

令和5年度
特許出願技術動向調査報告書（要約）

－量子計算機関連技術－

令和6年3月

特 許 庁

要 約

目 次

要約

第1章 量子計算機関連技術の技術の概要	1
第1節 量子計算機の各種方式	3
第2節 量子アルゴリズムと量子計算モデル	14
第2章 市場環境調査	16
第1節 市場規模の推移／予測（世界・地域・国別）及びシェア	16
第2節 方式別・応用技術別・応用分野別市場規模の推移／予測及びシェア	19
第3章 政策動向調査	26
第1節 日本の政策動向	26
第2節 米国の政策動向	32
第3節 欧州の政策動向	35
第4節 中国の政策動向	41
第5節 方式毎の政策動向	44
第4章 特許動向調査	48
第1節 技術区分表	48
第2節 全体動向	54
第3節 技術区分別動向	57
第4節 方式別パテントファミリー一件数年次推移及び比率	63
第5節 方式別動向	66
第6節 出願人別動向	67
第5章 研究開発動向調査	69
第1節 全体動向	69
第2節 技術区分別動向	71
第6章 総合分析	77
第1節 市場環境調査／政策動向調査	77
第2節 特許動向調査／研究開発動向調査	77
第3節 提言・示唆	78

目次

要約

第1章 量子計算機関連技術の技術の概要

量子計算機は、量子シミュレーション、最適化問題、人工知能、量子通信・インターネット、量子計測・センシングなどへの応用で、古典計算機では膨大な時間のかかる計算を可能とする計算能力を提供することにより、今後桁違いの応用分野の発展が期待される。そのため、量子計算機技術の研究開発及び応用開発が、世界的に急速に拡大している。

このような状況下で、日本の産業政策を盤石なものにするため、量子計算機関連技術全体を正しく俯瞰し、経済情報・産業情報を踏まえた技術開発の進展状況・方向性を明確にし、産業政策、科学技術政策の基礎資料の構築することが重要である。今後、我が国の産業が持続的に発展していくためには、新規事業の創出が重要であり、そのためには、企業や大学・公的研究機関等の技術開発、知財戦略策定を支援していく必要があると考えられる。

2022年6月に閣議決定された「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」において、「量子コンピュータの大規模化・高機能化の研究開発については、半導体や Beyond 5G 等の他の技術分野との融合やこれを応用する分野の研究も視野に入れた上で、日本単独で考えるのではなく、先行する有志国の企業との連携を実施するなどグローバルな対応を進める」等の記載があるように、量子計算機関連の技術開発に国を挙げて取り組んでいく方向性が示されている。

このような背景の下、「量子計算機関連技術」に関する技術革新の状況、技術競争力の状況、今後の展望等について検討する。技術の概要では、「量子計算機関連技術」の技術俯瞰とその要素技術について、また「量子計算機関連技術」の応用産業の概要について説明する。

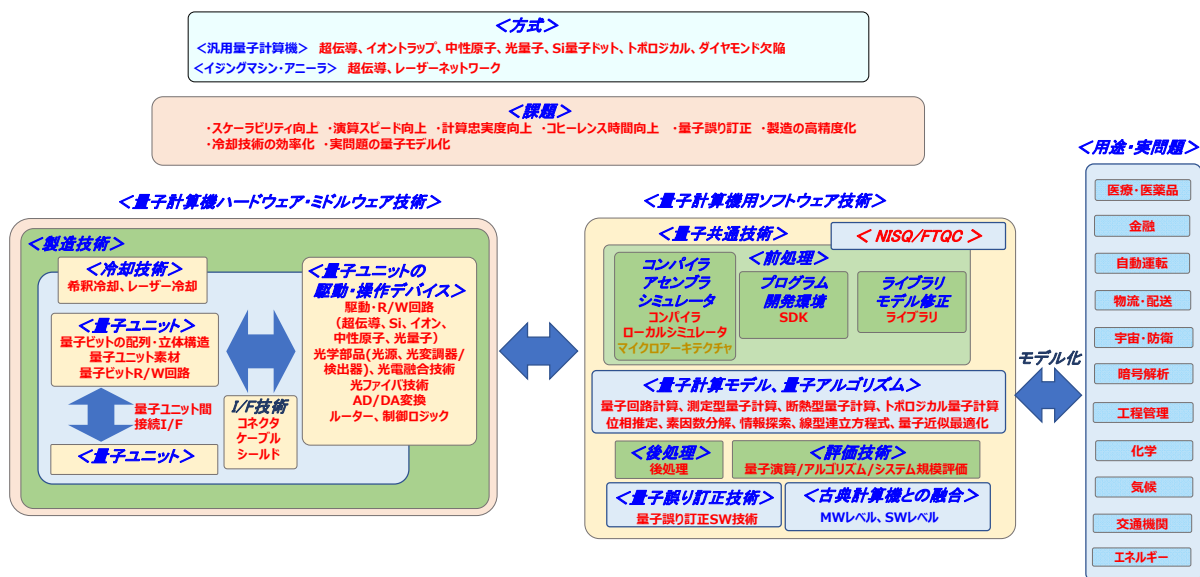
本調査の実施にあたり作成した量子計算機関連技術の技術俯瞰図を図 1-1 に示す。技術俯瞰図は、上段に「方式」と「課題」、下段左に「量子計算機ハードウェア・ミドルウェア技術」、下段中央に「量子計算機用ソフトウェア技術」、下段右端に「用途・実問題」という構成である。以下に、各技術区分の構成要素を概説する。

- ・「方式」では、汎用量子計算機の方式である超伝導、イオントラップ、中性原子、光量子、Si 量子ドット、トポロジカル、ダイヤモンド欠陥と、イジングマシン・アニーラの方式である超伝導、レーザーネットワークがある。
- ・「課題」では、スケーラビリティ向上、演算スピード向上、計算忠実度向上、コヒーレンス時間向上、量子誤り訂正、製造の高精度化、冷却技術の効率化、実問題の量子モデル化がある。
- ・「量子計算機ハードウェア・ミドルウェア技術」としては、大きく分けて「量子ユニット」「インタフェース技術」「量子ユニットの駆動・操作デバイス」「冷却技術」および「製造技術」がある。量子ユニットに関しては量子ビットの配列・立体構造、量子ユニット素材、量子ビット Read/Write 回路があり、冷却技術に関しては、希釈冷却器、レーザー冷却器などがある。また、これらの製造技術がある。量子ユニットの駆動・操作デバイスとして、超伝導、Si、イオン、中性原子、光量子などに特有の駆動・Read/Write 回路、光学部品の光源、光変調器/検出器、光電融合技術、光ファイバー技術、AD/DA 変

換器、ルーター、制御ロジックなど、また、量子ユニットと量子ユニットの駆動・操作デバイスとの間の接続インターフェースとして、コネクタ、ケーブル、シールドなどがある。本調査では量子計算機の主要な方式をまとめて調査する都合から、「量子ユニットの駆動・操作デバイス」として多様な回路・光学部品等をまとめて分類している点に留意されたい。

- ・「量子計算機用ソフトウェア技術」では、エラーのある小・中規模な量子計算機（NISQ：Noisy Intermediate Scale Quantum）及び大規模かつ計算中に誤り訂正が可能な量子計算機（FTQC：Fault Tolerant Quantum Computer）の実現に向けた量子ソフトウェア技術がある。量子計算モデルとして、量子回路計算、測定型量子計算、断熱型量子計算、トポロジカル量子計算などがあり、量子アルゴリズムとして、位相推定、素因数分解、情報探索、線型連立方程式、量子近似最適化などがある。量子共通技術のソフトウェア前処理技術として、コンパイラ、アセンブラ、シミュレータ、マイクロアーキテクチャ、プログラム開発環境のSDK（Software Development Kit）、ライブラリ、モデル修正などがある。また、計算結果の後処理、評価技術として、量子演算/アルゴリズム/システム規模の評価技術などがある。また、特に NISQ にとって重要な量子誤り訂正ソフトウェア技術、ミドルウェアレベル及びソフトウェアレベルでの古典計算機との融合技術がある。
- ・「用途・実問題」では、量子アルゴリズムのモデル化により、医療・医薬品、金融、自動運転、物流・配送、宇宙・防衛、暗号解析、工程管理、化学、気候、交通機関、エネルギーなど多様な応用が想定されている。

図 1-1 技術俯瞰図



出典：調査会社が作成

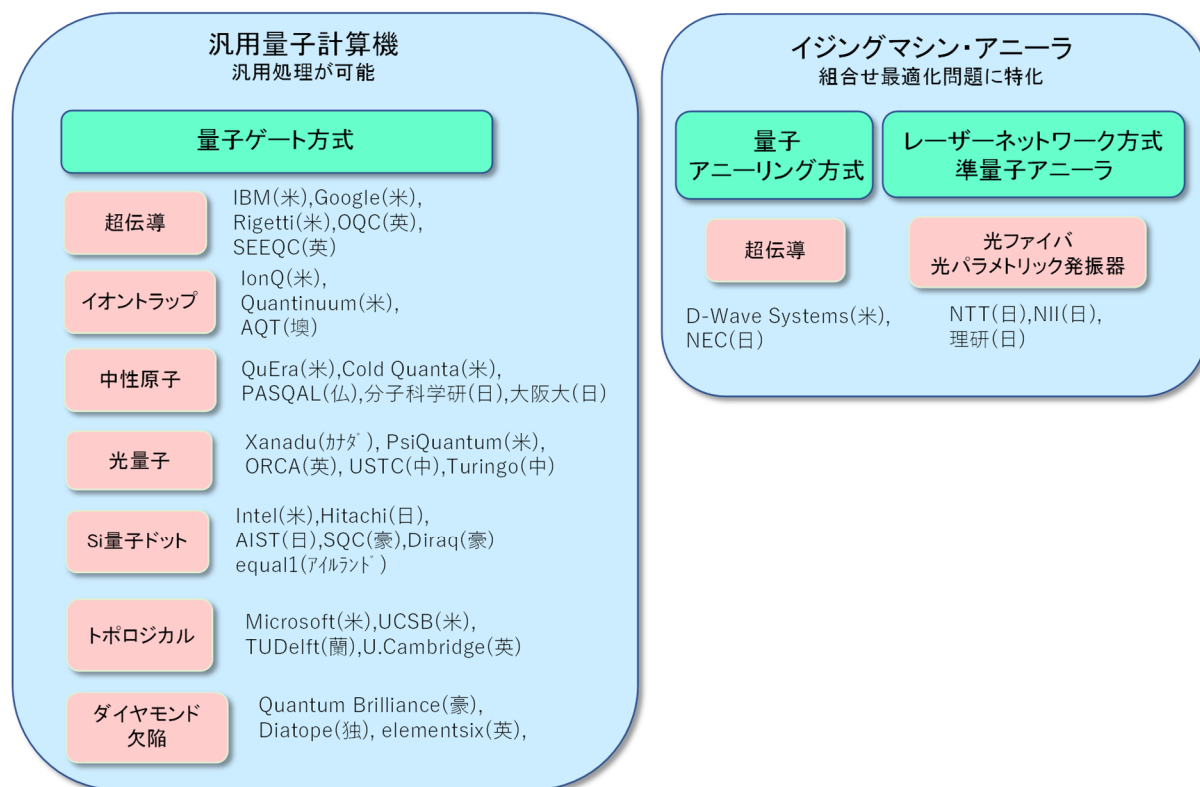
第1節 量子計算機の各種方式

量子計算機には、大きく分けて、「汎用量子計算機」と「イジングマシン・アニーラ」がある。各種方式と主要なプレイヤーを図1-2に示す。

「汎用量子計算機」は、量子ゲート方式と呼ばれ、量子ビットを量子ゲートに通すことにより超並列の量子計算を実行する計算機である。利用技術としては、超伝導方式、イオントラップ方式、中性原子方式、光量子方式、Si量子ドット方式、トポロジカル方式、ダイヤモンド欠陥方式などがある。

「イジングマシン・アニーラ」は、組合せ最適化問題を近似的に解くことに特化した計算機である。多くの組合せ最適化問題は、磁性体の数理模型であるイジング模型(Ising model)の基底状態探索問題に変換することができる。利用技術としては、超伝導量子ビットを用いた「量子アニーリング方式」、光子のスピンの用いた「レーザーネットワーク方式」がある。

図1-2 量子計算機の各種方式とプレイヤー



出典：調査会社が作成

以下、量子計算機の各種方式の概要を説明する。

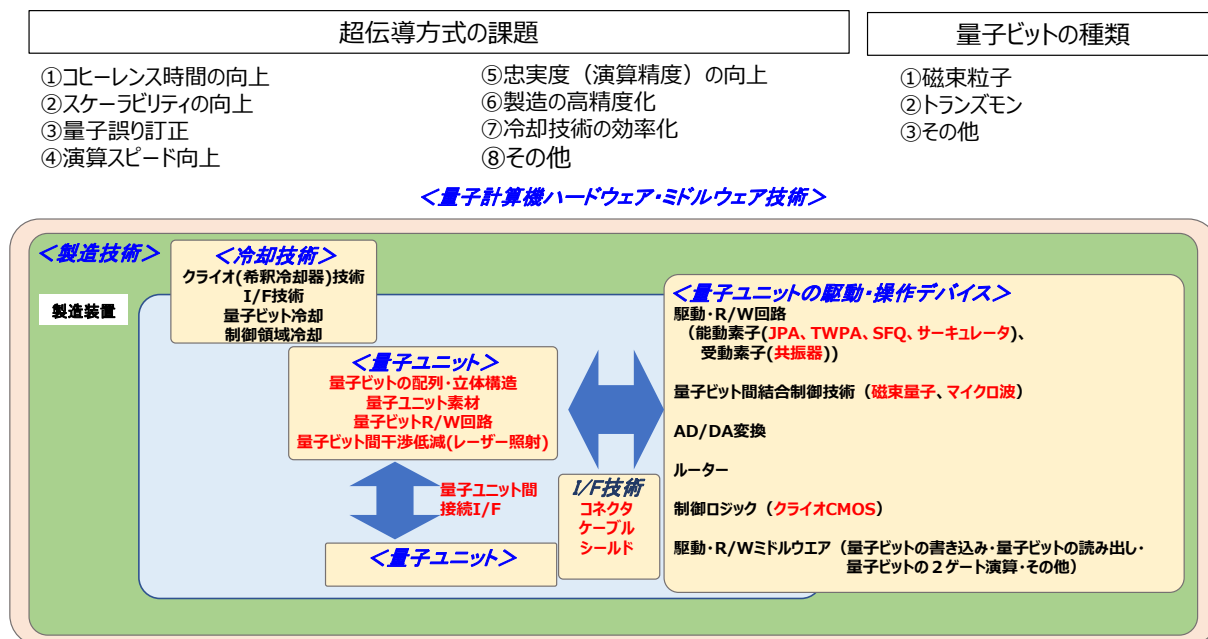
1. 超伝導方式

超伝導方式は、現在、開発が進んでいる方式である。半導体の加工技術などを使って、Si 基板上などに超伝導回路を作成する。ジョセフソン接合を利用し、回路の電流の右回り/左回りで、又は回路の基底状態/励起状態で量子ビットを構成する。ジョセフソン接合は、二つの超伝導体の間に薄い絶縁体膜を挟んだ素子で、2 個の電子からなる Cooper 対が、素子の絶縁体をトンネル効果によって突き抜け、超伝導電流が流れる。最初に量子計算機を事業化した D-Wave Systems の量子アニーリング方式は、量子ビットとして、電流の右回り/左回りによる磁束量子を用いている。一方、Google、IBM などは、LC 回路の基底状態/励起状態を量子ビットとしている。

超伝導方式の量子ビットの量子演算は、マイクロ波を利用して行う。LC 回路量子ビットでは、ジョセフソン接合の L の非線形性によりエネルギーレベルが等間隔からずれ、基底状態/励起状態の量子ビットとして使える。超伝導方式では、量子ビット間の完全結合が難しいため、IBM はスター型 (1 個の量子ビットから他の全ての量子ビットに結合)、Google は隣接型部分結合 (隣同士の量子ビットを結合)、D-Wave Systems はペガサスグラフ (ペガサスと名付けたトポロジーによる結合) などを用いている。

超伝導方式の長所は、現状の量子ビット数として、量子ゲート方式が 400~1k 量子ビット、量子アニーリング方式が 5k 量子ビット程度と大きく、高速計算が可能であり量子ビット数の大規模化において先頭を走っている。課題は、完全結合が難しく、コヒーレンス時間が短くエラー耐性が悪く 10mK レベルへの冷却器が必要であることなどである。図 1-3 に超伝導方式の調査・分析内容を示す。量子ユニットでは、レーザー照射によるジョセフソン接合の抵抗調整による量子ビット間干渉低減技術、駆動・Read/Write 回路では、ジョセフソン接合を使った低雑音アンプのジョセフソンパラメトリック増幅器 (JPA、TWPA)、サーキュレータ、共振器の技術、磁束量子やマイクロ波を用いた量子ビット間の結合技術、制御ロジックのクライオ CMOS 技術などが特徴的である。課題では、コヒーレンス時間の向上や量子誤り訂正が重要となる。

図 1-3 超伝導方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

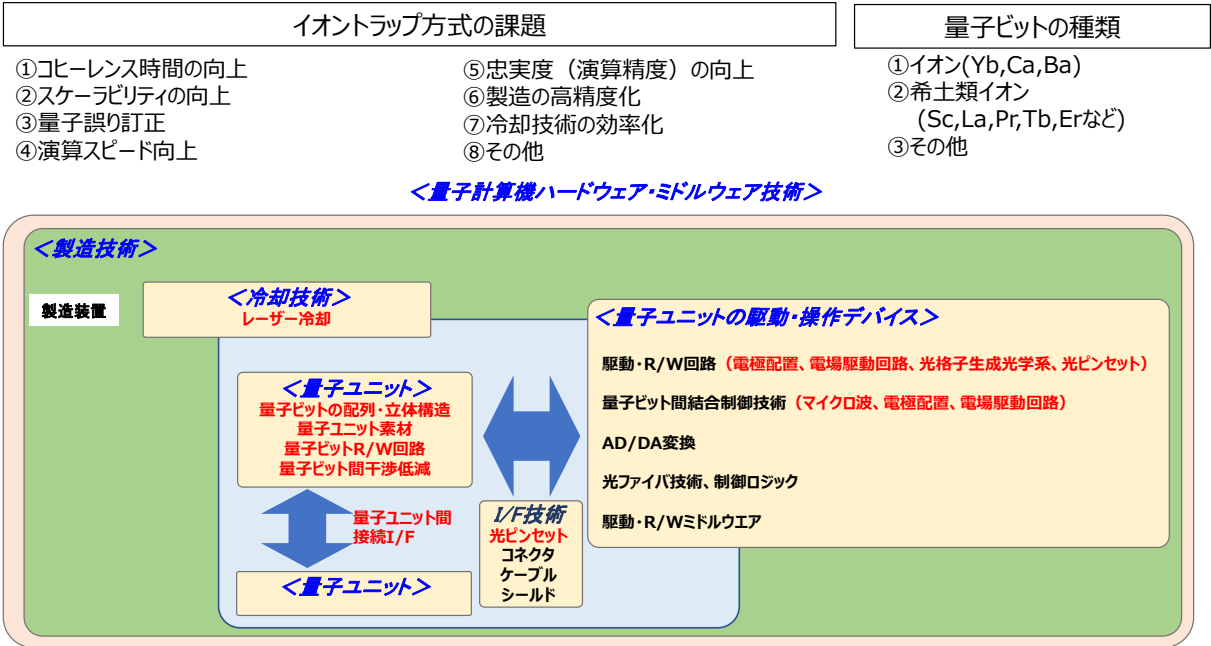
2. イオントラップ方式

イオントラップ方式は、捕捉イオンを利用する。1 価の陽イオンであるカルシウムイオン (Ca^+) やイッテルビウムイオン (Yb^+) などを波長、振動数、位相がそろったレーザー光を用いたレーザーで繰り返し冷却する。RF と静電場で超真空中 ($<10^{-8}\text{Pa}$) にトラップ（捕捉）する。それぞれの捕捉イオンの基底・励起エネルギー状態を量子ビットとしている。

イオントラップ方式の長所は、全ての量子ビットが完全に同一であり、完全結合が可能であり、コヒーレンス時間が長く（15 秒以上）、エラー耐性があることであり、注目されている。課題は、演算時間が長く（10ms 以上）、量子ビット数の増加が難しいことである。

図 1-4 にイオントラップ方式の調査・分析内容を示す。レーザー冷却技術、駆動・Read/Write 回路の電極駆動回路、光ピンセット技術、マイクロ波や電極配置による量子ビット間結合制御技術などが特徴である。課題としては、スケーラビリティの向上、演算スピードの向上などが重要である。

図 1-4 イオントラップ方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

3. 中性原子方式

イオントラップ方式の電荷を持ったイオンの代わりに、電荷を持たないルビジウム (Rb) 原子などをレーザー冷却などにより捕捉し、それぞれの基底・励起エネルギー状態を量子ビットとする。捕捉方法には、以下の二つがある。

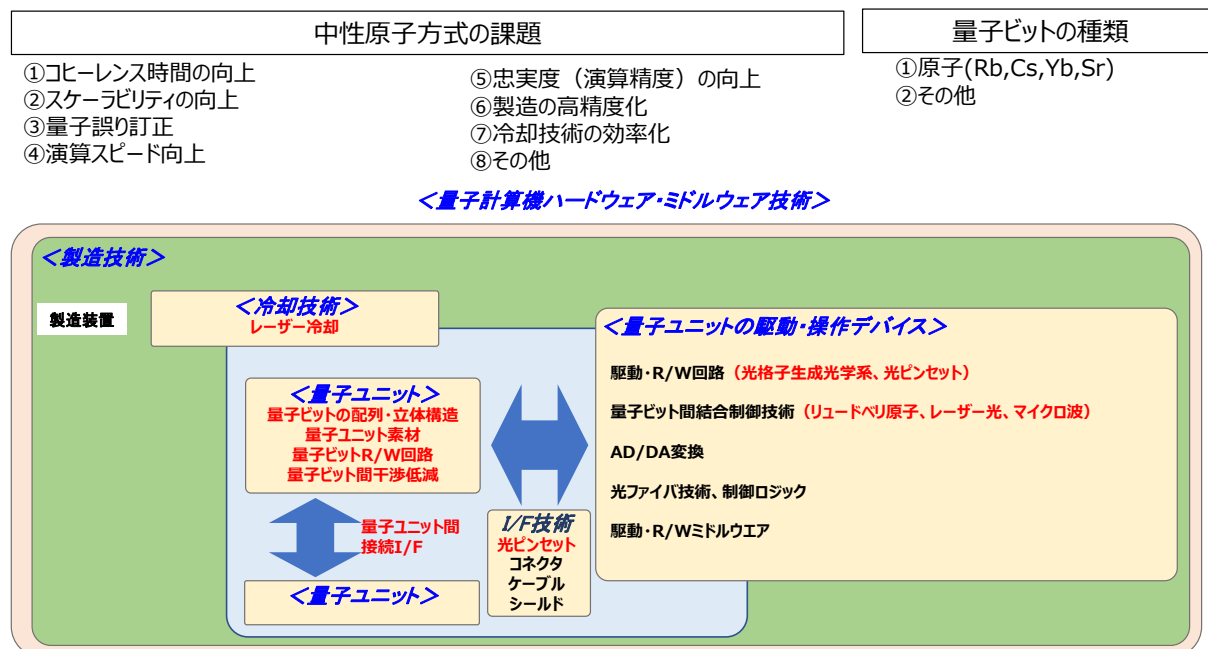
1 つは超伝導永久電流アトムチップ方式であり、固体表面上の電線に電流を流して生じる磁場によって捕捉する。量子ビットの集積度は約 1 万個/mm² である。もう 1 つは二重光格子方式を作製して、中性原子を 3 次元的に捕捉する方式であり、この方式は既に、極めて正確な原子時計（光格子時計）として実現されている。二重光格子方式の量子ビットの集積度は 100 万個/（100 μm）³ が可能である。

更に、従来の中性原子方式の課題として、リユードベリブロックにより隣接原子を近づけられないという課題があったが、最近その回避策が明らかになった。極低温に冷却した二つの原子を μm レベルに近づけ、特殊なレーザー光を当てて操作する。10 ピコ秒（1,000 億分の 1 秒）だけ光る超高速のパルスレーザーを使うことで、従来の中性原子型の課題であるリユードベリブロックを回避し、超伝導方式の 15ns を上回る 6.5ns で動作する世界最速の 2 量子ビットゲート（制御ゲート）を実現できた。これは、ノイズの時間スケールより 2 桁以上速いため、ノイズの影響をほぼ無視できる。また、量子ビット数を光格子により 1,000 個以上 2 次元アレイ状に配置でき、量子ビット間を全接合できるとしている。

中性原子方式の長所は、量子ビットを μm レベルに近づけられるため高速動作ができることや、全ての量子ビットが完全に同一であり、完全結合が可能であり、コヒーレンス時間が長く（15 秒以上）、エラー耐性があることである。結合操作において光ピンセットで原子を移動させる必要があり、演算時間が課題であるとされていたが、近年の研究開発により高速な量子ゲート操作に係る報告もなされており、大きな注目を集めている方式となっている。

図 1-5 に中性原子方式の調査・分析内容を示す。レーザー冷却技術、駆動・Read/Write 回路の光格子生成光学系、光ピンセット技術、リユードベリ原子やレーザー光による量子ビット間結合制御技術などが特徴である。課題としては、スケーラビリティの向上、演算スピードの向上などが重要である。

図 1-5 中性原子方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

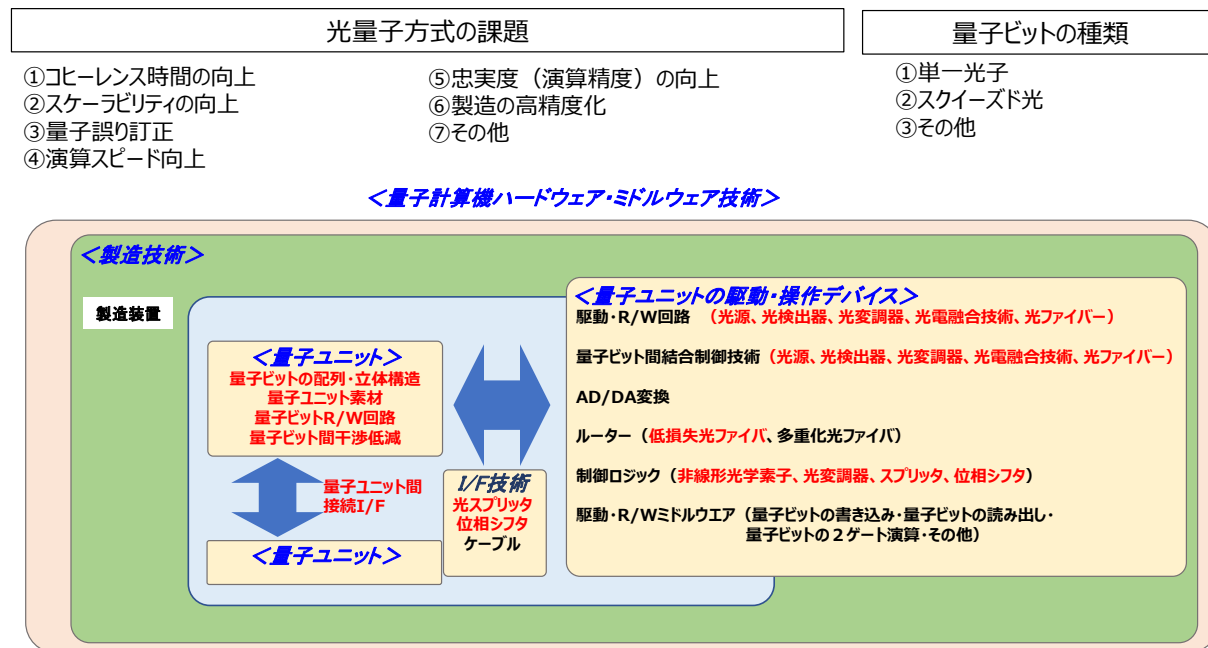
4. 光量子方式

光量子方式は、光子の偏光などを量子ビットとして用いる。他の方式の量子ビットはほとんど静止しているのに対して、光子は光速で移動する。光子を重ね合わせて干渉させ、もつれ状態を作り、1 パルス毎に演算を実行する。光パルスをループに回すことによって効率的に演算させる。

光量子方式の利点は、室温・大気圧下で動作すること、高速動作が可能であること（～10ps）、単一光子の検出・制御技術、量子誤り技術などが確立していること、多数の光パルスで計算が可能であること、量子通信・量子インターネットとの親和性が高いことである。課題は、光子損失によるエラー率の増大、単一光子生成技術の確立、光集積化技術、量子ビット数の増大、ビット間結合操作の工夫などがある。

図 1-6 に光量子方式の調査・分析内容を示す。光源、光検出器、光変調器、光電融合技術、光ファイバーなどの駆動・Read/Write 回路や量子ビット間結合制御技術、制御ロジックの非線形光学素子、光変調器、スプリッタ、位相シフタなどが特徴である。課題としては、コヒーレンス時間の向上、スケーラビリティの向上、忠実度（演算精度）の向上などが重要である。

図 1-6 光量子方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

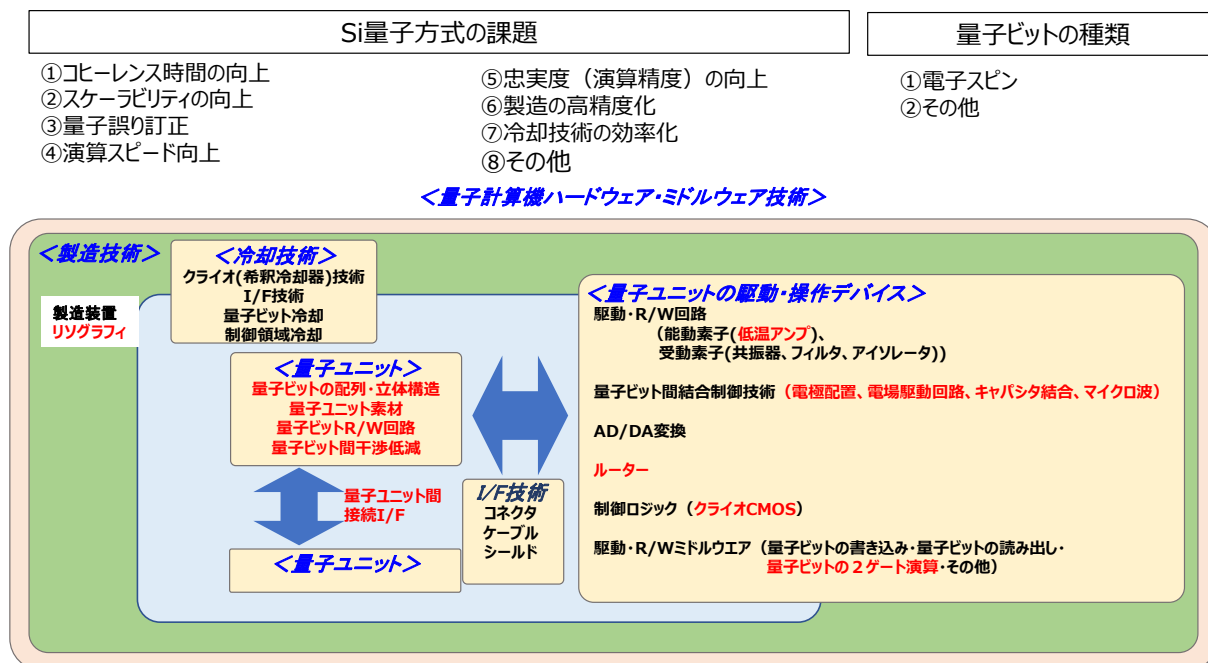
5. Si 量子ドット方式

Si 量子ドット方式は、Si 基板上にナノサイズの構造を作製又は n 型不純物ドットなどをドーピングして、電子を閉じ込めるドットを作成し、そのエネルギーレベルや電子スピンを量子ビットとして用いる。電子スピンを量子ドットとして用いる場合、Si 基板に含まれる同位体 ^{29}Si 、 ^{30}Si は、ノイズ源となるため、純粋な ^{28}Si ウェハ上に電子スピン量子ビットを作成することが行われている。既存のシリコン微細加工技術を活用することにより、1 億量子ビット/ cm^2 の集積度が期待される。2020 年 2 月には、理化学研究所と東京工業大学のグループが高速読出し法に成功している。Intel、日立、産業技術総合研究所などでも開発が活発に進行している。

Si 量子ドット方式の長所は、超伝導方式に比べて、コヒーレンス時間が長く（ $\sim 100 \mu\text{s}$ ）、冷却温度も高く（ $\sim 1\text{K}$ ）、冷却装置の小型化が可能である。課題は、Random Telegram Noise (RTN) などによるエラーの回避、ビット間結合の工夫などが必要である。

図 1-7 に Si 量子ドット方式の調査・分析内容を示す。電極配置、電場駆動回路、キャパシタ結合、マイクロ波などによる量子ビット間結合制御技術、制御ロジックのクライオ CMOS 技術などが特徴である。課題としては、コヒーレンス時間の向上、スケーラビリティの向上、忠実度（演算精度）の向上などが重要である。

図 1-7 Si 量子ドット方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

6. トポロジカル方式

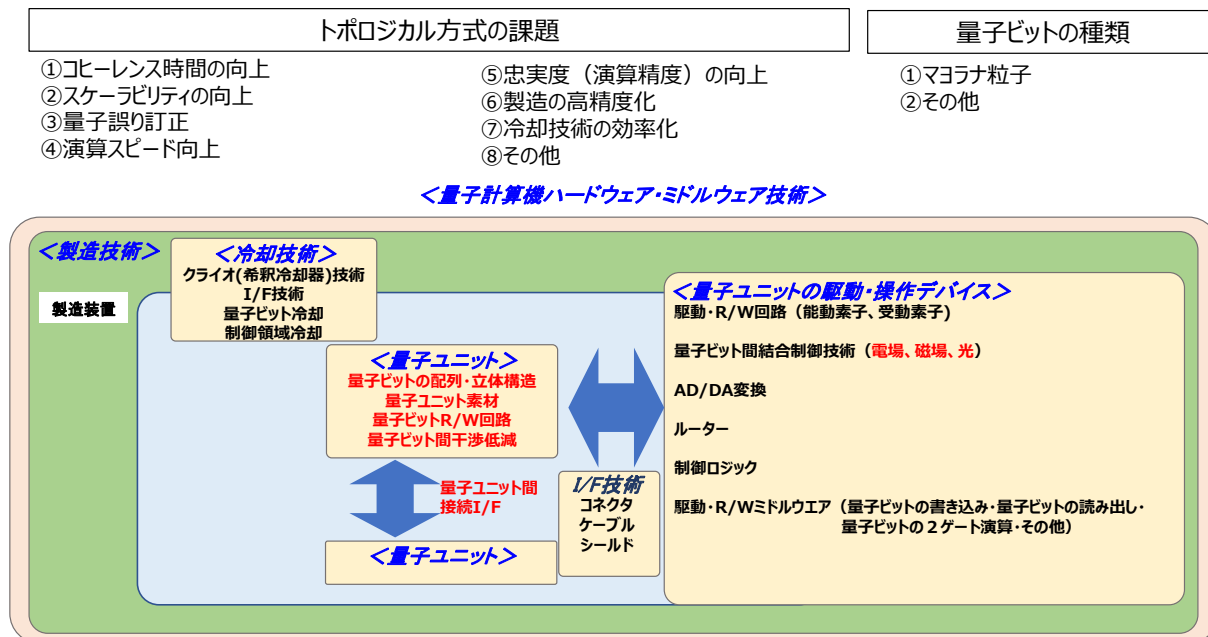
トポロジカル方式は、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体などの表面・端部で生じるマヨラナ準粒子を利用する。準粒子とは、物質中で量子化された量子のことで、真空中で量子化される粒子と区別するため、準粒子と呼ぶ。マヨラナ準粒子は、物質中で量子化され、粒子と反粒子が同一の半整数スピン準粒子である。反粒子と粒子とは、量子数（質量、寿命、スピン、電荷など）の絶対値は等しく、符号を持つ量子数の符号が互いに逆の粒子である。マヨラナ準粒子対の二つの消滅型を量子ビットとして用い、マヨラナ準粒子の入れ替えで演算を行う。トポロジーは、形を連続的に変えても変わらない性質である。したがって、トポロジーな量を量子ビットにできれば、ノイズに強くコヒーレンス時間が長いという利点が期待される。

ナノワイヤ半導体（InAs や InSb など）の表面のワイヤに沿った半分に超伝導物質の膜を作り、超伝導バルクに接続すると、ワイヤの両端にマヨラナ準粒子が生成される。2018年に京都大学・東京大学・東京工業大学のグループが磁性絶縁体の塩化ルテニウム（ α -RuCl₃）で実証することに世界で初めて成功した。

トポロジカル方式の長所は、ノイズに強く、コヒーレンス時間が長いことである。課題は、マヨラナ準粒子は発見されたが、量子計算は実証されていないことである。

図 1-8 にトポロジカル方式の調査・分析内容を示す。電場、磁場などによる量子ビット間結合制御技術などが特徴である。課題としては、未だ基礎研究段階であり、量子計算の動作検証が重要である。

図 1-8 トポロジカル方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

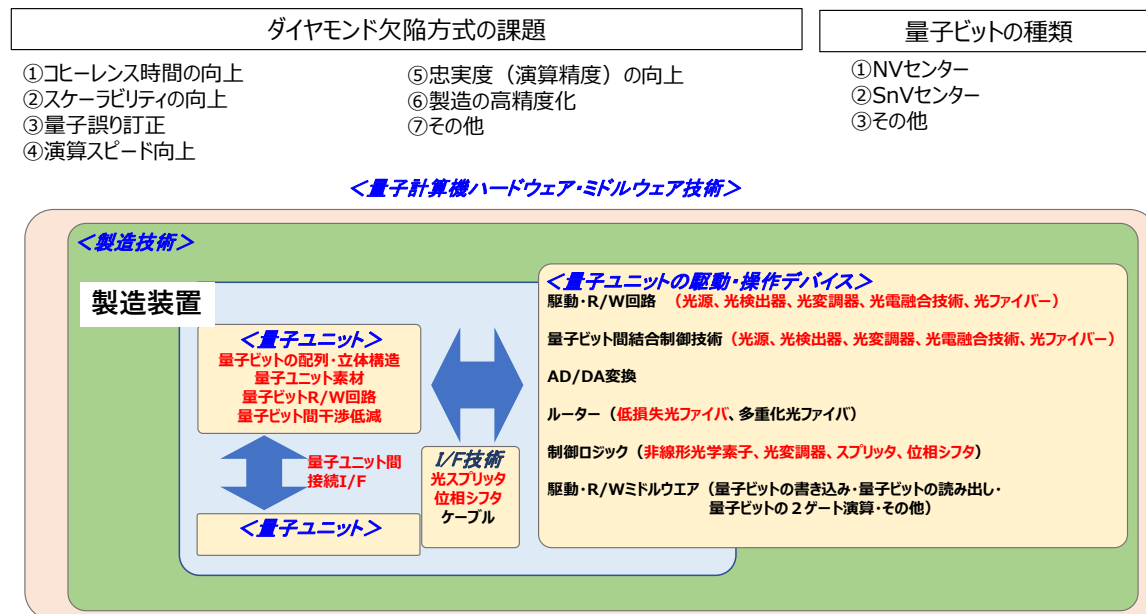
7. ダイヤモンド欠陥方式

ダイヤモンド欠陥方式は、ダイヤモンド NV センタを量子ビットとして活用する。ダイヤモンド結晶構造は、共有結合が 4 本で物理的に強固な物質であるが、ダイヤモンド結晶構造ができる過程で、結合手を 3 本しかもっていない窒素原子 (N) が炭素原子に置き換わると、炭素の結合手が 1 本余り、空孔 (Vacancy) ができる。この複合不純物欠陥の空孔に電子を閉じ込めて (ダイヤモンド NV センタと呼ぶ)、当該電子の「スピン」と呼ばれる量子状態を、マイクロ波やレーザー光で制御することにより演算を行う。

ダイヤモンド欠陥方式の長所は、コヒーレンス時間が長く安定で、動作温度が 10K 以上と高いこと、量子通信、量子インターネットとの親和性があることである。課題は、動作速度が $100\mu s$ と遅いこと、NV センタの位置と動作の制御が難しいことである。

ダイヤモンド欠陥方式の調査・分析内容を図 1-9 に示す。光源、光検出器、光変調器、光電融合技術、光ファイバーなどの駆動・Read/Write 回路などが特徴である。課題としては、製造の高精度化、演算スピードの向上などが想定されるが、未だ基礎研究段階であり、量子計算の動作検証が重要である。

図 1-9 ダイヤモンド欠陥方式の調査・分析内容



7

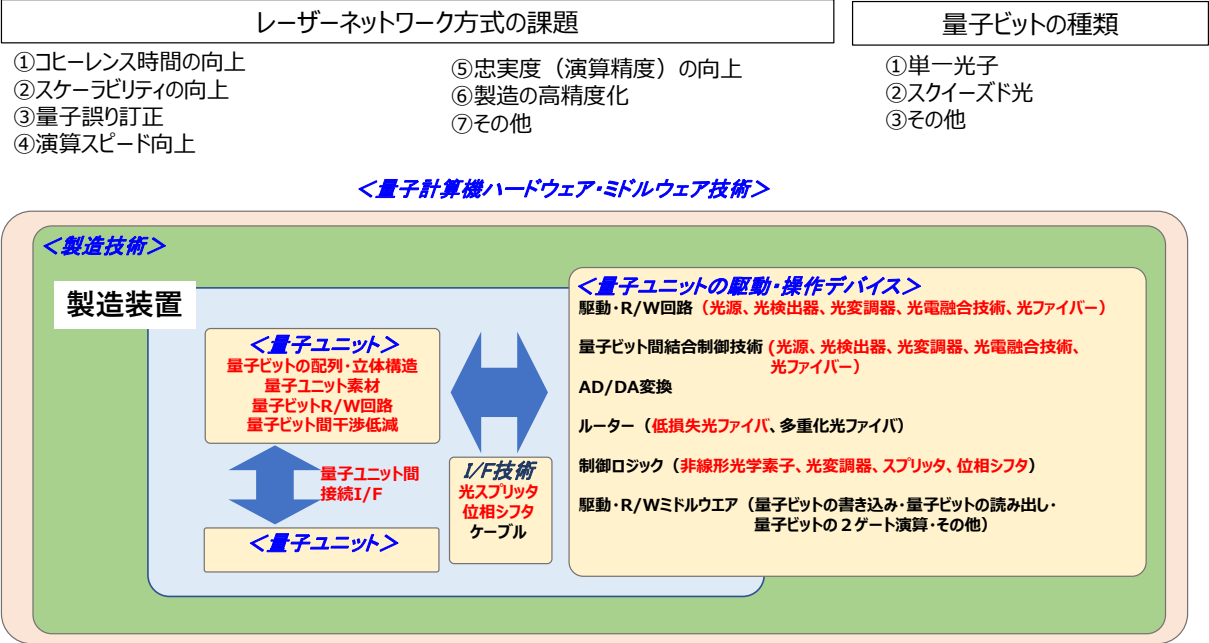
出典：調査会社が作成

8. レーザーネットワーク方式

レーザーネットワーク方式は、光ファイバー、光パラメトリック発振器などを用いたイジングマシン・アニーラ（準量子アニーラ）である。QNN（Quantum Neural Network）とも呼ぶ。2019年5月に、NTT、NII 及び米国スタンフォード大学は、光を用いた2,048量子ビットのコヒーレンスイジングマシン（CIM: Coherent Ising Machine）を作製し、超伝導方式に比べて量子ビット間の結合を強くし、優れた結果を得たと発表した。CIMでは、量子ビットとして、DOP0（Degenerated Optical Parametric Oscillator、縮退光パラメトリック発振器）のパルスの0位相、 π 位相をスピンの上向きと下向きとして用いる。多数のDOP0パルスを全長1kmの光ファイバリング発振器の中に入れ、電子演算回路のFPGAと組合せた測定・フィードバック法によって、DOP0パルス間の全結合が実現される。

レーザーネットワーク方式の調査・分析内容を図1-10に示す。光源、光検出器、光変調器、光電融合技術、光ファイバーなどの駆動・Read/Write回路や量子ビット間結合制御技術、制御ロジックの非線形光学素子、光変調器、スプリッタ、位相シフタ、低損失光ファイバー、多重化光ファイバーなどが特徴である。課題としては、コヒーレンス時間の向上、スケーラビリティの向上、忠実度（演算精度）の向上などが重要である。

図 1-10 レーザーネットワーク方式の調査・分析内容



出典：調査会社が作成

9. 量子計算機の各種方式の比較

表 1-1 に、量子計算機の各種方式の比較表を示す。デバイス構造、動作原理、プレイヤー、量子ビット数、長所、現状の課題を示している。量子ビットとしては、超伝導方式が量子ゲート方式、量子アニーリング方式共に、量子ビット数が 400～5K 量子ビットと大きく、高速計算が可能であり量子ビット数の大規模化において先頭を走っているが、コヒーレンス時間が短くエラー耐性が悪く 10mK レベルへの冷却器が必要である。一方、イオントラップ方式及び中性原子方式は、コヒーレンス時間が長くエラー耐性があり、注目されている。高速動作や量子ビット数の増加が課題である。Si 量子ドット方式は、Si LSI 技術との整合性が良いのが長所であるが、エラー耐性、量子ビット数の増加が課題である。トポロジカル方式は、原理的にノイズに強いが、ハードウェアで実証されていない。

表 1-1 量子計算機の各種方式の比較表

量子ビット方式	デバイス構造	動作原理	プレイヤー	Qubit数	長所	課題
超伝導方式	Josephson Junction	磁束量子またはトランズモン	IBM(米), Google(米), Rigetti(米), OQC(英), D-Wave(カナダ)	汎用: 433 Qubits (>1,000@2023) Ising: 5,640 Qubits (7k@2023)	・制御性良い ・高速 (~10ns) ・Si LSI技術との親和性高い	・コヒーレンス時間 中 (~100 μ s) ・強いエラー訂正必要 ・基板界面ノイズ、完全結合困難 ・冷却要 ~10mK
イオントラップ方式	真空中レーザー冷却イオン	冷却原子核スピン	IonQ(米), Quantinuum(米), AQT(韓)	12 Qubits	・コヒーレンス時間長く安定 (15s~10分)、完全結合 ・Noiseに強い、ECC容易	・Qubit数限界あり ・低速 10~100ms ・Qubit数増大
中性原子方式	真空中レーザー冷却原子	冷却原子核スピン リュードベリ軌道原子	QuEra(米), ColdQuanta(米), PASQAL(仏), 分子科学研	800Qubits	・コヒーレンス時間長く安定 (15s~10分) ・Noiseに強い、ECC容易 ・Qubit数増大	・結合操作 低速 μ s~ms
光量子方式	光ファイバ/OP0光源/フォトリソニック素子	単一光子またはスクイズド光	Xanadu(カナダ), PsiQ(米), ORCA(英), Turingo(中)	216Qubits (288@2023)	・室温・大気圧下動作 ・高速 (~10ps) ・量子通信/インターネットとの親和性	・光子損失によりエラー率大、集積化 ・Qubit数増大 ・ビット間結合
Si量子ドット方式	Si(or SiGe)-MOSFET	電子スピン	Intel(米), Hitachi	12 Qubits	・Si LSI技術との整合性良い ・高速 (~100ns)	・コヒーレンス時間 中 (~100 μ s) ・強いエラー訂正要、RTN、Si同位体 ・冷却要 ~1K
トポロジカル方式	トポロジカル絶縁体/超伝導体積層	マヨラナ粒子、準粒子(スピン対)	Microsoft(米)	—	・原理的にNoiseに強い ・コヒーレンス時間長い	・今のところ未実現
ダイヤモンド欠陥方式	ダイヤモンドNVセンター	NVセンターの核スピン+電子スピン	Quantum Brilliance(豪), Diatope(独), elementsix(英)	—	・動作温度高い (10K~) ・量子通信/インターネットとの親和性 ・コヒーレンス時間長く安定	・NVセンターの位置と動作制御 ・動作速度
レーザーネットワーク方式	光ファイバ/OP0光源/FPGA等	光ファイバスクイズド光	NTT, NII	10k~100k Qubits相当	・Qubit完全結合性	・適用範囲と効果の検証要 ・光子損失によりエラー率大、集積化

出典：調査会社が作成

第2節 量子アルゴリズムと量子計算モデル

1. 量子アルゴリズム

n 個の量子ビットを有する量子計算機では、量子並列性により、 2^n 個の状態を一度に同時に計算できるため、古典計算機と比較した量子計算機の超高速性が実現される。しかし、計算結果を得ようとして測定すると、たった一つの結果であるビット列しか読み出せない。しかもほとんどの場合、それは欲しい結果ではない。欲しい結果だけを残すために必要になるのが、量子アルゴリズムである。素因数分解を高速に解くショアの素因数分解アルゴリズム、データ検索を高速に解くグローバーの量子探索アルゴリズムなどがある。これらのアルゴリズムは、量子暗号やブロックチェーンなどにも適用できるとされている。

表 1-2 に主要な量子アルゴリズムを示す。ショアの素因数分解アルゴリズム、グローバーの量子探索アルゴリズム、誤り訂正未適用の量子計算機 NISQ 用アルゴリズムとして、変分原理に基づいた変分アルゴリズム、状態や動きの時間変化を追う動力学に基づいた量子ダイナミクスシミュレーションアルゴリズム、分子の基底状態のエネルギーレベル、分子の形状、励起エネルギーレベルを求める量子化学計算アルゴリズム、固有値問題を解く量子位相推定アルゴリズムなどがあり、新物質、新触媒、創薬などへの適用などが期待される。その他のアルゴリズムとしては、量子多重積分、微分方程式、偏微分方程式、連立一次方程式などを解く量子アルゴリズムも開発されている。

表 1-2 主要な量子アルゴリズム

量子アルゴリズム	原理	適用範囲
ショアのアルゴリズム	素因数分解	暗号解析
グローバーのアルゴリズム	量子データ探索	データ探索
変分アルゴリズム	変分原理	波動関数
量子ダイナミクスシミュレーションアルゴリズム	動力学	波動関数、物質の基底状態/励起状態計算
量子化学計算アルゴリズム	シュレーディンガー方程式	新物質、新触媒、創薬など
量子位相推定アルゴリズム	固有値問題	新物質、新触媒、創薬など

出典：調査会社が作成

2. 量子計算モデル

量子計算機の計算方式である汎用量子計算モデルは、表 1-3 に示す 4 種類が提案されている。

量子回路計算モデルは、標準型の量子計算モデルで、各量子ビットを先ず $|0\rangle$ や $|1\rangle$ に初期化し、順次量子演算を繰り返し、最後に各量子ビットを測定することにより、結果を得る。測定型量子計算モデルは、もつれ合った特殊な初期状態（リソース状態）を準備後、古典計算機を使いながら 1 量子ビットずつ測定し、最後に残りビットを測定する。測定状態とリソース状態は分離されている。このモデルは、光子による計算に最適で、量子誤り耐性計算を、表面符号に基づいて簡潔に実現可能である。断熱型量子計算モデルは、エネルギー演算子（ハミルトニアン）を、簡単な初期状態から欲しい終状態へ断熱的に変化させて、シュレーディンガー方程式を解く。トポロジカル量子計算モデルは、マヨラナ準粒子の組み換え（組みひも理論）で演算する。この方法の強みは、トポロジカルな現象を使うので、環境ノイズに強いことである。

表 1-3 汎用量子計算モデル

量子計算モデル	概要
量子回路計算モデル	標準型。量子ビットを先ず初期化し、順次演算して最後に測定。
測定型量子計算モデル（一方向型）	特殊な初期状態を準備後、1 量子ビットずつ測定し、最後に残りビットを測定。
断熱型量子計算モデル	エネルギー演算子を断熱的に変化させ、シュレーディンガー方程式を解く。
トポロジカル量子計算モデル	マヨラナ準粒子の組み換えで演算。

出典：調査会社が作成

3. 量子プログラミング言語

量子プログラミング言語は、量子アルゴリズムの計算を実際来实现するプログラミング言語である。命令型量子プログラミング言語（imperative quantum programming languages）と関数型量子プログラミング言語（functional quantum programming languages）の二つがある。命令型量子プログラミング言語は、逐次的に命令を連ねていくプログラミング言語で、具体的には、量子擬似コード、QCL（Quantum Computation Language）、Q 言語、qGCL、Q#などがある。関数型量子プログラミング言語は、データに何らかの処理を施す（データを引数とする関数を施した結果を、新たなデータとする）ことを繰り返すプログラミング言語で、具体的には、QFC、QPL、QML、Quantum lambda calculi、Quipper などがある。

第2章 市場環境調査

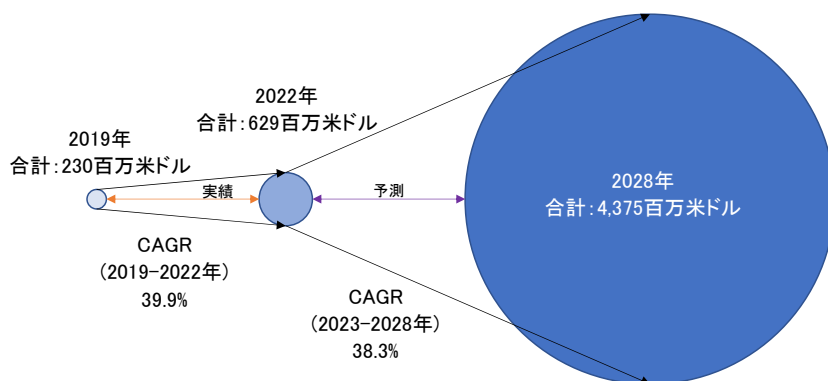
量子計算機関連の市場推移として、量子計算機関連の2022年までの実績と2023年から2028年までの予測をもとに、量子計算機関連の成長率、世界市場規模推移、地域別シェア、2021年における応用分野別のランキングとそれらの成長率を取り上げ、以下に示す。

第1節 市場規模の推移／予測（世界・地域・国別）及びシェア

1. 世界シェア

量子計算機関連の金額における2022年までの成長率（実績）と、2023年から2028年までの成長率（予測）を図2-1に示す。なお、市場データには、量子コンピューティング・ハードウェア（システム）とサービス（QCaaSを含む）の市場が含まれる。

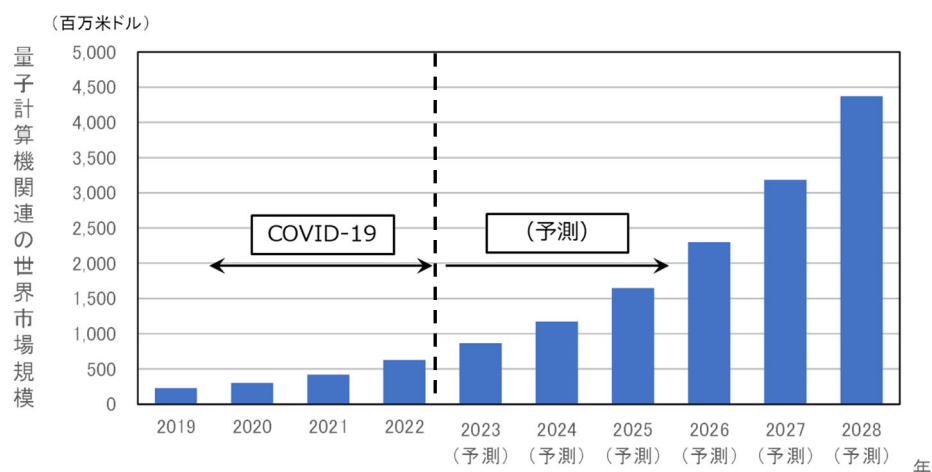
図2-1 量子計算機関連の世界市場成長率推移（金額：百万米ドル）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

量子計算機関連の金額における2019年から2028年までの年次推移を図2-2に示す。

図2-2 量子計算機関連の世界市場規模の年次推移（金額：百万米ドル）



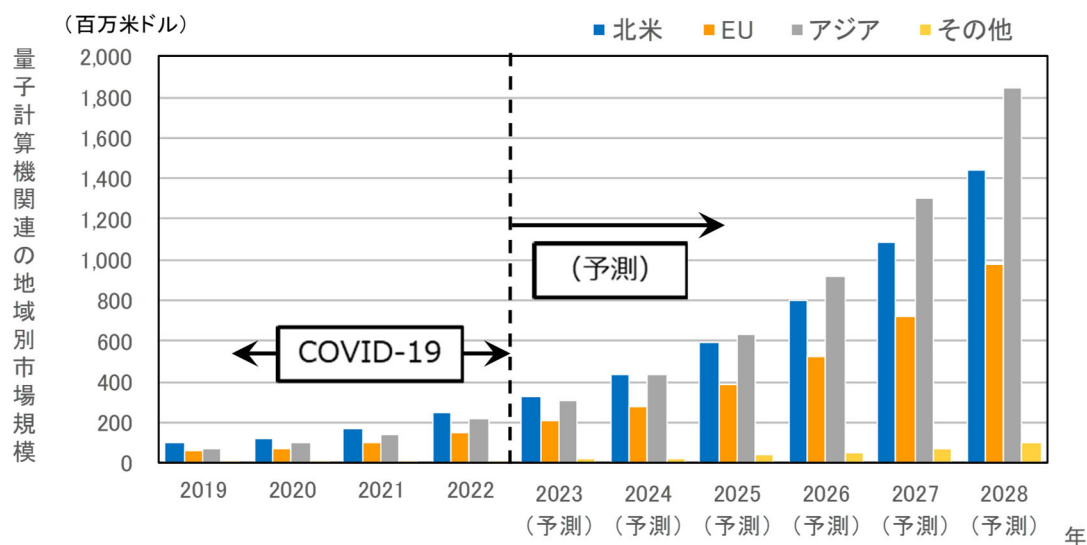
出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

量子計算機関連の世界市場規模の年次推移から、2020年から2022年まで続いたCOVID-19流行の影響はほとんど見られず、順調に成長している様子が見える。量子計算機関連市場は市場成長性が見込まれていることが分かる。

2. 地域別シェア

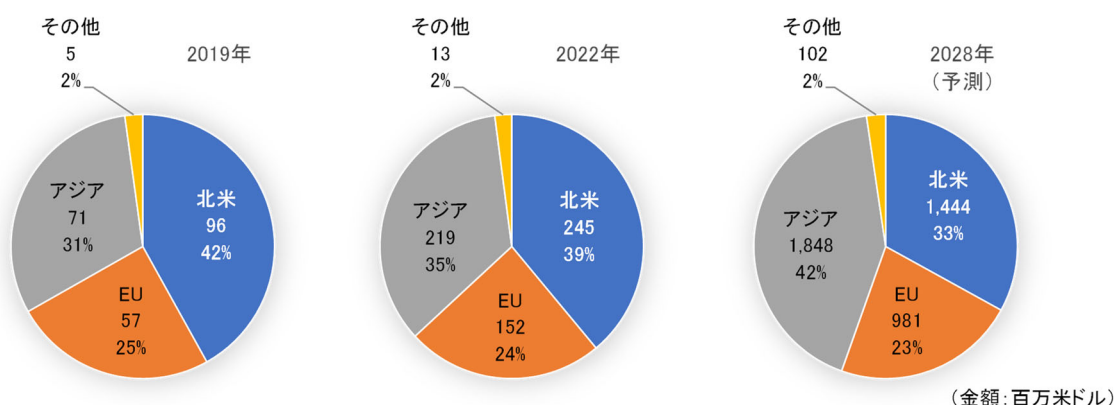
量子計算機関連市場規模の地域別年次推移（金額）を図 2-3 に、量子計算機関連市場規模の地域別シェア（金額）を図 2-4 に示す。

図 2-3 量子計算機関連の地域別市場規模年次推移（金額：百万米ドル）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

図 2-4 量子計算機関連の地域別市場シェア（金額ベース）



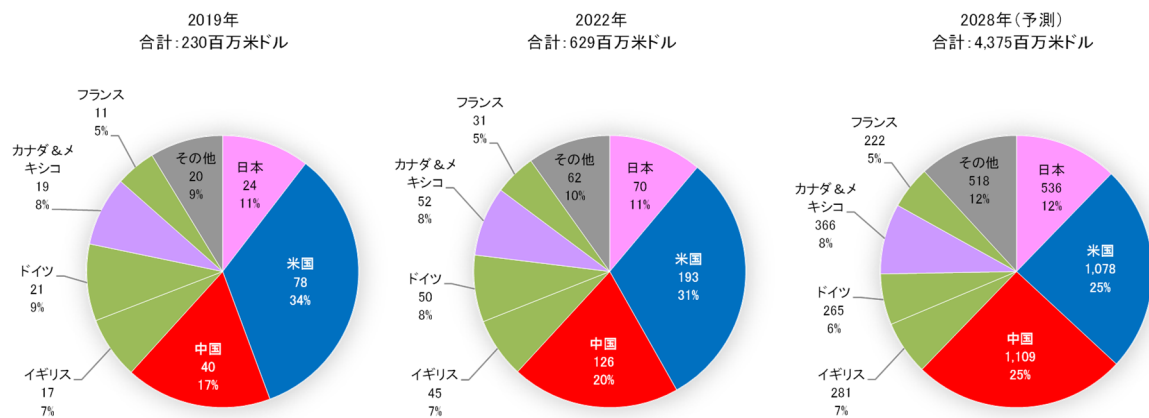
出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

2019年では北米が42%のシェアを占めており、続いてアジアが31%、EUが25%となっている。2022年では北米が39%のシェアを占めており、アジアが35%、EUが24%となった。さらに、2028年では北米が33%、アジアが42%、EUが23%と予想され、アジア市場のシェアが徐々に拡大すると予測されている。

3. 主要国別市場シェア

量子計算機関連市場における主要国別の市場シェア（金額）を図 2-5 に示す。

図 2-5 量子計算機関連市場の主要国別市場シェア（金額ベース）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

2019 年では米国のシェアが 34%で最も高く、次いで、中国が 17%で、日本は 11%であった。2022 年では、米国が 31%、中国が 20%、日本は 11%であった。2028 年の予測では、中国と米国がそれぞれ 25%を占め最も高く、日本は 12%であった。

地域別シェアでは、今後、アジアのシェアが伸びることが予想されていたが、この予想と整合するとおり、主要国別のシェアにおいても中国のシェアの伸びが高く、また、日本も僅かではあるがシェアが高くなっている。地域シェアの伸びが予想されるアジアでは、中国がけん引し、日本も今後は成長する見込みである。また、国内の量子関連市場では、量子計算機や量子材料の市場規模が大きい。

第2節 方式別・応用技術別・応用分野別市場規模の推移／予測及びシェア

量子計算機関連技術では、それを実現する方式、その応用技術、また、量子計算機関連技術を使う応用分野など様々な分野で、新たな探索や研究開発が同時進行している。

ここでいう実現する方式とは、量子計算方式を実現している量子素子を指し、現時点で商業的な市場を形成している量子素子は、ジョセフソン効果を利用した超伝導素子とイオントラップ素子である。また、超伝導素子は、汎用的な量子計算機の実現を目指す超伝導方式と組合せ最適化問題に特化したアニーリング方式に分けることとする。

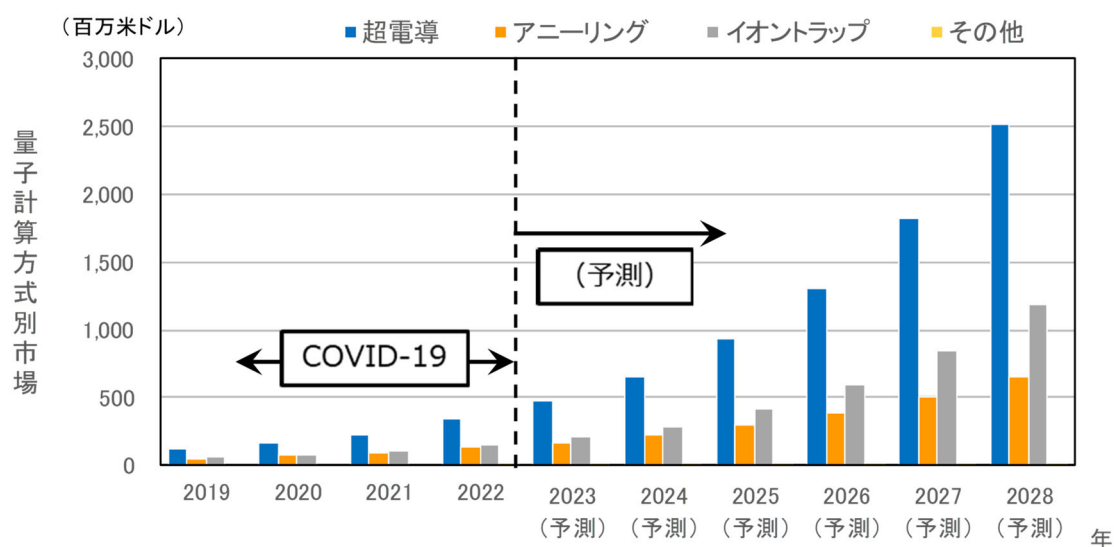
応用技術とは、量子計算機関連技術を用いることで、従来の計算機では達成できない計算、あるいは、特段に効率化される計算を（計算の可能性を有する方法を）指し、具体的には、組合せ最適化問題に代表される最適化、機械学習、シミュレーション等を指すこととする。

応用分野とは、量子計算機関連技術を用いて具体的な課題を解決することを目指している産業分野を指し、軍事・宇宙、金融、医療・医薬品、エネルギー、化学、運輸、政府、学術に分類する。

1. 量子計算方式

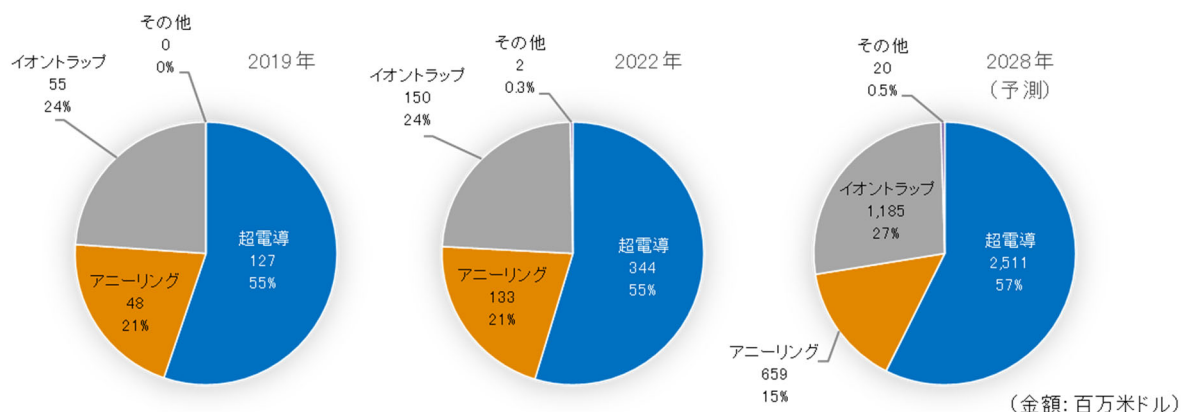
MarketsAndMarkets 社の量子計算方式別市場規模推移（金額）を図 2-6 に、また、そのシェア（金額）の推移（実績および予測）を図 2-7 に示す。

図 2-6 量子計算方式別市場の推移（金額：百万米ドル）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

図 2-7 量子計算方式別シェアの推移（金額ベース）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

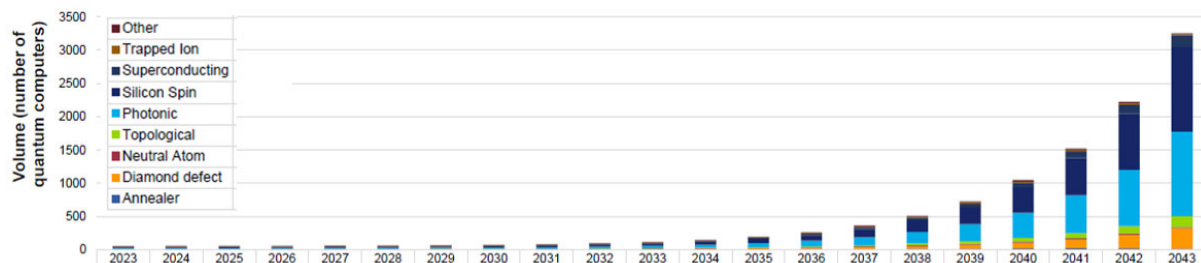
超伝導、アニーリング、イオントラップのいずれも、2019年から2022年にかけて大きく成長しているとともに、2023年から2028年にかけても継続した成長が予測されている。2019年から2022年の市場伸長率と2023年から2028年の市場伸長率（予測）は、図2-1に示した量子計算機関連の世界市場成長率推移とほぼ同じである。

方式別シェアを見ると、2019年では超伝導が55%を占めトップであり、次にイオントラップが24%で、アニーリングは21%であった。その傾向は2022年も変わっていない。ただ、2028年になると、アニーリングのシェアが21%から15%に低下するとともに、イオントラップが24%から27%に伸びると予測されており、今後は、イオントラップ量子素子を用いた量子計算機関連技術が成長するものと予測されている。

なお、量子アニーリングは一般的に、機械学習、ポートフォリオ最適化、ルート最適化などの組合せ最適化問題を解くために使用されるが、当該推移において2022年で最適化市場の60～70%は古典技術（Simulated Annealing）である。

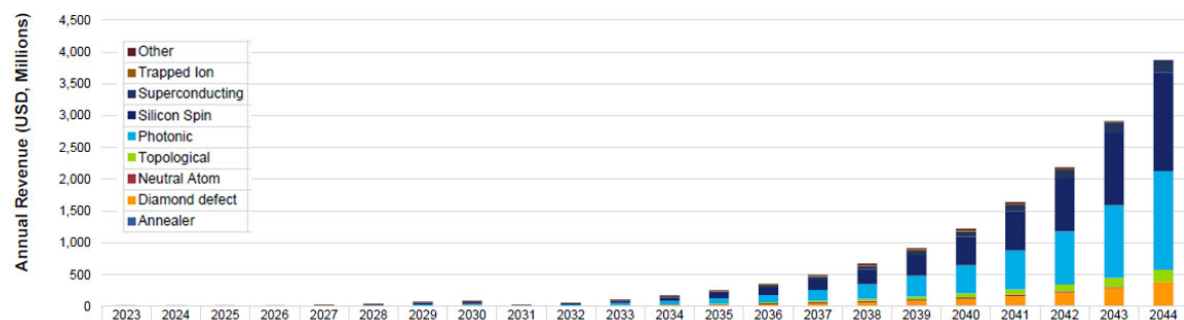
また、IDTechEX社の2023-2043年方式別量子計算機設置台数予測を図2-8に、また、2023-2044年方式別量子コンピューティング・ハードウェアの売上予測を図2-9に示す。

図 2-8 2023-2043 年 方式別量子計算機設置台数予測



出典：IDTechEX Quantum Computing 2023-2043

図 2-9 2023-2044 年 方式別量子コンピューティング・ハードウェアの売上予測



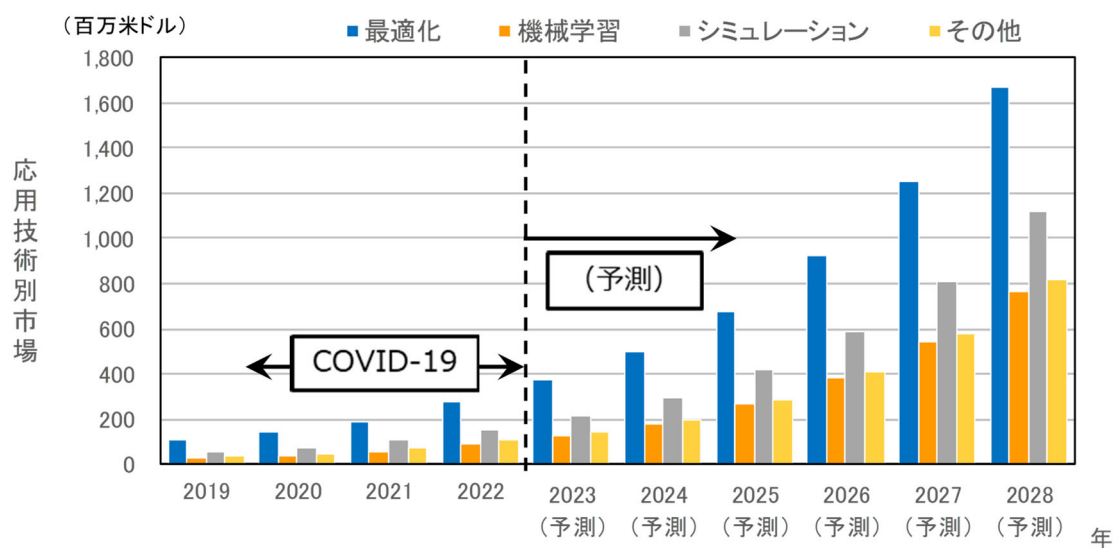
出典：IDTechEX Quantum Computing 2023-2043

2033 年以降で Si スピン方式と光量子方式の伸長が台数でも金額でも顕著となっている。それにダイヤモンド欠陥方式、超伝導方式とトポロジカル方式が続いている。イオントラップ方式や中性原子方式、アニーラー方式は 2035 年以降の伸びは少ない。

2. 応用技術

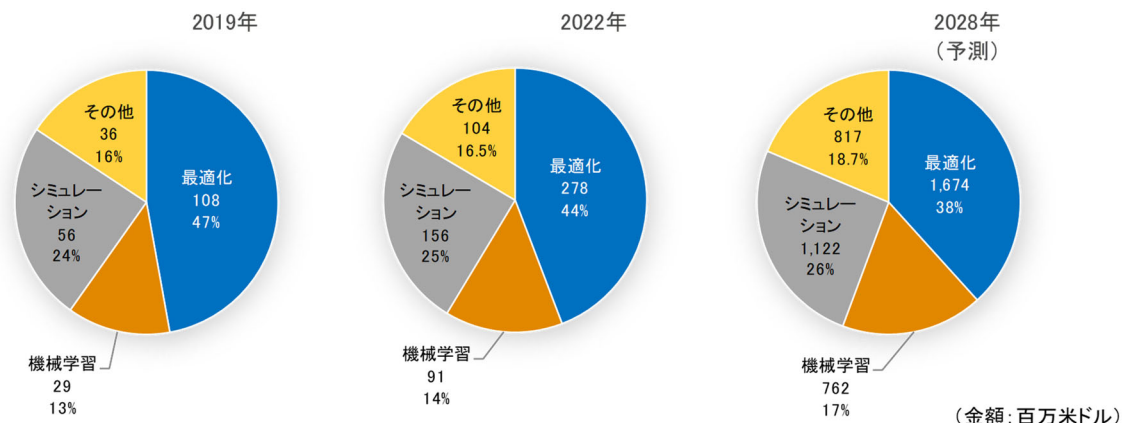
応用技術別市場規模推移（金額）を図 2-10 に、また、そのシェア（金額）の推移を図 2-11 に示す。

図 2-10 応用技術別市場の推移（金額：百万米ドル）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

図 2-11 応用技術別シェアの推移（金額ベース）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

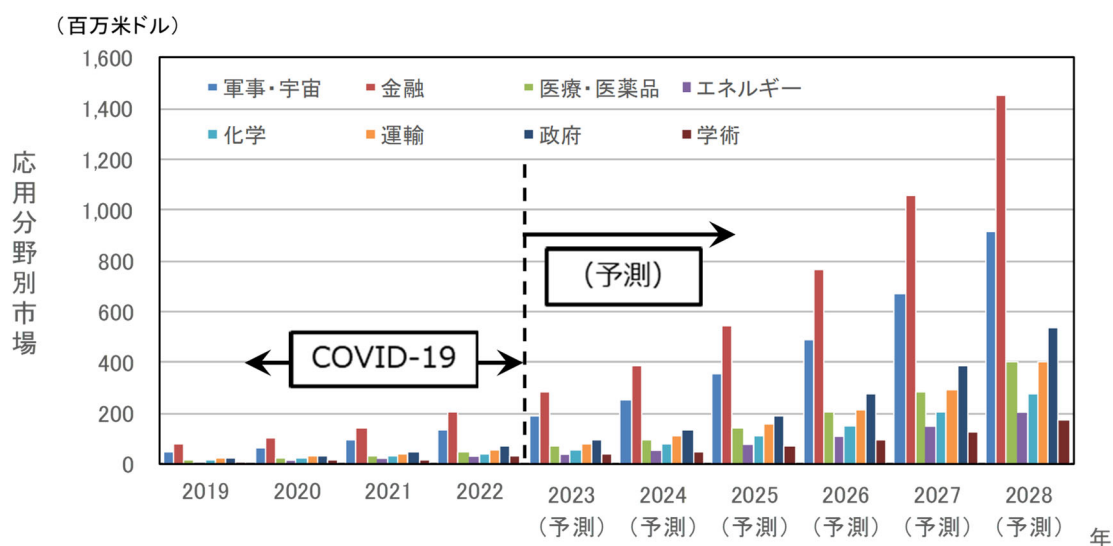
2019 年から 2022 年まで、いずれの応用技術でも市場規模は拡大しているとともに、2023 年から 2028 年にかけてもその傾向は継続するものと見込まれる。

2019 年、2022 年の実績値、および 2028 年の予想値において、最適化応用技術がトップシェアであり、続いてシミュレーション、機械学習技術となっている。また、シェア比率の推移をみると、機械学習が徐々に拡大している。

3. 応用分野

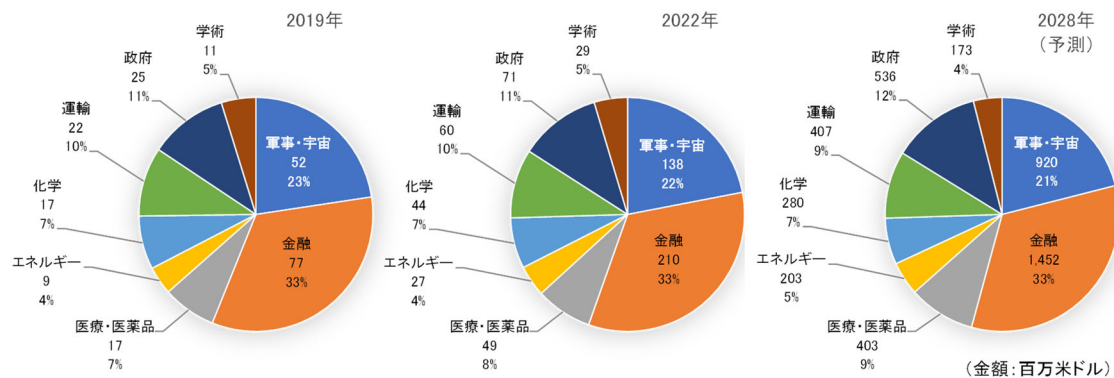
応用分野別市場規模推移（金額）を図 2-12 に、また、そのシェア（金額）の推移を図 2-13 に示す。また、応用分野毎のテクノロジー別シェアの推移を図 2-14 に示す。

図 2-12 応用分野別市場規模推移（金額：百万米ドル）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

図 2-13 応用分野別の市場シェアの推移（金額ベース）

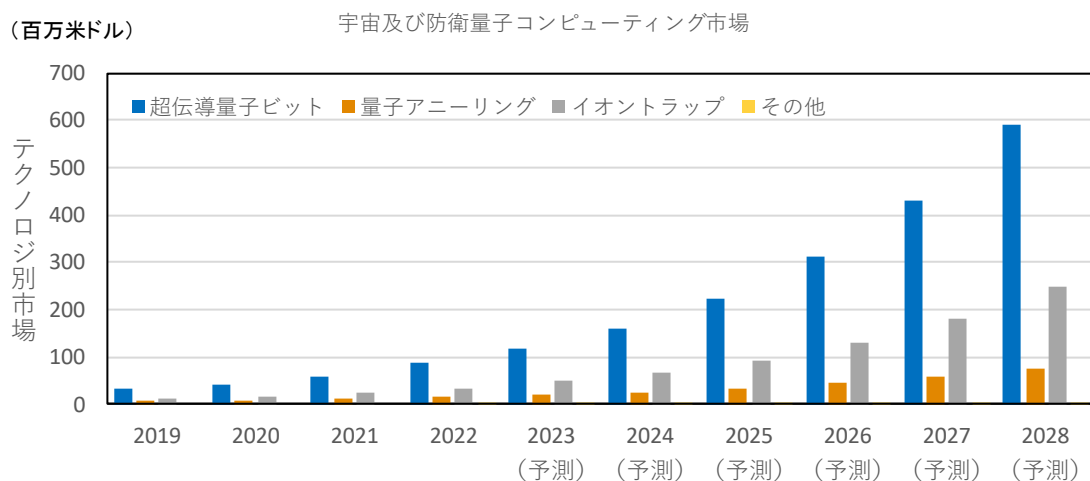


出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

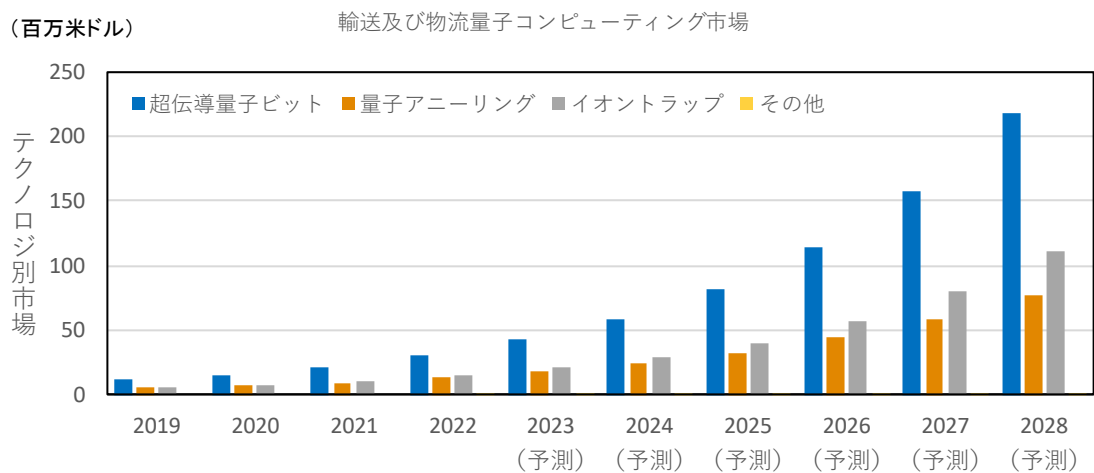
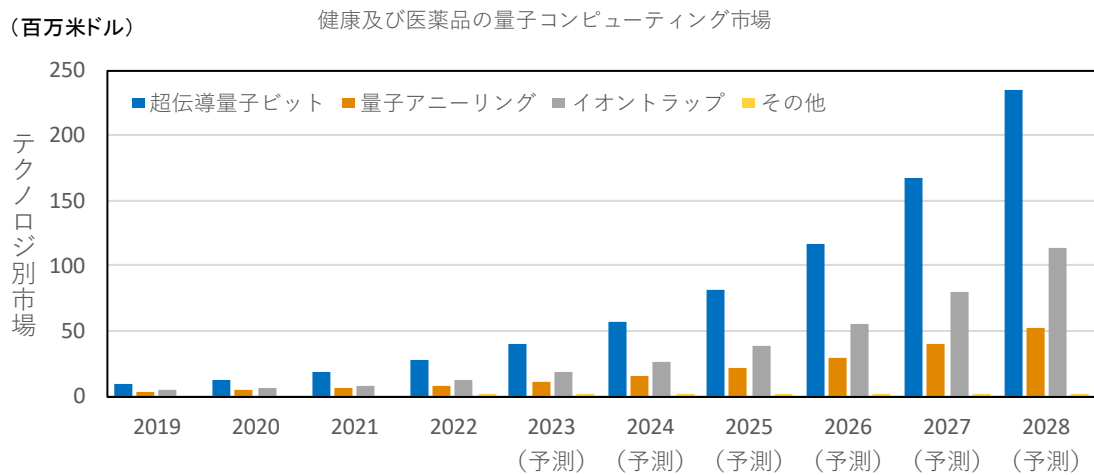
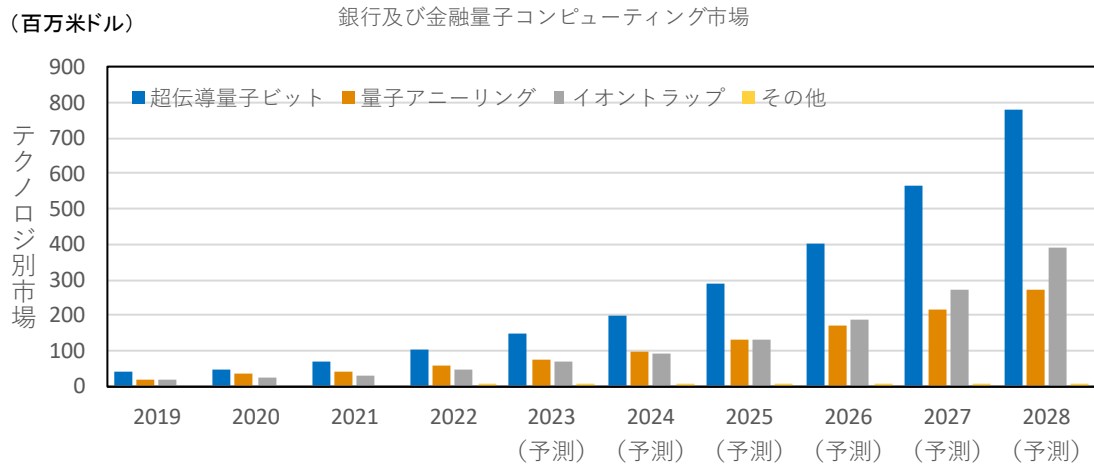
2019 年から 2022 年まで、いずれの応用分野市場も、規模は拡大しているとともに、2023 年から 2028 年にかけてもその傾向は継続するものと見込まれる。

2019 年、2022 年の実績値、および 2028 年の予想値において、その市場シェアの比率に大きな変化は見られない。

図 2-14 応用分野ごとのテクノロジー別シェアの推移（金額ベース）



(続き)



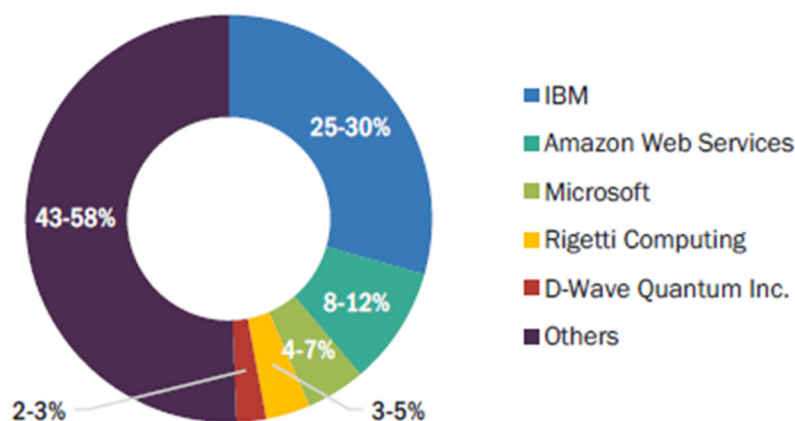
出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028 (Customization)」
を基に調査会社が作成

2019 年から 2022 年までは、いずれの応用分野市場においても市場規模が小さく、超伝導量子ビット、量子アニーリングとイオントラップ方式の差はさほど大きくない。しかし、2023 年から 2028 年にかけての成長では超伝導量子ビットが特に大きくなっている。イオントラップ方式と量子アニーリングがそれに続いているが、健康および医薬品分野での量子アニーリングの伸びがやや小さくなっている。

4. 企業別シェア

2020 年の量子計算機関連市場の企業別シェア（金額ベース）を図 2-15 に、企業ランキングを表 2-1 に示す。

図 2-15 量子計算機関連市場の企業別シェア（2020 年：金額ベース）



出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」

表 2-1 量子計算機関連市場の企業ランキング（2020 年：金額ベース）

企業名	市場シェア
IBM	25-30%
Amazon Web Services	8-12%
Microsoft	4-7%
Rigetti Computing	3-5%
D-Wave Quantum Inc.	2-3%
Others	43-58%

出典：MarketsAndMarkets 「Quantum Computing Market - GLOBAL FORECAST TO 2028」を基に調査会社が作成

2020 年では IBM（米国）が 25-30%でトップ、次いで Amazon Web Services（米国）が 8-12%、Microsoft（米国）が 4-7%、Rigetti Computing（米国）が 3-5%、D-Wave Quantum Inc.（D-Wave Systems）（カナダ）が 2-3%と続いており、TOP5 は全て北米の企業が占めている。

日本では、中性原子方式において、自然科学研究機構 分子科学研究所 大森賢治教授のグループが単一原子レベルで世界最速の 2 量子ビットゲートに成功した。この研究開発により中性原子方式は、将来 10,000 量子ビットの大規模集積化を可能とし、超伝導量子ビットよりもコヒーレンス時間が桁違いに長いこと等から、一躍、世界から注目を集める誤り耐性汎用計算機プラットフォームとなっている。

第3章 政策動向調査

第1節 日本の政策動向

量子計算機関連技術及びその応用産業の分野について、府省にまたがった取組を以下に紹介する。

内閣府の統合イノベーション戦略推進会議の量子技術イノベーション戦略最終報告では、

「政府では、第5期「科学技術基本計画」（2016年度）や「統合イノベーション戦略」（平成30年度）において、初めて光・量子技術を重要技術として位置づけたものの、現状では関係府省や企業が、それぞれ個別に研究開発等の取組を始めた段階にあり、必ずしも整合性のある十分な取組が行われてはいない。このままでは、我が国は量子技術の発展において諸外国に大きな後れを取り、将来の国の成長・発展や国民の安全・安心の基盤が脅かされかねない状況にあることを強く認識する必要がある。

このため、国として将来の産業・ビジネス構造の変化等を見据え、目指すべき社会像を明確に設定した上で、その実現に向けて、短期的な技術開発にとどまらず、産業・イノベーションまでを念頭に置き、かつ10～20年の中長期的な視点に立った新たな国家戦略として、この「量子技術イノベーション戦略」を策定する。」

とある。

この日本の量子技術に関する国家的な戦略策定を経て、2022年6月7日には令和4年第8回経済財政諮問会議・第9回新しい資本主義実現会議の合同会議が開催された。この中で、新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画（案）、経済財政運営と改革の基本方針2022（案）について議論が行われ、閣議決定された。新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画では、「量子計算機の大規模化・高機能化の研究開発については、半導体やBeyond 5G等の他の技術分野との融合やこれを応用する分野の研究も視野に入れた上で、日本単独で考えるのではなく、先行する有志国の企業との連携を実施するなどグローバルな対応を進める¹」としている¹。「新しい資本主義に向けた計画的な重点投資（科学技術・イノベーションへの重点的投資）の一例」を図3-1に示す。

1 内閣官房 新しい資本主義実現本部／新しい資本主義実現会議、「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画～人・技術・スタートアップへの投資の実現～」
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/atarashii_sihonsyugi/pdf/ap2022.pdf

図 3-1 新しい資本主義に向けた計画的な重点投資（科学技術・イノベーションへの重点的投資）の一例

Ⅲ. 新しい資本主義に向けた計画的な重点投資

2. 科学技術・イノベーションへの重点的投資

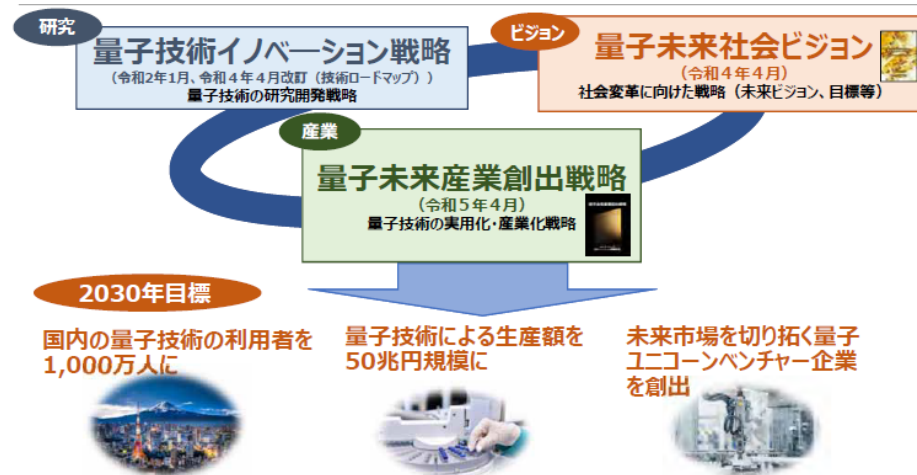
2022年度		2023年度	2024年度	2025～2027年度
今夏	年末			
予算編成 税制改正要望	秋～年末	通常国会		
科学技術・イノベーションへの重点的投資				官民研究開発投資120兆円の実現 (2025年)
夏～冬 民間企業の研究開発投資を促進するための税制の在り方について検討し、12月に結論を得る				
量子技術				
「量子未来社会ビジョン」に基づいて、計画的に取組を実施				
理化学研究所のヘッドクォーター機能の技術的な強化 世界先端の量子マテリアルの研究開発・供給を担う量子機能創製拠点をQSTに整備 産業界にとって価値のあるソリューション研究開発支援等を担う量子ソリューション拠点（仮称）を東北大学に整備		拠点を中核とした産学官の連携強化（共同研究開発、人材育成等）		
産業界へ総合的な支援を担う新たなグローバル連携拠点を産業技術総合研究所に整備		グローバル連携拠点活動の本格化、有志国とも連携して量子技術を活用した事業化推進と新市場創出等を推進		
2022年度内に国産量子コンピュータの初号機を整備		量子コンピュータの大規模化・高機能化に向けた研究開発、幅広い分野での実証、量子・古典ハイブリッドコンピューティング利用環境の提供		
量子コンピュータ、量子ソフトウェア、量子セキュリティ、量子ネットワーク、量子計測・センシング／量子マテリアル等の研究開発を強力に推進				
量子状態を維持した通信を可能とする量子通信基盤としての量子インターネットの要素技術の研究開発				
量子技術を活用した新産業やスタートアップ企業の創出・活性化、リカレント教育、異分野とも連携した教育、アウトリーチ活動等を通じた産学の人材育成・確保				
次世代半導体の設計・製造能力の確保に向けた国際共同研究の実施				
次世代半導体の製造能力の確保				

出典：内閣官房 新しい資本主義実現本部／新しい資本主義実現会議、「新しい資本主義実行計画工程表」
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/atarashii_sihonsyugi/pdf/apkoutetihyou2022.pdf

この新しい資本主義に向けた計画的な重点投資（科学技術・イノベーションへの重点的投資）において、量子技術については「量子未来社会ビジョン」に基づいて、計画的に取組を実施するとある。量子未来社会ビジョン（2022 年年 4 月）とは、研究開発（技術ロードマップ等）や量子拠点整備等の量子技術の研究開発を定めた量子技術イノベーション戦略（2020 年 1 月）に続き、量子技術による成長機会創出や社会課題解決等の量子技術による社会変革を定め、生産性革命など産業の成長機会の創出やカーボンニュートラル等の社会課題の解決のために量子技術を活用し、社会全体のトランスフォーメーションを実現していくため、量子技術により目指すべき未来社会ビジョンやその実現に向けた戦略である。

量子未来社会ビジョンで示された量子技術によって実現すべきビジョンや目標を実現するための量子技術の実用化・産業化に向けて、重点的・優先的に取り組むべき取組を取りまとめたものが「量子未来産業創出戦略」（2023 年 4 月）である。これら研究の視点の「量子技術イノベーション戦略」、ビジョンの視点の「量子未来社会ビジョン」、産業の視点の「量子未来産業創出戦略」の枠組みを図 3-2 に示す。

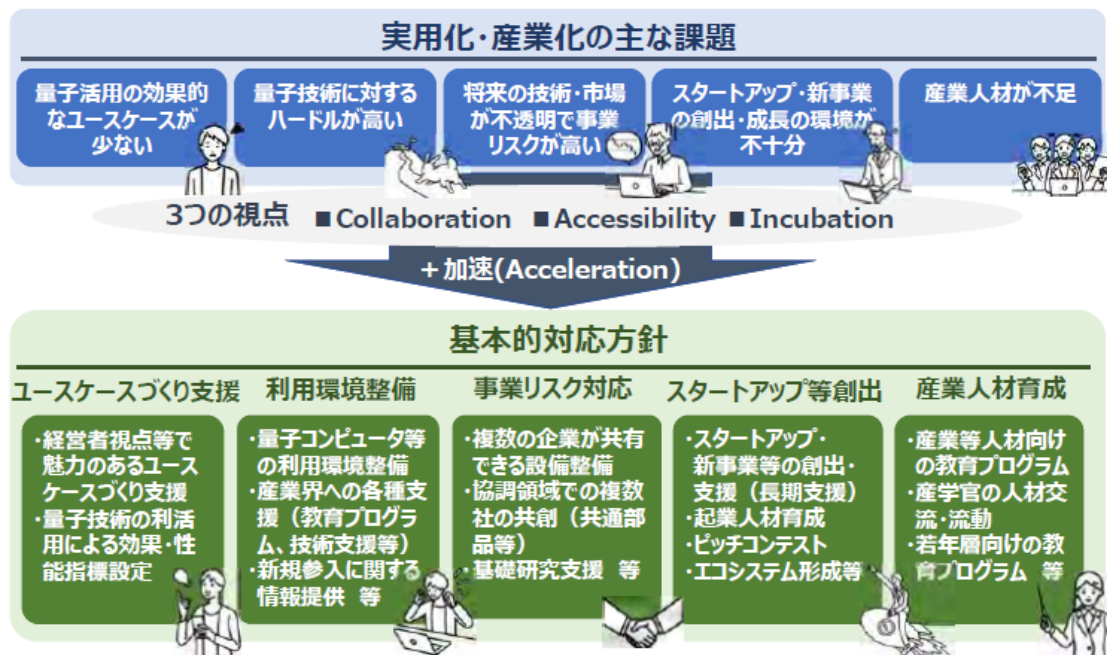
図 3-2 研究、ビジョン、産業の視点に立った戦略の枠組み



出典：内閣府 量子技術イノベーション 量子未来産業創出戦略、
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai_gaiyo.pdf

量子未来産業創出戦略では、目指すべき産業の方向性として量子技術の実用化・産業化の3つの視点を定めている。「多様な産業の量子分野への参画・協働・共創、グローバル連携、産学官連携」を図る「Collaboration」の視点、「産業界に開かれた量子技術の利用環境の実現」を図る「Accessibility」の視点、「積極的なスタートアップ／ベンチャー・新事業の創出支援」を図る「Incubation」の視点である。これらの視点から見た実用化・産業化の主な課題と、それに対する基本的対応方針が設定されている。基本的対応方針を図 3-3 に示す。

図 3-3 量子未来産業創出戦略における基本的対応方針



出典：内閣府 量子技術イノベーション 量子未来産業創出戦略、
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai_gaiyo.pdf

量子計算機関連技術に関する量子未来産業創出戦略での取組としては、大きく（１）量子計算機（ソフトウェア、利用環境整備等）と（２）量子計算機（ハード、基盤技術）があげられている。

量子計算機（ソフトウェア、利用環境整備等）では、「ユーザー産業の創出と振興」、「ソフトウェア産業の振興」、「ソフトウェア開発のための量子計算機利用環境の整備」の取組がある。具体的には、以下に示す３点の取組である²。

- （a）多くのユーザー企業の参画の下での訴求力のある魅力的なユースケースづくりを支援し、ユーザー産業の拡大・振興を図る。さらに、経営視点や ESG 視点などユーザー企業視点での量子技術利用の性能・効果指標（性能、コスト、利便性、低炭素化等）の検討を進め、経営者・投資家がこれらの指標を経営・投資に活用できる仕組みの構築に向けて検討する。
- （b）ユーザーが量子・古典ハイブリッド計算環境を容易に利用できる環境（アプリケーションやミドルウェア、開発環境等）の整備・提供を進めるとともに、これを通じたソフトウェア・利用支援サービス事業者の育成・振興を図る。
- （c）国産実機を産学官で多様な用途で活用していくとともに、国内外の量子計算機と従来型（古典）計算機と連携して、産業化をリードする実利用環境構築、産業・科学のフロンティアを開拓する最先端の量子・古典ハイブリッド計算環境を構築・提供する。

量子計算機（ハード、基盤技術）では、「量子計算機（ゲート方式）」、「量子計算機（アニーリング方式）」、「共通基盤技術」への取組がある。具体的には、以下に示す４点の取組である³。

- （a）量子計算機（ゲート方式）の技術方式として先行する超伝導型については技術開発・事業化を強化・加速する。さらに、運用の経験・ノウハウ蓄積やその担い手となる人材を育成していくとともに、運用等の結果をハード開発にフィードバックできる仕組みを構築する。その他の方式（イオントラップ、光、シリコン、原子等の各方式）については、スタートアップ企業を含む民間企業の参画・活動の促進に努める。
- （b）量子計算機（アニーリング）については、性能面での定量的な優位性を明確化し、早期の実機実証を進めるとともに、HPC やシミュレーテッド・アニーリングマシンなど多様なコンピュータ資源と一体的に運用し、産業利用をリードする実利用計算環境として活用することで、産業利用において競争優位性の向上を図る。
- （c）安定的かつ強靱なサプライチェーンの構築のため、有志国とも連携して、将来の量子計算機システムに必要な装置、部品・材料等の特定と技術内容の明確化を行い、その担い手となる中小企業を含む企業の参画を促進する。併せて、我が国の産業が強みを発揮できる優先すべき技術分野や、これも踏まえてチョークポイントとなる技術分野を特定し、これら技術分野の装置、部品・材料等や必要な技術の確保・高度化を図っていく。

2 量子未来産業創出戦略

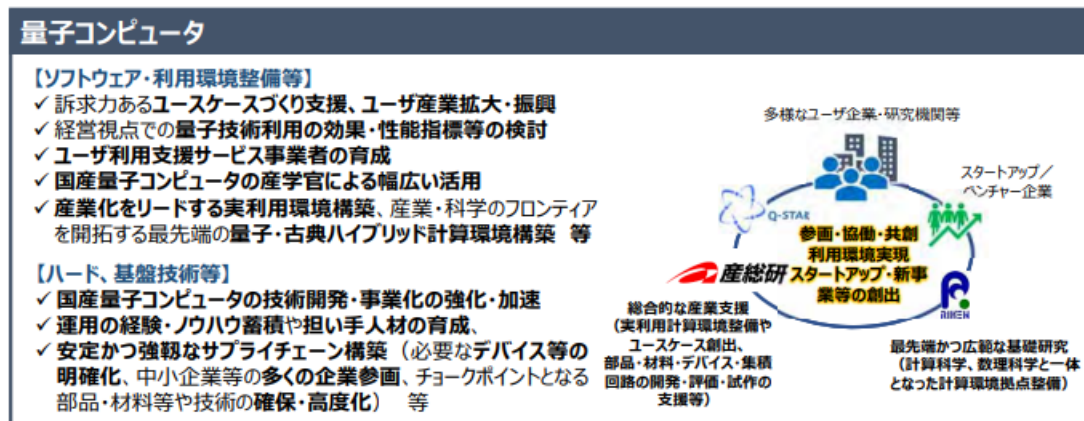
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai.pdf

3 量子未来産業創出戦略

https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai.pdf

(d) 量子チップ等の要素技術の基礎研究や、大規模化に向けた試作・試験・評価等プロセスにおいて、民間企業の活動を支援できるような環境づくりを進めていく。これら「量子未来産業創出戦略における量子計算機の実用化・産業化に向けた取組」を図 3-4 に示す。

図 3-4 量子未来産業創出戦略における量子計算機の実用化・産業化に向けた取組



出典：内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局 量子未来産業創出戦略概要、
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai_gaiyo.pdf

ここでは、ハードウェア・基盤技術等とともに、ソフトウェアの重要性が強調されている。また、イノベーション基盤への取組の1つとしてあげられている、「量子技術イノベーション拠点の強化等の取組」を図 3-5 に示す。

図 3-5 量子技術イノベーション拠点の強化等の取組



出典：内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局 量子未来産業創出戦略概要、
https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai_gaiyo.pdf

2023年9月21日に開催された第16回量子技術イノベーション会議（イノベーション政策強化推進のための有識者会議「量子技術イノベーション」）において、内閣府は、国際競争の激化などを踏まえ量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略「量子未来社会ビジョン」（2022年4月策定）に基づき、量子計算機をはじめとする各技術分野（量子技術横断、量子計算機、量子ソフトウェア、量子セキュリティ・ネットワーク、量子計測・センシング等）の取組及びイノベーション創出のための基盤的取組（スタートアップ企業の創出・活性化／人材の育成・確保、アウトリーチ活動／量子拠点の体制強化／国際連携・産学官連携／経済安全保障等）を強力に推進するとしている。

同会議で使用された資料の中から「量子未来社会ビジョンの実現に向けた内閣府の取組」を図3-6に示す。この資料の中では、内閣府として推進する、

- ① 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）
- ② 研究開発と Society 5.0 との橋渡しプログラム（BRIDGE）
- ③ ムーンショット型研究開発制度
- ④ 経済安全保障重要技術育成プログラム

の具体的施策について詳述している。

図 3-6 量子未来社会ビジョンの実現に向けた内閣府の取組



出典：内閣府内閣府の取り組み令和5年9月21日

<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/16kai/siryo3-1.pdf>

第2節 米国の政策動向

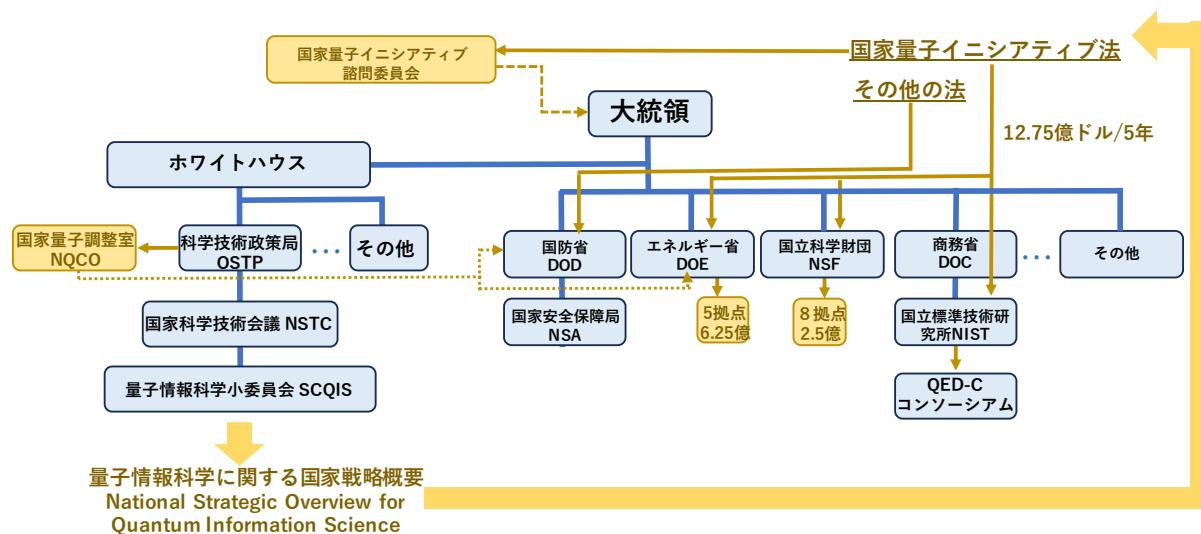
2018年9月に大統領府科学技術政策局（OSTP⁴）下の国家科学技術会議（NSTC⁵）が公表した報告書「量子情報科学国家戦略概要」の中で、量子情報科学に関する政策について、

- ① 科学を第一に置くアプローチをとること
- ② 量子情報科学分野の人材の育成に取り組むこと
- ③ 量子情報科学に関連する産業との関係を強化すること
- ④ 重要なインフラ（技術・設備等）を提供すること
- ⑤ 国家安全保障と経済成長を維持すること
- ⑥ 国際協力を進めること

を提言している⁶。

2018年12月には、量子計算機を含む量子技術41分野において、米国が持続的なリーダーシップを確保することを目的とする「国家量子イニシアチブ法（H.R.6227）⁷」が成立した。これにより、国家量子イニシアチブプログラム実施のための10か年計画策定が義務化されたほか、量子情報科学小委員会⁸及び国家量子イニシアチブ諮問委員会⁹が設置されることとなった。「米国における量子情報関係の政府機関」を図3-7に示す。

図3-7 米国における量子情報関係の政府機関



出典：調査会社が作成

国家量子調整室（NQCO）は、H. R. 6227 によって設置が義務化され科学技術政策局（OSTP）が設立したもので、量子研究開発に関する政策調整を担う目的がある。量子情報科学小

4 OSTP: Office of Science and Technology Policy

5 NSTC: National Science and Technology Council

6 National Science and Technology Council, “National Strategic Overview for Quantum Information Science”, September 2018. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf%3E>

7 National Quantum Initiative Act, P.L. 115-368. <https://www.congress.gov/115/bills/hr6227/BILLS-115hr6227enr.pdf>

8 量子情報科学小委員会：国家量子イニシアチブプログラムの調整を担う。

9 国家量子イニシアチブ諮問委員会：量子情報科学小委員会及び大統領に勧告を行う。

委員会（SCQIS）は、量子情報科学および技術研究、国際標準の開発および利用に関する情報共有、連邦機関の教育活動およびプログラムの調整等を責務とする。国家量子イニシアチブ諮問委員会は、産業界、大学、連邦研究所の代表により構成され、プログラムの見直し等について大統領に勧告を行う。また、具体的な政策は、エネルギー省（DOE）が基礎研究を行う「国家量子情報科学研究センタ（National Quantum Information Science Research Centers）」を設置、国家科学財団（NSF）が研究・教育活動を行う「量子研究教育総合センタ（NSF multidisciplinary centers for quantum research and education）」を設置、商務省配下の国立標準技術研究所（NIST）が量子技術産業を育成するための量子コンソーシアム（Quantum Economic Development Consortium（QED-C））を立ち上げるなどがある¹⁰。QED-C は、NIST がサポートする中で非営利団体 SRI International 主導で立ち上げられた。米国の量子計算機関連政策の特徴としては、早期に法案を成立させ、QED-C のようなコンソーシアムを立ち上げたところにある。QED-C の設立と各国・地域での同様なコンソーシアムの設立時期を図 3-8 に示す。

図 3-8 各国・地域の量子計算機関連コンソーシアムの設立時期



出典：内閣府 量子技術イノベーション会議 第9回、
<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/9kai/siryo4-1.pdf>

量子計算機開発に関するさまざまな産業のサプライチェーンを確立し、互いの連携をスムーズにしながら全体として量子計算機の実現を早期に目指すことが、QED-C の目的である。NIST、DOE、NSF、DARPA などの政府機関と、Amazon、Boeing、City グループ、Google、GE、IBM、Intel 等の民間企業やカリフォルニア工科大学、ジョージア工科大学が参加している。

また、DOE と NSF は、政府関連研究機関と約 50 に及ぶ大学との連携を目的とした重層的な研究開発体制を構築した。政府機関と大学との研究開発体制を図 3-9 に示す。

10 https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12213089_po_20210605.pdf?contentNo=1

The diagram illustrates a network of research centers and their interconnections, categorized by funding source:

- NSFによる研究センター (Yellow background):** CQN UArizona, Q-SENSE CU Boulder, UDelaware, UOregon, New Mexico, Howard, UMassachusetts, Colorado School of Mines, Temple, Yale, Tufts, USherbrooke, UTexas, CIQC UC Berkeley, UCLA, USC, Purdue, UTennessee, Duke, RQS U Maryland, Caltech, MIT, Harvard, QFoundry UCSB, QNEXT, QUBB UChicago, PennsylvaniSU, UIllinoisChicago, ChicagoSU, UWisconsin, Cornell, SUNY, Virginia Tech, UWashingon, Princeton, Illinois Institute of Technology, Johns Hopkins, Columbia, Stanford, MonArk Ofoundry MontanaSU, CCNY, Northwestern, QN NEXT, QUBB UChicago, PennsylvaniSU, UIllinoisChicago, ChicagoSU, UWisconsin, Cornell, SUNY, Virginia Tech, UWashingon, Princeton, Illinois Institute of Technology, Johns Hopkins, Columbia, Stanford, MonArk Ofoundry MontanaSU, CCNY, Northwestern.
- DOEによる研究センター (Green background):** C2QA, QSC, QSA.
- Other Centers (Blue background):** SQMS, Q-SENSE CU Boulder, QN NEXT, QUBB UChicago, PennsylvaniSU, UIllinoisChicago, ChicagoSU, UWisconsin, Cornell, SUNY, Virginia Tech, UWashingon, Princeton, Illinois Institute of Technology, Johns Hopkins, Columbia, Stanford, MonArk Ofoundry MontanaSU, CCNY, Northwestern, QN NEXT, QUBB UChicago, PennsylvaniSU, UIllinoisChicago, ChicagoSU, UWisconsin, Cornell, SUNY, Virginia Tech, UWashingon, Princeton, Illinois Institute of Technology, Johns Hopkins, Columbia, Stanford, MonArk Ofoundry MontanaSU, CCNY, Northwestern.

Connections are shown as lines between nodes, indicating collaborative research efforts across different funding sources and institutions.

また、米国国立標準技術研究所が量子技術産業を育成するためコンソーシアムを立ち上げ、「量子研究教育総合センタ¹¹⁾」及び「国家量子情報科学研究センタ¹²⁾」の設置が定められ、これらの活動のために、5年間で最大13億ドル規模の投資が行われることになった。2019年度に量子技術研究開発のために連邦予算から拠出された約4億5,000万ドルのうち、約1億ドルが量子計算機に関するものである¹³⁾。

① Chicago Quantum Exchange (CQE)

② 量子経済開発コンソーシアム (QED-C)

③ Center for Quantum Networks (CQN)

④ Next Generation Quantum Science and Engineering (Q-NEXT)

このように、米国での量子計算機関連の技術政策は、官民一体となったエコシステムの早期立ち上げに特徴がある。

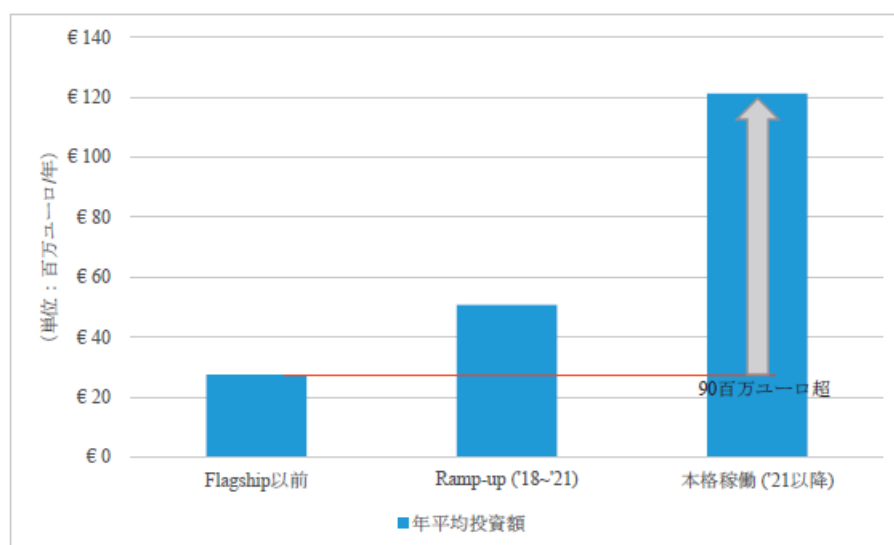
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11643171_po_1139.pdf?contentNo=1

第3節 欧州の政策動向

1. EU

2016年5月に発表された量子技術の研究開発戦略「Quantum Manifesto」に関し、EU加盟国や欧州委員会に対して10億ユーロ規模の研究開発プログラムの立ち上げが求められた。これに対し、欧州委員会は「Horizon 2020」の一部として量子技術に関する大型の研究開発プログラム「Quantum Flagship」を始動し、10年間で10億ユーロが拠出されることとなり、量子計算機、量子シミュレーション、量子通信、量子計測・センシング、これらを補完する基礎量子科学の5領域を対象に支援が行われている。2018年10月時点で合わせて20のプロジェクトが立ち上げられ、3年間で最大1,000万ユーロの資金が注入される。EUにおけるQuantum Technology Flagshipでの投資を図3-10に示す。また、Quantum Flagshipでの具体的なプロジェクト例を表3-1に示す。これらは、「国立国会図書館 2022年3月 量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 第4章 世界各国の政策¹⁴」をもとに、それぞれの研究拠点に関する公開情報を調査したものである。

図3-10 EUにおけるQuantum Technology Flagshipでの投資



出典：国立国会図書館 2022年3月 量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 第4章 世界各国の政策、
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12213089_po_20210605.pdf?contentNo=1

14 https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12213089_po_20210605.pdf?contentNo=1

表 3-1 Quantum Flagship でのプロジェクト例

プロジェクト略称	プロジェクト名称	投資額(€)	Coordinator	参加機関国	技術概要	URL
OpenSuperQ	An Open Superconducting Quantum Computer	10,334,392	FORSCHUNG SZENTRUM JULICH GMBH (Germany)	Finland, Sweden, Spain, Switzerland	100 量子ビット以上からなるフルスタックの超伝導量子計算機の研究開発をする	https://cordis.europa.eu/project/id/820363
AQTION	Advanced quantum computing with trapped ions	9,588,000	UNIVERSITÄT INNSBRUCK (Austria)	United Kingdom, Germany, France, Switzerland, Spain	全結合可能な 50 量子ビットからなるイオントラップ量子計算機を産業利用できるように研究開発する	https://cordis.europa.eu/project/id/820495
MicroQC	Microwave driven ion trap quantum computing	2,363,343	FOUNDATION FOR THEORETICAL AND COMPUTATIONAL PHYSICS AND ASTROPHYSICS (Bulgaria)	Germany, United Kingdom	複数の量子ビットからなるイオントラップをマイクロ波技術で実現する	https://cordis.europa.eu/project/id/820314
PhoG	Sub-Poissonian Photon Gun by Coherent Diffusive Photonics	2,761,866	THE UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY OF ST ANDREWS (United Kingdom)	Belarus, Germany, Switzerland	集積化された導波路を使ったコンパクト、多用途で決定論的な光量子光源を研究開発する	https://cordis.europa.eu/project/id/820365
2D-SIPC	Two-dimensional quantum materials and devices for scalable integrated photonic circuits	2,976,812	FUNDACIO INSTITUT DE CIENCIES FOTONIQUES (Spain)	United Kingdom, Netherlands, Italy	2 次元の光源、光検出器、光スイッチを集積化することで、半導体チップでは実現できない、処理速度、G23 低消費電力、集積度を達成する	https://cordis.europa.eu/project/id/820378
SQUARE	Scalable Rare Earth Ion Quantum Computing Nodes	2,990,277	KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (Germany)	Sweden, Denmark, France, Spain	希土類イオンは、長時間の量子状態を維持し、固体状の結晶中において光により活性化でき、スケールアップな量子ビットの可能性を有しており、これらの研究開発を中心的に進める	https://cordis.europa.eu/project/id/820391
QLSI	Silicon spin qubits could bring practical quantum computers a step closer	14,916,158	COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (France)	Denmark, United Kingdom, Netherlands, Belgium, France, Germany, Switzerland	既存の半導体製造技術を使って 16 量子ビットからなる Si スピン量子計算機を実現する	https://cordis.europa.eu/project/id/951852
FRESNEL	Industrial-scale quantum computing as a cloud-based service is on the horizon	3,564,375	PASQAL (France)	France	Pasqal 社の推進するプロジェクトで、300 量子ビットからなる中性原子方式の量子計算機でクラウドベースのサービスを 2024 年を目標に開始するプロジェクトである	https://cordis.europa.eu/project/id/968614
PaSQuaS	Building advanced platforms for quantum simulations	9,659,515	MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTEN EV (Germany)	Germany	リュードベリ状態にある 50 の中性原子を使った量子シミュレータであり、これに 20 個からなるイオンを加えている	https://cordis.europa.eu/project/id/817482
EuRyQa	A scalable route to quantum computers based on Rydberg atoms	4,970,860	UNIVERSITÉ DE STRASBOURG (France)	France	2022 年に開始された Horizon EUROPE のプロジェクトで、冷却されたリュードベリ状態の中性原子を使い 100~1000 個の量子ビットからなるシステムを目指している	https://cordis.europa.eu/project/id/101070144

2023 年 4 月 19 日と 20 日に、プラハでキックオフミーティングが開催され Qu-Test および Qu-Pilot プロジェクトが開始された¹⁵。これらのプロジェクトは、ヨーロッパにおける量子計算、量子通信、量子センシングにおける量子技術の実験生産および公開テストで量子サプライチェーンの中小企業をサポートすることにより、計測学、イメージング、安全な通信、および非常に複雑な計算の分野で新たなアプリケーションを開拓する。

Qu-Pilot では、ヨーロッパの既存のインフラストラクチャを相互にリンクし、量子テクノロジーのための初のヨーロッパ連合製造施設を開発し、アクセスを提供することを目指している。

Qu-Test のネットワークは、独立した第三者としてのテストベッドネットワークによる量子デバイス、チップ、コンポーネント、システムの検証を通じて、信頼できるサプライチェーンの構築をサポートする。

どちらのプロジェクトも産業界のニーズに応え、公募を通じて産業界をサポートすることを目的としており、これにより量子競争における EU の地位を高めることができる。10 か国から 40 のパートナーが参画し、予算 3,800 万ユーロのエコシステムプラットフォームのパイロット製造・評価施設の基盤整備と実験のプロジェクトである。

2. 英国

工学物理科学研究会議¹⁶ (EPSRC) は、2014 年からの 5 年間で 2 億 7,000 万ポンドを投資する量子技術分野の研究開発プログラム「UKNQTP¹⁷」を立ち上げた。これにより、大学や企業が参画する研究拠点「UKNQTP ハブ」4 拠点を設置、量子計算機、量子通信、量子センサの研究開発に対して、総額 1 億 2,000 万ポンドの資金が注入された。

2015 年 3 月には、新たに設立された「量子技術戦略諮問会議¹⁸」が量子技術に関する国家戦略を発表し、同年 9 月には量子技術各分野のロードマップを発表した。英国における 4 つの量子ハブの概要を表 3-2 に示す。

2018 年 11 月に政府は「UKNQTP」の 2024 年までの延長を発表し、2019 年からの 5 年間で総額 3 億 1,500 万ポンドが提供されることとなった。同時に、誤り耐性量子計算機の実現に向けた「国立量子コンピューティングセンター」の設立についても発表した。

15 https://qt.eu/news/2023/2023-05-05_the-quantum-future-begins-in-prague
<https://www.amires.eu/kick-off-meeting-of-the-qu-test-qu-pilot/>

16 工学物理科学研究会議：英国の工学・物理科学分野の研究資金配分機関 (EPSRC: Engineering and Physical Sciences Research Council)

17 UKNQTP: UK National Quantum Technologies Programme

18 量子技術戦略諮問会議：量子技術に関する国家戦略の策定や政府への助言等を行う機関

表 3-2 英国の四つの量子ハブ概要

拠点名	Sensors and Timing ^(注1)	Quantic ^(注2)	QCS ^(注3)	Quantum Communications ^(注4)
分類	量子センシング 量子計測	量子イメージング	量子コンピューティング 及びシミュレーション	量子通信
内容	健康, エネルギー, 交通, 土木, 宇宙, 防衛	気候変動, 健康, 交通, 防衛, 宇宙への応用	フルスタックかつ短期的 及び長期的目標	量子鍵配送
機関・指導者	U Birmingham Simon Bennett	U Glasgow Steve Beaumont	U Oxford Dominic O'Brien	U York Tim Spiller
金額 (第一期) ^(注5)	710 万ポンド / 年	480 万ポンド / 年	760 万ポンド / 年	480 万ポンド / 年
参加大学	Strathclyde, Nottingham, Glasgow, Sussex, Southampton, Imperial, Liverpool	Exeter, Heriot-Watt, Edinburgh, Bristol, Imperial, Southampton, Strathclyde	Bath, Bristol, Sheffield, Cambridge, Cardiff, Durham, Edinburgh, Glasgow, Imperial, Royal Holloway, Southampton, Strathclyde, Surrey, Sussex, UCL, Warwick	Bristol, Cambridge, Glasgow, Heriot-Watt, Kent, Oxford, Queen's Belfast, Sheffield, Strathclyde

出典：国立国会図書館 2022 年 3 月 量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 第 4 章
世界各国の政策（一部加工）、
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12213089_po_20210605.pdf?contentNo=1

2023 年 3 月 15 日、英国政府は英国における量子技術（QT）の 10 年間のビジョンと計画を定めた「国家量子戦略」を発表し、その期間中に研究、イノベーション、スキル、その他の活動に 25 億ポンドを支出することを決定した。英国の 10 年ビジョンは、世界をリードする量子対応経済となり、科学の卓越性に基づいて繁栄する量子セクターを創出し、量子技術（QT）が英国のデジタルインフラストラクチャと先進的な製造基盤の不可欠な部分となり、成長を促進し、強く回復力のある経済と社会を構築することとしている。

この長期的な取組は、

「国家量子技術プログラム（NQTP）¹⁹」と、2014 年から 2024 年の期間で 10 億ポンドを超える投資を行った公的および民間の R&D プログラムをすでに確立している英国部門によって築かれ成功した基盤の上に構築されている。NQTP は、政府、学界、産業界間のパートナーシップを代表し、QT の知識を研究室からより広範な社会的および経済的影響まで迅速に追跡している。NQTP の目的は、英国の研究人材と QT を商業化するためのアイデアを育成することで、経済的繁栄、国家安全保障、社会に価値を提供することである。

としている。

また、ゴールは以下を設定している。

- ・英国が世界をリードする量子科学と工学の本拠地であることを保証し、英国の知識

19 UK National Quantum Technologies Programme <https://uknqt.ukri.org/>

とスキルを向上させる

- ・ビジネスをサポートし、英国を量子ビジネスにとって頼りになる場所、グローバルサプライチェーンの不可欠な部分、また投資家や世界的な人材にとって好ましい場所にする
- ・英国での QT の利用を推進し、経済、社会、国家安全保障に利益をもたらす
- ・イノベーションと QT の倫理的使用をサポートし、英国の能力と国家安全保障を保護する国内および国際的な規制枠組みを作成する²⁰

3. ドイツ

連邦政府は、2018 年 9 月に「ハイテク戦略 2025」を決定し、ドイツを量子技術研究分野で世界最先端に発展させるとの目標を掲げた。同月、連邦教育研究省（BMBF）は、量子技術に関する研究開発プログラム「量子技術 -基礎研究から市場へ-」を発表し、2018 年から 2022 年の間に 6 億 5,000 万ユーロ（830 億円）の研究開発投資を実施すると述べた。重点研究分野は、量子計算機、量子通信、量子計測、量子システム実現のための基礎技術である。2020 年 1 月には、量子計算機分野の研究開発プログラムを拡充し、3 億ユーロの追加投資を行うことを発表した。

2020 年、ドイツ政府は経済刺激策を採択した。連邦教育研究省（BMBF）によって管理され、量子コンピューティング、量子センシング、量子通信、実現技術の分野で構成される新しい研究プロジェクトと、包括的な活動（教育や支援活動など）を支援する。経済刺激策の中で 量子技術（QT）に割り当てられた資金の別の部分は、連邦経済・気候変動省（BMWK）とドイツ航空宇宙センター（DLR）によって管理されている。

2022 年、BMBF は全ての QT 分野での研究を促進するために、10 年間の期間を持つ研究プログラム「量子システム」を開始した。量子コンピューティング（シミュレーションを含む）と量子センシング（イメージングを含む）に関して、研究プログラムはエコシステムの発展を評価するための主要業績評価指標（出版物、特許、新製品など）を明確にしている。

ミッションは以下のとおりである。

「今後 10 年以内に、量子コンピューティング（シミュレーションを含む）および量子センシング技術（イメージングを含む）においてドイツが世界をリードする地位を促進し、ヨーロッパのパートナー他国と連携して量子システム分野におけるドイツの競争力を強化すること。」

また、このプログラムは、量子システムにおけるドイツとヨーロッパの技術主権を確保することを目的とし、経済と社会における技術変化の利益のために量子システムの使用を促進する。この研究プログラムは、2023 年 4 月に発表された新しい連邦概念枠組みプログラム（「Handlungskonzept Quantentechnologien」）によって補完されている。連邦教育研究省の資金提供は、下記の 3 つの垂直方向と 1 つの水平方向（包括的）な研究分野を優先している。

- ・量子コンピューティングとシミュレーション（ハードおよびソフトウェア）
- ・量子ベースの測定およびセンシング技術

20 QuantERA, “Quantum Technologies Public Policies in Europe 2023”

- ・量子通信と暗号化
- ・量子システムを実現するテクノロジー²¹

4. フランス

フランス政府は 2023 年 3 月 30 日、発表から 2 年が経過した「量子技術国家戦略」の実施状況や成果を発表した。量子技術の関係分野には、政府目標額の半分以上が投資された。

この国家戦略は、2021 年 1 月にマクロン大統領が発表した。2025 年までの 4 年間に政府として約 10 億ユーロ、民間資本も合わせると約 18 億ユーロの投資を見込み、「量子計算機の技術開発と導入拡大」「量子センサ技術の完成」「ポスト量子暗号技術の開発」「量子通信技術の発展」「能力ある人材の育成」などの主要目標を掲げている。

投資状況は、以下のとおりである。

- ・ 5 か年投融資計画「フランス 2030」の枠組みの投資額は 3 億 5,000 万ユーロである。
- ・ 同計画の一環である「優先研究プログラム」(PEPR) の「量子編」として 1 億 5,000 万ユーロ
- ・ 「将来の能力・人材育成」プログラムによる教育として 6,000 万ユーロ
- ・ ハイブリッド量子計算機のプラットフォーム整備で 7,230 万ユーロ
- ・ 重要産業分野の支援として 8,000 万ユーロ

このうち PEPR「量子編」については、国立科学研究センタ (CNRS)、原子力・代替エネルギー庁 (CEA)、国立情報科学・自動化研究所 (INRIA) の 3 機関を拠点とし、ハイブリッド量子計算機のプラットフォーム「HQI」(France Hybrid HPC Quantum Initiative) が作られるなどした。10 件のプロジェクトが採択され、500 本を超える論文が関係コミュニティから発表された。また、研究機関内や企業内で発展途上段階にある技術の開発支援も行われている。「フランス 2030」の枠内では、以下のとおりである。

- ・ PASQAL (中性子量子計算機の開発、1 億ユーロを調達)
- ・ Siqance (半導体技術と欧州チップスの技術にもとづくコンピュータの開発・商用化。CNRS と CEA から派生)
- ・ Alice & Bob (誤り耐性量子計算機の開発。政府の公募による起業支援策「i-PhD」と「i-Lab」に採択)
- ・ Aqemia (量子メカニズムのアルゴリズム開発を目的とした人工知能を、創薬研究に特化して応用する研究。高等師範学校と CNRS が実施)

また、2022 年 7 月 5 日には、CNRS、リモージュ大学、米国立標準技術研究所 (NIST) が、特許利用に関する契約を締結した。NIST が指定する耐量子計算機暗号 (PQC) にもとづく暗号化規格を使う場合、CNRS の特許ファミリーにおいては特別なライセンスが必要なくなっている²²。

21 QuantERA, “Quantum Technologies Public Policies in Europe 2023”

22 <https://www.gouvernement.fr/france-2030-des-resultats-concrets-pour-les-2-ans-de-la-strategie-quantique>

第4節 中国の政策動向

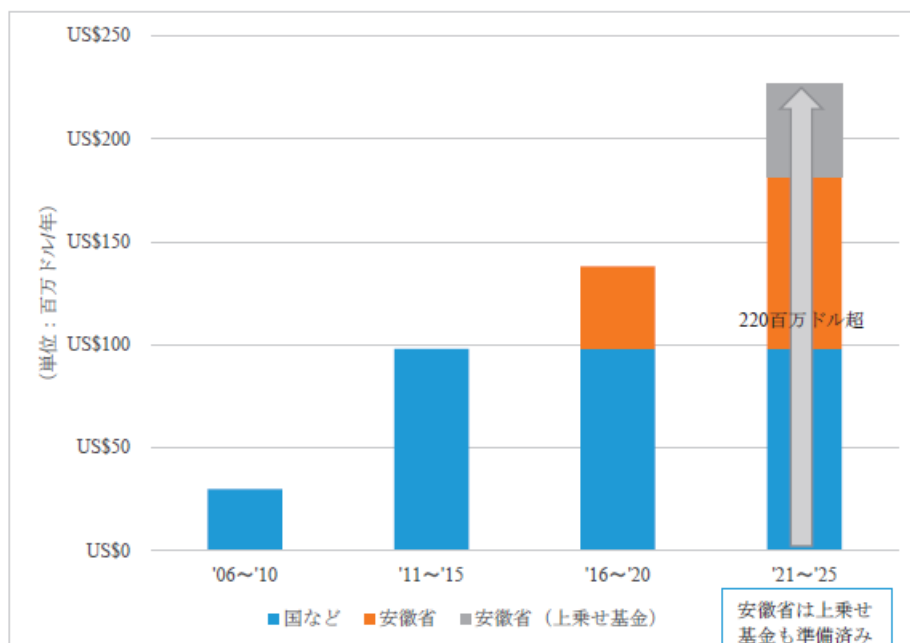
2006年2月に国务院発表の「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006～2020年）」で、重大科学研究の4領域の一つに「量子制御」が指定された。

2015年には、中国科学院がアリババグループと「中国科学院－アリババ量子計算実験室」を設立し、量子計算機の開発に取り組むことを発表した。2030年までに50～100量子ビットの量子計算機試作機を開発する研究計画を定めた。

2016年8月の国务院発表「科学技術イノベーション第13次5か年計画（2016～2020年）」では、国が長期にわたって安定的に支援する重点領域に「量子通信・量子計算機」が指定された。

また、安徽省の合肥市に量子技術の中心的研究拠点「量子情報科学国家実験室」を建設する計画が2017年から進められ、総工費は70億元に上るとされている。図3-11に、中国での量子情報科学への投資を示す。

図3-11 中国での量子情報科学への投資



出典：国立国会図書館 2022年3月 量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 第4章 世界各国の政策、
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12213089_po_20210605.pdf?contentNo=1

国家予算を投入した大型の国家プロジェクトは、おもに安徽省の合肥市に位置する中国科学技術大学や、浙江大学を中心に進められていると見られる²³。中国科学技術大学の Division of Quantum Physics and Quantum Information²⁴によれば、下記の研究開発が進行している。

- Optical quantum computing
- Superconducting quantum computing
- Quantum simulation with ultracold Bosons

23 <https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/1kai/siryo3.pdf>

24 <https://quantum.ustc.edu.cn/web/index.php/en/node/433>

- Quantum simulation with ultracold mixture of Lithium and potassium atoms
- High resolution heterotype optical superlattice
- Quantum simulation with ultracold mixture of Lithium and Dysprosium atoms
- Ultracold atoms in optical lattices
- Ultracold molecule
- Ultracold strontium Rydberg quantum gases

これらの研究開発プロジェクトで、おもに量子計算機に関連するのは、Optical quantum computing と Superconducting quantum computing である。Optical quantum computing では、偏光、運動量、軌道角運動などの複数の自由度を利用して 6 光子 18 量子ビットのエンタングルメントと 8 光子 24 量子ビットのエンタングルメントの研究開発と、InGaAs 量子ドットや原子結晶中の欠陥など、決定論的に単一光子を放出できる単一量子エミッタを用いて、97%の識別不能性を持つ最も純粋な単一光子を生成することに成功している²⁵。Superconducting quantum computing では、2 次元の 66 量子ビット（11×6 量子ビット）の超伝導チップを開発して 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している²⁶。

また、浙江大学では、超伝導²⁷やトポロジカル絶縁体²⁸を使った量子計算機の研究開発が進められている。中国科学院の Institute of Physics (IOP)²⁹では、超伝導方式に加え、イオントラップ方式の量子計算機の研究を実施している。

中国の量子計算機の政策³⁰の概要を時系列的に表 3-3 に示す。中国では、量子技術産業は継続的な政策支援を受けており、国家戦略に昇格している。

2006 年には、「国家中長期科学技術開発計画大綱（2006-2020）」で、「量子通信キャリアと規制の原理と方法、量子コンピューティング、電荷スピン相軌道およびその他の相関法則と新しい量子制御方法の研究に焦点を当てる」ことが提案されている。

2016 年、国務院の「国家イノベーション主導の開発戦略概要」は、「量子情報技術」の開発を促進するための戦略計画を提案した。

2020 年、CPC 中央委員会政治局は、量子科学技術の研究と応用の見通しに関する第 24 回共同研究を開催し、習近平総書記は「量子科学技術の発展を促進することの重要性と緊急性を十分に理解し、量子科学技術の戦略的計画とシステムレイアウトを強化し、一般的な傾向を把握し、最初の動きを起こす」ことを提案した。

また、中国科学技術大学のチームと中国科学院上海マイクロシステムおよび情報技術研究所、国立パラレル計算機エンジニアリング研究所が協力して、76 の光子を用いた量子計算機のプロトタイプ「九章」で「量子超越性」を実現したと 2020 年に「サイエンス (Science)」誌に発表した。

25 <https://quantum.ustc.edu.cn/web/index.php/en/node/48>

26 https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/kento_wg/2kai/sanko2.pdf

27 <http://physics.zju.edu.cn/phy/wuquantumwwnformation/list.htm>

28 <https://person.zju.edu.cn/en/0017105>

29 <http://english.iop.cas.cn/ju/qcrc/>

30 Shenzhen Zero Power “中国量子計算機市場調査 特別レポート”

表 3-3 中国の量子計算機の政策動向

年月	発行機関	政策名称	具体内容
2006/02	国務院	「国家中長期科学技術発展計画綱要(2006 年～2020 年)」	量子通信、量子コンピューティング、電荷-スピン位相-軌道相関法則と新しい量子制御法、閉じ込められた小さな量子系の新しい量子効果、人工バンドギャップ材料効果の巨視的量子効果の搬送波と制御の原理と方法に焦点を当てる。
2011/07	科学技術省	「科学技術発展のための国家「第 12 次 5 カ年計画」」	光子情報処理、サブ通信、量子コンピューティング、テラヘルツ通信、新しいコンピューティングシステム、ネットワークソフトウェア、定量的データ処理、インテリジェントな知覚とインタラクションなどの主要テクノロジーでブレークスルーを実現し、ユビキタスサービスやヒューマンマシンインタラクションなどの中核的課題を克服するテクノロジー。
2015/05	国務院	「中国製造 2025」	第 5 世代移動通信(5G)技術、コアルーティング・スイッチング技術、超高速大容量インテリジェント光伝送技術、「未来のネットワーク」コア技術とシステムアーキテクチャを包括的に突破し、量子コンピューティングの開発を積極的に、ニューラルネットワークなどを推進する。
2016/03	全国人民代表大会	「中華人民共和国国家経済社会発展第十三次五ヵ年計画の概要」	科学技術イノベーション 2030 の主要科学技術プロジェクトの一つとして量子通信と量子計算機を挙げる。
2017/05	科学技術省、教育省、中国科学院、中国国立自然科学財団	「第 13 次 5 カ年計画」国家基礎研究特別計画	量子計算機研究は、大規模量子システムの効率問題を解決し、量子システム、量子チップ材料、構造とプロセス、量子計算機の全体的なアーキテクチャ、及び操作及びアプリケーションシステムを開発し、量子計算機の変調、保存、送信および計算を実現します。量子情報を解明し、実用化された量子計算機試作機を実現する。
2017/08	科学技術省、軍事委員会科学技術委員会	「第 13 次 5 カ年計画」軍民科学技術融合特別計画	宇宙と地上の統合情報ネットワーク、量子通信と量子計算機、脳科学と脳にインスピレーションを得た研究など、新しいラウンドの主要な軍民統合科学技術プロジェクトの実証と実施を積極的に推進する。
2018/01	中国共産党中央委員会総弁公室、国務院総弁公室	「金融および重要分野における暗号化応用およびイノベーション開発の作業計画(2018 年～2022 年)」	暗号技術の革新を強力に推進し、暗号の基礎理論、主要技術、応用研究を強化し、暗号技術と量子技術、クラウドコンピューティング、ビッグデータ、モノのインターネット、人工知能、ブロックチェーン、その他の新興技術の統合と革新を促進する。
2020/10	政治局	第 24 回集合学習	量子技術の開発は、大きな科学的意義と戦略的価値を有しており、従来の技術体系に影響を与え、再構築する大きな破壊的技術革新であり、新たな科学技術革命と産業変革を導くものとなる。
2021/03	国務院	「中華人民共和国の国家経済社会発展のための第十四次五ヵ年計画(2021 年～2025 年)と 2035 年に向けた長期目標の概要」	「量子技術」に関連する内容としては、「量子情報などの主要な革新的分野における多数の国立研究所の設立」、「独創的かつ先導的な科学技術研究の強化」、「大都市圏、都市間における量子情報の研究開発」などが挙げられる。、自由空間量子通信技術」、ユニバーサル量子コンピューティング試作機と実用的な量子シミュレータの開発、量子精密測定技術のブレークスルーなど。
2021/12	中国共産党中央委員会、国務院	「内需拡大に向けた戦略計画大綱(2022 年～2035 年)」	「新しいインフラを計画的に導入し、需要に応じて、全国規模の広域量子安全通信バックボーンネットワークのサービス能力を強化する」ことが求められている。
2022/01	国務院	「第 14 次デジタル経済発展 5 カ年計画」	「センサや量子情報などの先進的な分野を目指す」
2022/11	科学技術省	「第 14 次 5 カ年計画『国家ハイテク産業開発区開発計画』」 `Dai 14-ji 5-kanen keikak	「量子情報などの先端技術や産業変革分野の未来産業への積極的な展開」について言及。

出典：Shenzhen ZeroPower（中国）「中国量子コンピュータ市場調査特別レポート」

第5節 方式毎の政策動向

1. 量子ゲート超伝導方式の各国の主な政策

量子ゲート超伝導方式の各国の主な政策を表 3-4 に示す。

表 3-4 量子ゲート超伝導方式の各国の主な政策

日本	・超伝導量子ビットの 2 次元配列やマイクロ波共振器構造の最適化による超伝導量子ビットの高性能な読み出しと超伝導量子計算機(ノイジーな中規模量子計算機 NISQ)の実現 (文部科学省:光・量子飛躍フラグシッププログラム(Q-LEAP)) ・誤り耐性汎用超伝導量子コンピュータ実現のためのプロセス・クライオ制御回路・冷凍機などの開発 (内閣府 ムーンショット:「超伝導量子回路の集積化技術の開発」プロジェクト、及び「スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発」プロジェクト) ・超伝導量子計算機(NISQ)のための製造プロセス・クライオ CMOS・超伝導制御回路及び、ボソニック超伝導量子ビット回路の開発 (NEDO 次世代コンピューティング・AI チップ事業「量子計算及びイジング計算システムの統合型研究開発」)
米国	・材料、デバイス、ソフトウェアを統合した実用的な超伝導計算機プロトタイプの研究開発 (DOE 主管:Co-Design Center for Quantum Advantage 研究所) ・トランズモンの改良に関する研究開発 (DOE 主管:Fermi National Accelerator Laboratory 研究所)
EU	・100 量子ビット以上のフルスタック超伝導量子計算機のシステムの実現 (Quantum Flagship: An Open Superconducting Quantum Computer プロジェクト)
中国	・超伝導量子ビットの 2 次元構造配列による 66 量子ビットからなる超伝導量子計算機の製造 (科学技術イノベーション第 13 次 5 か年計画:中国科学技術大学)

2. 量子ゲートイオントラップ方式の各国の主な政策

量子ゲートイオントラップ方式の各国の主な政策を表 3-5 に示す。

表 3-5 量子ゲートイオントラップ方式の各国の主な政策

日本	光ファイバーを使った量子ユニット間の接続によるスケーラビリティの向上、超伝導マイクロ波イオントラップやリユードベリイオンの研究 (内閣府ムーンショット:「イオントラップによる光接続型誤り耐性量子の研究開発」プロジェクト)
米国	イオントラップ方式に適した量子誤り訂正方式の研究(イオントラップに限定されず、中性原子やダイヤモンド欠陥方式に適した量子誤り訂正方式の研究) (NSF 主管:Challenge Institute for Quantum Computation 研究所): DARPA による民間企業(PsiQuantum 社)への 10 年間未満の出資 Lawrence Berkeley 研究所を中心に、Caltech、Duke、Harvard、MIT、UC Berkeley などの米国主要大学が参加してイオントラップ、3 次元超伝導方式の研究開発を推進しており、5 年間で 1 億 1500 万ドルの研究資金が提供されている。
EU	50 量子ビットからなる全結合量子計算機を産業応用化する (Quantum Flagship: Advanced quantum computing with trapped ions プロジェクト) プロジェクト名称: AQTION 投資額: €9,588,000 参加国: オーストリア、英国、ドイツ、フランス、スイス、スペイン 全結合可能な 50 量子ビットからなるイオントラップ量子計算機を産業利用できるように研究開発をおこなっている。
中国	科学技術イノベーション第 13 次 5 か年計画

3. 量子ゲート光量子方式の各国の主な政策

量子ゲート光量子方式の各国の主な政策を表 3-6 に示す。また、量子もつれ光源、光子検出器のプレイヤーリストを表 3-6 に示す。

表 3-6 量子ゲート光量子方式の各国の主な政策

日本	誤り耐性閾値を超えるスクイーズド光と量子誤り訂正 (GKP qubits) を用いた誤り耐性汎用量子計算 (Non-Clifford 量子ゲート)、QAM 光変調によるマルチコア大規模汎用量子計算機 (内閣府 ムーンショット:「誤り耐性型大規模汎用量子計算機の研究開発」プロジェクト)
米国	量子チップ化された光量子デバイス上にオンデマンドな単一光子光源を実現 (NSF 主管: Quantum Foundry (California NanoSystems Institute 研究所))
EU	2 次元構造による光源、光検出器の集積化 (Quantum Flagship: Two-dimensional quantum materials and devices for scalable integrated photonic circuits プロジェクト) 集積化された光導波路を使った決定論的光量子光源 (Quantum Flagship: Sub-Poissonian Photon Gun by Coherent Diffusive Photonics プロジェクト)
中国	6 光子 8 量子ビットのエンタングルメントを実現、及び、決定論的単一光子を生成する量子エミッタ (科学技術イノベーション第 13 次 5 年計画: 中国科学技術大学)

4. 量子ゲート Si 量子ドット方式の各国の主な政策

量子ゲート Si 量子ドット方式の各国の主な政策を表 3-7 に示す。

表 3-7 量子ゲート Si 量子ドット方式の各国の主な政策

日本	2 次元量子ビットアレイ、クライオ CMOS 回路による大規模集積シリコン量子計算機 (CMOS 型) の研究開発 (内閣府 ムーンショット:「大規模集積シリコン量子計算機」プロジェクト) スピン量子ビット配列による Si 量子計算機 (ゲート定義型) の多量子ビット化に向けた構造最適化と 2 量子ビット操作技術 (内閣府 ムーンショット:「拡張性のあるシリコン量子計算機技術の開発」プロジェクト)
米国	—
EU	既存の半導体製造技術を使った 16 量子ビットからなる Si スピン量子計算機 (Quantum Flagship: Silicon spin qubits could bring practical quantum computers a step closer プロジェクト)
オーストラリア	200m 秒までコヒーレンス時間が伸びた電子スピンを使ったシリコンチップ型量子計算機 (不純物原子型) (Center for Quantum Computing & Communication Technology 研究所)

5. 量子ゲート中性原子方式の各国の主な政策

量子ゲート中性原子方式の各国の主な政策を表 3-8 に示す。

表 3-8 量子中性原子方式の各国の主な政策

日本	・文部科学省「Q-LEAP 冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」 自然科学研究機構 分子科学研究所の大森賢治教授グループが世界最速の 2 量子ビットゲートを成功 ・内閣府ムーンショット目標 6「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレイ型・誤り耐性量子コンピュータ」、「ナノファイバー共振器 QED による大規模量子ハードウェア」、「ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース」
米国	・2018 年に「国家量子イニテチアチブ法」を制定し、早くから量子計算機関連技術に取り組む方針を打ち出し、具体的には、エネルギー省 (DOE) に基礎研究を推進する「国家量子情報科学研究センタ」を設立、また、国家科学財団 (NSF) も従来からの枠組みのなかで研究・教育活動を推進している。 ・DOE 主管の QSA (Quantum System Accelerator) では、Lawrence Berkeley 研究所を中心に、Caltech、Duke、Harvard、MIT、UC Berkeley などの米国主要大学が参加してイオントラップ、3 次元超伝導方式に加え QSA-Funded Research において Optical Tweezers と呼ばれるレーザー光による中性量子の配置方法で 42 個の原子を自由にするなどの研究開発を推進している。 ・NSF 主幹の IQIM (Institute for Quantum Information and Matter) 研究所では、Caltech において冷却原子 (中性原子) 方式、超伝導回路、トポロジカル材料の研究開発を実施している。
EU	5 か年投融資計画「フランス 2030」の枠組みの投資額 3 億 5,000 万ユーロから PASQAL が中性量子計算機の開発に 1 億ユーロを調達。 欧州委員会は「Horizon 2020」の一部として量子技術に関する大型の研究開発プログラム「Quantum Flagship」を始動し、10 年間で 10 億ユーロを拠出することを決定した。具体例を挙げる。 ・プロジェクト名称: FRESNEL 投資額: €3,564,375、参加国: フランス Pasqal 社の推進するプロジェクトで、300 量子ビットからなる中性原子方式の量子計算機でクラウドベースのサービスを 2024 年を目標に開始するプロジェクトである。 ・プロジェクト名称: PaSQuanS 投資額: €9,659,515、参加国: ドイツ リュードベリ状態にある 50 個の中性原子を使った量子シミュレータであり、これに 20 個からなるイオンを加えている。 ・プロジェクト名称: EuRyQa 投資額: €4,970,860、参加国: フランス 2022 年に開始された Horizon EUROPE のプロジェクトで、冷却されたリュードベリ状態の中性原子を使い 100~1,000 個の量子ビットからなるシステムを目指している。

6. 量子アニーリング 超伝導方式の各国の主な政策

量子アニーリング 超伝導方式の各国の主な政策を表 3-9 に示す。

表 3-9 量子アニーリング 超伝導方式の各国の主な政策

日本	NEDO(国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構)は、2018 年より高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発事業において「量子計算及びイジング計算システムの統合型研究開発」を実施し、コヒーレンス性能の高い超伝導量子パラメトロンを用いた量子アニーリングマシンの開発をフルスタックで進めている。
米国	2016 年より IARPA QEO(Quantum enhanced optimization)において、MIT や Northrop Grumann らがコヒーレンス性能の高い超伝導量子ビットを利用した超伝導量子アニーリングマシンの開発をすすめてきた。その後継プロジェクトである DARPAQAFS(Quantum Annealing Feasibility Study)及び RQMLS(Reversible Quantum Machine Learning and Simulation)において、南カリフォルニア大学、MIT、Northrop Grumann 等が、高コヒーレント超伝導量子アニーリングマシンの開発をすすめている。
欧州	2020 年より、AVaQus プロジェクトにおいてスペイン IFAE、スペイン Qilimanjaro、イギリス Glasgow 大学らが中心となり、コヒーレンス性能の高い超伝導量子ビットを利用した超伝導量子アニーリングマシンの開発をすすめている。
カナダ	国家量子戦略に先立つ D-Wave Systems への大規模出資(D-Wave Systems は、世界初の商業販売開始。2021 年にカナダ政府は D-Wave Systems(カナダ)に 4,000 万カナダ・ドルの出資を行っている。)

第4章 特許動向調査

第1節 技術区分表

技術区分別動向調査で着目する技術区分を整理してまとめた技術区分表を表4-1に示す。この技術区分表は、第4章 特許動向調査及び第5章 研究開発動向調査で共通に使用する。技術区分表は、大きく7つの項目から成る。それらは、「量子計算機的方式・量子ビットの結合」、「発明の課題・主題」、「ハードウェア・ミドルウェア要素」、「設計・製造方法の発明、設計・製造方法で特定される物の発明」、「ソフトウェア技術」、「評価技術」、「応用分野の記載のあるもの」である。

表4-1 技術区分表

【量子計算機的方式・量子ビットの結合】

大区分	中区分	小区分	詳細区分
汎用量子計算機	量子ゲート方式 超伝導方式	量子ビットの種類	磁束量子ビット
			トランズモン
			その他
	量子ゲート方式 イオントラップ方式	量子ビットの種類	イッテルビウムイオン
			カルシウムイオン
			バリウムイオン
			希土類イオン
			その他
	量子ゲート方式 中性原子方式	量子ビットの種類	ルビジウム
			セシウム
			イッテルビウム
			ストロンチウム
	量子ゲート方式 光量子方式	量子ビットの種類	単一光子
			連続光(スクウィーズド光)
			その他
	量子ゲート方式 Si 量子ドット方式	量子ビットの種類	電子スピン
			その他
	量子ゲート方式 トポロジカル方式	量子ビットの種類	マヨラナ粒子
			その他
	量子ゲート方式 ダイヤモンド欠陥方式	量子ビットの種類	NV センタ
			その他
	量子ゲート方式 その他		
イジングマシン・アニーラ	量子アニーリング 超伝導方式	量子ビットの種類	磁束量子ビット
			量子パラメトロン
			その他
	古典アニーリング レーザーネットワーク方式(光アニーラ)	スピンの種類	光パルス
			その他
方式に特定がない			
量子ビットの結合方式	全結合		
	その他		
	記載無し		

【発明の課題・主題】

大区分	中区分	小区分	詳細区分
システム構造に関する課題・主題			
ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題	量子ユニット(チップ)に関する課題・主題	大規模集積化(スケーラビリティ)の向上	
		コヒーレンス時間の向上/損失低減	
		その他	
	量子ユニット(チップ)の駆動、操作(R/W)回路に関する課題・主題	演算スピードの向上	
		ゲート操作の忠実度の向上	
		物理量子エラー訂正・耐性	
		その他	
	I/Fに関する課題・主題		
	冷却に関する課題・主題		
	その他		
設計・製造方法に関する課題・主題	設計技術に関する課題・主題		
	歩留まり		
	材料		
	その他		
ソフトウェア技術に関する課題・主題	実問題の量子モデル化に関する課題・主題	量子モデル化の簡易化	
		既存の量子モデルの適用先拡大あるいは新たな量子モデルの提案	
	プログラム開発に関する課題・主題	アルゴリズムの効率化	
		利便性の向上	
		その他	
	コンパイラに関する課題・主題	量子回路生成の効率化	
		エラー訂正	
		その他	
	制御装置ファームウェアに関する課題・主題		
	古典計算機と量子計算機の融合に関する課題・主題	計算速度の改善	
		プログラミングの容易化	
	その他		
評価技術に関する課題・主題			
その他			
課題・主題が不明、把握できない			

【ハードウェア・ミドルウェア要素】

大区分	中区分	小区分	詳細区分
設計・製造方法により課題を解決しているもの、設計・製造方法に発明の主題があるもの			
ソフトウェア技術により課題を解決しているもの、ソフトウェア技術に発明の主題があるもの			
評価技術により課題を解決しているもの、評価技術に発明の主題があるもの			
量子ユニット(チップ)の特徴	量子ビットの配列・立体構造に特徴	1次元構造	
		2次元構造	
		3次元構造	
	量子ユニット内の量子ビット操作(R/W)回路に特徴	能動素子	
		受動素子	
		その他	
	量子ビット間干渉低減回路に特徴		
	量子ユニット(チップ)が配置される温度域に特徴	0K 近傍	
		4K 近傍	
		その他	
	3次元実装により構成された量子ユニットに特徴		
	光ファイバー		
	Si フォトニクスにより構成された量子ユニットに特徴		
量子ユニット(チップ)間の I/F に特徴	電気・磁気・光学的特性に特徴		
「量子ユニット(チップ)」と、「量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路」との間の I/F に特徴	コネクタ ケーブル シールド 断熱に特徴		
量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路全体の構造に特徴	Si フォトニクス		
	3次元実装(超伝導、イオン、光子、量子ドット)		
	その他		
量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路の構成や動作に特徴 (続く)	量子ビット操作(R/W)回路(超伝導、Si 量子ビット)の回路構成に特徴		
	真空中の中性原子・イオンの配置・移動・操作(R/W)回路構成に特徴	電場駆動回路	
		電極配置	
		光格子生成光学系	
		光双極子トラップ	
		光ピンセット	
		マイクロ波回路	
		中性原子・イオンの位置検出光学系	
	光の駆動・操作(R/W)回路構成に特徴	その他	
	量子ビット間結合(エンタングルメント)制御回路の構成に特徴	キャパシタ結合	
		回路 QED	
		リュードベリ原子	
		電場駆動回路	
		共振器 QED	
		その他	

大区分	中区分	小区分	詳細区分
(続き) 量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路の構成や動作に特徴	量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路の動作(ミドルウェア)に特徴	量子ビットの書き込み 量子ビットの読み出し 量子ビットの2ゲート演算 その他	
量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路を構成する部品に特徴	能動素子		
	受動素子		
	制御ロジック	クライオ CMOS 超伝導制御回路	
	電源		
	マイクロ波源		
	光源		
	光量子・光パルス検出器		
	光変調器		
	光ファイバー技術		
	光ルーター		
	その他		
	量子ユニット内		
	0K 近傍		
	4K 近傍		
量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路の能動素子の配置に特徴	数十 K 近傍		
	室温		
	コネクタ		
	ケーブル		
「量子ユニット(チップ)の駆動回路、量子ビット操作(R/W)回路」と「制御装置(古典計算機)」との間の I/F に特徴	断熱に特徴		
	冷却装置の構造		
	冷却装置の配置		
	その他		
冷却構造に関する特徴			
その他			

【設計・製造方法の発明、設計・製造方法で特定される物の発明】

大区分	中区分	小区分	詳細区分
設計技術	シミュレーション		
	EDA ツール		
	その他		
量子ユニットの製造方法	量子ユニットの素材の選定に特徴		
	前工程	同位体シリコン製造技術(濃縮、原子置換など)	
		成膜技術	
		加工技術	
		配線技術	
		レーザー照射技術	
	後工程	実装技術(多層化、パッケージング技術)	
量子ユニット以外の製造方法	その他		

【ソフトウェア技術】

大区分	中区分	小区分	詳細区分
量子誤り訂正技術			
量子計算モデル	量子回路計算モデル		
	測定型量子計算モデル(一方向性)		
	断熱型量子計算モデル(イジングモデル)		
	トポロジカル量子計算モデル		
	その他		
アルゴリズムの効率化	アルゴリズムによる計算速度の向上		
	アルゴリズム上の工夫による量子回路の小規模化やゲート操作の低減		
	その他		
古典計算機との融合	物理・論理 Qubit を意識しないプログラミング		
	論理 Qubit を意識するプログラミング		
	物理 Qubit を意識するプログラミング		
	物理 Qubit の制御・操作プログラミング		
SDK (古典計算機の前処理含む)	プログラム開発環境		
	ライブラリ		
	高級言語		
	量子回路記述言語		
	コンパイラ		
	論理誤り訂正 SW		
	ローカルシミュレータ		
マイクロアーキテクチャ (ミドルウェア)	物理誤り訂正ファームウェア		
	物理レベルスケジューラ		
	デバイス制御ファームウェア		
	量子論理ゲート操作		
古典計算機による後処理			
オーケストレーション			
その他			

【評価技術】

大区分	中区分	小区分	詳細区分
ハードウェアに特徴			
ソフトウェアに特徴			
評価内容に特徴	ベンチマークテスト		
	量子ビットの性能評価		
	システム規模の評価		
	量子体積の評価		
	アルゴリズムの評価		
	その他		

【応用分野の記載のあるもの】

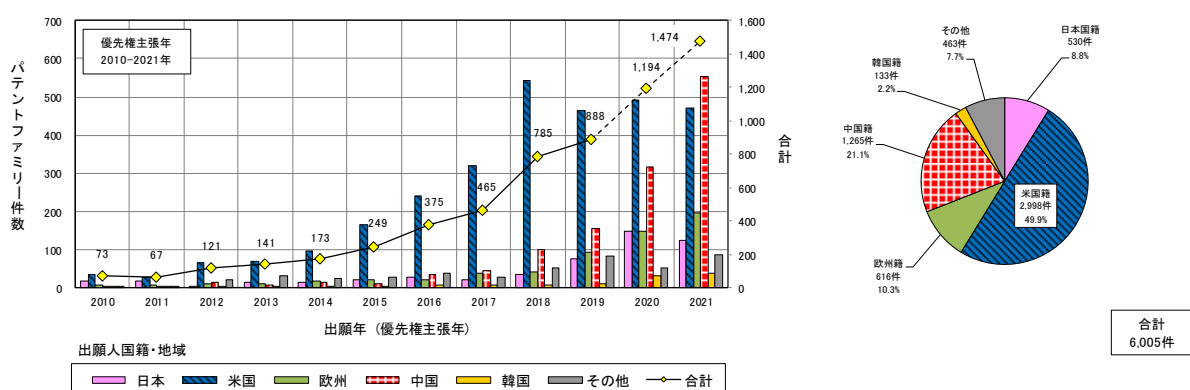
大区分	中区分	小区分	詳細区分
応用分野	FTQC/NISQ/イジングマシン・アニーラの記載	FTQC	
		NISQ	
		イジングマシン・アニーラ	
	アルゴリズムの種類	組合せ最適化問題	量子イジングマシン・アニーラ
			古典アニーリング レーザーネットワーク方式(光アニーラ)
			QAOA(Quantum Approximate Optimization Algorithm)
		量子化学計算(位相推定)	
		量子シミュレーション	
		量子化学計算(VQE)	
		量子機械学習	
		素因数分解(Shor's Algorithm)	
		データ探索(Groover's Algorithm)	
		線型連立方程式(HHL Algorithm)	
		振幅推定アルゴリズム	
		その他	
	適用する分野	医療・医薬品	
		金融	
		自動運転	
		物流・配送	
		宇宙・軍事	
		暗号解析	
		工程管理	
		化学	
		気候	
		交通機関	
		エネルギー	
		その他	
		適用する分野無し	

第2節 全体動向

1. 出願人国籍・地域別パテントファミリー件数年次推移及びパテントファミリー件数比率

量子計算機関連技術におけるパテントファミリー件数推移及び件数比率を図 4-1 に示す。本調査において集計の対象となったパテントファミリー件数（2010-2021 年）の合計は 6,005 件（ノイズ除く）で、出願人国籍・地域別で最も多いのは米国籍の 2,998 件で全体の 49.9%を占めている。次いで中国籍の 1,265 件（21.1%）、欧州籍の 616 件（10.3%）、日本国籍の 530 件（8.8%）である。

図 4-1 「出願人国籍・地域別」パテントファミリー件数年次推移及びパテントファミリー件数比率（出願先：日米欧中韓 WO、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

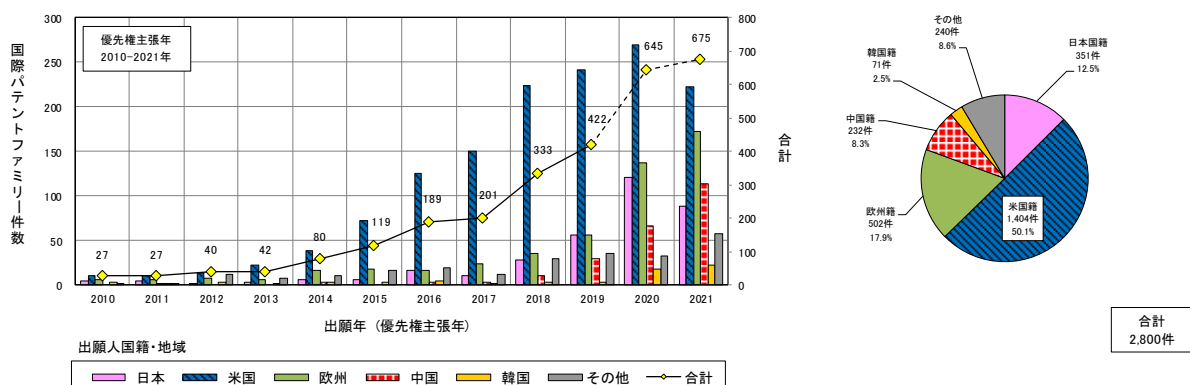


注）2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 出願人国籍・地域別国際パテントファミリー件数年次推移及び国際パテントファミリー件数比率

量子計算機関連技術における国際パテントファミリー件数推移及び件数比率を図 4-2 に示す。国際パテントファミリー件数（2010-2021 年）の合計は 2,800 件で、出願人国籍・地域別で最も多いのは米国籍の 1,404 件で全体の 50.1%を占めている。次いで欧州籍の 502 件（17.9%）、日本国籍の 351 件（12.5%）である。

図 4-2 「出願人国籍・地域別」国際パテントファミリー件数年次推移及び国際パテントファミリー件数比率（出願先：日米欧中韓 WO、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

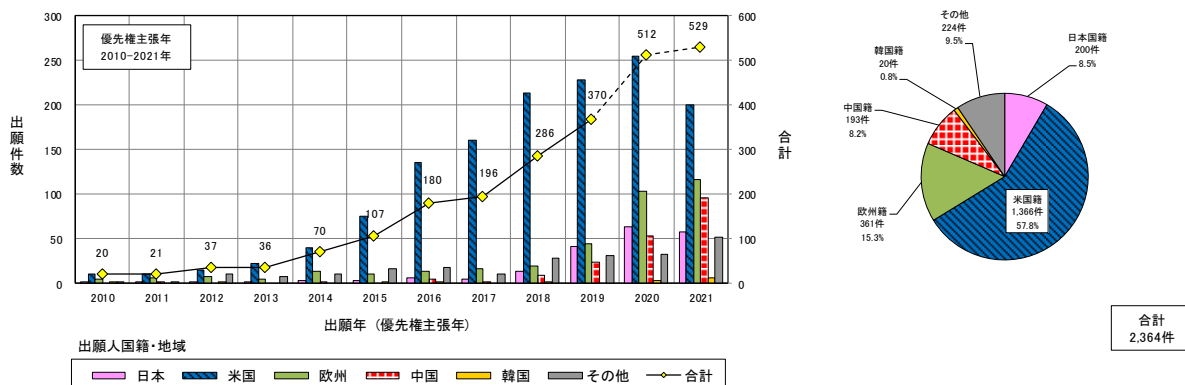


注）2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. PCT 出願状況

量子計算機関連技術における PCT 出願の出願件数推移及び件数比率を図 4-3 に示す。PCT 出願件数（2010～2021 年）の合計は 2,364 件で、出願人国籍・地域別で最も多いのは米国籍の 1,366 件で全体の 57.8%を占めている。次いで欧州籍の 361 件（15.3%）、その他の 224 件（9.5%）、日本国籍の 200 件（8.5%）、中国籍の 193 件（8.2%）、韓国籍の 20 件（0.8%）である。

図 4-3 「出願人国籍・地域別」PCT 出願件数年次推移及び PCT 出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

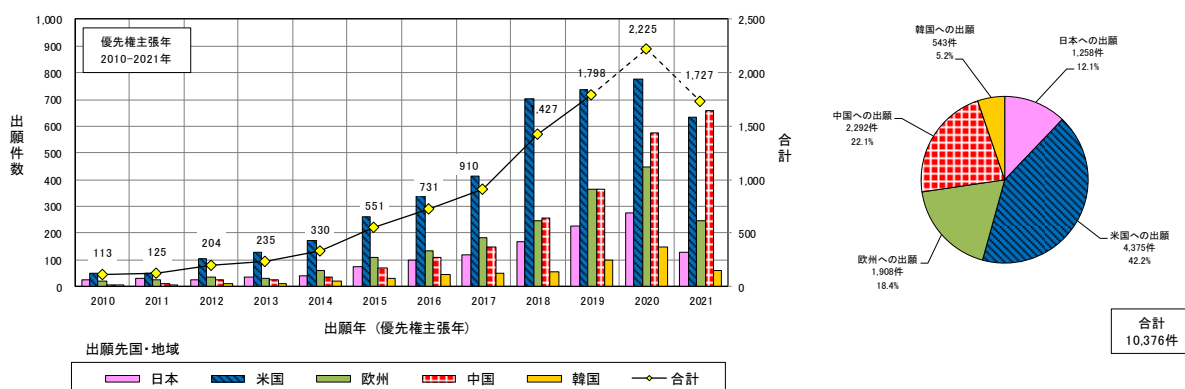


注）2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 出願先国・地域別出願件数推移及び出願件数比率

量子計算機関連技術における出願先国・地域別出願件数推移及び件数比率を図 4-4 に示す。出願件数（2010～2021 年）の合計は 10,376 件で、出願先国・地域別で最も多いのは米国への出願の 4,375 件で全体の 42.2%を占めている。次いで中国への出願の 2,292 件（22.1%）、欧州への出願の 1,908 件（18.4%）、日本への出願の 1,258 件（12.1%）、韓国への出願の 543 件（5.2%）である。

図 4-4 「出願先国・地域別」出願件数年次推移及び出願件数比率（出願先：日米欧中韓、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

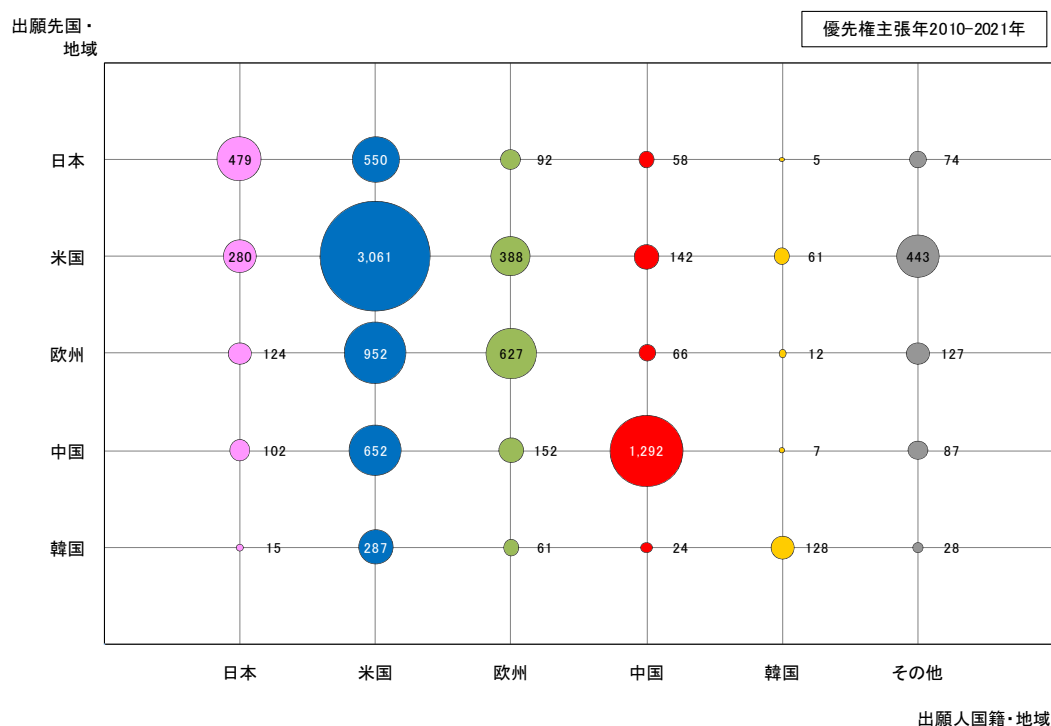


注）2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 出願先国・地域別－出願人国籍・地域別出願件数

出願先国・地域別－出願人国籍・地域別出願件数を図 4-5 に示す。各国籍・地域とも、自国・地域への出願が最も多い。米国籍出願人による他国・地域への出願は、中国以外の日欧韓の各国・地域において、自国籍・地域出願人を超えて最も件数が多く、海外へも積極的に出願していることがうかがえる。日欧中韓の各国籍・地域の出願人は、自国・地域に次いで、米国への出願が多い。中国籍は 94% が自国向けの出願であり、海外への出願が非常に少ないといえる。中国以外の出願人国籍・地域でも、中国への出願が多い（米国籍は米欧の次、欧州籍は欧米の次）。

図 4-5 「出願先国・地域別－出願人国籍・地域別」出願件数（出願先：日米欧中韓、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

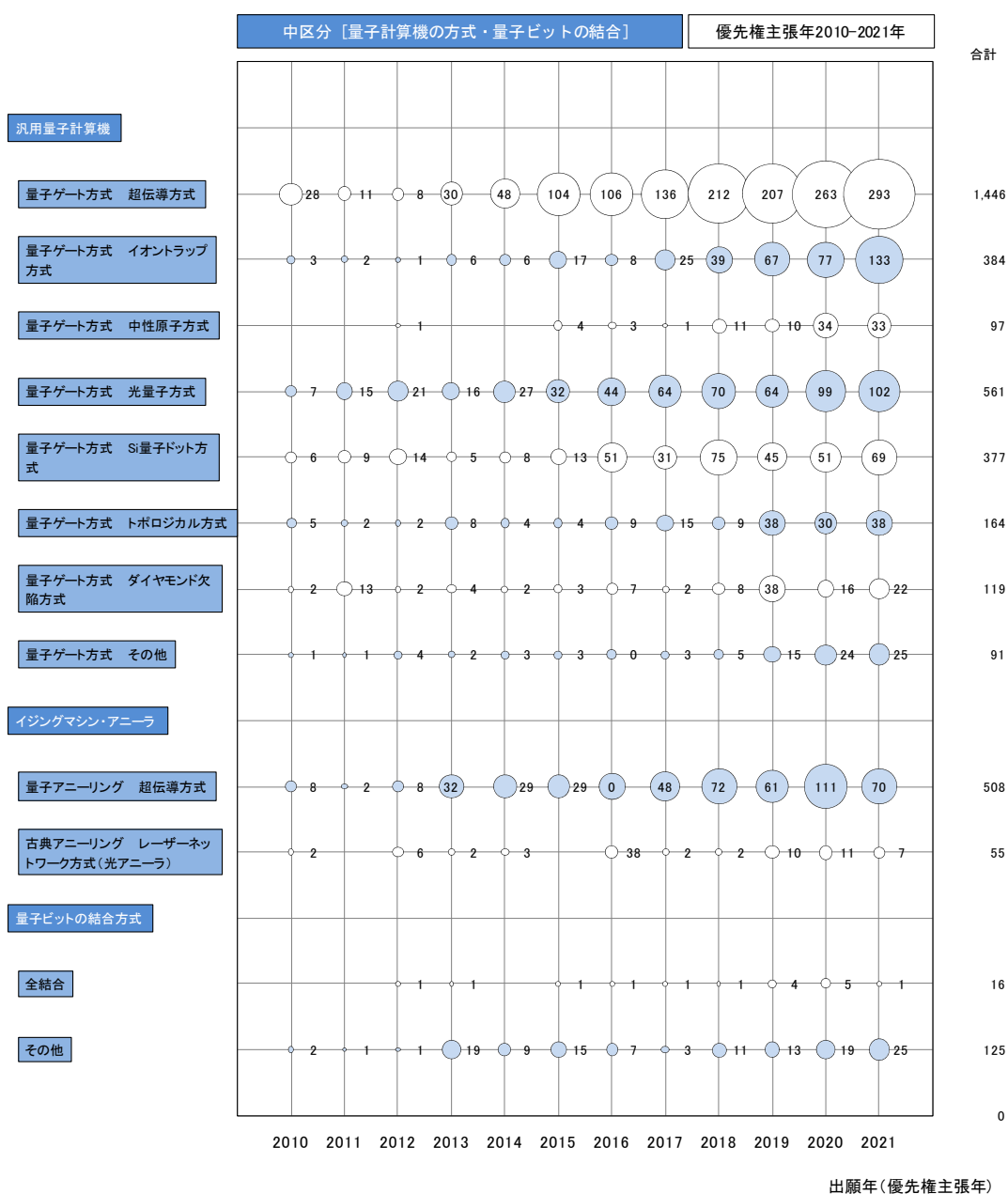


第3節 技術区分別動向

1. 方式別パテントファミリー件数年次推移

方式別パテントファミリー件数年次推移を図4-6に示す。汎用量子計算機の量子ゲート方式 超伝導方式の1,446件（14.7%）が最も多く、次いで汎用量子計算機の量子ゲート方式 光量子方式が561件（5.7%）である。

図4-6 「技術区分別」パテントファミリー件数年次推移（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】〔中区分〕、出願先：日米欧中韓W0、出願年（優先権主張年）：2010年～2021年）

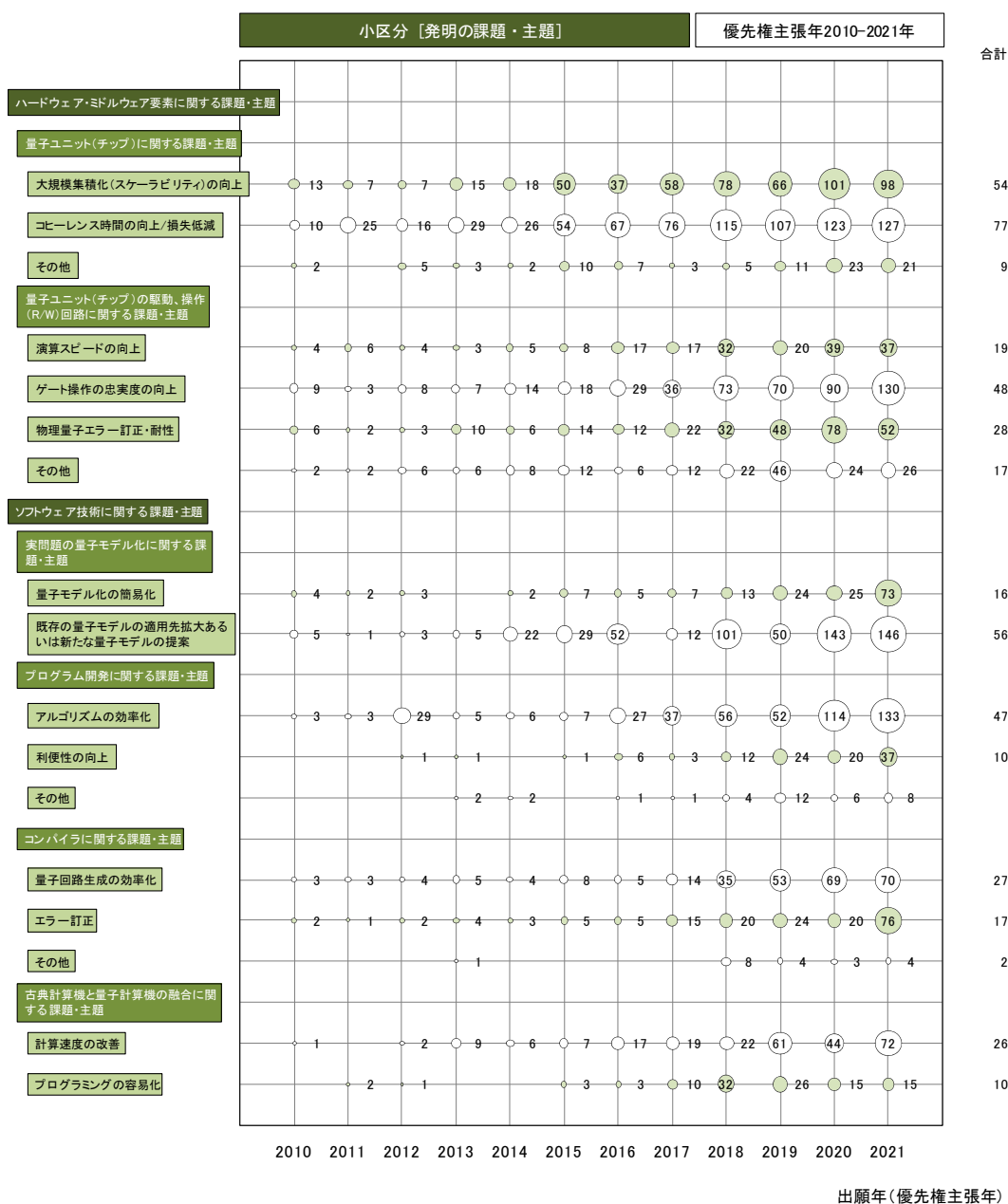


注）2020年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 発明の課題・主題

【発明の課題・主題】の小区分では、【ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題】〔量子ユニット（チップ）に関する課題・主題〕（コヒーレンス時間の向上/損失低減）が 775 件で最も多く 16.4%を占める。次いで、【ソフトウェア技術に関する課題・主題】〔実問題の量子モデル化に関する課題・主題〕（既存の量子モデルの適用先拡大
あるいは新たな量子モデルの提案）が 569 件（12.0%）、【ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題】〔量子ユニット（チップ）に関する課題・主題〕（大規模集積化（スケーラビリティ）の向上）が 548 件（11.6%）である。

図 4-7 「技術区分別」 パテントファミリー件数年次推移（技術区分：【発明の課題・主題】（小区分）、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



注) 2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. ハードウェア・ミドルウェア要素分析

ハードウェア・ミドルウェア要素分析の出願人国籍・地域別パテントファミリー件数の一部を図 4-8 に示す。全体的に米国のパテントファミリー件数が多い。日本は、件数は少ないものの『量子ユニット（チップ）間の I/F に特徴』『電気・磁気・光学的特性に特徴』と『「量子ユニット（チップ）」と、「量子ユニット（チップ）の駆動回路、量子ビット操作（R/W）回路」との間の I/F に特徴』〔コネクタ〕の出願件数が米国に次いで多い（青枠）。

図 4-8 「技術区分別」出願人国籍・地域別パテントファミリー件数（技術区分：量子ゲート方式 超伝導方式、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

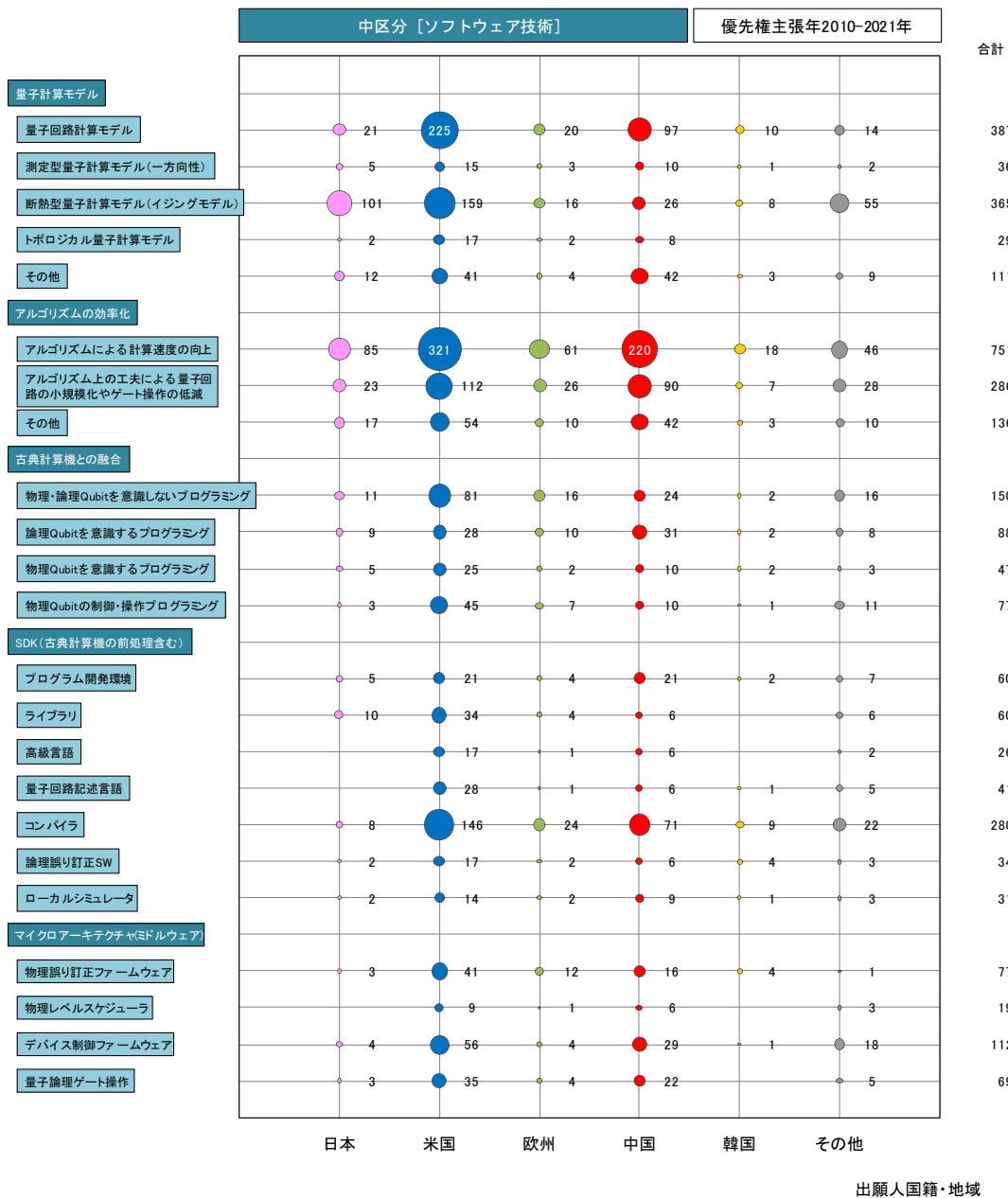


4. ソフトウェア

ソフトウェアの出願人国籍・地域別パテントファミリー件数の一部を図 4-9 に示す。

『アルゴリズムの効率化』〔アルゴリズムによる計算速度の向上〕が 751 件で最も多く 23.0%を占める。次いで、『量子計算モデル』〔量子回路計算モデル〕が 387 件 (11.8%)、『量子計算モデル』〔断熱型量子計算モデル (イジングモデル)〕が 365 件 (11.2%) である。『量子計算モデル』〔断熱型量子計算モデル (イジングモデル)〕は米国の 159 件に次いで日本の出願が 101 件である。

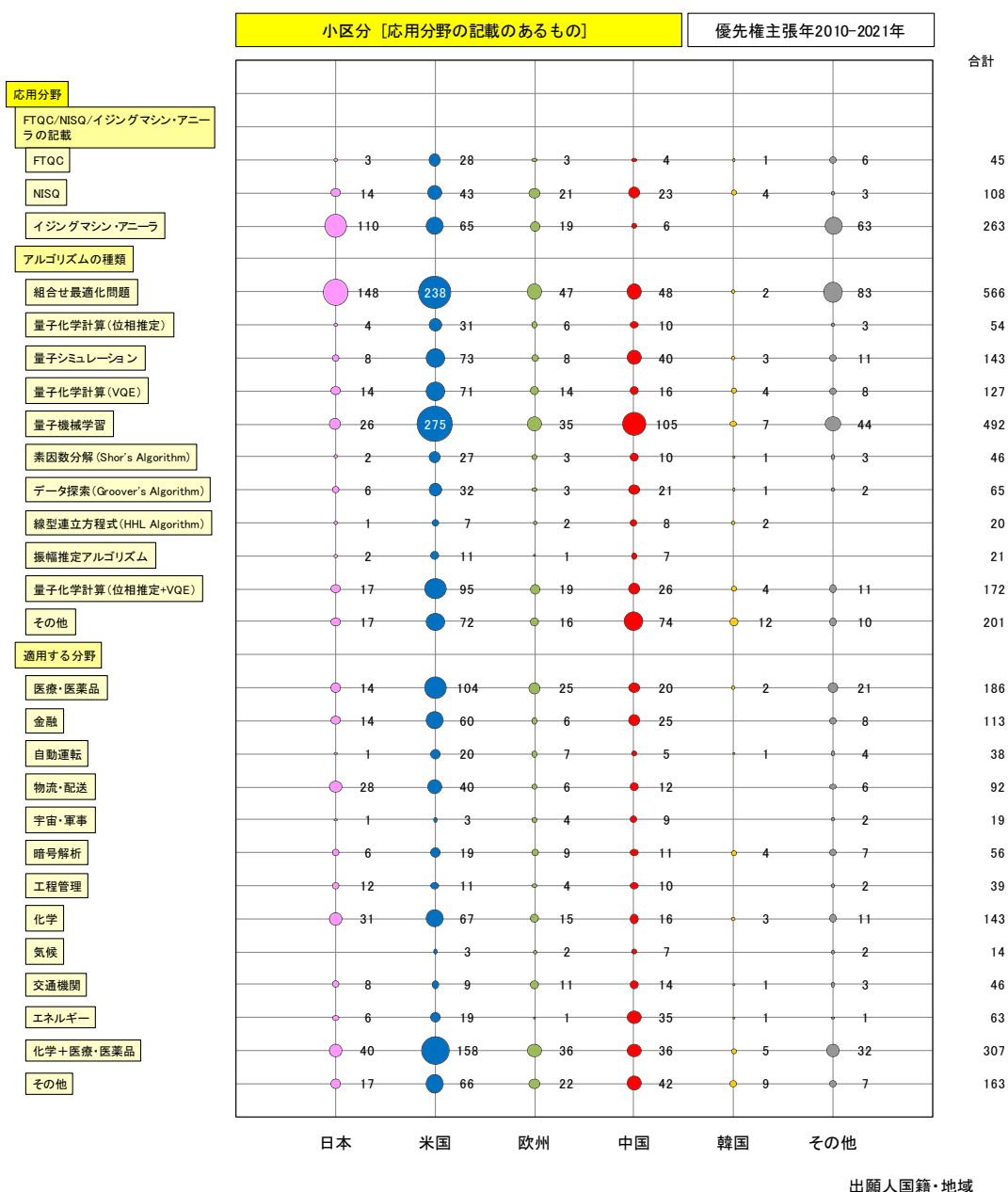
図 4-9 「技術区分別－出願人国籍・地域別」パテントファミリー件数（技術区分：【ソフトウェア技術】〔中区分〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



5. 応用分野

『応用分野』の出願人国籍・地域別パテントファミリー件数を図 4-10 に示す。『応用分野』〔アルゴリズムの種類〕（組合せ最適化問題）が 566 件（6.9%）で最も多く、次いで『応用分野』〔アルゴリズムの種類〕（量子機械学習）が 492 件（6.0%）である。日本は、（量子イジングマシン・アニーラ）が 110 件と最も多い。なお、表 4-1 の技術区分表に記載の小区分「適用する分野無し」については、当該図から削除している点に留意されたい。

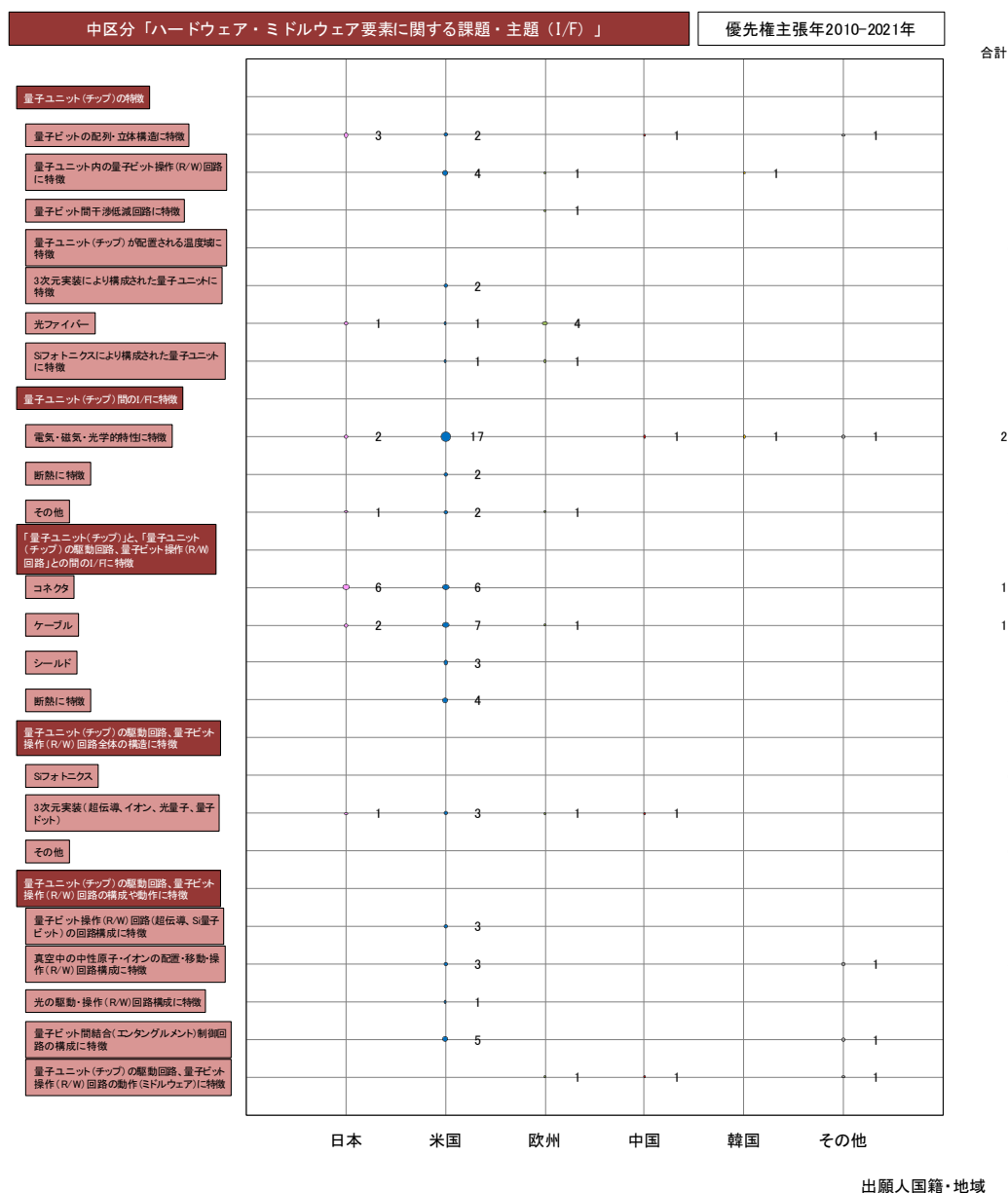
図 4-10 〔技術区分別－出願人国籍・地域別〕パテントファミリー件数（技術区分：【応用分野の記載のあるもの】（小区分）、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



6. インタフェース

【ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題 (I/F)】を図 4-11 に示す。ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題 (I/F) の中区分における技術区分別のпатентファミリー件数の合計（優先権主張年 2010-2021 年）は、『量子ユニット（チップ）間の I/F に特徴』『電気・磁気・光学的特性に特徴』が 22 件で最も多く 21.2%を占める。次いで、『「量子ユニット（チップ）」と、「量子ユニット（チップ）の駆動回路、量子ビット操作（R/W）回路」との間の I/F に特徴』『コネクタ』が 12 件（11.5%）、『「量子ユニット（チップ）」と、「量子ユニット（チップ）の駆動回路、量子ビット操作（R/W）回路」との間の I/F に特徴』『ケーブル』が 10 件（9.6%）である。全体的に件数は少ないが日本はコネクタが 6 件で米国と同じ件数であり、他国・地域は出願がない。

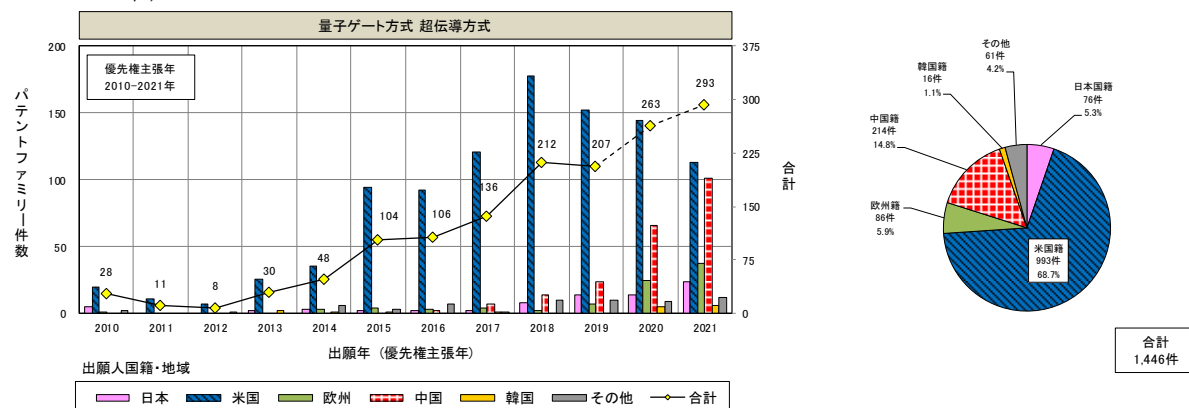
図 4-11 「技術区分別－出願人国籍・地域別」 патентファミリー件数（技術区分：【ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題 (I/F)】〔中区分〕、出願先：日米欧中韓 WO、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



第4節 方式別パテントファミリー件数年次推移及び比率

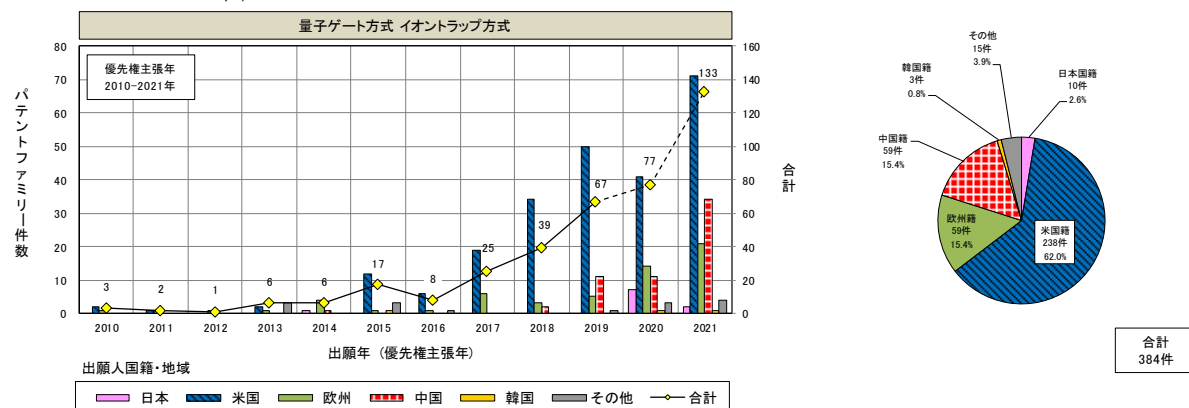
各方式別のパテントファミリー件数年次推移及び比率を図4-12～17に示す。

図4-12 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数年次推移及び比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】『汎用量子計算機』〔量子ゲート方式 超伝導方式〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010年～2021年）



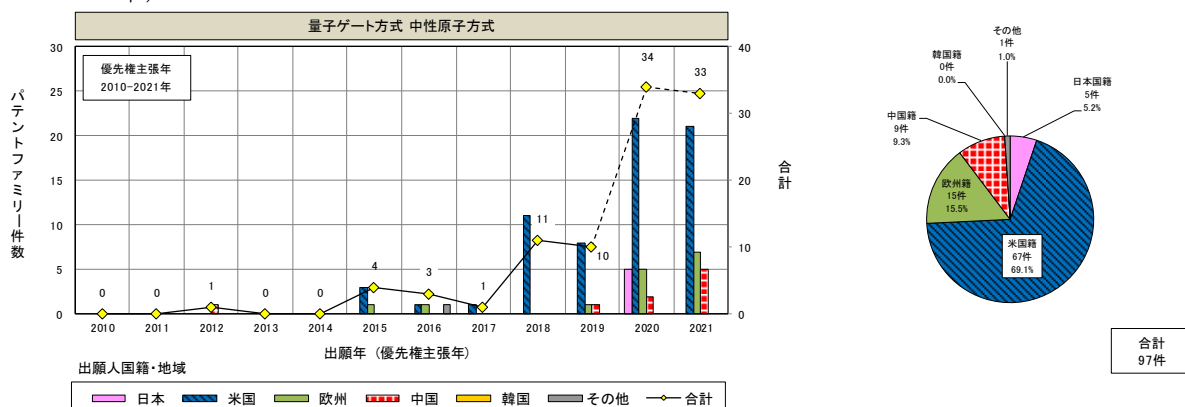
注）2020年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図4-13 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数年次推移及び比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】『汎用量子計算機』〔量子ゲート方式 イオントラップ方式〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010年～2021年）



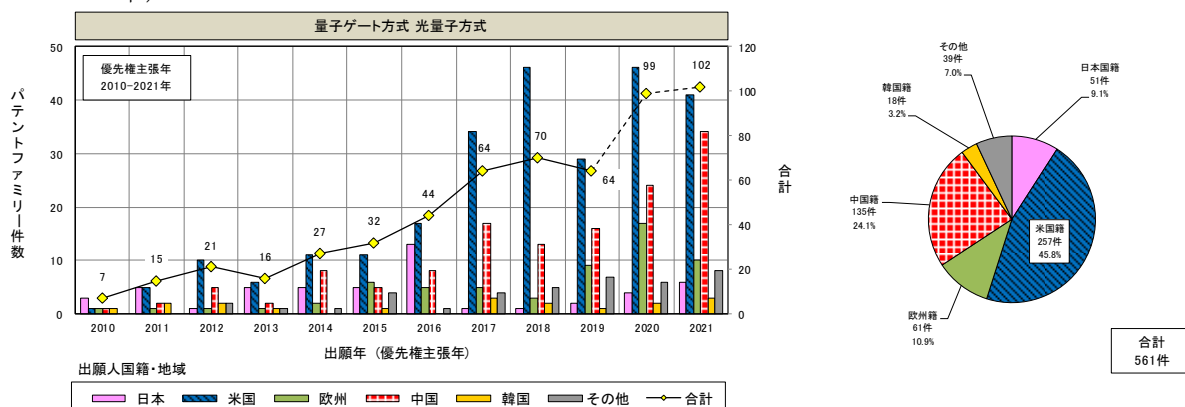
注）2020年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 4-14 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数年次推移及び比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】『汎用量子計算機』〔量子ゲート方式 中性原子方式〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



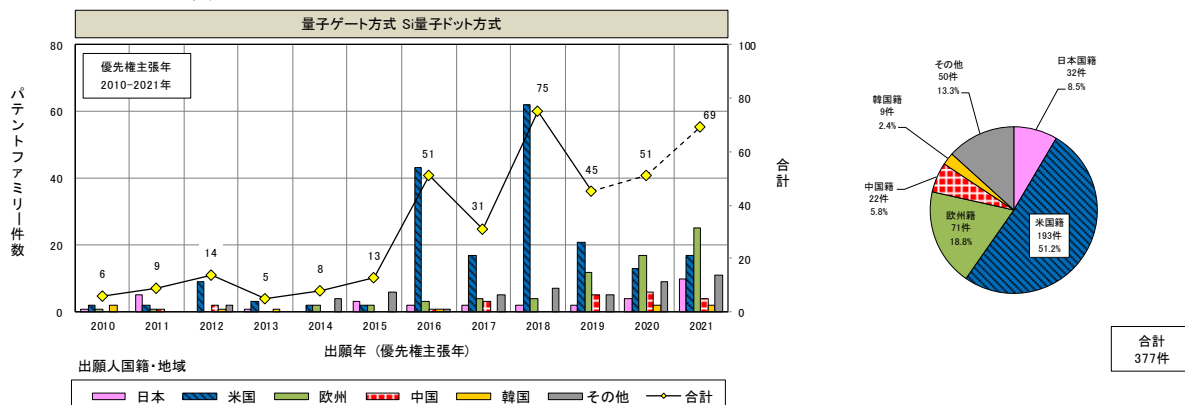
注) 2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 4-15 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数年次推移及び比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】『汎用量子計算機』〔量子ゲート方式 光量子方式〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



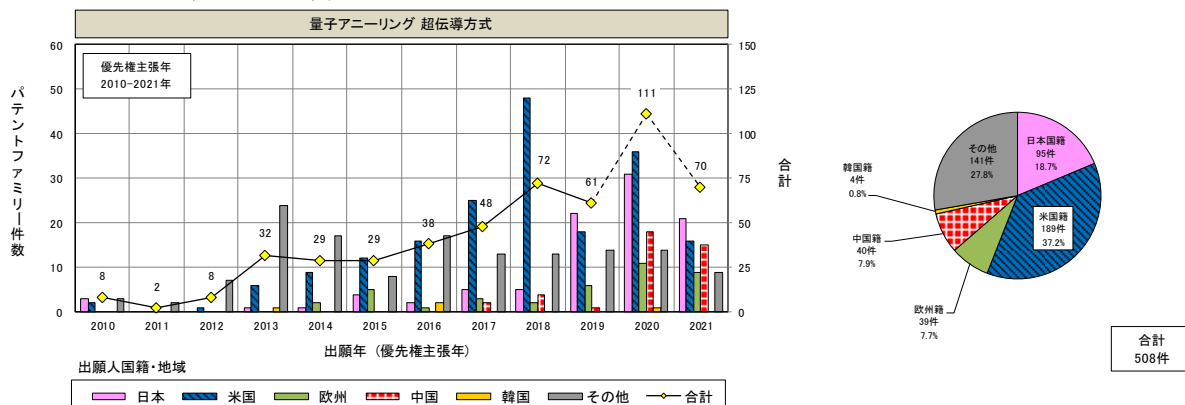
注) 2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 4-16 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数年次推移及び比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】『汎用量子計算機』〔量子ゲート方式 Si 量子ドット方式〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



注) 2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 4-17 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数年次推移及び比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】『イジングマシン・アニーラ』〔量子アニーリング 超伝導方式〕、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）



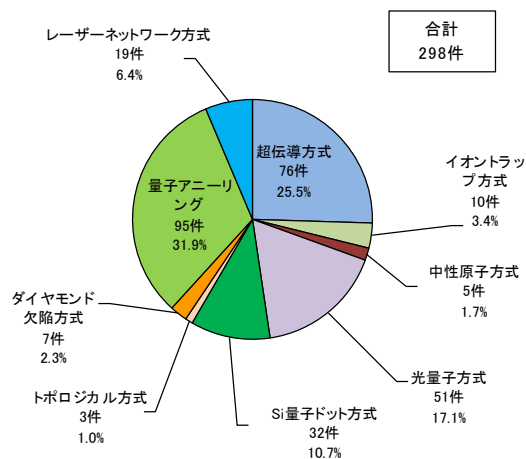
注) 2020 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

第5節 方式別動向

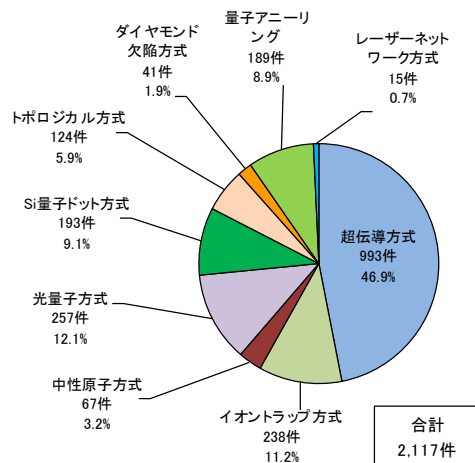
日本、米国、欧州、中国、韓国のパテントファミリー件数方式別比率を図 4-18 に示す。
日本は量子アニーリング 超伝導方式、超伝導方式、光量子方式の件数が多い。

図 4-18 [技術区分別][出願人国籍・地域別] パテントファミリー件数比率（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】量子計算機の方式別、出願人国籍：日米欧中韓、出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

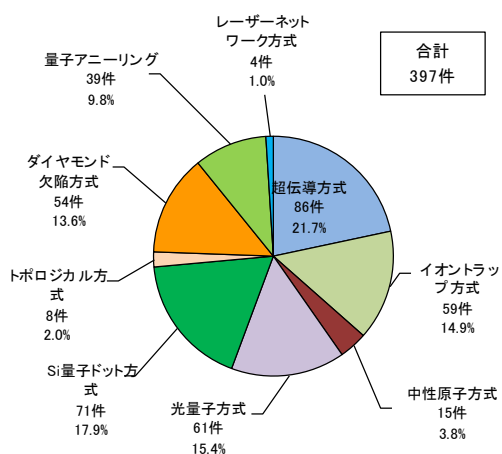
[日本]



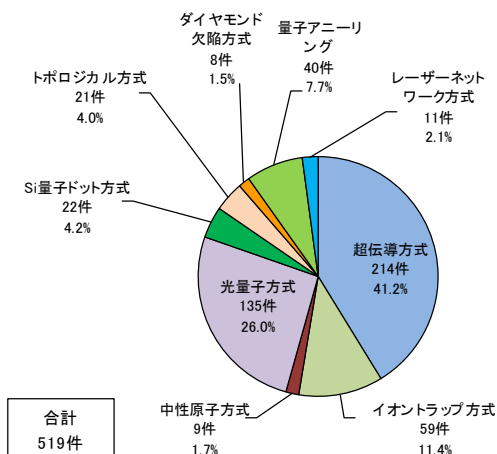
[米国]



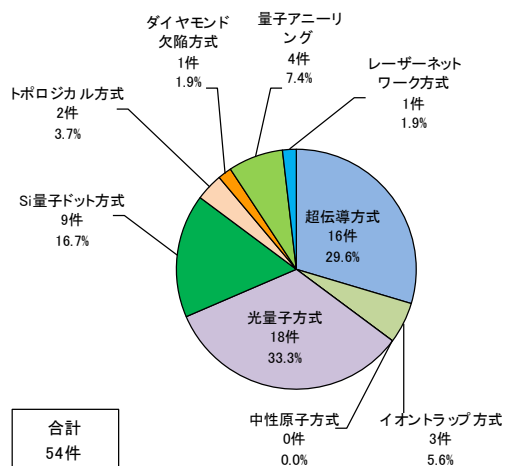
[欧州]



[中国]



[韓国]



第6節 出願人別動向

パテントファミリー件数上位出願人ランキングを表 4-2 に示す。上位 10 者のうち 6 者が米国企業である。その中でも IBM（米国）のパテントファミリー件数が特に多い。

表 4-2 パテントファミリー件数上位出願人ランキング（出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

順位	出願人(国籍・地域)	件数
1	IBM(米国)	745
2	ORIGIN QUANTUM COMPUTING TECH(HEFEI) CO LTD(中国)	288
3	MICROSOFT CORP(米国)	214
4	INTEL CORP(米国)	170
5	GOOGLE INC(米国)	163
6	D WAVE SYSTEMS INC(カナダ)	158
7	NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS CORP(米国)	110
8	BEIJING BAIDU NETCOM SCI & TECH CO(中国)	95
9	富士通株式会社	91
10	RIGETTI & CO INC(米国)	87
11	IONQ INC(米国)	75
12	PSIQUANTUM CORP(米国)	73
13	日本電気株式会社	72
14	日本電信電話株式会社	57
14	CHINESE ACAD SCI(中国)	57
16	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECH(MIT)(米国)	55
17	RED HAT INC(米国)	50
17	UNIV TSINGHUA(中国)	50
19	UNIV CHINA SCI & TECH(中国)	46
20	UNIV MARYLAND(米国)	45

国際パテントファミリー件数上位出願人ランキングを表 4-3 に示す。上位 10 社のうち 5 社が米国企業である。その中でも IBM（米国）の国際パテントファミリー件数が特に多い。

表 4-3 国際パテントファミリー件数上位出願人ランキング（出願先：日米欧中韓 W0、出願年（優先権主張年）：2010 年～2021 年）

順位	出願人(国籍・地域)	件数
1	IBM(米国)	316
2	MICROSOFT CORP(米国)	174
3	GOOGLE INC(米国)	128
4	INTEL CORP(米国)	98
5	NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS CORP(米国)	83
6	富士通株式会社	80
7	日本電気株式会社	61
8	D WAVE SYSTEMS INC(カナダ)	59
9	ORIGIN QUANTUM COMPUTING TECH(HEFEI) CO LTD(中国)	51
10	TENCENT(中国)	37
11	株式会社東芝	34
11	RIGETTI & CO INC(米国)	34
13	株式会社日立製作所	31
13	HARVARD COLLEGE(米国)	31
13	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECH(MIT)(米国)	31
13	ZAPATA COMPUTING INC(米国)	31
17	COMMISSARIA A LENERGIE ATOMIQUE & AUX(CEA)(フランス)	30
18	PSIQUANTUM CORP(米国)	29
18	IQM QUANTUM COMPUTERS(フィンランド)	29
20	HONEYWELL INT INC(米国)	25
20	BEIJING BAIDU NETCOM SCI & TECH CO(中国)	25

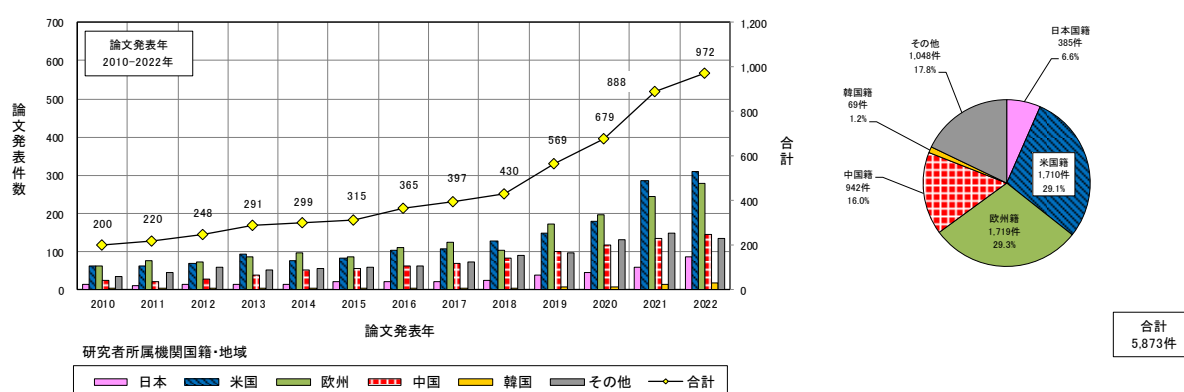
第5章 研究開発動向調査

第1節 全体動向

論文発表件数年次推移及び論文発表件数比率を研究者（筆頭著者）所属機関の国籍・地域別で見ると図5-1のようになる。

本調査において集計の対象となった全期間（2010-2022年）での研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数は、日米欧中韓で比較すると、欧州籍が1,719件（29.3%）で最も多く、米国籍が1,710件（29.1%）、中国籍が942（16.0%）、日本国籍が385件（6.6%）、韓国籍が69件（1.2%）と続く。米国籍と欧州籍が近年、件数が増加している。

図5-1 研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数年次推移及び論文発表件数比率（論文発表年：2010年～2022年）



論文発表件数上位研究者（筆頭著者）所属機関ランキングを表 5-1 に示す。上位 30 者中、米国が 13 者、欧州が 7 者、中国が 4 者、日本が 2 者、その他が 4 者である。

表 5-1 論文発表件数上位研究者（筆頭著者）所属機関ランキング（論文発表年：2010 年～2022 年、全体）

順位	研究者所属機関(国籍・地域)	件数
1	UNIVERSITY OF CALIFORNIA(米国)	121
2	UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA(中国)	120
3	UNIVERSITY OF MARYLAND(米国)	106
4	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY(米国)	91
5	TSINGHUA UNIVERSITY(中国)	82
6	UNIVERSITY OF WATERLOO(カナダ)	80
7	国立大学法人東京大学	79
8	DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY(オランダ)	73
9	UNIVERSITY OF OXFORD(イギリス)	70
10	UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA(米国)	67
11	ETH ZURICH(スイス)	65
12	HARVARD UNIVERSITY(米国)	64
12	CHINESE ACADEMY OF SCIENCES(中国)	64
14	UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES(オーストラリア)	59
15	YALE UNIVERSITY(米国)	57
16	PRINCETON UNIVERSITY(米国)	54
17	UNIVERSITY OF INNSBRUCK(オーストリア)	52
18	IBM(米国)	51
19	UNIVERSITY OF CHICAGO(米国)	45
20	CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY(米国)	44
21	国立研究開発法人理化学研究所(RIKEN)	42
21	NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY(米国)	42
21	UNIVERSITY COLLEGE LONDON(イギリス)	42
21	UNIVERSITY OF SYDNEY(オーストラリア)	42
25	UNIVERSITY OF BRISTOL(イギリス)	38
26	NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE(シンガポール)	36
27	STANFORD UNIVERSITY(米国)	35
28	LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY(米国)	33
29	UNIVERSITY OF BASEL(スイス)	32
30	PEKING UNIVERSITY(中国)	31

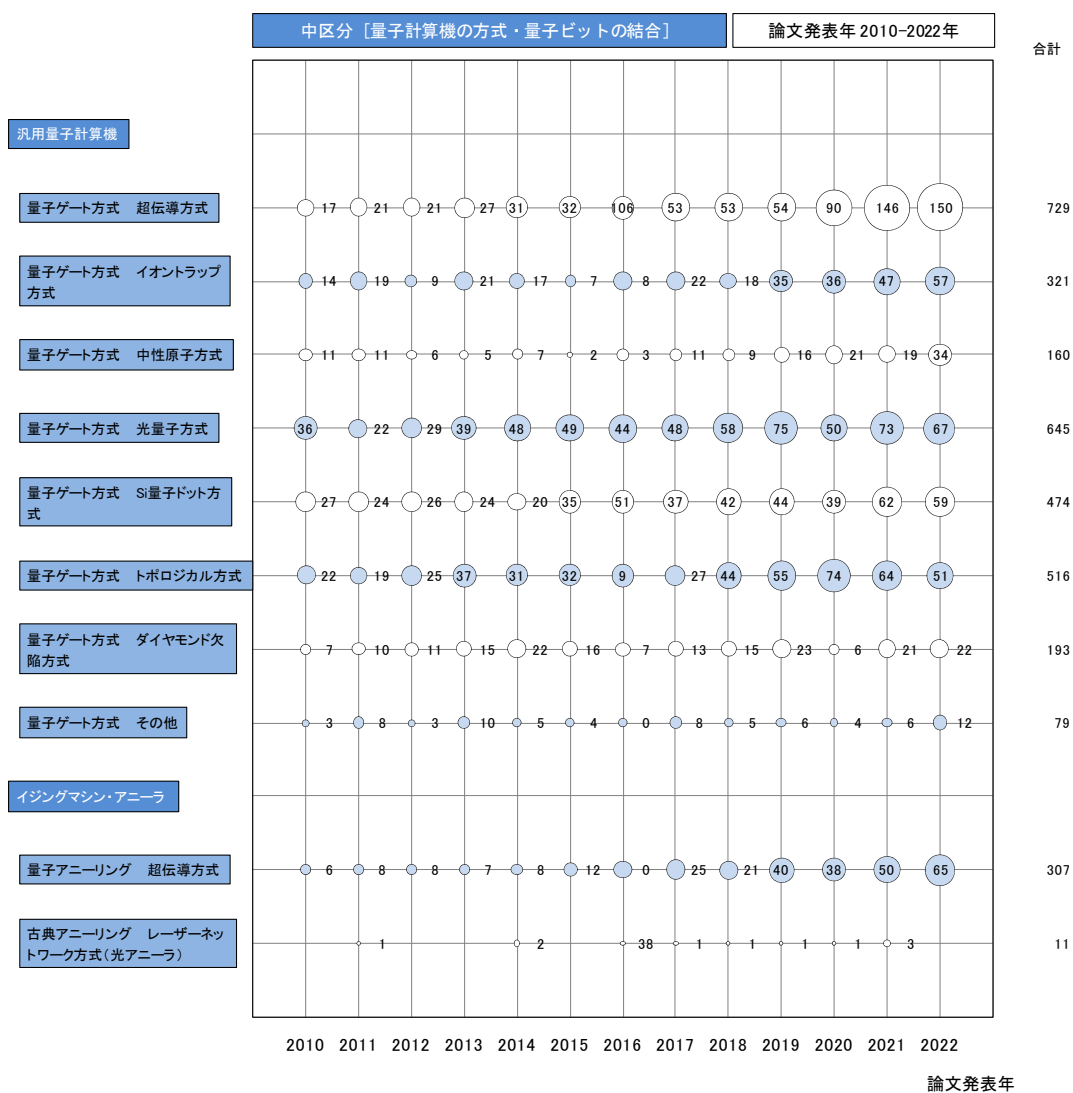
第2節 技術区分別動向

1. 方式別論文発表件数年次推移

量子計算機の方式別論文発表件数年次推移を図5-2に示す。

量子計算機の方式別論文発表件数の合計（論文発表年2010～2022年）は、『汎用量子計算機』〔超伝導方式〕が729件で最も多く、次いで『汎用量子計算機』〔光量子方式〕が645件、『汎用量子計算機』〔トポロジカル方式〕が516件である。

図5-2 技術区分別—論文発表件数年次推移（技術区分：【量子計算機の方式・量子ビットの結合】〔中区分〕、論文発表年：2010年～2022年）

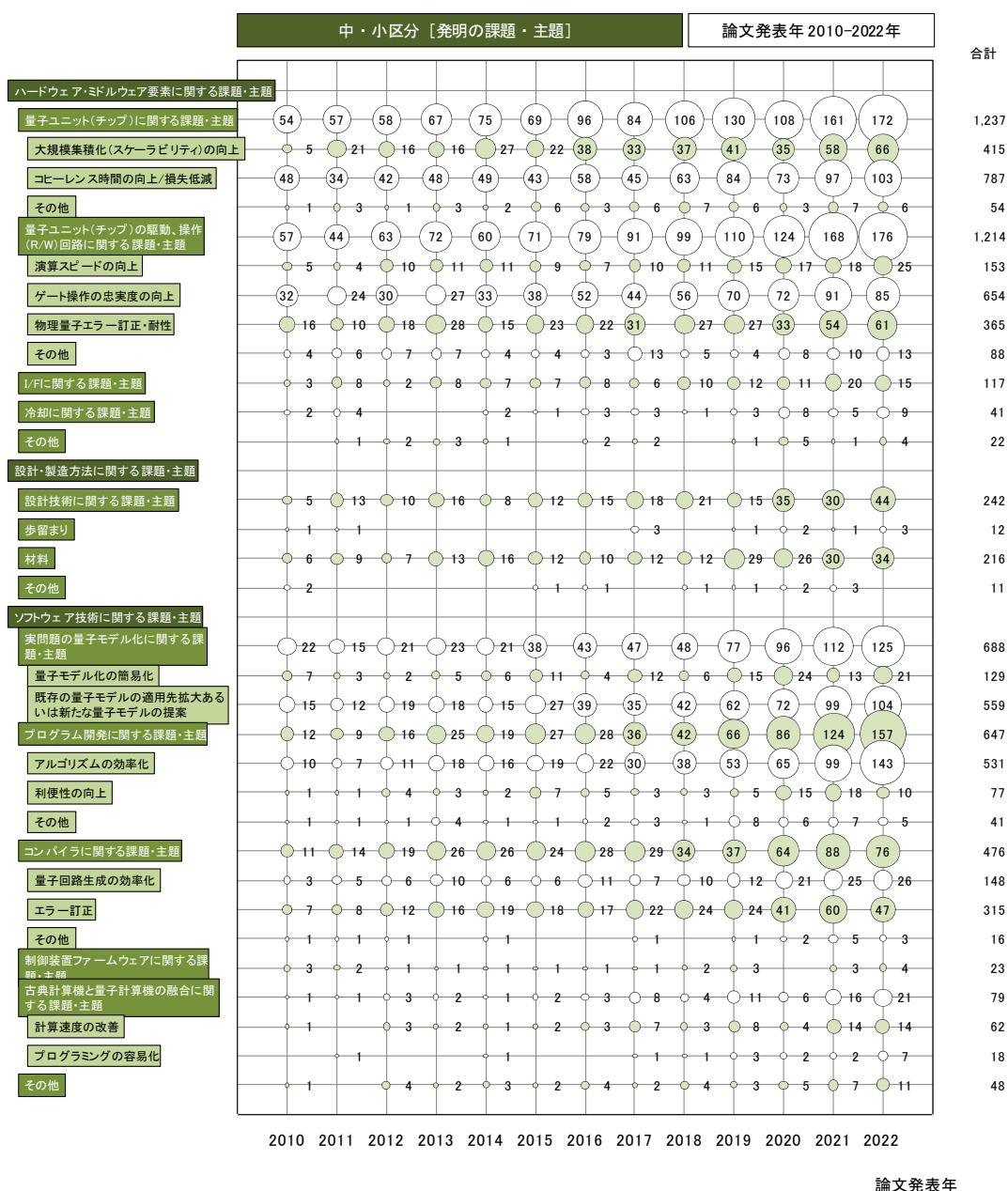


2. 発明の課題・主題

中区分では、『ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題』『量子ユニット（チップ）に関する課題・主題』が 1,237 件で最も多い。次いで、『ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題』『量子ユニット（チップ）の駆動、操作（R/W）回路に関する課題・主題』が 1,214 件である。

また、小区分では、『ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題』『量子ユニット（チップ）に関する課題・主題』（コヒーレンス時間の向上/損失低減）が 787 件で最も多い。『ソフトウェア技術に関する課題・主題』『プログラム開発に関する課題・主題』（アルゴリズムの効率化）が近年増えてきている。

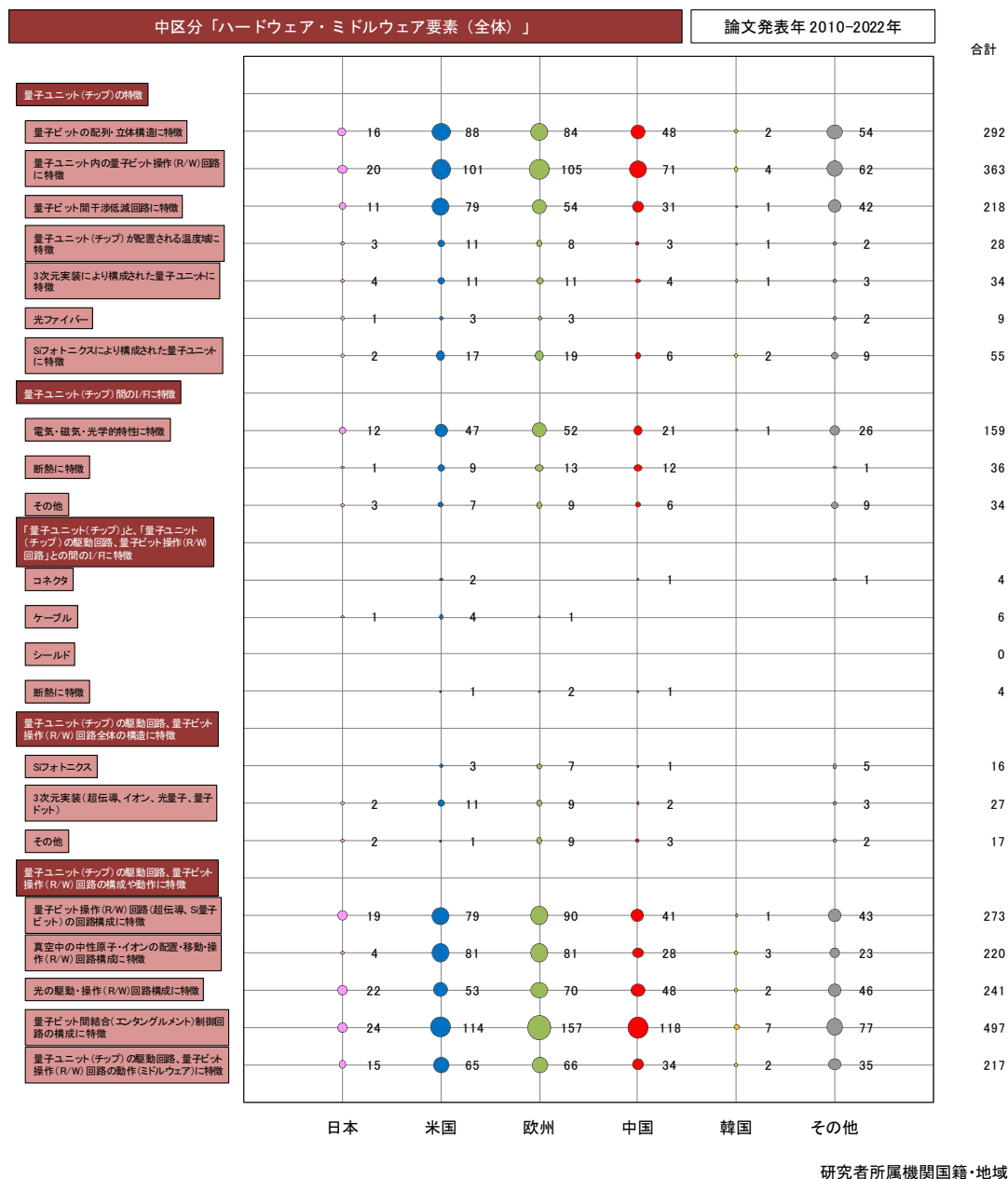
図 5-3 「技術区分別」論文発表件数年次推移（技術区分：発明の課題・主題の中・小区分、論文発表年：2010 年～2022 年）



3. ハードウェア・ミドルウェア要素分析

ハードウェア・ミドルウェア要素の研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数を図 5-4 に示す。

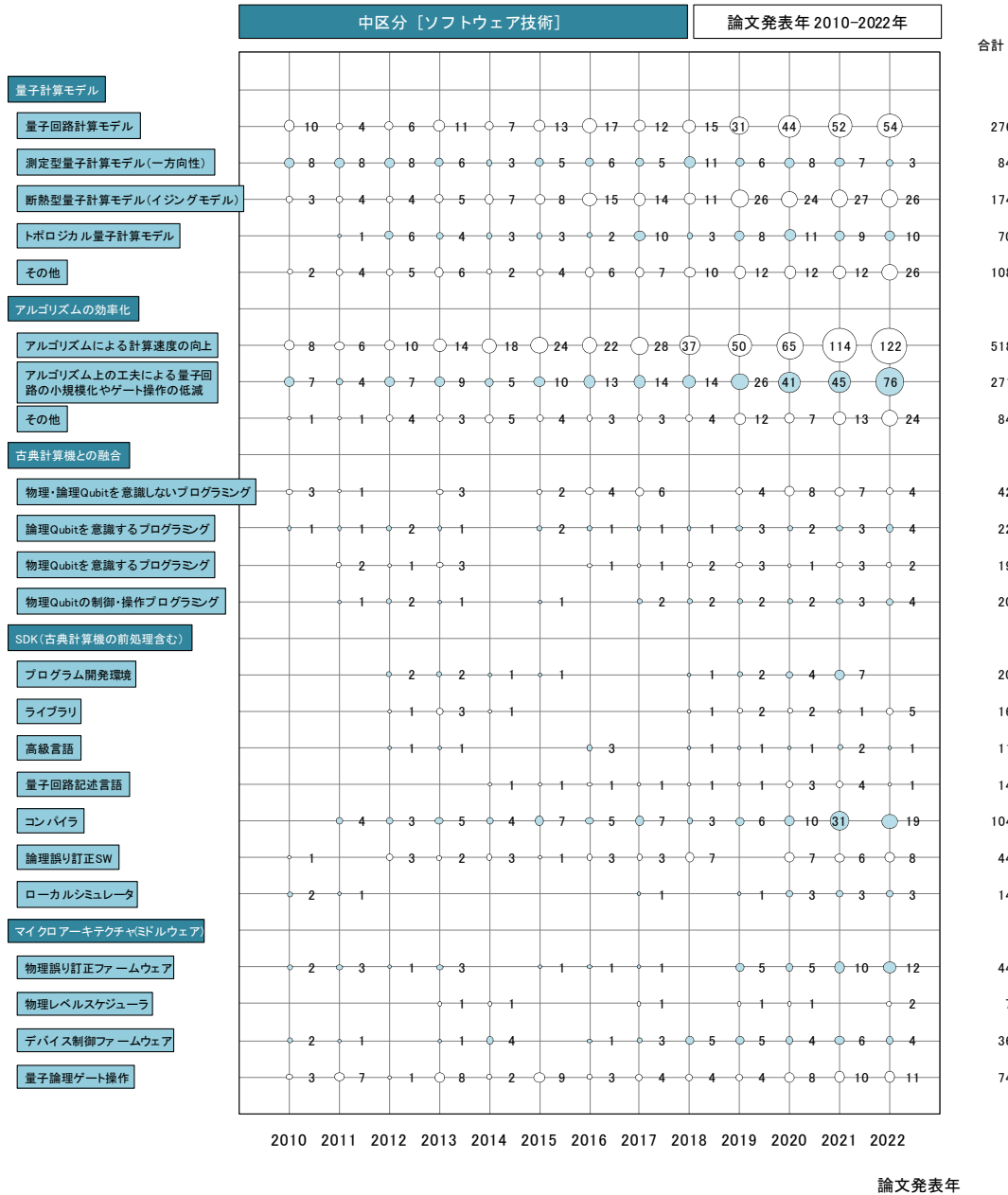
図 5-4 ハードウェア・ミドルウェア要素の研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数（論文発表年：2010 年～2022 年）



4. ソフトウェア

ソフトウェアの研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数を図 5-5 に示す。

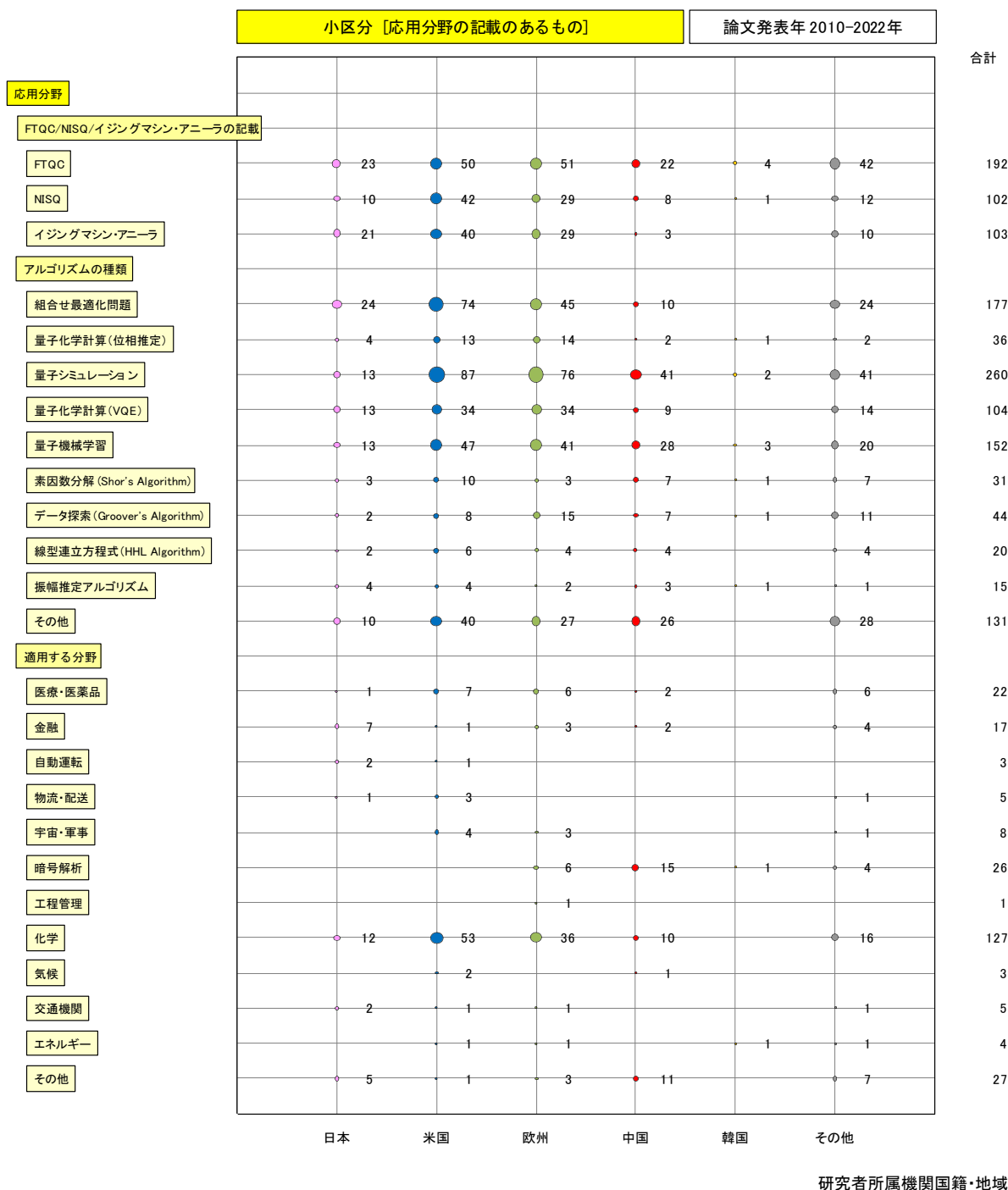
図 5-5 技術区分別一論文発表件数年次推移（技術区分：【ソフトウェア技術】〔中区分〕、論文発表年：2010 年～2022 年）



5. 応用分野

応用分野の研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数を図 5-6 に示す。なお、表 4-1 の技術区分表に記載の小区分「適用する分野無し」については、当該図から削除している点に留意されたい。

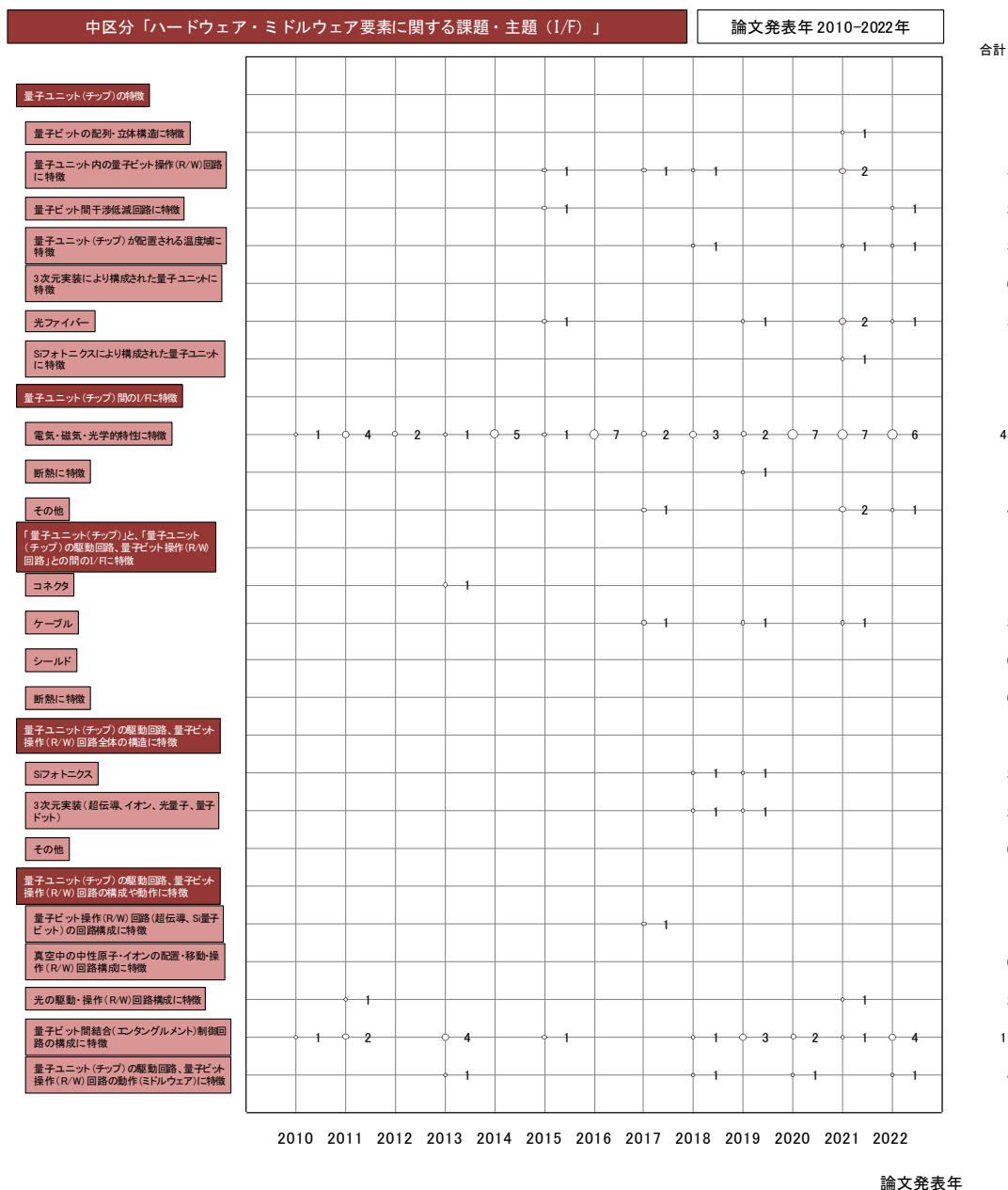
図 5-6 技術区分別—研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数（技術区分：【応用分野の記載のあるもの】（小区分）、論文発表年：2010 年～2022 年）



6. インタフェース

ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題（I/F）の研究者所属機関国籍・地域別論文発表件数を図 5-7 に示す。

図 5-7 技術区分別—論文発表件数年次推移（技術区分：【ハードウェア・ミドルウェア要素に関する課題・主題（I/F）】〔中区分〕、論文発表年：2010 年～2022 年）



第6章 総合分析

第1節 市場環境調査／政策動向調査

市場環境調査によると、量子計算機関連の市場は規模が拡大すると予想されている。方式別では超伝導方式、アニーリング方式、イオントラップ方式が伸びると予想されている。また、量子計算機関連技術の市場は各方式で幅広い応用分野に広がり規模が拡大すると予想されている。2020年の量子計算機関連市場の企業別シェアでは、IBM（米国）が25-30%でトップ、次いでAmazon Web Service（米国）が8-12%、Microsoft（米国）が4-7%、Rigetti Computing（米国）が3-5%、D-Wave Quantum Inc.（D-Wave Systems）（カナダ）が2-3%と続いており、TOP5は全て北米の企業が占めている。日本では、中性原子方式において、自然科学研究機構 分子科学研究所 大森賢治教授のグループが単一原子レベルで世界最速の2量子ビットゲートに成功した。この研究開発により中性原子方式は、従来からの中性原子方式の長所も相まって、一躍、世界中の産学界より注目を集める次世代プラットフォームとなっており世界をリードしている。（15 ページ～24 ページ参照）

政策動向調査によると、日本、米国、欧州、中国、韓国とも、国家レベルで量子計算機の研究開発に取り組んでおり多額の予算を充てている。プロジェクトも多岐にわたっており、大学や公的研究機関、企業一体となってエコシステムやサプライチェーンを網羅した取組もみられる。（25 ページ～46 ページ参照）

第2節 特許動向調査／研究開発動向調査

特許動向調査によると、パテントファミリー件数年次推移では、2012年から毎年増加している。また、米国が49.9%の比率を占め、近年では中国の出願が多くなっている。パテントファミリー件数上位出願人ランキングでは、上位10者のうち6者が米国企業である。その中でもIBM（米国）のパテントファミリー件数が特に多い。方式別では、ほとんどの方式が増加傾向にある。超伝導方式の1,446件（14.7%）が最も多く、次いで光量子方式が561件（5.7%）である。（54 ページ～68 ページ参照）

研究開発動向によると、論文発表件数年次推移では、日米欧中韓で比較すると、欧州籍が1,719件（29.3%）で最も多く、米国籍が1,710件（29.1%）、中国籍が942件（16.0%）、日本国籍が385件（6.6%）、韓国籍が69件（1.2%）と続く。米国籍と欧州籍が近年、件数が増加している。論文発表件数上位研究者（筆頭著者）所属機関ランキングでは、上位30者中、米国が13者、欧州が7者、中国が4者、日本が2者である。量子計算機の方式別論文発表件数年次推移では各方式で増加している。〔量子ゲート方式 超伝導方式〕が729件（7.8%）で最も多く、次いで〔量子ゲート方式 光量子方式〕の645件（6.9%）である。いずれも増加している。『イジングマシン・アニーラ』では、〔量子アニーリング超伝導方式〕が多く増加している。（69 ページ～76 ページ参照）

このように市場の拡大が予想され、各国の政策では国家レベルで研究開発に取り組んでおり、その状況が特許動向調査、研究開発動向調査で裏付けられた結果となっている。

第3節 提言・示唆

提言・示唆0：量子計算機全体動向

現在提案されている主要な量子計算機の方式の多くで、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「量子エラー訂正」を課題・主題とした出願が多くなされている。これら3つの技術課題は相互に関係しており、大規模かつコヒーレンス性能の高い誤り訂正汎用量子計算機を実現するため、各方式においてこれらの技術の研究開発が重要である。

また、日本はインタフェース技術や構成部品技術で強みを持っており研究開発・製品化のアクティビティが高い。日本はこれらの周辺・要素技術の強みをいかしつつ、長期的視野に立って誤り耐性汎用量子計算機を目指した要素技術開発と「装置インテグレーション」や「システムインテグレーション」に関する技術開発や特許出願を積極的に進めていくべきである。

調査分析結果及びアドバイザリーボードでの議論を踏まえ、今後、我が国の企業・大学が目指すべき研究開発・技術開発の方向性を、表6-1に示すように、方式別などの観点で8つの提言・示唆としてまとめた。

なお、本調査における特許出願動向調査および研究開発動向調査は、2010年～2021年に出願（優先権主張）された特許、および2010年～2022年に公開された論文を調査対象としている。

さらに、本調査における詳細解析の対象とした特許文献の母集団は、量子計算機に関する国際特許分類が付与された特許文献、ないしは関連する国際特許分類が付与されるとともに量子計算機関連キーワードが含まれる特許文献を母集団として設定している。また、本調査における詳細解析の対象とした論文の母集団は、量子計算機に対応する国際的に主要な論文・学会誌の中で量子計算機関連キーワードが含まれる論文を母集団として設定している。

本調査にて示す提言・示唆のそれぞれは、上記の調査条件に基づいて得られた結果を基に、アドバイザリーボードでの議論等を踏まえてまとめたものである点に留意されたい。

調査の結果、現在提案されている主要な量子計算機の方式の多くで、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「量子エラー訂正」が課題・主題としてあげられていることから、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「量子エラー訂正」を課題・主題とした出願が多くなされていることがわかる。これら3つの技術課題は、相互に関係している。例えば、量子エラー訂正を行う場合、低損失かつ大量の量子ビットが必要となり、低損失はコヒーレンス時間の向上に寄与し、大量の量子ビットは大規模な量子アルゴリズムを実行するためのスケーラビリティを提供する。これらの要素は組み合わせることで、信頼性の高い誤り耐性汎用量子計算機が実現可能となる。現在、世界的に見ても本命となる方式が定まっていない状況においては、日本にとって各方式におけるこれらの技術の研究開発の継続が重要である。

また、調査分析の結果、IBM（米国）の特許ファミリー件数が他者と比較して際立っ

て多く、方式では超伝導方式を中心に、インタフェース・構成部品や希釈冷凍機を含めたシステム、PaaS (Platform as a Service) や量子機械学習を含むソフトウェア技術等トータルシステムを見据えた特許出願を行っていることが分かった。しかしながら、トータルシステムで「装置インテグレーション」「システムインテグレーション」を念頭に置いた特許はまだ数件程度と少ない。

量子計算機は各方式で研究開発が進んでいるが、実用化までは数十年の研究開発が必要となると言われている。さらに、要素・周辺技術の開発だけでなく計算機としてのインテグレーション技術の開発や特許出願を行うことが今後益々重要となる。しかしながらインテグレーションに関する特許の件数は少なく、将来大きな差別化が可能な技術である。日本は周辺・構成部素材技術である光学部品の光源、光検出器、光変調器やマイクロ波によるインタフェース技術、光-マイクロ波への量子情報メディア変換技術やマイクロ波コネクタ/ケーブル技術で強みを持っており研究開発や製品化のアクティビティが高い。日本はこれらの周辺・要素技術の強みをいかしつつ、長期的視野に立って誤り耐性汎用量子計算機のための要素技術開発に加えて「装置インテグレーション」、「システムインテグレーション」に関する技術の開発や特許出願を積極的に進めていくべきである。

表 6-1 各方式とインタフェース・構成部品、ソフトウェアの提言・示唆

	方式	内容
提言・示唆 1	超伝導方式	超伝導方式の量子計算機において、技術開発で先行している米国は、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「エラー訂正技術」への出願が他国に比べて多く、技術の蓄積があるといえる。日本は極低温で動作可能な同軸ケーブルやコネクタ等の周辺・構成部素材技術の強みをいかしつつ、今後も「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「エラー訂正」の要素技術開発に注力しながら、計算機システムとしてのインテグレーション技術の開発に取り組むことが重要である。
提言・示唆 2	イオントラップ方式	イオントラップ方式の量子計算機は、低誤り率かつコヒーレンス時間の長い量子ビットを実現できることから、有力な量子計算機の方式の一つとして、米国や欧州において、早い段階で大型投資が行われ積極的に研究開発が進められている。日本においても、比較的早い段階から基礎研究が進められ、現在ではムーンショットや Q-LEAP などの国家プロジェクトにおいて研究開発が進められている。イオントラップ方式特有の課題を解決するために、実用化に向けて「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「エラー訂正技術」の特許出願が多い。特に、大規模化が課題であり、日本でも行われている光による量子情報処理ユニット間接続は、将来大きな差別化が可能な技術である。これらの強みをいかしつつ同方式の研究開発を推進することが重要である。
提言・示唆 3	中性原子方式	中性原子方式は、量子シミュレーションとしての研究開発から量子計算機の研究開発に急速に移りつつあり、量子計算機としての特許出願件数も増加している。市場が一気に立ち上がり、有望な量子計算機として、世界中の研究機関から注目を集め始めている。特に、大規模化に適しており、量子誤り訂正等の論理量子ビットの実現において、他の方式に比べて強みを発揮している。米国や欧州において、早い段階で大型の投資が行われ積極的に研究開発が進められている。日本においても、ムーンショットや Q-LEAP などの国家プロジェクトにおいて研究開発が進められ世界をリードする成果も創出されている。中性原子方式は多くが光関連技術によって構成され、重要部品に国産製品も使われている。これらの強みをいかしつつ同方式の研究開発を推進することが重要である。
提言・示唆 4	光量子方式	現時点で光量子方式の量子計算機の市場規模は小さいが、量子ビットの接続性や制御性、量子モジュール間の接続、長期的には量子インターネットとの親和性から、市場の主流になる可能性がある。また、各国が注力して研究開発をしているがまだ特許の件数は少なく、スクイズド光源、単一光子光源、光検出器等の技術で将来差異化できる可能性がある。日本は周辺技術である光学部品の量子もつれ光源、光検出器、光変調器、シリコンフォトニクス技術や石英系導波路技術による平面光集積回路などの研究開発が盛んである。光量子特有の課題として、光子損失によるエラー率の増大、単一光子生成技術、光集積化技術、量子ビット数の増大、ビット間結合操作技術の確立等がある。これらの課題解決に向けて、光学部品技術の高性能化とともに量子エラー訂正技術の研究開発を続けていくことが重要である。
提言・示唆 5	Si 量子ドット方式	Si 量子ドット方式の量子計算機は、現状、超伝導方式に比べ集積度が低いが、長期的には先端 CMOS 技術の流用性から、市場の主流になる可能性があり、米国を中心に世界的に研究開発が盛んである。日本は、高忠実量子論理ゲート、同位体シリコン技術、量子エラー訂正技術などで基礎研究開発のアクティビティが非常に高い。その一方で、誤り耐性汎用量子計算機に向けた大規模集積化技術やクライオ CMOS などの制御回路技術においては、欧米に大きく遅れをとっている。そのため、コヒーレンス性能と集積度向上のための設計・製造・制御・評価の技術開発を続けていくことが重要である。また半導体業界も巻き込みながら、基盤技術や IP を戦略的に確保することも重要である。
提言・示唆 6	量子アニーリング超伝導方式	量子アニーリング超伝導方式は、D-Wave Systems(カナダ)が商用化で先行している。その要因として「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」で先行していることや多くの企業へのソリューションサービスの提供があげられる。しかし、量子アニーリングの従来古典計算技術や古典アニーリングに対する優位性は、理論的にも実機ベンチマーキングにおいても未だに示されていない。そのため、量子アニーリングの優位性を示しうる産業応用領域の探索が課題となる。さらに、これまで培われてきた設計・製造・実装・制御・インターフェース・インテグレーション・ソフトウェア技術を超伝導量子計算機（ゲート型）の開発に転用することで、誤り耐性汎用量子計算機の早期実現に繋げていくことも重要である。
提言・示唆 7	インタフェース・構成部品	各方式において、大規模化および製品化を進めていくためには、インタフェースや構成部品が重要となる。スケーラビリティを獲得するためには、モジュール化された情報処理ユニット QPU を接続するためのインタフェースを介して、全体として大規模な QPU として動作させることが不可欠である。また、システム全体のインテグレーションを考えた構成部品などの周辺技術の開発が不可欠である。 日本は、この QPU 間を接続するインタフェース技術の研究開発に世界に先駆けて取り組んでいる。また、日本は、中小企業を中心に量子計算機の周辺・構成部素材技術に強みもある。今後もインタフェース技術及び構成部品技術の研究開発を続け、これらの強みを大規模誤り耐性汎用量子計算機の開発にいかすことが重要である。
提言・示唆 8	ソフトウェア	量子計算機のソフトウェアは、北米企業が先行して、NISQ 向けに PaaS (Platform as a Service) を構築し、オープンソースの量子プログラミングフレームワークを提供している。また、北米企業各社は信頼性の高い量子計算を実現するための鍵となる FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computing) にも注力し、研究開発を行っている。 しかしながら FTQC 向け技術の特許の出願件数は全般的に少なく、NISQ 同様、PaaS、及び、各応用分野に向けたアルゴリズム開発が求められることから、これら技術にいち早く取り組むことで、今後各分野で差別化できる可能性は大きい。日本は量子プログラミングフレームワークでは遅れているが、NISQ 向けの理論的な研究や量子アルゴリズムの開発、国際的な共同研究においては一定の地位を有しており、また創薬や化学分野での企業との共同研究、事業化で優位性があり、今後の進展が期待されている。 また、今後は NISQ/FTQC という2分類ではなく、その中間段階である early-FTQC まで含めた解像度で、ソフトウェアの開発動向を捉えていくことが望ましいと言える。 誤り耐性汎用量子計算機の実用化にはまだまだ数十年の研究開発が必要となると言われている。そのために、応用範囲を広げるだけでなく、ハードウェアの開発進捗に応じたアプリケーションの開拓 (PaaS や量子アルゴリズムの開発) を行うことが今後益々重要となる。

提言・示唆 1：超伝導方式

超伝導方式の量子計算機において、技術開発で先行している米国は、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「エラー訂正技術」への出願が他国に比べて多く、技術の蓄積があるといえる。日本は極低温で動作可能な同軸ケーブルやコネクタ等の周辺・構成部素材技術の強みをいかしつつ、今後も「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「エラー訂正」の要素技術開発に注力しながら、計算機システムとしてのインテグレーション技術の開発に取り組むことが重要である。

市場動向調査によると、他の方式と比較して超伝導方式は成長率が高いと予想され、北米企業がシェア上位を占めている。米国はスケーラビリティの向上による量子ビット集積化で世界をリードしている。

政策動向によると、研究開発で先行している米国は政府関連機関と約 50 の大学の研究開発体制で材料、デバイス、ソフトウェアを統合した実用的な研究開発を実施している。

また、特許動向、研究開発動向からも、今後も超伝導方式の研究開発にとって、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「エラー訂正技術」は重要であることが確認できた。

日本は周辺・構成部素材技術の中でも同軸ケーブルやコネクタ等でシェアが高く強みを持っている。超伝導量子ビットの 3 次元実装技術などの研究開発等も進んでおり、周辺制御回路を含めた超伝導量子計算機の集積化に関する研究開発がされている。日本が強みを有している周辺・構成部素材技術（同軸ケーブルやコネクタ等）は、誤り耐性汎用量子計算機の実現に向け装置・システムインテグレーションにおいて今後重要度が増すと思われる。しかしながら特許の件数は少なく、将来大きな差別化が可能な技術である。

超伝導量子計算機は技術が進展している方式であるが、100 万量子ビット級の誤り耐性汎用量子計算機の実現にはまだまだ数十年の研究開発が必要となる。そのため、今後、QPU(量子プロセッシングユニット)だけでなく、クライオ CMOS、希釈冷凍機、同軸ケーブルやコネクタ等の低温部素材要素技術の開発を我が国でも地道かつ長期的にすすめる事が肝要である。しかしながら要素技術の開発だけでは、製品化に繋がらない。計算機としてのシステム化のための開発をし、さらに、これらの要素技術を「装置インテグレーション」、「システムインテグレーション」することが今後益々重要となる。

これらのことから、日本は、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「エラー訂正」の研究開発に注力し、極低温で動作可能な同軸ケーブルやコネクタ等の周辺技術の強みをいかしつつ、誤り耐性汎用量子計算機に向けた要素技術及びシステム開発を続けていくことが重要である。

提言・示唆 2：イオントラップ方式

イオントラップ方式の量子計算機は、低誤り率かつコヒーレンス時間の長い量子ビットを実現できることから、有力な量子計算機の方式の一つとして、米国や欧州において、早い段階で大型投資が行われ積極的に研究開発が進められている。日本においても、比較的早い段階から基礎研究が進められ、現在ではムーンショットや Q-LEAP などの国家プロジェクトにおいて研究開発が進められている。イオントラップ方式特有の課題を解決するために、実用化に向けて「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「エラー訂正技術」の特許出願が多い。特に、大規模化が課題であり、日本でも行われている光等による量子情報処理ユニット間接続は、将来大きな差別化が可能な技術である。これらの強みをいかしつつ同方式の研究開発を推進することが重要である。

市場環境調査によると、イオントラップ方式は超伝導方式と同様に今後市場シェアが大きく伸長すると予測されており、今後も実用化に向け益々各国・地域での研究開発が盛んになると予想される。シェア上位を占める企業は IonQ、Quantinuum でいずれも米国企業であり、スケーラビリティの向上に重点を置いている。現在、IonQ 社では Forte と呼ばれる 32 物理量子ビットの量子コンピュータを販売しており、さらなる大規模化が計画されている。

政策動向調査によると、米国では、DOE や NSF 主管の複数の研究所でイオントラップ方式の研究開発を進めている。欧州でも、「Horizon 2020」の一部として量子技術に関する大型の研究開発プログラム「Quantum Flagship」が始動し、10 年間で 10 億ユーロを拠出して複数の PJ が推進されている。日本は、内閣府ムーンショット、大阪大学 IQIB、沖縄科学技術大学院大学でイオントラップ方式の研究開発が進められており、その特徴は光ファイバーを使った量子情報処理ユニット間の接続にある。

また、特許動向、研究開発動向からも、今後もイオントラップ方式の研究開発にとって、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「ゲート操作の忠実度の向上」が重要となる。一方、日本が研究開発を進めているイオントラップ方式での光等による量子情報処理ユニット間のインタフェース技術は、調査期間全体で 3 件とパテントファミリー件数が少ない。各国が注力している普及に向けたトータルシステムの研究開発において今後重要度が増すと思われる、将来大きな差別化が可能な技術であり、今後も研究開発に注力すべきである。

提言・示唆 3：中性原子方式

中性原子方式は、量子シミュレーションとしての研究開発から量子計算機の研究開発に急速に移りつつあり、量子計算機としての特許出願件数も増加している。市場が一気に立ち上がり、有望な量子計算機として、世界中の研究機関から注目を集め始めている。特に、大規模化に適しており、量子誤り訂正等の論理量子ビットの実現において、他の方式に比べて強みを発揮している。米国や欧州において、早い段階で大型の投資が行われ積極的に研究開発が進められている。日本においても、ムーンショットや Q-LEAP などの国家プロジェクトにおいて研究開発が進められ世界をリードする成果も創出されている。中性原子方式は多くが光関連技術によって構成され、重要部品に国産製品も使われている。これらの強みをいかしつつ同方式の研究開発を推進することが重要である。

中性原子方式の量子計算機は現在様々な方式の中で最も量子ハードウェアの開発が進んでいる方式である。

電荷をもたない中性原子は、原子間相互作用が難しく、環境からの影響も受けにくいため、単一原子を量子ビットとして、同一の量子ビットを大量に準備することが可能である。また、光ピンセットにより、単一原子を自在に配置することが可能になり、原子アレイと呼ばれる無欠陥の 2 次元配列が可能になっている。また、レーザー励起によるリドベルグ相互作用を用いて、2 量子ビット間の量子ゲート操作が可能となっている。これにより、現在では 1,000 を超える物理量子ビットと基本論理量子ゲートが実現しており、1,000～10,000 規模の物理量子ビットによる量子情報処理ユニットのロードマップが発表されている³¹。イオントラップ型には、誤り率とコヒーレンス時間で及ばないが、圧倒的な大規模化により、量子誤り訂正等の複雑な量子アルゴリズムが実装可能となってきた。

しかしながら、大規模な原子アレイを生成して制御するためには高度なトラップ技術が必要である。これには高出力かつ高安定なレーザー技術やそれらのレーザーの制御技術が必要となる。特に、大規模化に伴う複雑性の増大により、新たな課題が発見される可能性もある。これらの課題の解決には、イオントラップ型やその他の方式と同様に、モジュール化し拡張性（スケーラビリティ）の向上の検討も必要である。

市場環境調査によると、中性原子方式は、量子シミュレーションとしての研究開発から量子計算機の研究開発に急速に移りつつあり市場が一気に立ち上がり、有望な量子計算機として、世界中の研究機関から注目を集め始めている。中性原子方式の研究開発を行っている注目研究機関及び企業は自然科学研究機構 分子科学研究所（日本）、Pasqal（仏）、ColdQuanta（現 Inflection）（米国）、QuEra（米国）である。具体的には、2022 年 8 月、自然科学研究機構 分子科学研究所 大森賢治教授のグループが単一原子レベルで世界最速の 2 量子ビットゲートに成功した。また、2023 年 12 月に、QuEra（米国）は最大 280 物理量子ビットから構成されたプログラマブルな量子情報処理ユニットを発表し、符号長 7 までの論理量子ビット演算からなる具体的な量子誤り検出方式と実験結果を発表し、中性原子方式による誤り耐性汎用量子計算機の可能性を示した。

政策動向調査によると、米国では DOE 主管の QSA（Quantum System Accelerator）や NSF

31 QuEra ホームページ <https://www.quera.com/press-releases/quera-computing-releases-a-groundbreaking-roadmap-for-advanced-error-corrected-quantum-computers-pioneering-the-next-frontier-in-quantum-innovation>

主幹の IQIM (Institute for Quantum Information and Matter) 研究所で、欧州では欧州委員会において「Horizon 2020」の一部として量子技術に関する大型の研究開発プログラム「Quantum Flagship」、これに続く「Horizon EUROPE」で研究開発を行っている。日本では、ムーンショットプロジェクトでの「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレイ型・誤り耐性量子コンピュータ」や Q-LEAP における冷却原子量子シミュレータを使った量子計算機応用、さらに、ムーンショットプロジェクトにおける「ナノファイバー共振器 QED による大規模量子ハードウェア」の研究開発が行われている。モジュール化による拡張性（スケラビリティ）の向上を目指す方式はムーンショットプロジェクト「ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース」において研究開発が行われている。

特許動向調査によると、現時点では中性原子方式の市場は立ち上がったばかりで、特許の Patent ファミリー件数も 97 件と少ない。その中で米国の出願がほとんどを占め増加傾向にある。また、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「ゲート操作の忠実度の向上」の Patent ファミリー件数が多く、技術動向を裏付けるものとなっている。

研究開発動向調査によると、中性原子方式の発表件数は増加傾向にあり米国、欧州、中国の件数が多い。これは、政策動向調査のプロジェクトの活動と一致しており、研究開発動向分析結果が裏付けるものとなっている。

これらから、中性原子方式は、技術的には他方式に比べコヒーレンス時間が長くどれ安定な量子計算が可能となることから、将来有望な誤り耐性量子計算機方式の一つである。各国も注力して研究開発に取り組んでおり、今後特許出願が盛んになると思われる。特許の出願件数はまだ少ないが将来差別化が可能な技術である。

日本において、電気通信大学中川賢一研究室において、最初に量子シミュレータとして開発され、その後、Q-LEAP における冷却原子量子シミュレータやムーンショット型研究開発事業での「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレイ型・誤り耐性量子コンピュータ」などに発展している。さらに、リドベルグ相互作用を用いない「ナノファイバー共振器 QED による大規模量子ハードウェア」もムーンショット型研究開発事業において研究開発が推進されている。これらのネットワーク化技術も含めて、同方式および周辺技術の研究開発を推進することが重要である。日本は、光ピンセットを生成するための空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) や原子アレイを観察するための EMCCD や CMOS カメラを浜松ホトニクスが製造するなど、周辺技術に強みがある。

さらに、2022 年 8 月、自然科学研究機構 分子科学研究所の大森賢治教授グループが世界最速の 2 量子ビットゲートに成功した。1,000 億分の 1 秒（10 ピコ秒）だけ光る超短パルスレーザーを用い 2 個のルビジウム原子を光ピンセットで 1~2 ミクロン単位で並べ、世界最速のわずか 6.5 ナノ秒で「制御 Z ゲート」と呼ばれる 2 量子ビット高速ゲート操作を実現した。分子科学研究所によると、将来的には 1 ナノ秒まで可能としている。この研究開発により中性原子方式は、将来 10,000 量子ビット級の大規模集積化及び高い量子コヒーレンス性能により、一躍、有力な誤り耐性汎用量子計算機方式として世界的に注目を集める量子プラットフォームとなっている。

中性原子方式は多くが光関連技術によって構成され、重要部品に国産製品も使われている。これらの強みをいかしつつ、産学官交えて同方式の研究開発を推進することが重要である。

提言・示唆 4：光量子方式

現時点で光量子方式の量子計算機の市場規模は小さいが、量子ビットの接続性や制御性、量子モジュール間の接続、長期的には量子インターネットとの親和性から、市場の主流になる可能性がある。また、各国が注力して研究開発をしているがまだ特許の件数は少なく、スクイーズド光源、単一光子光源、光検出器等の技術で将来差異化できる可能性がある。日本は周辺技術である光学部品の量子もつれ光源、光検出器、光変調器、シリコンフォトリクス技術や石英系導波路技術による平面光集積回路などの研究開発が盛んである。光量子特有の課題として、光子損失によるエラー率の増大、単一光子生成技術、光集積化技術、量子ビット数の増大、ビット間結合操作技術の確立等がある。これらの課題解決に向けて、光学部品技術の高性能化とともに量子エラー訂正技術の研究開発を続けていくことが重要である。

光量子方式は、光子の偏光・経路・モード等を量子ビットとして用いる。他の方式の量子ビットは静止しているのに対して、光量子方式は光速で移動する、いわゆる飛行型量子ビットを利用している。光子を重ね合わせて干渉させ、もつれ状態を作り、1パルス毎に演算を実行する。光パルスをループに回すことによって効率的に演算させることも可能である。

光量子方式の利点は、室温・大気圧下で動作すること、高速動作が可能であること（～10ps）、単一光子の検出・制御技術、量子操作技術などが確立していること、多数の光パルスで量子計算が可能であること、量子通信・量子インターネットとの親和性が高いことである。

一方、課題は、光子損失によるエラー率の増大、単一光子生成技術の確立、光集積化技術、量子ビット数の増大、ビット間結合操作の工夫等がある。

光量子方式は、光源、光検出器、光変調器、光電融合技術、平面光集積回路、光ファイバーなどの駆動・Read/Write回路や量子ビット間結合制御技術、非線形光学素子、光変調器、スプリッタ、位相シフタなどで構成されている。今後は、スケーラビリティの向上、忠実度（演算精度）の向上に加えて、内閣府ムーンショットで実施中の誤り耐性汎用量子計算機実現に向けたGKP論理ビットの大規模化等が重要である。

市場環境調査によると、超伝導方式の市場に比べ小さいが、量子ビットの結合性や制御性、長期的には、量子通信、量子インターネットとの親和性から、市場の主流になる可能性が高い。

光量子方式で市場をリードしている米国とカナダを中心として、各国研究機関等がプロジェクトを実行している。特に量子誤り訂正、スクイーズド光源、単一光子光源、光検出器などのプロジェクトが多い。日本は光量子方式の一例である連続量時間多重を用いた光量子方式量子計算機、非線形光学材料（PPLN）の導波路等、周辺技術である光学部品の光源、光検出器、光変調器、及び量子中継器などで研究開発が盛んであり強みを持っている。

特許出願では、米国企業が上位12者中5者を占めており、PSIQUANTUM CORP（米国）の件数が他者とくらべて圧倒的に多い。米国の「コヒーレンス時間の向上／損失低減」「ゲート操作の忠実度の向上」の件数が他国籍・地域よりも多い。また、米国、欧州、日本、中国において、光量子方式で必須の「光源」、「光量子・光パルス検出器」「光変調器」の特許ファミリー件数が多い。これらは技術動向を裏付けた結果となった。

論文発表では、増加傾向にあり欧州の件数が最も多く 205 件、次いで米国が 122 件、中国が 115 件、日本が 45 件となっている。

現時点で光量子方式の量子計算機の市場規模は小さいが、量子ビットの接続性や制御性、量子モジュール間の接続、長期的には量子インターネットとの親和性から、市場の主流になる可能性がある。また、各国が注力して研究開発をしているがまだ特許の件数は少なく、スクイーズド光源、単一光子光源、光検出器、平面光集積回路等の技術で将来差異化できる可能性がある。日本は周辺技術である光学部品の量子もつれ光源、光検出器、光変調器等に強みがあり研究開発が盛んである。この技術をいかし量子誤り訂正技術、光学部品技術、システムインテグレーション技術の研究開発を続けていくことが重要である。

提言・示唆 5：Si 量子ドット方式

Si 量子ドット方式の量子計算機は、現状、超伝導方式に比べ集積度が低い、長期的には先端 CMOS 技術の流用性から、市場の主流になる可能性があり、米国を中心に世界的に研究開発が盛んである。日本は、高忠実量子論理ゲート、同位体シリコン技術、量子エラー訂正技術などで基礎研究開発のアクティビティが非常に高い。その一方で、誤り耐性汎用量子計算機に向けた大規模集積化技術やクライオ CMOS などの制御回路技術においては、欧米に大きく遅れをとっている。そのため、コヒーレンス性能と集積度向上のための設計・製造・制御・評価の技術開発を続けていくことが重要である。また半導体業界も巻き込みながら、基盤技術や IP を戦略的に確保することも重要である。

市場環境調査によると、現在は、Si 量子ドット方式は超伝導方式の市場に比べ小さく集積度も低い、長期的には、先端 CMOS 技術の流用性から、量子計算機の主流の一つになる可能性があると予測されている。

政策動向調査によると、Si 量子ドット方式は、日本、イギリス、EU、オーストラリアなどで盛んに研究開発プロジェクトが実施されている。特にスケーラビリティやコヒーレンス時間向上等に関するプロジェクトが多い。日本は集積度向上に向けたデバイス技術、制御技術等の要素技術開発を中心に推進している。

また、特許動向、研究開発動向からも、今後も Si 量子ドット方式の研究開発にとって、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」は重要であることが確認できた。また、「歩留まり」と「材料」の патент ファミリー件数も多い（図 6-1-68、6-1-69、6-1-73、図 6-1-74）。

Si 量子ドット方式に関しては、各国も盛んに研究開発へ取り組んでおり、今後一層特許出願が盛んになると思われる。日本は高忠実量子論理ゲート、同位体シリコン技術、量子エラー訂正技術などで基礎研究開発のアクティビティが非常に高く、将来差別化が可能な技術である。

これらのことから、Si 量子ドット方式の量子計算機は、長期的には先端 CMOS 技術の流用性から市場の主流になる可能性もあり、米国、欧州を中心に各国の研究開発が盛んである。日本は、理化学研究所を中心に高忠実量子論理ゲート、同位体シリコン技術、量子エラー訂正技術などで基礎研究開発のアクティビティが極めて高い。

しかしその一方で、誤り耐性汎用量子計算機に向けた大規模集積化技術やクライオ CMOS などの古典制御回路技術においては、欧米に大きく遅れをとっている。さらに関連特許の数も非常に少ない。そのため、コヒーレンス性能と集積度向上のための設計・製造・制御・評価技術及びクライオ CMOS などの古典制御回路のための技術開発を続けていくことが重要である。また半導体業界も巻き込みながら、プロセス、設計、製造、評価技術の基盤や IP を戦略的に確保することも重要である。

提言・示唆 6：量子アニーリング 超伝導方式

量子アニーリング超伝導方式は、D-Wave Systems（カナダ）が商用化で先行している。その要因として「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」で先行していることや多くの企業へのソリューションサービスの提供があげられる。しかし、量子アニーリングの従来古典計算技術や古典アニーリングに対する優位性は、理論的にも実機ベンチマーキングにおいても未だに示されていない。そのため、量子アニーリングの優位性を示しうる産業応用領域の探索が課題となる。さらに、これまで培われてきた設計・製造・実装・制御・インターフェース・インテグレーション・ソフトウェア技術を超伝導量子計算機（ゲート型）の開発に転用することで、誤り耐性汎用量子計算機の早期実現に繋げていくことも重要である。

市場環境調査によると、量子アニーリング超伝導方式は市場規模が拡大し有力な量子計算機の方式の一つになると予想されている。その一方で成長に鈍化傾向も見られている。D-Wave Systems（カナダ）は商用化で先行しており、応用拡大に向けてスケーラビリティ向上とソリューションサービス提供で市場をリードしている。日本はD-Wave Systems（カナダ）やFixstarsが提供するクラウドサービスを利用したユースケース探索などにおいて高いアクティビティを示している。

また、政策動向調査によると、米国、欧州で超伝導量子アニーリングマシンが研究開発されている。日本は、NEDOプロジェクトにおいて量子コヒーレンス性能の高い超伝導量子アニーリングマシンの研究開発やソフトウェアプラットフォーム基盤の研究開発を行っている。

特許動向、研究開発動向から、「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」、「コヒーレンス時間の向上／損失低減」、「既存の量子モデルの適用先拡大あるいは新たな量子モデルの提案」、「アルゴリズムの効率化」の技術がこれまで重点的に開発されてきたことが確認できた。

しかしながら、量子アニーリングの古典計算技術や古典アニーリング技術に対する優位性が理論的にも実機ベンチマーキングにおいても未だに示されていない。その一方で、磁性体やトポロジカル物質などの量子シミュレーションにおいて、量子アニーリングは古典計算技術に対して優位性があると期待されている。

これらをまとめると、以下のことが言える。

量子アニーリング超伝導方式は、D-Wave Systems（カナダ）が商用化で先行している。その要因として「大規模集積化（スケーラビリティ）の向上」やソリューションサービス提供への注力があげられる。しかしながら量子アニーリングの従来古典計算技術や古典アニーリングに対する優位性は、理論的にも実機ベンチマーキングにおいても未だに不明である。そのため、量子アニーリングが優位な組合せ最適化問題の有無の検証や量子シミュレータとしての優位性の有無の検証を、ベンチマーキングを通して行い量子アニーリングの優位性を発揮しうる産業応用領域の有無を探索することが今後課題となる。さらに、これまで培われてきた設計・製造・実装・制御・インターフェース・インテグレーション・ソフトウェア技術を超伝導量子計算機（ゲート方式）の開発に転用することで、誤り耐性汎用量子計算機の早期実現に繋げていくことも重要である。

提言・示唆 7：量子処理ユニット（QPU：Quantum Processing Unit）I/F・構成部品

各方式において、大規模化および製品化を進めていくためには、インタフェースや構成部品が重要となる。スケーラビリティを獲得するためには、モジュール化された情報処理ユニット QPU を接続するためのインタフェースを介して、全体として大規模な QPU として動作させることが不可欠である。また、システム全体のインテグレーションを考えた構成部品などの周辺技術の開発が不可欠である。

日本は、この QPU 間を接続するインタフェース技術の研究開発に世界に先駆けて取り組んでいる。また、日本は、中小企業を中心に量子計算機の周辺・構成部素材技術に強みもある。今後もインタフェース技術及び構成部品技術の研究開発を続け、これらの強みを大規模誤り耐性汎用量子計算機の開発にいかすことが重要である。

ゲート式超伝導方式、イオントラップ方式、中性原子方式、光量子方式、Si 量子ドット方式、量子アニーリング超伝導方式等で研究開発が進められているが、量子情報処理ユニット (QPU：Quantum Processing Unit) やそれを構成している量子ビットの性能改善に関する要素技術研究開発はもちろんのこと、古典制御装置も含めてシステムとして組み上げるための周辺・構成部素材技術は非常に重要である。さらに、小中規模の QPU をモジュール化し、複数の QPU 内の量子ビットを量子力学的に接続し、全体として大規模な QPU を実現する QPU 間インタフェース技術は非常に重要である。

このようなモジュール間接続を用いた QPU の集積度拡大のためには様々な技術課題がある。具体的には、QPU 内の量子ビットと通信を担うマイクロ波領域や光領域の光子との間で量子情報メディア変換を行い、通信用光子を介して、別の QPU 内の量子ビットとの間に量子もつれ状態を生成する必要がある。これにより、QPU 間で量子情報の転送が可能となり、大規模な分散型 QPU システムが実現できる。従って、QPU 間のインタフェース技術は、誤り耐性汎用量子計算機の大規模集積化の向上のために不可欠な技術である。

量子計算機は各方式で研究開発が進んでいるが、今後十年程度で、特定の有用な問題において量子計算機 (NISQ：ノイジーな中規模量子デバイス) のビジネス利用に繋がると期待できる。並行して、誤り耐性型汎用量子計算機の実用化に向けた研究開発が長期にわたって進められると考えられる。そのため、今後、QPU だけでなく、クライオ CMOS、超伝導制御回路、希釈冷凍機、同軸ケーブルやコネクタ等の低温部素材要素技術や周辺・構成部品の開発を我が国でも地道かつ長期的にすすめ、サプライチェーンのチョークポイントを我が国において押さえていくことが肝要である。しかしながら要素技術の開発だけでは、製品化・社会実装に繋がらない。これらの要素技術を組み合わせるシステムエンジニアリングが今後益々重要となる。例えば、冷凍機内の QPU と制御装置システムを計算機として装置インテグレーションする技術や、ハードウェア・インターフェース・ソフトウェアを協調設計に基づいて統合的にシステムインテグレーションするシステムエンジニアリング技術やノウハウを我が国において確立することが、我が国における誤り耐性汎用量子計算機の商用化のために今後益々重要となる。古典計算機の歴史を鑑みると、これらの要素技術とシステム化技術の両方が協調して発展することで、誤り耐性汎用量子計算機が社会実装していくものと考えられる。

また、日本は超伝導方式、イオントラップ方式、中性原子方式、光量子方式、Si 量子ドット方式などの、様々な量子ビットと通信キャリアとの量子インタフェース技術、通信キャ

リア伝送のための光ファイバーやマイクロ波導波路等による量子モジュール間接続技術の研究開発プロジェクトを世界に先がけていち早く開始した。さらに、その基盤技術である光学部品の光源、光子検出器、光変調器やマイクロ波によるインタフェース技術、光-マイクロ波への量子情報メディア変換技術やマイクロ波コネクタ/ケーブル技術開発・製品化で強みを持っている。しかしながら関連技術の特許件数は非常に少なく、将来的に戦略的に特許化を目指すべきである。これらのインタフェースに関する研究開発プロジェクトを活用し、QPU 間のインタフェース技術と周辺・構成部素材技術の研究開発を続けていくことも重要である。

提言・示唆 8：ソフトウェア技術

量子計算機のソフトウェアは、北米企業が先行して、NISQ 向けに PaaS (Platform as a Service) を構築し、オープンソースの量子プログラミングフレームワークを提供している。また、北米企業各社は信頼性の高い量子計算を実現するための鍵となる FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computing) にも注力し、研究開発を行っている。

しかしながら FTQC 向け技術の特許の出願件数は全般的に少なく、NISQ 同様、PaaS、及び、各応用分野に向けたアルゴリズム開発が求められることから、これら技術にいち早く取り組むことで、今後各分野で差別化できる可能性は大きい。日本は量子プログラミングフレームワークでは遅れているが、NISQ 向けの理論的な研究や量子アルゴリズムの開発、国際的な共同研究においては一定の地位を有しており、また創薬や化学分野での企業との共同研究、事業化で優位性があり、今後の進展が期待されている。

また、今後は NISQ/FTQC という 2 分類ではなく、その中間段階である early-FTQC まで含めた解像度で、ソフトウェアの開発動向を捉えていくことが望ましいと言える。

誤り耐性用量子計算機の実用化にはまだまだ数十年の研究開発が必要となると言われている。そのために、応用範囲を広げるだけでなく、ハードウェアの開発進捗に応じたアプリケーションの開拓(PaaS や量子アルゴリズムの開発)を行うことが今後益々重要となる。

量子計算機のソフトウェアは、IBM (米国)、Microsoft (米国)、Google (米国) 等の北米企業が先行し、NISQ 向けに、アプリケーション、アルゴリズム、フレームワーク、アーキテクチャ、量子ユニット、シミュレータ等の PaaS (Platform as a Service) を構築し、オープンソースの量子プログラミングフレームワークを提供している。これらのプラットフォームやフレームワークは、特許出願には未だ現れていないものの、ソフトウェアの競争力を強力に押し上げ得るキープレイヤーであることから、特許動向の注視・出願検討が望まれる領域と言える。また、北米企業のその他の顕著な動向として、信頼性の高い量子計算を実現するための鍵となる量子エラー訂正やフォールトトレラント性の向上への注力も見られる。

日本は量子プログラミングフレームワークでは遅れているが、NISQ 向けの理論的な研究やアルゴリズムの開発、国際的な共同研究においては一定の地位を有しており、また創薬や化学分野での企業との共同研究、事業化で優位性があり、今後の進展が期待されている。

特許動向調査から、日本はアルゴリズムとしてイジングマシン・アニーラの「組合せ最適化問題」に強みを持っていることが分かり、それを「物流・配送」や「工程管理」へ展開していることが分かった（。また米国は量子機械学習において、「医療・医薬品」の件数が多いことが分かった。しかしながら件数は少ない。

一方で、国内外共通的に、FTQC 向け技術の特許の出願件数は少ない。FTQC 向けにも、NISQ 同様、PaaS 及び、各応用分野に向けたアルゴリズム開発が求められることから、これら技術にいち早く取り組むことで、今後各分野で差別化できる可能性は大きい。

また、現時点では特許動向には明確に現れてはいないが、近年、NISQ と FTQC の中間段階として early-FTQC、もしくは、pre-FTQC という概念が提唱されている。各プレイヤーにおいて、early-FTQC 向けのアプリケーション開発が進められていることから、今後は NISQ/FTQC という 2 分類ではなく、その中間段階まで含めた解像度で、ソフトウェアの開発動向を捉えていくことが望ましいと言える。

誤り耐性用量子計算機の実用化にはまだまだ数十年の研究開発が必要となると言われている。そのために、応用範囲を広げるだけでなく、ハードウェアの開発進捗にと強調しながらアプリケーションの開拓を行うことが今後益々重要となる。

令和5年度特許出願技術動向調査 ―量子計算機関連技術―

アドバイザーボード名簿

(敬称略、所属・役職等は令和6年2月現在)

1. 委員長、委員

委員長	川畑 史郎	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター 副センター長
委員	嶋田 義皓	科学技術振興機構 研究開発戦略センター システム・情報科学技術ユニット フェロー
	寒川 哲臣	日本電信電話株式会社 先端技術総合研究所 常務理事 基礎・先端研究プリンシパル
	松岡 智代	QunaSys 社 最高執行責任者 (Chief Operational Officer, COO)
	山本 俊	大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授/ 量子情報・量子生命研究センター 副センター長

*委員は五十音順に記載

2. 特許庁オブザーバー

津幡 貴生	総務部 企画調査課 課長
馬場 亮人	総務部 企画調査課 知財動向班 班長
永富 宏之	総務部 企画調査課 知財動向班 班長 (前任)
井出 元晴	総務部 企画調査課 知財動向班 技術動向係 係長
四垂 将志	総務部 企画調査課 知財動向班 技術動向係 係長 (前任)
生野 一孝	総務部 企画調査課 知財動向班 技術動向係
福西 章人	審査第四部 情報処理 審査官

3. オブザーバー

岸上 智	経済産業省 産業技術環境局 国際電気標準課 課長補佐 (電子・情報担当)
二井内 学	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 研究開発専門職
鳥井 俊輔	経済産業省 貿易経済協力局 貿易管理部 安全保障貿易管理政策課 技術調査室 室長補佐
工藤 祥裕	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ロボット・AI 部 主任研究員
江下 尚彦	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ロボット・AI 部 主査
山口 浩	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 技術戦略研究センター デジタルイノベーションユニット 統括研究

員

角井 素貴	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 技術戦略研究センター デジタルイノベーションユニット 研究員
萩原 暁夫	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) IoT 推進部 専門調査員
秋元 淳	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) IoT 推進部 専門調査員

○本調査の実施と報告書の作成に当たっては、本調査のために設置された上記委員から構成されるアドバイザリーボードの助言を活用した。

非 売 品
禁無断転載

令和5年度
特許出願技術動向調査報告書
－量子計算機関連技術－

発 行 令和6年3月

発行者 特 許 庁
〒100-8915 東京都千代田区霞が関3-4-3
電 話 03-3581-1101（代表）

請負先 株式会社三菱ケミカルリサーチ

乱丁、落丁がございましたら、上記までご連絡下さい。