

量子コンピューターの 研究開発・産業動向

JST CRDS

量子チーム（赤木、嶋田、眞子）

2021.11.8

量子技術イノベーション戦略見直し検討WG

1.

量子コンピューターの 研究開発・技術の現状

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

研究開発の国際比較（量子コンピューター・シミュレーター）

量子コンピューター・シミュレーター						
	フェーズ	ハード		ソフト		各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
		現状	トレンド	現状	トレンド	
日本	基礎研究					<ul style="list-style-type: none"> • 第一次量子コンピューターブームの基礎研究は世界的にも顕著だった。一時的な停滞を乗り越え、研究開発が動き始めている。理研、阪大QIQB、慶応大量子コンピューターセンターなど拠点形成も進む。 • Si量子ドットで世界初となる3量子ビットもつれ状態を実証、光量子ビットの量子計算マシンで分野を牽引するなど、個別技術で存在感。
	応用研究・開発					<ul style="list-style-type: none"> • Q-LEAPでは量子コンピューターや量子シミュレーションの応用研究が進む。NEC、富士通など企業からの国家プロジェクトへの参画が見られ、産学連携による遂行体制が確立しつつある。 • 冷却原子量子シミュレータ開発でも分野を牽引。
米国	基礎研究					<ul style="list-style-type: none"> • DOE傘下の国立研究所や大学で古くから量子技術・量子情報科学の基礎研究が継続。 • 国家プロジェクトNational Quantum Initiativeでも基礎研究重視や研究インフラの整備が唱えられ、2020年に新たな量子拠点づくりに巨額の投資がなされた。
	応用研究・開発					<ul style="list-style-type: none"> • 上記の基礎研究をベースに、産業セクターで積極的な応用研究が進む。 • 超伝導量子ビットの量子コンピューター開発では、Googleが忠実度と集積度でリード。IBMは既にクラウドサービスを提供し、世界最多のユーザー数を誇る。 • イオン量子ビットの量子コンピューターではIonQが忠実度・集積度で先行。
欧州	基礎研究					<ul style="list-style-type: none"> • 国立研究所や大学で古くから量子技術・量子情報科学の基礎研究が継続。 • EU Quantum Technology Flagshipプロジェクト（1300億円超）がスタートし、第一次採択が決定。英国ではQuantum Technology Hubsのもと400億円規模の国家プロジェクトが2014年から進む。
	応用研究・開発					<ul style="list-style-type: none"> • オランダ、デルフト工科大学を中心とするQuTechでは、インテルやマイクロソフトと共同して、量子コンピューターの実現や応用に向けた研究が進む。
中国	基礎研究					<ul style="list-style-type: none"> • 巨額投資をもとに、中国科学院を中心に量子情報科学の拠点形成が進む。 • 中国科学技術大学で62量子ビット動作を成功、また光量子ビットの量子コンピューターで量子優位性を実現するなど、具体的な成果も出始めた。
	応用研究・開発					<ul style="list-style-type: none"> • アリババなどが量子コンピューターの開発を加速。クラウドサービスも開始。

〈現状〉

特に顕著な活動・成果が見えている

○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない

〈トレンド〉

↑：上昇傾向

→：現状維持

↓：下降傾向

NISQ時代

フルの量子コンピューター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

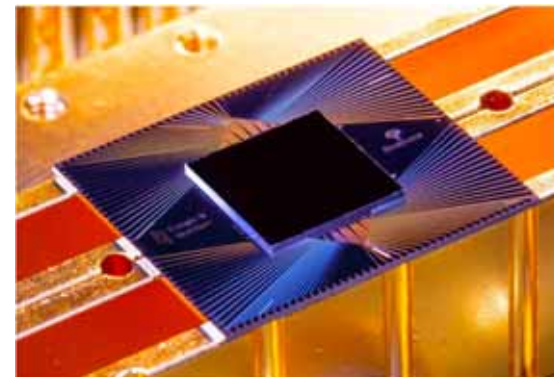
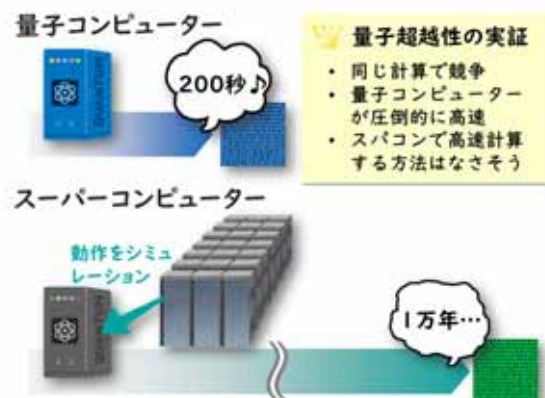
シミュレーションが**難しい**

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



嶋田義皓, Googleの「量子超越性」実証とは何なのか?, つばサイエンスニュース (2019年10月15日)

<https://ai.googleblog.com/2018/05/the-question-of-quantum-supremacy.html>

NISQ量子コンピューターのキラアプリ探索

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).

量子コンピューターメーカー各社の開発ロードマップ

- IBM : 2023年に1,121物理量子ビット (2020年9月)

<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/ibm-quantum-roadmap/>

- Google : 2029年に1,000,000物理量子ビット (2021年5月)

<https://www.imagazine.co.jp/google-quantum202105/>

- Origin Quantum (本源量子) : 2025年に1,024物理量子ビット (2021年9月)

中国情報通信技術学会技術基準研究所 (CAICT)
「量子云计算发展态势研究报告 (2021年)」より

<http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202110/P020211009505258802679.pdf>

- IonQ : 2028年に1,024アルゴリズムミック量子ビット* (2020年12月)

*高忠実度を実現するための誤り訂正オーバーヘッドは32:1で見積もりと発表 (= 32,768物理量子ビットの意味か?)

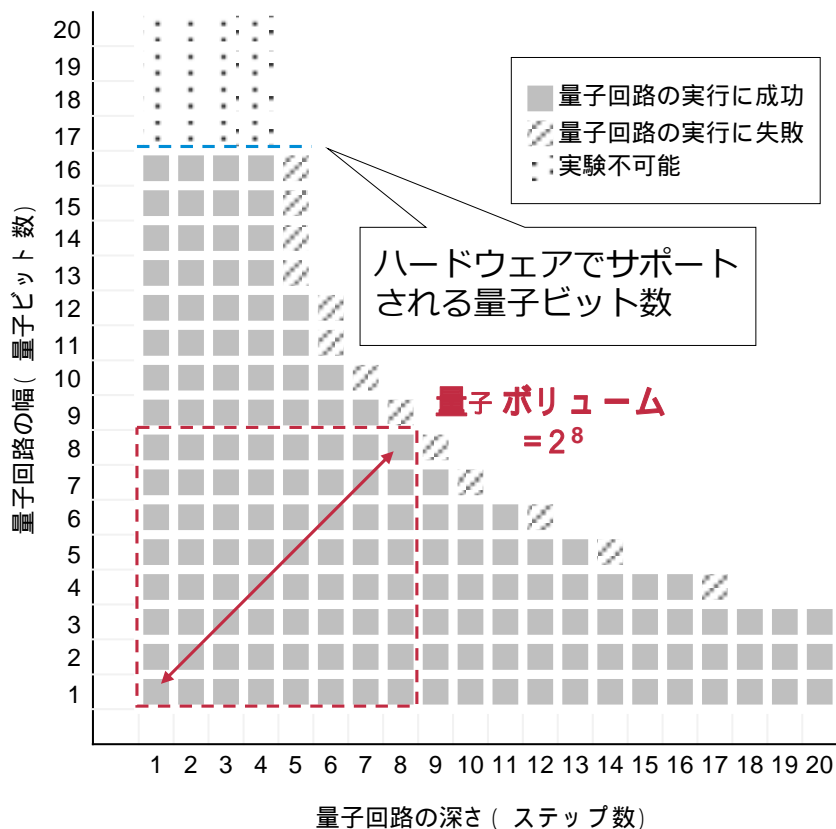
<https://techcrunch.com/2020/12/09/ionq-plans-to-launch-a-rack-mounted-quantum-computer-for-data-centers-in-2023/>

量子コンピューターの演算性能指標

量子ボリューム (QV)

有効な量子回路の大きさ

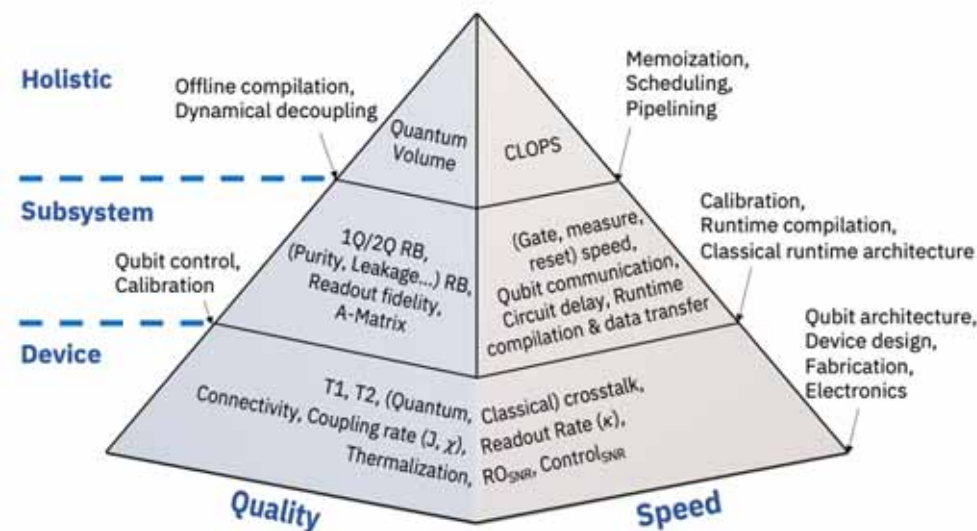
(～アクセス可能な状態空間の大きさ)



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



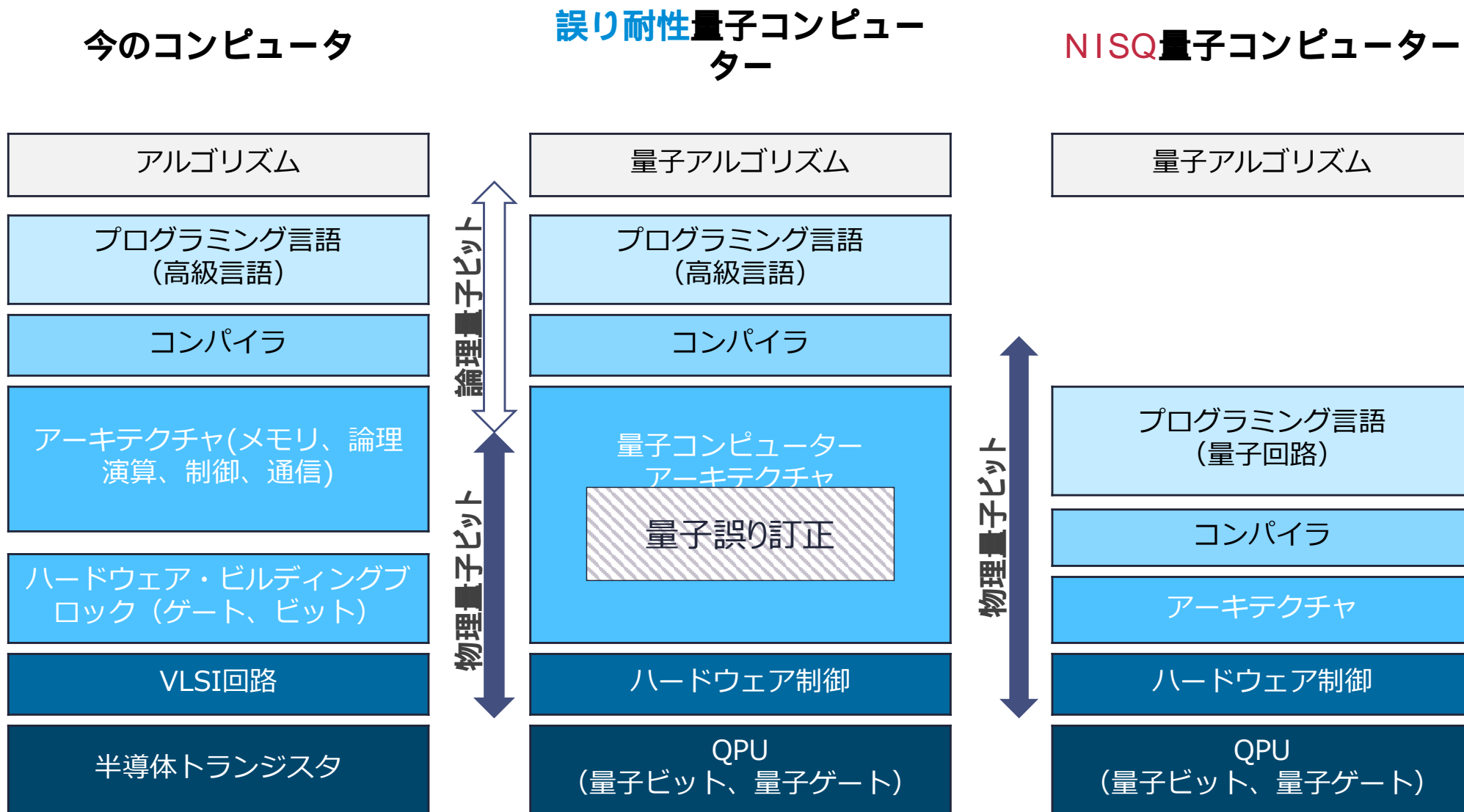
Device	Attributes					depth-1 circ per second
	Qubits	QV	Layers	Shots	CLOPS	
ibmq_bogota	5	32	5	100	1419	28355
ibmq_toronto	27	32	5	100	951	18837
ibmq_brooklyn	65	32	5	100	753	15041

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).



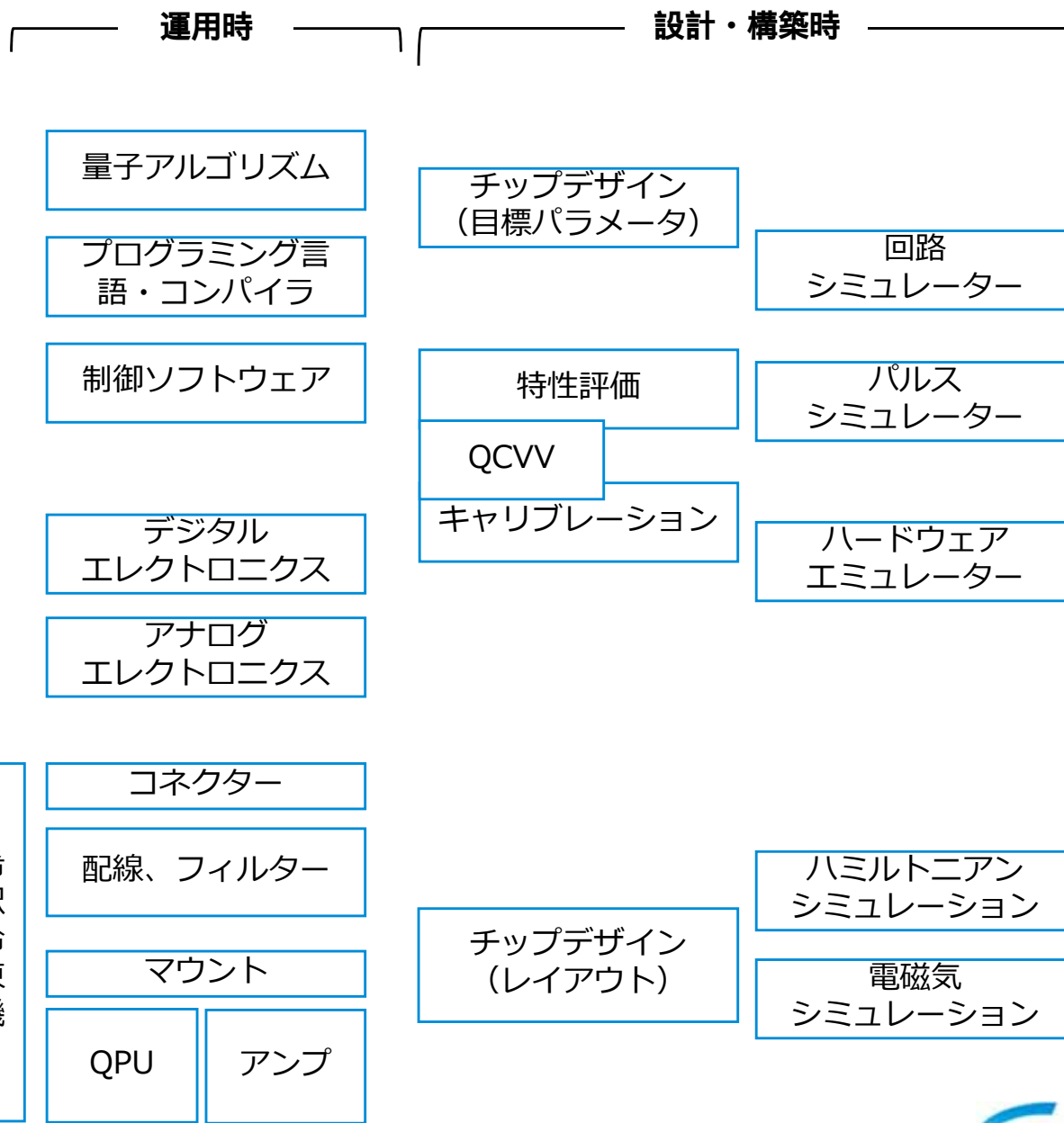
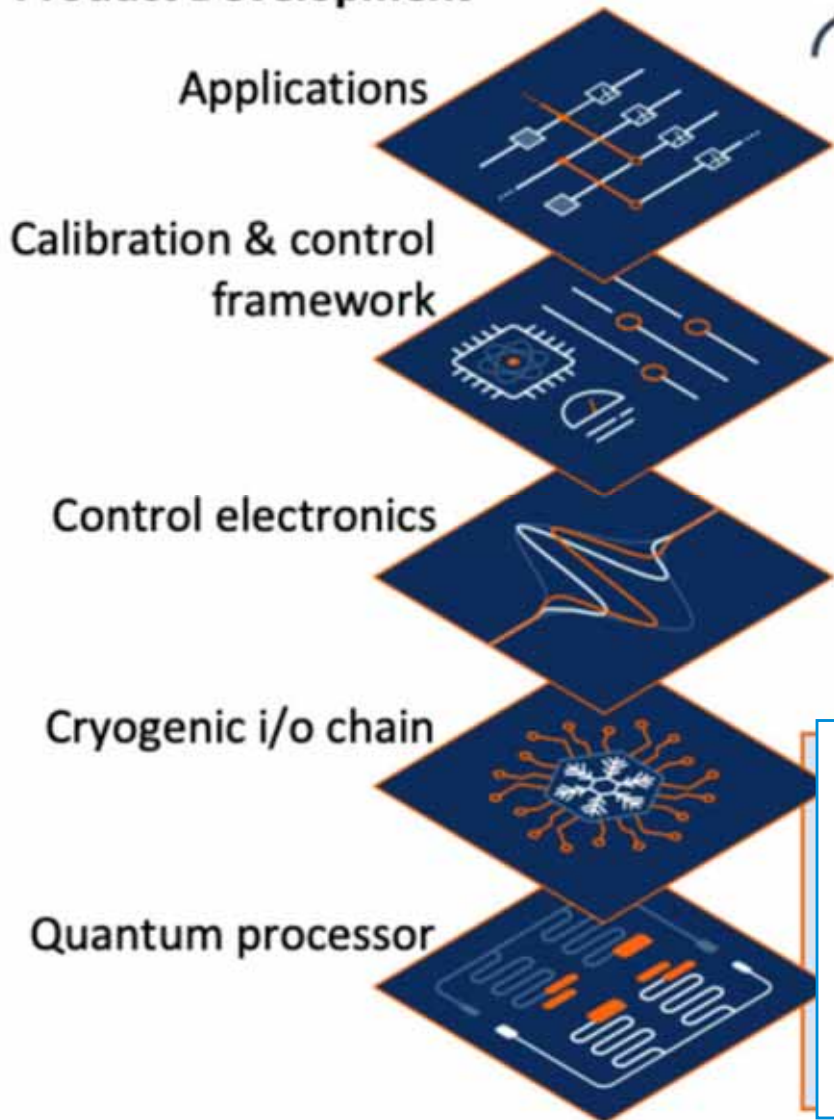
誤り耐性量子コンピューターにむけて



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

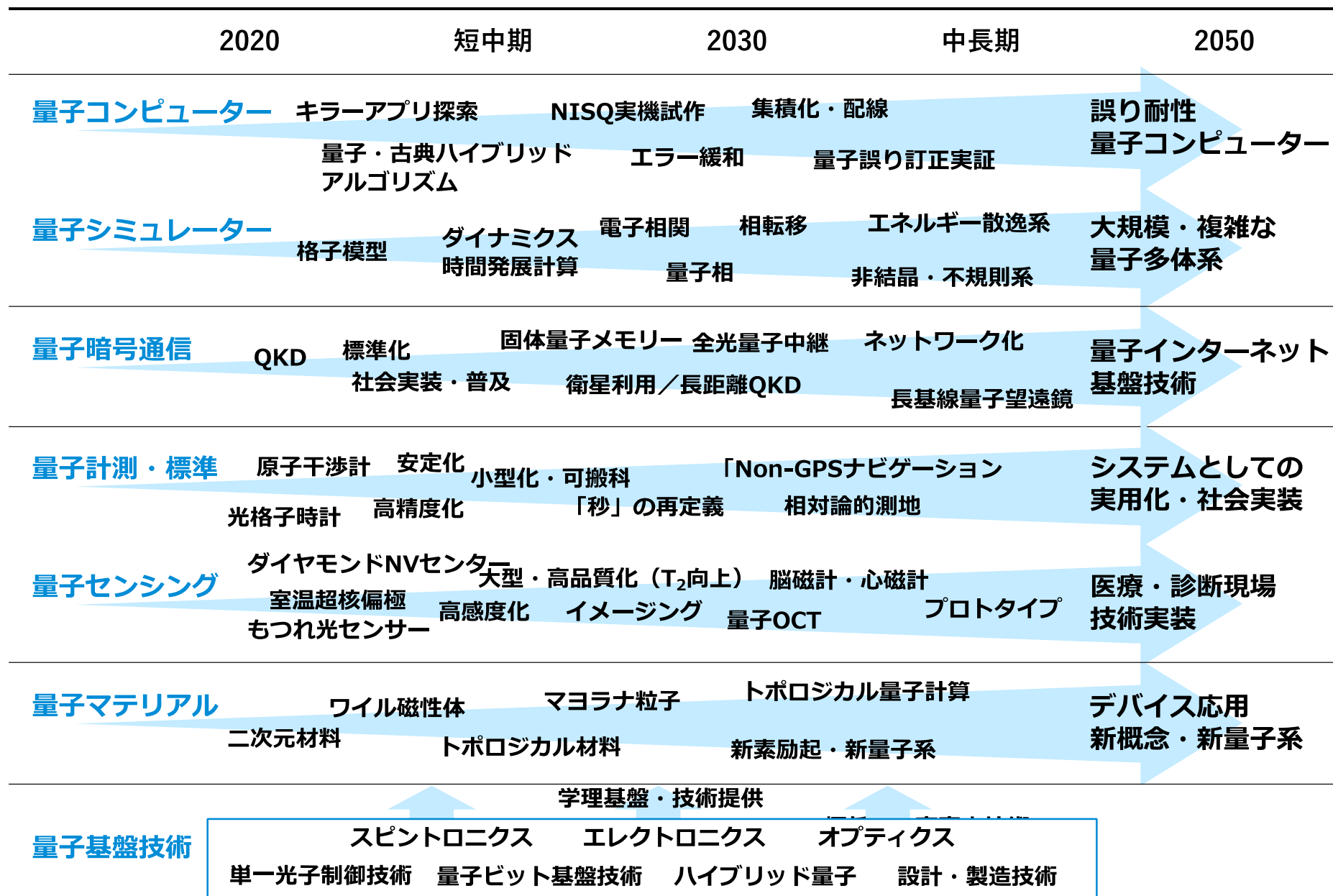
量子コンピューター実現技術群 (超伝導の場合)

Section 2. Product Development



Alberts, G.J.N., Rol, M.A., Last, T. et al. Accelerating quantum computer developments. EPJ Quantum Technol. 8, 18 (2021). を参考にCRDSで作成







量子技術 現状と展望



2 .

国際競争・各国の 量子コンピューター政策

主要国の量子技術政策

	政策動向	内容・予算規模
 米	<ul style="list-style-type: none"> 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
 中	<ul style="list-style-type: none"> 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)
 EU	<ul style="list-style-type: none"> Quantum Manifesto (2016.5) 	～1,300億円 (€1B) / (2019-28) 「Quantum Flagship」 20課題が採択
 独	<ul style="list-style-type: none"> ハイテク戦略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
 英	<ul style="list-style-type: none"> 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
 仏	<ul style="list-style-type: none"> 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 (量子コンピューター、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

代表的な量子技術R & D拠点

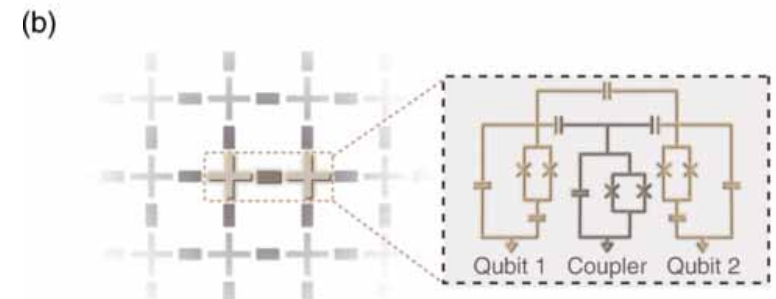
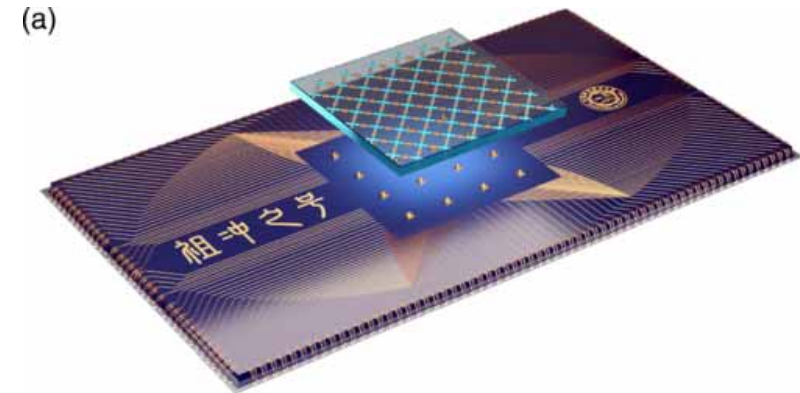
米	<ul style="list-style-type: none"> Quantum Leap Challenge Institutes 各グループに\$25M/5年を投資。2020年はコロラド大(量子センシング)、イリノイ大(量子コンピューターネットワーク)、UCバークレー(量子コンピューター)を代表とするグループを採択。2021年も1~3グループを募集中。 DOE Quantum Information Science (QIS) Research Centers 総額\$625M/5年を投資し、DOEの5つの研究所内に量子技術のセンターを新設(2020年) Joint Quantum Institute (JQI) メリーランド大と国立標準技術研究所により2006年に設立。「量子多体物理学」「量子制御・計測・センシング」「量子コンピューティングと情報科学」の3分野
中	<ul style="list-style-type: none"> 量子計算実験室 中国科学院とAlibabaで設立された量子コンピューター開発センター 量子情報科学国家実験室 2020年末に第1研究棟が完成
欧	<ul style="list-style-type: none"> Quantum Community Network Quantum Flagshipで採択された20課題のバーチャル研究拠点
独	<ul style="list-style-type: none"> Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST) 2014年に設立。シュトゥットガルト大、ウルム大、マックスプランク固体物性研究所で構成。「量子センシング」「複雑量子系」「物質の量子状態制御」「量子電気・光工学」「光-物質界面」の5分野
英	<ul style="list-style-type: none"> UK National Quantum Technology Hubs 「量子センサ・計測」(バーミンガム大)、「量子イメージング」(グラスゴー大)、「量子情報ネットワーク」(オックスフォード大)、「量子通信」(ヨーク大)の各分野でハブ拠点が形成
加	<ul style="list-style-type: none"> Institute for Quantum Computing (IQC) 2002年にウォータールー大学内に設立。「量子コンピューティング」「量子通信」「量子センシング」「量子マテリアル」の4分野
蘭	<ul style="list-style-type: none"> QuTech デルフト工科大学内に設置。「誤り訂正量子コンピューティング」、「量子インターネット・ネットワークコンピューティング」、「トポロジカル量子コンピューティング」の3分野 QuSoft 量子ソフトウェアの研究組織として国立数学情報科学研究所、アムステルダム大学、アムステルダム自由大学で2015年に設立

中国の最近の動き（2021年～）

中国科技大グループ、66量子ビット超伝導量子チップを開発

- 2次元の66量子ビット（11×6量子ビット）の超伝導チップ「祖冲之号（Zuchongzhi） 2.1」を開発。60量子ビットを用いたランダム量子回路サンプリング計算で、Google Sycamoreプロセッサ（53量子ビット）を大幅に上回る速度を実現したと発表（2021年10月）。

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.180501>



中国科技大グループ、光を使った量子コンピューター「九章2号」を開発

- 光を使った量子コンピューターで量子優位性を実証した「九章」の100億倍の速さでガウシアンボソンサンプリング問題を解くことができる「九章2号」を開発したと発表。光源の品質向上や干渉計のスケールアップなどにより実現（2021年10月）。

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.180502>



<https://physics.aps.org/articles/v14/147>

中国の最近の動き (2021年～)

2020年の基礎研究経費が初めて総研究開発経費の6%超

- 王志刚科技部長（日本の大臣に相当）が全国政協における民主党派委員の会議で発言。
- 長年、総研究開発経費の5%前後だった基礎研究経費が、2020年に初めて6%を超えた。
- 第13次五カ年計画期間に、中央政府の基礎研究経費は倍増。物質科学、量子科学、ナノ科学、生命科学等で大きな成果。
- 第14次五カ年計画の草案に示されるように、基礎研究10年行動計画を策定し、基礎研究センターを重点配置し、基礎研究経費の割合を8%以上にする。（2021年3月）。

新华网ウェブサイト http://www.xinhuanet.com/politics/2021lh/2021-03/08/c_1127181550.htm
JST-CRDS デイリーウォッチャーサイト <https://crds.jst.go.jp/dw/20210405/2021040526471/>

中国科学院、Googleの量子優位性実験のシミュレーションをGPUで5日で達成

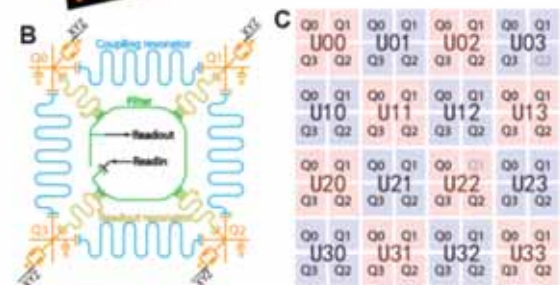
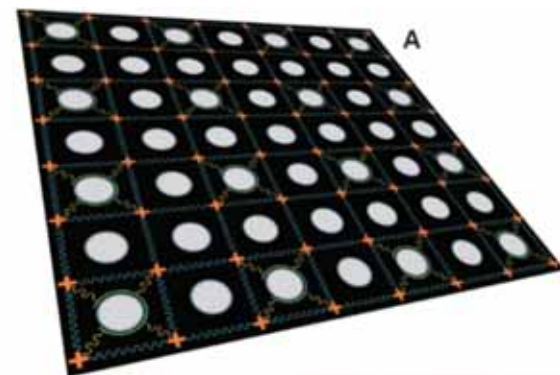
- Googleの量子優位性実験（53量子ビット、20サイクルのランダム量子回路）のシミュレーションを60GPUsの古典コンピュータで5日で再現できたと発表（2021年3月）。

<https://arxiv.org/abs/2103.03074>

中国科技大グループ、62量子ビット超伝導量子チップを実用化

- 2次元の62量子ビットの超伝導チップ（8×8、2つ不良）を用いて量子ウォークを実証（2021年2月）。

<https://science.sciencemag.org/content/372/6545/948>



3. | 国内外ベンダーの動向

クラウド利用が進むNISQ量子コンピューター

		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				●

量子コンピューターHW開発企業

	方式	開発企業
ゲート型 量子 コンピューター	超伝導	(米) IBM, Google, Rigetti, qci (中) Alibaba, 本源量子 (Origin Quantum) (日) 富士通 (加) D-wave ?
	イオン トラップ	(米) IonQ, Honeywell (中) 启科量子 (Qudoor) (澳) AQT (Alpine Quantum Technology)
	冷却原子	(米) ColdQuanta (仏) Pasqal
	半導体	(米) Intel (日) 日立製作所
	光	(米) Xanadu, PsiQuantum
	NMR	(中) 量旋科技 (SpinQ)
	マヨラナ	(米) Microsoft
イジング マシン	超伝導	(加) D-wave ※磁束量子ビット (日) NEC ※超伝導パラメトロン
	CMOS	(日) 日立製作所、富士通、東芝
	光	(日) NTT ※コヒーレントイジングマシン (中) 玻色量子 (Bose Quantum) ※コヒーレントイジングマシン

スタートアップ関連の最近の動き (2021年～)

IonQ (米) 躍進

- IBM Qiskitをサポート (2021年4月) → 全PFのクラウドサービスで使用可能に
- IonQがSPAC (特別買収目的会社) 上場。時価総額が約20億ドル (2021年3月) 。Softbankが出資 (2021年6月) 。
- 量子ボリューム400万 (世界最大) の量子コンピューター (32量子ビット) を発表 (2020年10月) 。

<https://ionq.com/news/march-08-2021-ionq-to-become-first-public-quantum-computer-company> ;
<https://jp.wsj.com/articles/softbank-and-ionq-in-strategic-pact-on-quantum-computing-11623211563>

Cambridge Quantum Computing (英) と Honeywell (米) が量子コンピューターの合弁会社設立

- Honeywellの量子コンピューター製造子会社Honeywell Quantum SolutionsとCambridge Quantum Computingが経営統合し、持ち株会社を設立することを発表 (2021年6月) 。

<https://www.honeywell.com/us/en/press/2021/06/honeywell-quantum-solutions-and-cambridge-quantum-computing-will-combine-to-form-worlds-largest-most-advanced-quantum-business>

Honeywellの量子コンピューター、512量子ボリュームを達成

- Honeywellのイオン量子ビット (10量子ビット) を利用した量子コンピューター Model H1で、512量子ボリュームを達成したと発表 (2021年3月) 。
- 商用の量子コンピューターとしては最大
- 6か月間で4倍の量子ボリュームに。シングル量子ビットフィデリティは99.991(8)% 。

<https://www.honeywell.com/us/en/news/2021/03/honeywell-sets-new-record-for-quantum-computing-performance>

ソフトベンダー・プラットフォーム対応表

		ゲート型 量子コンピューター	イジングマシン
国内	blueqat	●	(撤退?)
	Jij	●	●
	NTTデータ		●
	QunaSys	●	
	グルーヴノーツ		●
	フィックスターズ	●	●
	シグマアイ		●
海外	Amazon Web Service	●	●
	Cambridge Quantum Computing	●	
	Microsoft Azure	●	●
	QC Ware	●	●
	QuantiFi		
	Zapata Computing	●	●

量子コンピューター&イジングマシン利用例

◇イジングマシン
○量子ゲート方式での取り組み
* 両方での取り組み

	取り組み状況		
	取り組み発表	理論検証	実証実験
金融	<ul style="list-style-type: none"> ◇ コールセンター要員シフト作成 (SMFG) ○ 資産運用、暗号、リスク計算(MUFG) * AI活用、暗号、リスク計算(みずほ) * ポートフォリオ最適化(RBS、J.P.Morgan) 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ AIで株価予想(野村アセットマネジメン ト) ◇ ポートフォリオ最適化(1Qbit) ◇ リバースストレステスト(HSBC) * AIでオプション計算(IBM) 	
製造	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 倉庫オペレーション改善(日立、さくら インターネット) ◇ 生産計画最適化(富士通) 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 自動車のキャリブレーションテスト (AISIN AW) ◇ ロボットアーム操作(BMW) ◇ グラフ彩色(ロッキードマーティン) ◇ フォルトツリー解析(エアバス) 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 無人搬送車経路最適化(DENSO) ◇ 工場内ピックアップルート最適化(富 士通) ◇ 生産計画最適化(NEC)
情報		<ul style="list-style-type: none"> ◇ 広告入札最適化(リクルートコミュニ ケーションズ) ◇ 航空写真からの樹木判定(NASA) ◇ 行列因子分解(Los Alamos) 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ ホテルリコメンド最適化(リクルート コミュニケーションズ)
化学	<ul style="list-style-type: none"> ◇ 分子類似性による創薬(富士通) * リチウム電池開発(三菱ケミカル、JSR) 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ フラグメント分子軌道法(京セラ) ◇ ヒトαシヌクレインの凝集(Peptone) ◇ 量子分子動力法シミュレーション(Los Alamos) ○ 材料開発：分子構造予測 (OTI Lumionics Inc) 	
交通 など		<ul style="list-style-type: none"> ◇ マルチモーダルシェア(DENSO) ◇ 北京の交通量最適化(Volkswagen) 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ バンコクの交通量最適化(DENSO、 豊田通商) ◇ スタジアム座席販売最適化(富士通)