# 未来の保証:

## 耐量子セキュリティーへの取り組み

## Vanguard レポート

2022年4月

委託元:

IBM

451 Research

S&P Global
Market Intelligence

# 著者について

## ジョン・アボット氏

### 4SIGHT社、プリンシパル・リサーチ・アナリスト

ジョン・アボット氏は、S&P Global Market Intelligenceの一部である451 Researchでシステム、ストレージ、ソフトウェア・インフラストラクチャーを担当しています。30年以上ものキャリアを積んできた彼は、Unix, スーパーコンピューティング、システム・アーキテクチャー、ソフトウェア開発、ストレージなどの分野で先駆的に専門技術を開発してきました。

そして、1999年10月にThe 451 Groupの共同創設者の一人として、同社のサンフランシスコ事務所でアナリスト業務に携わりました。ストレージ仮想化やブレード・サーバーに関するレポートを含む、多数の451 Research特別レポートの筆頭著者を務め、いずれのテーマに関しても初めての包括的な調査内容を公開しています。最近、ジョン氏はコンバージド・インフラストラクチャー、新しいシステム・アーキテクチャー、AI, ディープ・ラーニング・アクセラレータなどのトピックに焦点を当てています。新興テクノロジーの将来を見据えた、長期的な調査対象のための451 Researchフレームワークである4SIGHTの確立に尽力しました。

また、テクニカルライターとしての経験と、メインフレーム、初期のPC, および Unixワークステーションを使用した直接的な関与に基づいて、1984年にテクノロジー部門の調査を開始しました。フリーランスのジャーナリストとして、Computing, Computer Weekly, The Financial Times, The Timesなどの出版物に寄稿してきました。1987年には、ComputerWireの週刊Unixニュースレター Unigram.Xの編集者に任命されました。その後、最初はロンドン、続いてサンフランシスコで、同社の日次発行のComputergram Internationalサービスの編集者になりました。サンフランシスコに451 Researchオフィスを設立し、10年以上駐在しました。

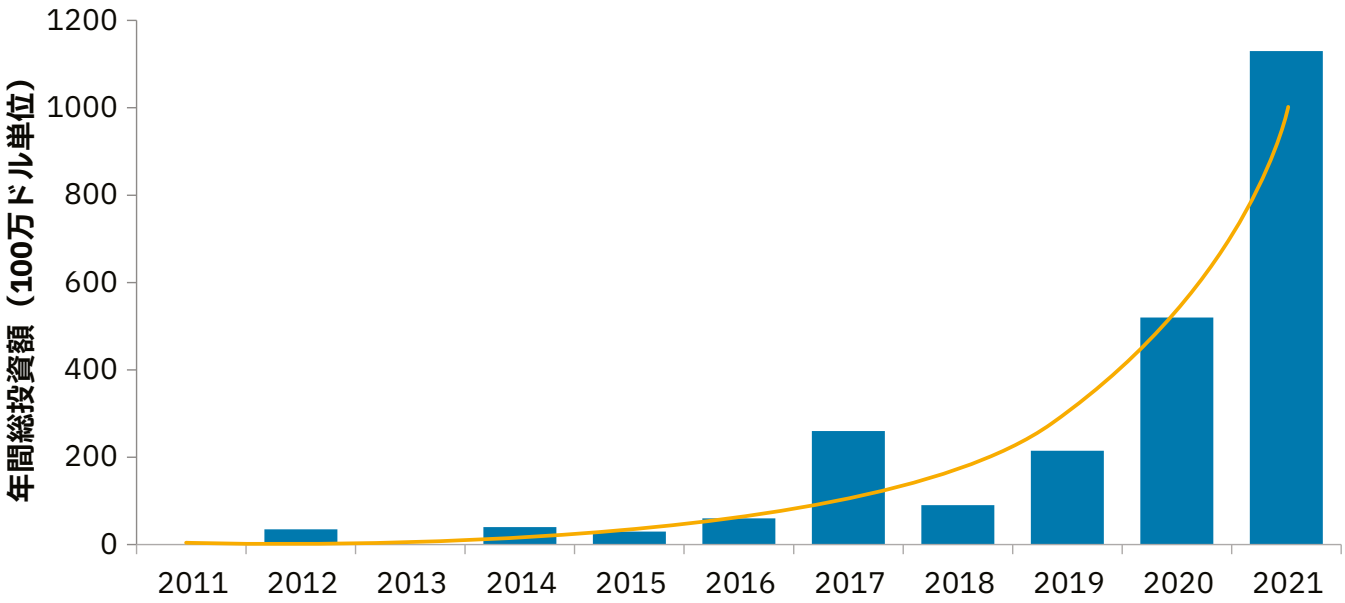
ジョン氏はキール大学で音楽を専攻し、ロンドン大学で現代英文学の修士号を取得しています。

# 序論

現代の量子コンピューティングは、ハイリスク・ハイリターン型の投資と言えるでしょう。私たちが生きている間に、普遍的で実用的な量子コンピューターが実現するという保証はありません。一方、研究所やテクノロジーセクターの民間企業は、日々、困難を乗り越えて、最先端の科学技術の開発を続けています。成功すれば途方もなく大きな成果が期待され、従来のスーパーコンピューターの能力では対処できない問題も解決してしまう可能性があります。売り手とユーザーの両方が、破壊的な可能性を秘めたテクノロジーのチャンスに賭けているのは、これが理由でしょう。S&P Capital IP Proのデータ (図 1) は、量子分野を手がけるスタートアップ企業が、過去10年間で24億ドルの投資を獲得したことを示しています。2021年には、量子関連企業へ11億ドルの資金が投入されるなど、大きな関心が寄せられました。そしてこのデータには、IBM, Amazon, Google, Honeywellなどの世界有数の IT 企業による大規模な投資は含まれていません。

このような機会とともに、大きな懸念も生じます。おそらく最も差し迫っている懸念は、現在のセキュリティ慣行に対する脅威です。悪意のあるユーザーが量子コンピューティングを悪用すれば、デジタル署名を偽造して、世界のITシステムに深く組み込まれている公開鍵インフラストラクチャーを含む、現在のレベルの暗号手法と暗号化を解読することができます。さらに、現在保護されている暗号化されたデータも、実用的な量子コンピューティングが登場してから解読する目的で、保存される可能性があります。これは、すぐに対処しなければならない問題です。時間がたてばたつほど、より多くのデータが作成され、リスクが大きくなります。

**図 1: 量子コンピューティングのスタートアップ企業への投資**




出典: S&P Capital IQ Pro

## The 451 Take

ショアのアルゴリズムを効果的に実行できる量子コンピューターが幅広く利用され、不正ユーザーがそれにアクセスできるようになる時期を正確に予測することはできません。これまでのところ、量子コンピューティングが従来のコンピューターの性能を超える時期について、明確なタイムラインを提示しているITベンダーはありません。ただし、過去5年間のテクノロジーの急速な進歩と、現在、多額の資金が投入されているという事実から、おそらく今後10年の間にはその時期が来ることが示唆されています。その場合、公開鍵アルゴリズムによって現在保護されているすべての情報が流出するおそれがあります。政府の防衛機関や諜報機関、および規制対象の業界の顧客をもつクラウド・サービス・プロバイダーやシステム・ベンダーにとって、すでに無視できないほどリスクが高まっています。1999年から2000年に変わるときに幅広く使用されているコンピューター・プログラミング・ショートカットが大混乱をもたらすと言われた2000年問題など、これまでに誤った警告もあり、将来のことは未知数であるともいえます。しかし、1つだけ明らかなことがあります。サイバー攻撃による危険性は、現代の大きな問題であり、脅威と脆弱性の特徴は絶えず進化しているということです。セキュリティ・ポリシーには継続的な見直しと更新が必要であり、暗号の俊敏性や暗号インベントリーの実装に加えて、今では耐量子暗号テクノロジーが非常に重要となっています。

# 量子耐性および耐量子シナリオ

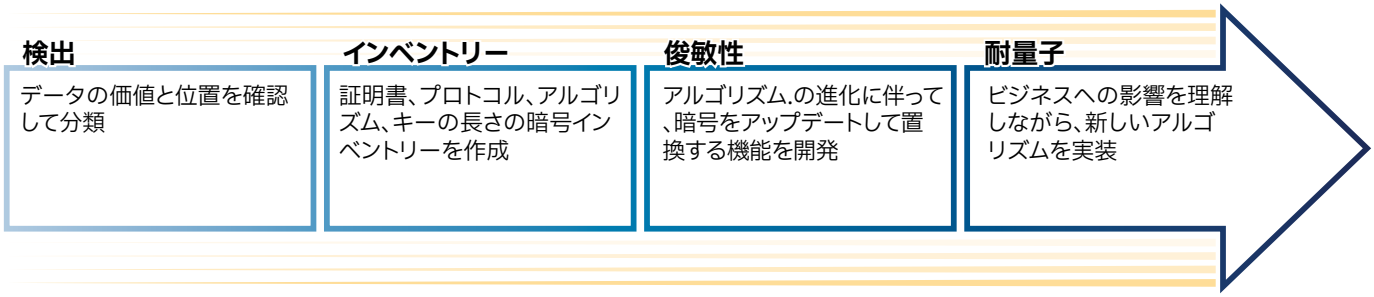
問題は次のとおりです。幅広く使用されている現世代のセキュリティー・アルゴリズムは、従来のコンピューターでは解けない難解な数学の問題に基づいています。しかし、これらの問題は、十分なパワーを搭載した量子コンピューターには簡単に解くことができます。これは、アメリカの数学者ピーター・ショア氏が、ショアのアルゴリズムとして現在知られている多項式時間アルゴリズムを発見した 1994 年以来、広く受け入れられている前提です。最初の量子コンピューターは、その3年後に構築されました。耐量子アルゴリズムの開発は、過去10年間で順調に進んでいます。一方、政府や業界全体で現在広く使用されている公開鍵暗号システムから新しい一連のアルゴリズムに移行するには、数十年かかる可能性があります。

そのため、米国国立標準技術研究所 (NIST) や米国国土安全保障省などの組織は、企業のポスト量子暗号への移行を助けるために、アルゴリズム自体の標準化プロセスや、推奨事項の作成に取り組んでいます。その取り組みにより、1月にホワイトハウス覚書が作成され、政府の防衛および諜報機関に対して、移行の開始が義務付けられました。

現在利用可能な最も強力なコンピューターでも、2,048ビットの複合整数を素因数を見つけて解読するには、数百万年かかると予測されています。量子コンピューターでは、理論的にそのタスクを数時間で完了できる可能性があります。ショアのアルゴリズムによって解読された現在の公開鍵スキームには、開発から45年経過しても、ほとんどすべてのインターネットベースのトランザクションで使用されている尊敬すべきRSAアルゴリズム、データセキュリティ標準、Paillier暗号システム、楕円曲線デジタル署名アルゴリズム、楕円曲線Diffie-HellmanおよびElGamal 暗号化が含まれます。NIST, ISO/IEC, ETSI, IETFによって制定された多数の標準が影響を受けます。これは、国際的な問題であることを示しています。中国のSM2デジタル署名アルゴリズムとSM9国家暗号化標準も解読されています。

2016年に提案を求めて開始されたNIST標準プロセスでは、量子耐性のある新しい一連の候補が特定されました。格子、多変量、ハッシュまたはコードベースの暗号化など、さまざまなアプローチにグループ化されています。これらには、格子ベースのCRYSTALS-Kyberキーカプセル化メカニズム (KEM), McEliece (コードベースの KEM), Falcon (格子ベース) のほか、Rainbow (多変量) のポスト量子署名スキームが含まれます。これらを含む一連の候補は、現在競争が完了している第3段階の後、標準化に向けて計画が進んでいます。代替アルゴリズムと署名スキームの追加要求を含む第4段階は、今年から始まり、2024 年末までに完了する予定です。

**図 2: 耐量子性への成熟度のマイルストーン**




出典: 451調査

# 耐量子暗号化への道のり

今後 10 年間で、情報セキュリティー・アーキテクチャーに耐量子暗号を組み込むための準備として、組織はどのような行動を取るべきでしょうか? すでに進行中である最初のステップは、標準化プロセスに参加することです。不正な認証の防止、暗号化の整合性の保護、デジタル署名の侵害の回避に取り組む組織は、最終的なアルゴリズム、プロセッサー、ツールの承認済みリストが、彼らの要件を満たすものになるように、積極的に参加することが重要です。標準化団体での前進がみられるとはいえ、これはまだ進行中です。より多くのアルゴリズムが必要になります。さらに、後続の成熟マイルストーンでは、耐量子性を実現していくことになります。

- **データの発見と分類:** 重要なデータのインベントリーを例にとりましょう。どれが最も価値がありますか? データはどこにありますか? どのようなコンプライアンス要件がありますか? 多くの組織は自社のシステムについて、またはその価値を十分に認識していないため、それらを理解することが非常に重要です。これを理解していなければ、最も深刻な脆弱性を特定することはできません。所有権が定義されたデータインベントリーを作成して管理する必要があります。
- **暗号インベントリー:** 暗号インベントリーには、脆弱な公開鍵暗号化が使用されている場所と方法の詳細が記載されており、証明書、暗号化プロトコル、アルゴリズム、鍵の長さなどの詳細が含まれています。インベントリーは、証明書と暗号化キーのライフサイクル全体に対応するように管理しなければなりません。
- **暗号の俊敏性:** 組織は、計画と移行プロセスの中で、暗号の俊敏性を考慮する必要があります。これにより、テクノロジーが進化して、状況が変化した際に、課題を軽減して調整を行うことができます。明確に定義されたリードタイム内に、さらに簡単に、現在の世代の暗号化技術を更新して置き換えてテストできるように、プロセスを設計して組み込む必要があります。
- **耐量子:** 組織は、耐量子暗号がビジネスに与える潜在的なパフォーマンスへの影響を認識して、新しいアルゴリズムを実装しなければなりません。

組織は、それぞれ異なります。例えばコストやライフサイクル管理の問題に対処するために、すべての組織が変更 (変更の見解) を余儀なくされるわけではありません。ただし、セキュリティー・プロトコルを更新または置換する機能を設計することは、短期的にも長期的にも重要です。これは、システム・インフラストラクチャーと密接に関連しているため、暗号の俊敏性を実現するには、システム設計者、アプリケーション開発者、セキュリティー専門家の協力が必要になります。現在、このプロセスを支援するために利用できるツールが不足しています。

組織が耐量子暗号化の置き換えをする上で、次のようなさまざまな要素が優先されます。保護対象資産の価値、保護対象 (キーストアとパスワード) の脆弱性、どの接続システムが影響を受ける可能性があるか (連邦政府機関を含む外部エンティティーとの情報共有)、データ保護が必要とされる期間などです。長い移行期間中は、従来のアルゴリズムと耐量子アルゴリズムを組み合わせた、ハイブリッド・スキームが必要になります。

# 実装、動機、推進要因

機器とインフラストラクチャーが極めて重要なエンタープライズ・ワークロードをホストしているシステム・ベンダーや大規模なクラウド・サービス・プロバイダーには、耐量子暗号化標準が開発されるまで待つ余裕はありません。両者はこの問題に数年間取り組んでおり、2024年に最終的な標準リストを作成するにあたって、最有力候補のアルゴリズムとプロトコルの選定に貢献しています。多くのクラウドベースのキー管理サービスでは、すでに第2段階および第3段階のアルゴリズムをサポートしています。顧客はこれらのサービスを使用して、帯域幅の使用率と遅延におけるオーバーヘッド増加によるアプリケーションへの潜在的なパフォーマンスの影響を測定し、トランスポート・レベル・セキュリティーのプロキシ・レイヤーで発生する潜在的な接続障害を軽減し始めています。一方、標準とテクノロジーが進化するのと並行して、耐量子への移行は数年かかるため、そのプロセスはコア・インフラストラクチャー保護から始めることになるのは当然と言えるでしょう。

大手の銀行、保険会社、電気通信、小売、運輸業界向けのシステムでは、メインフレームが高可用性で安全なコア・インフラストラクチャーとして広く使用されています。この傾向は、半世紀以上にわたって維持されてきました。最新のメインフレームには、耐量子ハードウェア・セキュリティー・モジュールが搭載され、更新されたオペレーティング・システム・コンポーネント、キー管理 API, および一連の新しい量子耐性アルゴリズムのサポートと連携して動作します。システム・ブート・ファームウェアの整合性を保護するために、ハードウェアの信頼のルートを搭載した耐量子セキュア・ブート・テクノロジーが使用されます。また、ビジネス・パートナーと暗号化キーも安全に交換できるよう、アプリケーション・プログラミング・インターフェースを介して、耐量子メカニズムが提供されます。

クラウド・サービス・プロバイダーとベンダーは、顧客が耐量子暗号化に移行するのを支援する上で、重要な役割を果たさなければなりません。ユーザー組織に特別な専門知識がなくても使用できるような、明確に確立されたガイドラインができておらず、規制当局の発表だけでは十分ではありません。すでに極めて重要なインフラストラクチャーに集中して取り組んでいるベンダーは、システム・レベルを追加変更することなく、コア・ビジネス・システムの保護を提供することで、プロセスを容易にすることができます。また、暗号化アプリケーション分析で必要とされている、発見ツールを提供することもできます。従来のアルゴリズムを使用して暗号化されたデータは、今後、高度な量子コンピューターによって復号化される可能性があります。そのため、データを管理する組織は、データがそのライフサイクル全体で、現在から将来にわたって保護する必要があるのです。そのデータを20年間保護する必要がある場合、2040年代の未来を想像しなければなりません。量子コンピューティングが実用化されるまで、まだ何年もかかると疑わない懐疑論者でさえ、現在の進化の状況を考えると、その可能性は非常に大きいことを認めなければならないでしょう。

# まとめ

量子コンピューティングのビジネスでの活用事例は、強い可能性を秘めています。量子コンピューターが完成すれば、化学、機械学習、金融、輸送、ヘルスケアなど各業界が大きく進歩します。量子コンピューターは、現在使用されている決定論的な従来のコンピューターでは実行不可能な方程式の処理を、指数関数的に加速させます。

とはいえ、量子コンピューティングでは、データ保護とプライバシーへのサイバー攻撃による脅威が増大し、悪影響が出る可能性もあります。データのビジネス価値が高まるにつれて、データ保護要件の規模とコストも増え続けます。また、データの価値は永続するため、近い将来に、量子コンピューティングが実用化される可能性が高まることを考慮に入れなければなりません。早いうちに行動することで、安全で管理された耐量子コア・インフラストラクチャへと移行し、現在のアプリケーション層の脆弱性を発見できるツールを実装し、組織全体で使用される鍵交換システムを保護し、機密性データを継続的かつ長期にわたり保護することができます。

**お問い合わせ**

**米国**
+1 877 863 1306
market.intelligence@spglobal.com

**ヨーロッパ、中東、アフリカ**
+44 20 7176 1234
market.intelligence@spglobal.com

**アジア太平洋地域**
+852 2533 3565
market.intelligence@spglobal.com

www.spglobal.com/marketintelligence