であるが、イギリスにとっての真の課題は、世界的に認められた学術的潜在力を市場で利用可能な応用に転換することである。この問題に対する解決策には、量子技術開発に対する国家助成金をより市場志向型にすること、イギリスにベンチャーキャピタル企業を誘致するためのより大きなインセンティブを創出すること、イギリスの学術界から商業部門への技術移転を促進することが含まれる。

2024年から10年間で25億ポンドを投資すること、多数のプログラムを開始すること、量子室を設立することへの政府の取り組みは、明確な戦略的方向性を反映している⁴³。RHCは、人材開発や国際協力の推進から、規制の見直しや量子技術の主要能力の保護に至るまで、この包括的なアプローチを支援している。イギリスは欧州で最大の公的およびベンチャーキャピタル投資を誇っているが、それでも米国や中国の投資には遠く及ばない。イギリスの戦略は引き続き、正確かつ費用対効果の高い成果に焦点を絞ったものとなる必要がある。

⁴³ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National quantum strategy, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>, (閲覧日：2024年9月1日)。

提言 8

DSIT（科学イノベーション技術省）は Innovate UK と協力し、イギリス政府による量子技術への移行支援が、イノベーションマインドと関連専門知識を評価する全体的なシステムに組み込まれるよう、以下のような要素を含む方法を探るべきである。

- A)** 既存の量子技術規制に対する理解とコンプライアンス戦略を含む、責任あるイノベーション（RI）の実践を組み込む。
- B)** UKQuantum やイギリステクノロジー協会(techUK)などの業界団体を通じて、規制に関する議論へ参加できるように企業を支援し、必要に応じて、量子技術のイノベーターが直面する課題を反映した規制の改正や開発を促す。
- C)** 既存の規制当局や政府のイニシアティブを基盤として、規制に関するトレーニングにリソースを割く。これにより、中小企業や新興企業が、量子分野において進化する規制環境に対応できる体制を整えることができる。

4.9. 国際協働

イギリスは優れた研究能力と強固な国内体制（NQTP は多くの国々によって模倣されている）を備え、欧州最大の資本投資を受けている量子技術関連のスタートアップ企業が最も多く存在する国である⁴⁴。革新的な規制システムとして定評のあるイギリスは、国際的な舞台で標準・ガイドライン・規制の策定、提携関係の構築、そしてさまざまな国際的な取り組みの共通項の発見において、主導的な役割を果たす機会がある。

ステークホルダーが指摘するところによれば、イギリスが国際標準に合致できない場合、イギリス企業によるグローバル市場への参入が阻害されるだけでなく、革新的な企業がイギリスへの進出を断念する可能性がある。このため、イギリスが大きな影響力を発揮できる分野に貢献すると同時に、イギリスの戦略的利益を高める国際標準に合致する、という2つの戦略が必要となる。イギリスはすでに、たとえば NPL が量子通信標準の開発に関与しているように、国際標準化団体の活動に関与している（セクション 5.2 参照）。また、NQCC は量子コンピュータの国際的な測定およびベンチマーク標準のテストと定義を行う機会がある。イギリスは、透明性、セキュリティ、責任あるイノベーション（RI）を強調しながら、これらのプラットフォームを活用して、量子技術規制に対する自国のアプローチを提唱すべきである。イギリス企業、特にこうした国際機関との関わりに苦勞している中小企業が不利にならないよう、産業界は政府と並んで重要な役割を果たすべきである。

標準規格の開発に取り組む国際機関には、以下が含まれる。国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）、国際電気通信連合（ITU）、インターネット技術タスクフォース（IETF）、欧州電気通信標準化機構（ETSI）、米国電気電子学会（IEEE）、経済協力開発機構（OECD）などである。これらの取り組みを活性化しようとする差し迫った国際的なイニシアティブには、北大西洋条約機構（NATO）の標準化協定（STANAG）や、今後予定されている NATO の量子戦略などがある。BSI はイギリスのメンバーであるか、あるいは ETSI の理事会に参画しているなど、これらの機関の多くと強力なつながりを持っている。提案されているイギリスの戦略的アプローチは、これらのつながりを基盤とし、イギリスの専門家、特に中小企業を支援し、統一された声を絞った声を届けるために必要であり、イギリスのプレゼンスが個々の企業のイニシアティブに

⁴⁴ 以下の情報に基づいている。Quantum Insider のデータを用いた DSIT 社内分析（2023 年）と、<https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf>。（閲覧日：2024 年 9 月 1 日）。

依存しないことを確実にするために必要である。

より戦略的で協調的なアプローチを取ったとしても、米国や中国といった国々と、将来の標準や規制に影響を与える上で競い合うのは難しいだろう。イギリスは、イギリスの利益と一致する他国と戦略的パートナーシップを構築し、「量子連合」の発展を促すべきである。これにより、イギリスの戦略的影響力が強化され、世界的な量子政策の方向性をより効果的に形作ることができる。

イギリスが国際的な議論を主導する役割を担っている例としては、世界初の主要な AI 安全サミットを主催したフロンティア AI タスクフォースや AI 安全研究所 (AI Safety Institute)⁴⁵の活動を通じて、AI の安全かつ責任ある開発と展開を確保するための取り組みが挙げられる。量子コンピューティングの分野では、イギリスが OECD の技術に関するグローバルフォーラム⁴⁶や世界経済フォーラムの量子経済ネットワーク⁴⁷に参与しているほか、ISO の新しい国際量子技術委員会⁴⁸の主査に選ばれている。

⁴⁵ 詳しくは以下を参照。<https://www.gov.uk/government/publications/ai-safety-institute-overview/introducing-the-ai-safety-institute>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日)。

⁴⁶ 詳しくは以下を参照。<https://www.oecd.org/en/networks/global-forum-on-technology.html>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日)。

⁴⁷ 詳しくは以下を参照。<https://initiatives.weforum.org/quantum/home>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日)。

⁴⁸ 詳しくは以下を参照。<https://www.bsigroup.com/en-gb/insights-and-media/media-centre/press-releases/2024/january/uk-chosen-to-drive-global-standardization-around-quantum-technologies/>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日)。

提言 9

イギリス(DSIT、BSI、NPL、NQCC および規制当局)は、国際標準や規制の策定に積極的に関与し、その専門知識と国際的な地位を活用して国際的な調和を支援すべきである。これは、以下の方法で達成されるべきである。

- A)** イギリスの戦略的優先事項に最も適合する国際的ガバナンスフォーラムを特定し、優先順位を決定する。すべてのガバナンスフォーラムにおいて、政府(BSI や NPL と提携)は、グローバルな量子標準の開発に向けた明確な成果ベースの目標を設定すべきである。
- B)** これらの目標を推進するために、規制当局(標準化団体、産業界、学术界)の専門家からなるイギリスの専門家グループに支援とリソースを提供する。
- C)** UKQuantum や techUK などの支援組織が、中小企業の標準開発への参加(国際標準化団体への参加を含む)を促進する。
- D)** 同様の野望と規模を持つ国々とのさらなる戦略的パートナーシップを構築する(米国、カナダ、オーストラリア、オランダとのパートナーシップに続く)。これらのパートナーは、他の分野において透明性の高いアプローチで標準の策定に取り組んだ実績を持っているはずだ。これにより、既存あるいは将来のパートナーシップにおいて、標準・規制の策定に対する多国間アプローチを国際フォーラムで推進するための統一された意見の表明に焦点を当てることを確実なものとする。

4.10. 今後の規制に関する検討事項

商業的集中

商業的集中は、量子技術特有の問題ではない。しかし、量子技術、特に量子コンピュータの指数関数的な能力が将来的に強力な「先行者利益」を生み出し、それが反競争的慣行として機能し、商業的独占につながる可能性がある。一方、有益な量子製品やプロセスの開発を遅らせたり阻止したりする規制システムの選択は、先行者不利益を生み出す可能性がある。特に、将来的な規制措置のタイミングを適切に計ることは、微妙なバランスが求められる。反競争的行為が一度確立されるとそれを解体することは困難であるが、時期尚早であるか非比例的な規制はイノベーションを阻害する可能性があるからだ。

独占化よりも優先すべき懸念事項が現在あるものの、必要となった場合に迅速な対応ができるよう、この状況はモニタリングしておくべきである。DRCFの規制当局は、量子技術に関する洞察文書の中で、「量子技術がオープンで競争的な市場を促進する形で発展することを確実にすることを目指していること、また「競争上の問題が生じる可能性がある新興市場を継続的にモニタリングし、必要に応じて既存の競争力を活用して行動する」ことを強調している。これらの現行の規制には、デジタル市場、競争、消費者法案（2023年）、2003年通信法、2000年金融サービス市場法、1998年競争法が含まれる。これらの規制をタイムリー実施し、既存の権限では対処できない課題が存在する分野を特定するためには、このモニタリングが極めて重要となる。

輸出規制とサプライチェーン

量子技術は、国際武器取引規則（ITAR）を含む輸出規制などの国際規制に大きく影響され、その世界的な軌道とサプライチェーンの仕組みが形成される。量子イノベーターの中には、こうした輸出規制の対応が輸出販売の障壁となっていると指摘する者もいる。また、一部のステークホルダーは、軍民両用製品の輸出規制への対応自体は目新しいものではないが、量子製品への適用には課題がある可能性があるとして指摘している。

ITAR やさまざまな国内および国際的な輸出規制を含むこれらの規制は、量子技術のグローバルな開発やサプライチェーンに大きな影響を与える可能性がある。新興企業にとって、これらの規制を理解し、遵守することは極めて重要であるが、規制の複雑さや技術の急速な進化により、困難な場合もある。スタートアップ企業は、こうした規制の状況を把握し、コンプライアンスを確保し、法的リスクを回避し、国際的な協力や市場へのアクセスを促進することが求められる。そのためには、セキュリティ上の懸念、法的コンプライアンス、そしてグローバルな技術共有と開発の促進のバランスをとる戦略的なアプローチが必要となる。

法律の専門家とのパートナーシップを確立し、変化する規制環境に関する情報を入手することは、スタートアップ企業がこうした課題を効果的に管理するための重要な戦略である。

輸出規制の一部は国際法や条約に基づくものであり、大幅な変更は困難である。しかし、詳細なガイダンスを提供することで、量子イノベーターがこうした規制を乗り切るのを大いに支援することができる。イノベーターを支援するには、明確なガイダンスと合理化されたプロセスが、デュアルユース製品を管理する上で不可欠である。この支援は、デュアルユース技術の輸出規制の複雑さに不慣れなスタートアップ企業にとって極めて重要である。

さらに、規制フレームワークにおけるサプライチェーンの役割も重要である。サプライヤーや国から調達した重要な部品だけに頼ることは、イギリス企業にとってリスクとなる。多くの地域から幅広い供給基盤を構築すれば、そのようなリスクを限定できる。

知的財産 (IP)

知的財産権はイノベーションを促進する上で重要な要素である。欧州特許庁は過去 10 年間にわたり、特に量子コンピューティング製品は「あらゆる技術分野全般よりも高い成長率を示している」と報告している⁴⁹。

複数の特許申請を行う機会は、「特許の藪」を生み出す可能性がある。基盤技術に関する多数の特許が存在すると、意図せぬ侵害のリスクによりイノベーションが妨げられる可能性がある。極端なケースでは、これは「特許トロール」につながる可能性がある。「企業が実質的な製品を作ることなく知的財産を蓄え、その収益のほとんどを訴訟から得ている」という状況である⁵⁰。

前進する方法としては、Quantum Delta NL の共同 IP プールのような革新的な IP モデルを採用することが考えられる。このようなモデルでは、標準化された技術移転プロセスと積極的な知的財産政策が可能となり、個々の知的財産の保護と共同開発の両方を支援する環境が促進される。この共同アプローチは、進歩が多くの場合、分野横断的な努力の積み重ねの結果である量子技術において特に重要である。

目標は、強固な知的財産保護とオープンイノベーションのエコシステムの育成とのバランスを

⁴⁹ European Patent Office, 2023, Quantum Computing, Insight report, https://link.epo.org/web/epo_patent_insight_report-quantum_computing_en.pdf, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

⁵⁰ Financial Times, 2017, Apple Accuses Qualcomm of acting as a 'common patent troll', <https://www.ft.com/content/6b44f5f0-d519-11e7-8c9a-d9c0a5c8d5c9>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

とることである。このバランスにより、量子技術は個々の成果と共有された研究努力の両方を通じて進歩することが可能となる。

5. ドメイン特化の規制要件

はじめに

前セクションで述べたように、量子技術に基づく技術のガバナンスを成功させる鍵は、技術成熟度がどの程度か、またその技術が既存の企業や産業のビジネスモデルにどの程度漸進的あるいは破壊的・変革的であるか、そしてどの産業に対して最も破壊的であるかを統合的に理解することにある。また、規制は技術ドメイン⁵¹全体ではなく、量子関連製品やプロセスを対象とすべきであることも指摘した。

すでに市場に出る準備が整いつつある量子技術の用途は、おそらく以下のようなものになるだろう。

1. 既存企業のビジネスモデルを破壊する度合いが最小限である。
2. 既存のバリューチェーンにおいて、すでに認知された役割を担っている。
3. そのバリューチェーンの一部を担う製品のための規制システムが、革新的な量子関連製品にとって障害となる可能性は低い。

バリューチェーンに関わる少なくとも1社以上の企業にとって、技術や製品がビジネスモデルを破壊するものである場合、その破壊の度合いによっては、製品開発における1つ以上のTRL（技術成熟度）において規制上の課題が生じる可能性が高くなる。極端な場合、製品が既存のバリューチェーンを破壊するものであるならば、その技術に対する規制上の課題は最も深刻に顕在化するだろう。

このセクションでは、NQTP ハブが定義した量子技術の分野を評価する。ステークホルダーからのフィードバックにおける類似性と潜在的な規制の影響を考慮し、量子センシング、タイミング、イメージングをひとまとめにし、その後に量子通信、量子コンピューティング・シミュレーションの各サブセクションを個別に配置した。これらの各領域には、さまざまな成熟度の製品やプロセスが存在するが、量子通信よりもセンシング、タイミング、イメージングの領域の方がより進んでいるものが多く、量子コンピューティングは一般的に最も進んでいない。本セクション

⁵¹ ドメイン：本レポートでは、量子技術における特定の応用分野または利用分野を指す。特定の実際的な応用または目的のために量子技術を利用する専門分野を意味する。たとえば、「ドメイン特化の量子技術」には量子コンピューティング、量子通信、量子センシング、量子イメージングが含まれ、それぞれ独自の規制および技術要件を持つ応用分野である。

では、これらの各領域について、最も進化した製品の市場成熟度、既存のビジネスモデルに対するこれらの製品の漸進性または破壊性、ステークホルダーが指摘する既存の規制上の課題、原則や標準の役割を含む提案されている規制アプローチなどを含めて、TRL を検討する。

5.1. 量子センシング、タイミング、イメージング

5.1.1. 技術成熟度

本レポートでは、規制やTRL（技術成熟度）の観点から共通点があることから、量子センシング、タイミング、そしてイメージングをまとめて取り扱う。ステークホルダーからのフィードバックによると、そのようなデバイスの多くはすでに「早期導入」段階（セクション2を参照）にあり、市場に投入できる状態にあるか、すでに市場で入手可能である。一方で、それより前の段階にあるものもある。市場への最初の応用例は、おそらく漸進的なイノベーションの例であり、既存のバリューチェーンに適合するもので、規制上の障壁はおそらく量子技術に特有のものではないだろう。そのような場合、既存あるいは将来の標準への整合性は注目に値する。また、最終的な消費者市場に混乱は生じないものの、バリューチェーン全体の間部分で事業を展開するメーカーが混乱に直面し、より技術的に進歩した競合他社に地位を奪われるという例も出てくるだろう⁵²。

3つの領域はすべて、最先端の製品が少数ある一方で、現在TRLがより前段階にあり、かつ／あるいは、より破壊的な可能性がある将来の潜在的な応用例がはるかに多くあるという特徴がある。これらのより破壊的で、潜在的により商業的に重要な後発の技術開発に向けて、将来の規制環境を整える必要性を視野から外さないことが重要である。

センシング

量子センサーは、従来のセンサーよりもコンパクトで効率的な可能性があり、さまざまな利点を提供できる。さらに、これまでは不可能だったまったく新しいセンシングの方法を開拓し、磁場、電場、重力場などの量を、従来のセンシング技術よりも数千倍高い感度で測定できる可能性がある。その潜在的な用途は、神経画像からガス漏れ検知まで、さらに広くはエネルギー、地質

⁵² Joyce Tait and Davied Wield, 2019, Policy support for disruptive innovation in the life sciences, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09537325.2019.1631449>, (閲覧日：2024年9月1日)。

学、ナビゲーション、医療画像、化学、生物学、材料科学、インフラストラクチャーにまで及ぶ。技術が発展するにつれ、さらに画期的な用途が生まれる可能性が明確になる。

従来の技術と比較してわずかな変化しか提供しない量子センサーは、現段階では新たな特定の規制を必要としない可能性が高いが、より画期的な性質を持つものは、安全性と正確性を確保するために新たな標準や規制フレームワークが必要になる可能性がある。たとえば、量子センサーから得られたデータは、それが同じデータカテゴリーに属する限り、古典的な技術で収集されたデータと同じデータ保護規制の対象となるべきである（ただし、従来は収集できなかったデータである場合は、その限りではない）。責任あるイノベーション（RI）の原則を適用するということは、特に社会的弱者から収集されたデータが倫理的に使用され、社会的な利益を第一に考慮されることを確保することを意味する。

量子センサーの市場創出と商業的普及を可能にするには、規制当局の承認プロセスや、一般の人々の技術に対する認識や信頼に関連するその他の課題に取り組む必要がある（RI アプローチを通じて）。産業界の専門家、政策立案者、消費者を含むステークホルダーを集めた協働フォーラムは、バランスのとれた規制の道筋を形成する上で役割を果たすことができる。これらの量子技術を取り巻く技術環境は急速に変化しているため、適応性の原則も重要となる。

タイミング

量子タイミング技術は、既存のマイクロ波原子時計よりも何千倍も正確なタイミングを実現する可能性がある。量子タイミング技術の将来的な用途は、超高速ブロードバンドから金融市場における高頻度取引まで多岐にわたる可能性が高い⁵³。たとえば、通信においては、量子タイミングによってデータ伝送を正確に同期させることができ、データの重複や損失のないシームレスなデータフローを確保できる。しかし、これを既存の通信インフラに統合するには、相互運用性の課題がある。同様に、金融市場では、高頻度取引は量子技術が提供するマイクロ秒単位の優位性から恩恵を受けることができるが、このような精密な取引メカニズムの倫理的影響や市場の歪みの可能性については、十分な検討が必要である。この技術を利用できる企業にとっての潜在的な利点は、不公平な競争条件や新たなシステミック・リスクを生み出す可能性がある。規制当局は、潜在的な経済的利益とこのようなリスクを比較検討しなければならない。

したがって、規制や相互運用性の問題には、量子タイミング装置と既存のインフラの互換性を確保すること、そして金融市場における公平性の確保やその他の責任に関する問題が含まれる。

⁵³ 詳しくは以下を参照。<https://www.birmingham.ac.uk/research/heroics/quantum-technologies>,（閲覧日：2024年9月1日）。

タイミング装置の管理に政策立案者や、業界関係者、そして一般市民を関与させることで、量子タイミング装置の普及と責任ある利用を促す環境が整う。

イメージング

量子イメージング装置には、濁った媒体（たとえば、濁った水中や地下環境）における解像度と性能が向上した超高感度カメラや、角を曲がって見るという未来を感じさせるような能力などが含まれる。このような製品の応用分野には、セキュリティ、ヘルスケア（腫瘍検出のための顕微鏡や MRI に代わる光学カメラ）、輸送（事故検出や交通の流れの改善）、気候変動（メタンガスやその他のガス漏れの場所や深刻度を特定するカメラ）などがある。医療分野では、量子イメージングは非侵襲診断を提供することができ、患者ケアに大きな影響を与える可能性がある⁵⁴。このような装置を現在の医療ワークフローに統合し、安全な運用を確保し、専門家と一般市民の両方から量子製品への信頼を獲得するには、規制監督の適応が必要となる。

これらの量子イメージング技術が商業的に実現可能になるにつれ、医療や輸送などの分野における相互運用性を確保するための規制や標準、そして倫理的な展開を促進するための責任あるイノベーション（RI）の標準など、バランスのとれた適切な規制フレームワークが必要となる。特に、対象に直接照明を当てずに詳細な画像を撮影できるセキュリティ監視などの分野における量子イメージングの悪用は、重大なプライバシー上の懸念を生む可能性がある。倫理的な配慮と強固なプライバシー保護は、規制に関する議論の最優先事項であるべきである。テラヘルツ・ボデイスキャナーなどの既存技術は、同様の課題がどのように克服されてきたかを示している。この技術は現在広く使用されており、量子イメージングへの道筋を示している。

5.1.2. 市場成熟度

これらの分野の一部の機器はすでに市場に出回っているが、有効性を実証することや製品に対する信頼を築くことの難しさ、そして初期コストの高さから、ユースケースの開発や市場での普及を促進することが課題となっている。NPL は、製品を独自にテスト・検証することで、これらの課題のいくつかに対処する役割を果たすことができる。

センシング

⁵⁴ Muhammad Shams and others, The Quantum-Medical Nexus, 2023, Understanding the Impact of Quantum Technologies on Healthcare, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38046499/>, (閲覧日：2024年9月1日)。

量子センシング技術には、主要なインフラプロジェクト⁵⁵のための地下地質調査を行う重力センサーや、メタンガスやその他のガス漏れを正確に特定してネットゼロ目標の達成に役立てる能力など、数多くの潜在的な利点がある。これらの製品の有効性を実証することは、環境面と経済面の双方で大きな利益を追求する産業を支援し、量子センシング製品の市場開発にもつながる可能性がある。

タイミング

イギリスの2023年国家リスク評価で強調されているように、位置、航法、時刻（PNT）サービスはイギリスのインフラの重要な要素であり、グローバル・ナビゲーション衛星システムの故障の影響を緩和するために、量子技術は信頼性の高い代替りの時刻源を提供できる可能性がある⁵⁶。政府の政策や規制は、このような製品の普及において重要な役割を果たすことができる。

イギリスはナショナル・タイミング・センター⁵⁷を設立しており、イギリスの使命のひとつとして、「2030年までにタイミングを含む量子航法システムが航空機に導入され、衛星信号に依存しない次世代の精度を備えた耐障害性を実現する」と述べている⁵⁸。また、イギリス政府の10か条計画に沿って、国家の重要インフラ部門に対して最低限のPNT要件を設定するための法規制オプションの検討も行われている⁵⁹。こうした取り組みは、標準やベストプラクティスといったよりソフトな規制イニシアティブとともに、この目標に向けた量子タイミングのイノベーションを支援する可能性もある。

イメージング

セキュリティ監視に関して、量子イメージング装置は、霧や煙、あるいは完全な暗闇といった状

⁵⁵ このような調査の必要性を示す例としては、グレート・ウェスタン・ルート（Great Western Route）の電化が挙げられる。予期せぬ地盤状況により、大幅な遅延とコスト増を招いた。以下を参照。<https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2016/11/Modernising-the-Great-Western-railway.pdf>,（閲覧日：2024年9月1日）。

⁵⁶ Cabinet Office, 2023, National Risk Register 2023, <https://www.gov.uk/government/publications/national-risk-register-2023>,（閲覧日：2024年9月1日）。

⁵⁷ 詳しくは以下を参照。<https://www.gov.uk/government/news/worlds-first-timing-centre-to-protect-uk-from-risk-of-satellite-failure>,（閲覧日：2024年9月1日）。

⁵⁸ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National Quantum Strategy Missions, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions>,（閲覧日：2024年9月1日）。

⁵⁹ 詳しくは以下を参照。<https://www.gov.uk/government/news/critical-services-to-be-better-protected-from-satellite-data-disruptions-through-new-position-navigation-and-timing-framework>,（閲覧日：2024年9月1日）。

況を覆い隠すような状態を潜在的に見通すことができる⁶⁰。これらの技術は倫理的な課題をもたらす可能性があり、プライバシー権を侵害しないことを保証する政策が必要である。また、産業界・学術界・政府の連携により、責任ある方法で利益を十分に実現できるよう、利用に関する明確な倫理指針を策定する必要がある。

5.1.3. 既存の規制上の課題

一部のステークホルダーは、特に技術開発の初期段階において、明確性と一貫性が市場の信頼に大きく影響する可能性があることから、標準の欠如を問題視している。また、検討中の特定の製品に関連する適切な標準を確保することも重要であり、さまざまな種類の製品をカバーする広範な標準を作成する誘惑にかられないようにする必要がある。磁気計や重力計は、光ファイバー通信のミラーリングプロセスやマイクロエレクトロメカニカルシステムセンサー技術とともに、標準に基づく保証を必要とする分野であると考えられている⁶¹。米国と日本は、これらの領域をリードしており、将来の標準開発の先駆者となっている。

量子センシング、タイミング、イメージング製品にも測定標準が必要であり、責任あるイノベーション（RI）と将来の技術進歩への適応性を組み込むことが重要である。その他の問題としては、量子製品自体の特性の測定や、特定のパラメータを測定するための量子製品の使用が挙げられる。イギリス量子計測研究所では、産業界のエンジニア、学術研究者、NPL の科学者が協力し、これらの問題の調査を行っている。

イギリスの重要なミッションの1つは、「2030年までに、すべてのNHS（国民保険サービス）トラストが量子センシングを可能にするソリューションの恩恵を受ける」ことである⁶²。課題は、医療応用は、量子関連のイノベーションにとって、既存の規制障壁が非常に多い分野であることだ⁶³。イノベーターは、NHSの規制フレームワークの下で新しい技術を導入することは難しいと

⁶⁰ House of Commons, 2018, Science and Technology Committee, Oral evidence: Quantum technologies, <https://committees.parliament.uk/oralevidence/8183/pdf/>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

⁶¹ Kai Bongs, Simon Bennett and Anke Lohmann, 2023, Quantum sensors will start a revolution - if we deploy them right, <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01663-0>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

⁶² Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National Quantum Strategy Missions, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

⁶³ Regulatory Horizons Council, 2022, The regulation of Artificial Intelligence as a Medical Device, <https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-horizons-council-the-regulation-of-artificial-intelligence-as-a-medical-device>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

主張している。量子関連技術を含むすべての医療技術において、企業は臨床試験や製品販売のために、カナダや米国で新製品の開発を行うことを選択している。マッキンゼーのレポートは、「医療応用は、主要な規制上のハードルを克服する必要があり、医療機関が導入を遅らせる可能性がある」と指摘している。ナビゲーション応用は、高度に規制されているものの、たとえば自動車業界では、より迅速な普及につながる可能性がある規制のハードルが低い⁶⁴。

CE マークは、製品が EU の安全、健康、環境標準に適合しており、EU および EEA 市場に合法的に販売できることを示す。イギリス政府は、CE マークの承認をイギリスに無期限に拡大する意向を発表した⁶⁵。一部の量子企業は、CE マークの要件が難しいと感じている。たとえば、ステークホルダーは、現在の技術向けに設計された CE 関連の試験の一部では、量子製品を高い放射線場にさらす必要があり、それによってデバイスの感度が損なわれると強調した。また、第三者による操作に責任が関連する機器保険や、製品が破壊試験を受ける場合の問題もある。適合性評価機関が量子製品のニーズを満たす認証制度を導入できるよう、さらなる作業が必要である。

量子イノベーターたちは、技術の発展に合わせて規制も進化させる必要性を強調し、量子センサー、タイミング、そしてイメージングを管理するイギリスの規制を見直し、主要な貿易パートナーの仕様と整合させることを提案した。問題の例として、NPL の量子ベースのクロックシステムがある。これは、限られた数量が生産され、各バージョンは前バージョンをわずかに改善したものとなっている。世界的な存在になることが期待されているが、それを支える規制フレームワークが欠如しており、時代遅れになるコンポーネントの CE マーキング要件に資金が費やされている。これは、この一例に特有の新しいタイプの規制上の課題であり、いくつかのシナリオでは、より合理的なアプローチが必要であることを示している。

⁶⁴ McKinsey & Company, 2021, Shaping the long race in quantum communication and quantum sensing, <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/shaping-the-long-race-in-quantum-communication-and-quantum-sensing>, (閲覧日：2024年9月1日)。

⁶⁵ Department for Business and Trade, 2023, CE marking guidance, <https://www.gov.uk/guidance/ce-marking>, (閲覧日：2024年9月1日)。

提言 10

DSIT（科学イノベーション技術省）は、より成熟した量子センシング、タイミング、そしてイメージングの応用を加速的に適用・開発・採用するための規制イニシアティブに対して、資金提供を含めた政策環境の調整を支援すべきである。同時に、技術の進歩に歩調を合わせた規制の進化を可能にするため、より破壊的な可能性を持つ製品の準備も行う。規制政策と資金提供は、以下の目標を掲げるべきである。

- A)** 製品イノベーションの可能性を不必要に阻害したり、人々や環境にリスクを生じさせたりすることなく対応できる場合には、同等の製品を対象とする既存の分野別規制システムを基盤として活用し、新たな規制システムを開発することは避けるべきである。たとえば、DSIT と Innovate UK は、医療用途の場合には医薬品医療製品規制庁(MHRA)などの関連規制当局と量子技術開発者との対話を促進し、既存のフレームワークを適用することができる。
- B)** 標準およびガイダンスの開発と適応を優先し、法的根拠に基づく規制よりも、相互運用性、データ保護、既存のインフラおよびワークフローとの互換性、および(NPL などを通じた)製品の検証とテスト(量子製品の認証を行う適合性評価機関の準備を含む)をカバーする。
- C)** ステークホルダーの関与に関しては、規制当局、標準化団体、業界政策立案者、公益団体、消費者などが参加する既存の協働的なフォーラムを可能な限り活用し、バランスのとれた技術を可能にする規制フレームワークの形成に貢献すべきである。最近発足したイギリスの「量子標準パイロットネットワーク」がこの役割を担う可能性がある。このネットワークは、量子センサー、タイミング、イメージングのユニークな能力を活用するために、既存の標準の開発や修正、ベンチマーク、測定プロトコルの策定を行うことができる。
- D)** すべての規制イニシアティブ、そして企業によるその実施は、たとえば、データが倫理的に使用され、社会や環境の利益のために使用されることを確保するなど、責任あるイノベーション (RI) のアプローチに準拠すべきである。

5.2. 量子通信

量子通信に関する現在の懸念は、主に暗号技術とサイバーセキュリティに関連する問題に集中している。技術が進歩するにつれて、予期せぬ利益やリスクが生じる可能性もあるため、警戒を怠らず、早期に認識することが重要である。また、効果的なガバナンスを維持するための迅速かつ協調的な行動計画を策定しておくことも重要である。

5.2.1. 技術成熟度

ステークホルダーからのフィードバックに基づき、多くの量子通信機器はすでに技術デモレベルから早期導入レベルの段階に入っている。量子暗号化ルーターや量子強化データセンターは、情報伝達とセキュリティ保護の方法に変化をもたらす可能性があり、主流のサービスに統合されれば、盗聴リスクを低減し、サイバースパイ行為から保護できる。量子暗号化された銀行取引などの応用の進歩は、既存のバリューチェーンとの互換性を示しており、開発の初期段階にある他の技術よりも破壊的なイノベーションが少ないことを示唆している。このより急速な進歩は、従来の暗号化技術に伴う脆弱性を制限し、安全性の高い金融取引が標準となる道を開く可能性がある。

量子鍵配送 (QKD) はすでに比較的成熟しており、イギリスや中国、米国などでは、この技術を用いたネットワークが構築され、試験運用も行われている。BT と東芝は現在、ロンドンで世界初の商業用量子セキュリティメトロネットワークを試験運用しており⁶⁶、HSBC と EY は、金融取引、セキュアなビデオ通信、ワンタイムパッド暗号化など、さまざまな用途にこのネットワークを利用している。これは、業界が QKD の潜在的な可能性を認識していることを示すものである。

量子暗号を開発するもう一つの理由は、現在の暗号化方式が将来的に量子コンピュータによる解読に対して脆弱になる可能性があることである。量子暗号は、このセクションおよび量子コンピューティングのセクション 5.3 で後述する PQC と混同すべきではない。

QKD の他にも、量子通信の分野にはさまざまな革新的な応用例がある。量子乱数発生器 (QRNG) はすでに成熟した技術であり、市販製品も入手可能である。QRNG は暗号化プロセスに役立つ可

⁶⁶ 詳しくは以下を参照。<https://newsroom.bt.com/bt-and-toshiba-to-build-worlds-first-commercial-quantum-secured-metro-network-across-london/>, (閲覧日：2024年9月1日)。

能性がある。

量子通信の潜在的な用途は、安全な鍵の配布にとどまらない。量子技術を既存の通信インフラに統合し、効率性と安全性を高める方法についての研究が進められている。しかし、安全な鍵や量子コンピューティングの拡張以外の分野におけるこれらの用途の範囲と実用性については、現在も活発な研究と議論が続けられている。

量子通信で相互接続された分散型量子センサーによるネットワーク量子センシングは、データ収集と処理に新たな可能性をもたらす。イギリスの量子ミッションのひとつに、「2030年までに、モバイルネットワーク型量子センサーが、輸送、通信、エネルギー、防衛の各分野の重要なインフラ全体で、新たな状況認識能力を解き放つ」というものがある⁶⁷。

量子セキュリティは発展途上の分野であることを認識することが重要である。そのため、新たに発生する脆弱性や既存の脆弱性に対抗するためには、絶え間ない警戒と開発を継続することが不可欠である。QKDの標準規格は策定中であるが、さらなる開発と標準化が必要である。量子通信全般についても同様である。相互運用性と普及を確実にするためには、これらの進歩をグローバルな標準規格に整合させることが不可欠である。

5.2.2. 市場成熟度

量子通信装置のプロトタイプや初期の商用システム、たとえばQKDシステムや量子乱数発生器(QRNG)などがすでに実証され、一部はすでに市販されている。たとえば、量子暗号鍵配送(QKD)は、いくつかの国々で実施された政府選挙において、投票データの安全性をリアルタイムで確保するために、鍵を安全に送信する目的で使用された。中国は2024年に量子通信実験専用の「墨子号」衛星を打ち上げ、欧州宇宙機関(ESA)も同様の機能を持つ「イーグル1号」を2024年に打ち上げる予定である。また、イギリスは2024年に「光量子通信衛星プラットフォーム」を打ち上げ、宇宙からハブ光地上局への軌道上量子鍵配送の実証を行う予定である。

QKDベースのサービスは、長距離通信をサポートするために、信頼ノード(現在の国家規模の高セキュリティネットワークで一般的な安全な場所)を使用している。しかし、量子もつれを利用した量子通信(次期NQTPハブフェーズで計画されている)では、広範囲にわたって安全な

⁶⁷ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National Quantum Strategy Missions, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

通信を確保するために、量子中継器のような新たなソリューションが必要となる。量子通信システムの商業的拡張性を確保し、グローバルネットワーク全体で一貫性のある信頼性の高い量子データ伝送を保証するためには、その開発と統合が極めて重要となる。

量子通信デバイスを既存のデジタルインフラに統合することは、確立されたプロトコルや標準を使用する従来のデバイスとは異なり、量子システムでは多くの場合、単一光子検出器や光源などの特殊なハードウェアが必要となるため、課題となっている。この乖離は、移行プロセスを遅らせる可能性があり、量子互換インフラの並行開発の重要性を浮き彫りにしている。また、システムに統合された際に安全性が確保されることも重要である。量子通信はセキュリティ面で優位性があるものの、導入コストは高く、そのメリットを正当化する必要がある。そのため、将来的な技術やサービスをサポートする運用インフラを、今日から展開する戦略的な理由があるかもしれない。

また、QKD とポスト量子暗号 (PQC) の価値とセキュリティへの影響に関する現在進行中の議論も考慮することが不可欠である。QKD は安全な鍵の伝送方法を提供するが、ハードウェアベースのセキュリティに依存していることと、現在のインフラの限界が課題となっている。一方、PQC は、量子コンピュータによる攻撃を受けないアルゴリズムに置き換えることで、量子コンピュータによる潜在的な脅威から通信を保護することを目的としている。QKD と PQC の選択は二者択一ではないことを明確にしておくことが重要である。QKD と PQC を統合することで、両技術の長所を活かしたハイブリッドなソリューションを提供できる。PQC は QKD システムに不可欠な認証を提供し、全体的なセキュリティフレームワークを強化する。ただし、このアプローチはユーザーのニーズに応じて柔軟に対応できるが、追加のハードウェアが必要となり、コストが増加する可能性がある。

さらに、QKD は、ハードウェアが指定されたパラメータ内で動作することを前提に、証明可能なセキュリティを提供している。しかし、これらの前提と実際のハードウェア実装との間に相違があることは、セキュリティ上の懸念事項である。このことは、このような脆弱性を軽減するための継続的な研究開発の必要性を浮き彫りにしている。

同様に重要なのは、PQC は既知の量子攻撃に耐えるように設計されているが、現在のところ、量子コンピューティングのあらゆる可能性に対する耐性を保証するセキュリティの証明はないという認識である。この不確実性は、将来の脅威から身を守るために暗号化手法における継続的な警戒とイノベーションの重要性を強調している。

5.2.3. 既存の規制上の課題

現在の規制上の課題は、相互運用性のための標準規格の開発が国際的に進められている QKD

にある。関係者は、進展が見られる例として欧州電気通信標準化機構（ETSI）を挙げ、国際標準化機構（ISO）は ISO/IEC 15408 フレームワークに統合された QKD セキュリティ標準規格の開発を進めている⁶⁸。

ネットワーク事業者が技術を採用するには、ネットワークの相互運用性を確保することが不可欠である。QKD のセキュリティはハードウェアの性能に関する想定に基づいているため、期待される性能と実際の性能に相違があると脆弱性が生じる可能性がある。デバイスの不完全性と潜在的な脆弱性は、現在活発に研究されている分野である。イギリスの「量子ミッション 2」は、「2035 年までに、イギリスは世界で最も先進的な量子ネットワークを大規模に展開する」というものであり、「量子通信における短期的な商業機会のさらなるテスト、実証、評価」を支援している⁶⁹。関係者は、量子脅威に対する通信の安全性を確保する上で PQC が補完的な役割を果たすことを認識しながらも、QKD の潜在的な可能性を熱心に探求している。これは量子通信の長期的な価値を認識しており、採用を促進するために QKD ハードウェアをテストし認証する手法の開発を含めることが重要である。

QKD 技術は成熟しつつあるが、イギリスの国家サイバーセキュリティセンター（NCSC）は「政府や軍事用途での QKD の使用を推奨せず、特に重要な国家インフラ部門におけるビジネスクリティカルなネットワークでの QKD への単独依存には警告を発している」⁷⁰。NCSC は、QKD に関連するセキュリティリスクを強調し、その脅威に対する最善の緩和策として PQC を提唱している⁷¹。米国の国立標準技術研究所（NIST）は、国家安全保障局（NSA）と協力し、同様の見解を示している。

ステークホルダーは、QKD がもたらす価値と機会を強調し、NCSC がその立場を再考し、軟化させることを望んでいる。ステークホルダーは、QKD は認証メカニズムによってサポートさ

⁶⁸ 詳しくは以下を参照。<https://www.quantumcommshub.net/research-community/about-the-hub/phase-2/work-package-5/the-hubs-spoqc-mission/>,（閲覧日：2024 年 9 月 1 日）。

⁶⁹ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National Quantum Strategy Missions, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions>,（閲覧日：2024 年 9 月 1 日）。

⁷⁰ National Cyber Security Centre, 2020, Next steps in preparing for post-quantum cryptography, <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/next-steps-preparing-for-post-quantum-cryptography>,（閲覧日：2024 年 9 月 1 日）。

⁷¹ National Cyber Security Centre, 2023, Next steps in preparing for post-quantum cryptography, <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/next-steps-preparing-for-post-quantum-cryptography>,（閲覧日：2024 年 9 月 1 日）。

れなければならないことを認識しており、したがって、単独での信頼を推奨していない⁷²。

ドイツ連邦情報セキュリティ局がとっているアプローチ⁷³は、QKD に関するプロジェクトを支援し、関連するセキュリティ問題に積極的に取り組んでいるという点で、より積極的なアプローチの例として挙げられ、機密性の高い応用に対する信頼を構築するための作業が必要であることを示唆している。NCSC の現在の立場が大幅に変わる可能性は低いものの、NCSC は引き続き動向をモニタリングしている。また、NCSC が原則に基づく保証（PBA）アプローチに移行し、普遍的なリスクベースの手法を提供していることも関連している。このアプローチは、量子通信技術の開発と評価を導くものであり、イノベーションを促進しながら、セキュリティの原則を確実に満たすことができる。

量子標準パイロットネットワークの立ち上げは、量子通信システム向けの標準化されたインターフェースの開発、相互運用性の促進、量子技術の採用拡大に向けた歓迎すべき一歩である。このパイロットは、NCSC の PBA アプローチに沿ったものであり、量子標準開発への各国の関与を調整し、異なる組織間の責任の分散に対処する上で重要な役割を果たす可能性がある。

自己認証ではなく、量子通信の複雑性により、よりロバストな検証アプローチが求められる。QKD と PQC 技術の有効性と安全性に関する現在進行中の議論は、これらの検証アプローチの形成において重要な役割を果たしており、量子通信技術の評価基準と原則を決定する。ドイツと日本の認証機関が潜在的な手段として浮上しているが、その作業の規模から、そのプロセスには業界主導のアプローチが必要となる。

NPL との共同で、量子技術の標準化に関する BSI パネルが発足したことは、イギリスの量子セクター⁷⁴全体でより協調的なアプローチを取るための道筋となるが、これが量子通信を独立した製品カテゴリーとして扱うものになるのか（我々の提言通り、セクション 4.1 を参照）、あるいは量子プラットフォーム全体をカバーしようとするものになるのかは明らかではない。量子通信やその他の技術分野の関係者の中には、同様の意図を持つ他のフォーラムが量子コンピュー

⁷² Quantum Communications Hub, 2020, Community Response to the NCSC 2020 Quantum Security Technologies White Paper, <https://www.quantumcommshub.net/news/community-response-to-the-ncsc-2020-quantum-security-technologies-white-paper/?site=industry-government-media>, (閲覧日：2024年9月1日)。

⁷³ Federal Office for Information Security, Germany, 2022, Quantum Cryptography, https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Quantentechnologien-und-Post-Quanten-Kryptografie/Quantenkryptografie/quantenkryptografie_node.html, (閲覧日：2024年9月1日)。

⁷⁴ 詳しくは以下を参照。 <https://www.bsigroup.com/en-GB/insights-and-media/media-centre/press-releases/2024/january/uk-chosen-to-drive-global-standardization-around-quantum-technologies/>, (閲覧日：2024年9月1日)。

ィングに焦点を絞る可能性がある」と指摘する者もいる。これも重要ではあるが、量子通信の標準規格については、具体的な議論を行うべきである。

ステークホルダーは、オンライン安全法（2023年10月に国王裁可）についても懸念を表明している。この法律は、インターネットサービスプロバイダ（ISP）が提供する暗号化へのアクセスを義務付けるものであると理解されている。イギリスのプロバイダは、エンドツーエンドのセキュリティをユーザーに提供できなくなる可能性があり、イギリスのISPや安全な通信技術のプロバイダに影響を及ぼす可能性があるという見解である。量子技術の場合、このようなアクセス方法では、その技術の科学的原理に反することになる。この法律の導入には正当な理由があるものの、Ofcomに付与される権限がどのように行使されるかについては懸念がある。立法者と量子通信業界の間でさらなる議論が必要である。

提言 11

イギリスの量子標準パイロットネットワークは、特に相互運用性標準やテスト・検証方法を含め、量子通信の標準化に向けた世界的に整合のとれたアプローチに貢献すべきである。特に注目すべき分野としては、量子通信におけるデータセキュリティが挙げられる。

提言 12

NCSC が QKD のセキュリティ上の利点について懸念を抱いていること、また業界が潜在的な価値と需要を見出していることを踏まえ、DSIT（科学イノベーション技術省）、NCSC、およびその他の量子技術関係者は、イギリスの QKD 研究開発におけるリーダーシップが不注意により損なわれることがないように協力すべきである。これを達成するために行うべきことは以下の通りである。

- A)** DSIT は、NCSC と量子技術の関係者との間で継続している対話をさらに拡大し、この立場を定期的に見直し続け、進化する技術とセキュリティの状況に適合させるべきである。
- B)** 技術が発展するにつれ、BSI と NPL は、主要なステークホルダーおよび NCSC と協力し、QKD が信頼される技術として認められるために必要な標準および保証を開発し続けるべきである。DSIT は、責任あるイノベーション（RI）の実践に沿って、この調整を促進する手助けをすべきである。

提言 13

DSIT は、オンライン安全法が意図せず量子製品開発を制限してしまわないよう、政府と量子通信の専門家との対話を促すべきである。可能であれば、量子セキュリティの原則を損なうことなく、同法への準拠を確保するための明確なガイドラインの提供も含まれるべきである。

5.3. 量子コンピューティング

5.3.1. 技術成熟度

量子コンピューティングの応用の中には、技術デモ段階にあるものもあるが、すでに製品が商業的に入手可能な「ノイズあり中規模量子 (Noisy Intermediate-Scale Quantum; NISQ) 時代」と呼ばれる時代においては、プロセッサは開発されているものの、まだ汎用的な誤り耐性は備えていない。古典的技術と量子技術の要素を組み合わせたハイブリッドコンピューターは、現在市場に出回っているか、あるいは近い将来に市場に出回る可能性が高く、古典的機能と量子機能が共存する可能性を示す一例である。一部の商用システムはすでに利用可能であり、人工的な問題では古典的コンピュータを上回る性能を示す兆しを見せているが、「優位性」や「実用性」（古典的アプローチでは困難な現実の問題の解決）を備えた量子システムはまだ開発段階にあり、市場での実用化は5年から20年後と予測されている。

量子コンピュータの将来のアルゴリズムは、特定のタスクの処理速度を飛躍的に向上させることが期待されている。たとえば、創薬の分野では、量子コンピュータは分子の量子挙動をシミュレートすることが可能であり、これは従来のコンピュータでは非現実的なタスクである。また、金融サービス業界では現在、ポートフォリオの最適化や市場予測などのタスクに量子ソリューションを適用することを検討している。自動車、化学、素材、ヘルスケアの各業界も、量子コンピューティングの進歩から多大な恩恵を受ける可能性があるという見方もある⁷⁵。

暗号セキュリティにおける大きな課題は、既存の公開鍵暗号 (PKC) の手法の基盤となっている数学的問題を、大型の汎用量子コンピュータを使用して解くことができる可能性である。この問題に対処するには、従来の計算機攻撃や量子計算機攻撃に耐性を持つと考えられている PQC (量子計算機暗号) へのアルゴリズムの移行が必要となる。これらのアルゴリズムのさらなる開発、その後の実装、移行のタイムラインと、「今収集して後で解読 (harvest now, decrypt later)」という考え方を併せ考えると、この分野には細心の注意が必要である⁷⁶。

量子最適化やその他の量子コンピューティング関連のイノベーションが、アーリーアダプターに不均衡な利益をもたらす画期的なソリューションを提供することは避けられないが、望ましい

⁷⁵ McKinsey Digital, 2023, McKinsey Technology Trends Outlook 2023, <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-top-trends-in-tech#tech-talent-dynamics>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

⁷⁶ National Cyber Security Centre, 2023, Next steps in preparing for post-quantum cryptography, <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/next-steps-preparing-for-post-quantum-cryptography>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

オープンで競争的なイノベーションのエコシステムを維持するには、慎重な政策とガバナンスの対応が必要となる。暗号化への影響は予測されており、緩和策も開発中であるが、以下で議論するように、量子コンピューティングの将来の能力の正確な性質と範囲はまだ完全に理解されていない。そのため、ガバナンスの決定はアジャイルかつ適応的であるべきであり、規制当局は常にオープンな姿勢で、進展を注意深くモニタリングする必要がある。デルフト工科大学の QuTech は、量子コンピューティングのガバナンスは、RI 原則の企業社会的責任の要素であるセキュリティ、安全性、回復力、信頼、プライバシー、平等なアクセス、ネット中立性⁷⁷などの公共の価値を優先すべきであると提言している。

5.3.2. 市場成熟度

企業は、現在のところ主に研究コミュニティを対象としているものの、将来的にはより幅広い商業的応用が期待される量子システムを発表している。イギリスの ORCA Computing や Oxford Quantum Circuits などの企業は、すでに量子コンピュータを販売しており、政府や産業界の顧客と直接協力しながら、現実世界での応用を模索している。同様に、量子ソフトウェア企業は、創薬や複雑な最適化問題の解決に向けた量子アルゴリズムの研究を進めている。

量子コンピューティングは、大きな注目を集めている。そのため、量子コンピューティングの能力を過大評価し、あらゆる計算上の課題に対する万能薬と見なすか、あるいはその真の可能性と将来の使用事例を誤解するかのいずれかに至る可能性がある。こうした理解のギャップは、一般市民やステークホルダーに対するより良い教育の必要性を生み出している。その一例が、IBM の「Qiskit」プラットフォームである。これは量子研究のためのツールを提供するとともに、量子コンピューティングの謎を解明することを目的とした教育リソースも提供している⁷⁸。

5.3.3. 既存の規制上の課題

量子コンピューティングに関連して特定された既存の規制上の課題のほとんどは、広く使用されている RSA アルゴリズムを含め、前述の量子通信に関して指摘されたものと同様に、既存の暗号システムの脆弱性に関連している。「今収集して後で解読」という手法を採用する潜在的な敵対者は、今日暗号化されたデータを保存し、将来的に量子コンピュータを使用してそれを復号

⁷⁷ 詳しくは以下を参照。<https://www.tudelft.nl/over-tu-delft/strategie/vision-teams/quantum-internet/impact-governance/governance>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

⁷⁸ 詳しくは以下を参照。<https://www.ibm.com/quantum/qiskit>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

する計画を立てている可能性があり、PQC への移行に向けた準備を開始する必要性を強調している⁷⁹。この移行は慎重に計画し、管理しなければならない。ETSI 標準および作業グループの設立は、正しい方向への一歩である。

米国では、NISTが国際的な取り組みの一環として標準化されたアルゴリズムを開発するなど、PQCの基盤整備に積極的に取り組んでいる⁸⁰。2022年に可決された米国量子コンピューティンググサイバーセキュリティ準備法は、「連邦政府機関が量子コンピューティング攻撃から保護する技術を採用する」ことを奨励している⁸¹。イギリスがこの法律をモデルとして採用することも考えられるが、当面の懸念事項と長期的な影響の両方を考慮した慎重な検討が必要である。

量子技術が進化するにつれ、たとえば光デバイスと量子デバイスの区別など、分類体系を明確化する必要性が生じている。分類の誤りや誤った表現は、業界の投資を歪めたり、ステークホルダーを誤解させる可能性がある。そのため、ISO/IECのような一貫性のある量子用語の開発を目指す国際的な取り組みの重要性が強調されている。

競争や商業的独占が反競争的行動につながるのではないかという懸念(セクション4.10参照)は、先行者利益が予想される量子コンピューティングに特に当てはまる。反競争的行為の防止を担当する競争市場庁(Competition and Markets Authority: CMA)のような機関は、量子技術の進歩が市場力学をどのように再形成しうるかについて認識しておく必要がある。初期のマシンの仕様は限定的に見えるかもしれないが、一部の問題の規模があまりにも大きいことから、量子技術のアーリーアダプターには相当な優位性がもたらされる可能性がある。これは、公平かつ公正なアクセスを確保することに関する懸念と関連する問題である。こうした複雑性とコストを考慮すると、量子コンピュータへのアクセスは、おそらくは大手テクノロジー企業を通じて行われることになるだろう。こうした独占は、アクセスを制限し、イノベーションを阻害し、倫理的・経済的な問題を引き起こす可能性がある。したがって、量子リソースへのアクセスを民主化するには、オープンソースの量子イニシアティブや官民パートナーシップが重要となる。

⁷⁹ PQCは量子アプローチそのもの(たとえばQKD)というよりも、量子コンピュータへの古典的なアプローチであることに注目すべきである。

⁸⁰ 詳しくは以下を参照。<https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-announces-first-four-quantum-resistant-cryptographic-algorithms>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

⁸¹ Congress, United States of America, 2022, Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act, <https://www.hsgac.senate.gov/wp-content/uploads/imo/media/doc/Quantum%20Computing%20Cybersecurity%20Preparedness%20Act.pdf>, (閲覧日: 2024年9月1日)。

量子コンピュータが拡張されるにつれ、エネルギー効率を維持し、さらに向上させる必要性が生じるだろう。現在の軌跡から判断すると、量子コンピュータは国連の持続可能な開発目標(SDGs)に沿ったものにはならない可能性がある。ただし、これに反する意見もある⁸²。持続可能性の制約は必ずしもイノベーションを妨げるものではないが、特にコンピュータなどの量子技術の今後の軌跡を描く上で、ライフサイクル分析(LCA)の必要性が浮き彫りになっている。

同時に、特にAIを伴う量子システム(同様の課題にも対応する)は、確率的な量子アルゴリズムに基づく意思決定により、説明が困難、あるいは不可能なアウトプットにつながる可能性がある。これは、たとえば量子機械学習アルゴリズムが医療に関する提言を行う場合など、重大な影響を及ぼす可能性がある。これらのアルゴリズムがどのように結論に達するのかを明確に理解できなければ、それらに対する信頼を育むことは、規制の策定や普及率の向上にとって課題となる。これを緩和するために、複雑なアルゴリズムの結果を人間にとってより理解しやすいものにするを目的とした「説明可能なAI(XAI)」システムの開発がますます重視されるようになっている。量子領域では、XAIの原則を統合することで、量子機械学習の透明性と信頼性を高めることができる。また、特に医療のようなセンシティブな分野では、量子アルゴリズムによって下された重要な決定を、人間の専門家がレビューまたは確認する監視メカニズムを導入するというアプローチも考えられる。これらの慣行を確立することは、量子機械学習の信頼性と安全性を確保しながら、一般の人々の信頼を維持し、より広範な導入を促進する規制フレームワークの開発に役立つ。

量子コンピューティングの開発を巡る不確実性を考慮しても、今後5年から20年の間に多くの画期的なイノベーションが生まれる可能性が高いと期待するのは妥当である。これらの未来のイノベーションの本質と力は、今日の量子イノベーションの軌跡に沿った初期段階のガバナンスをどれだけうまく管理できるかによって決まる。これは、規制当局、標準化団体、政策立案者が直面する責任の度合いを強調している。

⁸² techUK, 2021, Could Quantum Computing hold the key to sustainability?, <https://www.techuk.org/resource/could-quantum-computing-hold-the-key-to-sustainability.html>, (閲覧日: 2024年9月1日) .

提言 14

量子コンピューティングおよび関連アプリケーションは、経済、社会、環境に最も大きな影響を与える可能性を秘めた、最も変革的な量子関連技術である。この分野において、比例的かつ適応的で、バランスがとれており、責任ある原則を採用することが最も重要となる(セクション 3.2)。現段階では、将来の技術および市場の発展に対する注意深い監視と結びついた標準や指針、そして責任あるイノベーション (RI) の実践に基づく規制フレームワークが必要である。

- A)** 量子コンピューティングに関しては、潜在的な利益と弊害についてより明確になるまでは、早急に法規制を導入することは避け、その代わりに標準や指針に頼ることが重要である。DSIT (科学イノベーション技術省) は、BSI、NQCC、NPL、および産業界と協力し、量子コンピューティングに関する国内および国際的な標準を策定するために、どのような標準化が短期的に最も適切であるかを検討すべきである。
- B)** 量子コンピューティングの胎生期にあることを認識し、DSIT は産業界と協力して、その規制フレームワーク(セクション 3.1.1 で説明されている)内で、責任あるイノベーション (RI) の実践を確立し、量子コンピューティングと暗号化のための特定のコンポーネントをそのフレームワーク内に含めるべきである。これにより、現在および将来のリスクを軽減し、この技術に対する国民の信頼を促すことができる。

付録

付録 A：方法論

RHC は提言をまとめるにあたり、以下のプロセスを踏んだ。

1. 量子技術の中でも最も価値をもたらす分野を決定するためのスコーピングプロセスを設けた。DSIT(科学イノベーション技術省)の量子政策チーム(現在は量子室と呼ばれる)や、あるいはデジタル規制協力フォーラム(DRCF)や Innovate UK といった近いステークホルダーと協議を重ね、開発・改善した。
2. エビデンスを収集するフェーズの一環として、インタビュー、座談会、オンライン調査を通じて、広範囲にわたってステークホルダーを巻き込んだ。これには、規制当局や学界、政府、イノベーション・研究機関のほか、商業、産業、国際パートナー・団体が含まれる。一覧は付録 E を参照のこと。
3. ステークホルダーの関与(巻き込み)と並行して、とりわけ量子技術に関する情報源について、ならびに横断的でイノベーション・フレンドリーな規制に関する情報源についても、机上調査を通じて情報収集を行った。特に、イギリスや国際的な量子規制の現状について、RHC に代わって調査を実施したインペリアル・ポリシー・フォーラムチームに感謝したい。
4. レポートの初期版のドラフト作成後、ステークホルダーとさらなる協議を行い、調査結果と提言をテストした。さらに、主要なステークホルダーからのフィードバックを基に、提言を反復プロセスでより発展させた。

付録 B：用語

- **量子技術⁸³：**
古典的なシステムでは不可能な機能を提供する、量子力学に基づくデバイスやシステム。
- **量子通信⁸⁴：**
量子力学の特性を利用した情報伝達。具体的には、以下のような特性を利用している。重ね合わせ、もつれ、単一光子技術や共役変数技術を活用した情報伝達、量子状態や量子状態情報を配送するための通信ネットワーク(量子であるか否かを問わない)の利用、あるいは量子物理プロセスを用いた暗号鍵の確立や証明可能なランダムな数値の生成。
- **量子コンピューティング⁸⁵：**
量子力学の特定の性質、とりわけ重ね合わせやもつれを利用するシステムが、情報の取得・エンコード・操作・処理を行い、アルゴリズムを実行したり、あるいはデータに対する操作や測定を行ったりすることを、シミュレーションあるいは実現すること。これには以下が含まれる。これには、アルゴリズム・アプリケーション・ソフトウェア・エラー訂正・ノイズ低減・オペレーティングシステムなど、システムの機能を実現する要素が含まれる。また、量子情報処理・コンピューティング・シミュレーションのクラウドベースサービスへの第三者によるアクセスのホスティング・提供も含まれる。
- **量子イメージング⁸⁶：**
量子力学の位相または振幅特性、具体的には重ね合わせやもつれ、またはサブポアソン光源や光子検出器を活用して、物体の画像を作成する。

⁸³ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, The UK Science and Technology Framework, <https://www.gov.uk/government/publications/uk-science-and-technology-framework>, (閲覧日：2024年9月1日)。

⁸⁴ Cabinet Office, 2021, National Security and Investment (NSI) Act 2021, https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2021/25/pdfs/ukpga_20210025_en.pdf, (閲覧日：2024年9月1日)。

⁸⁵ 注 70 を参照。

⁸⁶ 注 70 を参照。

■ **量子センシング⁸⁷** :

量子力学の位相特性、具体的には原子やイオン、原子スピン系の測定を利用することで、物体の特性やその変化率、あるいは測定可能な量に物体が及ぼす影響を決定する。

■ **量子タイミング⁸⁸** :

量子力学の位相特性、具体的には原子やイオン、原子ガスの測定、あるいは安定周波数ミキサーや光学・マイクロ波源、水晶発振器、周波数コムなどの関連ハードウェアの応用を利用することで、タイミングや同期信号、あるいは周波数基準を提供する。

⁸⁷ 注 70 を参照。

⁸⁸ 注 70 を参照。

付録 C : 図表

図 2 BSI PAS 440 責任あるイノベーションのフレームワーク⁸⁹

1. ID#	2. RI の要素 : イノベーションのポジティブ/ネガティブな結果を特定する	3. ベースライン評価に要素を含めた理由を記録し (7.3 項参照)、RIF の前の反復 (8.2 項参照) 以降の要素の変更を記録する	4. ステークホルダーを特定し (7.4 項参照)、巻き込む (8.3 項参照)	5. 行動する (7.5 項と 8.4 項参照)
1. x	社会的要素 (利益)			
2. x	社会的要素 (リスク)			
3. x	環境的要素 (利益)			
4. x	環境的要素 (リスク)			
5. x	健康関連要素 (利益)			
6. x	健康関連要素 (リスク)			
7. x	バリューチェーン要素 (他の重要なアクターによる RI 行動)			
8. x	規制要素			

⁸⁹ British Standards Institution (BSI), 2020, PAS 440, Responsible innovation – Guide, <https://pages.bsigroup.com/1/35972/2020-03-17/2cgenc1>, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

図3 量子規制について出版物で提案された既存の「原則」の例（と、量子に特化して設計されたわけではないものの関連するいくつかの例）

情報源	原則
イギリス国家量子戦略 ⁹⁰ （2023年）	<ul style="list-style-type: none"> ● 安定しており、整合的で、予測可能性である ● 技術開発に迅速に対応できる程度にアジャイルである ● 理解が容易で、実装が高価でない ● 可能な範囲で産業界と共同設計されている ● イノベーションと産業界のニーズに焦点を当てている ● 量子技術の透明で倫理的な使用を推進する
量子コンピューティング・ガバナンス原則 ⁹¹ （2022年）	<ul style="list-style-type: none"> ● 共通善：人類の利益を確保するために活かされる能力 ● アカウントビリティ：設計・利用・成果において、人間がアカウントビリティを果たせるよう保証する ● 包摂性：幅広く多様なステークホルダーの視点が、有意義な対話に参与している ● 分配均衡性（Equitability）：量子コンピュータがバイ・デザインで公平である ● 非加害：安全かつ倫理的で責任ある方法で量子コンピューティングが使用されている
責任ある量子イノベーションのための10原則 ⁹² （2023年）	<ul style="list-style-type: none"> ● 情報セキュリティ：情報セキュリティを量子技術の不可欠な要素にする ● デュアルユース：量子応用の悪用をプロアクティブに予測する ● 量子における競争：共有された価値観に基づいた国際的な協働を模索する ● 量子ギャップ：量子技術が機能すべき社会技術的な環境として地球をみなす

⁹⁰ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National quantum strategy, <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>,（閲覧日：2024年9月1日）。

⁹¹ World Economic Forum, 2022, Quantum Computing Governance Principles, <https://www.weforum.org/publications/quantum-computing-governance-principles/>,（閲覧日：2024年9月1日）。

⁹² Mauritz Kop and others, 2023, 10 Principles for Responsible Quantum Innovation, <https://law.stanford.edu/publications/10-principles-for-responsible-quantum-innovation/>,（閲覧日：2024年9月1日）。

	<ul style="list-style-type: none"> ● 知的財産：可能な限りオープンであり必要な限りクローズドであることを維持しながら、イノベーションを推進する ● 包摂性：分野と人材の観点から多様な研究開発コミュニティを追求する ● 社会との関連性：量子技術の研究開発を望ましい社会的目標と明示的に結びつける。 ● 補完的なイノベーション：持続可能で分野越境的なイノベーションを積極的に促す ● 責任：量子技術の応用について、ありうる利用と結果について学ぶためのエコシステムを構築する ● 教育と対話：ステークホルダーとともに、量子技術の未来をより明確に描くような対話をファシリテートする
<p>AI 規制に対するイノベーション推進のアプローチ⁹³ (2023 年)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 安全性、セキュリティ、ロバスト性 ● 適切な透明性と説明可能性 ● 機会均等性 (Fairness) ● アカウンタビリティとガバナンス ● 競争可能性と救済措置
<p>ギャップを埋める：イノベーション・フレンドリーな規制の原則から実践へ⁹⁴ (2022 年)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 相応の配慮をし、潜在的な利益とリスクのバランスをとる ● 倫理的配慮と、市民・関連ステークホルダーとの対話から得られた結果を統合する ● 商業的配慮と投資を呼び込む必要性を考慮に入れる ● 規制の代替形態を盛り込む ● タイミングを適切に見極める ● オープン性と成長志向のマインドセットを醸成する

⁹³ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, A pro-innovation approach to AI regulation, <https://www.gov.uk/government/publications/ai-regulation-a-pro-innovation-approach/white-paper>, (閲覧日：2024 年 9 月 1 日) .

⁹⁴ Regulatory Horizons Council, 2022, Closing the gap: getting from principles to practice for innovation friendly regulation, <https://www.gov.uk/government/publications/closing-the-gap-getting-from-principles-to-practice-for-innovation-friendly-regulation>, (閲覧日：2024 年 9 月 1 日) .

付録 D：国際比較

イギリスの国家量子戦略の目標のひとつは、「イノベーションと量子技術の倫理的な利用を支援し、イギリスの能力と国家安全保障を保護する国家的・国際的な規制フレームワークを構築する」ことである。本レビューは、この目標の達成に役立つことを企図して作成されている。そのため、量子技術に関する標準や規制について、特定諸国が現在採用しているアプローチをレビューすることが重要であった。これにより、重要な分野や協働の方法を浮き彫りにできるとともに、規制が量子技術の市場を活性化させる（あるいは阻害する）要因となりうることを学ぶことができる。

規制に関する国際比較

イギリスをはじめ、アメリカ、カナダ、中国、日本、インド、ロシア、オーストラリア、オランダ、デンマークなど、今では多数の国々が国家量子戦略を発表している。これらは、規制、標準、責任あるイノベーション（RI）のそれぞれに異なった重点を置いている。各国の戦略はその国独自の優先事項やリソースを反映しており、規制がどれだけ成熟しているかや量子技術への力の入れ方の違いが表れている。

アメリカ

アメリカは最近、量子技術に関連するいくつかの法案に署名し、法律化した。CHIPS and Science Act（2022年）は、製造やサプライチェーンの強化、研究開発や未来の労働力への投資、そしてそして重要な標準の策定と取り組みを承認し、量子技術を含む産業におけるアメリカのリーダーシップを維持することを目的としている。量子コンピューティング・サイバーセキュリティ準備法（2022年）は、行政機関のITシステムのポスト量子暗号（PQC）への移行を検討している。この法律は、ポスト量子暗号の進歩による安全強化を目的として、連邦機関によるポスト量子暗号ITシステムの導入とそれへの移行を優先している。このアプローチは、既存のサイバーセキュリティのパラダイムを破壊する可能性を持つ量子技術を認識し、安全な技術の未来を育むための意図的な転換を強調している。

アメリカ国家標準戦略2023は、国際標準におけるプレゼンスと影響力を維持・拡大することを目指しており、特に量子技術を重点分野として強調している。この戦略的な位置づけは、将来のグローバルな量子エコシステムを形成し、量子技術を支える標準を定義する上でアメリカがリーダーシップを維持していく上で重要な要素である。NISTはすでに、PQC標準化アルゴリズムに関する作業を進めている。さらに、2020年の大統領令では、アメリカの航空当局が2025年までにグローバルナビゲーション衛星システムのタイミングとは独立に、代わりにの時刻信号源を用意することを義務づけている。これは、量子タイミング技術のイノベーションを支援するもので

ある。これは、重要なインフラにおける潜在的な脆弱性に対する回復力を強化するためのアメリカの積極的な対策を物語っている。最後に、NIST と NSA は、量子鍵配送(QKD)に関して NCSC と似た立場を採っている⁹⁵。QKD に関するこの立場は、セクション 5.2 でより詳細に検討されている。

欧州連合 (EU)

2020 年、欧州量子フラッグシップは戦略研究アジェンダを発表し、標準化の重要性を強調した。ETSI と CEN-CENELEC は、量子技術の標準化に向けた開発分野を継続的に進めている。しかし、量子技術の商業展開を妨げるのではなく、それを可能にすることを担保するためには、こうした取り組みが業界のニーズやイノベーションのトレンドとしっかりと足踏みを揃えていることが極めて重要である。

欧州委員会の「量子技術の ICT 標準化に関するローリングプラン」(2023 年)では、ギャップ分析を通じてどの応用にどの標準が必要かを特定し、ロードマップを策定することに関するいくつかの行動が求められている。このロードマップでは、急速に進化する量子技術の状況に適応できるような、柔軟でロバストな標準の開発を優先する方針である。

2020 年、EU の「デジタルの 10 年」におけるサイバーセキュリティ戦略では、量子計算・通信が優先事項として含まれ、アメリカと同様に、通信のための量子耐性暗号プロトコルの実現を目指している。これらのイニシアティブは、量子技術の将来的な影響を考慮した、サイバーセキュリティへの統合的なアプローチを反映している。EU はまた、量子産業が大きく依存する半導体産業のサプライチェーンの保護にも重点を置いており(ハードウェア・プラットフォームに関係なく)、欧州チップ法 2023 は加盟国にサプライチェーンの混乱を回避するよう提言し、そのための仕組みを導入している。

オランダ

オランダは、国家量子アジェンダを実施することで、オランダ国内における量子技術開発を加速させることを目的とした「Quantum Delta NL Foundation (QDNL)」を設立した。開発と中小企業の統合に焦点を絞ったこのローカルな取り組みは非常に重要であり、量子革命が経済の幅広い領域に恩恵をもたらすことを約束してくれる。Quantum Delta NL の中小企業プログラムは、

⁹⁵ National Security Agency, 2021, Quantum Computing and Post-Quantum Cryptography FAQs, https://media.defense.gov/2021/Aug/04/2002821837/-1/-1/1/Quantum_FAQs_20210804.PDF, (閲覧日: 2024 年 9 月 1 日) .

125社にわたるハイテク・複合領域的な国内中小企業を、その企業が最も必要としている量子技術の舞台と結びつけることを目的としてきた。また、量子経済が成長するにつれ、将来の展開を予測し、潜在的な依存関係を早期に警告するモニタリングシステムを整備することが重要だとも強調している。

カナダ

カナダの国家戦略は標準化に重点を置いており、とりわけ国際的なものに重点を置いている。国家戦略では「カナダは、共同研究を促進し、国内産業の将来の可能性を切り開くべく、相互にとって有益な国際標準規格の開発において主導的な役割を果たす必要がある」と述べられており、社会科学・人文科学研究協議会（SSHRC）が量子技術の社会的・倫理的考察に関する研究に資金提供し、カナダがこの点に関する観点を提示できる可能性を示唆している。倫理と社会への重点的な取り組みは、量子技術の多面的な影響と、そのガバナンスに対する包摂的なアプローチの必要性を強調している。

カナダ標準審議会は、「カナダのビジネスと社会に利益をもたらす仕方で、量子応用を統合し採用するための政策や規制の策定」を含む標準化を支援し、これを達成するために国際的なプレゼンスを確保する必要性を強調した。提言9で強調されているように、イギリスも同様に、自国の国益を保護し、促進していくことを確実にすべく、こうした国際フォーラムに参加することが不可欠である。他にも、政府のシステムとデータを保護する上で、標準化されたPQCの使用が重要であることをカナダは強調している。

オーストラリア

オーストラリア国家戦略では、「国家の利益を支える基準とフレームワーク」を主要テーマとして強調している。そこでは、オーストラリア政府は「国際的な標準策定団体に積極的に参加し、標準の整備を促進する[...]。オーストラリアの規制フレームワークが、オーストラリアの国益を守りながらも、同時に量子関連の研究を促進し、量子関連企業への投資を支援し、輸出を支援する」ことを目指している。オーストラリア政府は、「強力な保護を提供し、公正な競争を確保し、国益を支援し、市場の整合性を促進する」ような規制環境を求めている。こうした国際的な標準策定への積極的な関与は、特に国益の促進とグローバルな協働とのバランスをとるという点において、イギリスが見習うべき模範となりうるだろう。

デンマーク

2020年、デンマーク標準協会は、欧州での取り組みにおけるデンマークの影響力を確保するために、量子標準化に関する委員会を設立した。イギリスも同様のアプローチから得るところが

大きいだろう。イギリスの標準開発が国内にとってのみ有益となるのではなく、欧州のフォーラムに対しても影響力を持つようにするのだ。

韓国

韓国は、量子科学技術研究の開発に関する戦略計画（これによると、量子応用の実現可能性を証明し、成功事例を創出できる）の「応用」段階（2025年～2030年）にある。実世界での展開と市場の準備を重視する韓国の応用重視戦略から、イギリスは貴重な洞察を得ることができる。韓国は、「量子鍵配送（QKD）」を含む「量子情報通信技術の開発および産業化の促進に関する法律」を施行した。この法律は、量子コンピュータ、量子通信、暗号、計測などを含む量子技術の開発ロードマップの策定を目的としている。また、量子ソリューションの採用に向けたタイムラインも定め、2020年までには政府ネットワークに、2025年までにはすべての商業ネットワークに量子暗号を導入することを求めている。これにより、韓国は量子暗号の早期導入国として位置づけられることになる。イギリスは、とりわけ量子技術を既存のインフラや市場に統合するという観点において、量子産業を支援する韓国の立法措置を注視し、必要に応じてそこから学ぶべきである。

こうした国際的な取り組みは、イギリスにとって貴重な教訓とモデルとなる。イギリスは、他国の成功例や課題を検証することで、成長する量子産業を支援し規制するためのアプローチを洗練させることができる。さらに、国際的な標準策定や政策立案に積極的に参加することは、イギリスが量子技術におけるグローバルリーダーとしての地位を確保するためには不可欠である。

公的・民間資金の国際比較

イギリスは現在、量子技術全般において非常に有利な立場にあり、量子コンピューティング、PQC、通信、センサーの分野で高い評価を得ている⁹⁶。イギリスには世界をリードする量子コンピューティング企業はないものの、経済に価値をもたらすバリューチェーンにおいて戦略的に重要な企業は複数存在する。多様性は重要だが、特定の企業にとっては戦略的集中や規模の拡大を犠牲にすることにもなりかねない。他の一部の国には、より変革的ではあるものの未だ発展途上にある技術と比較すると商業化に近いといった理由で、センシングなどのより短期間で実用化できる量子技術に公的投資を集中させることを選択している国もある。イギリスがこのアプローチを採用する場合には、変革的技術への投資を継続しながら、同時に市場成熟度が高まった技術も活用していく、というようにポートフォリオのバランスをとる必要がある。

さらに、国際的な同業者間では、資金調達のアプローチや規模に著しい違いがあり、より積極的な戦略やイニシアティブがとられていることもある。たとえば、DAPRA がそうだ。以下に、資金調達やイニシアティブの例をいくつか挙げる。

米国

政府資金：「国家量子イニシアティブ法により、エネルギー省、全米科学財団、国立標準技術研究所に総額 12 億 7500 万米ドルまでの支出が承認された。ホワイトハウスの科学技術政策局（OSTP）によると、2020 年度には、量子情報科学の研究に対して 5 億 7900 万ドルの資金が連邦政府によって制定された」⁹⁷。この多額の投資は、量子分野における主導的地位の確立を目指す米国政府の取り組みを象徴している。

EU

欧州ハイパフォーマンス・コンピューティング共同事業（EuroHPC JU）イニシアティブの総資金は、2021 年から 2027 年までの期間で 70 億ユーロに上る⁹⁸。その目的は、量子機能を含む

⁹⁶ Department for Science, Innovation and Technology, 2023, National Quantum Strategy, Additional Evidence, <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6572db4433b7f20012b720b7/national-quantum-strategy-additional-evidence-annex.pdf>, (閲覧日：2024 年 9 月 1 日)。

⁹⁷ Johnny Kung and Muriam Fancy, CIFAR, 2021, A Quantum Revolution, Report on Global Policies for Quantum Technology, <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/05/QuantumReport-EN-May2021.pdf>, (閲覧日：2024 年 9 月 1 日)。

⁹⁸ 詳しくは以下を参照。 https://eurohpc-ju.europa.eu/index_en, (閲覧日：2024 年 9 月 1 日)。

新しいインフラの下で、スーパーコンピュータのネットワークを構築することである。EU が量子技術をスーパーコンピューティングインフラに統合することにコミットしていることは、科学的なコンピューティング能力の強化を目指す先進的なアプローチを示している。

オランダ

オランダは、Quantum Delta NL Foundation (QDNL) を設立した。その一部には中小企業プログラムが含まれている。これは、量子技術ロードマップに沿った製品やサービスの開発を目的とした研究開発プロジェクトを対象に、助成金という形で年間 500 万ユーロの予算が用意されている。このイニシアティブは包括的なアプローチを反映しており、小規模なイノベーターが量子エコシステムに貢献し、その恩恵を受ける機会を確保している。これにより、中小企業は国内および欧州レベルでの量子技術ロードマップに貢献できることになる。QDNL の 1500 万ユーロのファンドは、「量子研究の助成金支給段階とベンチャー投資の『長期投資』段階の橋渡し」を行い、技術的なアイデアを商業化された企業へと変える。また、欧州の量子技術スタートアップのエコシステムを統合し、変革することを目指す「Infinity」もある。

シンガポール

シンガポールの量子工学プログラム (QEP) は、量子能力の向上に実用的なアプローチを採用している。同国は、国家量子コンピューティングハブと国家量子ファブレス・ファウンドリを立ち上げたが、際立っているのは国家量子安全ネットワークである。「リビング・ラボ」として機能し、組織が現実の環境で QKD のような量子安全通信技術の実験を行う機会を提供している。この実践的なアプローチは学習曲線を加速し、イギリスを含む他の国々にとって、ステークホルダーの間で量子技術の実用的な理解を促進するためのモデルとなる可能性がある。

イスラエル

イスラエル政府は、国家量子イニシアティブを通じて、量子技術に多額の公的投資を行っている。2019 年後半に開始されたこの 5 年間のイニシアティブには、12 億 5000 万シェケル（約 4 億ドル）の予算が当てられている。このイニシアティブの資金は、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) パンデミック時のイスラエルの経済刺激策によってさらに強化され、同国初の量子コンピュータの構築に 6000 万ドルが追加で割り当てられた。この多大な財政的コミットメントは、国内における量子技術の進歩に対する政府の貢献を強調している。イスラエルは、量子コンピューティング分野への参入が他国よりも遅れたものの、すでに多額の外国投資を誘致しており、今後 5~6 年以内にこの分野で独自の地位を築くことが期待されている。

付録 E：謝辞

RHC は、量子技術の応用を規制することについて、以下のステークホルダーの意見を収集した。英国国家量子技術プログラム(NQTP)の4つのハブ、techUK、EY、UKQuantum には、座談会のステークホルダーを招集していただき、またインペリアル・カレッジ・ロンドンの政策フォーラムには、その支援と専門知識に感謝したい。

規制当局

- デジタル規制協力フォーラム(DRCF)と、それを構成する以下の組織
 - 競争市場庁(CMA)
 - 金融行動監視機構(FCA)
 - 情報コミッショナー事務局(ICO)
 - 通信局(Ofcom)

政府機関および省庁

- 国防情報局(DI)、国防省(MOD)
- 国防科学技術研究所(DSTL)
- 科学イノベーション技術省(DSIT)
- 国立サイバーセキュリティセンター(NCSC)
- 国立物理研究所(NPL)
- 量子技術局(DSIT)

イノベーションおよび研究機関

- Innovate UK(IUK)
- ナレッジ・トランスファー・ネットワーク(KTN)
- 国立量子コンピューティングセンター(UKRI NQCC)
- QuantIC — 量子強化イメージングにおける英国量子技術ハブ — グラスゴー大学
- 量子通信ハブ — ヨーク大学
- イギリス国立量子コンピューティング・シミュレーションハブ — オックスフォード大学
- イギリス量子技術センサー・タイミングハブ — バーミンガム大学
- オックスフォード大学・責任ある技術研究所

商業・産業

- Anchored In
- Arqit
- BAE システムズ
- イギリス標準協会(BSI)
- 英国テレコム(BT)
- ケンブリッジ・コンサルタンツ
- キャップジェミニ
- セルカ・マグネティクス
- Dwave
- エシカル
- EY
- IBM
- インテル
- ケッツ
- マイクロソフト
- Nu Quantum
- オックスフォード・イオンクス
- フェーズクラフト
- QLM
- Qruise
- Quantum Dice
- Quantum Exponential
- Quix Quantum BV
- RiverLane
- techUK
- Secqai
- 東芝
- UKQuantum

国際パートナー、団体、および学者

- カナダ — カナダ：イノベーション・科学・経済開発省
- デンマーク — デンマーク外務省、デンマーク企業庁
- 欧州電気通信標準化機構(ETSI)
- インペリアル・カレッジ・ロンドン：量子工学・科学・技術センター(QuEST)、およびインペリアル・ポリシー・フォーラム(Elizabeth Pasatembou、Dimitrie Cielecki、Michael Ho、Kuan-Cheng Louis Chen を含む)
- マウリッツ・コップ — スタンフォード大学・責任ある量子技術センターの創設者兼エグゼクティブ・ディレクター

- 米国 — 米国国立標準技術研究所(NIST)

イギリス規制ホライズン委員会：量子技術応用を規制する（日本語訳）

榎本 啄杜

大阪大学 社会技術共創研究センター 特任研究員（常勤）（2024 年 10 月現在）

**UK Regulatory Horizon Councils: ‘Regulating Quantum Technology Applications’
(Japanese translation)**

Takuto Enomoto

Osaka University



大阪大学 社会技術共創研究センター
Research Center on Ethical, Legal and Social Issues

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-8
大阪大学吹田キャンパステクノアライアンス C 棟 6 階
TEL 06-6105-6084
<https://elsi.osaka-u.ac.jp>

