

国際連携、産官学連携、 知財・標準化

JST CRDS

量子チーム（赤木、嶋田、眞子）

2022.1.26

量子技術イノベーション戦略見直し検討WG

1. | 国際連携

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

米国：量子ネットワーク

量子ネットワークの協調的アプローチに関する報告書の発表（2021年1月）

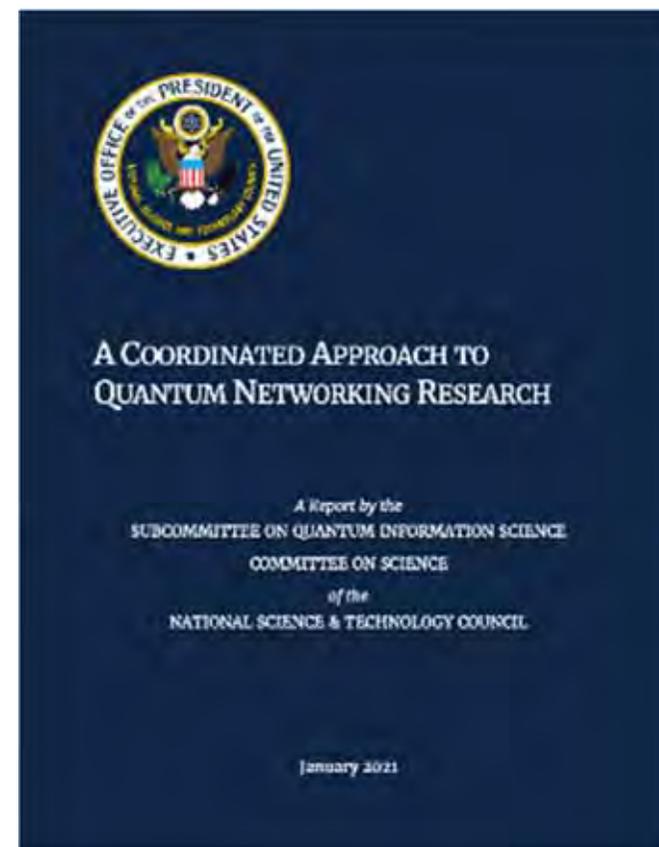
国家科学技術会議（the National Science and Technology Council）は、量子ネットワーク（QN）推進のための技術的勧告（TR）と制度的勧告（PR）を行い、政府機関がとるべき方向性を提示。

技術的勧告

- TR1：QNのユースケース研究を継続
- TR2：QNの有益なコアコンポーネントの優先順位付け
- TR3：QNをサポートする古典技術の改善
- TR4：適切なサイズのQNテストベッドの開発

制度的勧告

- PR1：QN研究開発に関する省庁間連携の強化
- PR2：QN研究開発インフラのタイムテーブルの確立
- PR3：QN研究開発の**国際協力の促進**



米国：NSF「量子情報科学・工学における国際協力支援」

DCL: International Collaboration Supplements in Quantum Information Science and Engineering Research (2021/5/21)

すでにNSFからグラントを受給している研究者を対象に、研究・教育目的での国際協力についての補助的な資金提供。目安30000USD。

興味深い協力国として、オーストラリア、カナダ、ドイツ、日本、オランダ、韓国、英国が挙げられている。

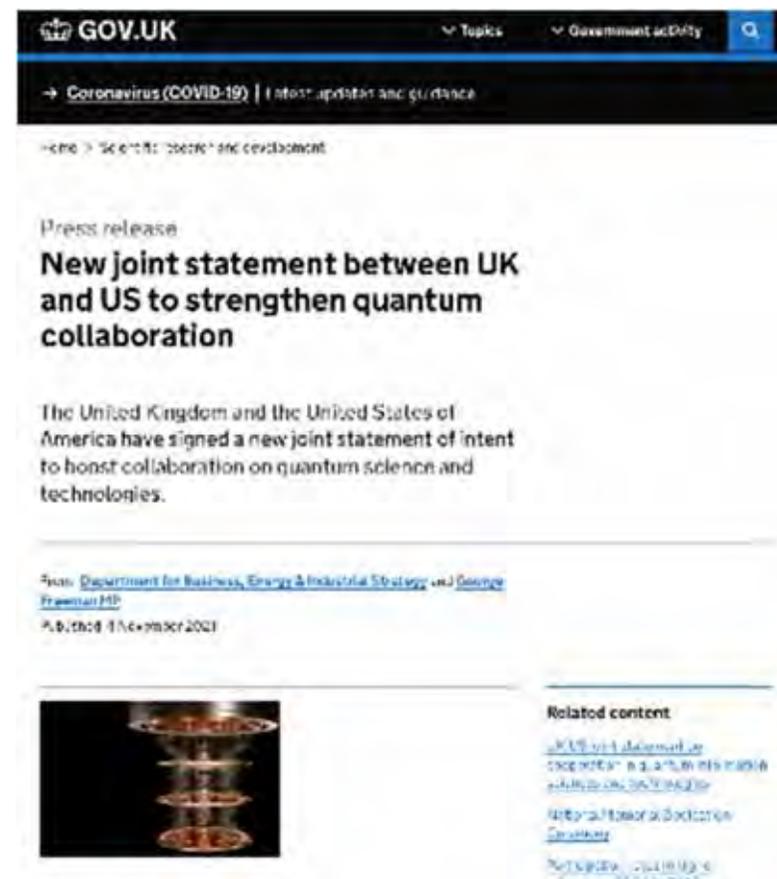


<https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21090/nsf21090.jsp>

アメリカ-イギリス 「量子協力強化のための共同声明」

New joint statement between UK and US to strengthen quantum collaboration (2021/11/4)

- 量子技術のコラボレーションを促進するための英国と米国による新しい意向表明
- 科学大臣ジョージ・フリーマンと科学技術政策局長および大統領の科学顧問、エリック・ランダー博士によって署名
- 発表は、Innovate UKが、量子技術の商業化を目的とした12のプロジェクトに資金を提供するための5,000万ポンドの国内競争の結果も発表するのと同じ日



<https://www.gov.uk/government/news/new-joint-statement-between-uk-and-us-to-strengthen-quantum-collaboration>

イギリス-カナダ「量子技術コンペティション」

UK-Canada Quantum Technologies Competition

- 英国研究技術革新機構（UKRI）とカナダ自然科学工学研究評議会（NSERC）が共同開催。量子技術開発のための2国間の最初のPJ。2017年の合意に基づく。
- 受賞した8つのプロジェクトは、二国間イニシアチブの下で、英国からの200万ポンドの助成金と、カナダからの合計440万カナダドルの投資をシェア。

プロジェクト名	カナダ・アカデミア	イギリス・産業界	カナダ共同提案者	カナダ・産業界	イギリス・アカデミア
Diamond NV Sensors for Quantum-Limited Magnetic Field Measurements	Michael Bradley University of Saskatchewan	M-Squared Lasers Limited		Dias Geophysical Ltd.	Nottingham University
Scanning Probe Fabrication and Readout of Atomically Precise Silicon Quantum Technologies	Peter Grutter, McGill University	Nanolayers Research Computing Ltd.		NanoAcademic Technologies Inc.	Univ. of London – Univ. College London
Reference-Frame Independent Quantum Communication for Satellite-Based Networks (ReFQ)	Thomas Jennewein, University of Waterloo	Craft Prospect Ltd.	N. Lutkenhaus, Univ. of Waterloo, D Oblak, Univ. of Calgary	Waterloo, COM DEV International Ltd, Canadian Space Agency, Ontario Research Fund Excellence	University of Bristol, University of Strathclyde
Making noisy quantum processors practical: from theory to applications	Raymond Laflamme, University of Waterloo	Phasecraft Limited		Perimeter Inst for Theoretical Physics, Quantum Benchmark Inc.	Univ. of London – Univ. College London
Development of Highly Efficient, Portable, and Fiber-Integrated Photonic Platforms Based on Micro-Resonator	Roberto Morandotti, Institut national de la recherche scientifique (INRS)	TMD Technologies Ltd.		OptoElectronic Components Inc.	University of Sussex
Connectorizing Integrated Quantum Photonics Devices	Roberto Morandotti, Institut national de la recherche scientifique (INRS)	Duality Quantum Photonics		PROMPT, OptoElectronic Components Inc.	Heriot-Watt University
Building a standardised quantum-safe networking architecture	Michele Mosca, University of Waterloo	KETS Quantum Security Ltd.	N. Lutkenhaus and DJ Stebila University of Waterloo	RHEA Group, QEYnet Inc., Crypto4A, Communications Security Establishment	University of Bristol
Advanced Manufacturing Toolkit for Quantum Sensing and Quantum Computing	Michel Pioro-Ladrière, Université de Sherbrooke	Oxford Instruments; Nanotechnology Tools Limited	D Drouin, Université de Sherbrooke	Oxford Instruments, SBQuantum Inc., PROMPT, Nord Quantique	University of Glasgow

EU内の国際連携

European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) initiative

- ヨーロッパ全域における量子通信インフラの構築を目指すために、2019年6月に7ヶ国の合意で発足。2021年6月にEU全加盟国（27ヶ国）の合意完了。
- 欧州域内の拠点をQKDネットワークで結ぶ大規模テストベッドPJ。
- OpenQKD projectの成果を活用。Digital Europe programme、Connecting Europe Facility、Horizon Europeなどのプログラムでサポート。
- 2027年までに、地上ネットワークおよび衛星を使った完全に安全な通信ネットワークの構築を目指す。
- まずはQKD。将来的には量子インターネットのバックボーン想定
- アプリは金融、安全保障、医療情報など。



<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

EU QIA プロジェクト



Quantum Internet Alliance (QIA) 1)、2)

Horizon 2020のPJ（代表：オランダ デルフト工科大）（2018～2022年、計 €10M）

- ▶ 全欧州にわたる量子インターネットの青写真を描くことを目標に、多ノード量子ネットワーク上で動作する完全に統合されたスタックを実現するプロジェクト。
- ▶ エンドノード（トラップ型イオンキュービット、ダイヤモンドNVキュービット、中性原子キュービット）と量子リピーター（希土類ベースのメモリ、原子ガス、量子ドット）の技術開発を行い、双方の統合を行う。それによって3～4の量子ネットワークノード間のエンタングルメントとテレポーテーションを実証し、マルチノードネットワークを実現。
- ▶ さらに、メモリベースの量子中継器を実現し、世界最長の中継器リンクを含む、長距離中継器リンクの原理実証を行う。
- ▶ 23のパートナー（大学、研究機関、企業）が参画。



1) <https://quantum-internet.team/>

2) <https://cordis.europa.eu/project/id/820445>

EU OpenQKD プロジェクト



Open European Quantum Key Distribution Testbed (OpenQKD) ¹⁾、²⁾

Horizon 2020のPJ（代表：オーストリア AIT）（2019～2022年、計 €18M）

- ▶ 欧州の量子通信技術のグローバルな地位の強化を目指し、EU全域にまたがる量子セキュリティ技術を統合することを目的とするプロジェクト。
- ▶ 具体的なターゲット
 - QKD対応実験プラットフォームの確立
 - インターフェース標準化
 - ユースケースの実証
など
- EU域内13か国 38のパートナー（東芝など 16の企業、22の研究機関）が参画。



1) <https://openqkd.eu/>

2) <https://cordis.europa.eu/project/id/857156>

フランス-オランダ (2021年～)

フランスとオランダが量子技術に関する覚書を締結 (2021年8月)

- 将来の欧州の量子リーダーの基盤を構築するべく、量子技術における二国間協力の強化を目的とした覚書を締結。
- 目的は、両国間の自然な相乗効果を高め、欧州のリーダーを創出し、最高の国際的な人材を引き付けるために必要なクリティカルマスに到達すること。
- この協力関係を長期的に確立するために、両国の量子戦略コーディネータは、共同融資や二国間協力の機会を特定することができるように、ガバナンスと交流の枠組みを設定する。

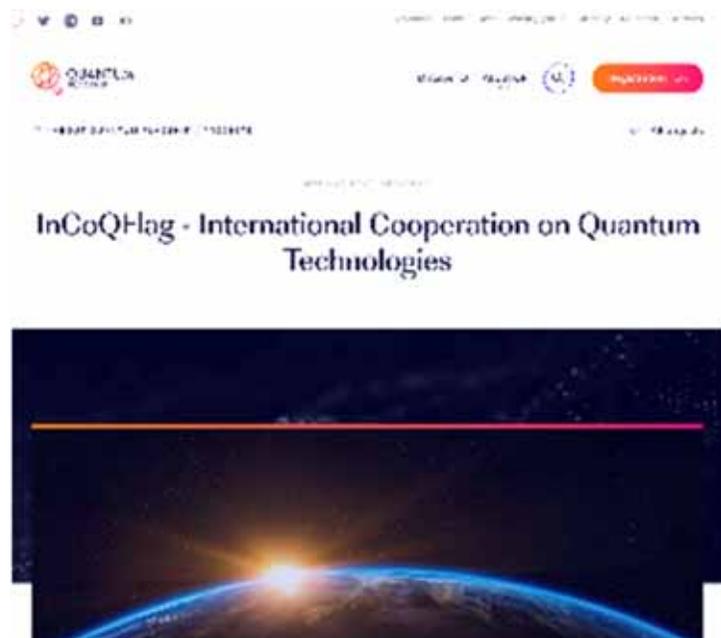


<https://www.gouvernement.fr/investissements-d-avenir-l-strategie-quantique-protocole-d-accord-entre-la-france-et-les-pays-bas>



InCoQFlagプロジェクト

- アメリカ、カナダ、日本など、量子に多額の投資を行っている国々との協力を目指し、双方にメリットのある領域の特定が目的のPJ
- 技術、インフラ、スキル、知識を国際的なパートナーと共有。Win-Winのコラボレーションを構築を目指す。
- EUと非EUの学界・産業界の利害関係者の中でいくつかのワークショップとネットワーキングセッションを開催（EU-カナダで2021年5月にWS開催済み）



<https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/incoqflag/>

文科省と米エネルギー省（DOE）に係るProject Arrangement署名

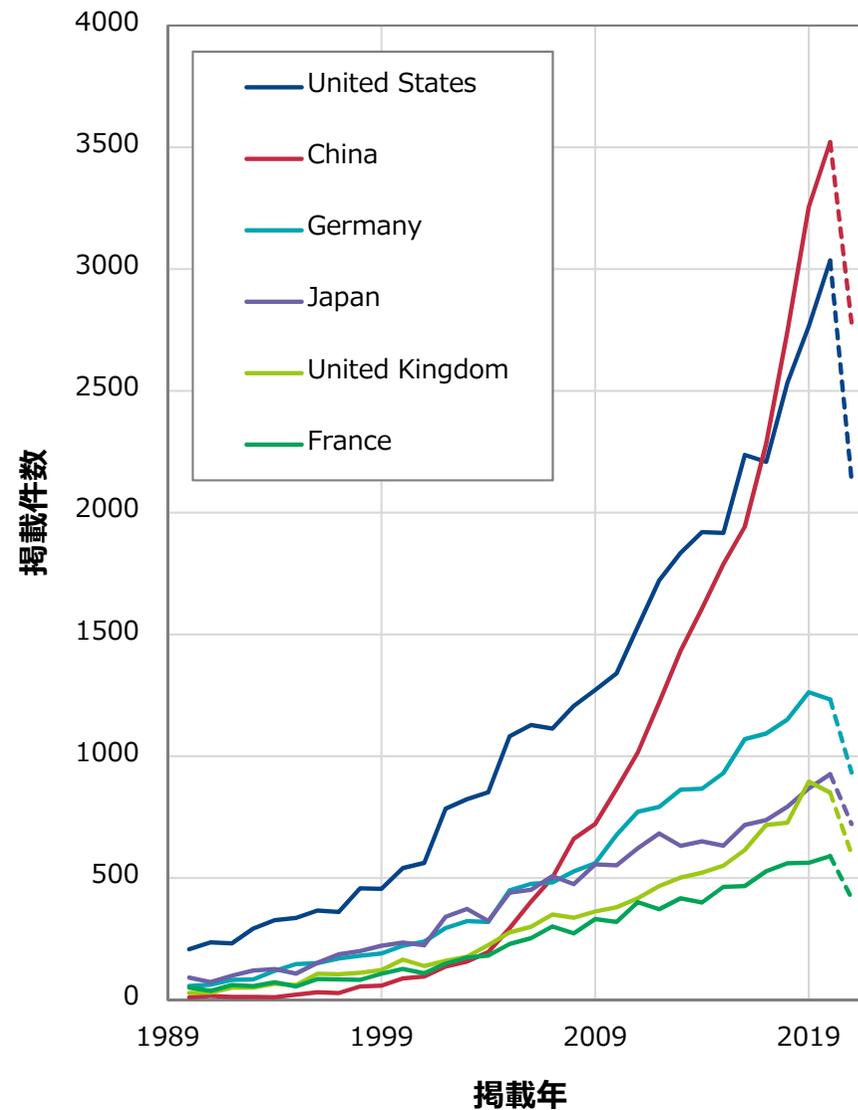
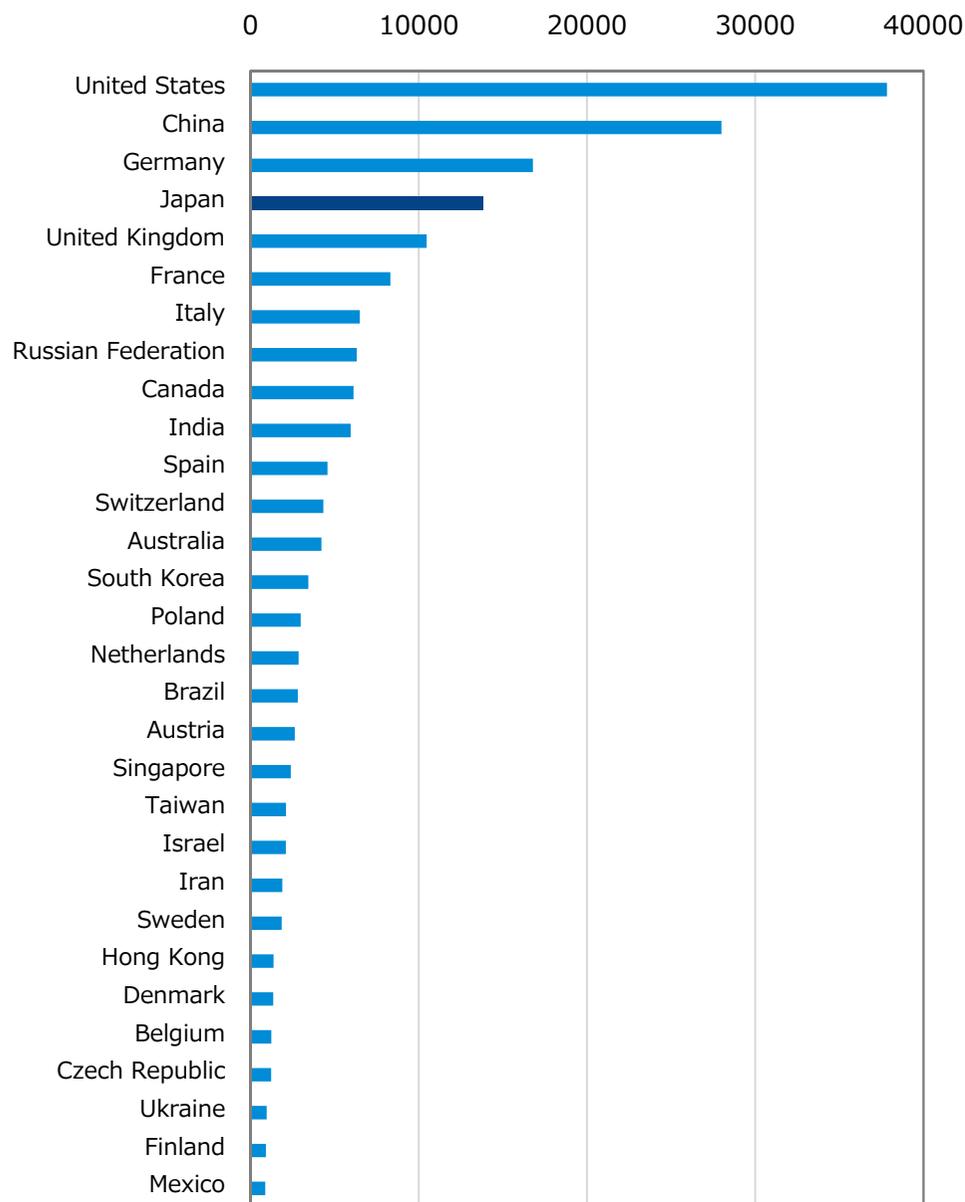
（2021年6月17日）

- 2021年4月に立ち上げられた「日米競争力・強靱性（コア）パートナーシップ」において、「共同研究及び研究者の交流を通じた、量子科学技術分野における研究機関間の連携及びパートナーシップを強化すること」を目的に、両国研究機関間の連携の具体化を図るPAに署名。
- 目的：量子技術に関連するプロジェクトの研究開発に関する協力を促進
- 協力分野：通信、コンピューティング、エミュレーション、デバイス、センサ、材料等
- 協力内容：人的交流、実験機器や材料の提供・交換、装置の移転、技術情報の交換等



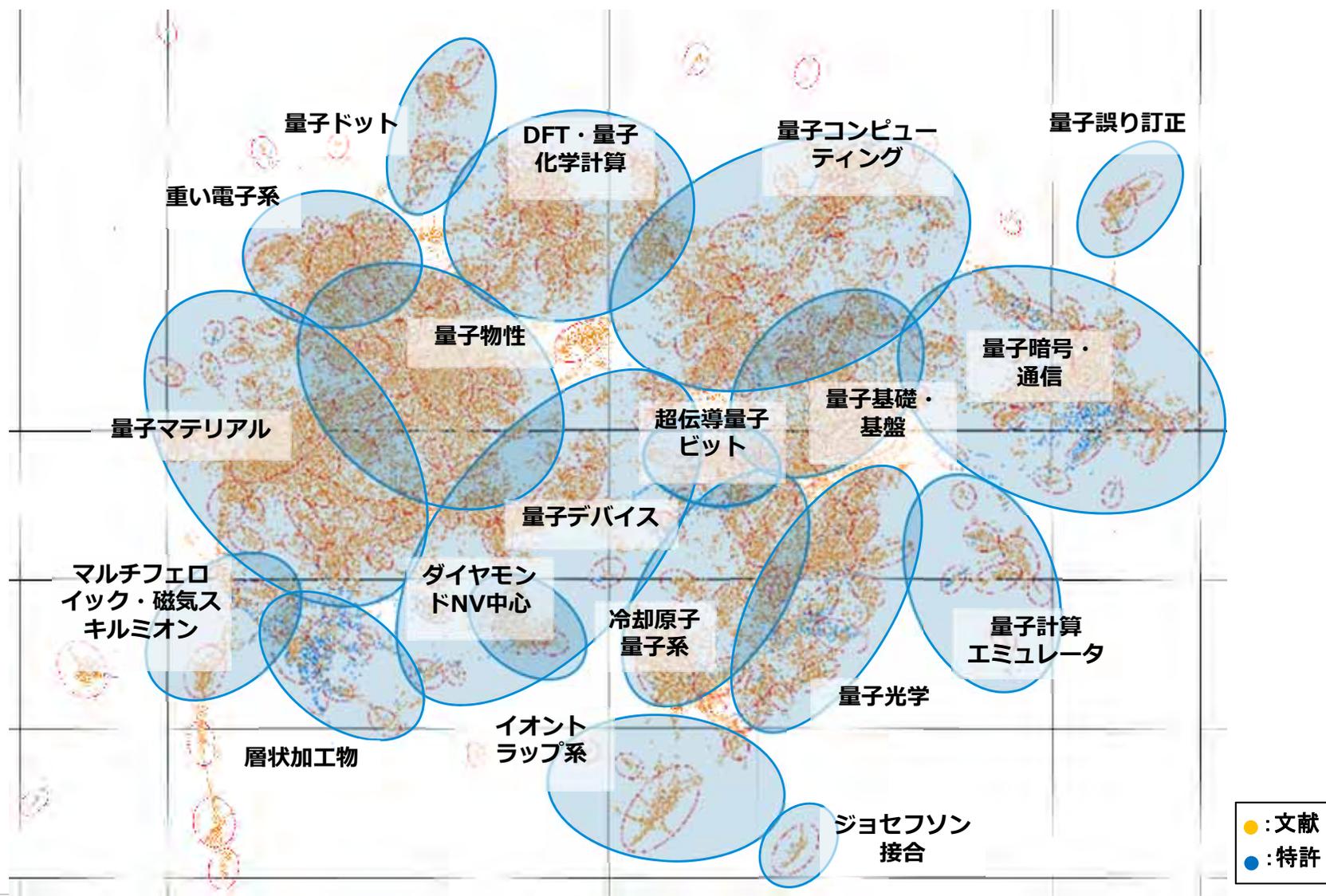
論文の国際動向

量子技術分野の学術文献137,718件をCRDSにて集計。
データソースはScopus。



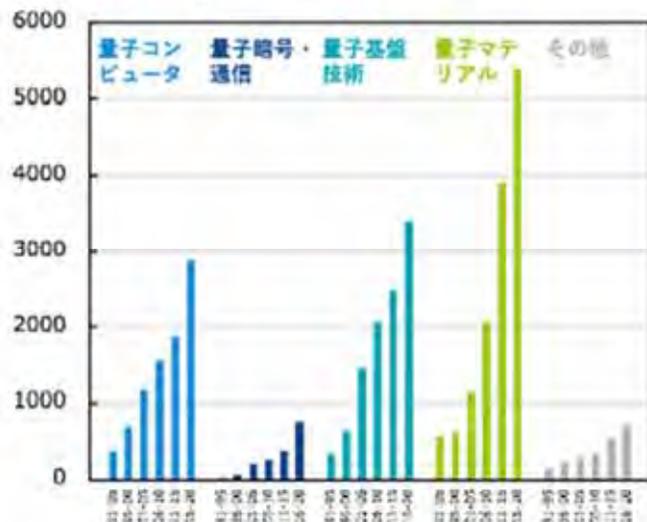
量子技術の論文・特許俯瞰マップ

量子技術分野の論文・特許計152,039件（学術文献137,718件+特許14,321件）をトピックモデル+多様体学習により俯瞰解析（分析対象は、文献がタイトル及び要約、特許は要約のみ）

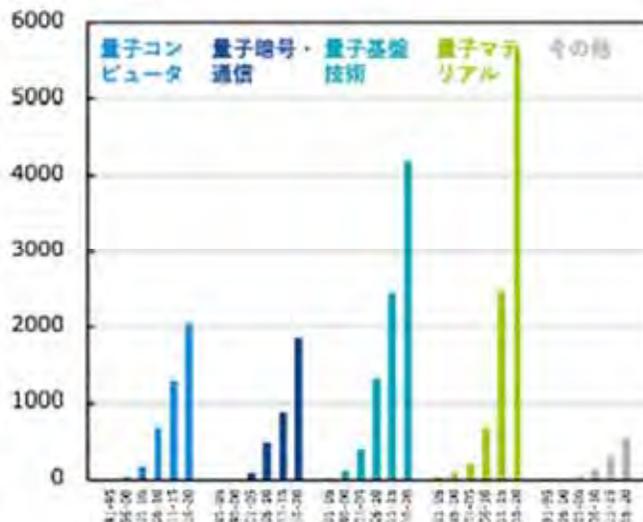


量子技術の論文数・急増

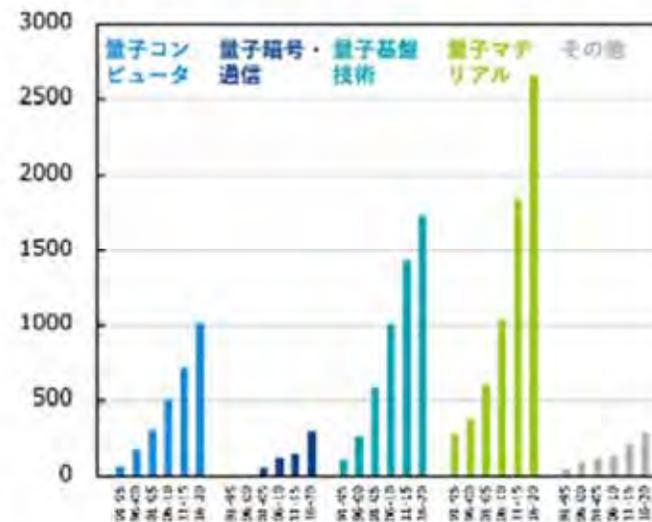
(a) 1st アメリカ



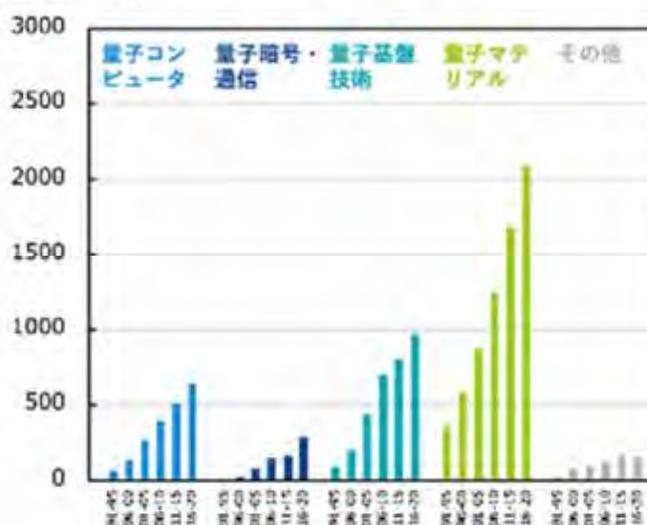
(b) 2nd 中国



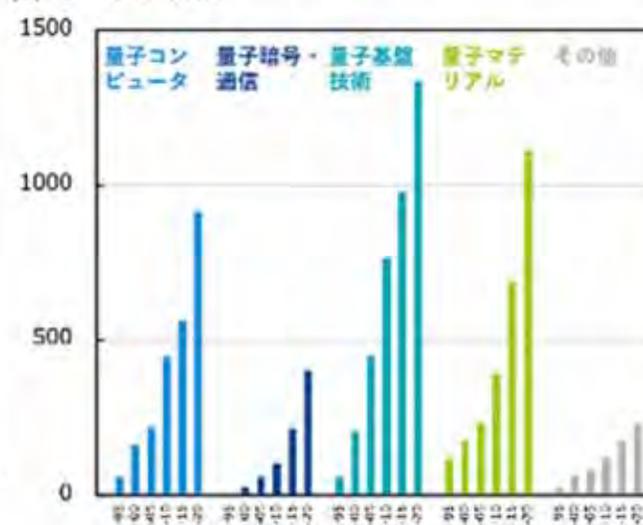
(c) 3rd ドイツ



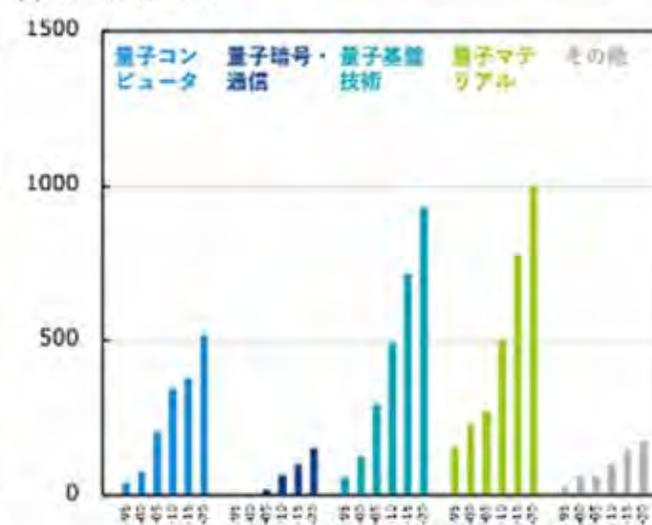
(d) 4th 日本



(e) 5th イギリス

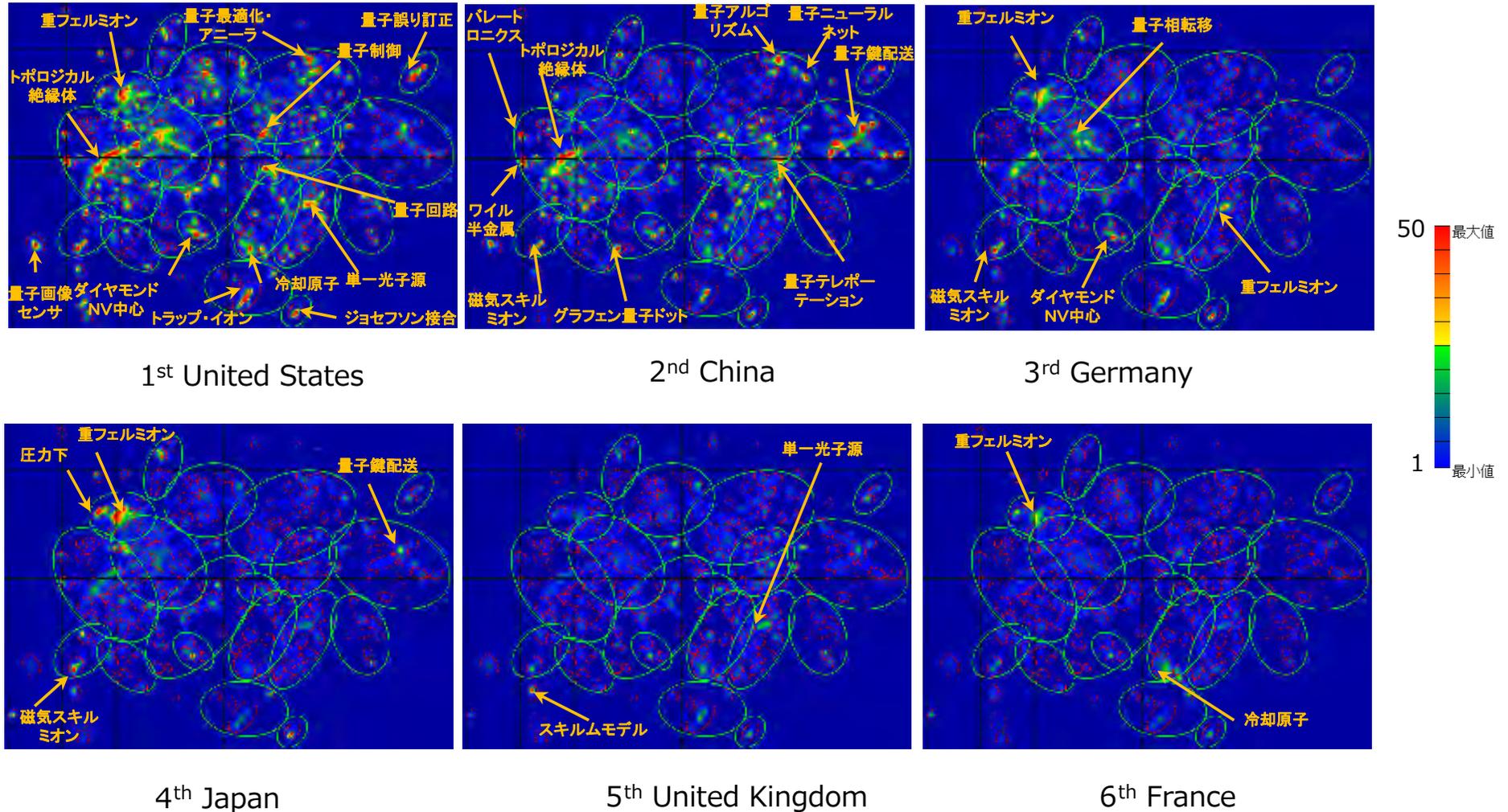


(f) 6th フランス



量子技術の論文発行状況 (国別比較)

- 米国はほぼ全領域を網羅しているが、相対的に量子暗号・通信が少ない。
- 中国は量子暗号・通信で強い。重い電子系や量子物性は米国と比べ少ないが、トポロジカル絶縁体は多い。
- 日本は、量子鍵配送、磁気スキルミオン、重フェルミオンなどで論文の集積が見られる。



量子技術の論文・国際共著状況

分野によって共著率にそれほど大きな差はない

(中国の量子暗号・通信分野は顕著に共著率が低い)

	量子コンピュータ	量子暗号・通信	量子基盤技術	量子マテリアル	その他
アメリカ	41%	46%	45%	54%	43%
中国	31%	18%	26%	41%	30%
ドイツ	61%	59%	64%	70%	63%
日本	38%	38%	42%	38%	40%
イギリス	60%	70%	64%	75%	58%
フランス	62%	68%	61%	76%	68%
イタリア	55%	62%	61%	69%	59%
ロシア	38%	23%	50%	62%	55%
カナダ	64%	68%	69%	70%	58%
インド	26%	23%	32%	33%	34%

国際共著マトリクス

量子コンピュータ

アメリカ											
中国		589									
ドイツ		538	144								
日本		291	111	72							
イギリス		382	132	232	91						
フランス		297	28	155	70	148					
イタリア		265	32	170	48	173	157				
ロシア		112	15	88	23	31	35	25			
カナダ		472	124	149	47	120	63	48	9		
インド		131	24	61	31	35	22	18	7	44	

量子暗号・通信

アメリカ											
中国		163									
ドイツ		74	33								
日本		71	60	29							
イギリス		132	89	72	53						
フランス		44	11	22	14	40					
イタリア		58	12	34	6	66	18				
ロシア		13	6	10	5	12	7	8			
カナダ		158	94	52	38	81	34	7	9		
インド		26	11	5	8	11	8	5	6	15	

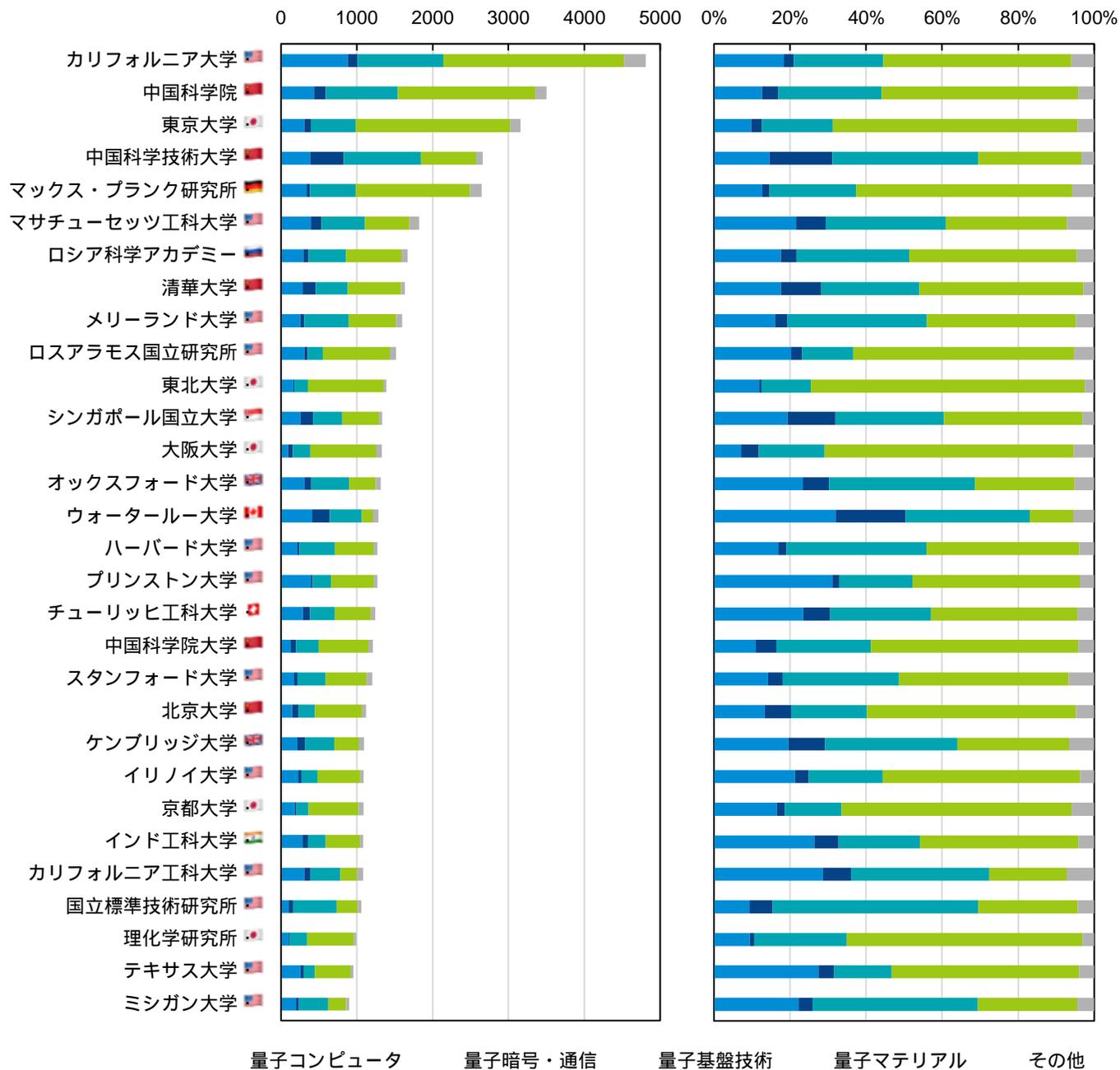
量子基盤技術

アメリカ											
中国		844									
ドイツ		896	338								
日本		554	249	272							
イギリス		603	283	564	225						
フランス		355	106	376	86	250					
イタリア		312	100	281	59	297	197				
ロシア		304	64	293	98	101	111	66			
カナダ		540	197	188	91	220	71	70	65		
インド		120	28	58	32	42	36	18	9	39	

量子マテリアル

アメリカ											
中国		2133									
ドイツ		1585	541								
日本		990	430	601							
イギリス		659	324	603	267						
フランス		624	123	672	413	314					
イタリア		320	95	332	123	189	248				
ロシア		413	117	568	172	126	199	82			
カナダ		648	186	211	81	91	83	48	33		
インド		250	47	160	71	64	56	43	26	46	

論文発表数トップ30機関

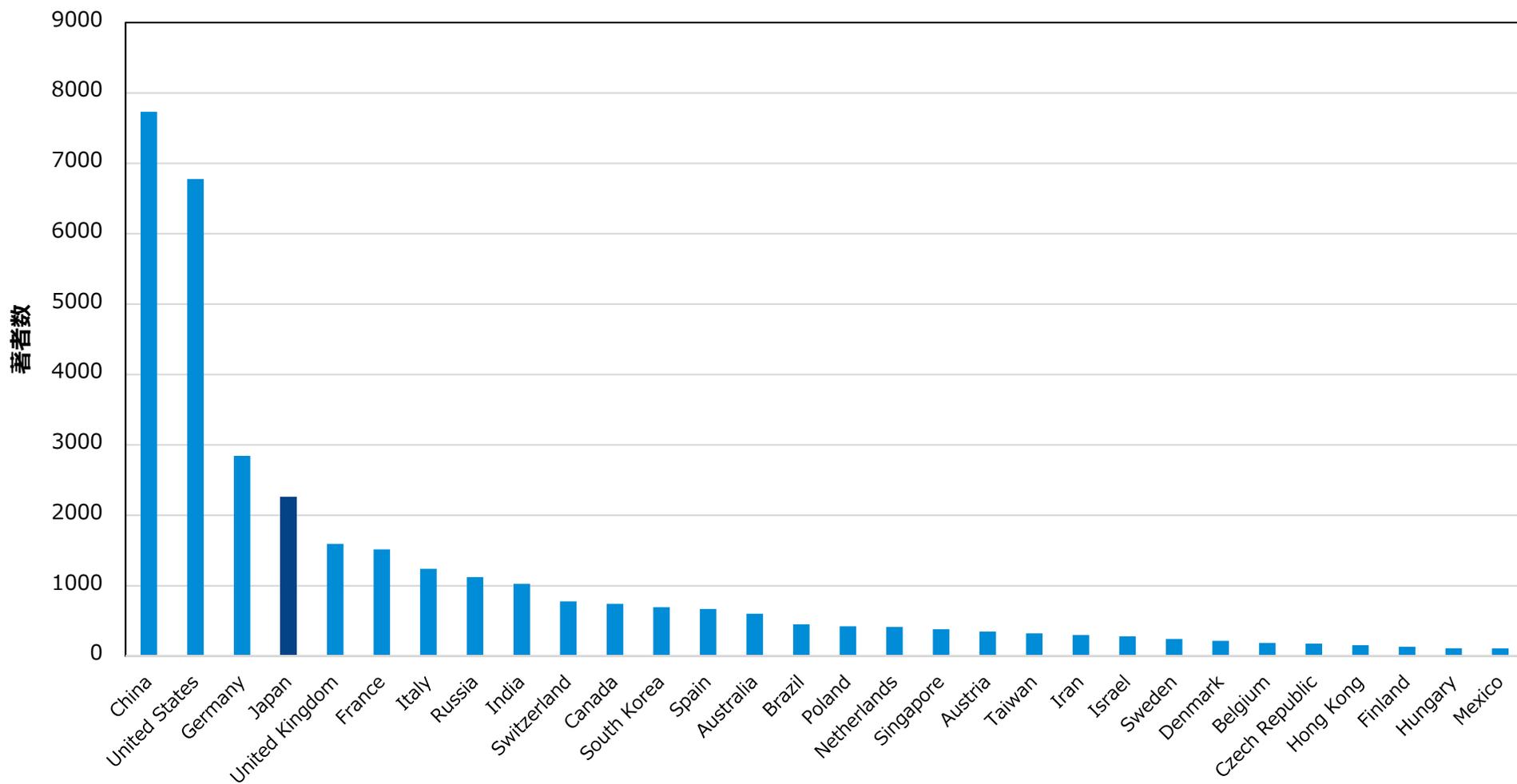


量子コンピュータ 量子暗号・通信 量子基盤技術 量子マテリアル その他



量子技術論文の国別著者数

- 2011年～2020年で発表された論文は83,348件、著者は143,901人である。
- そのうちの3件以上発表している35,638人を対象とした。



2. | 産官学連携

産学共同研究の事例：量子コンピュータ・シミュレータ

企業	大学・国研	方式・対象	概要
QunaSys、Blueqat、東芝、NEC、NTT	理研、東京大、産総研NICT、京都大、大阪大、名古屋大、東京医科歯科大（Q-LEAP）	超伝導量子コンピュータ	超伝導量子ビットを用いた量子計算プラットフォーム拠点を構築。
IBM	東京大	超伝導量子コンピュータ	「Japan IBM Quantum Partnership」締結。量子アプリケーション、量子コンピュータシステム技術の開発、量子科学の推進・教育の実施。
NEC、日立など	OIST、東京大、横国大、大阪大など（ムーンショット目標6）	誤り耐性型汎用量子コンピュータ	2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現。
NTT、e-Trees Japan	大阪大、慶應大、名古屋大、東京大、京都大（Q-LEAP、COI-NEXT）	量子ソフトウェア	量子コンピュータの性能を引き出すためのソフトウェアを開発、アーキテクチャ設計を実施。量子コンピュータの制御装置・ミドルウェアを事業化するスタートアップ QuEL を設立。
豊田通商、フィックスターズ、NEC	早稲田大、東工大、NII、産総研、横国大、京都大（NEDO）	量子アニーリングマシン	量子アニーリングマシンの技術開発を推進。
フィックスターズ、QunaSys	早稲田大、慶応大	イジング型コンピュータ	従来の計算方法と比較して、格段に処理や解析を高速化・高度化する次世代アクセラレータ基盤の研究開発。

公開情報などを基にJST-CRDSで作成



産学共同研究の事例：量子暗号・通信

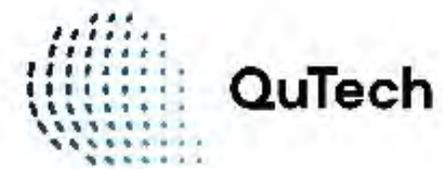
企業	大学・国研	概要
ソニーコンピュータサイエンス研究所、スカパーJSAT	次世代宇宙システム技術研究組合、東京大、NICT (MIC・ICT重点技術の研究開発プロジェクト)	衛星利用の需要拡大に対応するため、また、安全な衛星通信ネットワークの構築を可能とするため、高秘匿な衛星通信の基盤技術を実現。
東芝、NEC、三菱電機、浜松ホトニクス、古河電気	東京大、北海道大、横国大、学習院大、NICT、産総研、NIMS (MIC・ICT重点技術の研究開発プロジェクト)	グローバル規模での量子暗号通信網の構築に向けた基盤技術の確立。極めて堅牢性の高い安全なサイバー空間の実現に寄与。
スカパーJSAT、東芝、NEC	NICT (MIC・ICT重点技術の研究開発プロジェクト)	グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発。
NEC、東芝、ZenmuTech	NICT、学習院大、東京大、北海道大 (SIP)	量子暗号技術、秘密分散技術、電子署名技術、秘匿計算技術を組み合わせた、量子セキュアクラウドを開発。ゲノムデータ・電子カルテ等に適用可能なセキュアなデータ交換基盤を構築する。2019年、生体認証データの高秘匿・高可用性な伝送・保管を量子暗号を用いて実現
NTT	大阪大、富山大 (CREST[量子技術])	全光量子ネットワークの実現に向けた研究開発。2019年「全光」で量子中継の原理検証実験に成功。

公開情報などを基にJST-CRDSで作成

産学共同研究の事例：量子計測・センシング

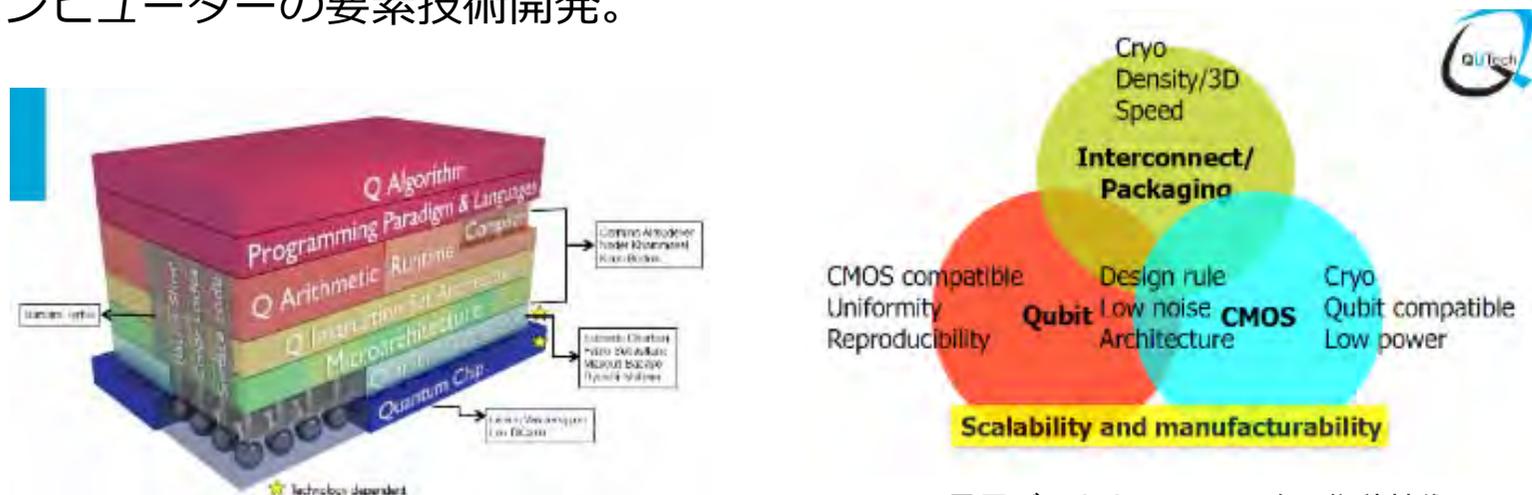
企業	大学・国研	方式	概要
信越化学、住友電工、デンソー、日立製作所、矢崎総業など	東工大、京都大、QST、東京大、産総研など (Q-LEAP)	ダイヤモンドNV中心	脳磁計測システムや、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステムを開発。
村田製作所、島津製作所、堀場製作所、ニコン、ビジョン開発、ナノ炭素研究所、ソーラボジャパン	QST、京都大、東京大、大阪大、生理研、北海道大、名古屋大、東工大など (Q-LEAP)	ダイヤモンドNV中心	生体ナノ量子センサに関する研究開発を実施。
NTT、島津製作所、NEC、シグマ光機、アイシン・エイ・ダブリュ、エクス・リサーチ	東京大、理研、NICT、産総研、電通大、福岡大、JAXA、国立天文台、国土地理院 (未来・大規模)	光格子時計	「光格子時計」をネットワーク展開・社会実装することで、次世代の超高精度・時空間情報の共通プラットフォームを構築。
三菱重工、日本航空電子工業	東工大、産総研、大阪大 (COI-NEXT、未来・大規模)	量子ジャイロスコープ	量子航法技術を基盤とする安全・安心・豊かな社会の実現。
JEOL RESONANCE、東レリサーチセンター、大陽日酸	東京大、理研、京都大、QST、阪府大、岐阜大、徳島大など (Q-LEAP)	超偏極MRI	超高感度MRI/NMRに関する研究開発を実施。
日本レドックス	北海道大、東京大 (AMED先端計測)	超偏極MRI	純国産の ¹³ C励起装置の製品化を進めている。小動物イメージング用装置の国内販売を予定。
島津製作所	京都大、NICT (Q-LEAP) 京都大、九州大、広島大、北里大 (CREST[量子技術])	量子もつれ光	量子もつれ分光法開発や、量子・古典ハイブリッド光断層撮影システム構築などを実施。

海外の産学連携例：オランダ QuTech



QuTech

- デルフト工科大、TNO、産業界パートナーによって設立
- 「誤り訂正量子コンピューティング (FTQC)」「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」の主3テーマ
- FTQCと量子インターネットシステムはエンジニアリングに注力
 - Intel、Microsoftと長年、共同研究を実施。
 - Microsoftと共同で、デルフト工科大のキャンパス内にMicrosoft Quantum Labを設立。マヨラナ粒子に基づいたキュービット開発を加速。
 - スピンアウト会社 QBlox と共同で、キュービット制御電子機器を開発。
 - ABN AMRO銀行と共同で、量子鍵配送によるオンラインおよびモバイルバンキングの研究開発。
 - 富士通との共同研究協定を締結。ダイヤモンドスピン量子ビットに基づく量子コンピューターの要素技術開発。



海外の産学連携例：英国 NQIT



Quantum hub for Networked Quantum Information Technologies (NQIT)

- オックスフォード大学が主導。9大学、30企業が参画。
- 400量子ビットデバイスQ20:20の開発が目標。イオントラップ、原子、ダイヤモンドNVを組み合わせたハイブリッドアーキテクチャ。
- RRI、トレーニング、アウトリーチ部門もある。

- 大手企業と協力して、初期の商業化の可能性を秘めた量子技術のパートナーシッププロジェクトを実施。
- Gooch & Housegoと共同で、量子テクノロジーアプリケーションの信頼性を大幅に向上させるファイバー化光スイッチを開発。
- Element Sixと共同で、ダイヤモンドNV中心を活用した高感度磁力計の開発。
- Brukerと共同で、医療用センシングのためのダイヤモンドNV中心の量子特性評価を実施。
- RouteMonkeyと共同で、輸送・ロジスティック計画を改善するために、量子コンピューティングを活用する可能性についての検討。



海外の産学連携例：米国 Chicago Quantum Exchange



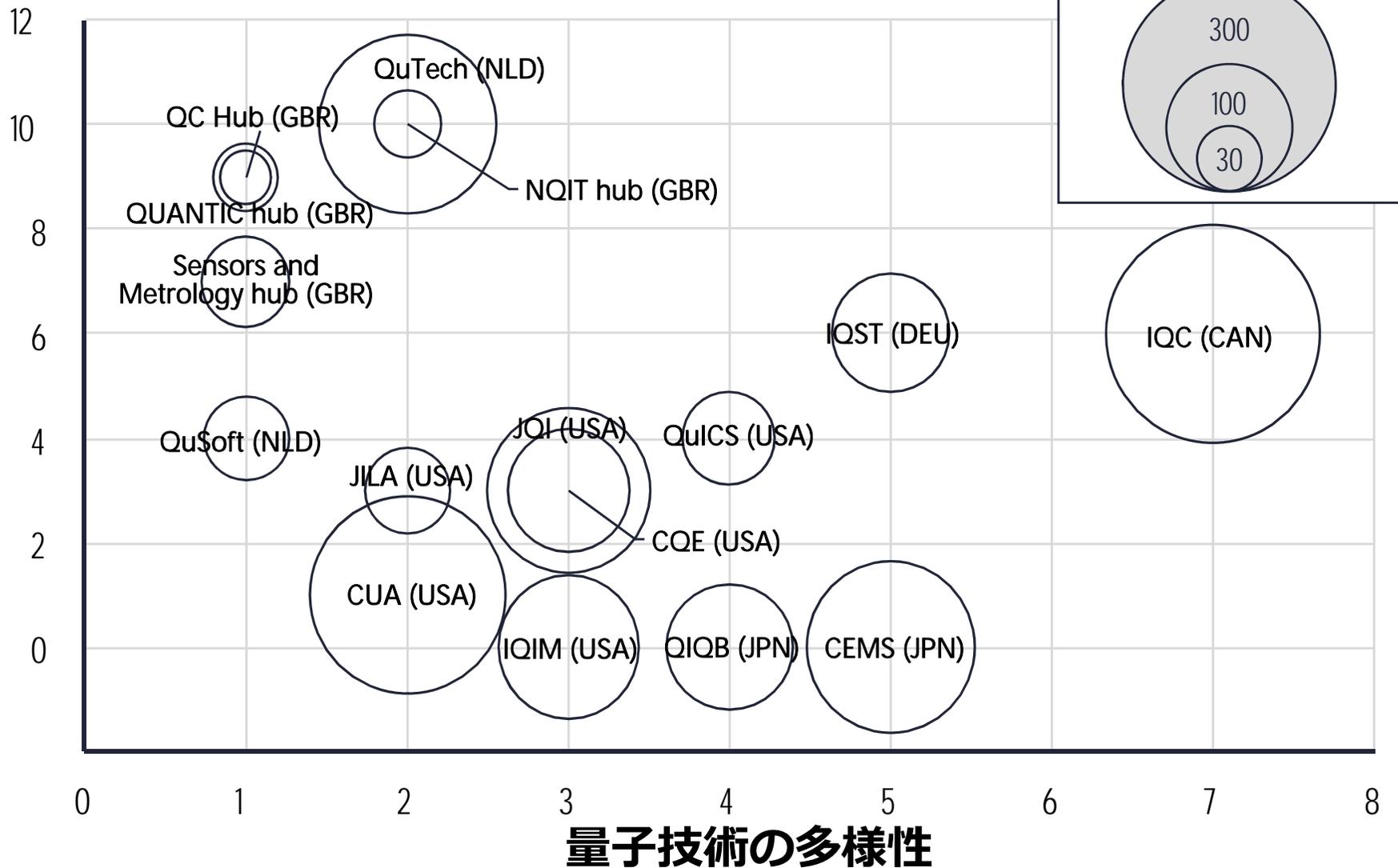
Chicago Quantum Exchange

- U. Chicago、Argonne National Lab、Fermilab、U. Illinois Urbana-Champaign、U. Wisconsin-Madison、Northwestern U. がメンバー。
- 量子通信、量子コンピューティング、量子センシングのためのデバイス、材料、および技術の研究開発を実施。
- 企業、非営利団体、国際パートナーと連携。
 - 25の企業パートナーが参画（2022年1月現在）。
 - 企業パートナーは、CQEメンバーと共同ワークショップを開催、セミナーや毎年恒例のシカゴクォンタムサミットに参加するなど、CQEの研究者コミュニティと積極的にかかわっている。
 - コアパートナーは、Boeing、IBMの2社。
 - ボーイングはCQEメンバー機関での共同研究プロジェクトをサポート。量子通信・コンピューティング・ニューロモルフィック処理・センシングに共同で取り組んでいる。
 - IBMおよびIBM Qネットワーク はCQEメンバーと共同で、ハードウェアとソフトウェア、特に分散量子システム用のコンパイラー、量子コンピューター間結合・通信のための量子変換技術の開発に取り組む。

量子研究拠点 (要アップデート)

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)



DOEの量子拠点：Q-NEXT

Next Generation Quantum Science and Engineering (Q-NEXT) ¹⁾

DOE Quantum Information Science (QIS) Research Centersの1つ

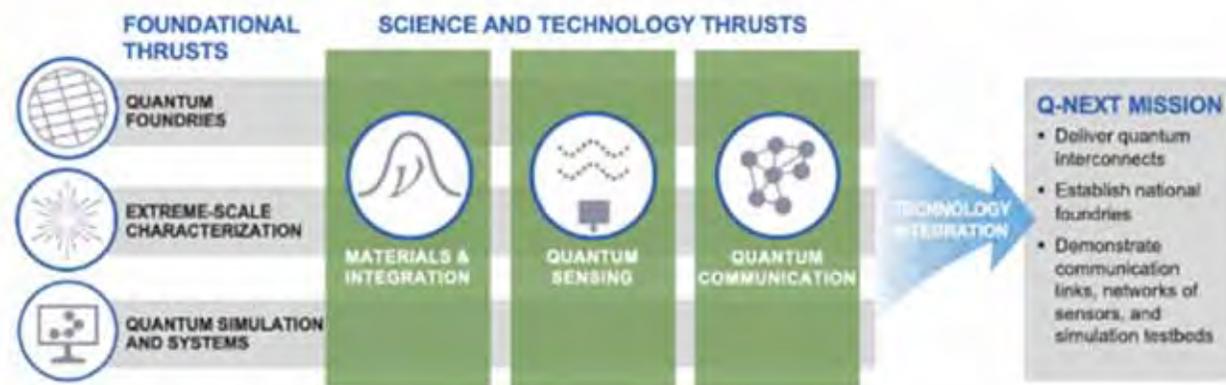
(代表：アルゴンヌ国立研究所)

$\left(\begin{array}{l} \$115M \text{ (DOEの予定額、2020~2025年)} \\ \$ 93M \text{ (パートナー団体から)} \\ \$200M \text{ (イリノイ州から、2020年)} \end{array} \right)^{2)}$

➤ 量子暗号・通信開発を含む、量子科学技術のためのエコシステム構築。量子デバイスのためのマテリアル研究から量子センシング、ネットワークテストベッド構築まで幅広く行う。Chicago Quantum Networkはこの枠組みに含まれる様子。³⁾

➤ ミッションは、

- 量子材料ファウンドリ構築
- 量子インターコネクト確立
- 量子通信リンク、量子センサーネットワーク、量子シミュレーションテストベッドの実現



➤ 3つのDOE研究所、9つの大学、12の米国量子関連企業が参画。

1) <https://www.q-next.org/>

2) <https://www.anl.gov/article/department-of-energy-selects-argonne-to-lead-national-quantum-center>

3) <https://news.uchicago.edu/story/argonne-uchicago-scientists-take-important-step-developing-national-quantum-internet>

NSFの動向 (2020年～)

NSF研究トレーニングプログラムが量子情報科学とAIを重点化 (2020年12月)

- 大学院生対象の教育プログラム募集 (～\$55M) で、2021年は量子情報科学・工学 (QISE) とAI分野を、他のNSF「Big ideas」6分野と同様に重点化。

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

ワシントン大 Accelerating Quantum-Enabled Technologies (AQET) Traineeship Program (2020年9月)

- 大学院生に対する量子技術の教育プログラム (12～15ヶ月) (\$3M/5年)

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

AI Research Institutes (NSF、農務省NIFA) (2020年8月)

- 7拠点に5年で \$ 20Mずつ措置。(総額 \$140M/5年)
- 5拠点はNSFが支援 / 2拠点は農務省NIFAが支援

<https://beta.nsf.gov/science-matters/new-nsf-ai-research-institutes-push-forward-frontiers-artificial-intelligence>

アリゾナ大 Center for Quantum Networks (CQN) (2020年8月)

- 量子インターネットのための研究センター設立 (\$26M/5年)

<https://news.arizona.edu/story/university-arizona-awarded-26m-architect-quantum-internet>

National Q-12 Education Partnership (2020年8月)

- 中高生のための量子教育のための産学官パートナーシップ締結
- 参加 : OSA, APS, IBM, Google, Microsoft, Boeing, Lockheed Martinなど

<https://q12education.org/>

Quantum Leap Challenge Institutes (QLCI)

- Round Iとして3つのChallenge Institutes (CI) を2020年に設立 (総額 \$75M/5年)
- Round II (2021年) も募集 (〆切済み、1～3件採択予定)

<https://www.nsf.gov/pubs/2019/nsf19559/nsf19559.htm>

ドイツの動向（2021年～）

ドイツで最初の商用量子コンピューターが使用可能に（2021年6月）

- 連邦教育研究省（BMBF）のKarliczek大臣、フラウンホーファー協会Neugebauer会長のインタビュー記事（FAZ誌）より。
 - エーニンゲンに設置されたIBM Quantum System One（27量子ビット）が使用可能になった。
 - ドイツ10企業（BMW, Bosch, Merck, Siemensなど）による、**量子技術とアプリケーションのコンソーシアム QUTAC** が発足。

<https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/neues-technologieniveau-durch-quantencomputing.html>

ポストコロナに向けた「未来パッケージ」発表（2020年6月、2021年1月）

- ポストコロナ対策の追加予算のほぼ半分に当たる 600億ユーロ以上を教育、研究、イノベーション領域に投資する。
- 量子技術には、5年間で20億ユーロを投資。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）の研究開発が対象。
- 最初の1.2億ユーロで、量子通信と量子コンピューターハードの主要技術の開発プロジェクトに注力。

<https://www.bmbf.de/de/karliczek-mit-investitionen-in-bildung-und-forschung-ueberwinden-wir-die-krise-11737.html>

<https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3415.html>

<https://www.bmbf.de/de/karliczek-mit-quantentechnologien-zu-mehr-technologischer-souveraenitaet-13489.html>

英国の動向（2021年～）

AI・量子コンピューティングを推進する研究センターの新設（2021年6月）

- 英国研究・イノベーション機構（UKRI）は総額2億1,000万ポンド（UKRIから1億7,200万ポンド、IBMから3,800万ポンド）の5ヶ年プログラムを開始すると発表。
- 新たにハートリー国立デジタルイノベーションセンター（HNC DI）を設立。AI、高性能コンピューティング・データ解析、量子コンピューティング、クラウド技術を活用して、英国の業界が提起した実際的な問題に対する革新的なソリューションを提供することを目指す。



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)

国別の量子スタートアップ企業数

注) 日本のベンチャー投資は小さい
 米国：37.8兆円、欧州：13.9兆円、
 中国：14.8兆円、日本：0.8兆円

	量子コンピューティング		量子通信		複合	教育	その他	総計
	ハード	ソフト	QKD,PQC	コンサル				
アメリカ	17	20	12	5	1	1	1	57
カナダ	5	18	5			1		29
イギリス	7	5	11	4		1		28
ドイツ	4	5	3			1		13
フランス	5	2	2	2				11
日本		8		2				10
オランダ	5	1	1	2				9
中国	2		2	1	2		1	8
スペイン	2	4		1		1		8
インド	1	2	1		2		1	7
オーストラリア	2	2	1	1				6
ポーランド		3	1			1		5
スイス	2		1		2			5
イスラエル		2	1			1		4
シンガポール		2	1				1	4
総計	52	74	42	18	13	2	3	204

量子スタートアップ例 (青字は大学発 or 大学と深い関係にあるもの)

	ソフトウェア					ハードウェア		
	QunaSys	QCWare	CQC	1QBit	Zapata	Rigetti	IonQ	Xanadu
PF名	Qamuy	Forge	tket	1Qcloud	Orchestra	Forest	-	PennyLane
分野	量子化学計算、機械学習、コンソ、コンサル、共同研究	組合せ最適化、コンソ、コンサル、共同研究	暗号、量子化学計算、機械学習、NLP、共同研究	組合せ最適化、コンサル、共同研究	量子化学計算、機械学習、最適化、金融、コンサル、共同研究	超伝導量子HW、Pythonライブラリ	イオントラップ量子コンピュータHW	光量子HW、Pythonライブラリ
所在地	Tokyo	Palo Alto	Cambridge	Vancouver	Boston	Barkeley	College Park	Toronto
従業員数	1-10	11-50	101-250	11-50	51-100	101-250	51-100	51-100
ラウンド	Series A	Venture (Series Unknown)	Venture (Series Unknown)	Series B	Series B	Series C	Post-IPO Equity	Series B
資金調達額	\$2.8M	\$39.7	\$72.8M	\$35.6M	\$67.4M	\$198.5M	\$432M	\$135.6M
備考	コンソ QPARC運営	Q2Bをホスト。コンソ QED-Cのメンバ。	HQSと合併し Quantinuum社。	富士通と連携。	伊藤忠が出資。	IBMからのスピンアウト	メリーランド大発。NYSE上場。	DARPAグラント受給。

量子暗号通信 国内企業の動向

	概要
東芝	東芝欧州研究所傘下のケンブリッジ研究所で基礎技術開発し、実用化に向けた体制を日本に構築。2017年に、距離10kmで10Mbpsを超える鍵配信速度を達成（世界最速）。最長240kmの光ファイバーリンクを用いた鍵配送実用性の実証や、ゲノム解析データの暗号化通信の実証など、実用化に向けた実証実験を積極的に進める。2020年度より量子暗号システム提供開始。
	東芝独自開発の新しいプロトコル Twin-Field QKD を発明。2021年に600kmを超える暗号鍵共有を実証。実用化に向けた研究開発が進む。
NEC	NICTとの共同で、量子暗号（QKD）を用いて、顔認証システムでの特徴データの伝送と、特徴点などの認証用参照データの保存を高秘匿で実行できるシステムを構築。NICTの量子暗号研究開発用ネットワーク上に同システムを構築し、2019年から、日本代表選手が所属する様々なスポーツ分野のナショナルチームのデータサーバ管理のための試験利用を開始。
三菱電機	同種写像暗号などの耐量子計算機暗号の研究開発を長年行っている。
NTT	阪大、富山大との共同で、2019年に「全光」での量子中継の原理検証実験に成功。全光量子ネットワークの実現に向けた第一歩。
日立情報通信エンジニアリング	玉川大学、ソフトバンクテレコムとの共同で、量子揺らぎを利用したY-00方式を長年開発している。2017年にAPRESIA Systems(株)が、日立のY-00技術を活用して情報保護ソリューション分野に参入することを発表。
東芝・NEC・三菱電機・古河電気・浜ホト	東大・北大・横国大・学習院大・NICT・AIST・NIMSとの共同で、総務省委託事業「情報通信技術の研究開発に係る提案の公募－グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発－」を受諾（上限14.4億円@令和2年）
NEC・東芝	NICTとの共同で開発してきた量子鍵配送ネットワーク技術の成果を盛り込んだ国際標準勧告が、国際標準化機関ITU-Tで承認（2019年）。

量子計測・センシング技術 (青字がスタートアップ)

*主流の方式における
サンプル作成時の環境

	ダイヤモンド NV中心	量子慣性センサ	光格子時計	量子もつれ光	超偏極MRI
計測物性	温度、磁場など	加速度、角加速度	時間	(3次元)空間位置	(3次元)空間位置
量子系	ダイヤモンドNV中心	冷却原子	冷却原子	もつれ光子対	偏極核スピン
環境	常温/常圧	極低温/超高真空	極低温/超高真空	常温/常圧	極低温/超高真空*
主な応用先	医療、バイオ、デバイスモニタ	測位、計測標準、資源探査、地震計測	時間標準	化学分析、バイオ、医療	医療
海外	Nvision Imaging(独) , Quantum Diamond Tech(米) , SQUTEC(独) , QNA MI(スイス) , QZabre(スイス) , Quantum Flagship(EU)	Muquans(仏) , AOSense(米)	Muquans(仏) , Quantum Flagship(EU)	Rochester大(米), Auckland大(ニュージーランド), Monterrey工科大(メキシコ), イスラエル工科大など多数	GE(米), NVision Imaging(独) , Quantum Flagship(EU)
国内	Q-LEAP(東工大, 東, NIMS, 産総研, QST, 生理研, 京大), CREST[量子技術](NTT)(筑波大)	Q-LEAP(電通大), JST未来・大(東工大)	ERATO(理研, 東大), 未来・大(理研, 東大)	Q-LEAP(京大, 電通大), CREST[量子技術](京大)	Q-LEAP(阪大, QST), CREST[量子技術](阪大), AMED(北大, 日本レドックス)

量子計測・センシング 国内企業動向

	方式	概要
NTT	超伝導量子ビット	2019年に、超伝導量子ビットによる高感度・高空間分解能電子スピン共鳴に成功。マイクロメートル領域での電子スピンの高感度検出に繋がる成果。（CREST[量子技術]の成果）
デンソー、日立製作所、矢崎総業	ダイヤモンドNV中心	Q-LEAP量子計測・センシング領域 FP に参画。
村田製作所、島津製作所、堀場製作所、ニコン、ビジョン開発、ナノ炭素研究所、ソーラボジャパン	ダイヤモンドNV中心	Q-LEAP FP 量子生命領域の「生体ナノ量子センサ」研究に参画。プローブ開発、装置開発を担当。
日本レドックス	超偏極MRI	北大・東大との共同で、純国産の ^{13}C 励起装置の製品化を進めている。2021年度中に、小動物イメージング用装置の国内販売を開始予定。（AMED先端計測）
JEOL RESONANCE、東レリサーチセンター、大陽日酸	超偏極MRI	Q-LEAP FP 量子生命領域の「量子技術を用いた超高感度MRI/NMR」研究に参画。超偏極プローブ、装置開発を担当。
島津製作所	量子もつれ光	京大・NICTとの共同（Q-LEAP）、あるいは京大・九大・広島大・北里大との共同（CREST[量子技術]）で、量子もつれ分光法開発や、量子・古典ハイブリッド光断層撮影システム構築などを実施。島津製作所は主に光学素子開発を担当。

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

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

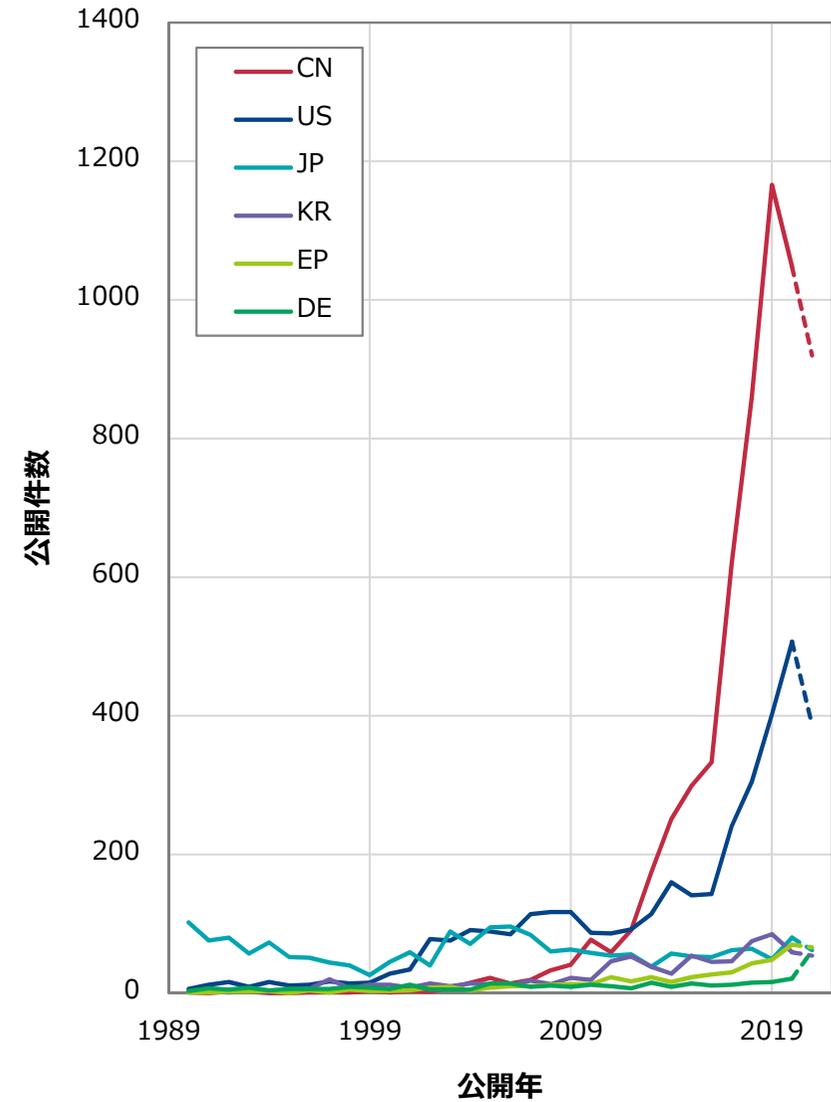
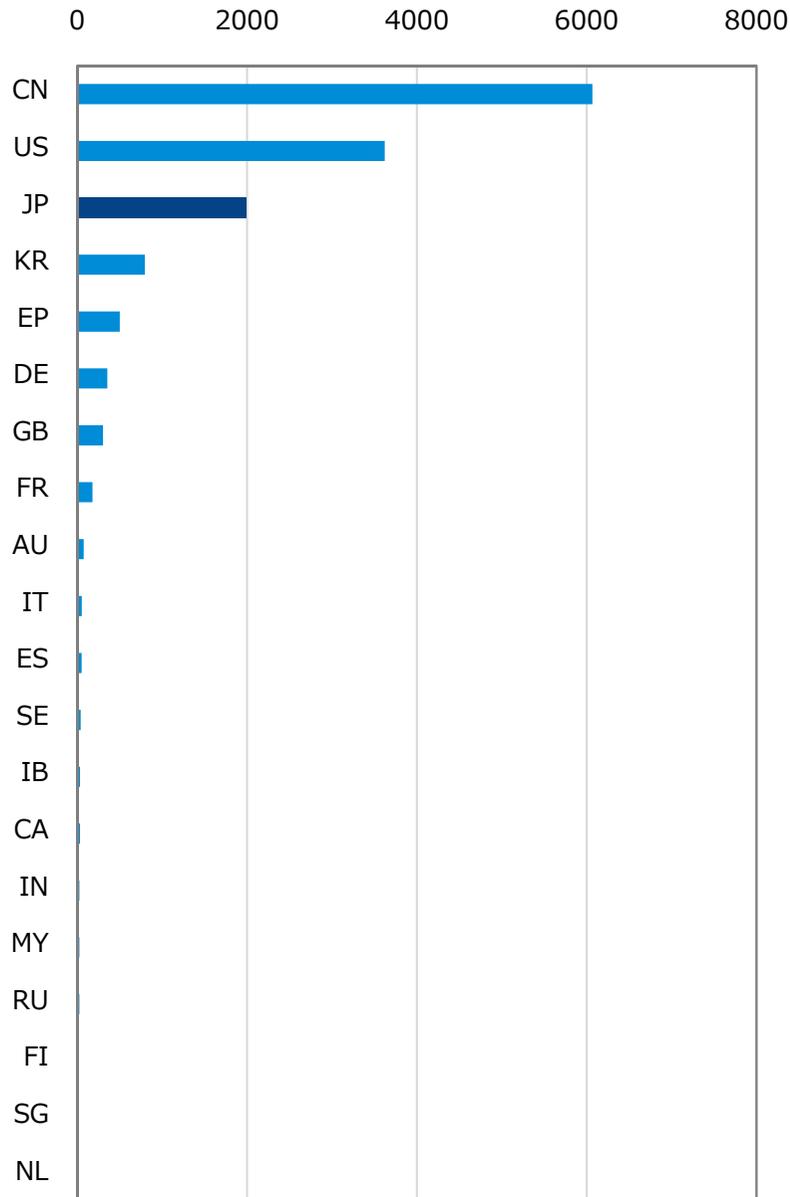
- NSF I-Corpsプログラムによる顧客発見の促進
- 潜在的な研究およびサポートパートナーとのマッチメイキング
- SBIR応募のセットアップと提案書作成支援
- SBIR / STTRなどの政府助成金のバックオフィス支援
- オフィススペース（追加料金、アワードを条件とすることも可）
- 3Dプリント、クリーンルームなどの大学施設利用（要追加料金）



3. | 知財・標準化

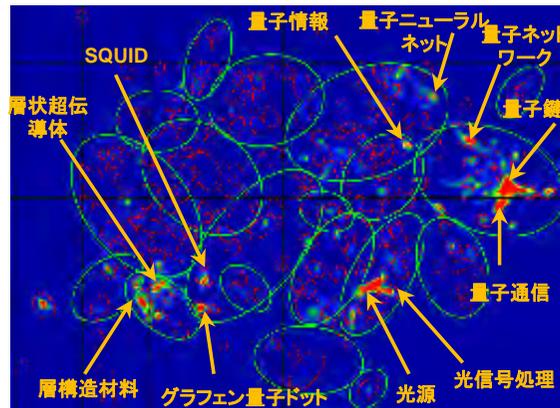
特許の国際動向

量子技術分野の特許14,321件をCRDSにて集計。
データソースはTotalPatent。

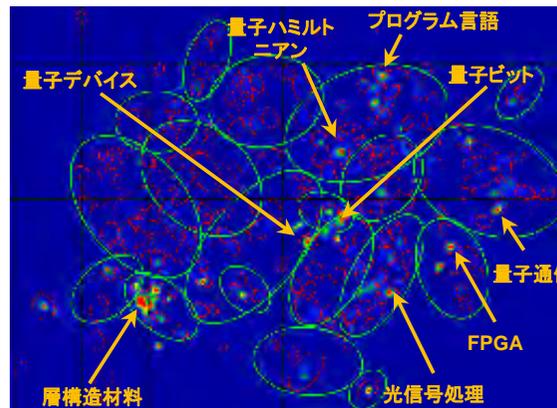


量子技術の特許発行状況 (国別比較)

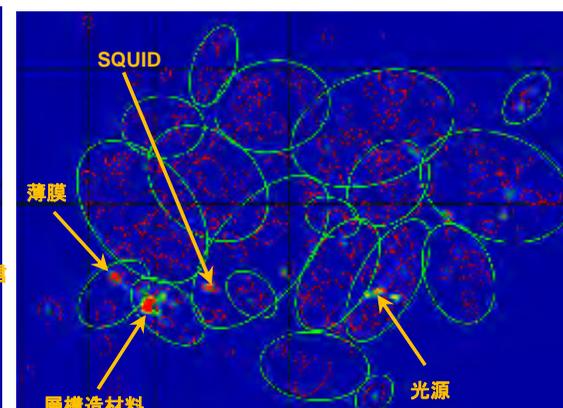
- 中国は論文に続いて特許でも量子暗号・通信で優位。量子アルゴリズムにも集積が見られる。
- 米国は量子コンピュータのハード（量子ビット）とソフト（プログラム言語）で強みがある。
- 日本は、層構造材料、薄膜、SQUID、量子鍵配送など限定的。



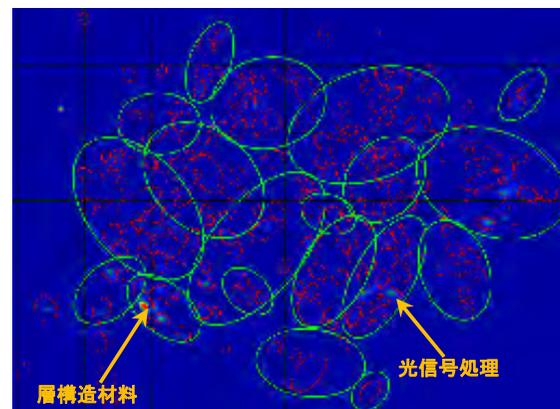
1st CN



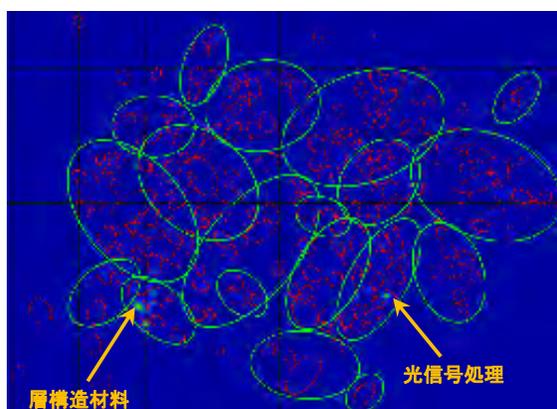
2nd US



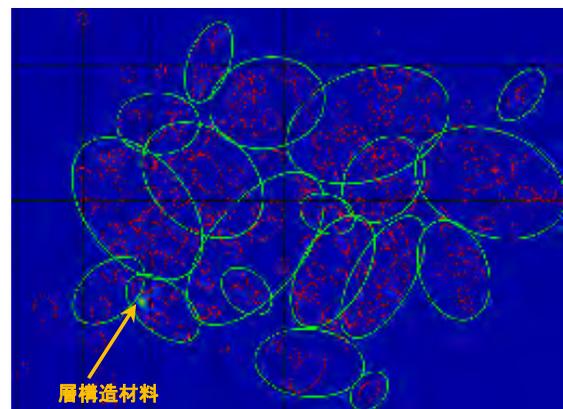
3rd JP



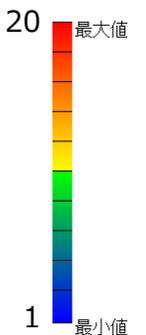
4th KR



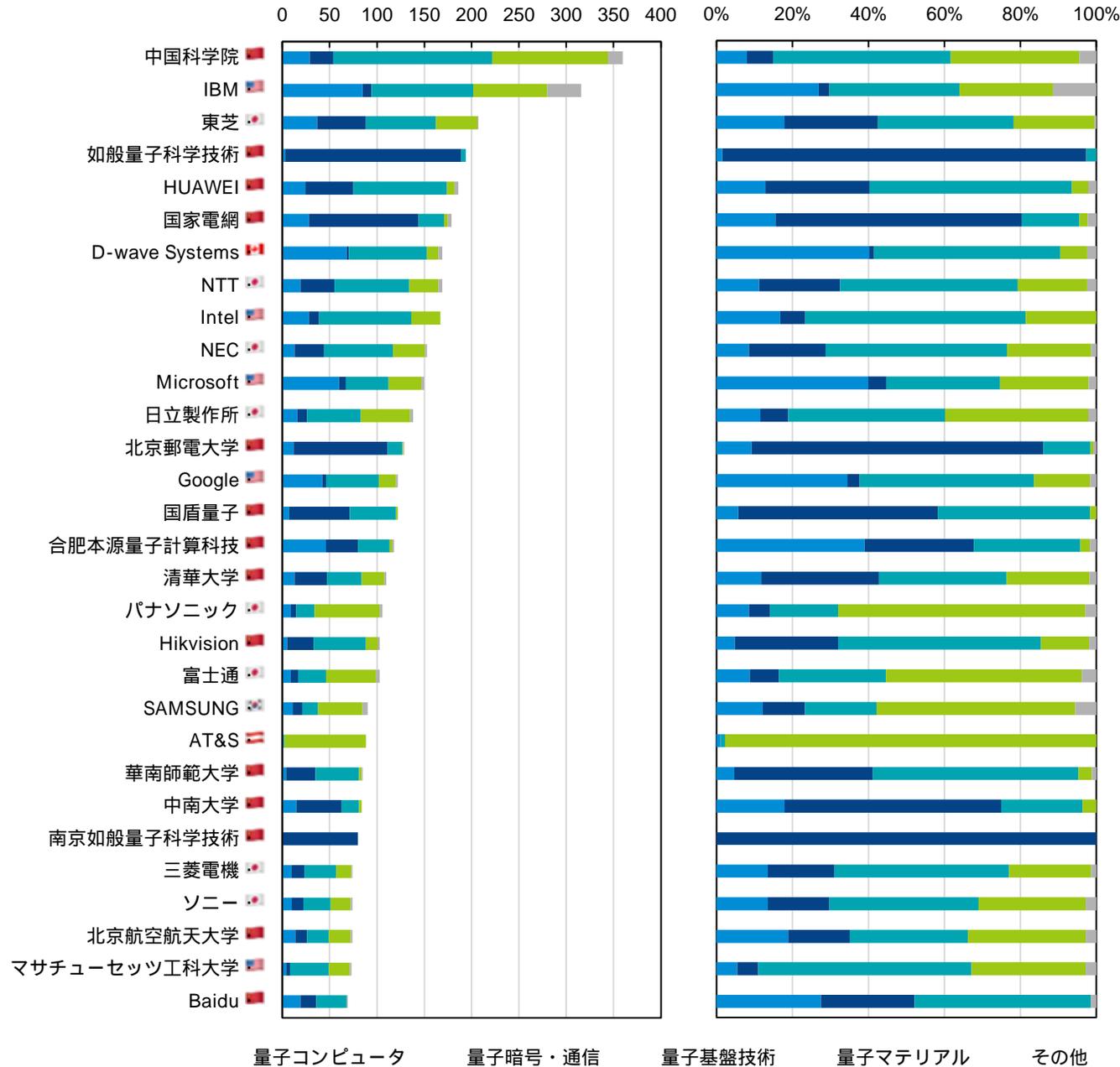
5th EP



6th DE

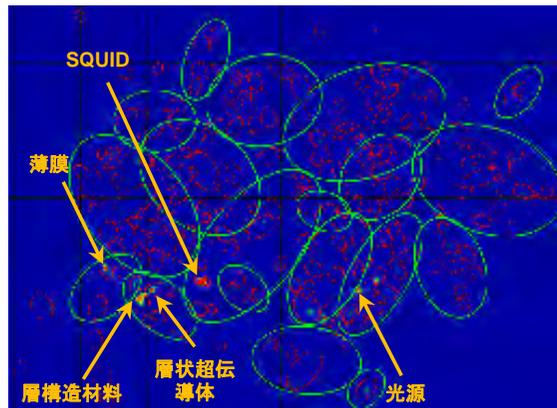


特許数トップ30機関

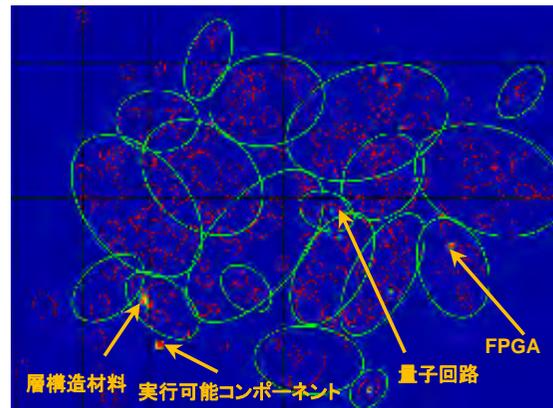


量子技術の特許発行状況 (出願人別比較)

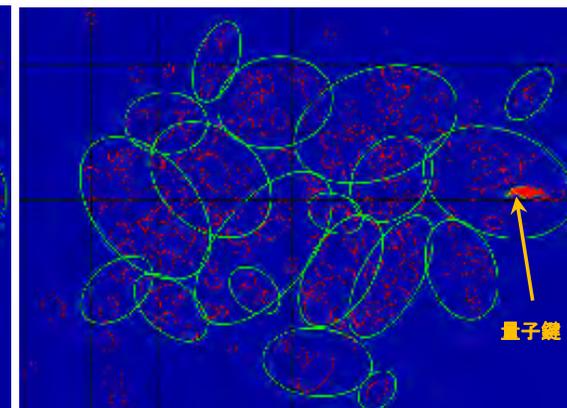
- 首位の中国科学院では、SQUID、層構造材料、薄膜に注力している。
- 2位のIBMではFPGA、量子回路、層構造材料に注力。3位のRuban Quantum Technologyでは量子鍵のみ、4位の東芝では量子鍵と層構造材料、5位のHuaweiは光信号処理、6位の中国国家電網も量子鍵に注力。



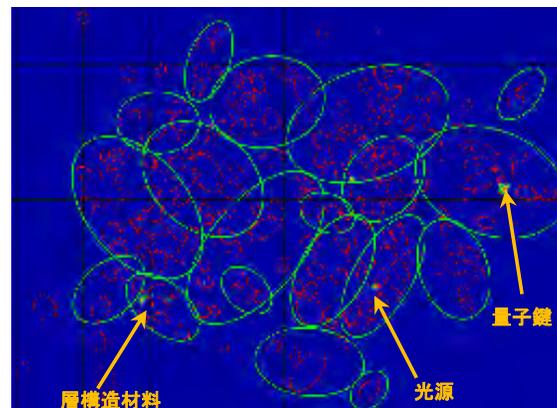
1st CHINESE ACADEMY OF SCIENCE



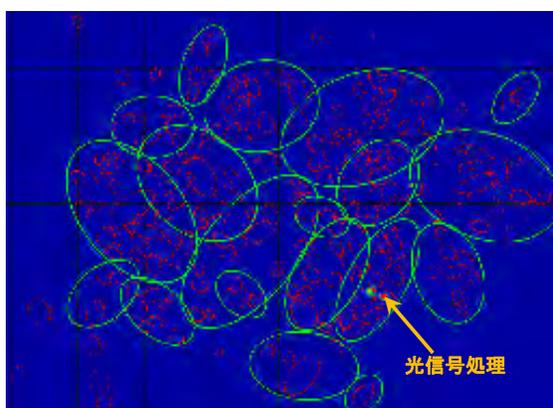
2nd IBM



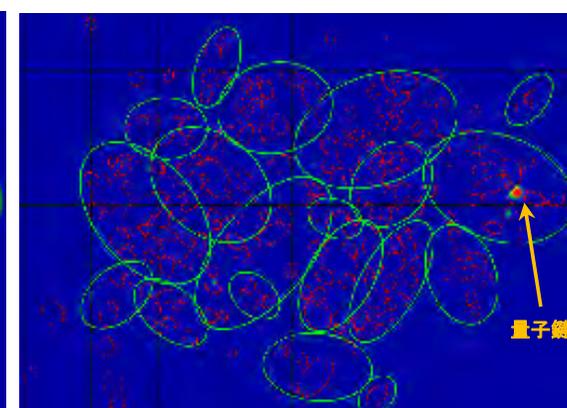
3rd RUBAN QUANTUM TECHNOLOGY CO LTD



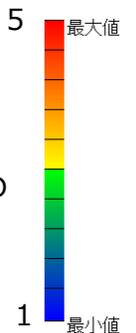
4th TOSHIBA CORP



5th HUAWEI TECHNOLOGIES



6th STATE GRID CORP OF CHINA



QKDの国際標準化（デジタル標準）

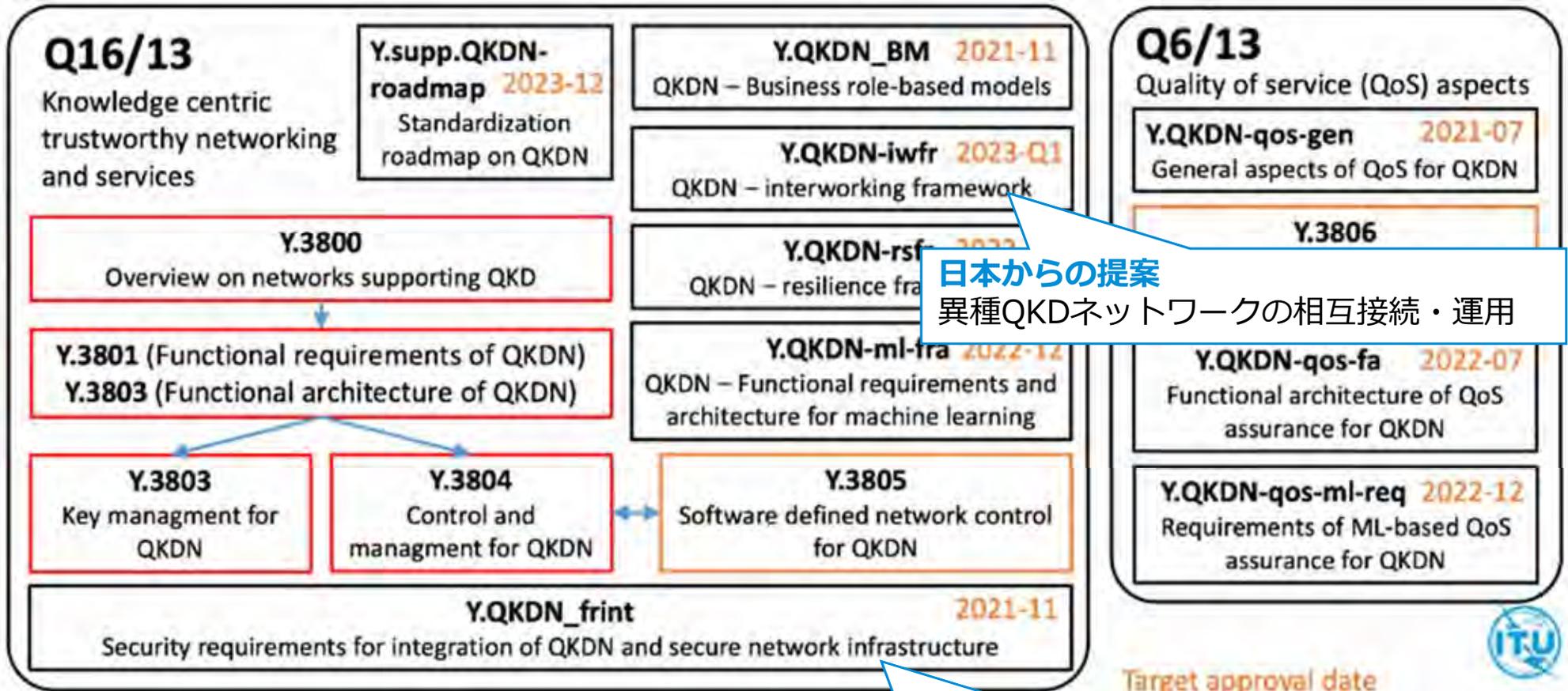
公的機関	内容
国際電気通信連合-電気通信標準化部門(ITU-T)	
SG13	ネットワークアーキテクチャ：QKDネットワークの概要、機能要求条件、鍵管理、制御・管理、SDN、ビジネスモデル、QoSなど。 (参加：日、中、韓、瑞、英、加、独、米など)
SG17	ネットワーク・セキュリティ：セキュリティ要求条件、鍵管理、乱数源、暗号機能など。(参加：日、中、韓、瑞、独、米、露など)
SG11	QKDネットワーク・プロトコル：インタフェースプロトコル仕様(参加：日、中、韓など)
欧州電気通信標準化機構 (ETSI)	
Industry Specification Group on QKD	部品、モジュール、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



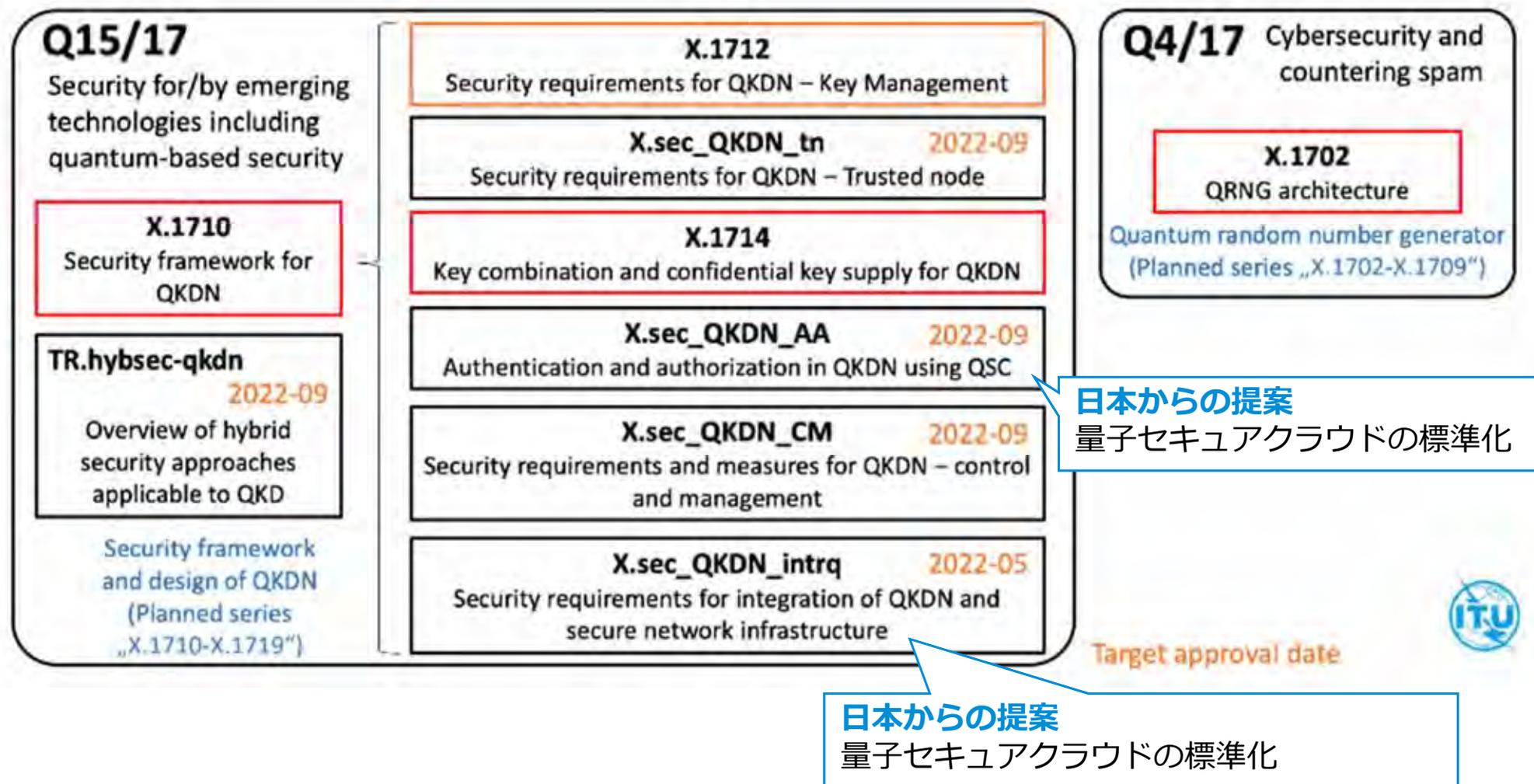
日本からの提案
異種QKDネットワークの相互接続・運用

日本からの提案
量子セキュアクラウドの標準化

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

耐量子計算機暗号の標準化

赤字：日本からの提案

太字：Round2

太字青：Round3 finalists

太字緑：Round3 alternates

	格子暗号	符号暗号	多変数多項式	その他
暗号 化・鍵 確立	Compact LWE, CRYSTALS-KYBER , Ding Key Exchange, EMBLEM and R.EMBLEM, FrodoKEM Giophantus , KCL, KINDI, LAC , Lima, Lizard, LOTUS , NewHope , NTRU (NTRUEncrypt + NTRU-HRSS-KEM), NTRU Prime , Odd Manhattan, Round5 (HILA5+Round2), SABER , Three Bears , Titanium	BIG QUAKE, BIKE , Classic McEliece , DAGS, Edon-K, HQC , LEDAcrypt (LEDAke m+LEDApkc), Lepton, McNie, NTS-KEM , QC-MDPC KEM, Ramstake, RLCE-KEM, RQC ROLLO (LAKE+LOCKER+Ouroboros-R)	CFPKM, DME, SRTPI	GuessAgain, HK17, Mersenne-756839, Post-Quantum RSA- Encryption, RVB, SIKE
デジタル署名	CRYSTALS-DILITHIUM , DRS, FALCON , pqNTRUsign, qTESLA	pqsigRM, RaCoSS , RankSign	DualModeMS, GeMSS , Gui, HiMQ-3, LUOV , MQDSS , Rainbow , SRTPI	Post-Quantum RSA-Signature, WalnutDSA, Gravity- SPHINCS, Picnic , SPHINCS+

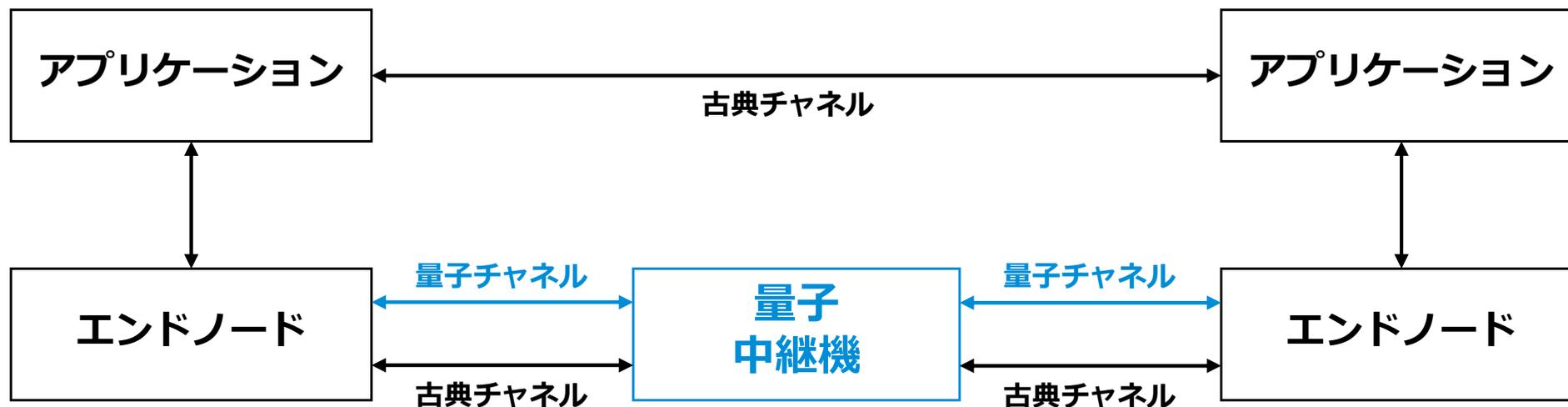
量子インターネットの概念モデル

Internet Research Task Force (IRTF)

- インターネット技術標準化委員会（IETF）の姉妹団体。研究に特化。

Quantum Internet Research Group (QIRG)

- 2018年11月設置。チェアはR. Van Meter（慶應大）とW. Kozlowski（QuTech）



ノードの種類

- 量子ルータ：制御信号により制御される量子ノード。E2Eでの交換ベルペアを決めるなど。
- 自動量子ノード：量子チャネルのみを中継し、延伸化する。
- エンドノード：エンタングルメントペアを受信する。量子メモリは持たない。
- 非量子ノード：古典チャネルの制御を行う。