

量子技術の実用化推進WG（第8回）・参考資料

量子技術イノベーション 創出基盤の国内外現状

2023年2月20日

JST 研究開発戦略センター



1. | 産業人材の確保・育成

日本の量子人材戦略

量子技術イノベーション戦略における人材戦略の取組状況

- 高等教育段階で教育・研究環境等を充実・強化し、**優れた若手研究者・技術者を戦略的に育成・確保**
- 早期から量子技術を使いこなす高い知識・技能を持つ「**量子ネイティブ (Quantum Native)**」を育成するとともに、ムーンショット等の量子技術のファンディング事業を通じて研究者層の拡大を図る
- 今後、量子技術イノベーション協議会等の場を通じて、産業界への量子人材の輩出の在り方や民間コンソーシアムによる取組等を活用したリカレント教育の充実を検討

IPA 未踏ターゲット事業 (対象:未踏的IT人材*) <量子技術イノベーション戦略との連携施策>

- 「量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発」に興味を持つ**未踏的IT人材**からプロジェクトを募集し、優れた能力と実績を持ち合わせたプロジェクトマネージャー等が指導・助言をする。加えて、活動実績(育成従事実績)に応じた活動費提供を行う。 ※ITを駆使してイノベーションを創出できる優れたアイデア・技術力をもつ人材

【実施内容】「アニーリングマシン」や「ゲート式量子コンピュータ」を活用したソフトウェア開発を通じた人材育成

科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業

- 博士後期課程学生の処遇向上** (生活費相当額 (180万円以上) の支援を含むフェローシップと**キャリアパスの確保** (博士課程修了後のポストへの接続) を、全学的な戦略の下で、一体として実施する大学への新たな補助金を創設(対象:博士後期課程学生)

光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)

○**FlagShipプロジェクト、基礎基盤研究:**
量子科学技術をリードする**卓越した研究人材の育成**
(TA、RA ※の雇用を含む)
(対象:大学院生、若手研究者)

○**人材育成プログラム:**

- ①体系的に学習できる共通的なコアカリキュラムの開発(対象:大学生以上)
- ②各教育機関の特色を生かした先進的な人材育成プログラムの開発(対象:高校生以上)

※TA: Teaching Assistant, RA: Research Assistant

NICT量子人材育成プログラム NQC

量子ICTネイティブ人材を育成する講習会など大学、企業などと連携しながら実施

○**探索型/課題解決型研究:**
量子ICT知識・技能の応用力
対象:修士・博士課程、若手研究者など
(量子技術に関する基礎知識・技能を有する者)

○**講習会:基礎知識 (座学講習) + 技能習得 (演習)**
対象:高専生、大学生、大学院生など

トップクラス
研究者・エンジニア

各分野に量子技術を
応用できる人材を輩出



若手
研究者・
エンジニア

大学院生

大学生、高専生

高校生

量子ネイティブ(Quantum Native) 育成

リカレント教育

人材育成プログラム

Q-LEAP人材育成プログラム <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/>

研究開発課題名	研究代表者	所属機関	役職
量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発	根本 香絵	情報・システム研究機構国 立情報学研究所	教授
実践的研究開発による全国的量子ネイティブの育成	大関 真之	東北大学大学院情報科学研究科	准教授
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム	野口 篤史	東京大学総合文化研究科	准教授
多様な専門分野で活躍する「量子ベース 思考型」人材育成のための体験型プログラムの開発	岸本 哲夫	電気通信大学大学院情報理工学研究科	准教授
Quantum Transformation イノベーター人材育成の事業化の研究	崔 熙元	JellyWare 株式会社	代表取締役

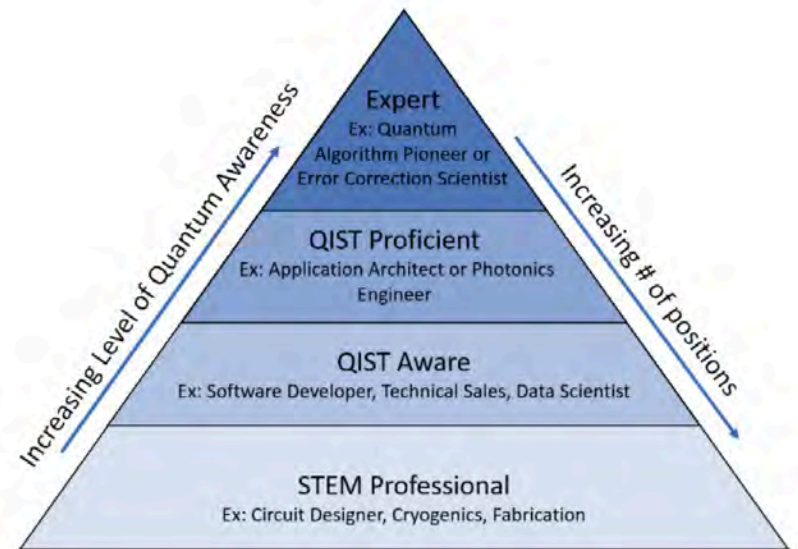
量子技術フェロースhip <https://www.jst.go.jp/shincho/program/fellowship.html> 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェロースhip創設事業。

機関	フェロースhip名称	機関	フェロースhip名称
東北大学	東北大学高等大学院博士学生フェロースhip(量子・スピントロニクス分野)	京都大学	未来を創る先端量子技術創出フェロースhip
筑波大学	筑波研究学園都市のオープンイノベーション拠点と連携した量子分野横断型人材育成フェロースhip	大阪大学	大阪大学フェロースhip「量子リーダー人材」
千葉大学	千葉大学量子科学フェロースhip	大阪市立大学	南部・アインシュタインフェロースhip
東京大学	量子科学技術フェロースhip	広島大学	広島大学大学院リサーチフェロースhip制度(量子分野)
名古屋大学	名古屋大学融合フロンティアフェロースhip (量子科学分野)	九州大学	九州大学先導的人材育成フェロースhip事業(量子分野)

米国：QIST労働力開発のための国家戦略プラン

Quantum Information Science and Technology Workforce Development National Strategic Plan

- 国家科学技術会議（NSTC）の量子情報科学小委員会（SCQIS）が発行したQIST労働力開発のための国家戦略計画（2022年2月）
- 人材不足がQISTの進歩の妨げになるとの認識のもと、一連のアクションを通じて**すべてのレベルでのトレーニングと教育の拡大を通じ、QISTの労働力を増やすこと**を強調。
- 特定された4つの主要なアクション：
 1. 短期的・長期的な視点で、QISTエコシステムにおける労働力ニーズの理解を深める。
 2. アウトリーチや教育を通じて、幅広い聴衆にQISTを紹介する。
 3. 専門的な教育と訓練の機会におけるQIST固有のギャップに対処する。
 4. QISTとその関連分野でのキャリアをよりアクセスしやすく公平なものにする。



<https://www.quantum.gov/scqis-releases-strategic-plan-for-qist-workforce/>

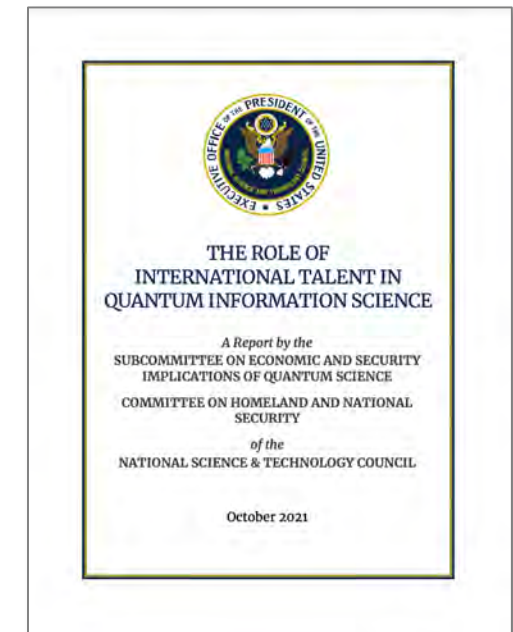
©2023 CRDS

米国：報告書「量子情報科学における国際人材の役割」

The Role of International Talent in Quantum Information Science

- 国家科学技術会議（NSTC）の量子科学の経済的および安全上の影響に関する小委員会（ESIX）が発行（2021年10月）
- 世界中で量子科学技術に関する教育を受けた人が継続的に不足していると主張。米国が技術でリーダーシップを維持するためには、**労働力を増やすことが重要**と指摘。

1. 米国は、研究安全性の懸念との適切なバランスを取りつつ、才能のある国際的な研究者を歓迎し続けるべき。
2. 米国連邦組織は、活発で安全な国際的QISTエコシステムの確保のために、同盟国・パートナーとの緊密な協力を継続する必要がある。
3. 量子情報科学に関するNSTC小委員会（SCQIS）は、QIST労働力開発のための5年間の戦略プランを策定する必要がある。
4. QISTの研究、開発にファンディングする連邦組織は、知財保護のための包括的な技術保護プランを策定する必要がある。



https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/10/2021_NSTC_ESIX_INTL_TALENT_QIS.pdf

米国 : National Q-12 Education Partnership

量子労働力強化のための産・官・学・教育コミュニティのパートナーシップ (2020年8月)

- 大統領府科学技術政策局 (OSTP) とNSFが主導するコンソーシアム。NSF資金によるプログラム "Q2Work" (イリノイ大アーバナシャンペーン校、シカゴ大、ピッツバーグ大が参画) が中心。
- 産業界 (IBM, Intel, Google, Microsoft, Boeing, Lockheed Martinなど)、学術界 (OSA, APS, SPIEなど)、教育コミュニティ (American Association of Physics Teachers) など18の企業・団体がメンバー。
- 次世代の量子リーダーを刺激するための **"K-12 Quantum learning tools"** (中学・高校でのアウトリーチ、大学などの学習教材や量子関連カリキュラム基盤) を、**米国教育者と協力して構築**。実践的な体験のための教室ツールの提供から、教材開発、量子キャリアへの道筋のサポートまで、強力な量子学習環境を確保。教育者が学生に量子キャリアの機会を与えられるような環境を整える。

National Q-12 Education
Partnership

<https://q12education.org/>

米国 : NSF Research Traineeship Program

大学院生対象の教育プログラムで量子情報科学・工学 (QISE) 分野を重点化 (2020年12月)

<https://www.quantum.gov/the-nsf-research-traineeship-nrt-program-adds-qise/>

- 大学院生対象の教育プログラム (~\$55M) で、量子情報科学・工学 (QISE) とAI分野を、他のNSF「Big ideas」6分野と同様に重点化。
- NRT-QL (The Quantum Leap: Leading the Next Quantum Revolution) として採択。

Accelerating Quantum-Enabled Technologies

(U. Washington、2020年-、\$3M/5年)



ワシントン大の博士・修士課程学生対象の12-15ヶ月トレーニングプログラム。量子情報/量子コンピューティングに関する「Introduction」「Implementations」「Advanced Topics」の3コース

<https://www.quantumx.washington.edu/training/aqet/>

A Program for Training a Quantum Workforce

(Colorado School of MinesとSan Jose State U.の共同、2021年-、合計\$3M/5年)

他分野の学生に量子情報科学技術の基本を紹介するトレーニング資料開発、学生に企業や国研で行われている最先端技術・研究へのアクセス・経験提供、学生のリクルート・メンタープログラムなどを実施。量子情報科学技術における労働力の多様性確保を目指す。

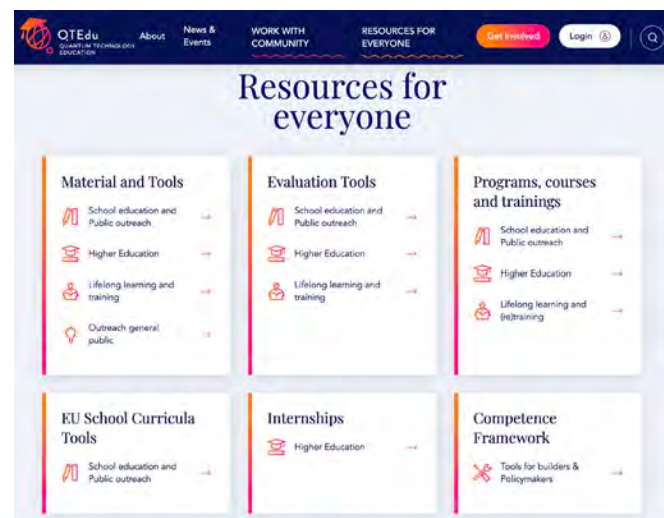
https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2125899&HistoricalAwards=false
https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2125906&HistoricalAwards=false

EU : QT Flagship 「QTEdu」プロジェクト

教育・アウトリーチプログラムに関するポータル機能を担うPJ

- 教育&トレーニング、アウトリーチ、ジョブ&インターンシップ、イベントに関する情報提供
- 「第2次量子革命」のためには、教育とアウトリーチがカギ。
- そのために、教育リソースの探求による学習、さまざまなプロジェクトへの資金提供、最先端の教育とアウトリーチ活動およびツール作成、が貢献する。
- 以下4つのデータベースを、量子コミュニティー（学習者、教育者、政策立案者）をサポートするために提供。

1. 教育コース・プログラムなど（公式・非公式の）**教育&トレーニング機会情報**（77件）
2. 量子技術の普及とトレーニングのための資料、活動、内容、およびツールなどの**アウトリーチ資料**（49件）
3. 企業や研究機関での学部生および大学院生向けの**ジョブ&インターンシップ情報**（87件）
4. 研究、教育、および会議、会議、ワークショップ、学校、ハッカソン、フェスティバルなどのアウトリーチのための**イベント情報**



<https://qtedu.eu/>

EU : QTedu 「能力フレームワーク」

教育・訓練プログラム設計のための能力・スキルのマップ



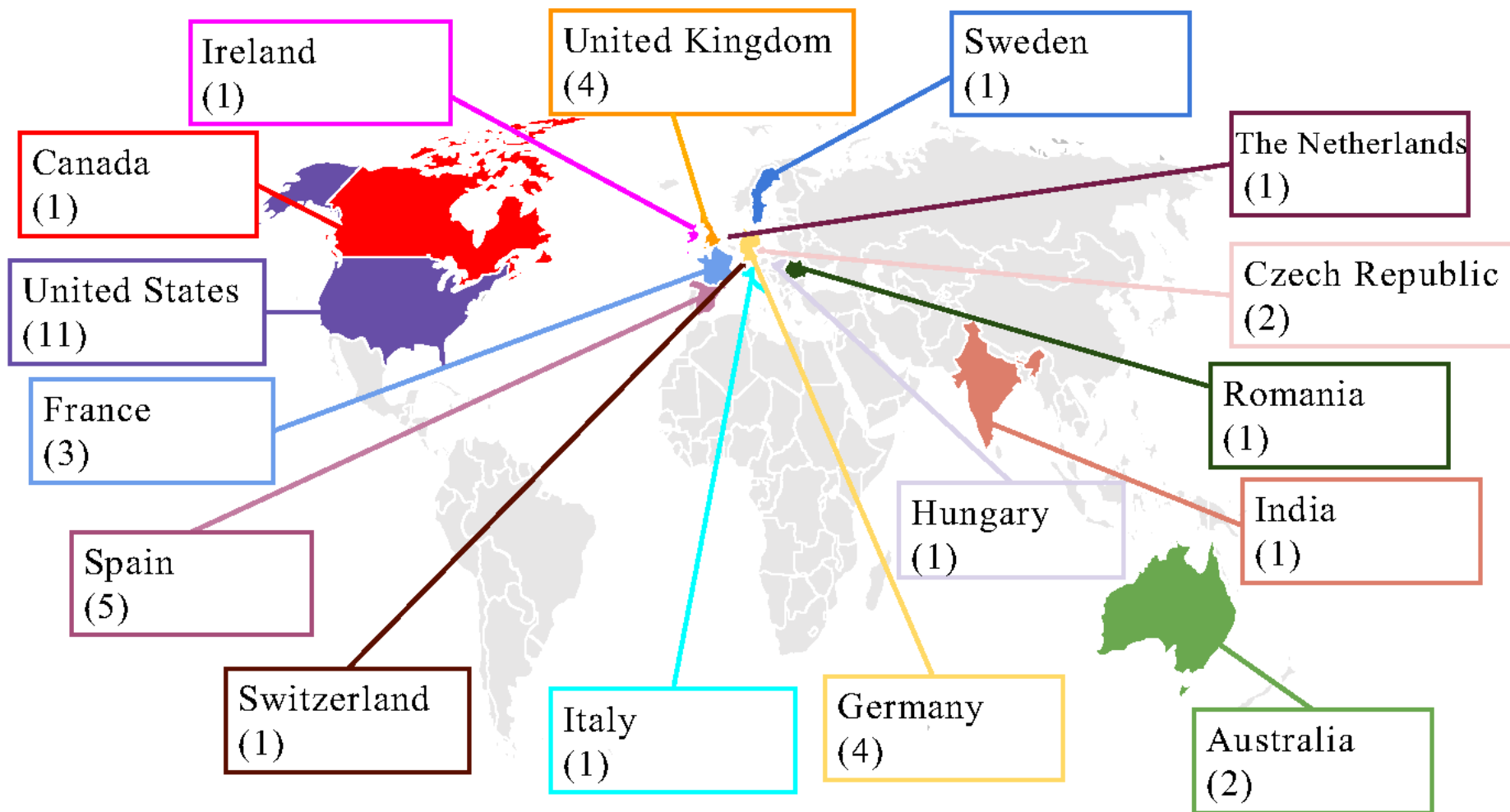
節ごとに細かく階層化されている



冊子版も提供されている

<https://qtedu.eu/european-competence-framework-quantum-technologies>

量子技術に特化した修士プログラム



M. Kaur et al., Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives, *Optical Engineering*, 61, 8, 081806 (2022)

産業人材育成の戦略

エンドユーザー企業がとりうる戦略の重要度は短期・中期・長期で変わる

戦略	短期	中期	長期
量子技術コンサルタントの利用	高	中	低
戦略・訓練サービス提供者とのパートナーシップ	高	中	低
イベント・ワークショップの実施	高	中	低
スタートアップとの協力・出資	高	中	低
産学連携（共同研究、博士学生支援、インターンシップ）	高	中	低
コンソーシアムや産業団体への参加	高	中	低
外部の訓練プログラム参加によるスキルアップ	高	中	低
内部の訓練プログラム実施によるスキルアップ	低	中	高
新たに人材を雇用する	低	中	高
量子技術を用いたビジネスを試行する	低	中	高
自社での研究開発、新たな知見の獲得	低	中	高

低← 重要度 →高

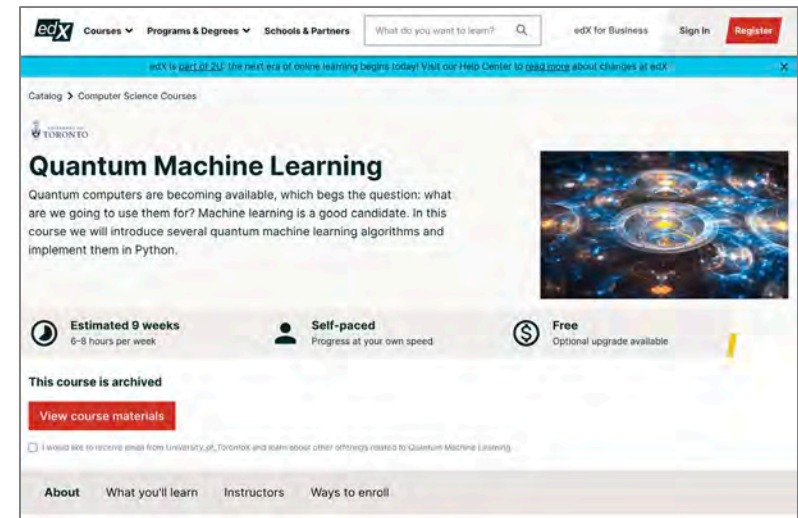
オンラインコース (MOOC)

The Quantum Internet and Quantum Computers: How Will They Change the World? (デルフト工科大学、6週間)



<https://online-learning.tudelft.nl/courses/the-quantum-internet-and-quantum-computers/>

Quantum Machine Learning (トロント大学、9週間)



<https://www.edx.org/course/quantum-machine-learning>

edX上には他にも

Introduction to Quantum Computing for Everyone (シカゴ大学)

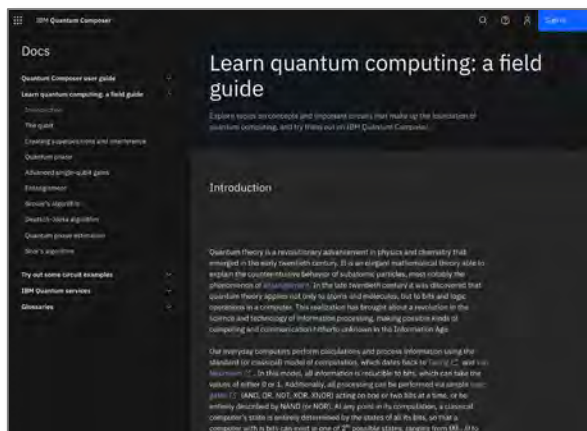
Architecture, Algorithms, and Protocols of a Quantum Computer and Quantum Internet (デルフト工科大)

Introduction to Quantum Transport (パデュー大学)

など様々なコースが用意されている。

ハンズオン・チュートリアル (プログラミング)

クラウドのチュートリアルとして提供
(IBM、Xanadu)

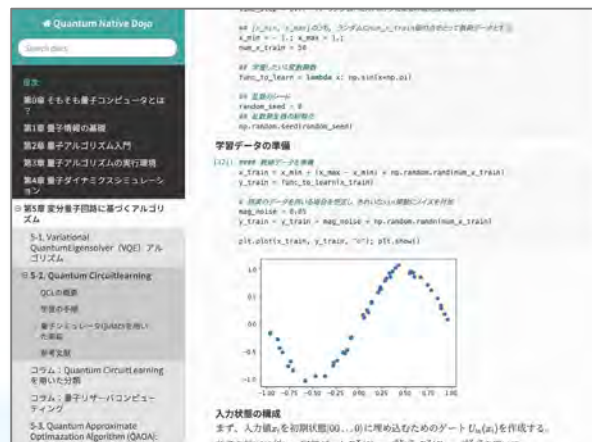
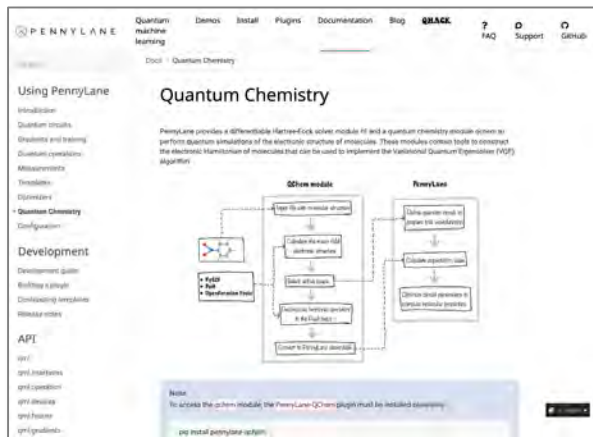


<https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/iqx/guide/>

プロジェクトの成果展開として提供
(シカゴ大EPIQC)



量子回路シミュレーター込みでコード公開
(Quantum Native Dojo)



教科書 (主に量子コンピューティング)

						
価格・ページ数 発売日	19530円・962頁 2004/12/24	6314円・518頁 2019/11/28	3960円・332頁 2020/8/27	4840円・368頁 2020/8/28	3520円・289頁 2020/11/9	3300円・256頁 2021/11/26
量子計算の基本 (行列, 量子回路 等)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
データ処理周り (Encoding, QRAM 等)			✓	✓	✓	
量子情報理論 (Holevo限界 等)	✓					
量子シミュレーション (時間発展)	✓			✓		
位相推定 (ショアのアルゴリズム)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
量子化学計算 (位相推定でFull-CI)					✓	
グローバルアルゴリズム (検索, 最適化)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
量子機械学習 (HHL, QSVM, QPCA等)			✓	✓	✓	
NISQアルゴリズム (VQE, QCL等)				✓	✓	✓
計算複雑性理論 (BQP, QMA, 量子超越等)	✓				✓	✓
量子暗号鍵配送、耐量子計算機暗号	✓					
量子誤り訂正 (スタビライザ, Clifford等)	✓	✓			✓	✓
表面符合 (符号距離、格子手術等)					✓	
プログラミング言語・コンパイラ		✓			✓	✓
ハードウェア (超伝導, イオントラップ 等)	✓					✓
量子コンピュータアーキテクチャ					✓	
量子コンピュータの歴史・開発の現状	✓	✓			✓	✓
最近のトピックス (2014年以降)		✓			✓	✓
回路型以外の計算モデル (測定型 等)						
量子アニーリング				✓		✓
演習問題・ハンズオン教材	✓	✓	✓			

シンガポールの量子人材戦略

海外リーダー招聘 + 若手育成で伸長

シンガポール国立大学（NUS）に量子技術センター設置（2007）

- 研究テーマは量子セキュア通信（光ファイバー、人工衛星）、量子コンピューティング・シミュレーション、量子センシング、と多岐にわたる。

各分野のリーダーに欧州トップ人材を招聘

- 量子情報・通信 → A. K. Ekert
- 量子センシング → V. Vedral
- 量子マテリアル → A. H. Castro-Neto



A.K. エカート



V. ヴェドラル



A.H. カストロ・ネト

ポーランド出身（2003年～）
情報、セキュア通信
1990年、新しい量子暗号考案
オックスフォード大でも講義

セルビア出身（2006年～）
センシング、基礎科学
2022年夏～ 退任

ブラジル出身（2010年～）
材料（2次元材料とグラフェン）
複数のベンチャーでCEO兼務

量子工学プログラム（2018～）

- 3つの重点分野・実現技術で合計27 PJsが採択
- 第2期「QEP2.0」では3つの施策を実施予定

施策	内容
量子コンピューティング・ハブ	シンガポール初の独自の量子コンピュータかを設置。企業や政府機関がクラウドネットワーク経由でなく直接アクセスして検証できるようになる。
国立量子ファブレス・ファウンドリー	マイクロ・ナノ加工を必要とする量子デバイス開発を通じて研究コミュニティを支援。国内外・産学の橋渡し役を担う。
量子セキュア通信技術の国内試験	重要インフラや機密データを扱う企業に強固なネットワークセキュリティ提供を目指す。NRFの支援で、民間企業と政府機関の15の組織が参加。

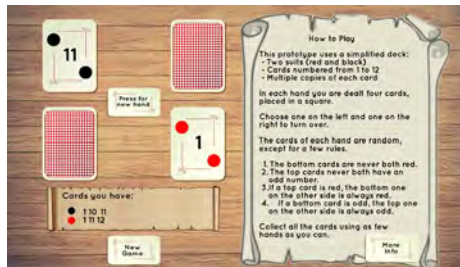
2. | アウトリーチ

QPlayLearn

オールト大学・ヘルシンキ大学が開発したゲーム・アート・動画などの教材群

Quantum Solitaire

ソリティアのようなカードゲーム。量子もつれについての直感的な理解がねらい。カード間の相関関係に関する知識を利用して、できるだけ少ないハンドですべての黒と赤のカードを集める。



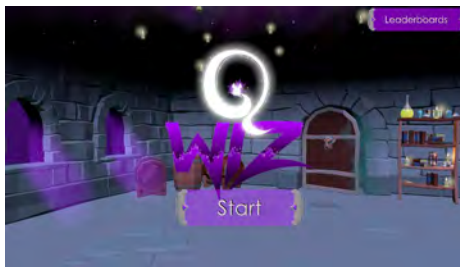
Q | Cards>

量子ビットやゲートなど量子コンピューティングの基本的な概念を学習できるカードゲーム（テーブル版・オンライン版）。ゲームプレイで作成された量子回路はIBMのQiskitで実際に実行できる。



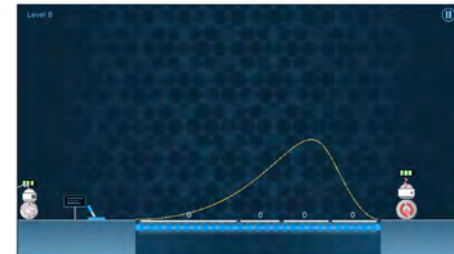
QWiz

量子魔法使いの見習いとして行動するゲーム。量子力学の法則に従って動く液体をの挙動を理解するのがゲーム上の目的で、左右のハンドル操作で液体をガラス容器に移動させる。



Psi & Delta

粒子の波のような振る舞いを探るパズルゲーム。光と電子との相互作用を使う敵を回避しながらゴールを目指す。2人プレイも可能。



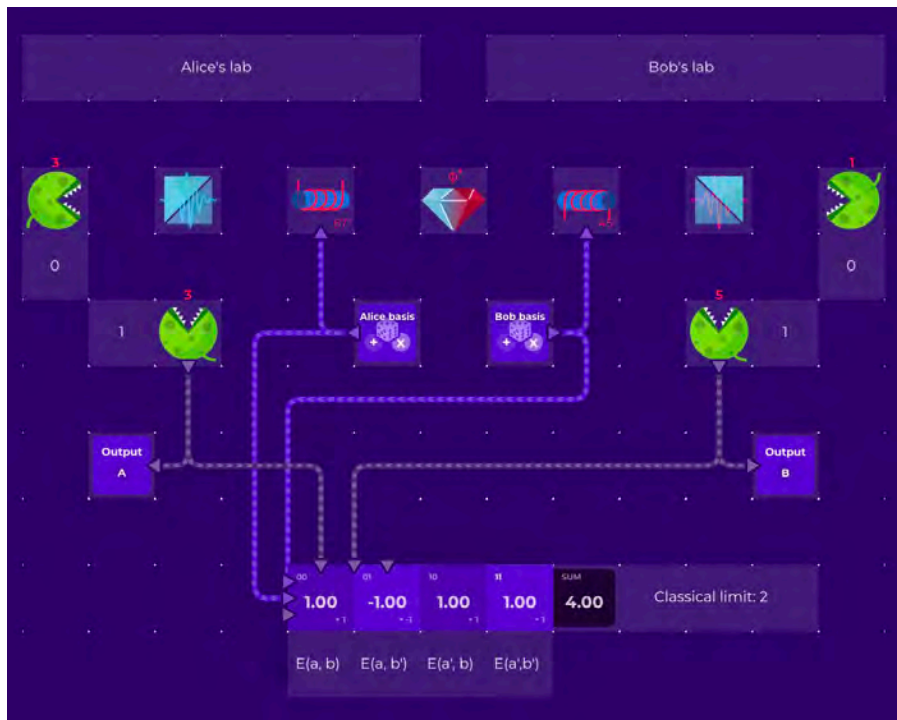
<https://qplaylearn.com/>

Quantum Lab - Virtual Optical Table

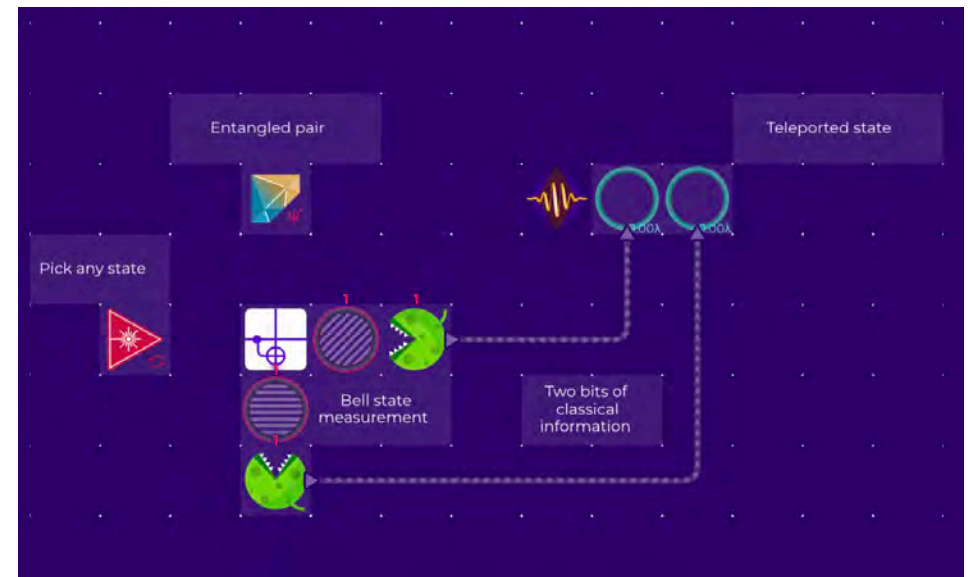
スタートアップQuantum Flytrap社が開発した量子光学の「レゴブロック」

各種の光学素子を仮想空間上の光学定盤にドラッグアンドドロップでセットするだけで、誰でも干渉、量子テレポーテーション、QKDプロトコルなどの量子光学実験をすることができる。

ベル不等式の破れの検証



量子テレポーテーション



<https://quantumflytrap.com/virtual-lab/>

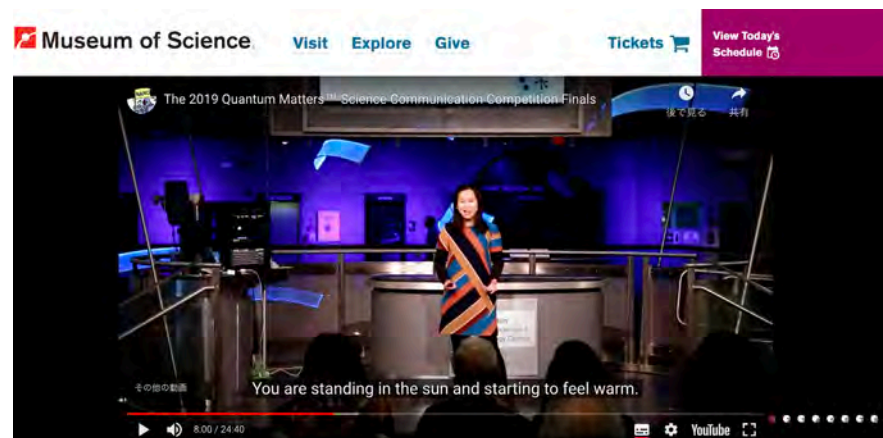
ボストン科学館

量子コンピューター（IBM、モックアップ）の展示



<https://www.mos.org/events/nanodays-with-a-quantum-leap-2021>

量子マテリアル科学コミュニケーションコンテスト（2018,2019）



The Quantum Matters™ Science Communication Competition

Learn about the 2021 Reach Out Science Slams!

Reach Out is a new science communication competition involving early-career researchers affiliated with the nation's 12 NSF Science & Technology Centers. Find out more [here](#).

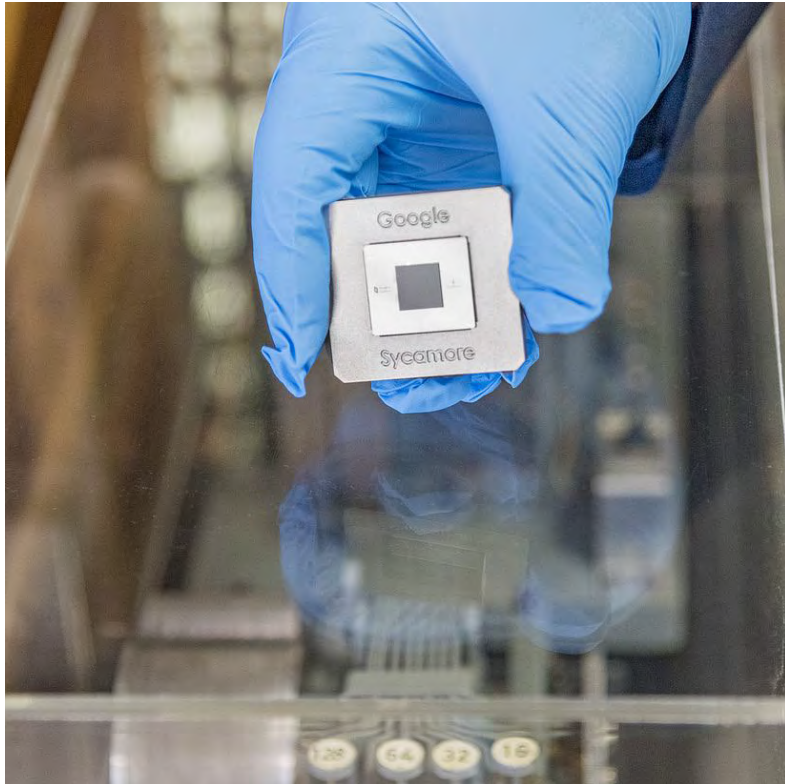
See the winners of the 2019 Competition and watch the 2019 film.

See the winners of the 2018 Competition and watch the Telly Award winning 2018 film.

<https://www.mos.org/quantum-matters-competition-2019>

ドイツ博物館

GoogleのSycamoreチップの収蔵



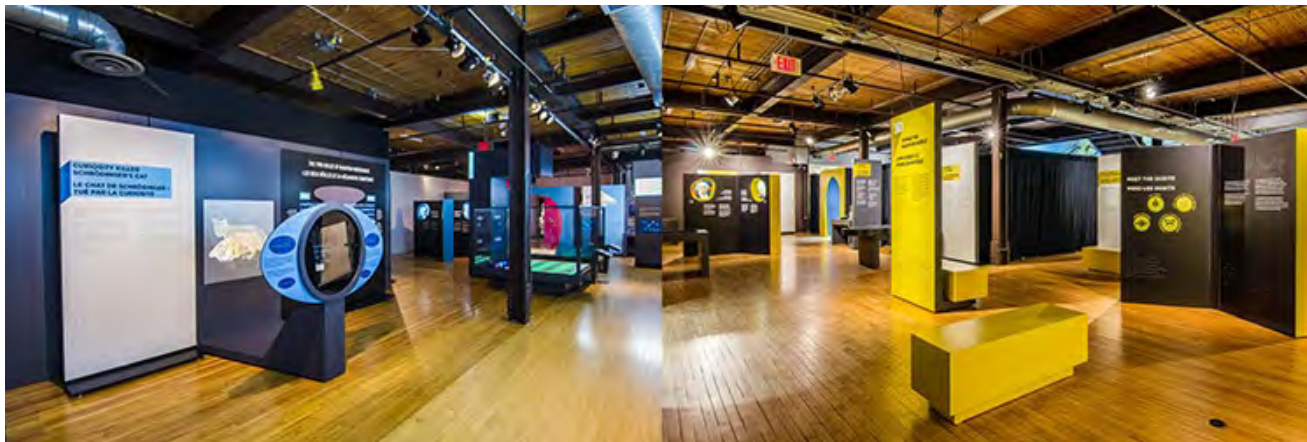
<https://www.deutsches-museum.de/museum/presse/meldung/ein-meilenstein-auf-fuenf-quadratcentimetern>

Quantum: The Exhibition

Waterloo IQC開発の量子技術に関する貸し出し展示

展示全体で4000 ft² (巡回版は300 ft²)

過去にオンタリオ科学館で展示 (2018~19)

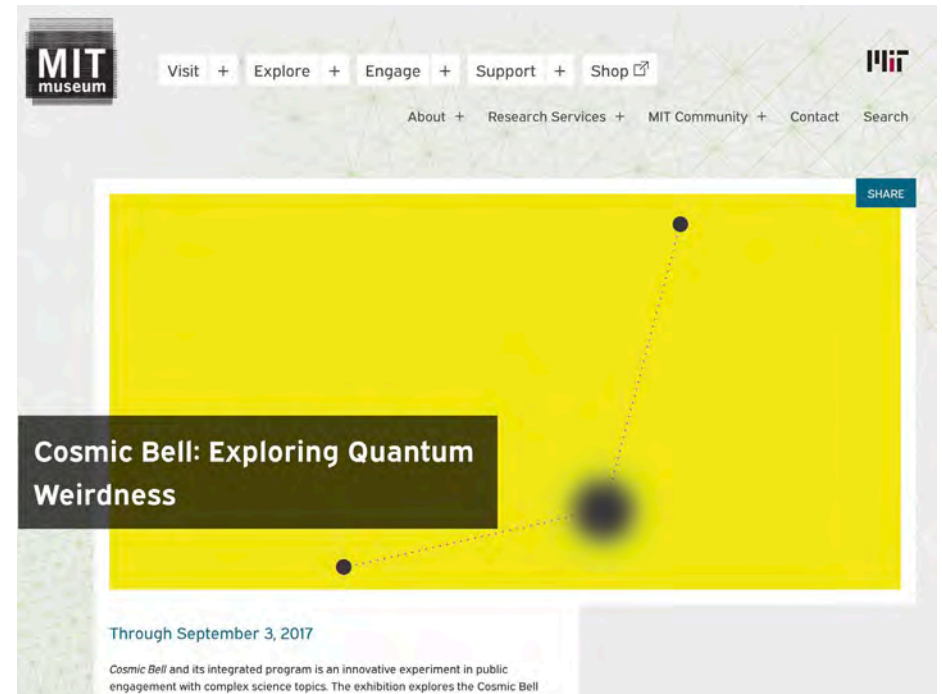


MIT博物館「Cosmic Bell」

MIT開発の量子もつれに関する展示とイベント

MIT博物館で展示（2017）

現在はイベント動画アーカイブのみ



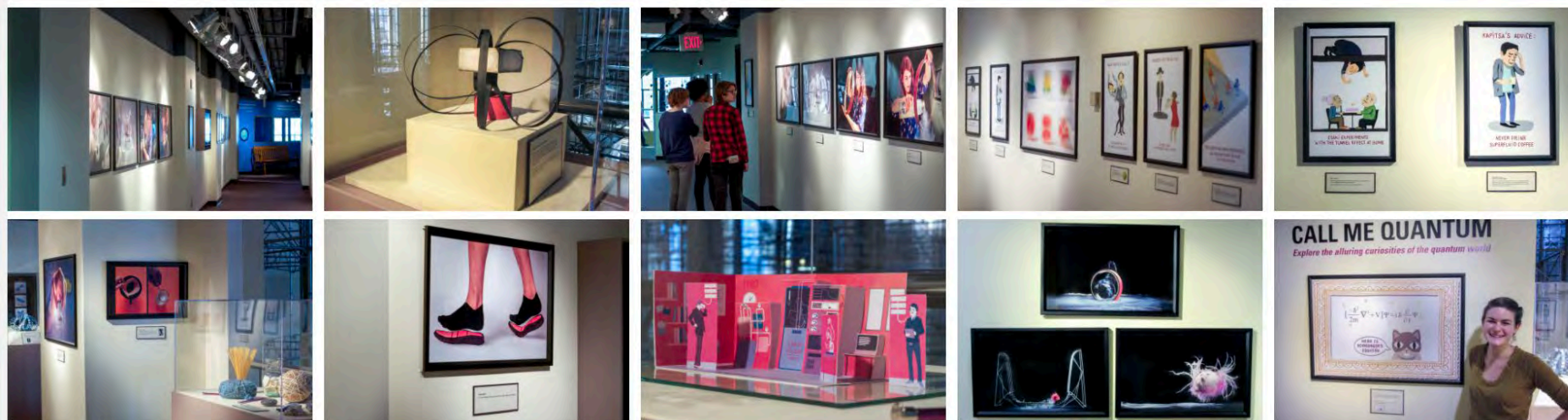
<https://mitmuseum.mit.edu/exhibition/cosmic-bell-exploring-quantum-weirdness>

バージニア科学博物館「Call Me Quantum」

バージニア大学の学生が中心となって開発した展示

バージニア科学館で展示（2015）

現在は写真アーカイブのみ



https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/exposmv_en.html

日本科学未来館 「技術革新と未来」

量子コンピューターに関する常設展示 (2009~16) 現在は別の展示になっている

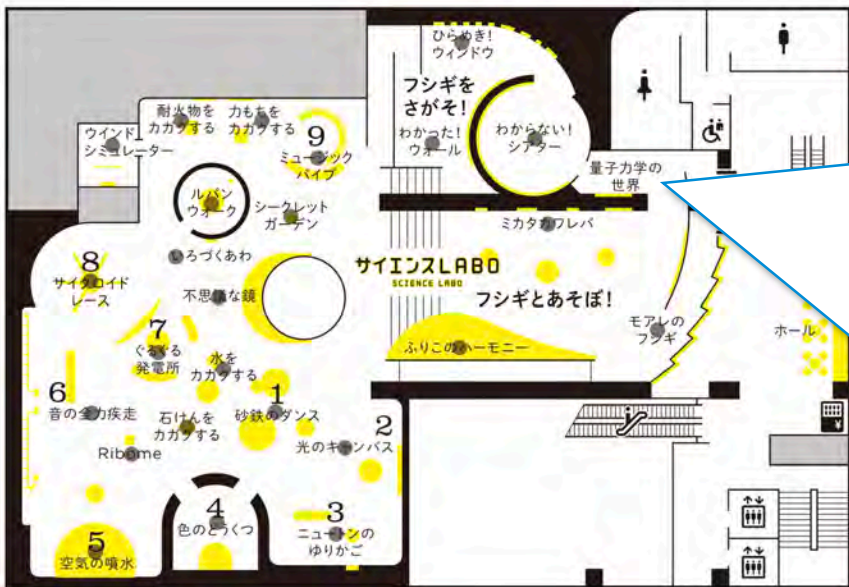


想像力の川「むすびつける」

量子の物理的性質と計算機を「むすびつける」ことで生まれる、「量子コンピュータ」が研究されています。量子コンピュータの不思議な世界を体感できる「あなたの顔探し」で、従来のコンピュータとの違いにびっくり？

北九州市科学館「スペースLABO」

量子力学の世界



量子力 The world of qu

3 応用

量子力学の
おうち
ようち

量子コンピューター！
今のパソコンの
何百万倍の
速度で計算できる

わたしたちが使うパソコンの内部では、あらゆる情報は「0」か「1」のどちらかで表現されます。量子コンピューターは「0」と「1」の重ね合わせ状態を利用でき、現在最速のスーパーコンピュータにも難しい計算を、短時間で処理できるようになると期待されています。

身体の中にも、量子力学！
量子力学を応用したMRI（磁気共鳴画像診断装置）

体内の検査に使われるMRI装置（磁気共鳴画像診断装置）も量子力学の応用です。人間の体に水として含まれている水素原子は、「スピン」という量子力学的な性質を持っています。MRI装置は電波を使ってスピンを調べ、体の中の様子を撮影するのです。

ミクロの世界をすり抜

【トンネル効果】
日常の世界では、投げたボールは本来通り投げられない波のかたちですり抜ける「トンネル効果」とよびます

スマートフォンだって
スマートフォンだって

スマートフォンからインターネットまで、あらゆるIT機器は量子技術のかたまりです。無数の電子が量子力学に従って規則正しく動き、ゲームや動画などの複雑な情報処理を行っています。LED、レーザー、光通信なども量子力学の応用です。

量子力学が役立っている！
**パソコンだって
スマートフォンだって**

スマートフォンからインターネットまで、あらゆるIT機器は量子技術のかたまりです。無数の電子が量子力学に従って規則正しく動き、ゲームや動画などの複雑な情報処理を行っています。LED、レーザー、光通信なども量子力学の応用です。

2019	2017	1999	1994	1993	1985
量子コンピューターの高速性を実証検証 Googleの研究者ら	量子通信衛星「量子号」の実験成功 パン・ジエンウェイ	超伝導量子ビットの発明 ヤチ藤原ら	量子計算機 量子アルゴリズムの発見 ピーター・ショア	量子テレポーテーション チャールズ・ベネットら	量子コンピューターの原理 ディヴィット・ディヴィ

2. | 量子スタートアップ

スタートアップ支援施策を持つ国

	政策オプション			
	イノベーション拠点	競争的資金	特別PJ	スタートアップ投資
オーストラリア	●	●	●	●
オーストリア	●			●
カナダ	●	●	●	●
中国	●		●	●
デンマーク	●		●	
EU		●	●	
フィンランド	●		●	●
フランス	●	●	●	●
ドイツ	●	●	●	
ハンガリー	●			
インド	●		●	
アイルランド			●	
イスラエル	●		●	
日本	●		●	●
オランダ	●	●	●	●
ニュージーランド	●			
ノルウェー	●			
ロシア	●		●	●
シンガポール	●	●	●	●
韓国			●	
スイス	●			
台湾	●	●	●	
UAE	●		●	●
イギリス	●	●	●	●
アメリカ	●	●	●	●

CIFAR "A QUANTUM REVOLUTION: Report on Global Policies for Quantum Technology" (2021年4月)

量子スタートアップ数

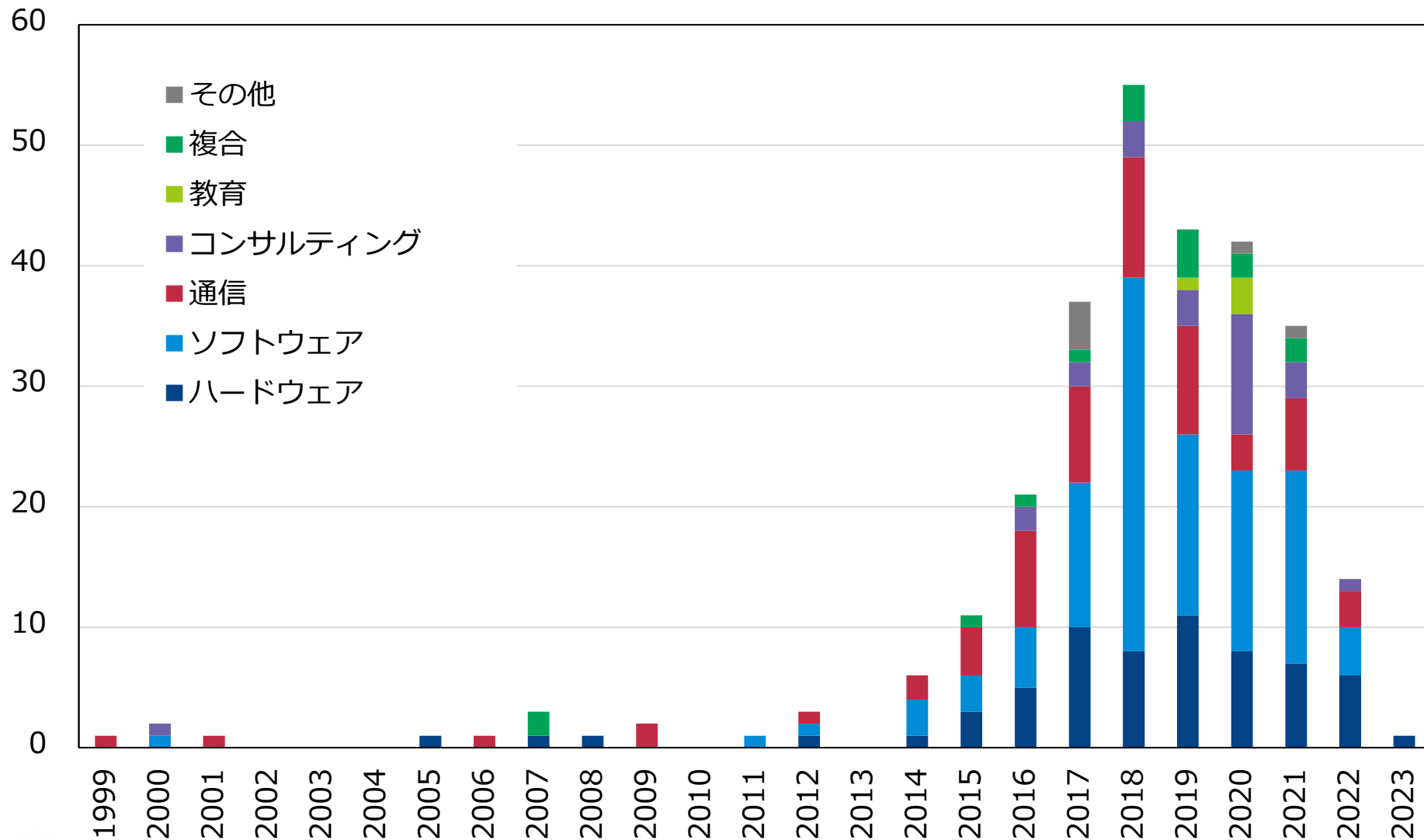
	国	ハードウェア	ソフトウェア	通信	コンサルティング	教育	複合	その他	総計
1	アメリカ	16	24	15	5	2	1	1	64
2	カナダ	4	19	6				1	30
3	イギリス	9	6	11	4				30
4	ドイツ	6	8	3			1	1	19
5	フランス	6	3	3	3				15
6	日本	1	9		2				12
7	スペイン	1	6	2	1		1		11
8	オランダ	5	1	2	2				10
9	中国	3		2	1		2	1	9
10	インド	1	3	2		1	2		9
11	オーストラリア	3	2	1	1				7
12	フィンランド	2	2		2	1			7
13	ポーランド		3	3			1		7
14	スイス	2		2			2		6
15	イスラエル	1	2	1			1		5
16	シンガポール		2	1				1	4
17	韓国		2	2					4
18	デンマーク	1	1		1				3
19	イタリア	1	2						3
20	スウェーデン	2						1	3

2023年2月CRDS調べ

Source: Quantum Computing Report

<https://quantumcomputingreport.com/privatestartup/>

量子スタートアップ設立年



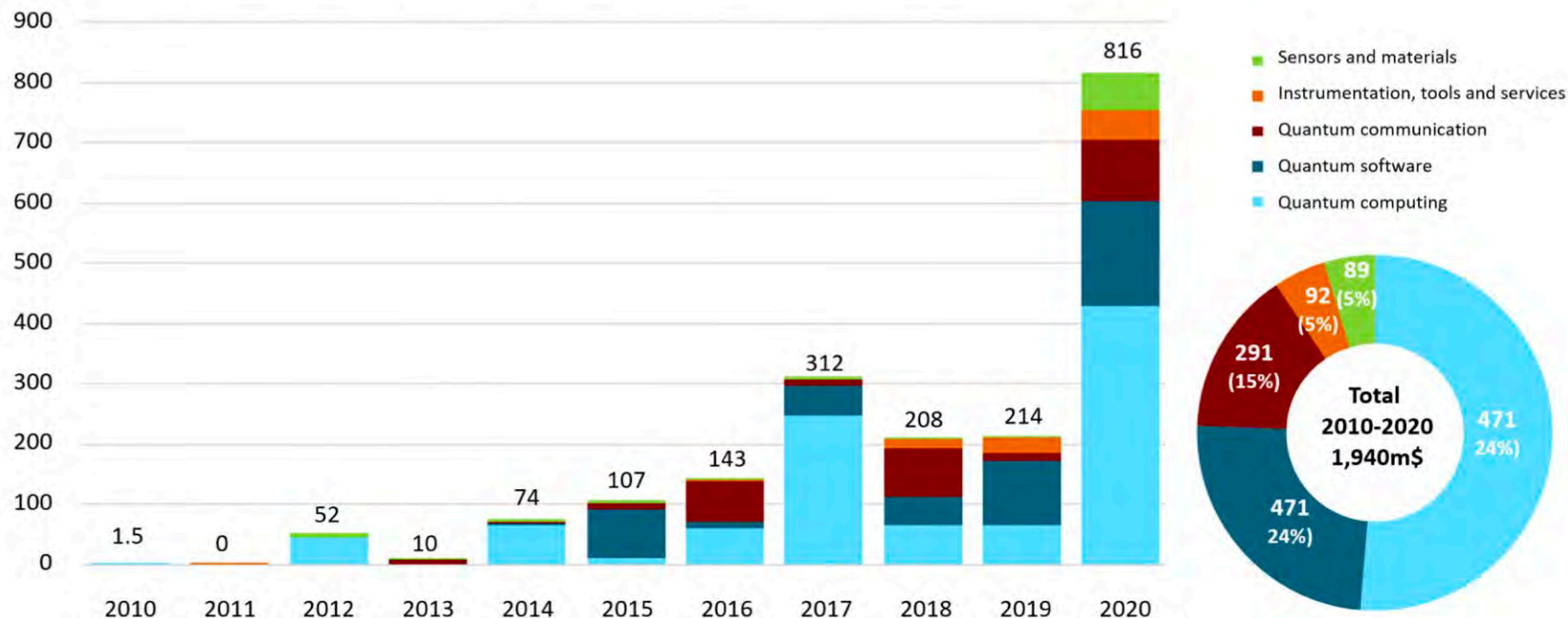
2023年2月CRDS調べ

Source: Quantum Computing Report

<https://quantumcomputingreport.com/privatestartup/>

量子スタートアップVC投資額

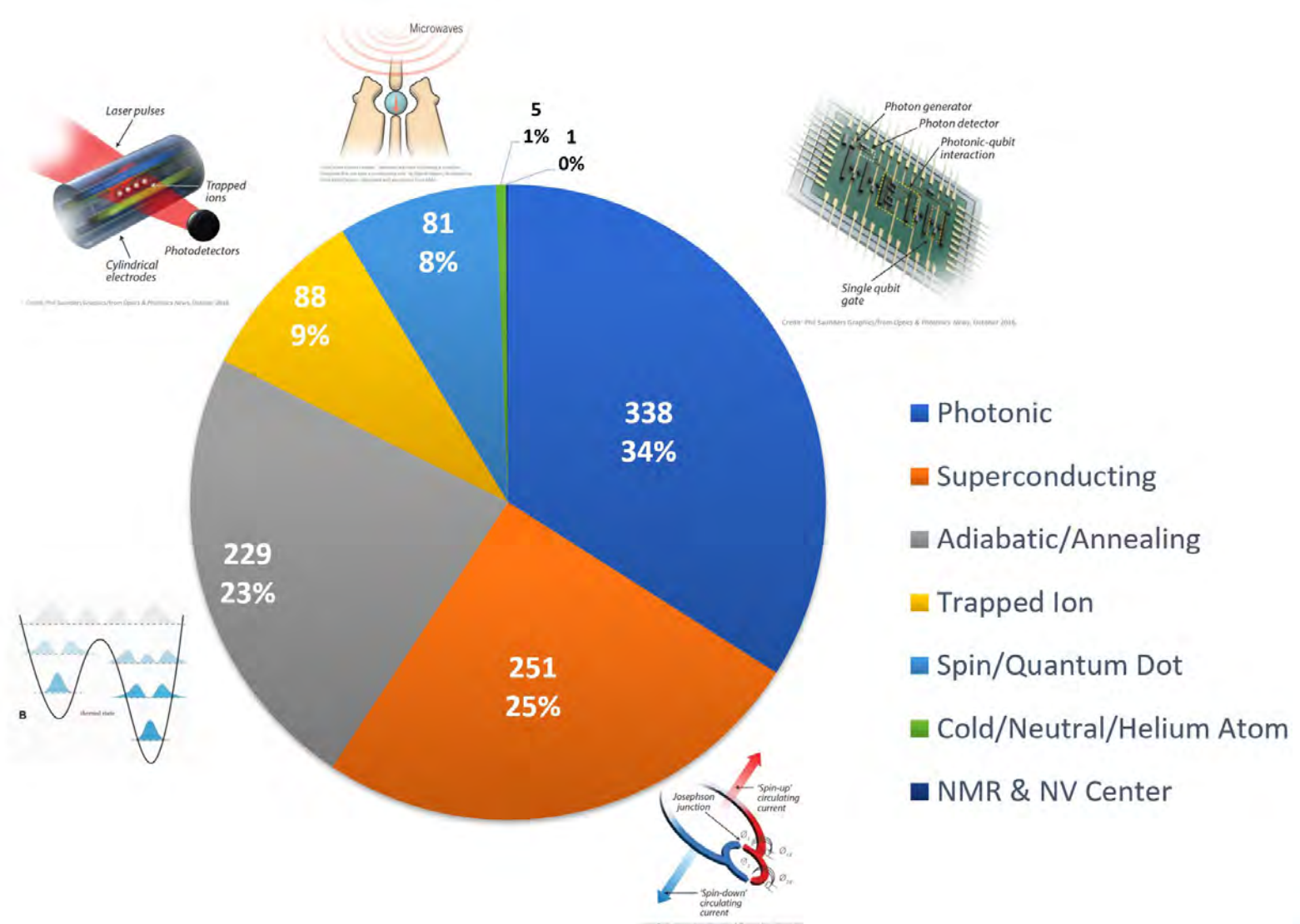
量子技術へのVCからの投資は2010-2020で\$ 1.9B以上



Source: Michel Kurek at Le Lab Quantique

Le Lab Quantique (フランスの調査会社) 調べ
<https://sifted.eu/articles/investors-quantum-as-a-service/>

量子スタートアップVC投資額 (HW方式別)



SpeQtral (シンガポール)

実験用人工衛星「SpooQy-1」の打ち上げ成功

PIのA. リンはNUS准教授、量子通信が専門

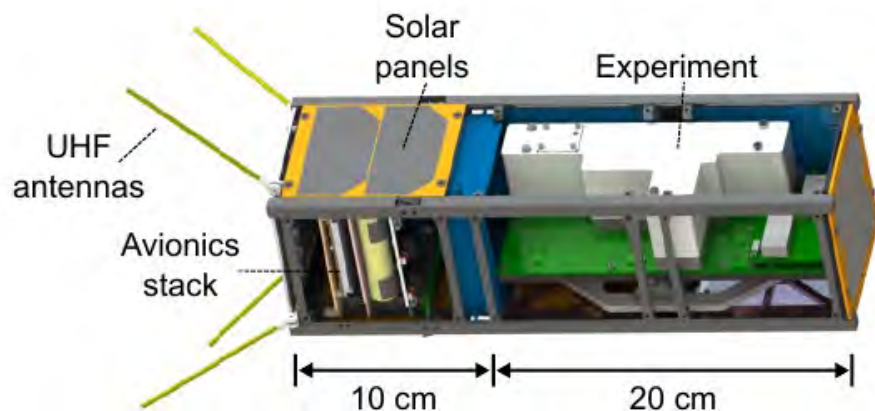
- 国内アカデミア連合「QuantumSG」主導者の一人
- QEPのプログラム・ディレクターも務める



A. リン
(Alexander Ling)

リン研究室発の量子技術ベンチャー「SpeQtral」

- 英RALスペースとも協力し「SpooQy-1」を開発・打ち上げ
- 宇宙空間で偏光もつれ光子対の生成と検出（ベルテスト）に成功（2016）
- 東芝デジタルソリューションズと共同で、QKDを政府機関や企業に導入するソリューション提供を発表（2021）



<https://speqtral.space/>



Credit: NASA

The Quantum Terminal (オーストラリア)

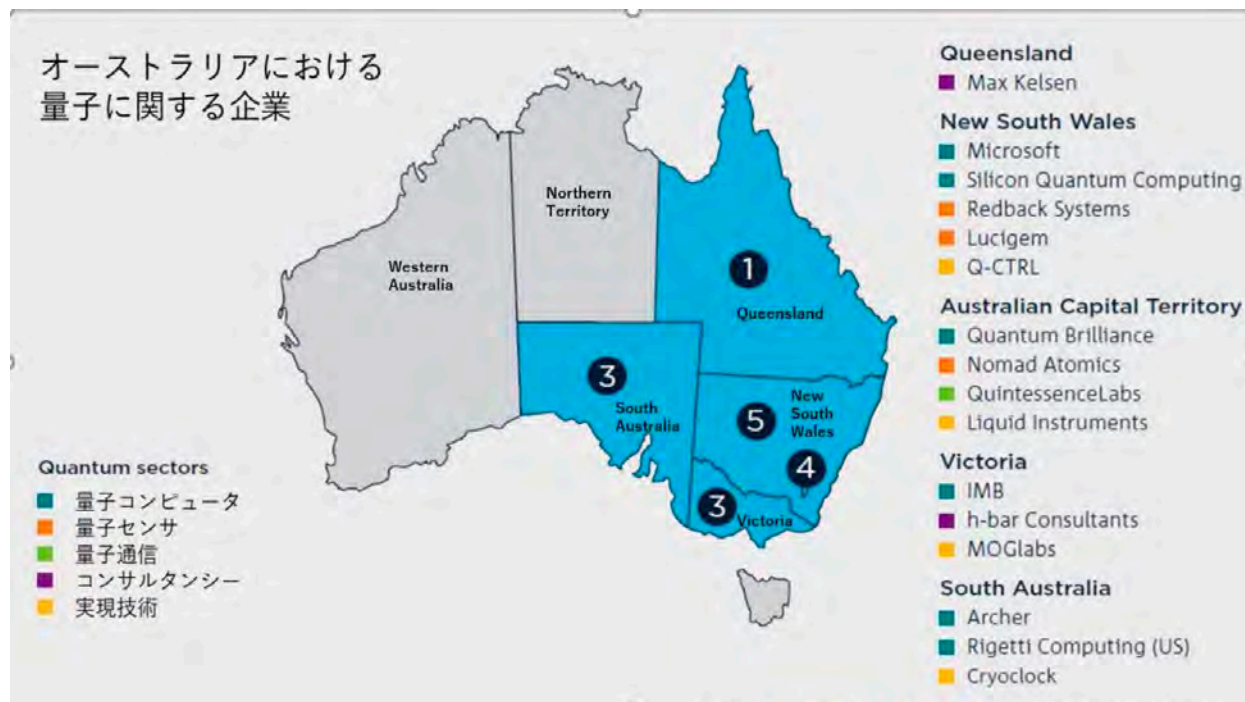
ハブとなる機関が仲介となり研究者が起業。経営も活発に牽引

M. Biercuk (シドニー大学教授) → Q-CTRLの創業者

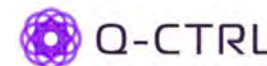
- 量子コンピュータのエラー要因をAIで特定 (2021)

M. Simmons (CQC2Tディレクター) → SQCの創業者兼CEO

- 10量子ビット量子集積回路プロトタイプを開発中



REDBACK SYSTEMS



出典: CSIROロードマップ, p.10の図をAPRC翻訳

JSTアジア太平洋総合研究センター

注: ●内の数字は州内に存在する企業数を表す『アジア・太平洋主要国・地域の量子技術動向』

APRC-FY2022-RR-01 (発行準備中)



米国：シカゴ大学「Duality Accelerator」

量子スタートアップ支援に特化

12か月のアクセラレータプログラムを提供

- 50,000ドルの資金提供（用途の制限なし）
- ビジネススクールによる起業教育・ビジネストレーニング
- 55人を超える一流のビジネス専門家、投資家、起業家からのメンターシップ
- 世界的に有名な量子科学者や技術会社からの技術的専門知識
- 業界の露出と企業リーダーへのアクセス
- オフィススペースと最先端の施設へのアクセス（要承認）
- シカゴの急速に発展している量子スタートアップコミュニティへの没頭



技術諮問委員会

Jean-Francois Bobier : Boston Consulting Groupのパートナー

Michael Brett : AWSの量子コンピューティング事業開発担当

Dan Caruso : ColdQuantaの元エグゼクティブチェアマン

Monisha Ghosh : シカゴ大学プリツカー分子工学スクールの研究教授

Celia Merzbacher : QED-Cのエグゼクティブディレクター

Mark Saffman : ウィスコンシン大学マディソン校の物理学教授

Rafael R.Salmi : Richardson RFPD のグローバルプレジデント

Ray Sharma : Extreme Venture Partnersの創業者で最高経営責任者

米国：メリーランド大学「Quantum Startup Foundry」

量子技術関係の起業家・スタートアップ支援のリソースまとめ

TraQtionプログラム

- 大企業やパートナーと協力してアーリーステージの企業を支援
- スタートアップをパートナーや顧客と結びつけ、市場のフィードバックを提供
- 製品の市場適合性、技術の準備状況を確認
- 顧客の要件・ニーズを満たす量子独自の価値提案を固める
- 有望なスタートアップのパイプラインアクセスをパートナーに提供

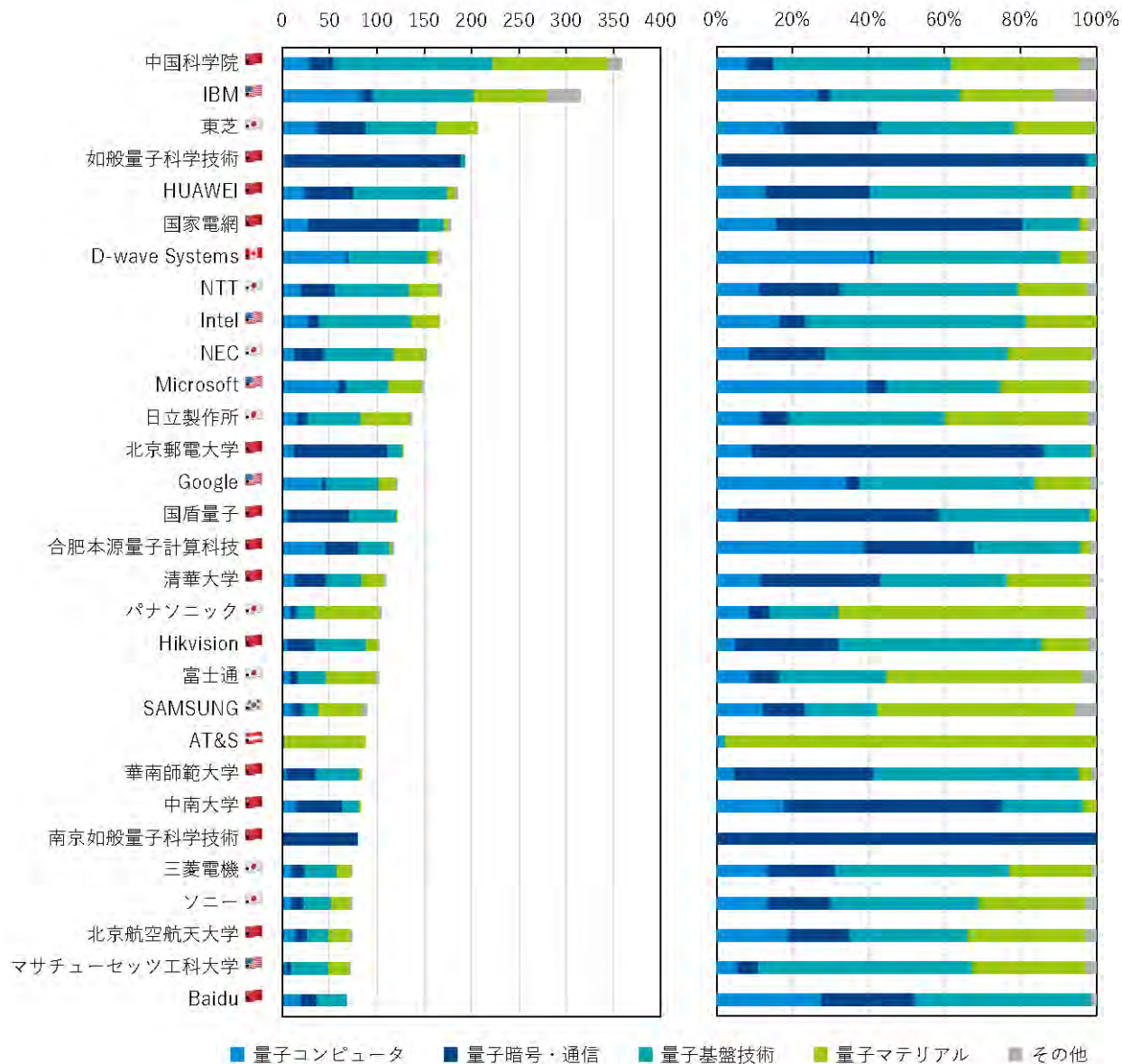
Pre-TraQtionプログラム

- NSF I-Corpsプログラムによる顧客発見の促進
- 潜在的な研究およびサポートパートナーとのマッチメイキング
- SBIR応募のセットアップと提案書作成支援
- SBIR / STTRなどの政府助成金のバックオフィス支援
- オフィススペース（追加料金、アワードを条件とすることも可）
- 3Dプリント、クリーンルームなどの大学施設利用（要追加料金）



3. | 知財・標準化・ベンチマーク

特許数トップ30機関



©2022 CRDS

CRDS報告書「論文・特許
俯瞰マップで見る量子技
術の国際動向」CRDS-
FY2021-RR-08 (2022)

QKDの国際標準化（デジタル標準）

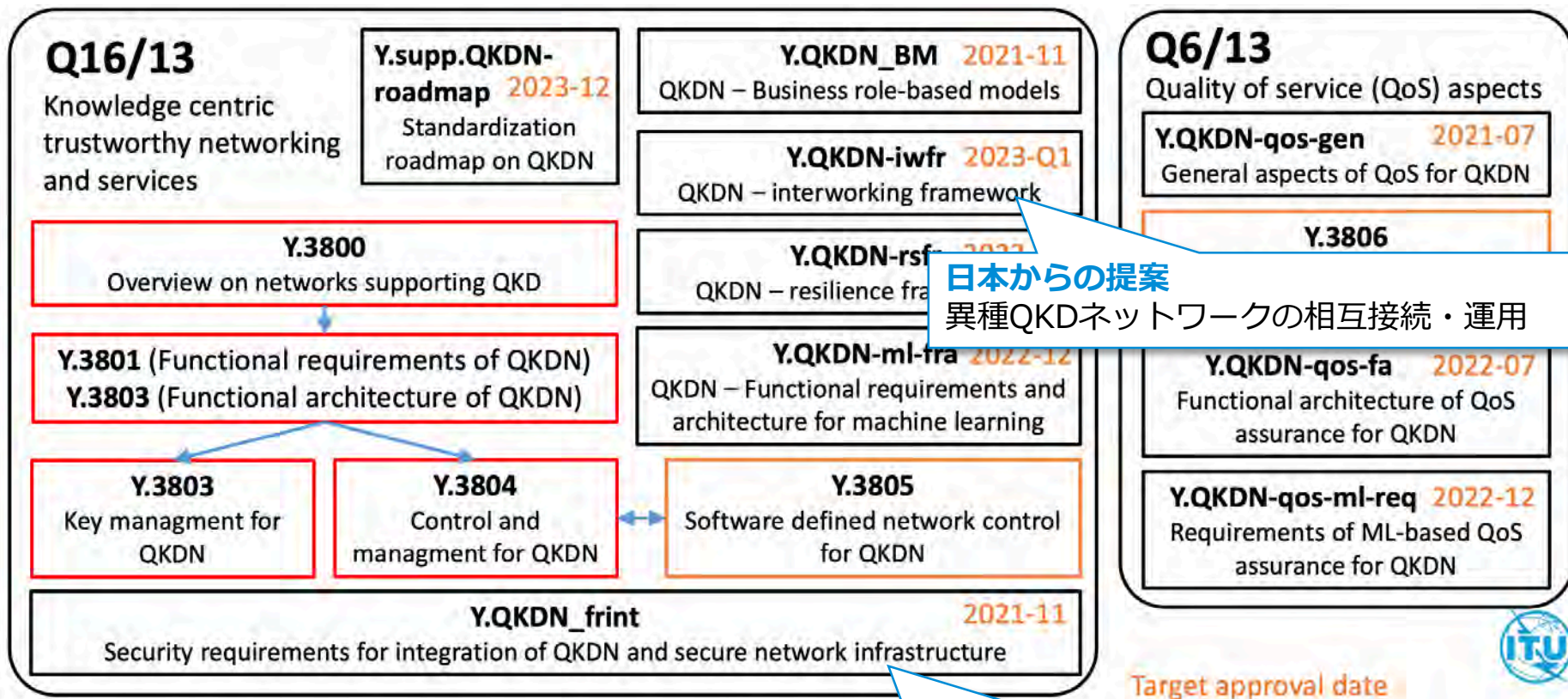
公的機関	内容
国際電気通信連合-電気通信標準化部門(ITU-T)	
SG13	ネットワークアーキテクチャ：QKDネットワークの概要、機能要求条件、鍵管理、制御・管理、SDN、ビジネスモデル、QoSなど。 (参加：日、中、韓、瑞、英、加、独、米など)
SG17	ネットワーク・セキュリティ：セキュリティ要求条件、鍵管理、乱数源、暗号機能など。(参加：日、中、韓、瑞、独、米、露など)
SG11	QKDネットワーク・プロトコル：インタフェースプロトコル仕様 (参加：日、中、韓など)
欧州電気通信標準化機構 (ETSI)	
Industry Specification Group on QKD	部品、モジュール、インタフェースの標準化。実装の安全性に関する白書を発表(2018年7月)。東芝が鍵供給のインタフェース標準化(2019年2月)。
国際標準化機構-国際電気標準会議	
ISO/IEC JTC 1/SC 27	QKD装置の安全性評価手法 (参加：日、中、加、英など)

国内の関連フォーラム

- 一般社団法人 情報通信技術委員会 (TTC)
- 量子ICTフォーラム 量子鍵配送技術推進委員会

ITU-T SG13 ネットワークアーキテクチャ

日本のQKD技術開発をベースとする基本勧告体系

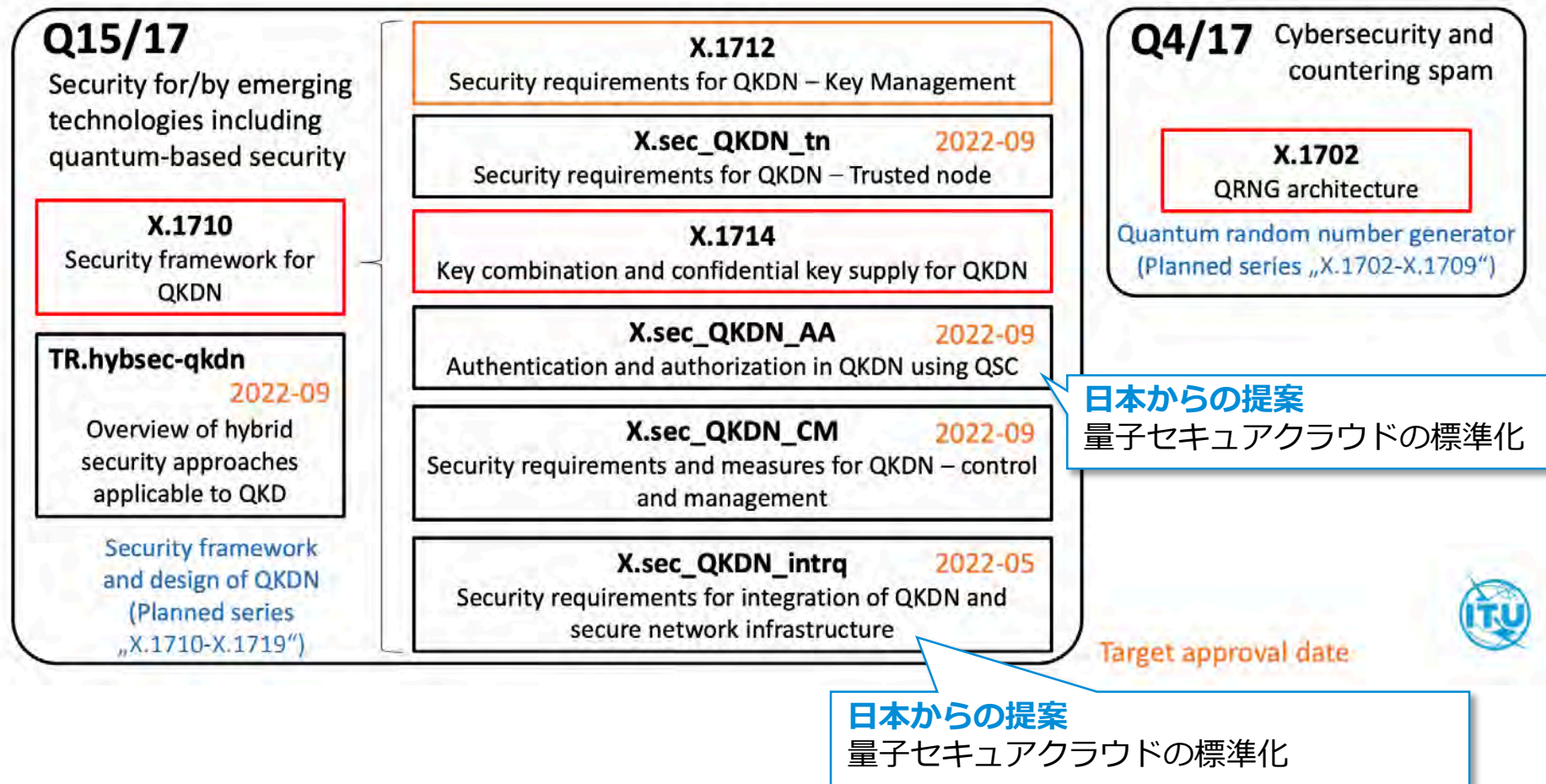


Helmut Griesser, "QKD related work at ITU-T", Workshop on Standardization and Certification of QKD Systems and QKD Networks (2021.11.28)

https://openqkd.eu/wp-content/uploads/2021/10/2021-09-28_1030_HelmutGriesser_QKD-related-work-at-ITU-T.pdf

ITU-T SG17 サイバーセキュリティ

日本のQKD技術開発をベースとする基本勧告体系



Helmut Griesser, "QKD related work at ITU-T", Workshop on Standardization and Certification of QKD Systems and QKD Networks (2021.11.28)

https://openqkd.eu/wp-content/uploads/2021/10/2021-09-28_1030_HelmutGriesser_QKD-related-work-at-ITU-T.pdf

ITU-T Y.3809

A role-based model in quantum key distribution networks deployment

QKDネットワーク上のセキュリティアプリケーションサービスをサポートする、既存のユーザーネットワーク内での役割、役割ベースのモデル、サービスシナリオを記述。役割の観点からQKDネットワークを適用するガイドラインとして利用することが想定されている。

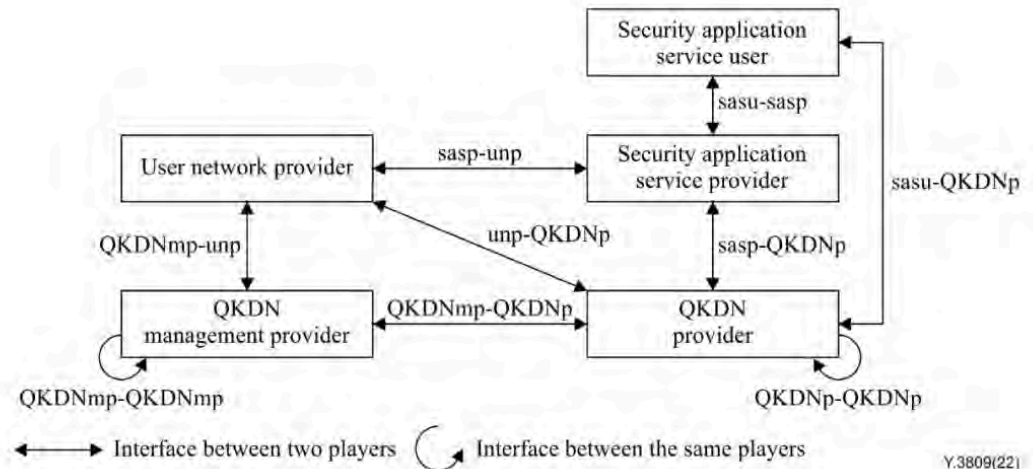
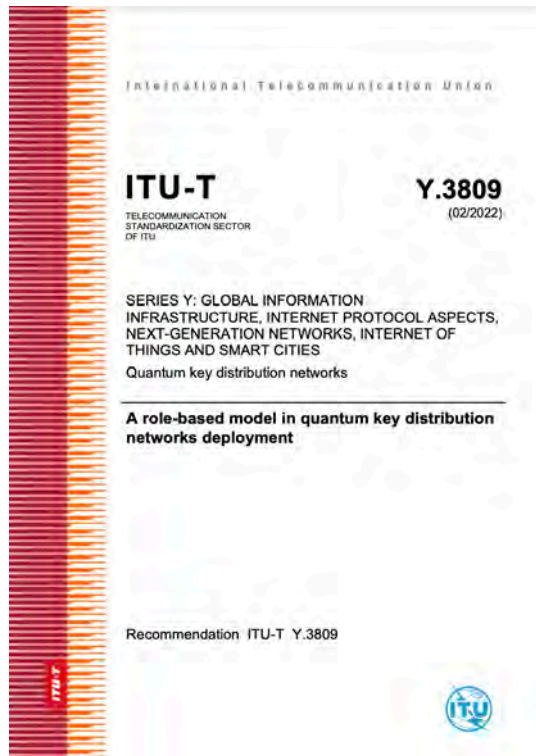


Figure 6-1 – The players of roles in QKD deployment

ITU-T Y.3809, "A role-based model in quantum key distribution networks deployment," Feb. 2022 (Approval).

量子コンピュータ性能指標

さまざまなものが提案されている

量子回路
実行性能



システム
性能

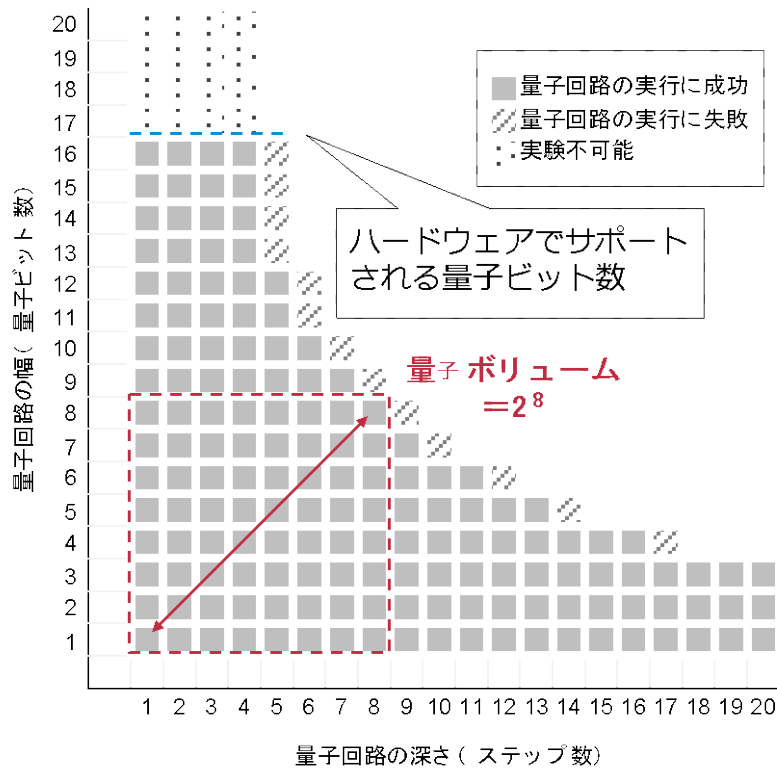
ベンチマーク	提案者	評価基準の概要
SupermarQ	Super.tech	一般的な量子アルゴリズムを実行したときの忠実度
App-oriented benchmark	QED-C	一般的な量子アルゴリズムの実行したときの忠実度
Q-Score	Atos	最適化問題で扱える変数の最大数
Mirror Circuits	Sandia National Lab.	反転構造のある量子回路の実行したときの忠実度
Circuit Layer Ops / sec (CLOPS)	IBM	1秒間に実行できる量子回路の数
Quantum Volume	IBM	実行可能な最大の正方形の量子回路の大きさ

量子コンピュータ性能指標

量子ボリューム (QV)

有効な量子回路の大きさ

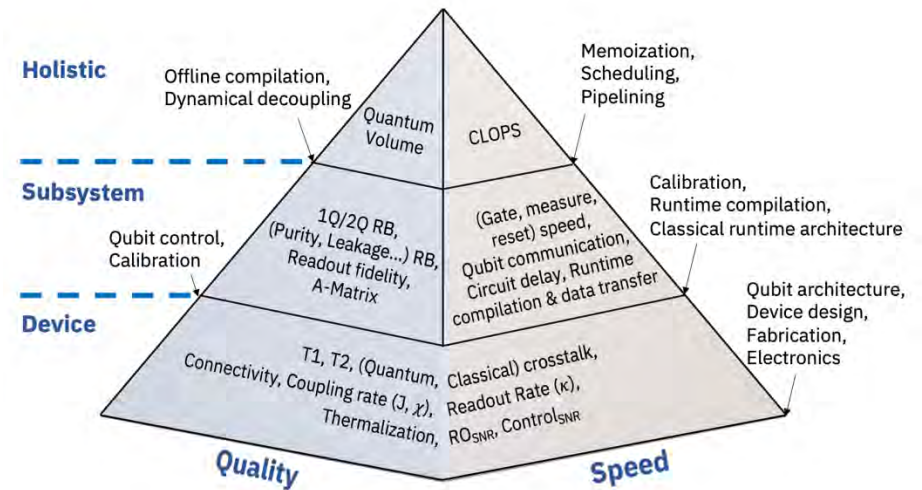
(～アクセス可能な状態空間の大きさ)



CLOPS

Circuit Layer Operations Per Second

QV実験を利用した新しい速度ベンチマーク



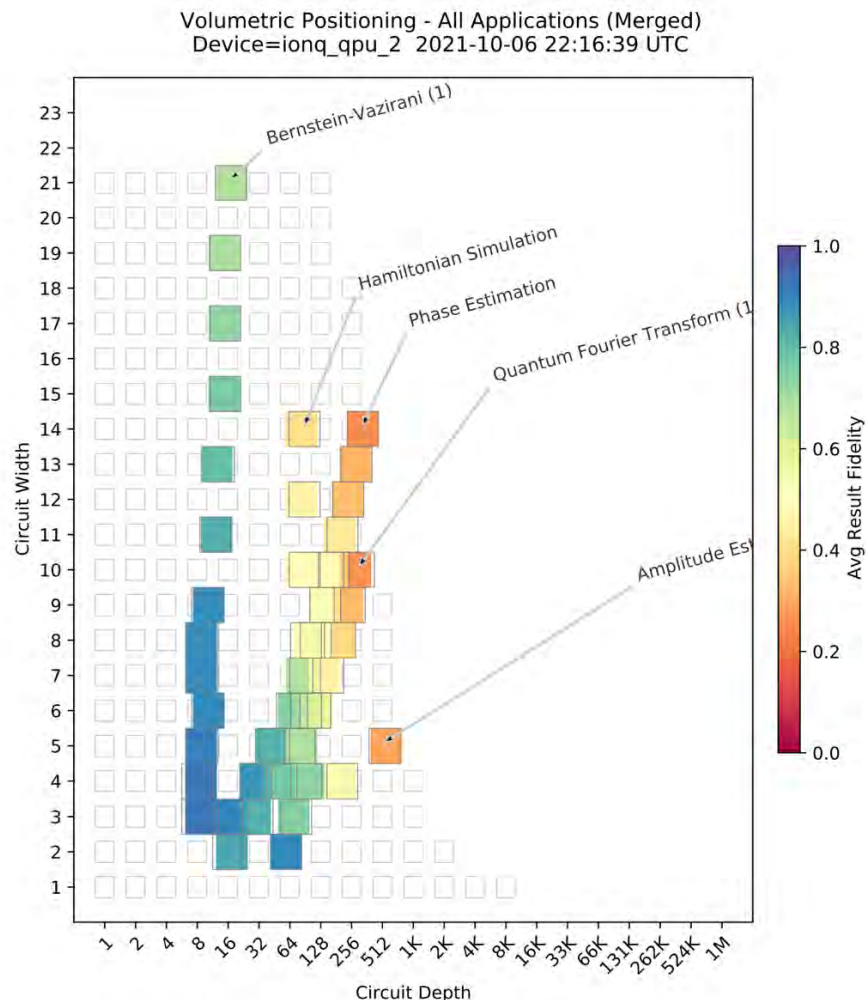
Device	Attributes					
	Qubits	QV	Layers	Shots	CLOPS	depth-1 circ per second
ibmq_bogota	5	32	5	100	1419	28355
ibmq_toronto	27	32	5	100	951	18837
ibmq_brooklyn	65	32	5	100	753	15041

FIG. 6. CLOPS results with depth-1 circuits per second

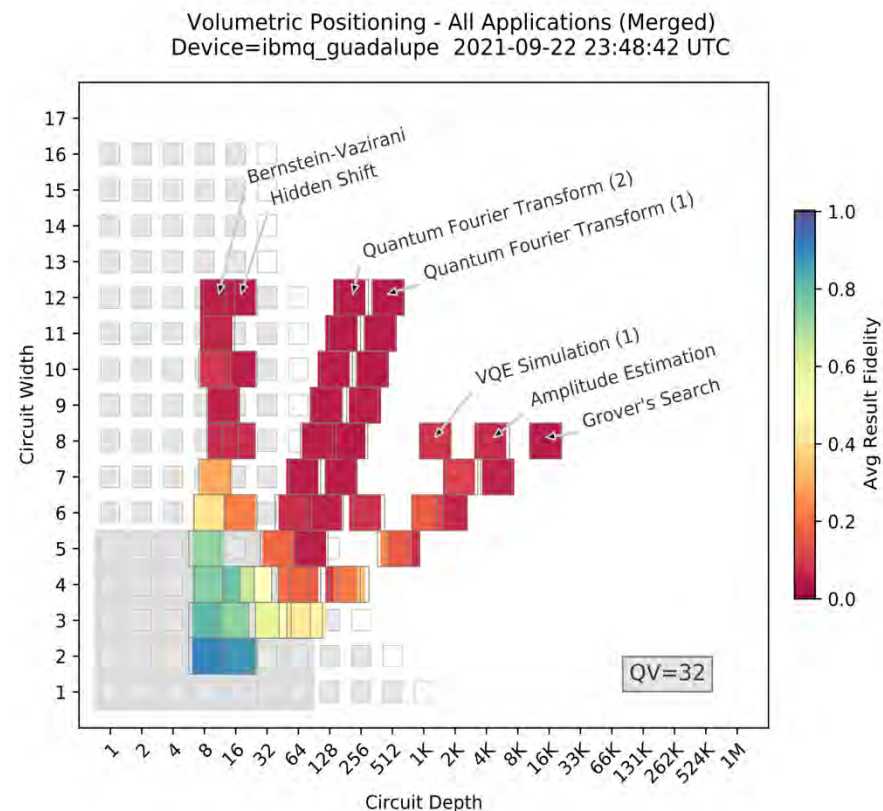
A. Wack, et al., "Quality, Speed, and Scale: three key attributes to measure the performance of near-term quantum computers", arXiv:2110.14108 (2021).

NISQマシンのベンチマーク

IonQ (Latest, イオントラップ)



IBM (Guadalupe, 超伝導量子ビット)



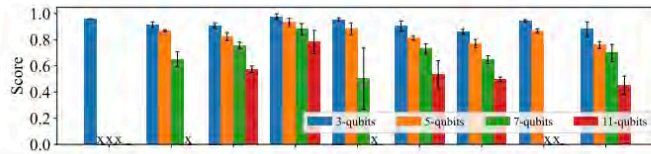
T. Lubinski, et al., "Application-Oriented Performance Benchmarks for Quantum Computing", arXiv:2110.03137 (2021).

NISQマシンのベンチマーク

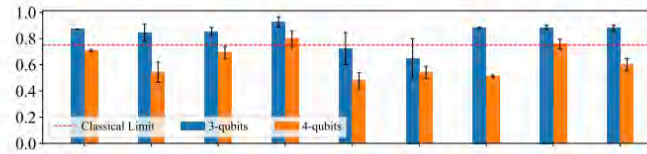


古典ベンチマーク手法を量子に適用 (Super.tech)

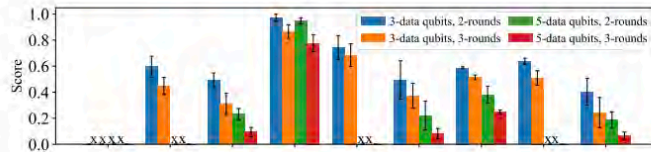
EPIQCプロジェクトからスピノフしたスタートアップ。



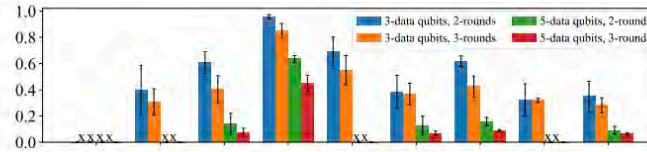
(a) GHZ



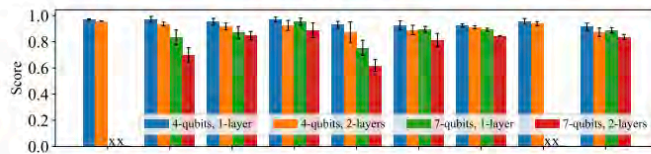
(b) Mermin-Bell



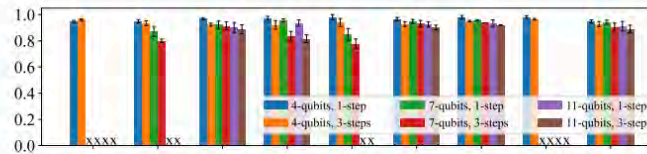
(c) Bit Code



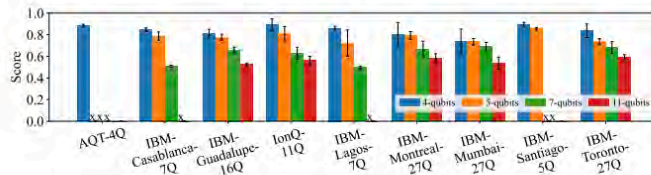
(d) Phase Code



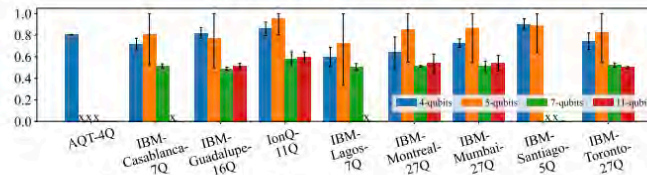
(e) VQE



(f) Hamiltonian Simulation



(g) ZZ-SWAP QAOA



(h) Vanilla QAOA



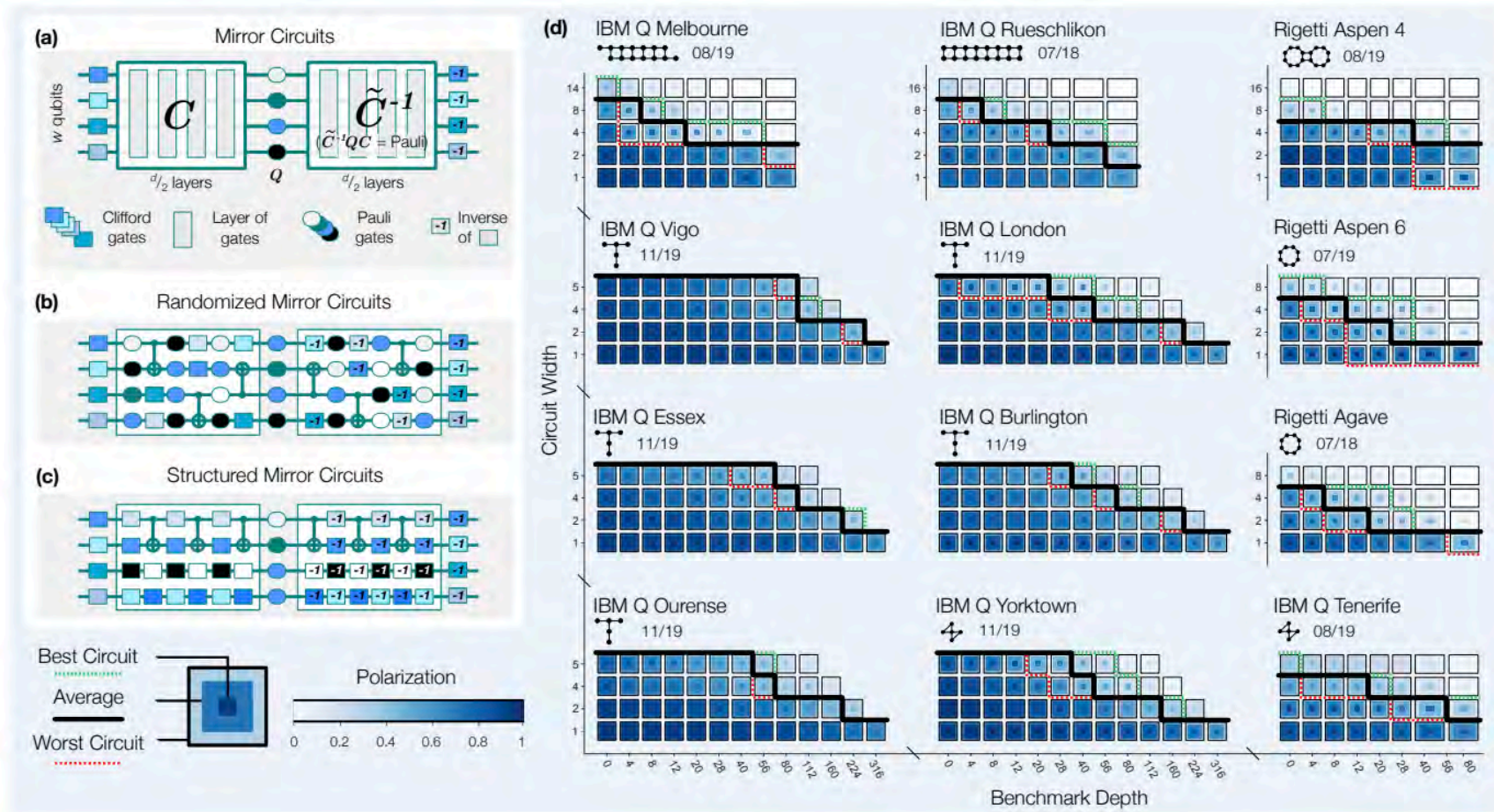
T. Tomesh et al., SupermarQ: A Scalable Quantum Benchmark Suite, HPCA 2022, 587-603 (2022).

<https://www.super.tech/supermarq/>

NISQマシンのベンチマーク

反転構造のある量子回路を実行 (DoE Sandia National Laboratory)

単純なランダム量子回路の結果だけでは性能評価できない



T. Proctor et al., Measuring the capabilities of quantum computers. Nature Physics 18, 75–79 (2022).

イジングマシンのベンチマーク

Sherrington-Kirkpatrick model :
スピングラスを扱う平均場モデル

3-Regular 3-XORSAT問題

小規模問題ではD-wave、大規模はGPU上のSATソルバが高速。富士通DA、東芝SBMはスケーリングはGPU同等だが遅い。

MQLib, NAE 3-SAT, SK model*

MQLibではD-waveのHSS、NAE 3-SATでは富士通DA、SKモデルでは東芝SBMが高速。

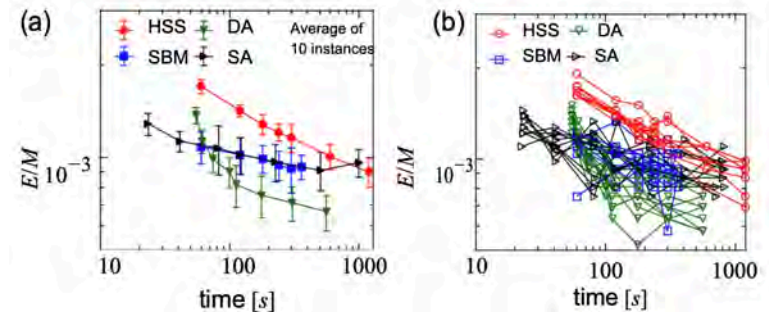
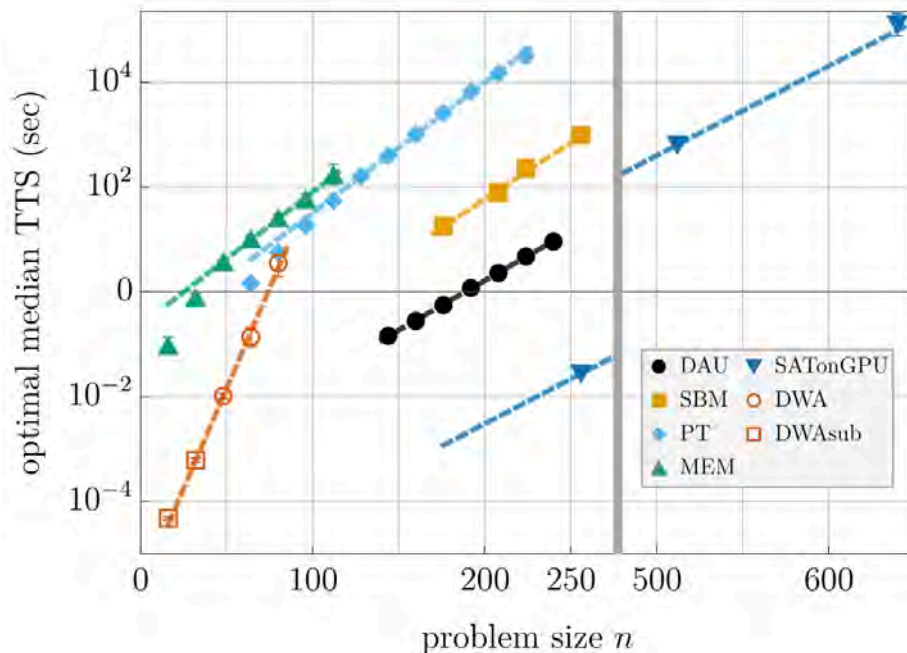


Figure 2. Value of the cost function per clause as a function of the execution time, obtained for NAE 3-SAT with a number of variables $N=8192$ and a number of clauses $M=17,285$, i.e., $M/N = 2.11$. Each data point was obtained from an independent run. See the main text for the time metric of each solver. (a) Average of ten instances. The error bars denote standard deviation. For DA and SA, the execution time was also averaged. (b) Results for ten different instances.

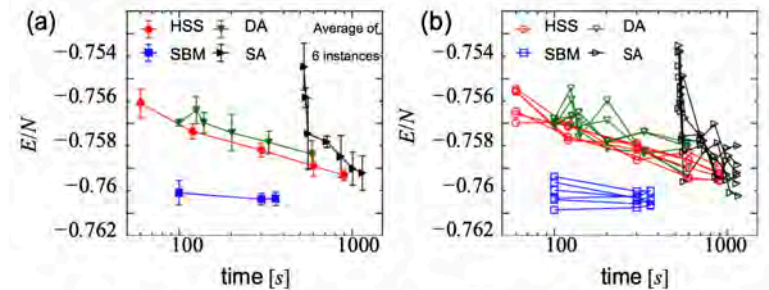


Figure 3. Value of cost function per variable as a function of the execution time, obtained for the SK model with a number of variables $N=8192$ and $J=1$. Each data point was obtained from an independent run. See the main text for the time metric of each solver. (a) Average of ten instances. The error bars denote standard deviation. For DA and SA, the execution time was also averaged. (b) Results for six different instances.

M. Kowalsky et al., 3-regular three-XORSAT planted solutions benchmark of classical and quantum heuristic optimizers, Quantum Science and Technology 7, 025008 (2022).

H. Oshiyama and M. Ohzeki, Benchmark of quantum-inspired heuristic solvers for quadratic unconstrained binary optimization, Scientific Reports 12, 2146 (2022).

4. | グローバル連携・ サプライチェーン

米国 : GAO Technology Assessment

米国政府説明責任局 (Government Accountability Office : GAO) 報告書

政策オプション

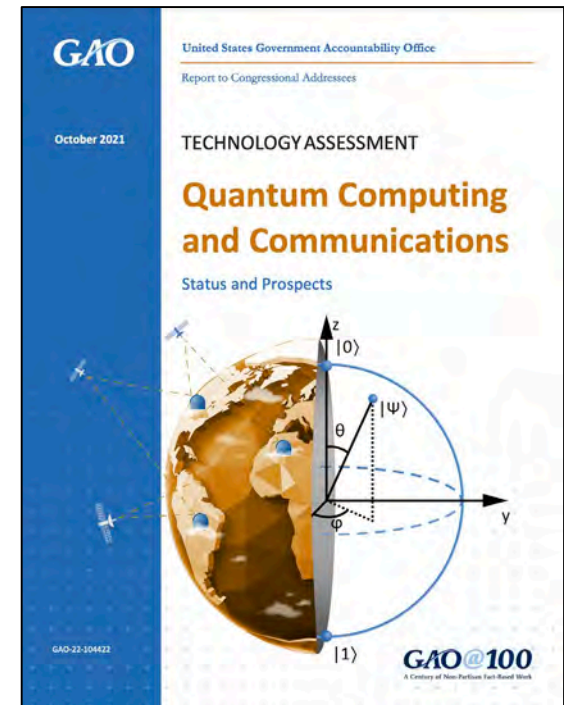
- グローバルサプライチェーンのギャップを特定する取り組みの強化
- リスクのあるサプライチェーンを持つアイテムの製造能力拡大

機会

- 堅牢なサプライチェーンは、必要なコンポーネントや材料へのアクセスを拡大したり、規模の経済を改善したりすることで、進歩を加速。量子技術開発のリスクを軽減するのに役立つ。
- 量子材料製造能力の向上により、量子技術の開発をサポートするための材料の信頼できる供給が確保される可能性がある。
- 量子材料の生産に特化した施設は、量子技術の開発に必要な構成部品のスケーラブルな製造をサポートするのに役立つ可能性がある。

懸念事項

- 現在の量子サプライチェーンはグローバルであり、リスクを伴う。コンポーネントの潜在的な脆弱性を完全に理解することは困難。
- レアアースなどの一部の重要なコンポーネントは、主に米国外で採掘されており、その軽減が困難な場合にはサプライチェーンにリスクをもたらす可能性がある。
- 量子製造施設の開発には長い時間がかかり、コストがかかる可能性がある。

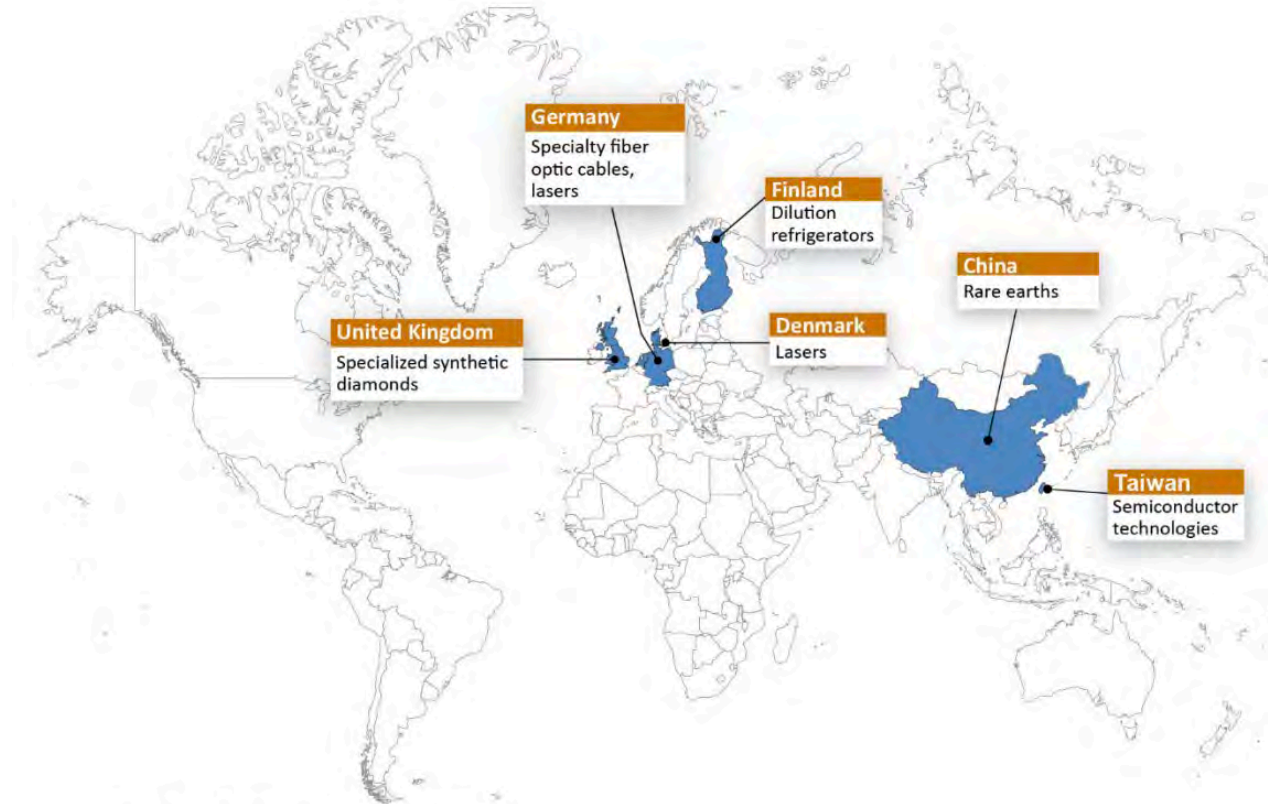


<https://www.gao.gov/products/gao-22-104422>

米国 : GAO Technology Assessment

量子サプライチェーンには潜在的な“単一障害点”があると指摘

特定の技術が利用できない場合、開発を中断せざるを得ない可能性がある（かつ、そのような技術が米国外にある）。例として希釈冷凍機、合成ダイヤモンド、光ファイバー、レーザー、半導体、レアアース、などが挙げられている。



Source: GAO analysis of public information. | GAO-22-104422

米国：サプライチェーンに関するアンケート（QED-C）

現在～今後3年間で生じる可能性が高いQC製造上のチョークポイント

QCサプライチェーン上の現在～今後3年間で生じる可能性が高いチョークポイント上位3つをアンケート調査（N=24）。潜在的QCチョークポイントの範囲は広く、すべてに適切に対処できる単一のソリューションはないと思われる。

	第1 選択	第2 選択	第3 選択	
主要なハードウェア部品	42	16	19	
主要な熟練労働力	4	26	6	
科学・工学・技術の熟練労働力	13	11	13	
主要な製造装置	13	16	6	
主要な加工済み材料	8	5	19	
主要な原材料	13	0	19	
材料・商品の流通経路	4	11	13	
材料・商品の代替流通経路	4	5	6	
計算・設計・テスト機器およびソフトウェア	0	5	0	
重要なIP・特許	0	5	0	単位 [%]

米国：サプライチェーンに関するアンケート（QED-C）

QCサプライチェーンの懸念に対処する政策イニシアティブの評価・期待

QED-Cのメンバー企業からみた米国政府の政策イニシアティブの価値（N=47）。政府からの財政・技術的な支援の増加・強化に関する政策が有益だと見なされている。また、グローバルなエコシステムへの参加を妨げる可能性のある政策には有害であるとの評価が下がっている。

	とても有益	やや有益	やや有害	とても有害	効果なし
量子R&D組織への政府直接投資	68	26	0	0	4
政府主導R&Dプログラムの改善・拡大	60	32	0	2	4
企業R&D費に対するインセンティブ（税控除など）を増加・強化	57	40	0	0	0
国内産業コンソーシアムの投資・支援の増加	47	45	0	2	2
国際協力支援の強化	45	34	6	2	9
大学などにおける政府支援量子R&Dプログラムの改善・拡大	40	49	4	2	4
IP・知的財産保護の強化	34	36	11	0	4
政府調達強化	28	36	6	6	9
標準化・ベンチャーマーケティング活動の強化	27	47	4	0	16
優遇産業（favored industries）政策の強化	21	40	9	4	2
法人税政策の改善	17	40	4	0	17
金融・投資規制の改善	15	26	11	4	20
独占禁止法規制の強化	13	17	15	13	21
商品・サービスの輸出管理政策の強化	4	13	28	21	11
みなし輸出（deemed export）政策の強化	2	17	21	23	4
輸出入関税の引き上げ	0	6	19	43	9

単位
[%]

日本：外為法改正（ロシア向け先端的な物品等の輸出禁止措置）

ロシアへの先端的な物品等の輸出等禁止措置（2022年5月20日施行）

追加対象品目（関連技術を含む）

- 石油精製用の触媒
- **量子計算機その他の量子の特性を利用した装置及びその附属装置並びにこれらの部分品**
- 電子顕微鏡、原子間力顕微鏡その他の顕微鏡及びこれらの顕微鏡とともに使用するよう設計した装置
- 積層造形用の装置（3Dプリンター）並びにこれに用いられる粉末状の金属及び金属合金
- 有機発光ダイオード、有機電界効果トランジスター及び有機太陽電池の製造用の装置
- 微小な電気機械システムの製造用の装置
- 水素（太陽光、風力その他の再生可能エネルギーを利用して製造するものに限る。）を原料とする燃料及び変換効率の高い太陽電池の製造用の装置
- **真空ポンプ及び真空計（量子技術関連）**
- **極低温用に設計した冷却装置及びその附属装置並びにこれらの部分品（量子技術関連）**
- 集積回路から蓋及び封止材料を除去するための装置
- **量子収率の高い光検出器（量子技術関連）**
- 工作機械及びその部分品並びに工作機械用の数値制御装置
- **電磁波による探知を困難にする機能を向上させる材料（メタマテリアル）、ほぼ等しい割合の複数の元素で構成された合金（高エントロピー合金）その他の先端的な材料（一部は量子技術関連）**
- 導電性高分子、半導電性高分子及び電界発光の性質を有する高分子