

大規模な量子コンピュータの実現に向け、 光接続で拡張を期待できる ダイヤモンドスピン方式量子コンピュータの プロトタイプを開発

2026年9月8日

富士通株式会社
富士通研究所 フェロー 兼 量子研究所長

佐藤 信太郎

富士通の量子コンピューティング研究開発戦略

- 量子デバイスから基盤ソフトウェア、アプリケーションまで全領域で、世界有数の研究機関と取り組む
- ソフトウェア技術に注力する一方、ハードウェアは幅広く可能性を追求
- ハイブリッド量子プラットフォームを活用し、早期からお客様とアプリケーションを開拓

量子アプリケーション	エンドユーザーとの共同研究を推進  材料  創薬  金融	富士フイルム 東京エレクトロンなど	デルフト 工科大学
量子基盤ソフトウェア	アルゴリズム	UCバークレー 量子エラー訂正技術	大阪大学 量子エラー訂正技術
量子プラットフォーム	ミドルウェア コンパイラ	エジンバラ大学 ハイブリッド計算	クラウド技術
量子状態制御 量子デバイス、集積	理化学研究所 超伝導方式	デルフト工科大学 ダイヤモンドスピン方式	其他方式も 幅広く検討、 中性原子など

量子コンピュータハードウェアの方式

固体中のスピンと光の特長を活かせるダイヤモンドスピン方式を第6の方式として開発

量子コンピュータ



超伝導

超伝導回路



ダイヤモンド

電子スピン
+ 核スピン



シリコン

量子ドットの
電子スピン



イオン

イオンの
電子状態



中性原子

中性原子の
電子状態

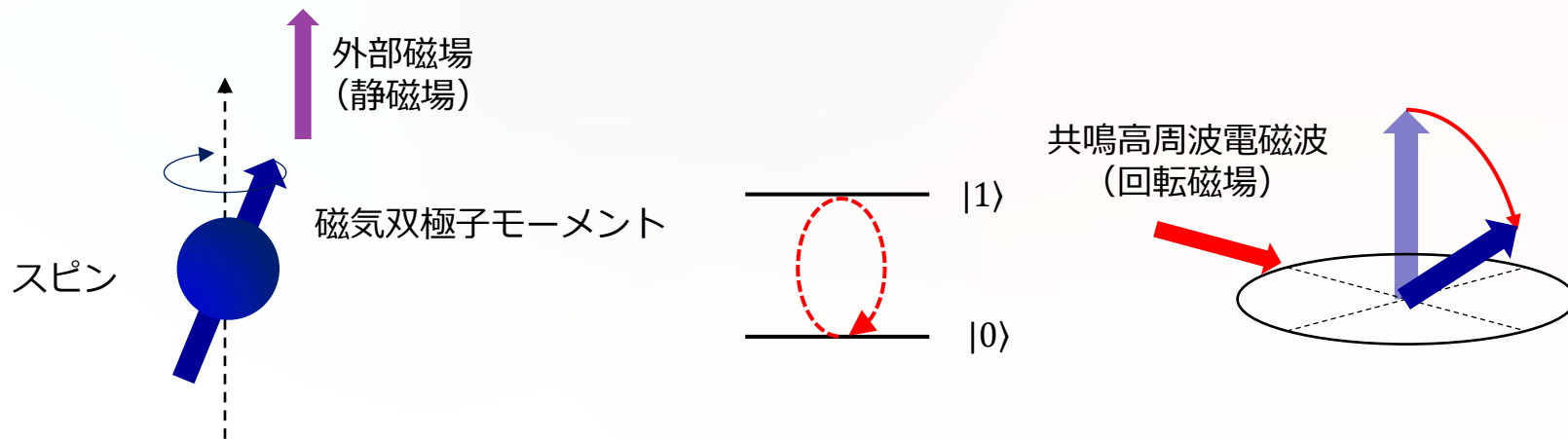


光

光子の経路
光の振幅と
位相

スピン量子ビットとは

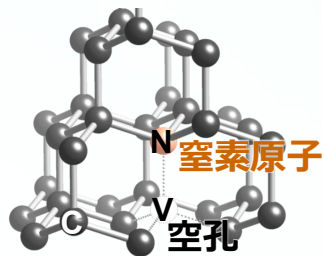
- スピンは磁気双極子モーメントを持ち、微小磁石のように振る舞う。
- 外部磁場などによって形成された2準位系を量子ビットとして利用できる。
- 共鳴する高周波電磁場（回転磁場）を与えることで量子ビットの状態を制御できる。



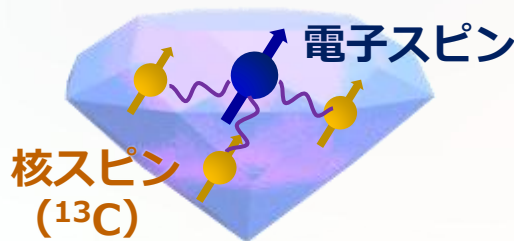
外部磁場中のスピンにおける2準位形成と共鳴高周波によるスピン量子ビット制御

ダイヤモンドスピン量子ビット

- 優秀な量子母材である高純度の人工ダイヤモンド結晶およびその中に形成した欠陥（カラーセンター）を使用
- ダイヤモンド中の1つのカラーセンターの電子スピンと、それと結合した核スピンを量子ビットに用いて量子モジュールを構成
- **コヒーレンス時間が長く、本質的に高い忠実度**を得ることが可能
- 電子スピン量子ビットの状態は量子もつれた光子（発光・非発光）で読み出すことが可能

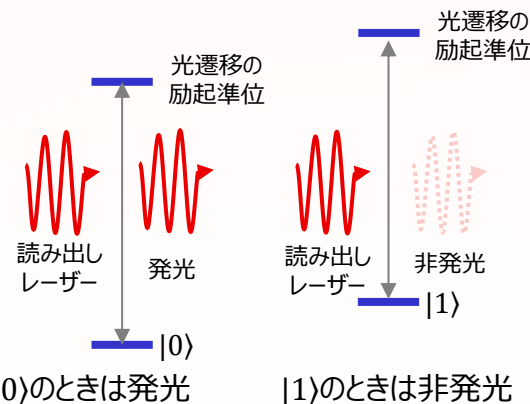


カラーセンターの例：NVセンター



ダイヤモンドスピン量子モジュール

	コヒーレンス時間(T_2)
電子スピン(NV)	> 1秒
核スピン(^{13}C)	> 1分

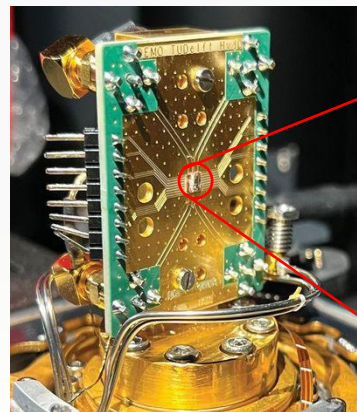


ダイヤモンドスピン量子ビットの光読み出し

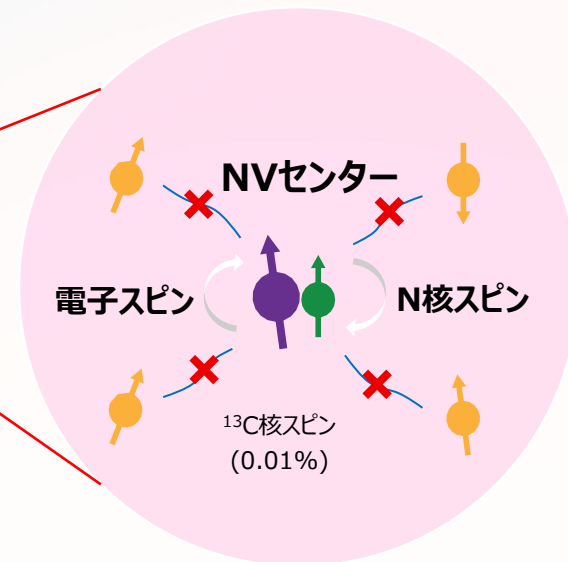
高忠実度の量子ゲート操作実証例（NVセンター）

エラー確率0.1%以下の量子ゲート操作を実証

- 2量子ゲート忠実度: $> 99.9\%$
- 1量子ゲート忠実度
 - 電子スピン: $> 99.99\%$
 - 核スピン : $> 99.999\%$



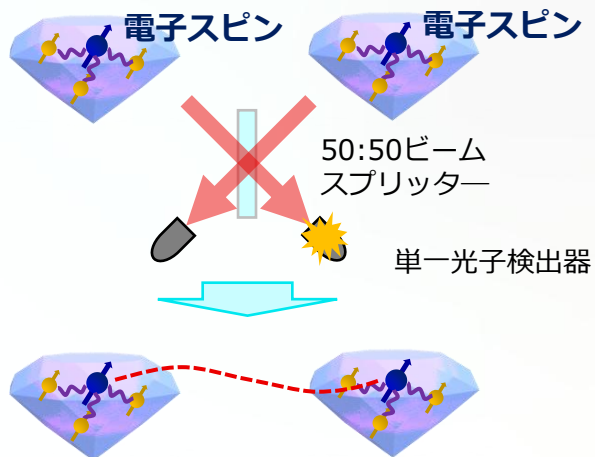
実評価装置



H.P. Bartling et al.,
Phys. Rev. Applied **23**, 034052 (2025).

ダイヤモンドスピン方式による拡張性の高いモジュール型 アーキテクチャへのアプローチ

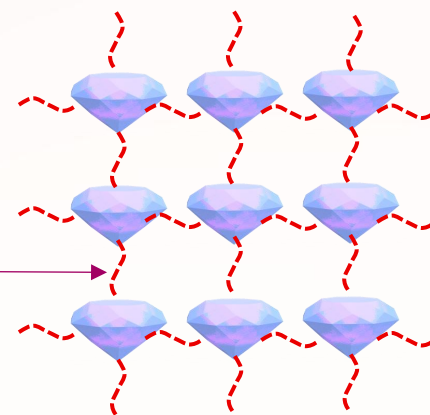
- **動作温度**：超伝導と比較して高温（ >1 K ※ケルビン）での動作が可能
- **モジュール型量子コンピュータ**：量子モジュール同士を量子状態が転送可能な**光接続**によって連結、一体のシステムとして量子コンピューティングが可能



量子的な光接続の概念図

(光による電子スピン量子ビットの遠隔エンタングルメント)

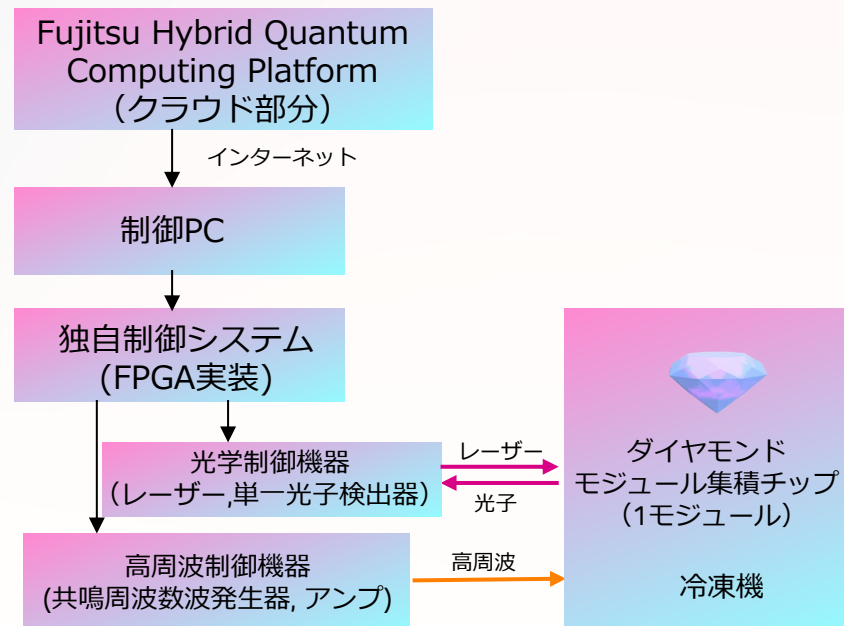
量子的な光接続に
よって拡張が可能



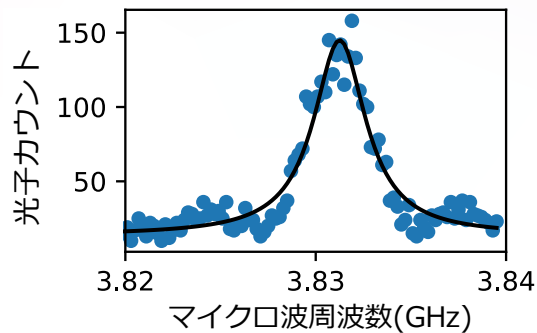
モジュール型アーキテクチャ

開発したプロトタイプの全体像

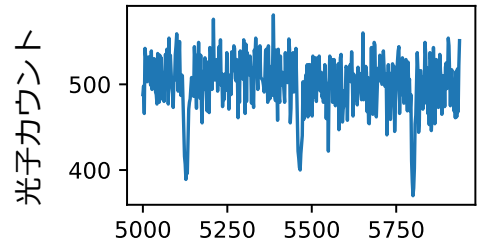
- 光接続による拡張に適した新規ダイヤモンドスピン材料（スズ-空孔、SnVセンター）を量子ビットとしてチップ集積した量子ゲート操作可能なシステムを世界で初めて構築



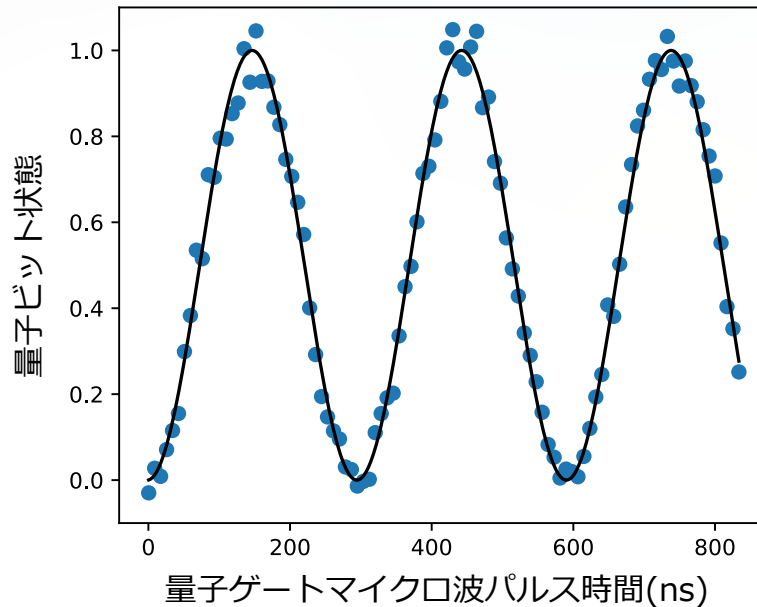
ダイヤモンドスピン量子ビットの動作例



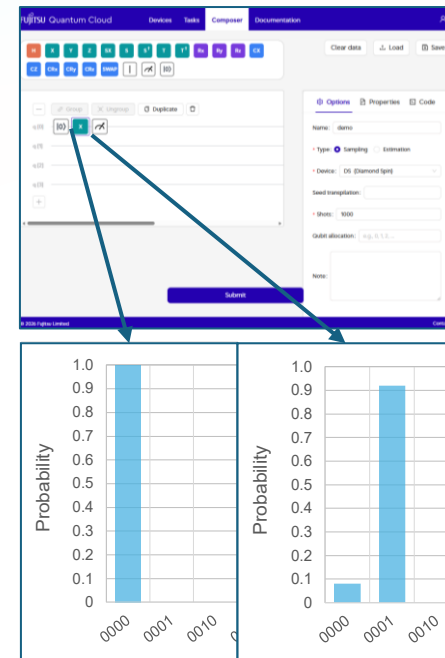
電子スピン量子ビット周波数の校正



核スピン量子ビット周波数の校正



電子スピン量子ビットの駆動例（ラビ振動）



クラウドシステムからのアクセスイメージ

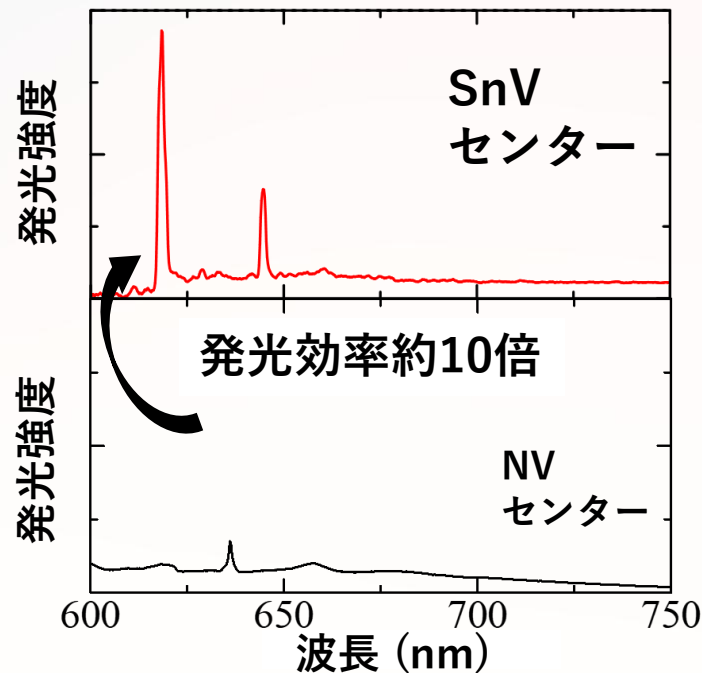
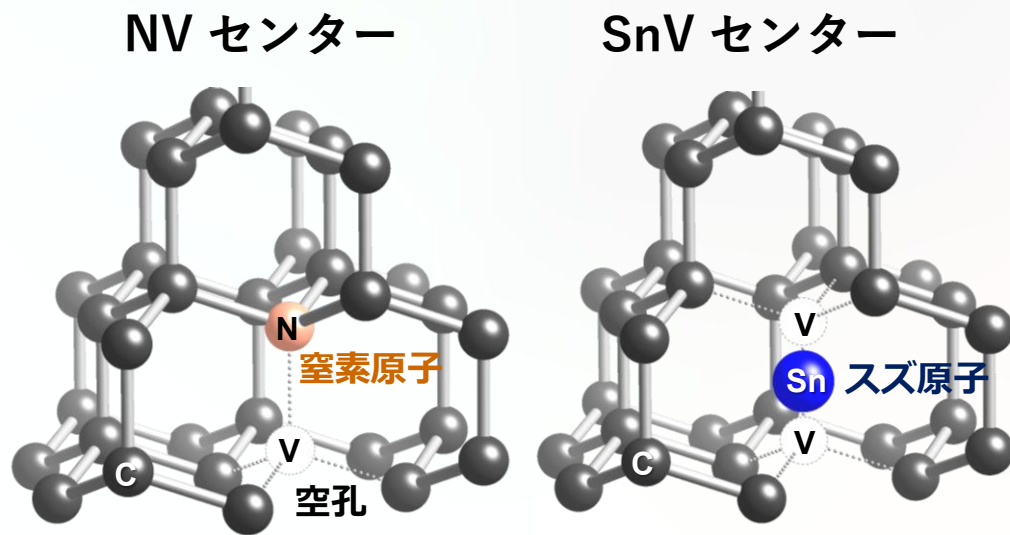
共同研究機関からのビデオメッセージ

QuTech, デルフト工科大学 Tim Taminiau グループリーダー



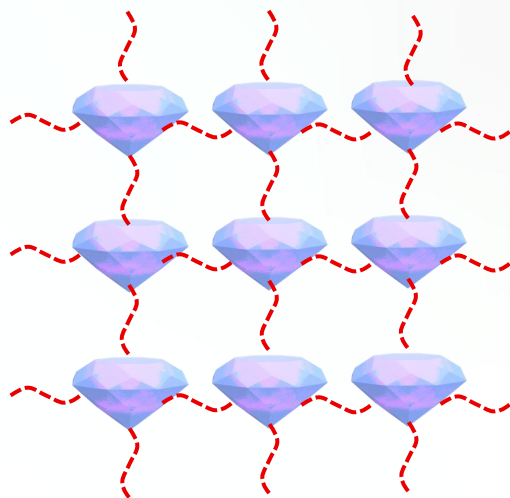
新材料の採用：スズ-空孔（SnV）センター

- 構造対称性により電荷ノイズに耐性があり、集積化に必要なナノ加工が可能
- 従来材料（NVセンター）と比較して約10倍の発光効率、高効率な光接続が可能

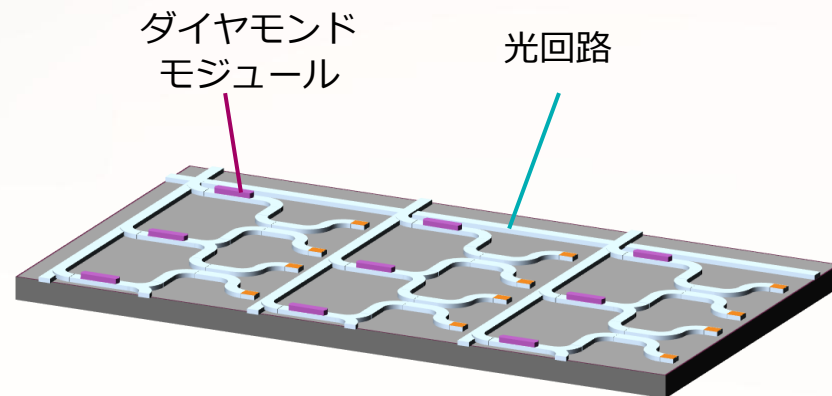


集積チップ化技術開発の必要性

- 限られたスペースでより多くのダイヤモンドモジュールを収めるには、集積チップ化が不可欠
- 高品質ダイヤモンドの制限を緩和し、求められる光回路機能を実現するために異種材料接合をベースに光集積チップを開発

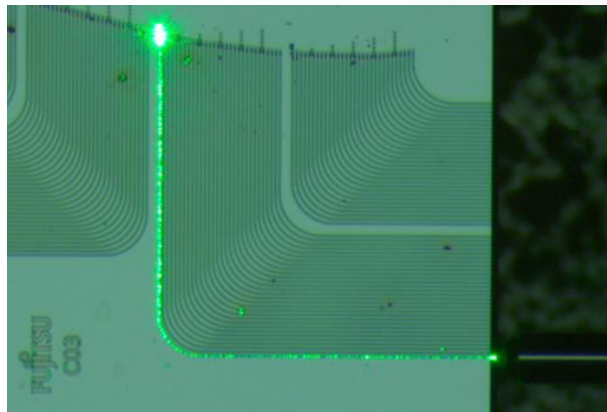


チップ化

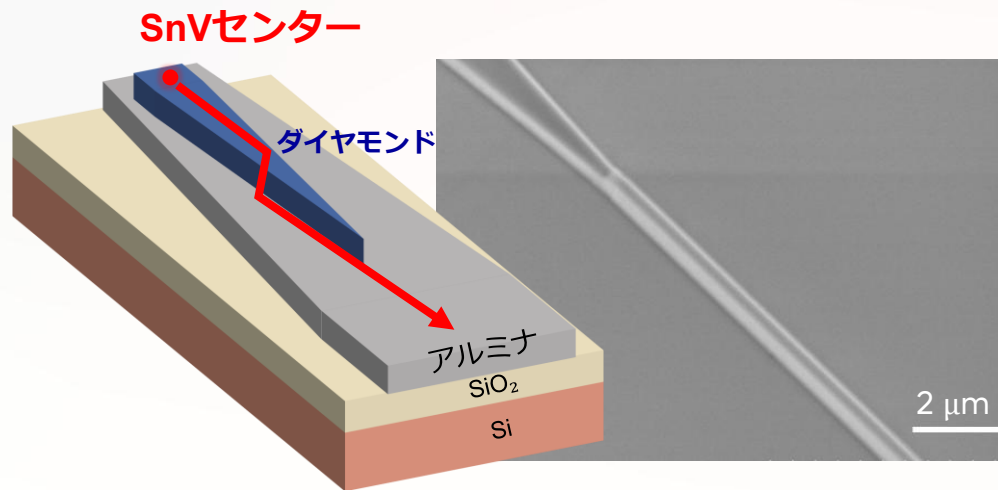


ダイヤモンドスピン向けフォトニクス集積回路技術

- SnVセンターの制御光および信号光となる可視光の波長帯で低光損失となるアルミナ光導波路回路を採用
- 貼り合わせ集積されたダイヤモンドモジュールとアルミナ光導波路が良好な光結合を得るために光導波路形状を最適化、さらに加工の最適化によりこれを実現



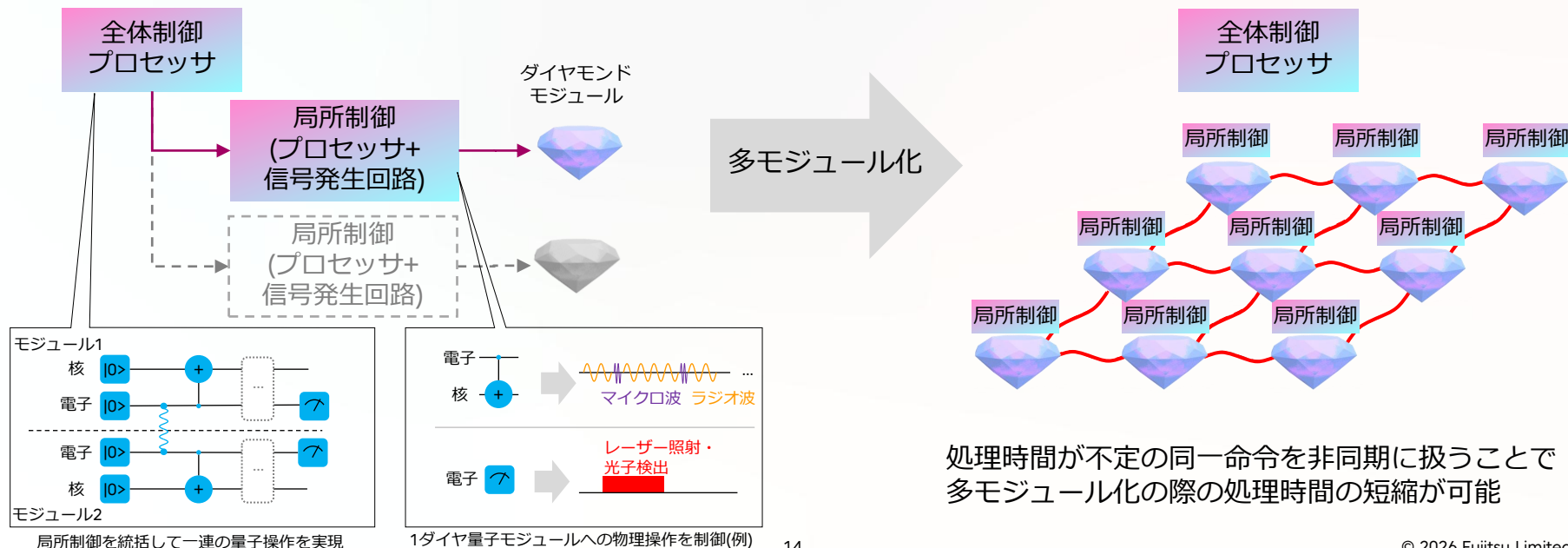
サンプル集積チップの外観写真



ダイヤモンドモジュール集積部分の拡大イメージ

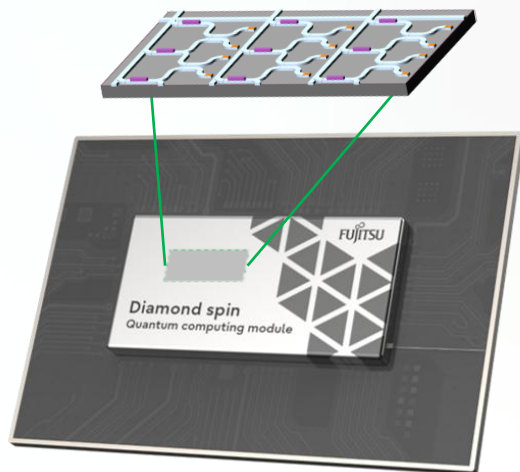
多モジュール化に対応した独自制御システムの開発

- ・ 制御システムもモジュール型で構成、将来の大規模化に容易に対応可能
- ・ 全体制御と局所制御の双方にプロセッサ搭載、リアルタイム制御をソフト制御化して、モジュール内外で柔軟な制御が可能

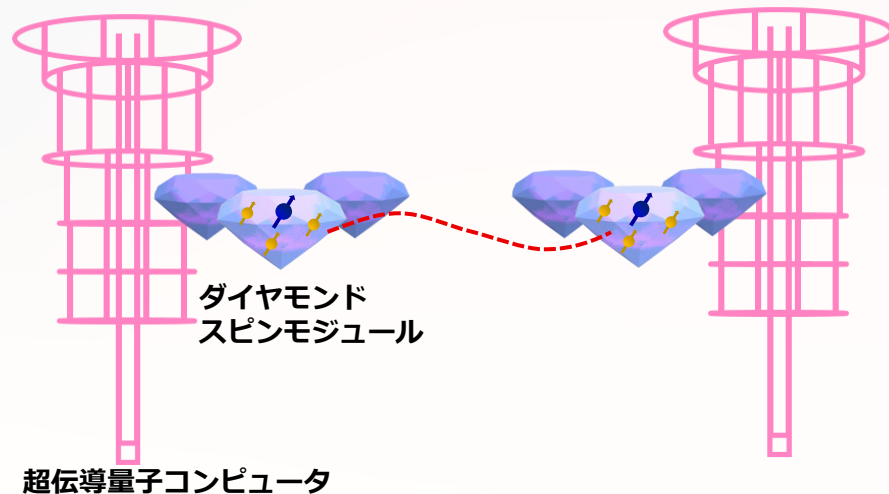


今後について

- 複数モジュール化の開発とともに、超伝導方式との接続技術の開発にも取り組み、両方式を合わせて誤り耐性量子コンピューティング実現を目指す。



マルチモジュールダイヤモンドスピン
量子チップのイメージ



超伝導量子コンピュータ大規模化へのイメージ

Thank you

クラウド経由でのプロトタイプ動作を実証

- 開発したプロトタイプをFujitsu Hybrid Quantum Computing Platformに接続し、量子ビット操作を確認

