The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 量子技術のELSIを探る ： 文献レビュー |
| Author(s) | 榎本, 啄杜; 長門, 裕介; 岸本, 充生 |
| Citation | ELSI NOTE. 2024, 41, p. 1-40 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/95445 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

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

ELSI NOTE No.41

2024 年 5 月 1 日

# 量子技術のELSIを探る：文献レビュー


## Authors

| | | |
|---|---|---|
| **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4月現在） |
| **長門 裕介** | 大阪大学 社会技術共創研究センター | 特任助教（常勤）（2024年4月現在） |
| **岸本 充生** | 大阪大学 社会技術共創研究センター | センター長（2024年4月現在） |



本ノートの作成は、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との共同研究の一環として行ったものである。


大阪大学

Osaka University
Research Center on
Ethical, Legal and
Social Issues

# 目次

**1. はじめに ..... 3**

**2. 量子技術の ELSI を見据える ..... 5**

2.1. 透明性 ..... 6
2.2. 公平性 ..... 7
2.3. 知的財産 ..... 9
2.4. データ管理 ..... 10
2.5. デュアルユース ..... 11
2.6. 経済と雇用 ..... 12
2.7. 持続可能性 ..... 14
2.8. ミスリーディングな言説 ..... 15

**3. 量子技術の ELSI を紐解く ..... 17**

3.1. レトリック分析 ..... 18
3.2. テクノロジーアセスメント ..... 19

**4. 量子技術の ELSI を手懐ける ..... 23**

4.1. 国際協力 ..... 24
4.2. 規制と規範 ..... 25
4.3. ステークホルダーの参与 ..... 29
4.4. 教育と公共の認識 ..... 31

**5. おわりに ..... 33**

**引用文献リスト ..... 34**

# 1. はじめに

近年、量子技術はその革新的な可能性により、重要な新興技術として注目を集めている。量子コンピューティング、量子通信、量子センシングといった各領域は、従来の技術の限界を超える可能性を秘めており、これらがもたらす変革は、産業、医療、通信、セキュリティなど、多岐にわたる分野に影響を及ぼすことが予想される。一方で、この領域の技術革新は、同時に「倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues）」（以下、 ELSI）を引き起こす可能性を内包している。ELSI への適切な対処は、量子技術の持続可能な発展と健全な社会実装に、すなわち「責任ある研究・イノベーション（Responsible Research and Innovation）」（以下、RRI）にとって不可欠だと言える[1]。

本稿の目的は、量子技術の ELSI に関する主要な論点と、それに関する既存の研究動向を包括的に検討することである。これにより、量子技術の急速な発展がもたらす複雑な問題を、技術的な側面だけでなくより広い視点から理解し、将来の研究の方向性や政策立案に対する新たな洞察を提供することができる。

上記の目的を達成するため、本稿は以下の構成で展開される。まず第 2 節「量子技術の ELSI を見据える」では、量子技術の ELSI として広く認識されている論点[2]を列挙し、論点ごとに先行研究を整理する。これらの論点には、AI などの他の新興技術と共通するものもあれば、量子技術特有の性質により生じる独自のものもある。本稿ではここで見出された課題の解決に繋がるようなアプローチを提示したいわけだが、第 2 節で見出された課題はそれぞれ雑多に取り出されたもので、いわばありのままの素材の段階である。これを上手く扱えるようにするための準備段階として、第 3 節「量子技術の ELSI を紐解く」がある。ここでは、素材を上手く扱うための下処理——本稿では、これを「課題クレンジング」と呼ぶ——の手法が紹介される。この作業を経たのち、第 4 節「量子技術の ELSI を手懐ける」では、第 2 節で見出され第 3 節でクレンジングされ

---

[1] 榎本らが量子技術領域における RRI アプローチについて論じている（榎本ら 2024）。

[2] それぞれの論点は「倫理」「法」「社会」といった ELSI という言葉を構成するそれぞれの切り口に必ずしも落とし込めるわけではなく、ほとんどは横断的な課題である。たとえば、セキュリティに関する課題は倫理的課題であると同時に規制や標準化を必要とする法的課題でもあり、さらには経済や個人の働き方にも影響を及ぼす社会的課題であるとも言える。そのため、本稿では倫理・法・社会という各カテゴリーにこだわらず、「ELSI」という大きなまとまりとして並列的に論点を整理している。

た数々の ELSI を上手く解決できるような、有力なガバナンス手法をいくつか提示する。そして第 5 節「おわりに」では、第 4 節までの議論を踏まえて得られる示唆を提示し、我々が今後とりうる方針を述べることとする。

下図は、上で述べた本稿の方針を図示したものである（図 1）。レビューという性質上、本稿では様々な話題が出てくる。そのため、適宜この図を道案内の地図として参照する。本稿を読む際の参考とされたい。

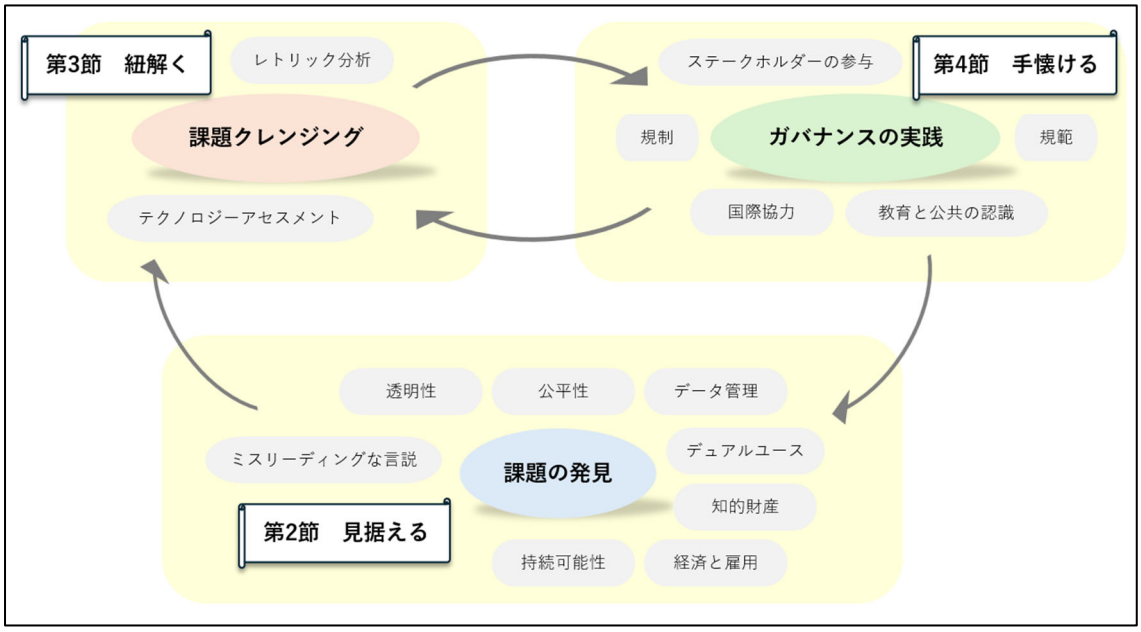


図 1　本稿の見取り図

# 2. 量子技術の ELSI を見据える

第 2 節は「見据える」をテーマとして、量子技術の ELSI として広く認識されている論点を整理する（図 2）。具体的には、透明性（2-1）、公平性（2-2）、知的財産（2-3）、データ管理（2-4）、デュアルユース（2-5）、経済と雇用（2-6）、持続可能性（2-7）、ミスリーディングな言説（2-8）といった論点を順に扱う。ただし、便宜上このようにラベリングしたものの、これらの話題は互いに関連し合っており、排反な関係性ではない。そのため、なるべく各論点の関連性を意識した整理を行う。

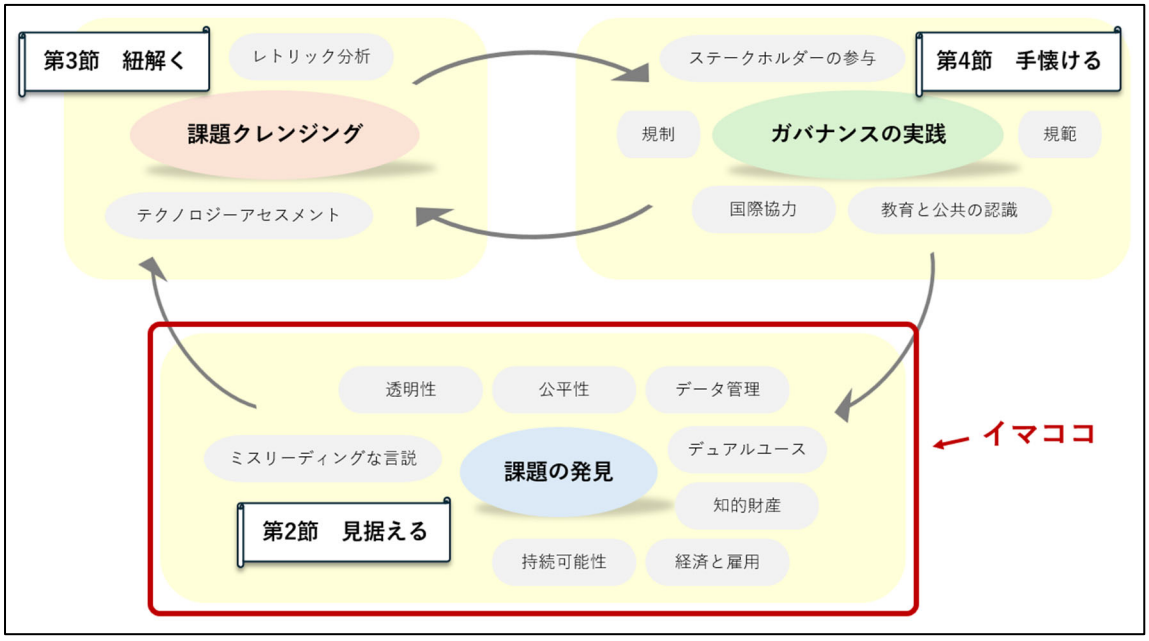


図 2　第 2 節の位置づけ

## 2.1. 透明性

量子技術が提起する第一の論点は、「透明性」である。具体的には、計算プロセスが不透明であることによるブラックボックス化は、深刻な問題を生み出す。計算とは、あるデータの入力に対して、有限回の一連の手続きを行うことによって、ある出力に変換することである。この手続きを外部から追跡することができない場合、一般に「ブラックボックス」に陥っていると言われる。高度に複雑化した古典的な計算においても同様の問題が従来から指摘されているが、多くの論者は、量子技術における不透明性は古典的な計算におけるそれとは異なるレベルにあると考えている。

Perrier や Possati は、量子技術における不透明性は、計算プロセスにおける存在論的な不確実性に由来すると指摘している（Perrier 2022a; Possati 2023）。確かに古典的な計算プロセスであっても複雑さに程度はあり、とりわけ深層ニューラルネットワークのような場合には、もはや人間の認知能力では追跡することができない。したがって、結果的に計算プロセスが不透明であるという点においては、従来の問題と同様である。しかし、量子計算の重ね合わせやもつれ、干渉などの特有の性質は、計算能力の指数関数的な向上に貢献している反面、データの入出力の完全な対応関係を保証しない。これは、我々の認知能力の限界に由来する認識論的な不確実性に加えて、システムの状態そのものの性質に由来する存在論的な不確実性でもある[3]。どちらも現実的に追跡できないという実践的な側面においては、大差はないかもしれない。しかし、彼らはそこに原理的な隔たりがあると考えており、それゆえに倫理的な問題としては無視できないと主張する。

こういった不透明性は、責任の帰属先をどこに求めるのかという問題を容易に導く。Ayode らは、計算の出力に着目した問題提起を行っている（Ayode et al 2022）。つまり、我々の意図や望ましさに反するような結果が出力されてしまった場合、その責任は誰に求めればよいのだろうか？現実的に追跡可能なプロセスで計算されていた場合、多少複雑であろうとも時間をかければ、プロセスの正当性や意思決定の所在を明らかにすることができる。しかし、プロセスが認識論的

[3] これは量子力学についての標準的な見解を反映したものだが、一見飛躍が存在する量子特有の性質は「隠れた変数」に由来しており、その不確実性は認識論的なものだと主張する立場もある（白井 2022）。その解釈においては、量子技術における不透明性を引き起こす不確実性は存在論的なものではなく、古典的な計算と同様に認識論的なものとして捉えられる。しかし、これはあくまで非標準的な見解であることは強調されなくてはならない。

にブラックボックス化しており、さらにはそのブラックボックス化が存在論的なものでもあった場合、責任をどのように扱うのかはその技術の仕様によっては決定されないことになる。また、Possati は、量子複製不可能定理によってバックアップコピーを作成することができない事実から、いわゆる「エージェンシー・ロンダリング」の問題を論じている（Possati 2023）。これは、我々の意図や望ましさに反するような結果が誰かによる意図的な行為によって生み出されたものであったとしても、ブラックボックス化された計算プロセスそのものへと責任を押し付けることができるというものである。Possati は、量子コンピューティングの複雑さがこうした責任逃れの現象をより悪化させる危険性があると予想している。

このように、量子技術はその理解に高度な専門性を要し、加えて反直観的な性質を持つ。これによって、一般市民を中心とするステークホルダーにおいて、理解の著しい欠如を引き起こしてしまう危険性がある。その意味では、上述の「計算プロセス」や「責任」における不透明性とはまた異なる、「公共の理解の欠如」という意味での不透明性をも導いてしまう。これは、仮に研究開発の進展によって科学者・技術者の間で上述の不透明性が解決されたとしても、ステークホルダーの間で依然として残り続ける心理的な障壁である。こうした障壁は量子技術に対する誤解や不信といった問題(2-8)に直結し、その結果として社会受容性が低下する恐れがある(Grinbaum 2017; Vermaas 2017; Seskir et al 2023）。また、このような状況に陥った社会においては、量子技術の ELSI についての十分な議論が行われづらく、適切な政策や規制の策定を困難にするかもしれない。

## 2.2. 公平性

量子技術が提起する第二の論点は、「公平性」である。この表現は多義的であり、ここでは少なくとも次の 2 つ、すなわち「すべての人に対して均等な取り扱いや機会が与えられること（Fairness）」と、「各人が必要とするリソースや支援が均等に分配されること（Equity）[4]」の 2 つに分けて整理する。

公平性の問題を直観的に理解するため、次のような十分に起こりうるワーストケースを考えて

[4] WEF（世界経済フォーラム）による『量子コンピューティング・ガバナンス原則』では、分配均衡性のことを指して「Equitability」（Equity と ability の複合語）と表現している（WEF 2022c）。おそらくは、実現可能性のニュアンスを帯びさせるために ability との複合語にしたものだと考えられるが、本稿では特に訳し分けない。

みよう。

**ワーストケース１：**
量子技術を用いた次世代 MRI 技術（超偏極 MRI）は、どうやら癌などの難病を早期に発見することに貢献するらしい。しかし、そうした量子を用いた先端医療技術が社会実装される場面を想像してみると、おそらく一部の富裕層にだけ恩恵をもたらして、私のような庶民はまったくその技術から取り残されてしまうではないか。そういった技術はとんでもなく高額な検査費用がかかるうえに、地理的な事情によって生じる医療アクセスの不平等によって、裕福な人々だけが素早く的確な診断を受けられて、最新の治療を受けられる。一方で、庶民の私は従来の診断技術に頼らざるを得ない。この様子では、症状が重くなってからでないと最先端の治療――その頃には最先端ではないのだが――を受けられそうにない…。

**ワーストケース２：**
それから少し年月を経たが、やはり予想通りの結果になった。同じ疾患であるにもかかわらず、裕福な人々は初期段階で発見・治療されたが、私たち庶民には手遅れになった頃にやっと順番が回ってきたのだ。当然だが、予後に大きな開きが生じてしまった。もしもこの状態がこの先も解消されなければ、最先端医療へのアクセス格差が世代を超えて続き、健康面での不平等が固定化し、さらにはそれ以外の様々な格差の拡大・固定化にも繋がってしまう…。

ワーストケース 1 は、「機会均等性（Fairness）」と呼ばれる類いの公平性に関するものである。Ten Holter らや Possati によれば、経済的理由や社会的理由、地理的理由など様々な理由によって、量子技術の機会均等性は実現されないことが見込まれる（Ten Holter et al 2022; Possati 2023）。特定の社会集団にとって有利であったり不利益であったりすること自体が倫理的な問題であることに加えて、こうしたアクセス機会の偏りは、次に述べる分配においての平等さ（Equity）の欠如にも繋がる点で、重大な問題だと言える。また、経済的・社会的には問題がなくとも、量子技術へアクセスするための知的スキルが不足していることによって、機会均等性が実現されない可能性もあることを Ten Holter らや Seskir らが指摘している（Ten Holter et al 2022; Seskir et al 2023）。あるいは、2-1 で述べた不透明性を理由として、そのようなリスクのある新興技術に対する心理的な障壁が多くの人の間で共有されてしまい、実質的に機会均等性が実現されないといった事態もありうるだろう（Seskir et al 2023）。もちろん、これはユーザーフレンドリー

なインターフェースを開発するという技術面での課題とも密接に関わっているものの、民主主義において均等なアクセス可能性を担保するという社会的側面での課題でもある（4-3 参照）。

一方で、ワーストケース 2 は、「分配均衡性（Equity）」と呼ばれる類いの公平性に関するものである。前述の「機会均等性（Fairness）」では入口となるアクセスが問題となっていたが、「分配均衡性（Equity）」では逆に出口となるリソースの分配が問題となる（Kop 2022a）。つまり、量子技術が生み出す価値の分配に偏りが生じると、社会的・経済的な格差がより拡大してしまう。こういった事態は量子技術特有の課題ではなく、AI・ナノテクノロジーなどの他の技術によっても懸念されている課題である。しかし、従来から存在する問題を、より深刻な仕方で拡大させてしまう可能性があるという点では、無視することはできない。

他にも、現状の知的財産権のあり方では、戦略次第では一握りの先発者が利用を実質的に独占することも可能であることから、アクセスやリソースの分配の両方を含めた公平性一般が損なわれるのではないかという指摘を Kop が行っている（Kop 2022b）。分配均衡性の問題は、次の論点とも深く関係している。

## 2.3. 知的財産

量子技術が提起する第三の論点は、「知的財産」である。具体的な内容は国によって異なるが、知的財産権の主な目的の一つは、科学技術の進歩を促進するような知的創造物を保護し、インセンティブを与えることにある。量子技術に関連する様々な発明やイノベーションも知的財産として認められるため、知的財産権から受ける影響もまた ELSI の対象となる。

Kop によると、上記の目的に反して、知的財産に関する過度な排他的権利の主張は、科学研究や製品開発、公正な流通（Equity）、技術への公平なアクセス（Fairness）に悪影響を及ぼすかもしれない（Kop et al 2022）。言い換えれば、健全・公正な競争を促すはずの枠組みが、いわゆる「アンチ・コモンズの悲劇」と呼ばれる、むしろ反競争的な環境をもたらす可能性があるという。というのも、現行の知的財産権を戦略的に利用すれば、一握りの先発者によって、世界的な利用権の独占がほとんど無制限になるからである（Kop 2022b）。

他にも、量子技術を含む新興技術の一部は、2-5 で述べるように、軍事利用に供される可能性がある。そのため、国家安全保障の観点から言えば、重要かつ先進的な情報はなるべく秘密裏にしておくのが得策である。しかしその一方で、技術の民主化の観点から言えば、すでに 2-2 で言及したような課題が生じてしまう。新興技術に関する知的財産権と当該技術の民主化はこのような仕方で緊張関係にあるため、知的財産の過剰な保護は、企業秘密を含む未公開情報と組み合わさることによってイノベーションのプロセスを阻害する危険性がある。このような背景のもと、Kop と Brongersma は、現行の知的財産権を見直し、保護期間を短くするなどの策が必要だと主

張している（Kop and Brongersma 2022）。ただし、量子技術の開発は国際的に行われているため、現行法の見直しはグローバルなレベルにおける整合性を考慮したうえで行われなければならない（4-1 参照）。

なお、上では一握りの先駆者による利用権の独占が懸念されていたが、Aboy らが指摘するように、過去 20 年間に公開された特許開示の約 50%はすでにパブリック・ドメインとなっているという事実もある（Aboy et al 2022）。第 3 節で言及するように、法改正を含むような政策提言は、こうした証拠に基づいて慎重になされるべきだと言えるだろう。

## 2.4. データ管理

量子技術が提起する第四の論点は、「データ管理」である。この論点は、大きく「データの格納」の問題と「セキュリティ」の問題に分けられる。

### （1）データの格納

前者の「データの格納」の問題は、量子技術によって新たに生み出されるタイプのデータによって、メタデータのあり方や、リポジトリの容量への影響が出ることを指している。これは技術的課題でもあるが、ELSI や RRI といった話題と密接に関係するオープンサイエンスの話題と切り離せない論点である。そもそもメタデータとは、データに関する位置や時間などのデータである。メタデータを整備することによって、出力データの解釈や再現性、正確性の検証が可能になり、データリポジトリにおける検索や他データとの紐づけも容易になる。しかし、こうしたメタデータを管理する際には便宜上確立された標準的な規格を使用することが多い一方で、量子技術によって生み出されるデータの中には、古典的な計算システムでは処理が困難な構造を持ち、量子複製不可能定理によってバックアップコピーを作成することができず、壊れやすく不安定でもありうることを、Possati が指摘している（Possati 2023）。そのため、新しいメタデータの標準を確立しなければ、従来のデータ分類だけでは対応できない可能性がある。また、量子技術は膨大な量のデータを高速に生成するため、現在多くの大学などの機関が用意しているリポジトリの容量では対応できない可能性が高い。データのオープン化が義務付けられる昨今の潮流において、これらの事実は、従来の運用のままではデータの格納時に困難が生じることを意味する（Possati 2023）。

### （2）セキュリティ

後者の「セキュリティ」の問題は、前者の「データの格納」に関する問題が解決したとしても、なお付き纏う問題である。量子技術とセキュリティの関係は、「量子技術による既存の暗号体系の脆弱化」という攻めの側面と、「量子技術による保護の強化」という守りの側面があり、どちらも深刻な問題を孕んでいる。攻めの側面として、Perrier や WEF は、量子技術による計算能力

の進歩は、現在広く使用されている暗号化標準のいくつかを破壊する潜在的な脅威を有していることを指摘している（Perrier 2022b; WEF 2022a; WEF 2023）。RSA 暗号などの公開鍵暗号は因数分解の問題を解く難しさに基づく暗号プロトコルであるが、量子コンピュータは因数分解を高速に解くことを得意としているため、原理的には現実世界のほとんどの通信や暗号を解読できるようになる。この既存の暗号体系の脆弱化により、インターネット上の通信や国家安全保障に関わる情報が脅かされる危険性がある。対策としては、既存の安全システムをポスト量子システム[5]に置き換えることが挙げられる。これによってより高い水準のセキュリティが一旦は保証されるが、Grumbling と Horowitz によると、この移行プロセスには数十年単位の長い時間がかかる(Grumbling and Horowitz 2019)。移行が完了するよりも前の段階で機密データを持ち出されて相手の手元で保存される場合、言い換えると今すぐ保存して後で解読しようとされた場合、なす術はない（Grobman 2020）。ただし、量子技術のこのような側面を過剰に強調しすぎることは、Seskir らが述べるように、量子技術の流通を必要以上に制限しようとする保守主義的な運動を引き起こしてしまうかもしれず、注意が必要である（Seskir et al 2023）。これは、2-8 でも述べるハイプの問題とも関わる。

一方、守りの側面の観点からは、量子鍵配布が生成する暗号鍵が挙げられる。これは上記のアルゴリズムでは解読できないために高い安全性が保証されている。ただし、実際にはコストやインフラ上の課題があり広い社会実装は難しいものの、もし量子技術を利用したセキュリティ対策が社会実装されれば、過剰なセキュリティを招いてしまうリスクがあると Possati は注意喚起している（Possati 2023）。過度なセキュリティは不透明性が極めて高いために、量子鍵を使用した犯罪が行われたとしても、解読することは難しい。また、量子技術を利用することができる一部の集団だけがその恩恵を受けることができる一方で、利用できない集団はプライバシーの点で深刻なダメージを受けることになるという不均衡の問題が生じるだろう（2-2）。

## 2.5. デュアルユース

先に述べたセキュリティに関する論点は、直ちに第五の論点である「デュアルユース（軍民両用）」の問題に結びつく。というのも、セキュリティの攻守の問題は国家安全保障に大きく関わり、情報の観点からの優位性を確保する目的から国家間の競争に繋がるためである。Krelina と Dúbravčík が指摘するように、アメリカ、中国、イギリス、オーストラリア、インド、ロシア、カナダなどの先進国の長期防衛計画には量子技術に関する記述が含まれており、量子技術はデュ

[5] 「量子セキュア暗号」や「耐量子暗号」とも呼ばれる。名前に「量子」が含まれているために誤解されがちだが、これらの実行は古典的なコンピュータでも可能であり、量子コンピュータは必要とされない。

アルユースの中心的話題の一つだと言ってよい（Krelina and Dúbravčík 2023）。

量子技術が軍事利用に供される可能性については、Krelina や Neumann らがレビューしている（Krelina 2021; Neumann et al 2021）。2-4 でも述べたように、量子暗号解析や量子鍵配布によるセキュリティの問題は、通信の信頼性・堅牢性・安全性に関わる。安全な通信が確保されなければ、情報の優位性が損なわれ、国のミッションが危険にさらされることになるだろう。他にも、量子技術による位置決定精度の向上やセンシング機能の向上は、味方や敵の位置のより正確な特定、精密弾薬の誘導、自律型無人機（UXV）の操作、より正確な信号の検出、ノイズの効率的な抑制、位置ベースのアクセスによるデータの保護など、軍事利用における数々の重要な側面と大きく関わる。Lele が指摘するように、量子技術はこうした本質的に新たな軍事能力を提供するため、これらの技術の軍事利用はいわば「量子戦争」へと繋がる可能性がある（Lele 2021）。

また、量子技術に限った話ではないものの、一般にある技術が軍事目的で使用され始めると、研究所から発信される情報量が制限されてしまう。Seskir らはこの問題が量子技術にも当てはまると指摘しており、実際に量子技術が軍事利用されるかどうかとは独立に、民主主義にとって重要な要素である透明性（2-1）や一般市民からのアクセス（2-2）を妨げることになると主張している。一方で、民主主義諸国における軍事的な潜在力は対抗勢力への牽制にも繋がることから、長期的な視点から見れば、量子技術の軍事利用は世界的な民主主義的価値を維持するために必要であるかもしれないとも述べている（Seskir et al 2023）。

ただし、こういったデュアルユースの視点から危険性を過度に指摘することは、場合によっては 2-8 で述べるようなミスリーディングな言説の問題を生み出す可能性もあることに注意すべきである。Smith はこうした点に着目し、技術に対する習慣的な誤った認識が、国が作成する脅威の評価や戦略立案を歪めてしまうこともありうると指摘している（Smith 2020）。

## 2.6. 経済と雇用

すでに繰り返し述べてきたように、量子技術によってこれまでの社会のあり方が部分的に急速に変化する可能性が高い。その影響は、当然経済的な側面にも及ぶ。量子技術が提起する第六の論点は、「経済」の発展とそれに付随する「雇用」の問題である。

量子技術が経済に与える影響は甚大である。WEF の調査によると、対象を量子コンピューティングに限定しても、政府や企業の投資は 2022 年時点において世界で 355 億ドルに達している

[6]（WEF 2022b）。また、今後数年間で量子コンピューティング市場は世界経済全体で数兆ドルの価値になると見積もられている（WEF 2022a）。とりわけアメリカと中国は桁違いの投資を行っており、欧州で最大規模の投資額を誇るイギリスのそれですら遠く及ばないことが指摘されている[7]（RHC 2024）。

多くの論者や機関が指摘しているように、量子技術の発展は医療[8]や金融[9]、物流[10]、製造業[11]など多岐に渡る業界へ影響を及ぼし、新規産業を創出する可能性が高い。とりわけその初期には、量子技術ビジネスはブルーオーシャンとして競争が激化することが予想される。これが国家間同士の競争に発展すれば、そこで勝ち抜くことは、国家の経済的地位を確立することにも繋がるだろう。ただし、そもそもこの競争に参加できるだけの資金的・技術的体力があるかどうか、競争の結果として分配に偏りが生まれないかといった問題に繋がることから、この問題は 2-2 の論点とも関係している。

量子技術の発展によって可能となる自動化と効率化は、一部の既存職種へと影響を与えるかもしれない。一方では、量子技術に関連する研究開発や製品開発、システム管理などの分野で新たな職種が生まれる可能性がある。量子技術産業を支えるために必要なスキルを持つ労働者の需要が高まり、慢性的な人手不足に陥る可能性がある。他方では、資金的・技術的体力が不足していたり、保守的な考え方があることなどによって量子技術の導入への対応ができなかった企業は、対応できた企業と比べて、市場競争において劣位に立たされることになる。また、こうした影響により市場全体が一時的に不安定になることで他の分野が競争力を失ったり、特定の職種が衰退

---

[6] この数字は WEF の調査時に追跡可能なもののみを補足している。WEF が補足できていないものを考慮すると、355 億ドルというこの数字すらも過小に見積もられていることに注意する必要があることを、WEF 自身が指摘している（WEF 2022b）。

[7] 投資額と直接結びつけるのは危険だが、Seskir と Willoughby によると中国は積極的な特許政策をとっており、ここ 10 年間で量子暗号に関する特許を最も多く取得した国だという事実も参考になるだろう（Seskir and Willoughby 2023）。

[8] たとえば、原子の振る舞いをシミュレートできることにより、医薬品や材料の開発が可能になる。また、量子と AI のハイブリッドとして医療用量子アプリケーションがある（Quantum Delta NL 2023a）。

[9] たとえば、量子アルゴリズムを用いた株価のより正確な予測や、マネーロンダリング防止法のもとでの疑わしい取引の検出が想定されている（IBM 2019）。

[10] たとえば、物流ネットワークやタイムテーブル設計の最適化（Quantum Delta NL 2023a）。

[11] たとえば、IC 製造・設計、材料管理、サプライチェーン管理（Quantum Delta NL 2023a）。

することで一部の労働者が職を失うリスクも指摘されている。

すべての労働者に対して量子技術に関する知識やスキルが求められることはおそらくないものの、その重要性は従来よりも高まると見て間違いない。しかし、量子技術は他の新興技術と比較した際に未だ社会実装が進んでいない段階であるため、具体的にどのような領域の知識やスキルがどの程度が求められるのかが明確ではない。たとえば「AI 人材」として一般的なレベルにおいて想定されるのは、既に社会実装された具体的なアプリケーションを使いこなすだけの IT スキルを備えた人材であり、そのアプリケーションの基盤となる機械学習などの知識までは求められていないように思える。一方で、現状「量子人材」としてそのような具体的なアプリケーションが想像しづらいこともあり、一般市民にとってはやや過剰に思える要求がなされることもしばしばある。「量子人材」に対してどのようなスキルを要求し、どの程度の水準の理解を求め、それを教育していくのかが課題となるだろう。この問題は、4-3 や 4-4 で再び浮上する。

## 2.7. 持続可能性

量子技術による影響は経済だけではなく、環境問題を中心とした SDGs の領域にも及ぶ。量子技術が提起する第七の論点は「持続可能性」であり、ここではとりわけ環境の側面に着目する。

量子技術が環境に及ぼすポジティブな側面としては、エネルギー効率やモニタリング精度の向上が挙げられる。2-6 でも述べたように、量子コンピューティングの発展は、特定の種類の計算を従来型のコンピュータよりも効率的に行うことができる。また、量子センサーは少量の粒子も記録できるため、より正確でエネルギー効率の高い作業が可能になる。これは経済の発展に繋がるだけではなく、計算時のエネルギー消費を従来よりも削減することに繋がる。また、計算それ自体だけではなく、計算の結果新たに発見された材料や化学反応が、エネルギー効率の向上に役立つものであることも期待される。他にも、量子センシングの発展は、環境モニタリングの精度を向上させる。これにより、気候変動の監視や汚染の検出、自然資源の管理がより効果的に行えるようになる可能性がある（WEF 2022b; Quantum Delta NL 2023a）。

一方で、量子技術が環境に及ぼすネガティブな側面として、技術開発の環境コストの増加が挙げられる。エネルギー効率やモニタリング精度の向上をもたらすような量子技術の発展には、高度な設備や材料を要することがある。これらの生産や維持、そして廃棄には膨大な環境コストが伴う。これが意味するのは、単にポジティブな側面だけを取り上げるのではなく、こうしたネガティブな側面を含めて、環境と経済の双方を視野に入れて最善のバランスを見ることが重要だということである（森下ら 2023）。

## 2.8. ミスリーディングな言説

ここまで量子技術が提起する様々な ELSI を挙げてきたが、それらが生じる主な要因は、量子技術やその技術の基礎となる量子力学などの諸分野の複雑さや革新性にある。この複雑さや革新性を大衆に向けて効果的に伝えようとする場合、意図的であるかどうかとは独立に、しばしば情報の正確さとのトレードオフが起こってしまう。つまり、わかりやすさや面白さのために誤解や誇張を伴った言説が蔓延する、という望ましくない事態が生じる。量子技術が提起する第八の論点は、ハイプや疑似科学といった話題を含む「ミスリーディングな言説」である。

新興科学技術については「ハイプ」と「ロックイン」の懸念が常につきまとうが、量子技術もその例外ではない。ハイプ（hype）は「誇大宣伝」とも訳されるが、当該の技術の応用可能性、安全性、経済的利益、国家戦略への貢献などについて、誇張が伴う仕方で重要性が喧伝される事態を指す（Master and Resnik 2013）。たとえば、量子コンピュータは実際には特定の種類の計算に特化しているに過ぎないが、あらゆる計算を従来のコンピュータよりも高速かつ正確に解くことができる…といった過剰な期待感を煽るような誤った認識が広まることがある。このような期待感は、短期的には投資や資金調達を促すこともあるのだが、長期的には現実とのギャップに突き当たった際に失望させたり信頼を喪失したりするリスクがある。実際、AI 技術においては 2000 年代にハイプが生じたことにより、一転して投資が冷え込んだ「AI の冬」を招いた。WEF はこれを引き合いに出し、量子技術においての冷え込み、いわば「量子の冬（quantum winter）」を避けなければならないと主張している（WEF 2022c）。また、ロックイン（Lock-in）は技術に対する社会の想像力がその技術の目標、優先順位、リスクに大きく影響することを指摘するとともに、研究開発の方向性が早い段階で特定の範囲内に限定されてしまう事態を指す（Jassanoff and Kim 2009; Mikami 2015）。Smith はハイプが特に国家安全保障とかかわる文脈で問題になることに着目し、それらが技術開発の方向性や戦略・政治にかかわる意思決定を歪めてしまう可能性から、ハイプの受容については聴衆の関心に大きく依存することを指摘している（Smith 2020）。このことは実質的に量子技術に関するロックインを問題にしていると考えられる。

一方で、量子技術に関して、科学的根拠に欠けるものの「科学」を称する疑似科学（pseudoscience）的な主張がなされることがある[12]（森下ら 2023）。量子技術の基盤である量子力学そのものが、神秘主義やニューエイジ思想に（科学者たちが想定していないような仕方で）受容されてきた経

[12] 日本における商業出版物やプレスリリースなどでは「疑似量子コンピュータ」という用語が用いられることがあるが、これは「古典コンピュータ上で量子アニーリングの仕組みを疑似的に再現したもの」という意味であって、ここでいう疑似科学の問題とは関係しない。

緯（いわゆる「量子神秘主義（Quantum mysticism）の問題」)を考えると、この問題は一層深刻である。たとえば、量子特有の反直観的な性質（「重ね合わせ」や「もつれ」など）を実際には用いていないにも関わらず、その製品の際立った特徴として用いられているかのように説明する健康製品やエネルギー療法がある。こうした疑似科学的な主張は、量子技術や科学全体の信頼性を損なうことにも繋がる。また、消費者を誘導し、非効果的あるいは危険な製品やサービスに投資させることも考えられる。

全体として、量子技術に関するミスリーディングな言説は、この分野の健全な発展と公衆の理解に悪影響を与える可能性が高く、問題である。ハイプや疑似科学の問題に対処するにあたっては「教育と公共の認識」（4-4）を考えるのはもちろん、「レトリック分析」（3-1）などを用いて、量子に関する人々の想像力がどのような方向に向かっているかを正しく認識することが必要になる。

# 3. 量子技術の ELSI を紐解く

第 2 節では、量子技術が社会実装される際に想定される基本的な ELSI を紹介した。現代における技術開発の進展の速さを考えれば、これらが技術的な側面における発展により解決される可能性は十分にあるだろう。一方で、技術開発によってだけではなく、ガバナンスによって ELSI を解決するというやり方も一つの選択肢として考えられる。続く第 4 節においてガバナンスによる ELSI の手懐け方を紹介するが、このままでは課題が雑多に見出されているだけで、何らかの策を講じるのは尚早である。この第 3 節はその準備段階として、第 2 節で見通した課題が現状どのように立ち現れているのかを整理・分析・評価することを通じて、実行可能なガバナンス戦略のための基盤を準備する下処理、いわば「課題クレンジング」を行う（図 3）。とりわけ本稿では次の 2 つの論点、すなわち「レトリック分析（3-1）」と「テクノロジーアセスメント（3-2）」を取り上げる。

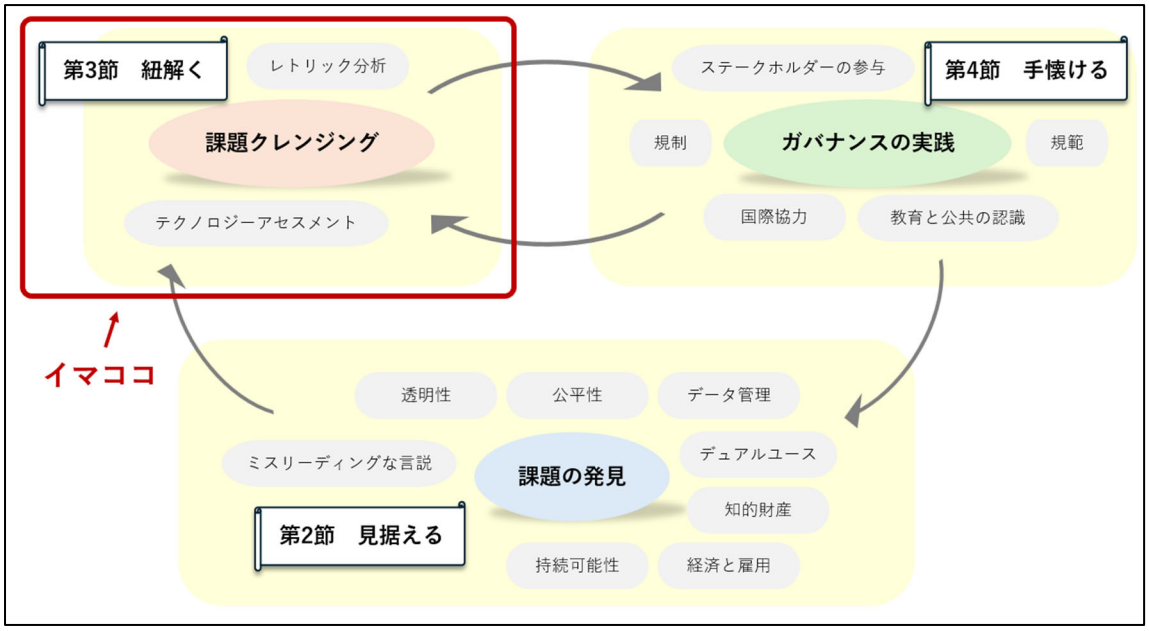


図 3　第 3 節の位置づけ

### 3.1. レトリック分析

量子技術の ELSI を紐解くための最初の論点は、「レトリック分析」である。レトリック分析とは、テキストやスピーチなどのコミュニケーションがどのように構成され、それが聴衆にどのような影響・効果を与えるかを理解するための手法である。近年の社会科学では気候変動対策や移民受け入れ、原発の再稼働、カジノの解禁などの論争的テーマについて人々が意見や主張を述べるとき、語り手が自分と聴衆をそれぞれどのような存在とみなしているか、何をキーワードにしているか、あるいはどのような修辞技法や論法を用いているかなどをつぶさに見ることで、自明とされている前提やイメージ、用いられる概念同士の連関を可視化・記述するためにこの手法が用いられる。また、このレトリック分析を時系列に即して通時的に行うことで、言説の発生、拡散・流行・消滅までを追跡することにも役立ちうる。

「量子技術」という言葉やそれに関連する表現は、論文や政府文書のような公式の文書だけではなく、報道、プレスリリース、広告やフィクションなど、様々な媒体において登場する。そうした多様な媒体における使用法や紹介のされ方を分析し、それが引き起こす影響・効果を分析することは、量子技術に関する現状や今後取るべき方針を理解するためにも重要である。

たとえば、量子技術におけるレトリック分析は、ハイプやデュアルユースの課題をより深く認識することに繋がる。2-5 でも述べたように、技術に対する偏った認識やハイプが、脅威の評価や戦略立案を歪めてしまうこともある（Smith 2020; Roberson et al 2021）。Roberson はオーストラリアの研究助成機関[13]が助成した研究助成金の提案書を分析し、そこに登場する「革新」「未来」「競争」といったキーワードの関連を明らかにすることで将来ビジョンや期待がどのように形成されているのかを明らかにしている（Roberson 2021）。また、McKay は量子産業における米軍関係者の公的レトリックを分析している（McKay 2022）。そこでは、戦争の暴力の実現、空軍がアメリカ人に安全な未来を提供するという物語の維持、量子技術と戦争の美学との融合に焦点が当てられており、McKay はそこに既存の暴力的な権力構造の再生産を見出している。

他にも、フィクション作品や日常的な文書、個々の論考などにおける用語の使用法の分析は、一般市民がどのように量子技術を理解しているのかを可視化する手掛かりになる[14]。森下らは文

---

[13] オーストラリア研究会議（Australian Research Council）

[14] レトリック分析がなされているわけではないものの、生田は量子情報処理に関連する話題が登場する日本のアニメや漫画などをまとめており、参考になる（生田 2022）。

学やフィクションによる量子技術の社会的イメージの形成について言及している(森下ら 2023)。当然のことながら、正しく理解されて用いられているものもあれば、誤って理解されたまま使用されているものもある[15]。中には、量子力学の難解さを逆手に取り、意図的に誤った発言がなされる場合もあるだろう。2-8 では量子技術に関するミスリーディングな言説を望ましくないものとして紹介した。しかし、これを安易に「ミスリーディングだ」「疑似科学的だ」と嘲笑するのではなく、量子技術関連の知識体系のうちどの部分をどのように曲解してミスリーディングな言説へと繋がっているのかを明らかにするという目的があれば、当然レトリック分析の対象となるだろう。これは、安易に嘲笑しないという「態度」の問題（4-4 参照）とも関係しているが、嘲笑するかどうかとは独立して取り組めるという点では、態度の問題とは切り離して考えられるだろう。こうした分析結果をもとに、4-4 で述べる一般市民向け教育プログラムの提供の仕方を検討することができる。

## 3.2. テクノロジーアセスメント

量子技術の ELSI を紐解くための二つ目の論点は、「テクノロジーアセスメント（Technology Assessment）」（以下、TA）である。技術一般に当てはまることではあるが、社会実装後に誰にどのような影響を与えそうかを社会実装前に予測し、社会実装後にはそれらをもとに継続的なモニタリングを行うことによって、当該技術の利点を最大限に活かしつつリスクを最小限に抑えることができる。量子技術は他の技術よりも長期的な影響が見えづらい分、評価の柔軟性が求められるが、TA を行うことによって量子技術の ELSI を適切に考慮することができ、そこから得られた知見をガバナンスの意思決定へとフィードバックさせることが重要である。

[15] ミクロレベルにおける量子の振る舞いをマクロレベルに適用して何かを主張する事例は枚挙にいとまがないため、ここでは言及しない。

以下、網羅的ではないものの、TA ツールの例をいくつか挙げる。

| ツール名 | 説明 |
|---|---|
| シナリオ分析<br>（Scenario Analysis） | 技術の発展がもたらす様々なシナリオを案出し、それをもとに新規事業や研究開発の戦略を構想する。未来学（Future Studies）や SF プロトタイピングという分野・技法は、未来に焦点を当てた思考実験に重きを置いたシナリオ分析を行っていると見なせる。 |
| デルファイ法<br>（Delphi Method） | 専門家パネルなどを通して専門家の意見を集約し、技術に関する予測や意思決定に関する合意形成を目指す。 |
| ステークホルダー分析<br>（Stakeholder Analysis） | 技術の影響を受ける様々なステークホルダーを特定し、それぞれの関心や懸念、影響力、立場などを分析する。 |
| 費用便益分析<br>（Cost-Benefit Analysis） | 技術の導入による経済的なコストと利益を評価し、実行可能性や効率性を分析する。 |
| インパクトアセスメント／影響評価<br>（Impact Assessment） | 技術が与える潜在的なインパクトを予測・分析・評価する。目的に応じて、環境や健康、倫理、プライバシーなどに特化したインパクトアセスメント／影響評価がある。 |
| 予期技術倫理<br>（Anticipatory Technology Ethics） | 分析対象となる技術を適切な抽象度に分類し、それぞれのレベルにおいてどのような負の倫理的影響が生じうるのかを予測・検討する。 |
| 技術成熟度<br>（Technology Readiness Levels） | 分析対象となる技術の成熟度を 9 つのレベル（TRL 1～9）に分けることにより、その技術が市場に出回る時期を予測したり、規制の種類や強さを調整するのに役立つ。 |

これらはいずれも目的依存的で、技術のどの部分をどのように評価したいか次第で、実行主体にとっての有益さが変わる。長所や短所を理解したうえで使用することが重要である。

加えて、それぞれの短所を補うように工夫することで、新たな TA ツールを作成することも可

能である。たとえば、量子技術に特化した TA ツールとしては、オランダの量子デルタ NL[16]が開発した「EQTA（The Exploratory Quantum Technology Assessment）」がある（Quantum Delta NL 2023a; Kop 2023b）。EQTA は、量子技術がもたらす機会とインパクトをタイムリーな仕方で探索することを通じて、量子技術にまつわるネガティブなものを組織が回避できるように設計されている。具体的には図 4 で示したように、組織が EQTA を積極的に利用する必要があるかどうかを「クイックスキャン」ブロックで簡単にチェックしたのち、「探索」ブロック（Step 1～3）と「実践」ブロック（Step 4～7）、合わせて 7 つのステップを踏みながら組織内で理解を深めていく仕組みになっている。7 つのステップの中には、いくつもの既存の TA ツールが組み込まれていることがわかるだろう。この作業を通じて、量子技術の ELSI をより良く可視化することが想定されている。

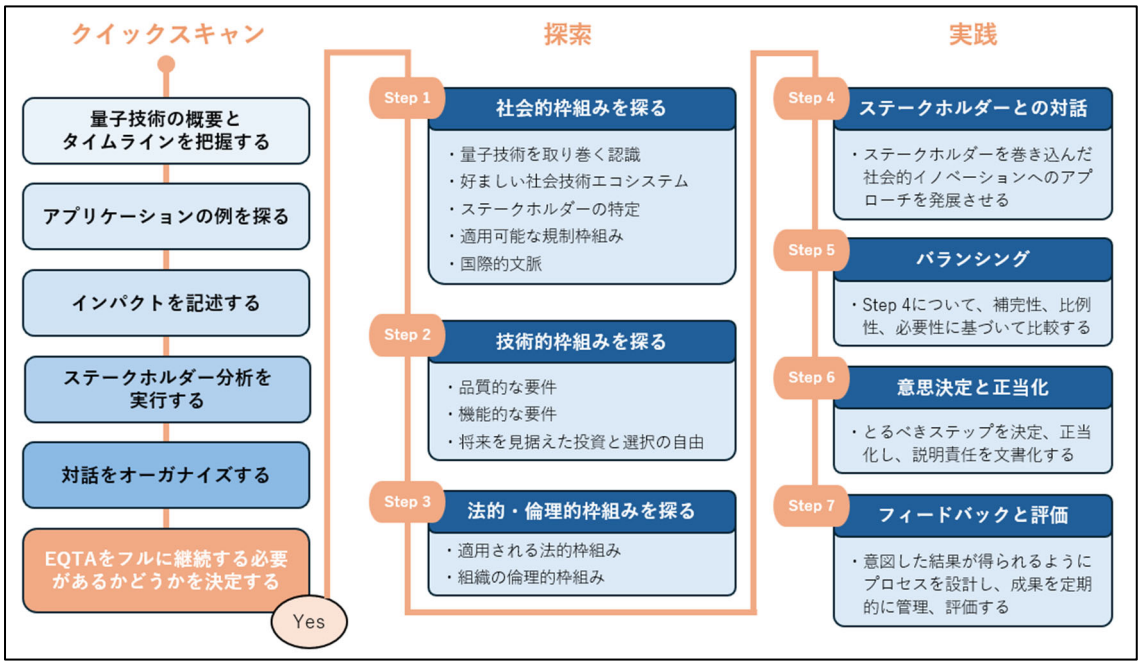


図 4　EQTA を用いたアセスメントのロードマップ
（Quantum Delta NL 2023 によるものを参考に筆者が作成）

[16] 正確には、量子デルタ NL 内に設置されている「量子社会センター（Centre for Quantum & Society）」が実際の開発を行っている。このセンター内で進められた EQTA の開発には Pieter Vermaas や Eline de Yong、そして Mauritz Kop といった人文社会科学系の研究者が数多く携わっており、人文社会科学系の量子人材（4-4）という観点から注目に値する。

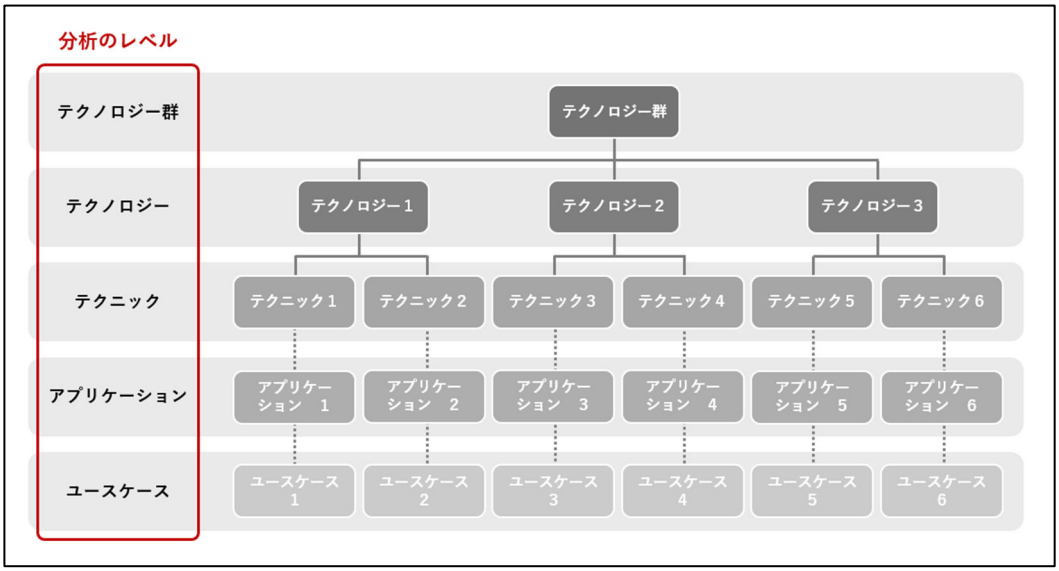


図 5　予期技術倫理における分析のレベル
（Umbrello et al 2023 によるものを参考に筆者が作成）

現状、量子技術に特化した TA ツールは EQTA のみだが、他の新興技術へと適用することを想定した新たな TA ツールを作成する試みは他にもある。たとえば EU が資金を提供した研究プロジェクトである TechEthos は、「エシックス・バイ・デザイン（Ethics-by-Design）」というスローガンのもと、気候工学・拡張現実・ニューロテックといった 3 つの新興技術に適用するための新たな TA ツール「TEAeM（TechEthos Anticipatory ethics Matrix）」を作成している（Bhalla et al 2023）。TEAeM の基礎となるのは、同じく TechEthos によって改良されたバージョンの「予期技術倫理」である（Umbrello et al 2023）。技術を一括りで論じるのではなく、分析するレベルを「テクノロジー群」「テクノロジー」「テクニック」「アプリケーション」「ユースケース」という 6 つに分けることで、各技術の微妙なニュアンスを拾いつつ分析することが可能になっている（図 5）。Possati が予期技術倫理を用いた量子コンピューティングの分析を行っており、本稿の目的にとっては参考になるだろう（Possati 2023）。ただし予期技術倫理は、未来に関するシナリオ分析と、多様なステークホルダーの関与といった側面がやや弱い。そこで、それぞれ「未来学」と「倫理インパクトアセスメント」という TA ツールを組み合わせることで、予期技術倫理の苦手な側面を補強している。

以上のように、レトリック分析と TA には、量子技術領域において発見された生の課題をより鮮明に可視化し、次のステップへの移行を可能にする力がある。この力を指して、本稿では課題クレンジングと呼んでいたのであった。課題クレンジングという下処理を終えれば、いよいよ最後のステップへと進むことになる。

# 4. 量子技術の ELSI を手懐ける

課題クレンジングを経て、第 4 節ではいよいよ各課題の手綱を引くことのできる手法を整理する（図 6）。ここではガバナンスに関わる 4 つの論点、すなわち「国際協力（4-1）」、「規制と規範（4-2）」、「ステークホルダーの参与（4-3）」、そして「教育と公共の認識（4-4）」を扱う。

第 3 節の課題クレンジングは第 4 節のための準備段階として導入されたが、課題クレンジング自体は、ここで述べるガバナンス手法が適切に機能しているのかを分析・評価するためにも使える。図 6 における矢印は、各テーマ間のフィードバックループを意味している。実際にガバナンスを実践する際には継続的に分析と評価を行い、フィードバックのサイクルを回していくのが効果的である。

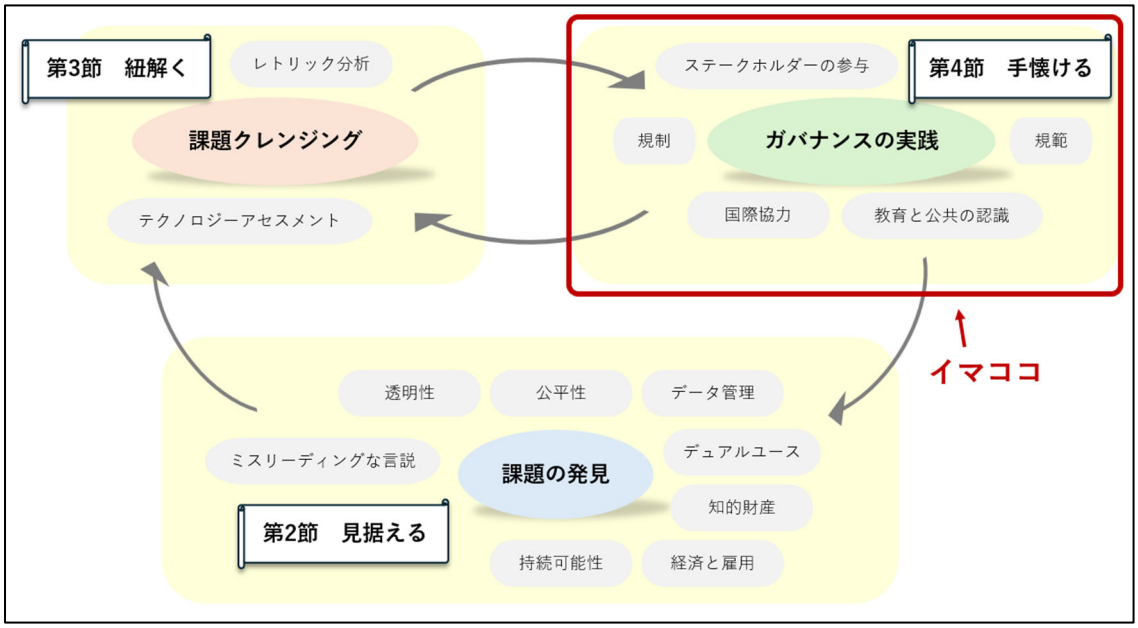


図 6　第 4 節の位置づけ

## 4.1. 国際協力

第一に、量子技術の ELSI は「国際協力」を考慮することによって手懐けられるかもしれない。というのも、量子技術はその性質上、国境を越えてグローバルに影響を持つ可能性が高く、課題のいくつかは、国際的な協力によってより効果的に対処できると考えられるためである。

量子技術の研究開発は高度な専門性と豊富な資源を要するため、国籍を問わない共同研究が効果的である。異なる国の研究機関や企業間で協力することで、研究開発の進展が加速することが見込まれる。これによって、技術的な側面における発展により解決される類いの論点はもちろん、様々な意味でのコストを削減することも可能である（2-7）。また、続く 4-2 でも述べるように、セキュリティ・プロトコルやインターフェースなどの互換性を確保するためには、国際的に認められた技術標準の策定が不可欠である。研究開発における国際協力はこうした協調的な活動を促進し、規制や規範を適切に機能させるための必要条件だと言えるかもしれない。こうした国際協力の動きとして顕著なのが、欧州委員会による『量子技術に関する欧州宣言』である（EC 2023）。そこでは、EU 加盟国ごとの単独行動だけでは国際的な競争力のあるエコシステムを実現することはできず、EU 全域のレベルで協力し、さらには志を同じくする他の地域や国々との協力を視野に入れた国際的な対話に参加することが重要だと述べられている[17]。また、Perrier は量子技術と量子経済の発展のための不可欠な要素として国際協力を挙げており、貿易時の関税の引き下げなどをはじめとした、国際協力のインセンティブとなる手続きに踏み込んだ提案を行っている（Perrier 2022b）。

他にも、オープンに研究開発を進めることは、一部の不透明性の問題（2-1）や国家安全保障上の問題（2-5）、ミスリーディングな言説の蔓延（2-8）といった諸課題が生じるのを防止することにも繋がり、昨今のオープンサイエンスの精神とも合致する。Biamonte らはオープンな研究開発について、2-3 で述べたような特許取得などによる知識のクローズド化を開かれた科学的精神の観点から批判しつつ、グローバルかつオープンな量子技術の開発を訴えている（Biamonte et al 2019）。

他にも、国際的な技術移転は、共同研究開発やライセンシング契約、フランチャイズ、直接投資、教育プログラム、コンサルティングサービスなど多様な形態をとって、ある国・地域から別

[17] 国家レベル・国際レベルを問わず、志を同じくする政府が協調して対応することが重要だという論点は、OECD による『Science, Technology and Innovation Outlook 2023』でも述べられている（OECD 2023）。

の国・地域への技術や知識、製造方法などのスキル、そしてその他の知的財産の移転を可能にする。このプロセスが実現すれば、国境を越えて技術が共有され、異なる地域間でのイノベーションが促進されることになる。個別事例として、オランダの量子デルタ NL はイノベーションの促進を目的として、大学から企業への技術移転を積極的に促す方針をとっており、欧州他国からも注目を集めている（Quantum Delta NL 2023b; RHC 2024）。現状はオランダ国内に留まるが、前述の『欧州宣言』に則り EU 域内への活動拡大が期待される。

ただし、協力関係からはじかれた集団が生まれた場合、技術的格差やアクセス・分配の不平等（2-2）が現状よりもさらに拡大することへと繋がる点には注意しなければならない。

## 4.2. 規制と規範

量子技術の ELSI を手懐けるための第二の論点は、「規制」と「規範」である。本稿における規制と規範の用法は、日常的な理解に基づく素朴なものである。つまり、「規制（Regulation）」は法的な拘束力を持つ公的なルールであり、強制力を伴う。たとえば、法律や安全基準、金融規制などがその例として想定されている。一方、「規範（Norm）」は社会的な合意や慣習に基づく非公的なルールであり、強制力は伴わないものの、場合によっては社会的な非難や排除の対象となることもある。規範の例としては、ある集団における共通の礼儀や伝統、行動様式などが挙げられる。規制と規範は互いに影響を及ぼし合い、社会の秩序を構成している。以下、こうした理解に基づいて論点を整理する。

ただし、規制に関しては以下の点に注意が必要である。本来、量子技術に対する規制を論じる際には、プラットフォーム技術としての量子技術に対する規制と、応用的な個別領域としての量子技術に対する規制を区別する必要がある。というのも、個別領域としての各量子技術（量子コンピューティング、量子センシング、量子通信など）はそれぞれ研究開発の進展具合や社会実装の時期が異なる。そのため、あらゆる量子技術に対してまとめて規制を課すことはあまり効果がなく、各技術の「技術成熟度（Technology Readiness Levels）」（3-2 参照）に応じた規制のタイミングを考慮することが求められる。ただし本稿では、文献レビューという性質上、一般的な話に留めることとする。技術成熟度に応じた規制のあり方に着目した議論は、イギリスの規制ホライズン委員会（RHC）によるものが詳しい（RHC 2024）。

### （a）規制

技術や社会制度に対する「規制」という話題は、しばしば否定的なニュアンスを帯びて論争を引き起こす。規制は悪であり、研究開発の妨げになるものだという考え方は決してマイナーなものではない。これは一理あり、研究開発を妨げるような規制は歴史的にも存在してきた。一方で、規制は技術の利点を最大限に活かし、リスクを最小限に抑えることができる有効なツールであるという考え方もある。この考え方によれば、新興技術が安全かつ責任ある仕方で社会に受容されるためには、むしろ規制は不可欠なものである（岸本 2024）。本稿ではどちらの立場に分があるかの判定には踏み込まないが、少なくとも「技術の発展にとって良い規制がある」という前提を採用したうえで論じることとする。

これまで述べてきたような量子技術の ELSI の一部には、AI などの他の新興技術と同様に、強制力を持つ法規制を策定することで手懐けられるとする立場がある。たとえば Derose は、既に言及したような知的財産の保護のあり方（2-3）や、データ漏洩といった問題を含むセキュリティに対する課題（2-4）について、それらを体系的かつ柔軟に管理できるような法規制の枠組みを整備することの重要性を訴えている（Derose 2023）。その方向性において具体的に踏み込んだ提案としては、以下のようなものがある。現行の知的財産権を戦略的に利用（ハック）すれば、一部の先駆者によってほとんど永続的な知的財産の独占が可能になる、という事態を Kop が問題視していることは 2-3 で述べた。この解決策として Kop や Brongersma は、何らかのインセンティブと引き換えに、量子技術や AI を組み込んだ知的財産についてはとりわけ 3 年から 10 年という比較的短い保護期間を導入することを提案している（Kop 2022b; Kop and Brongersma 2022）。その他、量子技術、とりわけ量子センシングや量子コンピューティングによるプライバシーの侵害能力について、単なる人権侵害だけではなく人権概念そのものの変容をも引き起こす深刻なものと捉えたうえで、政府への監視手法の開示請求や、量子技術を用いた具体的な脅威を受けた際の防衛としての攻撃的技術の使用を可能にするような法整備を主張する者もいる（Hoofnagel and Garfinkel 2022）。

量子技術の国境を越えた性質を勘案すると、Derose が述べるように、こうした法規制の改正は 4-1 で述べた国際協力を前提としたグローバルレベルで考慮することによって、はじめて適切に機能するものもあるだろう（Derose 2023）。というのも、至極当然の話ではあるが、適用される法規制は現地において成立しているものであって、一旦その法規制の外側に出てしまえばその法規制は適用されないからである。たとえば、知的財産権の大枠を他国と揃えることによって知的財産の国際的な保護が可能になったり、軍事用途に関わる技術の輸出規制を行うことによってデュアルユース的な側面（2-5）に対する特定諸国への牽制として機能することが期待される（Perrier 2022b）。ただし、量子技術を含む新興技術は研究開発の進展が早いため、法規制のみ

では対応しきれない可能性が高い。そのため、（b）で述べるソフトな規範的側面を枠組みの中に取り入れたアジャイルな法規制枠組みを作っていく必要があるという指摘も多い(Derose 2023; OECD 2023）。

また、量子技術に関する技術標準や国際的なセキュリティ基準もまた、健全な研究開発の促進にとっては重要である。こうした技術ガバナンスの中核を担っているのは、たとえばアメリカの国立標準技術研究所（NIST）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）、ITU 電気通信標準化部門（ITU-T）、米国電気電子学会（IEEE）、欧州電気標準化委員会（CENELEC）、国際標準化機構（ISO）といった国際的な影響力を持つ公的機関である。国際的なセキュリティ・プロトコルやメタデータ、インターフェースの相互運用性を確立するためには公的機関を巻き込んだ国際協力が不可欠であると同時に、こうした標準・基準が策定されていることによって調和的な国際協力がさらに促進される側面もある（Perrier 2022b; WEF 2022b）。これが示すように、国際協力とグローバルな規制の確立は、量子技術の研究開発や社会実装を行う際の両輪として機能し、相互補完的な関係であると言える。

### （b）規範

一方で、規制ほどの強制力は持たないものの、社会的な合意や倫理的な原則に基づく「規範」によって対応する考え方もある。たとえば、量子技術を利用したデータ収集や監視活動といったセキュリティにまつわる課題（2-4）は、個人のプライバシーを尊重すべきだとする伝統的な規範が対応する。また、量子技術の研究開発プロセスの不透明性にまつわる課題（2-2）は、ステークホルダーに対する透明性を確保し、社会に対して責任を持つべきだという規範が対応する。他にも、量子技術へのアクセス、そしてその結果得られる利益の分配に関する公平性にまつわる課題（2-2）は、広範な社会に恩恵をもたらすべきだという民主的な規範が対応する。こうした規範は法的拘束力を持たないとはいえ、無視できない程度には人々の行動のガイドラインとして機能する。

こうした規範によるガバナンス、言い換えると、正式な法的強制力を持たないものの道徳的な力を持つ倫理原則を重視したテクノロジー・ガバナンスが候補として挙がる理由としては、(a）でも指摘したように、新興技術は研究開発の進展が早く、法規制だけに基づいたガバナンスだけでは対応速度や手続き面での限界があるという事情がある。たとえば、WEF が 2022 年に公開した『量子コンピューティング・ガバナンス原則』は透明性やアクセシビリティといったいくつかの中核的価値観を重視した研究開発や社会実装を、そして OECD が 2023 年に公開した『OECD STI Outlook 2023』では法的強制力を持たない原則や基準、ガイドライン、規範に基づいたテクノロジー・ガバナンスを志向している（WEF 2022c; OECD 2023）。

欧州を中心に採用されているアプローチである RRI（Responsible Research and Innovation）も、望ましい価値観から逆算的に研究開発のプロセスをデザインする方針をとっているという点で、規範に基づいた発想に立脚していると言える。量子技術における RRI アプローチの必要性は複数の論者（cf. Coenen et al 2022）によって訴えられている[18]が、ここでは個別事例として、量子技術に特化した RRI アプローチである「責任ある量子技術（Responsible Quantum Technology）」（以下、RQT）を紹介しておく。Kop は、次の 3 つの異なるレベルで量子技術の ELSI へと対処しようとしている。

**上位レベル**：量子 ELSPI パラダイム（Kop 2023a）
**中位レベル**：RQT（10 原則）（Kop 2023a; Kop et al 2024）
**下位レベル**：SEA フレームワーク（Kop 2023a; Kop et al 2024）

上位レベルの「量子 ELSPI パラダイム」は 3 つのレベルの中で最も抽象的で、この研究分野についての規範的見解を記述する[19]。中位レベルの「RQT（10 原則）」はもう少し具体的なもので、AI やナノテクノロジーの ELSI に関する知見を援用した 10 個の指導的原則を指示している。そして下位レベルの「SEA フレームワーク」は最も具体的なもので、実際のルールやツール（国際条約や各国の法規制、基準、チェックリストなど）を、「保護（Safeguarding）」「関与（Engaging）」「前進（Advancing）」という 3 つのカテゴリー（SEA）に整理したうえで実践する。Kop 自身は中位レベルを指して RRI アプローチだと主張しているが、規範に基づいてプロセス全体をデザインするという発想は 3 つの全レベルを通して成し遂げられる仕組みになっているため、この 3 つを併せて一つの大きな RRI アプローチになっていると評価できる。

以上、規範によるガバナンスを紹介したが、注意すべき点がある。それは、規範はあくまでも規範に過ぎず、それが適切に機能するかどうかは、当該コミュニティにおける各構成員の意識に委ねられるという点である（横山 2021）。加えて、国際協力（4-1）を前提としたガバナンスに

---

[18] 逆に、McKay などの論者は、RRI アプローチは典型的に資本主義の枠組みで行われているとして否定的である（McKay 2022）。

[19] ELSPI とは、ELSI に政策（Policy）の要素を付け加えたものである。なお、Kop は「I」を Issues ではなく Implications と表現しているが、その意味するところは「量子技術に関する研究」と「それを社会に導入した際に生じる（倫理的・法的・社会的・政策的な）課題（issues）に関する研究」を結びつけたパラダイムのことであるため、個別の問題については「課題（issues）」と捉えて差し支えない（Kop 2023a）。

おいては、異なる文化や価値観を持つ複数の地域間である程度共通した規範を形成することが要求される。規範的アプローチを採用する際には、積極的な対話や協力を通じてこれらの課題を解決していく必要があることに注意しなければならない。その際、倫理学者などを含めた学際的なチームを編成することが、課題解決の助けとなることだろう。

### 4.3. ステークホルダーの参与

量子技術の ELSI を手懐けるための第三の論点は、「ステークホルダーの参与」である。ここで述べる「ステークホルダー」とは、科学者や技術者だけではなく、政策立案者、産業界、教育業界、そして一般市民など、実際の研究開発プロセスには一見携わらないような層をも含む。この論点は「公平性」「多様性」「包摂性」といった規範の文脈において論じられることも多く、とりわけ欧州においては、多様なステークホルダーを適切に巻き込むことは、民主主義における重要な価値観として尊重されている（Wolbring 2022）。中には、公衆の意見を幅広く考慮することは単に道徳的な意味合いしか持たず、研究開発の進展にとっては少なくとも遠回りで、ときには有害なものだとする考え方もあるだろう。しかし、こうした多様なステークホルダーの意見やニーズを考慮し、透明性や社会からの信頼を確保することは、むしろ量子技術のスムーズかつ持続可能な社会受容にとって効果的であるかもしれない。

こうした動きは広く「量子技術の民主化」と呼ばれているが、その中にも民主化の強さに程度が存在する（Seskir et al 2023）。中でも、政策立案プロセスへの参画を要求するものは、程度の強い民主化だと言える。Coenen と Grunwalt は議会の関与を想定した強力な RRI アプローチを提唱している（Coenen and Grunwalt 2017）。ステークホルダーの中でもとりわけ非科学者・技術者といった一般市民からの意見を公開的な対話によりインプットし、それを体系的、透明かつ応答的な方法で、議会やその他の政治的審議、意思決定プロセスへ反映できるように制度を設計すべきだ、と彼らは考えている。

一方で、政策立案プロセスへの参画を要求するかどうかとは独立に、公開対話やワークショップを開催し、一般市民を中心とした多様なステークホルダーが意見を交換できるようなプラットフォームを形成することを求める動きもある。たとえば、2017 年にイギリスで行われたパブリック・ダイアログ（EPSRC 2018）や、2022 年に日本で行われた印象聞き取り調査（肥後ら 2022）などがこれに当たる。これには、ステークホルダーからの意見を取り入れる目的もあるが、同時に、一般市民の量子技術に関する理解を深め、抵抗感や嫌悪感を減らす効果もある。こうした取り組みは、政策立案プロセスへの参画の要求と比較すれば、比較的弱い民主化だと言える。また、一般市民の量子技術に関する理解を深めるという点では、一般市民向けの教育プログラムを提供する啓発活動という手段も考えられるだろう。これについては続く 4-4 で言及する。

他にも、多様性を確保するという点で、ジェンダー、民族、文化などのバランスへの配慮も重要な課題である。こうした多様性の確保は、イノベーションの促進、社会的公正の実現、技術の社会受容性の向上に繋がる。多様性の確保を一時的ではなく持続可能な取り組みとするためには、当該コミュニティ全体のコミットメントと継続的な努力が必要である。手段としては、多様性を促進するための明確なポリシーやガイドラインを策定し、これを実施するための具体的な策を講じることが考えられる。量子技術に特化したものでは、EU のコンソーシアムである QuantERA のウェブサイトには、量子技術の研究開発におけるジェンダーバランスへの配慮を宣言する専用のページが用意されている（QuantERA 2022）。

ステークホルダーの参与という論点は、民主化を実現するうえでは欠かせない要素である。しかし、上でも触れたように、難点がないわけではない。第一に、ステークホルダー間で意見が多様であり、合意形成に時間を要する、あるいは合意形成自体がそもそも困難であるという点が挙げられる。第二に、量子技術に関する専門知識は限られた一部の層に集中していると言わざるを得ない現状において、非専門家である一般市民の参与を適切に促進するためには、適切な情報提供と教育が欠かせないように思える。第三に、ステークホルダーの参与に関して効果検証を行った際に、実際の意思決定プロセスに影響を与えていない場合が考えられる。このとき、ステークホルダーの参与自体にさほど効果がないのか、それとも手法が形骸化しているなど、進め方の問題によって効果が出ていないのか（そして改善は見込めるのか）といったことを適切に見極める必要がある。ただし、仮にステークホルダーの参与自体にさほど効果がないことが判明したとして、その結果がステークホルダーの参与を取りやめることに繋がるかどうかは、また別の問題として考える必要がある。効果がないから取りやめるというのは、ステークホルダーの参与をある意味で道具的に見なしているわけで、「仮に効果がなかったとしても、ステークホルダーの参与そのものに意義があるのだ」という立場からの反論を容易に導く。

## 4.4. 教育と公共の認識

量子技術の ELSI を手懐けるための第四の論点は、「教育と公共の認識」である。量子技術やその基盤となる量子力学などの分野は、その反直観的な性質や高い専門性から、一般市民にとって理解が難しい側面がある。量子技術が社会的に受容されるためには、専門性をある程度備えた量子人材をどのように育成するか、そして一般市民の知識の底上げをどのように実現するか、という課題に取り組む必要がある。こうした取り組みはミスリーディングな言説（2-8）を蔓延させないようにする効果的な戦略であり、同時にステークホルダーの参与（4-3）を効果的に実現させるためにも重要な論点だと言える。

まず、高度な専門性を備えた量子人材をどのように育成するか、という問題がある（WEF 2023; 内閣府 2023; 森下ら 2023）。ここでいう専門性には、本稿で列挙している量子技術の ELSI を認識し、社会にとって責任のある仕方でその解決に取り組み、それをステークホルダーへ教育することのできる能力も含まれる。必ずしも全員がすべての能力を備えていなければならないわけではないものの、そのような人材を育成するためには、従来の科学的トレーニングだけでなく、人文社会科学系の要素を組み入れたトレーニングをプログラムの中に取り込む必要があるだろう（Arrow et al 2023; RHC 2024）。

次に、一般市民を中心としたステークホルダーを何らかの仕方で参与させるためには、知識の底上げを実現することが重要である。そのためにはまず、量子技術を最低限度理解する必要があり、それを実現できるような教育プログラムを提供することが求められている[20]（Grinbaum 2017; Vermaas 2017; Seskir et al 2023）。具体的には、一般市民にもアクセス可能な講座（対面・オンライン問わず）やワークショップなどを通じて量子技術の基礎についての理解を促すことなどが挙げられるほか、近年ではカードゲームやアプリなどを用いたゲーミフィケーションによって量子力学や量子技術の基礎を解説する試みも行われるようになってきている（Seskir et al 2022; RHC 2024）。

[20] ただし、量子デルタ NL が指摘するように、古典的なコンピュータの基本的な仕組み（たとえば、0 と 1 の二値から複雑な機能を実現するという仕組み）ですら大半の人は理解できないのだから、言葉を用いた説明はそこまで必要ではないとする立場もある（Quantum Delta NL 2023a）。

最後に、忘れられがちな側面として、ミスリーディングな言説や単純な誤解に基づく発言を安易に嘲笑するような態度を取らない、という問題がある[21]。2-8 ではミスリーディングな言説を望ましくないものだと述べたが、専門家や好事家たちによる嘲笑的な態度が、一般市民をより学問的手法から遠ざける心理的要因になることもある。また、「〇〇警察」と一部で揶揄されているような過激な振る舞いは、TPO を考慮しない場合には一般市民を必要以上に委縮させてしまうことにも繋がる。たとえば、物理学者である Ferrie は、量子に関係する怪しげな言説の数々をいわゆる「f-bomb」を多用しながら嘲笑う書籍を出版した（Ferrie 2023）。Ferrie の記述は正しい理解に基づいているが、過剰ともとれるほどの嘲笑的な表現に対して気分を害する読者も一定数存在するのは確かである。こうした事態は、改めて態度の問題を考え直すきっかけになるだろう。しかし言うまでもなく、これは「誤った言説でも寛大な精神で放置すべきだ」という主張ではない。

[21] シティズンサイエンスや哲学対話のような場では、「くだらないと思えることでも、何でもいいから言ってみる。そしてそれを否定しない。」といった規範がある（cf. 梶谷 2018）。これは実際には難しい問題で、本当に思いついたことを何でも言ってよいかと考えると、そんなことはないことはほとんど自明である。とりわけ、差別的な発言は許容されるべきではないだろう。しかし、「理解が著しく浅く、明らかに準備不足な発言」をマナー違反と捉えるかどうかは、やや厄介な問題である。ありがちな論争として、「勉強の場として図書館などの公共施設があるのだから、最低限は学んでから議論に参加すべきだ。そうでないと議論が進まない。」と考える論者もいれば、「情報収集の場がただあるだけでは議論は発生せず、議論する環境が整っているからこそ人は図書館などの場で情報収集をするのだ。だから議論の場が先だ。」と考える論者もいるだろう。一般市民側の態度が逆に専門家のやる気を削いでしまう事態は現に日々起こっており、専門家と一般市民の両方が態度の問題を真剣に考える必要がある。

## 5. おわりに

ここまで、量子技術の ELSI とその手懐け方を包括的に検討してきた。以下、本稿の議論を振り返る。第 2 節では、量子技術の ELSI に関する主要な論点を明らかにし、各論点に紐づける形で先行研究を整理した。第 3 節では実行可能なガバナンスによる解決のための下準備を行い、第 4 節ではこれらの ELSI に対処するための有効なガバナンスアプローチをいくつか検討した。

本稿の議論から、量子技術の ELSI に対する深い理解と、それに基づく適切な政策立案が、この技術分野の健全な発展にとって不可欠だと言える。今後の研究では、以下の点に特に注意を払う必要がある。

**国際的な協調と規制：**
量子技術のグローバルな影響を考慮すると、国際的な協力と規制の枠組みの構築が不可欠である。ELSI の観点を含む提言を公的機関へ継続的に行い、効果的なガバナンスへと寄与することが求められる。

**多様なステークホルダーの参与：**
量子技術の ELSI に関する議論には、科学者や技術者だけでなく、政策立案者や産業界、一般市民など、多様なステークホルダーの積極的な参加が求められる。

**継続的な教育と人材育成：**
量子技術の健全な社会実装を実現するためには、継続的な教育と量子人材の育成が重要である。ここには、一般市民への教育活動や高度な専門性を持った技術者の育成だけではなく、ELSI について深い理解を伴った人文・社会科学分野の研究者が積極的に関与することも含まれる。

量子技術の ELSI に対する適切な対応は、この技術が国際社会へともたらす利益を最大化しつつ、同時に潜在的なリスクを最小限に抑えるための鍵となる。今後の研究と政策立案において、本稿が提供する洞察が有益な貢献に繋がることを期待する。

# 引用文献リスト

Aboy, M., Minssen T., and Kop, M., 2022, Mapping the Patent Landscape of Quantum Technologies: Patenting Trends, Innovation and Policy Implications, *International Review of Intellectual Property and Competition Law*, 53, 853-882.

Allow, J., Marsh, S., and Meyer, J., A Holistic Approach to Quantum Ethics Education, *IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering*, 119-128.

Ayoade, O., Rivas, P., and Orduz, J., 2022, Artificial Intelligence Computing at the Quantum Level, *Data*, 7(3): 28.

Bhalla, N., Cannizzaro, S., Richardson, K., and Brooks, L., 2023, Enhancement of ethica l frameworks and outline of detailed ethics framework, https://www.techethos.eu/enhancement-of-ethical-frameworks/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Biamonte, J., Dorozhkin, P., and Zacharov, I., 2019, Keep quantum computing global and open, *Nature*, 573, 190-191.

Coenen, C., and Grunwalt, A., 2017, Responsible research and innovation (RRI) in quantum technology, *Ethics and Information Technology*, 19, 277-294.

Coenen, C., Grinbaum, A., Grunwald, A., Milburn, C., and Vermaas, P., 2022, Quantum Technologies and Society: Towards a Different Spin, *NanoEthics*, 16, 1-6.

Derose, K., 2023, Establishing the Legal Framework to Regulate Quantum Computing Technology, *Catholic University Journal of Law and Technology*, 31(2), 145-171.

EC, 2023, European Declaration on Quantum Technologies, https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies, （閲覧日：2024 年 4 月 1 1 日）.

EPSRC, 2018, Quantum Technologies: Public Dialogue Report Summary, https://nqit.ox.ac.uk/sites/www.nqit.ox.ac.uk/files/2018-07/Quantum%20Technologies%20Public%20Dialogue%20Report%20Summary.pdf, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Ferrie, C., 2023, *Quantum Bullsh*t: How to Ruin Your Life with Advice from Quantum Physics*, Sourcebooks Inc.

Grinbaum, A., 2017, Narratives of quantum theory in the age of quantum technologies, *Ethics and Information Technology*, 19, 295-306.

Grobman, S., 2020, Quantum Computing's Cyber-Threat to National Security, *PRISM*, 9(1), 52-67.

Grumbling, E., and Horowitz, M. (ed.), 2019, *Quantum Computing: Progress and Prospects*, National Academies Press.

Hoofnagel, C., and Garfinkel, S., *Law and Policy for the Quantum Age*, Cambridge University Press.

IBM, 2019, Exploring quantum computing use cases for financial services, https://www.ibm.com/downloads/cas/2YPRZPB3, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Jasanoff, S., and Kim, S., 2009, Containing the Atom: Sociotechnical Imaginaries and Nuclear Power in the United States and South Korea, *Minerva*, 47(2), 119-146.

Kop, M., 2022a, Abundance and Equality, *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 7.

Kop, M., 2022b, Quantum Computing and Intellectual Property Law, *Berkeley Technology Law Journal*, Commentaries, https://btlj.org/2022/02/quantum-computing-and-intellectual-property-law/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Kop, M., and Brongersma, M., 2022, Integrating Bespoke IP Regimes for Quantum Technology into National Security Policy, SSRN, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4095763, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Kop, M., Aboy, M., and Minssen, T., 2022, Intellectual property in quantum computing and market power, *Journal of Intellectual Property Law & Practice*, 17(8), 613-628.

Kop, M., 2023a, Quantum-ELSPI: A Novel Field of Research, *Digital Society*, 2, 20.

Kop, M., 2023b, Quantum Technology Impact Assessment, https://futurium.ec.europa.eu/en/european-ai-alliance/best-practices/quantum-technology-impact-assessment, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Kop, M., Aboy, M., de Yong, E., Gasser, U., Minssen, T., Cohen, I., Brongersma, M., Quintel, T., Floridi, L., and Laflamme, R., 2024, 10 Principles for Responsible Quantum Innovation, *Quantum Science and Technology*, 9(3), 035013.

Krelina, M., 2021, Quantum technology for military applications, *EPJ Quantum Technology*, 8: 24.

Krelina, M., and Dúbravčík, L., 2023, Quantum Technology for Defence: What to Expect for the Air and Space Domains, *Transforming Joint Air & Space Power: The Journal of the JAPCC*, 25, 39-46.

Lele, A., 2021, *Quantum Technologies and Military Strategy*, Springer Cham.

Master, Z., and Resnik, D., 2011, Hype and Public Trust in Science, *Science and Engineering Ethics*, 19, 321-335.

McKay, E., 2022, "Keep the fight unfair": Military rhetoric in quantum technology, arXive, https://arxiv.org/abs/2203.01415, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Mikami, K., 2015, State-Supported Science and Imaginary Lock-in: The Case of Regenerative Medicine in Japan, *Science as Culture*, 24(2), 83-204.

Neumann, N., van Heesch, M., Phillipson, F., and Smallegange, A., 2021, Quantum Computing for Military Applications, *2021 International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS)*, 1-8.

OECD, 2023, *OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2023: Enabling Transitions in Times of Disruption*, https://www.oecd.org/sti/oecd-science-technology-and-innovation-outlook-25186167.htm, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Perrier, E., 2022a, Ethical Quantum Computing: A Roadmap, arXive, https://arxiv.org/abs/2102.00759, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Perrier, E., 2022b, The quantum governance stack: Models of governance for quantum information technologies, *Digital Society*, 1, 22.

Possati, L., 2023, Ethics of Quantum Computing: an Outline, *Philosophy & Technology*, 36: 48.

QuantERA, 2022, Towards more gender-balanced research in QT, https://quantera.eu/towards-more-gender-balanced-research-in-qt/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Quantum Delta NL, 2023a, LAUNCHING THE EXPLORATORY QUANTUM TECHNOLOGY ASSESSMENT, https://quantumdelta.nl/news/quantum-delta-nl-launches-exploratory-quantum-technology-assessment-eqta, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Quantum Delta NL, 2023b, IP & TECH TRANSFER, https://quantumdelta.nl/ip-tech-transfer, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

RHC, 2024, RHC report on the regulation of quantum technology applications, https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-horizons-council-regulating-quantum-technology-applications, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Roberson, T., 2021, On the Social Shaping of Quantum Technologies: An Analysis of Emerging Expectations Through Grant Proposals from 2002–2020, *Minerva*, 59, 379–397.

Roberson, T., Leach, J., and Raman, S., 2021, Talking about public good for the second quantum revolution: analysing quantum technology narratives in the context of national strategies, *Quantum Science and Technology*, 6(2), 025001.

Seskir, Z., Migdał, P., Weidner, C., Anupam, A., Case, N., Davis, N., Decaroli, N., Ercan, İ., Foti, C., Gora, P., Jankiewicz, K., La Cour, B., Yago Malo, J., Maniscalco, S., Naeemi, S., Nita, L., Parvin, N., Scafirimuto, F., Sherson, J., Surer, E., Wootton, J., Yeh, L., Zabello, O., and Chiofalo, M., 2022, Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education, *Optimal Engineering*, 61(8), 081809.

Seskir, Z., Umbrello, S., Coenen, C., and Vermaas, P., 2023, Democratization of quantum technologies, *Quantum Science and Technology*, 8: 024005.

Seskir, A., and Wiiloughby, K., Global innovation and competition in quantum technology, viewed through the lens of patents and artificial intelligence, *International Journal of Intellectual Property Management*, 13(1), 40-61.

Smith, F., 2020, Quantum technology hype and national security, *Security Dialogue*, 51(5), 499-516.

Ten Holter, C., Inglesant, P., Srivastava, R., and Jirotka, M., 2022, Bridging the quantum divides: a chance to repair classic(al) mistakes?, *Quantum Science and Technology*, 7: 044006.

Umbrello, S., Bernstein, M., Vermaas, P., Resseguier, A., Gonzalez, G., Porcari, A., Grinbaum, A., and Adomaitis, L., 2023, From speculation to reality: Enhancing anticipatory ethics for emerging technologies (ATE) in practice, *Technology in Society*, 74, 102325.

Vermaas, P., 2017, The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable, *Ethics and Information Technology*, 19, 241-246.

WEF, 2022a, Transitioning to a Quantum-Secure Economy, https://www.weforum.org/pu

blications/transitioning-to-a-quantum-secure-economy/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

WEF, 2022b, State of Quantum Computing; Building a Quantum Economy, https://www.weforum.org/publications/state-of-quantum-computing-building-a-quantum-economy/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

WEF, 2022c, Quantum Computing Governance Principles, https://www.weforum.org/publications/quantum-computing-governance-principles/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

WEF, 2023, Quantum Readiness Toolkit: Building a Quantum-Secure Economy, https://www.weforum.org/publications/quantum-readiness-toolkit-building-a-quantum-secure-economy/, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

Wolbring, G., 2022, Auditing the 'Social' of Quantum Technologies: A Scoping Review, *Societies*, 12(2), 41.

生田力三, 2022, 日本アニメ／漫画（ときどきその他）で描かれる量子情報処理に関する話題, http://ikuta.ocoao.info/misc/Q/Qjapanimation.pdf, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

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, 1-25.

梶谷真司, 2018, 『考えるとはどういうことか：0 歳から 100 歳までの哲学入門』, 幻冬舎新書.

岸本充生, 2024, 科学技術政策と規制政策・競争政策の統合に向けて, 城山ら（著）, 『社会課題対応のための科学技術政策システムの再構築』, 東京財団政策研究所, 13-20.

白井仁人, 2022, 『量子力学の諸解釈：パラドクスをいかにして解消するか』, 森北出版.

内閣府, 2020, 量子技術イノベーション戦略（最終報告）, https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf, （閲覧日：2024 年 4 月 11 日）.

肥後楽, 長門裕介, 鹿野祐介, 2022, 大学生を対象とした量子技術に関する印象の聞き取り調査, 『ELSI NOTE』, 18, 1-51.

森下翔, 肥後楽, 永山翔太, 寺元健太郎, 久保健治, 長門裕介, 鹿野祐介, 小林茉莉子, 岸本充生, 2023, 「量子の未来」をめぐる 23 の話題：株式会社メルカリ mercari R4D 量子情報技術チームへの重点的グループインタビュー, 『ELSI NOTE』, 29, 1-135.

横山淳, 2021, ソフト・ローとハード・ロー再論～CG コードに基づく開示と法定開示を巡って～, https://www.dir.co.jp/report/column/20210701_010686.html, （閲覧日：2024 年 4 月 1

１日）.

ELSI NOTE No. 41 令和 6 年 5 月 1 日

# 量子技術の ELSI を探る：文献レビュー

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 4 月現在）
長門 裕介　大阪大学 社会技術共創研究センター　特任助教（常勤）（2024 年 4 月現在）
岸本 充生　大阪大学 社会技術共創研究センター　センター長（2024 年 4 月現在）

# Exploring Ethical, Legal, and Social Issues of Quantum Technology: A Literature Review

Takuto Enomoto　Osaka University
Yusuke Nagato　Osaka University
Atsuo Kishimoto　Osaka University

〒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

大阪大学

Osaka University
Research Center on
Ethical, Legal and
Social Issues