

量子技術の 研究開発・政策動向

JST CRDS
嶋田義皓

2021.10.27

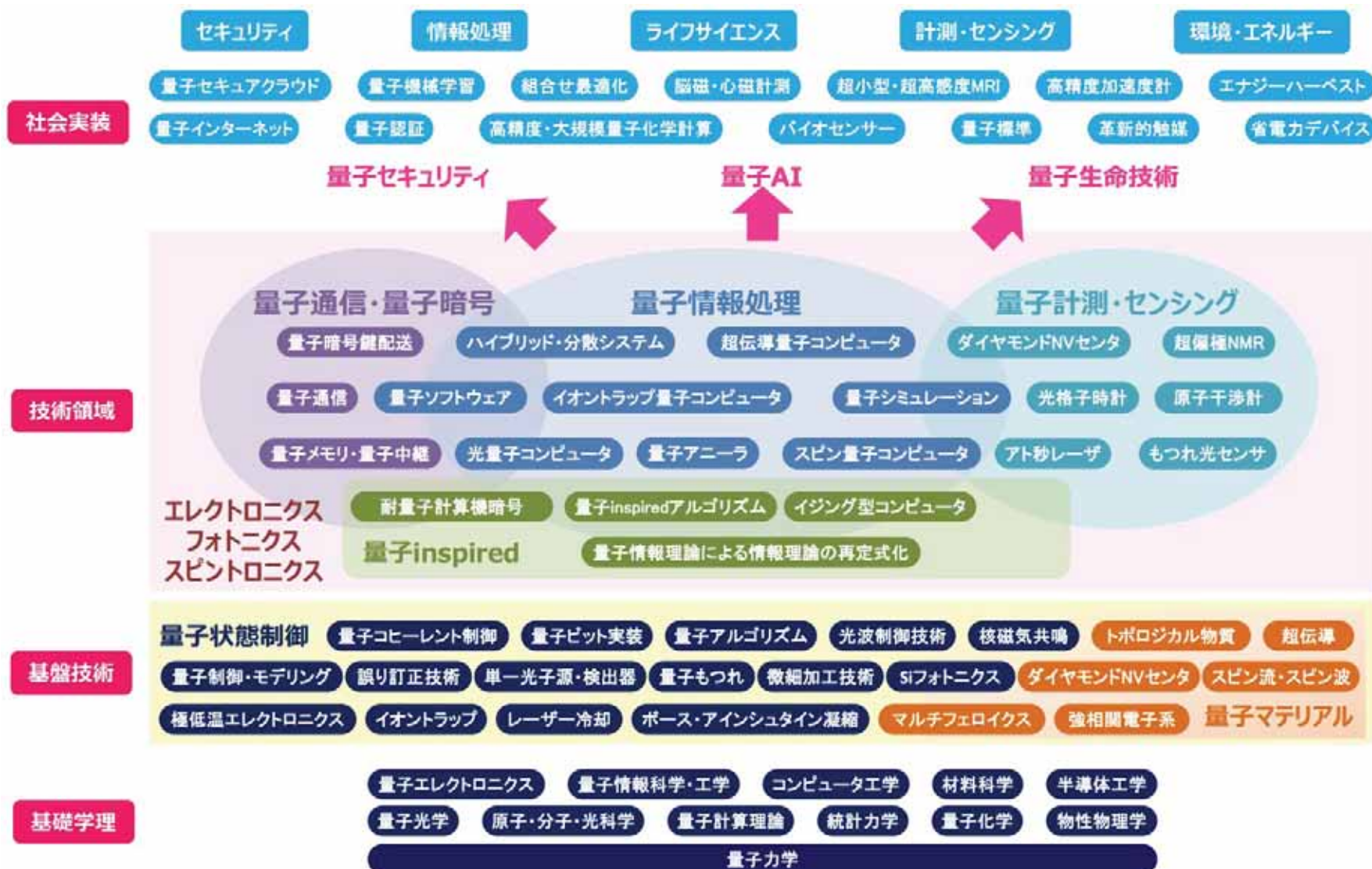
量子技術イノベーション戦略見直し検討WG（第1回）

第2次量子革命

次なる“半導体”級イノベーションへの期待



量子技術イノベーション戦略（研究開発課題）



主要国の量子技術政策

	政策動向	内容・予算規模
	- 量子情報科学の国家戦略概要 (2018.9) - 国家量子イニシアティブ法 (2018.12)	～1,400億円 (\$1.28B) / (2019-24) 「国家量子イニシアティブプログラム」 DOE : 140億円 (\$125M) /年 量子情報研究センター (最大数5) NSF : 56億円 (\$50M) /年 量子研究・教育センター (最大数5) NIST : 89億円 (\$80M) /年 量子情報研究・計量標準、ワークショップ
	科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画 (2016)	> 1,200億円/ (2016-20) 「国家重点研究計画」 「量子情報科学国家実験室」 (合肥市)。第1研究棟完成 (2020年)
	Quantum Manifesto (2016.5)	～1,300億円 (€1B) / (2019-28) 「Quantum Flagship」 20課題が採択
	- ハイレク戦略2025 (2018) - BMBF「量子技術」 (2018.9) - 未来パッケージ (2021.1)	～840億円 (€650M) / (2019-22) 量子計算、量子通信、計測、量子分野の技術移転と産業の参画推進 ～2,600億円 (€2B) / (2021-2025) 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
	量子技術国家戦略 (2014.12)	～600億円 (～ £ 400M) / (2015-19) 「UK National Quantum Technologies Programme」 量子イメージング、量子センシング、量子通信、量子コンピューティング & シミュレーションの4つのhubs構築など
	MESRI「国家量子戦略」 (2021.1)	～2,300億円 (€1.8B) / (2021-25 ?) 量子戦略の7本の柱 (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・技術実験を大幅に強化

1. | 研究開発の動向

NISQ時代

フルの量子コンピュータは当分手に入らない。しかし…

Noisy

ノイズあり

誤り訂正（論理化）なし。高エラー率。

Intermediate-Scale

中規模スケールの

50～100量子ビット程度

Quantum device

量子デバイス

量子効果を使うデバイス

シミュレーションが**難しい**

複素数の係数が 2^N 個必要

（50Qの状態ベクトル＝メモリ16PB）



表裏一体

何かには使えそう

限られたHW資源を活かす

知恵・ソフトウェアが重要

NISQ量子コンピュータのキラアプリ探索

量子化学・量子多体系

問題設定が量子力学で定式化されてい

(例) 高精度の物性予測、分子・材料設計、
反応・ダイナミクスのシミュレーション

機械学習・最適化

問題設定は非量子だが、線形代数構造。

(例) 巨大な行列の固有値・特異値、
PCA、クラスタリング、分類、SVM

優位性のあるタスクや高効率の計算方法などは今まさに研究萌芽期

量子多体系を機械学習で分析

- G. Carleo, M. Troyer, "Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks", Science 355, 602 (2017).
- M. Broughton et al., "TensorFlow Quantum: A Software Framework for Quantum Machine Learning", arXiv:2003.02989.
- K. Osaki, K. Mitarai, K. Fujii, "Classically Optimized Variational Quantum Eigensolver for Topological Ordered Systems", AQIS 2020.

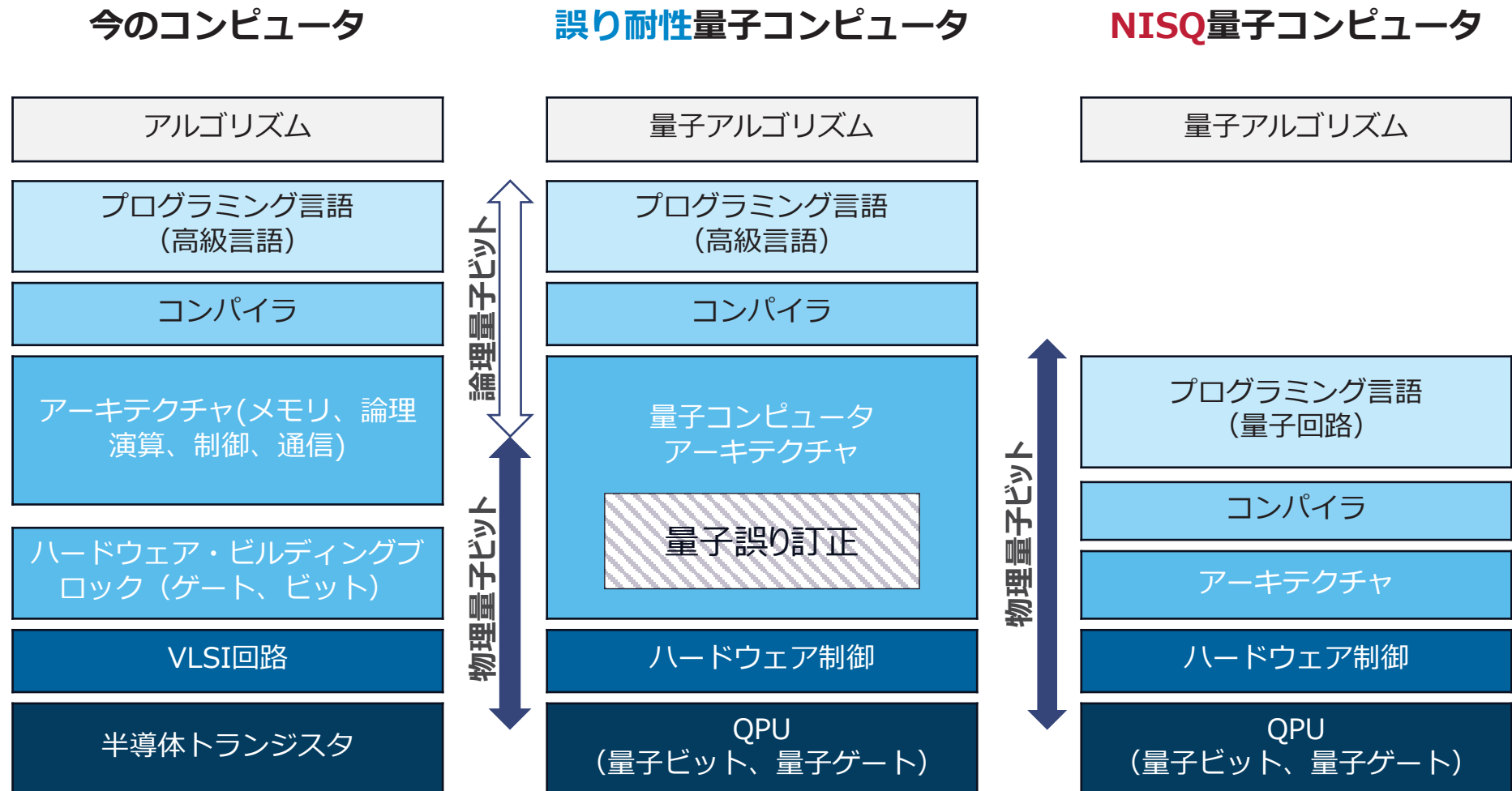
変分アルゴリズム／量子機械学習の優位性

- M. Cerezo et al., "Variational Quantum Algorithms", arXiv:2012.09265.
- Y. Liu et. al. "A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning", arXiv:2010.02174.
- H.-Y. Huang, et al. "Power of data in quantum machine learning", Nature communications 12, 1-9 (2021).

クラウド利用が進むNISQ量子コンピュータ

			IBM	GCP	Azure	AWS
ソフトウェア 開発プラットフォーム (SDK)	Qiskit (by IBM)		●	●		
	Cirq+TFQ (by Google)			●		
	Braket (by Amazon)					●
	PennyLane (by Xanadu)			●		
	Tket (by CQC)			●		
	Q# (by Microsoft)				●	
ハードウェア (QPU)	超伝導	IBM	●			
		Google		●		
		Rigetti				●
		qci			●	
	イオン トラップ	IonQ	●	●	●	●
		Honeywell			●	
	QAマシン	D-wave				●

誤り耐性量子コンピュータにむけて



(参考) F. T. Chong et. al, "Programming language and compiler design for realistic quantum hardware, Nature 549, 180 (2017).

量子通信・量子インターネット研究動向

日本

- グローバル量子暗号通信ネットワーク

中国

- National quantum secure communication backbone network (京滬幹線)

米国

- Center for Quantum Networks (NSF)
- Long Island Quantum Repeater Network
- Chicago Quantum Network

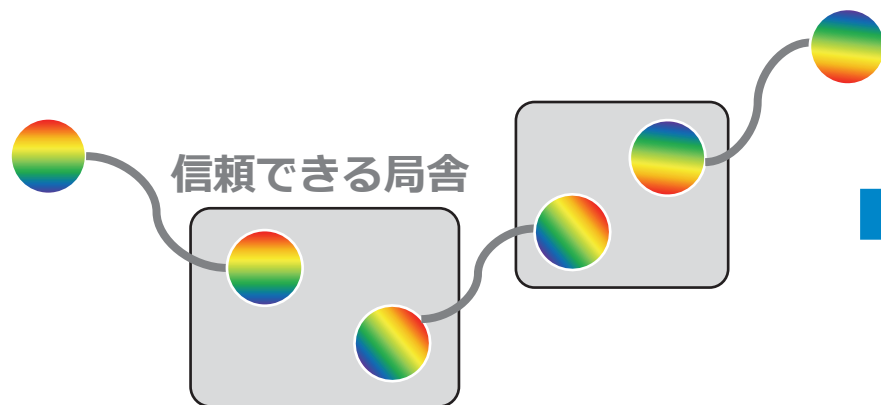
欧州

- Quantum Inernet Alliance (オランダ)
- Q.Link.X (ドイツ)
- OpenQKD (スペイン)

量子中継技術

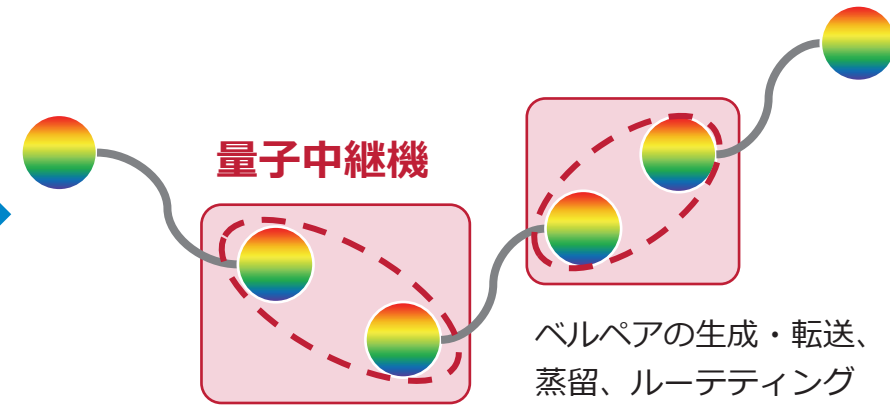
量子暗号鍵配送 (QKD)

「信頼できる局舎」によるリレー



量子インターネット

量子中継機による量子情報ネットワーク



		共有されるデータ	
		デジタルデータ (非量子)	量子データ (量子状態)
通信	ビット (非量子)	インターネット	
	量子 ビット	量子暗号通信 (QKD)	量子インターネット

QKDユースケース例@中国

中国工商银行

- ネットバンキングのデータの北京・上海間量子暗号通信に成功。
- 量子乱数発生器を利用して、ユーザー管理・認証のセキュリティ向上。

<http://finance.people.com.cn/n1/2021/0512/c1004-32101145.html>

徽商银行（HQ：安徽省・合肥）

- 主データセンターとバックアップセンターの間でのQKD利用。
- 支店と中国金融認証局（CFCA）の間でのデジタル証明書の発行・送信。

<https://www.cfca.com.cn/20171106/100002298.html>

海南省

- 衛星利用で政府データセンタ、産業商業管理局の科学技術部門、地域の人的資源社会保障局間で量子通信実証PJ。

<https://www.yicaiglobal.com/news/hainan-enters-quantum-communications-era-with-demonstration-project>

具体的な研究開発課題

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

ゲート型量子コンピュータ実機の試作

- ・超伝導量子ビット系

エラー耐性量子コンピューター基盤技術

- ・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中心作製技術

- ・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

2. | 推進方策

量子技術イノベーション戦略（推進方策）

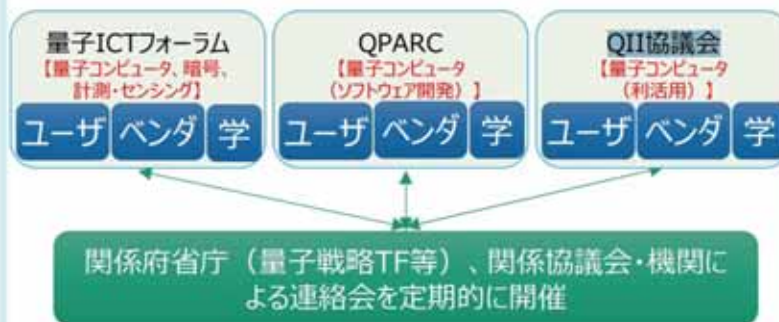
量子技術イノベーション戦略に基づき重点的に取り組む事項

参考：統合イノベーション戦略推進会議資料4-5

量子技術イノベーション会議を中心に、「量子技術イノベーション戦略」（令和2年1月決定）に基づく以下の取組を強力に推進する。

量子技術イノベーション協議会

- 量子ICTフォーラム・QPARC・QII（量子イノベーションイニシアティブ）協議会など、民間団体が主導する個別の協議会における活動等を通じて、量子技術の社会実装に向けた協調領域でのオープンイノベーションやエコシステムの形成を促進する。
- 個別協議会の活動に加え、関係省庁・機関も参加する形で定期的に連絡会を開催し、各協議会の連携を支援、社会実装に向けた戦略的な取組を推進する。



量子技術イノベーション拠点

- 基礎研究から技術実証、知財管理、人材育成に至るまで、産学官で一気通貫で取り組む拠点として「量子技術イノベーション拠点」を整備する。
- 国内8拠点における各分野での研究開発の取組に加え、Head Quarterを設け、拠点横断的な取組を強化する。



- ・我が国経済が再び成長し、世界をリードしていくために、関係機関が総力を結集して基礎研究から人材育成に至る幅広い取組を進めるとともに、協議会および拠点に集う産学官が一体となって研究開発や量子技術の社会実装を加速する。

6

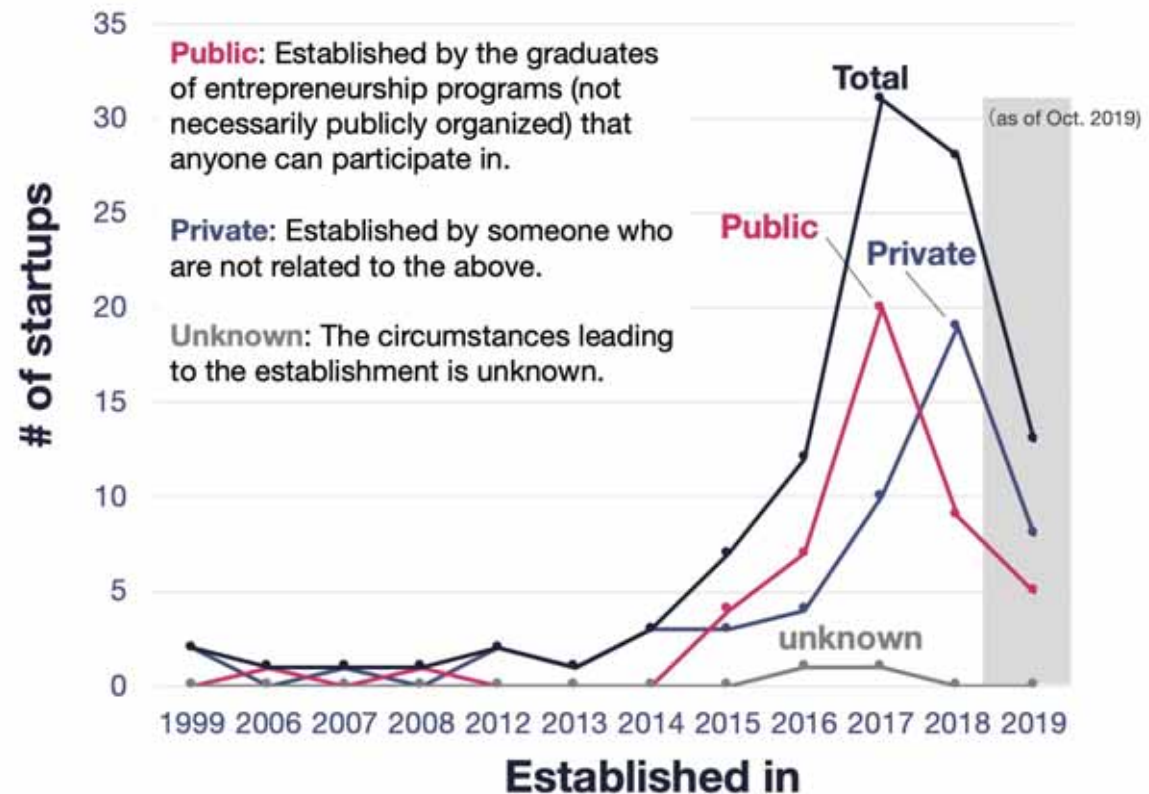
量子産業の創出にむけた動き（１）

スタートアップ

- 北米を中心に起業・投資が拡大している（2017-18で約4800億円*）
- 量子コンピューティングでは大手クラウドベンダ各社とともにエコシステム形成
- 起業数はピークを超えた気配

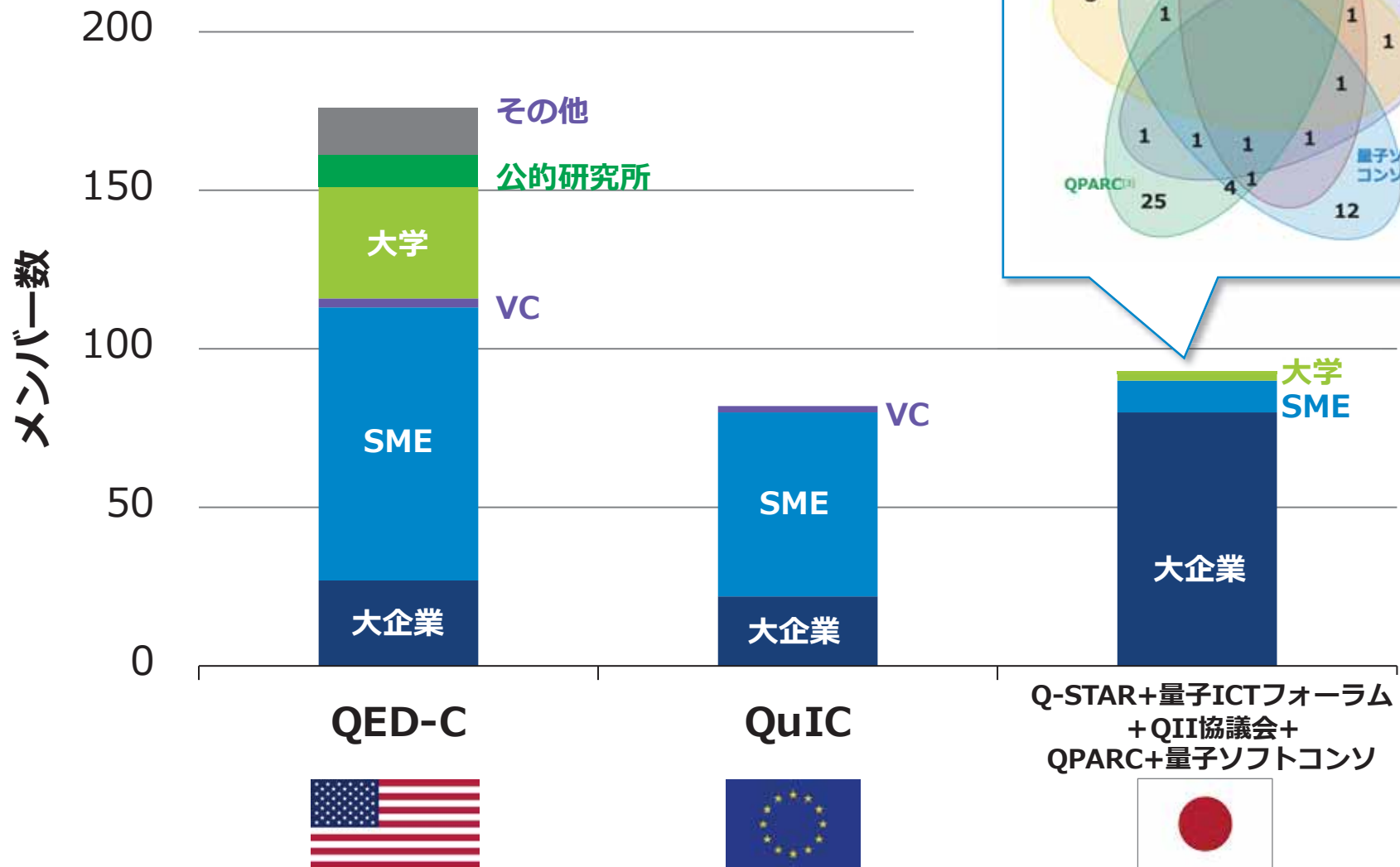


*E. Gibney, "Quantum gold rush: the private funding pouring into quantum start-ups", Nature 574, 22-24 (2019).



量子産業の創出にむけた動き（２）

コンソーシアム



<https://quantumconsortium.org/>

<https://qt.eu/about-quantum-flagship/the-quantum-flagship-community/quic/>

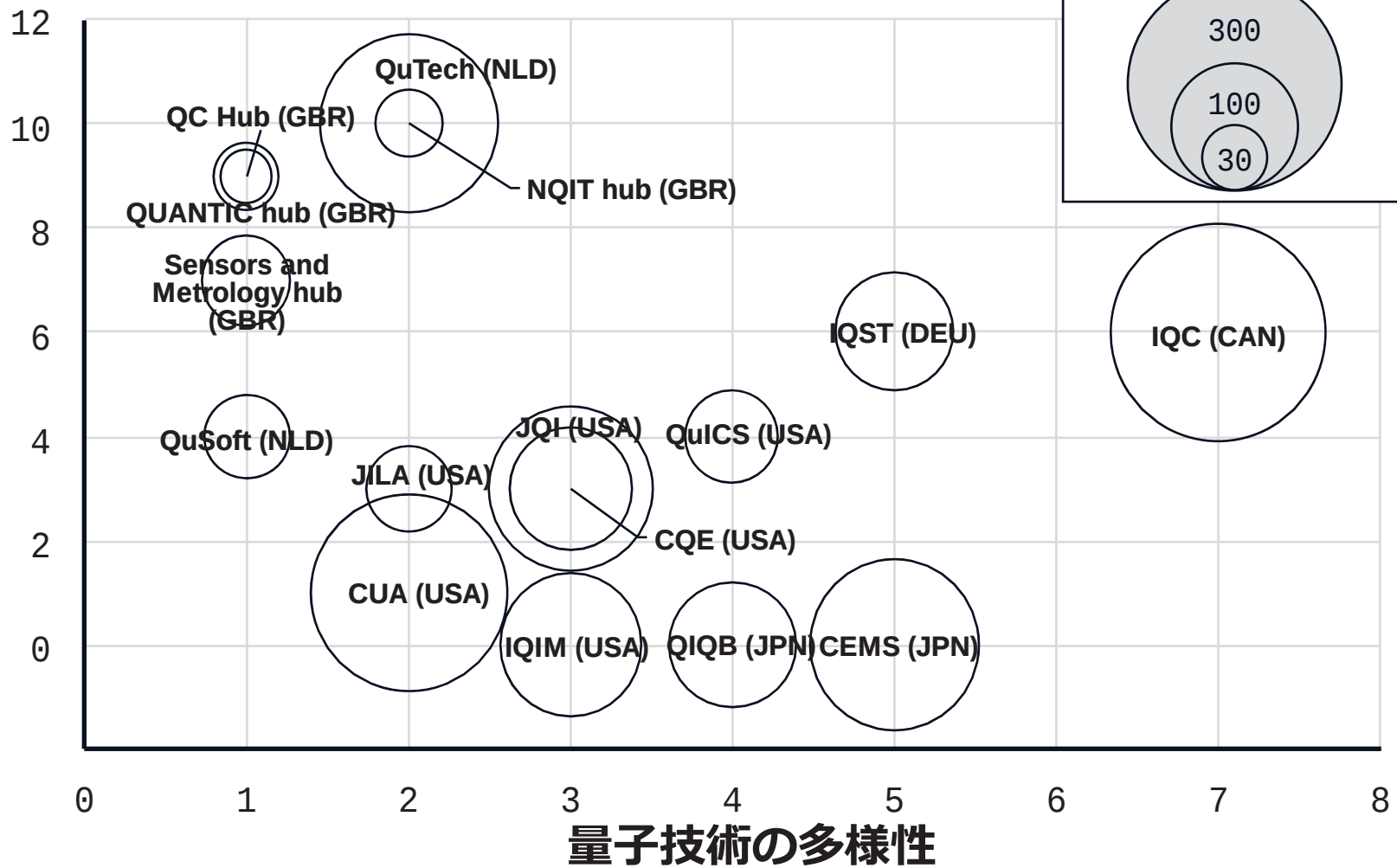
CRDS調べ（2021年9月）



量子研究拠点

産学連携活動の多様性

(スタートアップ企業、スピンオフ企業、インキュベーション施設、共同研究の支援プログラム)



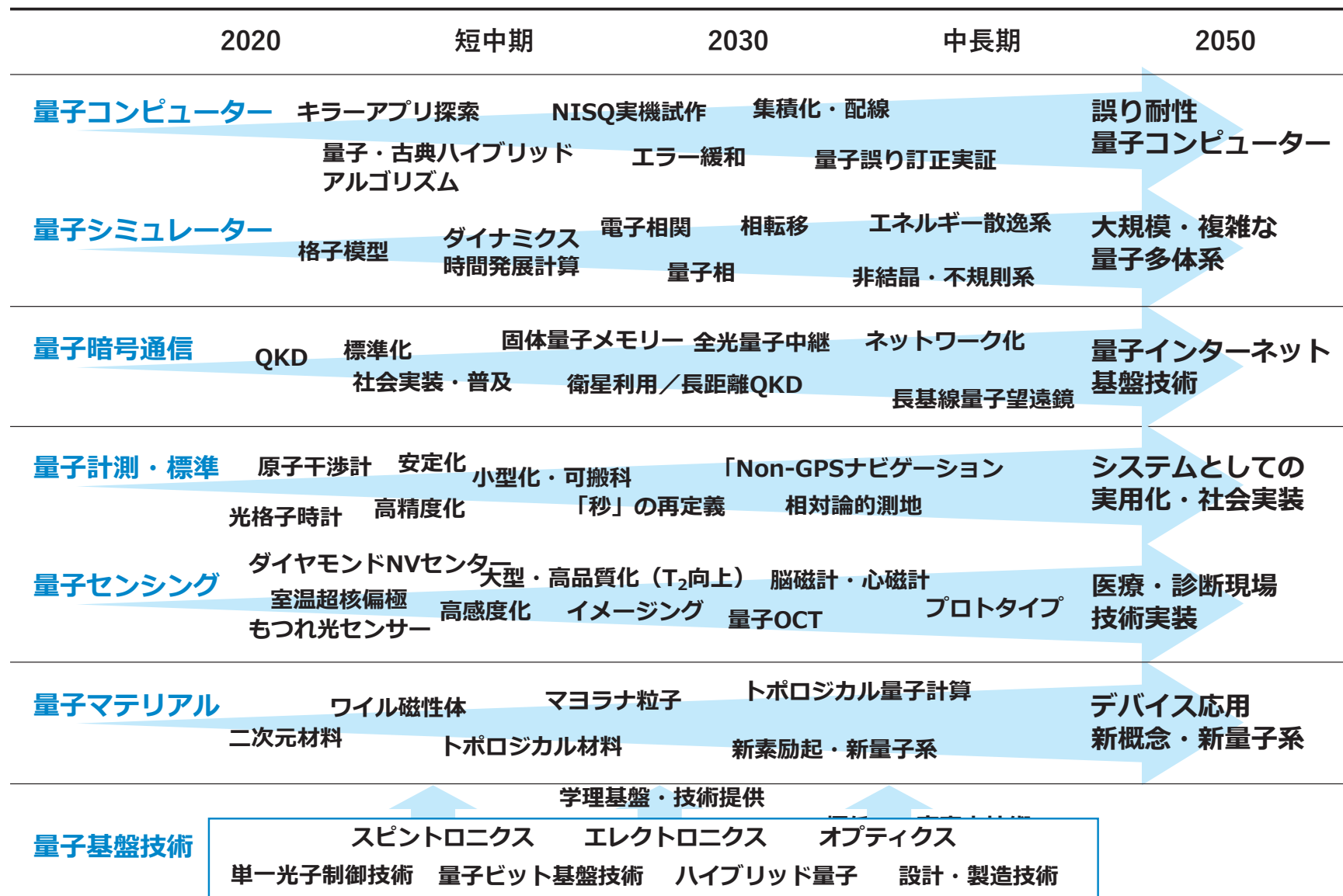
(量子基盤、量子コンピューティング、量子シミュレーション、量子センサー、量子通信、量子マテリアル、量子教育)

CRDS調べ (2019年10月)



3. | 展望

量子技術 現状と展望



量子技術イノベーションをドライブするには…

2つの好循環（量子版ムーア則を目指して）

（１）技術：性能向上→収益→投資→性能向上→…

（２）人材：魅力的な環境→優秀な人材→問題解決→魅力アップ→…

