

# 量子技術の政策、研究開発に関する動向

2023年6月19日

JST研究開発戦略センター  
ナノテクノロジー・材料ユニット  
佐藤 隆博

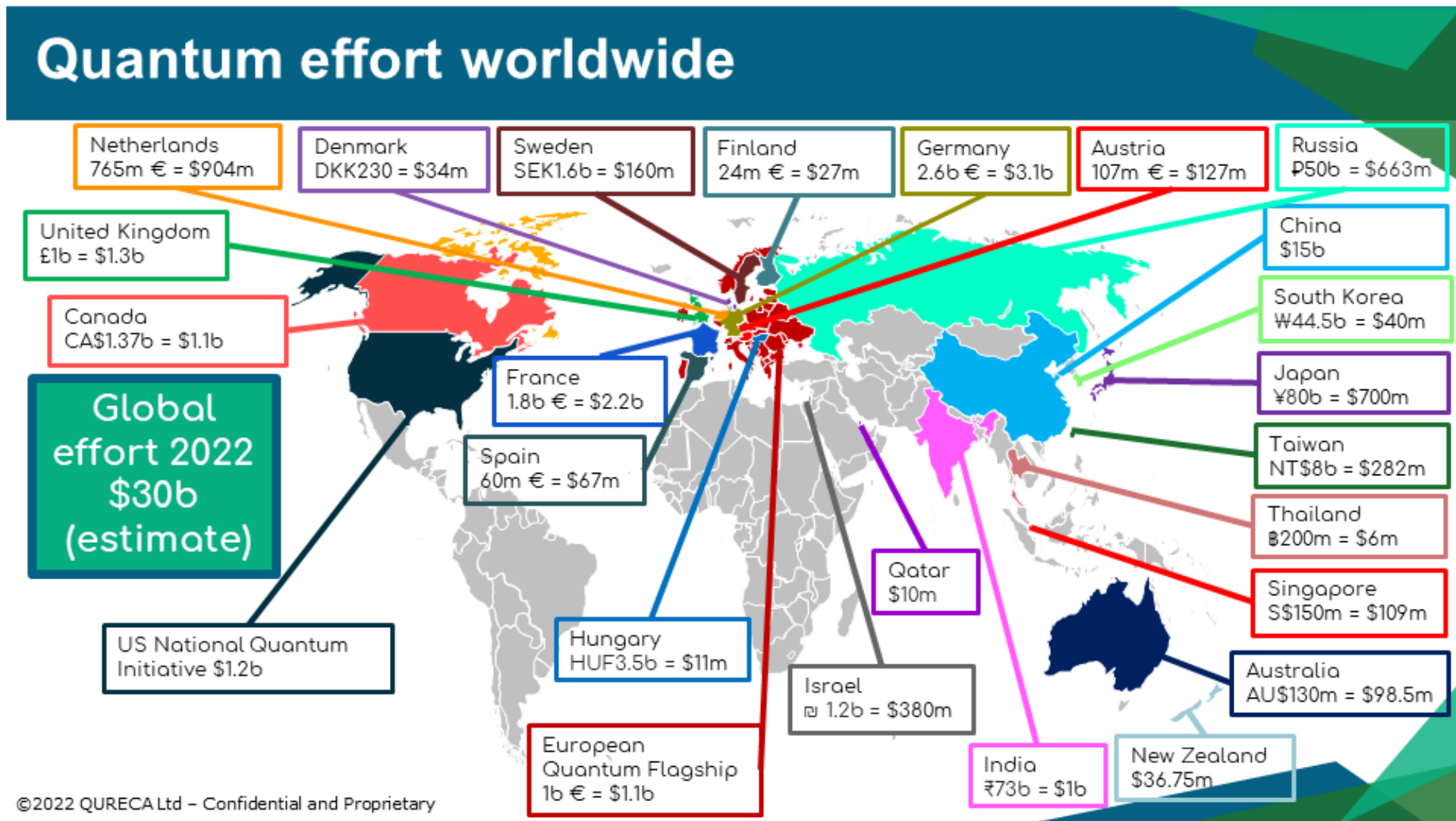


# 本日の内容

1. 各国の支援政策の動向
2. 研究開発・技術の現状
3. 市場動向
4. 論文動向
5. まとめ

# 1. 各国の支援政策の動向

# 各国政府の量子技術への投資額



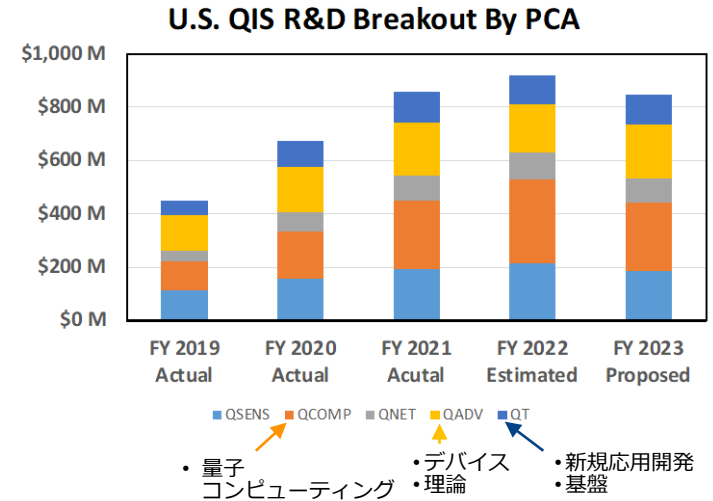
<https://qureca.com/overview-on-quantum-initiatives-worldwide-update-2022/>



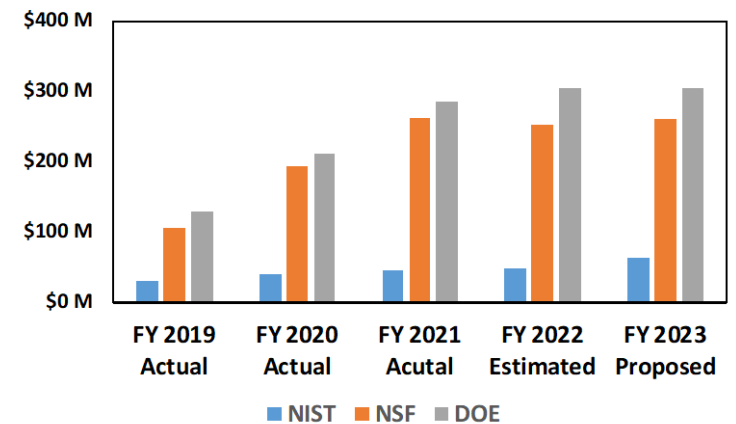
# 米国政府の動向

## 「National Quantum Initiative Acts」の FY2023 予算に関する年次報告書 (2023年1月)

- 横断的なQIS政策トピックの進展に加え、国立標準技術研究所 (NIST)、国立科学財団 (NSF)、エネルギー省 (DOE)、国防省 (DOD)、情報コミュニティ (IC)、米国航空宇宙局 (NASA) が資金提供する量子情報科学 (QIS) 研究開発事業の取り組みの概要を報告。
- NQI センターの設立, 量子経済開発コンソーシアムの設立, **QIS 研究開発活動の新設など**, **NQI プログラムへの持続的な投資**を受けている。各省庁は、2019年度に4億4900万ドル、2020年度に6億7200万ドル、2021年度に8億5500万ドルのQIS研究開発の予算支出実績を報告。2022年度のQIS研究開発予算は9億1800万ドル (概算)、**2023年度は8億4400万ドル (要求予算)** である。



## NQI Act Agencies QIS R&D Budgets



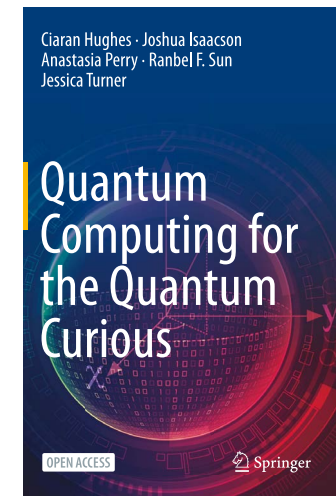
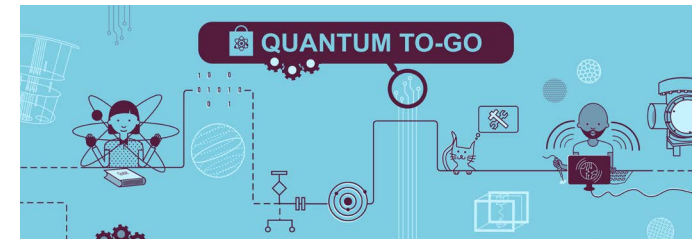
"National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2023 Budget," 2023.

# 米国：OSTPとNSFの量子人材育成計画

## National Q-12 Education Partnership

National Q-12 Education  
Partnership

- 幼稚園の年長から高等学校を卒業するまでの教育期間（K-12）における学生や教師を対象とした、量子技術に関する教育プログラム。
- 米国の**量子技術産業と教育機関**が参画
- 主な活動
  1. 教育カリキュラムの開発
    - 量子力学、量子コンピューティング、量子暗号、量子センシングなど、量子技術の基礎的なトピックをカバーする。
  2. 学習リソースの提供
    - ウェブサイト、ゲーム、実験キットなど学習リソースの開発と提供
  3. **教師研修**の実施
    - 量子技術の基礎的な知識や教育カリキュラムの使い方などを学ぶ



<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-61601-4>

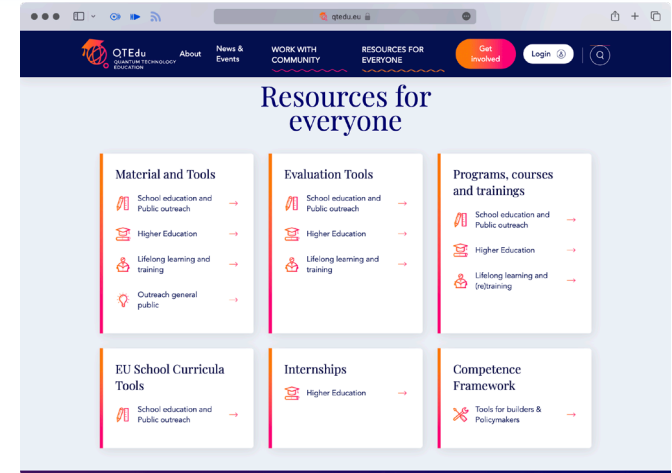
# EUの量子技術教育

## QTEdu

- Quantum Flagshipの一環として実施される量子技術教育のプロジェクト。
- 代表：イタリア学術会議（CNR）
- 340kユーロ（2020～2022）

## QTIndu

- **量子技術人材の高まるニーズに対応**するために、量子技術トレーニングプログラムを開発
- 代表：Qureca Spain
- 5.6M ユーロ（2023）  
（European Health and Digital Executive Agency（HaDEA））





# 欧州高性能コンピューティング共同事業 (EuroHPC JU)

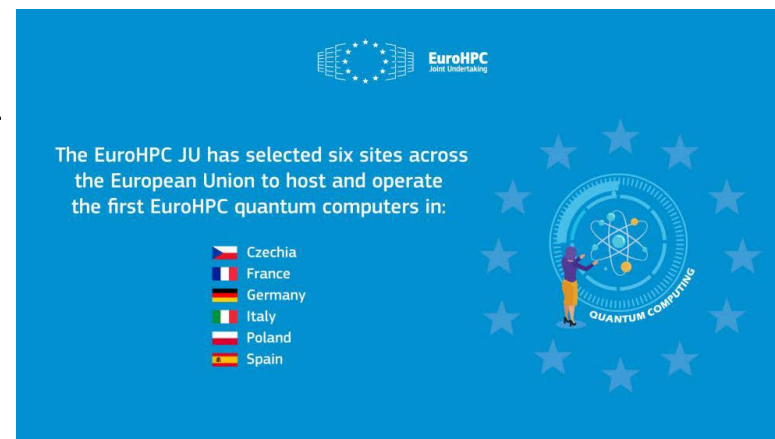
## 欧州初の量子コンピュータを6拠点に設置

- 2023 年後半までに

- チェコ：LUMI-Q (チェコ、フィンランド、スウェーデン、デンマーク、ポーランド、ノルウェー、ベルギー、オランダ、ドイツ)
- ドイツ：ライプニッツ・スーパーコンピューティング・センター (LRZ)
- スペイン：バルセロナ・スーパーコンピューティング・センター (BSC)
- フランス：GENCI社/フランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA)
- イタリア：CINECA (大学、研究機関、イタリア教育大学研究省 (MIUR) で構成)
- ポーランド：ポズナン・スーパーコンピューティング&ネットワークング・センター (PSNC)

で利用可能となる予定。

- 総投資額：100Mユーロ以上
- 欧州の技術のみを取り入れ、欧州の投資の活用を目的としている。産業・科学・社会に関わる幅広い応用を支援する。
  - 人体のデジタルツイン作成による新薬開発
  - 複雑な物流やスケジューリング問題の解決
  - 新材料の仮想環境での開発と実証試験



# 中国政府の動向

## 中国国民経済・社会発展第14次五カ年計画（2021～2025年）

- テクノロジーフロンティア分野における研究
  - 新世代人工知能（AI）、**量子情報**、集積回路、脳科学と脳様研究、遺伝子とバイオテクノロジー、臨床医学と健康、深宇宙・深地層・深海と極地探査等に注目。
- 国防・軍の近代化・強化
  - 軍民科学技術協力において、第13次五カ年計画では触れられていなかった生物学、新エネルギー、AI、**量子技術**といった特定の科学技術分野に言及。

## 量子技術への財政的支援

- Kania and Costello（2018）は**数B米ドル**、Brennen et al.,（2021）も**1B米ドル規模**、Kung a Fancy（2021）は国家研究所の建設も含めた予算として**5年間で15.3B米ドル**、Parker et al.,（2022）らは**年間84M米ドルから3B米ドル近く**と推測。いずれも中国政府が発表している数字とは大きく異なっている。

# 主要国の量子技術政策まとめ

	政策動向	内容・予算規模
米	<ul style="list-style-type: none"> <li>国家量子イニシアティブ (NQI) 法 (2018)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.28Bドル (5年間) 449Mドル (2019)、672Mドル (2020)、855Mドル (2021)、918Mドル (2022、概算)</li> </ul>
中	<ul style="list-style-type: none"> <li>科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画 (2016)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1,200億円 (5年間) 「国家重点研究計画」、「量子情報科学国家実験室」</li> </ul>
EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>Horizon Europe (2021~2027)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>95.5Bユーロ (7年間) Investing in alternative quantum computation and simulation platform technologies (20Mユーロ)、Quantum Space Gravimetry (17Mユーロ)、Next generation quantum sensing and metrology technologies (10Mユーロ) 等</li> </ul>
独	<ul style="list-style-type: none"> <li>連邦教育研究省 (BMBF) 「Agenda Quantensysteme 2030」 (2021.3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>~2Bユーロ (2021~ 5年間) 量子通信、量子コンピューティング、量子センサおよび周辺技術 (電子機器、光源、光学部品、材料、インターフェースなど) の研究開発</li> </ul>
英	<ul style="list-style-type: none"> <li>UK Digital Strategy (2022.6)</li> <li>英国研究・イノベーション機構 (UKRI) 5か年戦略「Transforming tomorrow together」 (2022.8)</li> <li>National Quantum Strategy (2023.3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AI、半導体、量子コンピュータなどに対するイノベーションの支援</li> <li>7.9Bポンド。AI、量子技術、生物工学など、将来技術への投資</li> <li>2024年より10年間で25Bポンドを量子技術の研究開発・実用化等に投資</li> </ul>
仏	<ul style="list-style-type: none"> <li>国家量子戦略 (2021.1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1.8Bユーロ (2021~ 5年間?) 量子コンピュータ、量子センサ、量子暗号通信などを中心に、産業のバリューチェーン、人材育成・科学研究・技術実験を強化</li> </ul>
日	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子科学技術 (光・量子技術) の新たな推進方策 (2017.8)</li> <li>量子技術イノベーション戦略 (2020.1)</li> <li>量子未来社会ビジョン (2022.4)</li> <li>量子未来産業創出戦略 (2023.4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Q-LEAP (2018~ 10年間)、37億円 (2022) 量子情報処理、量子計測・センシング、次世代レーザーの3つが中心</li> <li>JST未来社会創造事業 (量子慣性センサー、光格子時計、等)</li> <li>ムーンショット型研究開発制度目標6 (2021~)、1480億円 (基金) の内数、2050年までに誤り耐性型汎用量子コンピュータ実現</li> </ul>

## 2. 研究開発・技術の現状

# 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2023）

- 2023年4月公開
- CRDSが科学技術分野別に発行した4分冊の中の一つ。  
（他には「環境・エネルギー分野」、「システム・情報科学分野」、「ライフサイエンス・臨床医学分野」）
- 総ページ数 426ページ
- 執筆協力者 約105名



<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-FR-04.html>

# 世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流

## 蓄電デバイス

LIBの着実な高性能化が進む中、全固体型、金属-空気などの次世代LIBが進展。またNaイオン、多価イオン、Li-Sなどの革新電池の研究にも進展。



全固体電池 (LIBTEC)

## 再生可能エネルギーによる物質変換

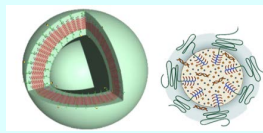
再生可能エネルギーを駆動力とした水素等の燃料・化成品合成技術が進展。高効率プロセスのための触媒、電解質探索が加速。



大型水電解システム (旭化成)

## mRNAナノ医薬

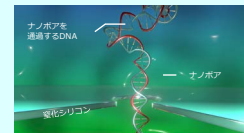
COVID-19 mRNAワクチンの成功を受け、様々な感染症に対するmRNAワクチンや、ワクチン以外の医療目的（がん免疫療法、ゲノム編集治療など）に向けたmRNAナノ医薬の開発が加速している。



多様な医薬ナノ粒子 (東大)

## 生体分子シーケンス

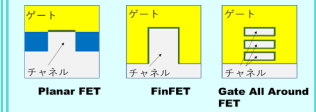
DNAやRNAの配列に加え、タンパク質の配列や分子の高次構造・修飾などを検出する技術が進展。特に、ナノテクを駆使した1細胞・1分子レベルでの検出技術に期待。



ナノポアDNAセンサー (阪大)

## 先端半導体

従来のCMOSを超える新構造・新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現をめざす研究開発に期待。Si系以外の新材料チャンネルの登場も視野に。



FETの構造

## 脳型AIチップ

高エネルギー効率でAI処理を行う脳型AIチップ開発で、デジタル・アナログNN回路、コンピュータインメモリ、ニューロモルフィック、リザバコンピュータリングが進展。



DNN推論アクセラレータ (東工大)

## 量子コンピューティング

超伝導量子ビット数拡大、周辺エレクトロニクス、古典とのハイブリッド等、実用的な計算での量子優位性実現に向けた開発が活発。超伝導方式以外にも進展。

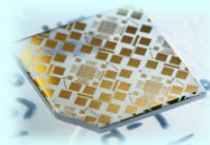


量子コンピュータ

(© RIKEN Center for Quantum Computing)

## 次世代パワー半導体

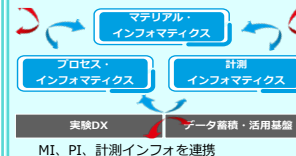
SiC、GaNの実用化が進み、Siとともにデバイス高性能化、ウェアの大口径化へ。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などワルトラワイドバンドギャップ半導体の開発が活発化。



Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタチップ (NICT)

## データ駆動型材料設計・創製

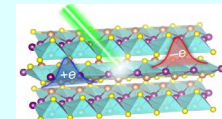
データ科学と実験科学・計算科学・理論科学の連携により物質設計・創製を革新。ハイスループット実験、自律的最適化手法やデータ蓄積・活用基盤の整備も重要。



MI、PI、計測インフォを連携

## 低次元・トポロジカル材料

低次元性やトポロジーに起因する特徴的な電子状態を活かした次世代の電子デバイスやエネルギー変換デバイスの候補として、低次元材料やトポロジカル材料に注目。



トポロジカル光電流発生 (理研)

JST CRDS 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2023) より抜粋



# 研究開発課題

## 量子コンピューティング 量子シミュレーション

### NISQマシンのキラーアプリ探索

- 量子化学計算/機械学習
- 量子超越性
- 古典-量子ハイブリッドアルゴリズム

### ゲート方量子コンピュータ実機の試作

- 超伝導量子ビット系

### エラー体制量子コンピュータ 基板技術

- 量子ソフトウェア
- 量子誤り訂正方式
- 様々な量子ビット系

### 複雑系の計算が可能な量子 シミュレータ開発

## 量子計測・センシング

### ダイヤモンドNV中心作成技術

- 大型・高品質化 ( $T_2$ ) 向上
- 新材料探索

### ダイヤモンドNV中心と量子もつれ光センサの医療・診断応用

- プロトタイプ製作
- 脳磁計・心磁計
- イメージング技術

### 原子干渉計・光格子時計の 実用性探索

- 小型化・可搬化
- 高精度化
- 「秒」の再定義・標準化

## 量子暗号・通信

### QKDの社会実装と一般普及の促進

- BB84運用・品質保証
- 市場投入・キラーアプリ探索
- 低価格化

### 標準化活動への積極的寄与

- ETSI & ITU-T
- 耐量子-公開鍵暗号

### 高速化・長距離化に向けた 量子中継技術、ネットワーク技術

- 量子メモリー・全光量子
- 量子望遠鏡
- 量子インターネット

## 量子マテリアル

### トポロジカル量子物質

- トポロジカル量子コンピュータ
- トポロジカル絶縁体
- ワイル磁性体

### スピントロニクス材料

- 半導体スピントロニクス
- スピンMOSFETデバイス

### エネルギー変換材料

- スピン-ゼーベック効果
- スピン流

### フォトニクス材料

- メタマテリアル
- シリコン/ナノフォトニクス

## 共通量子技術基盤

原子・分子・光科学  
量子光学  
量子エレクトロニクス

## 単一光子制御技術

- 効率化・室温動作・光子検出器
- 量子もつれ光子、多体量子もつれ制御

## 異種の量子ビット間結合（ハイブリッド量子科学）

- 固体量子ビット & 光など

## 量子ビット基盤技術

- 様々な量子ビット系

## 材料設計・製造、計測技術

CRDS 戦略プロポーザル「量子2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」 (2020)

# 量子技術の現状

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	基礎理論 の着想	技術コン セプト策 定	PoC実験	実験室で の技術検 証	関連環境 での技術 検証	関連環境 でのデモ	実環境で のプロト タイプ	システム 運用テスト・ 認証	最終段階、 実運用
量子コンピュータ（誤り耐性）		■	■	■					
量子コンピュータ（NISQ）					■	■			
量子アニーラ						■	■		
QKDネットワーク							■	■	
QKD（衛星利用）						■	■		
耐量子計算機暗号							■	■	
量子通信・量子インターネット		■	■	■					
光格子時計					■	■	■		
量子慣性航法				■	■	■			
量子磁気センサ			■	■	■				
量子イメージング			■	■	■				

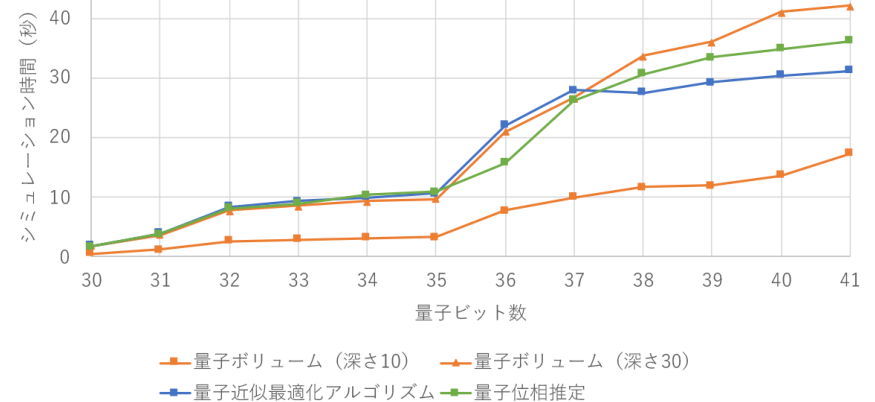
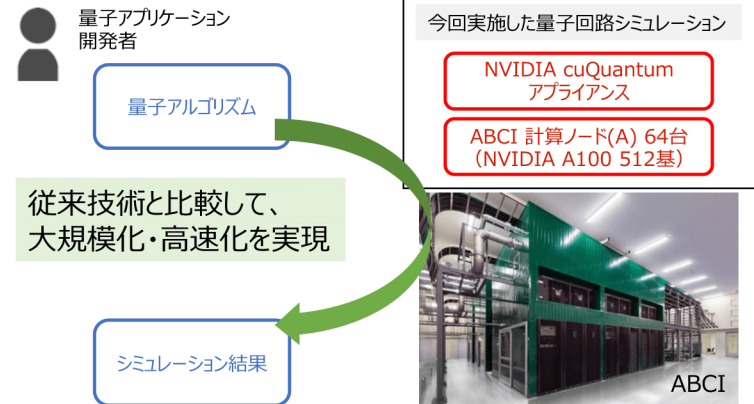
M. Krelina, "Quantum technology for military applications", EPJ Quantum Technology 8, 24 (2021). を参考にCRDS作成



# 産総研：世界最速の量子回路シミュレーションに成功

- 2022年12月  
世界最速の41量子ビット量子回路シミュレーションに成功
- GPUに最適化された世界最速の41量子ビット量子回路シミュレーション
- NVIDIAが開発した量子回路シミュレータを産総研AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) 上で実行して高速化を実現
- ABCI計算ノード64台 (GPU 512基) で構成
- 成果を活用した量子・古典ハイブリッド計算テストベッドの構築を推進

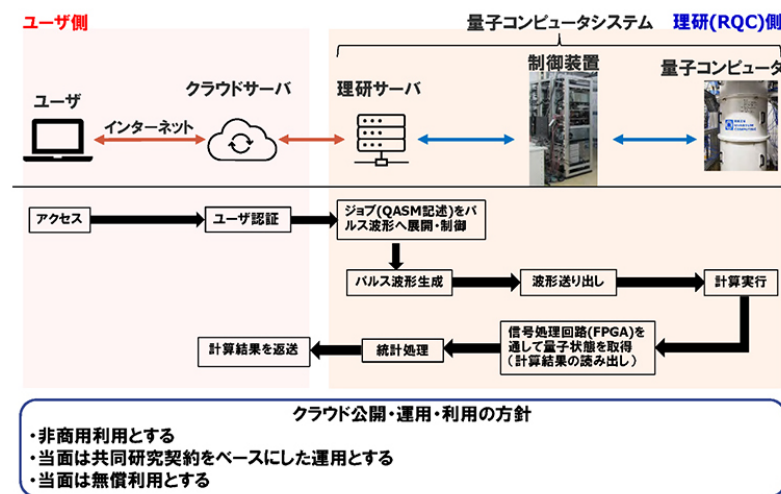
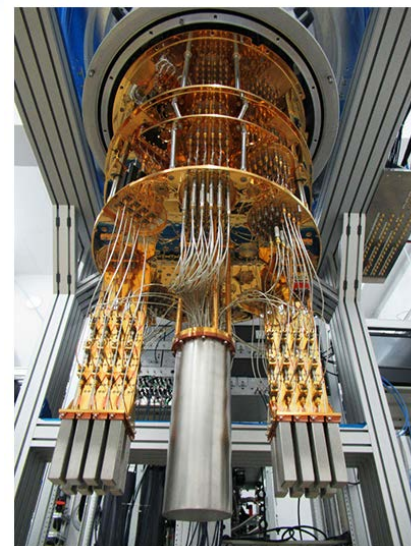
大規模な量子計算を試すことができるオープンなクラウド型計算システム



<https://www.digiarc.aist.go.jp/publication/quantum/20221219.html>

# 理研：国産「量子コンピューター」初号機公開

- 2023年3月  
最大64個の超伝導量子ビットを制御。
- 超伝導量子コンピュータをどこからでも利用できるよう、インターネットを介して外部利用が可能な「量子計算クラウドサービス」を提供（現在1日/週の公開）。
- テストベッドとして提供することで、量子ソフトウェア開発者や企業開発者からのフィードバックにより、量子コンピュータ研究開発の加速が期待される。

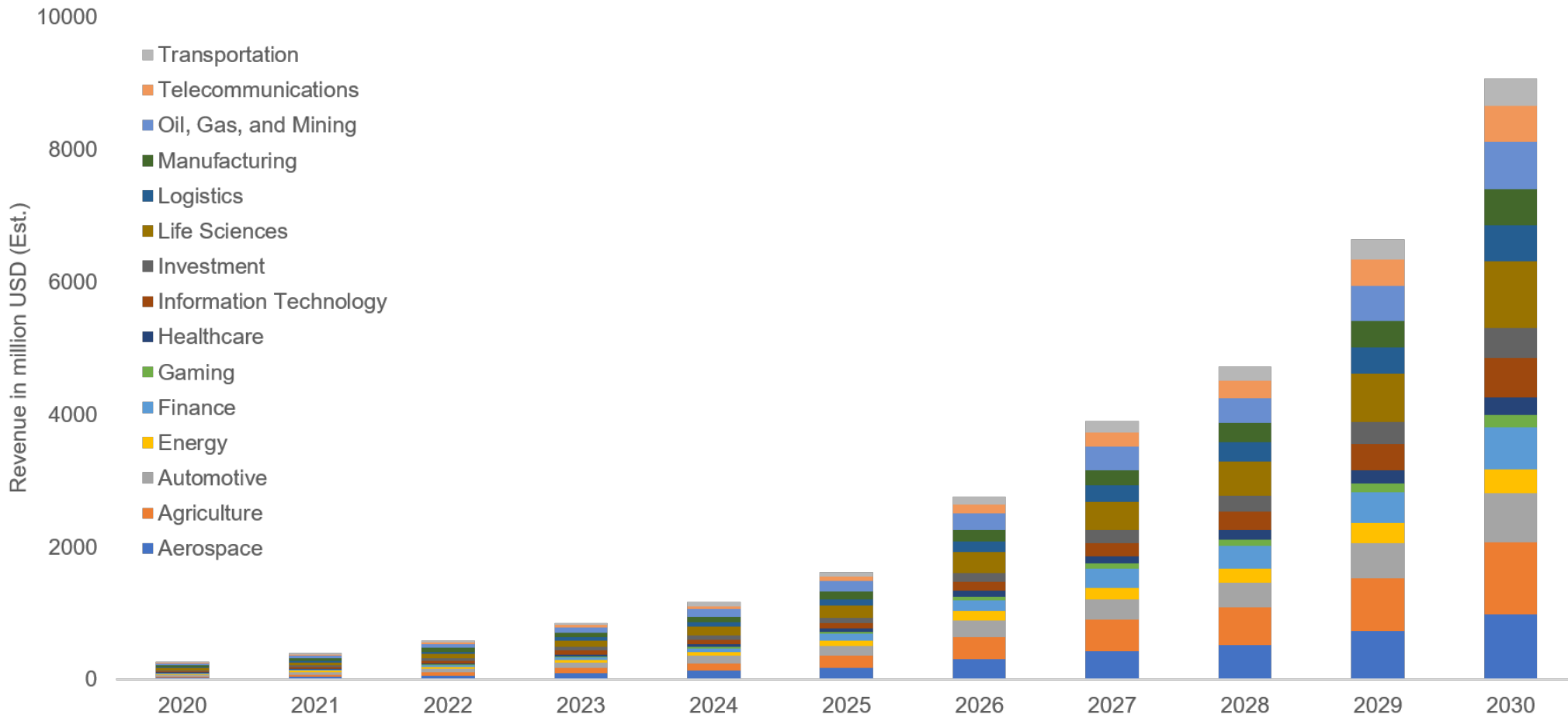


[https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324\\_1/index.html](https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230324_1/index.html)

# 3. 市場動向

# 世界の量子コンピューティング市場の売上高予測（内訳）

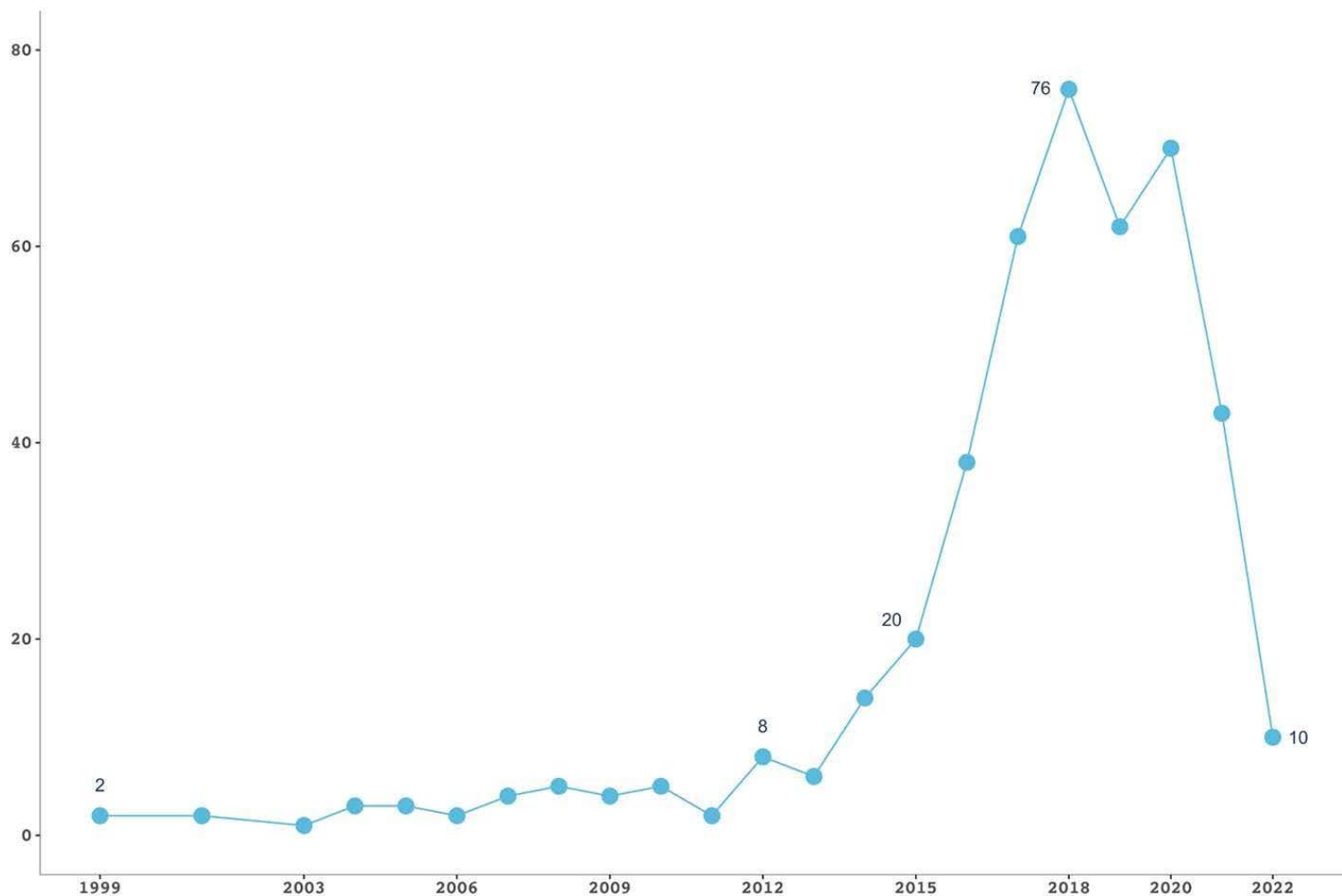
Global enterprise quantum computing market revenue by industry from 2020 to 2030



Source: Tractica

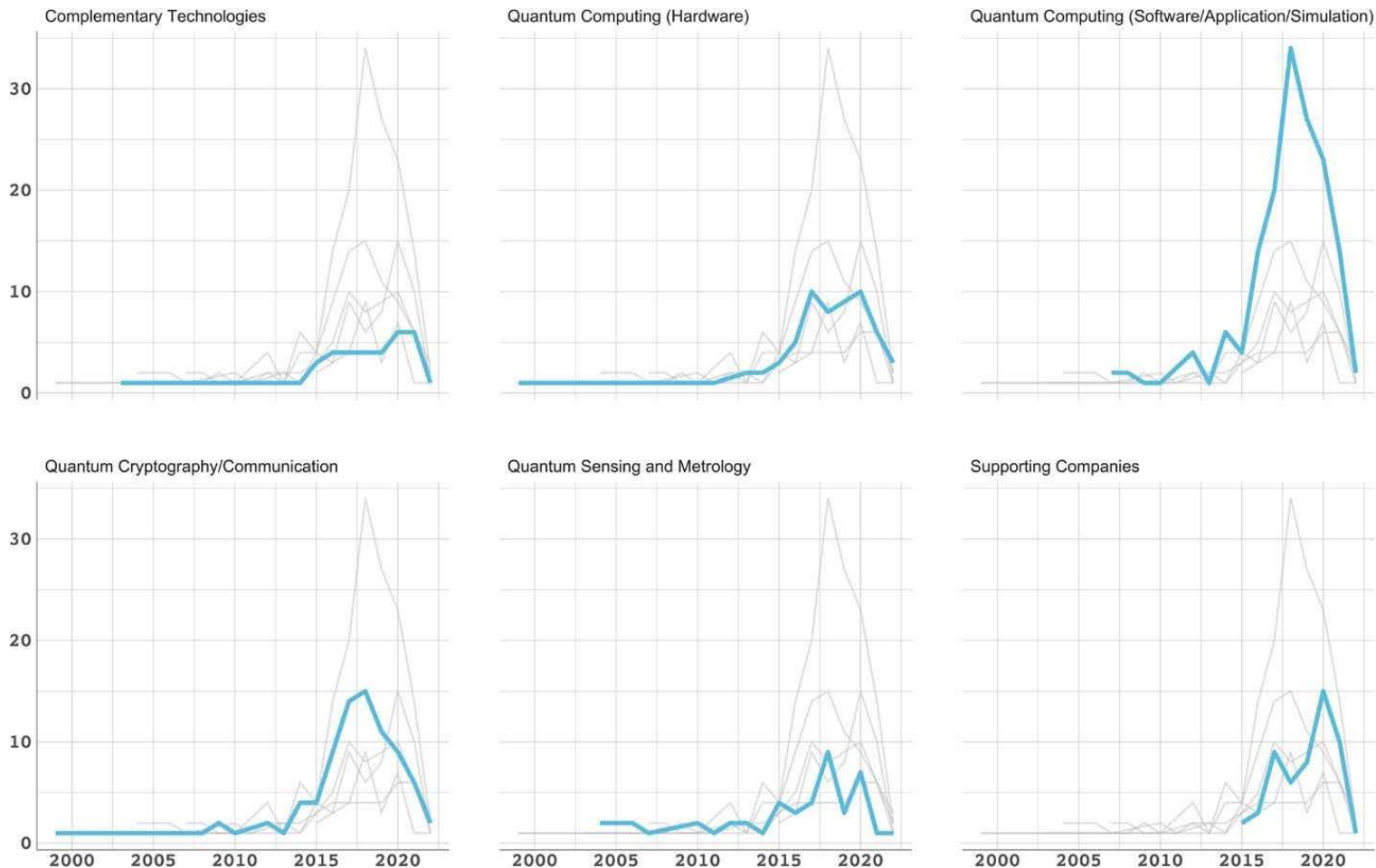
<https://standards.ieee.org/beyond-standards/how-can-quantum-computing-and-artificial-intelligence-transform-the-healthcare-industry/>

# 量子技術の新規スタートアップ企業数推移



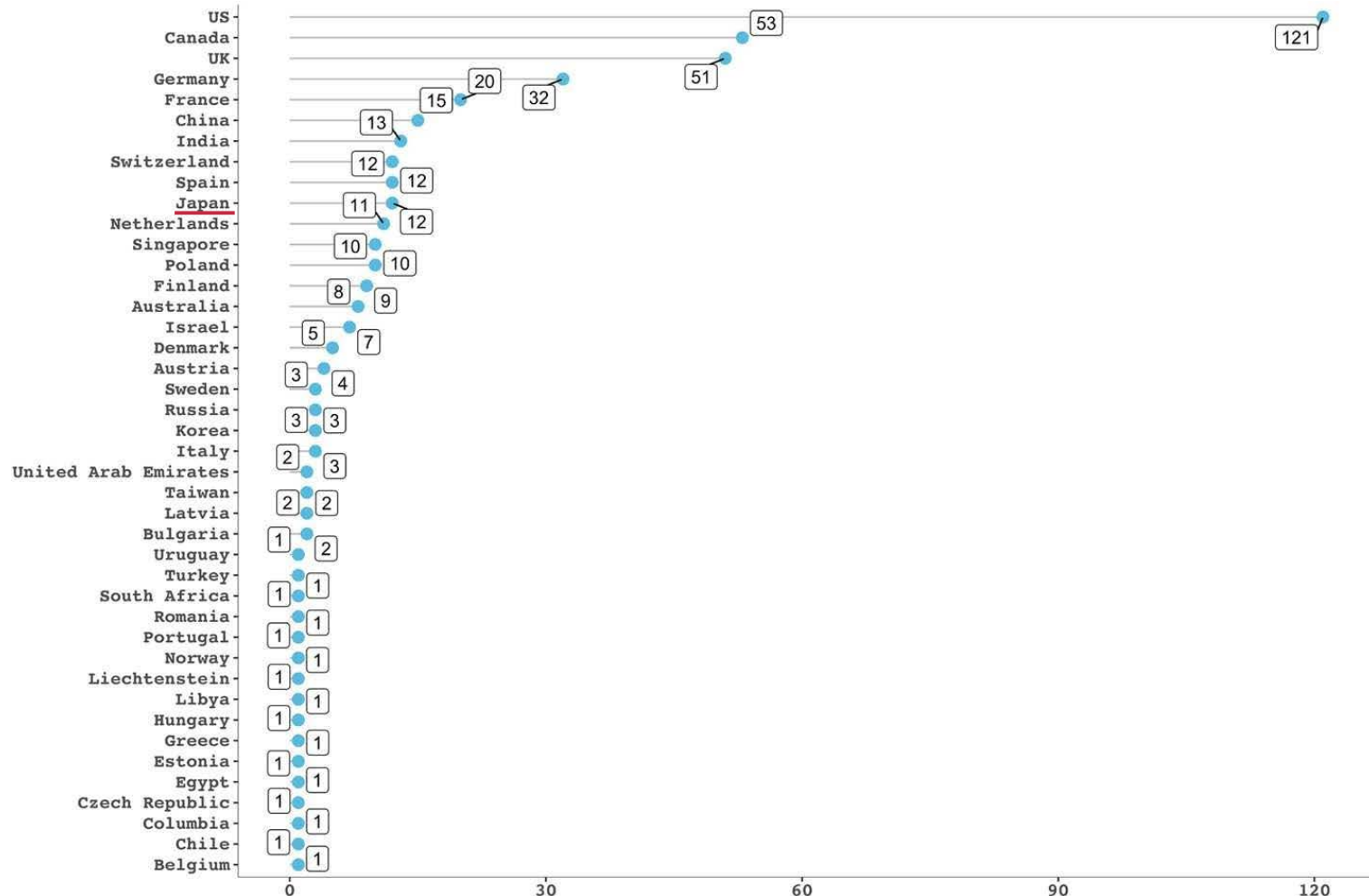
Z. C. Seskir, R. Korkmaz, and A. U. Aydinoglu, "The landscape of the quantum start-up ecosystem," EPJ Quantum Technol., vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1140/epjqt/s40507-022-00146-x.

# 量子技術の新規スタートアップ企業数推移（領域別）



Z. C. Seskir, R. Korkmaz, and A. U. Aydinoglu, "The landscape of the quantum start-up ecosystem," EPJ Quantum Technol., vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1140/epjqt/s40507-022-00146-x.

# 量子技術のスタートアップ企業数（国別）



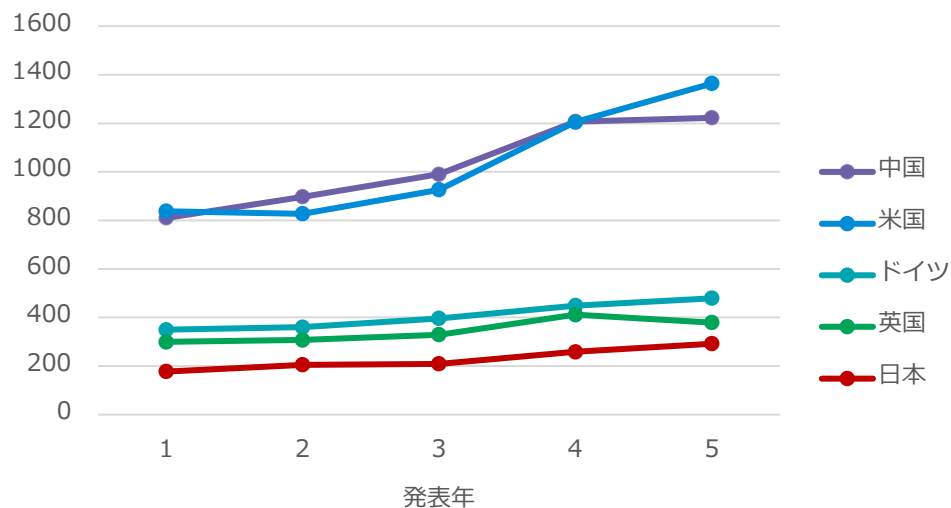
Z. C. Seskir, R. Korkmaz, and A. U. Aydinoglu, "The landscape of the quantum start-up ecosystem," EPJ Quantum Technol., vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1140/epjqt/s40507-022-00146-x.

## 4. 論文動向

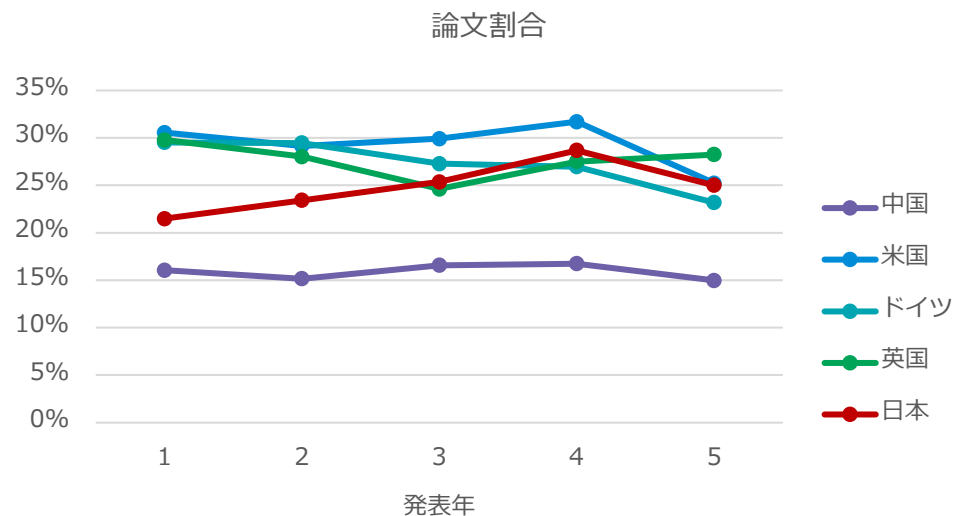


# 量子情報処理

量子コンピューティング・量子シミュレーション 総論文数



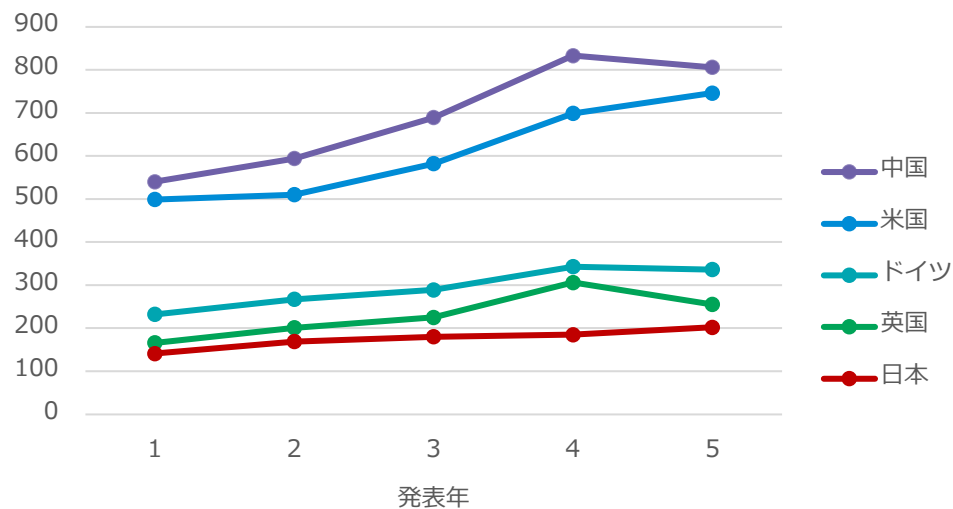
量子コンピューティング・量子シミュレーション Top10%



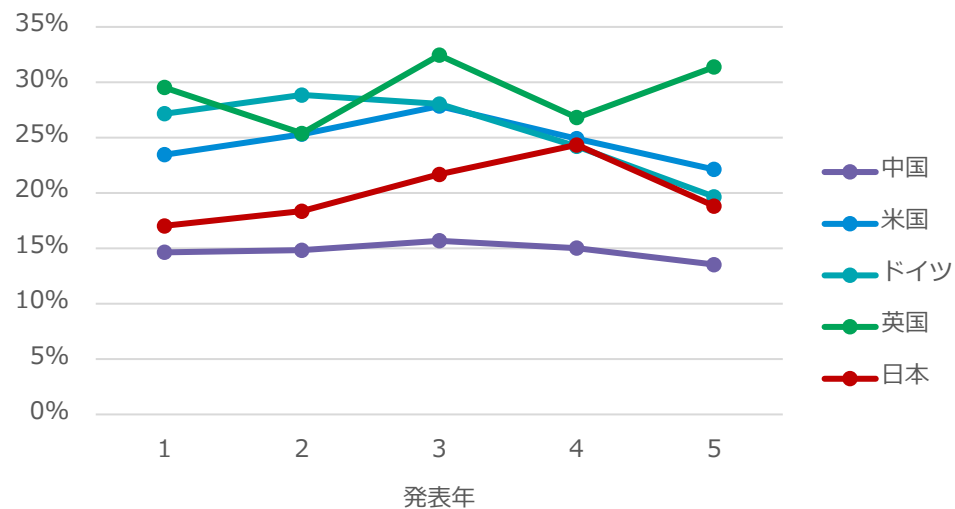
エルゼビア Scopusカスタムデータを基に、JSTが集計、作成

# 量子計測・センシング

量子計測・センシング 総論文数



量子計測・センシング Top10%論文割合



エルゼビア Scopusカスタムデータを基に、JSTが集計、作成

## 5. まとめ

- 量子科学技術に対して各国で多額の研究開発投資が継続されている。また、基礎研究だけでなくTRL6以上を目指すような実用化研究の取組が増加。
- 初等中等教育から博士、企業技術者のトレーニングまで、各国で量子技術に関する人材育成の取り組みが進められている。
- 量子技術関連の企業設立は2018年をピークに少なくなっている。考えられる要因として、人材の不足、ハードウェアの成熟、ユースケースの不足などが挙げられる。
- 総論文数では米・中が圧倒的だが、Top10%論文数で日本は健闘している。

ご静聴ありがとうございました