目標６
「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

戦略推進会議

プログラムディレクター：
北川　勝浩
大阪大学　教授
令和4年3月11日

目次

1．目指す社会像
2．プログラムの構成
3．プロジェクトの進捗・成果
4．今後の方向性
5．自己評価結果

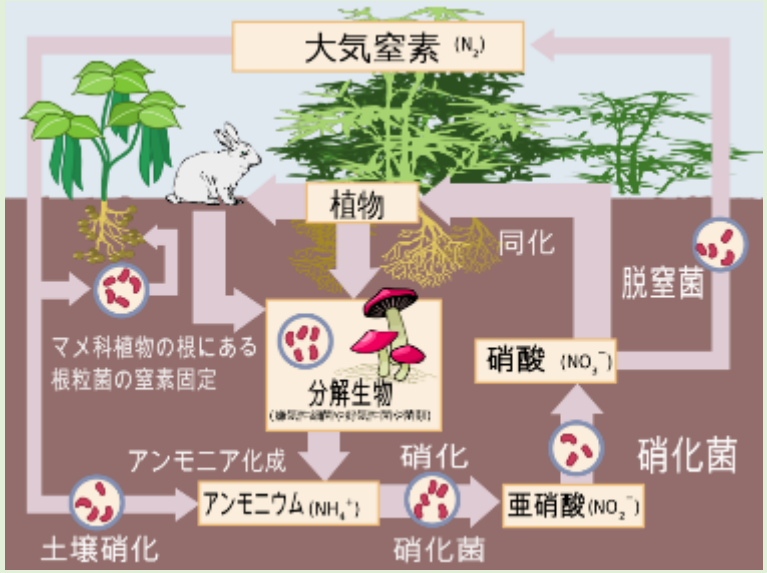
1．目指す社会像（1）

1．目指す社会像（2）

食料・エネルギー・環境問題の解決

窒素固定

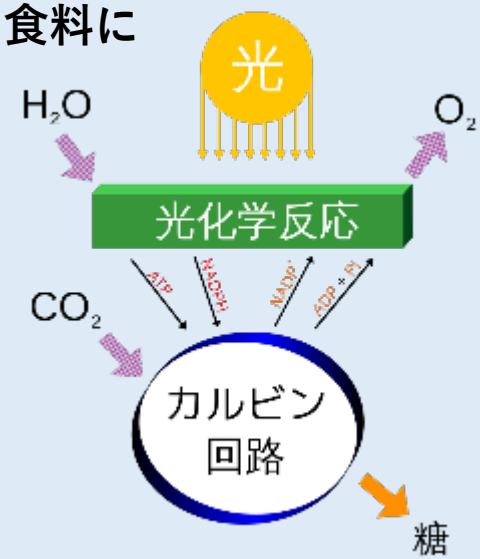
- 化学肥料：アンモニア合成の工業化
  百年前～ ハーバー・ボッシュ法
  高温400～600℃、高圧200～1000気圧
- 人類の全エネルギー消費の数%占める



- 菌の生物窒素固定
- 量子コンピュータによる解明に期待
- 人工的に模倣して省エネルギー化

光合成

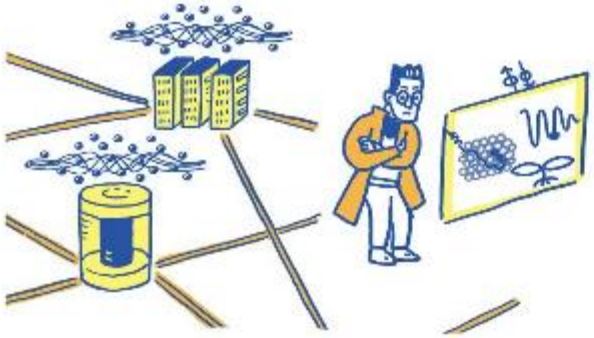
- 太陽光をエネルギー源として
  二酸化炭素と水から酸素と糖を生産
- 二酸化炭素（温室効果ガス）を減らして
  地球温暖化を緩和
- 糖はエネルギー・食料に



- 天然光合成の高効率の鍵は量子性
- 量子コンピュータによる解明に期待
- 模倣してありふれた元素で人工光合成

脱炭素の未来へ

1．目指す社会像（3）



複数の量子コンピュータをネットワークで連携させることで、大規模な計算を高速で行う

「省エネ」な生物の営みを正確に理解

20世紀初頭に発明されたハーバー・ボッシュ法は窒素肥料の原料となるアンモニアの工業生産を可能にし、人類の繁栄を支えてきた。しかし現在、窒素肥料の生産には人類が消費する全エネルギーの数%が費やされており、地球環境に大きな負担をかけている。
一方で、菌が行う天然の窒素固定（空気中に存在する窒素分子を、窒素化合物に変換する反応）は、ハーバー・ボッシュ法に比べるとはるかに省エネルギー、省資源だ。窒素固定を人工的に再現できれば、エネルギー問題、食料問題、地球温暖化など、私たちが抱える様々な問題の解決につながるだろう。
なぜ、生物は当たり前のように複雑な反応を効率よく行うことができるのか。その秘密は反応に関わる物質を構成する量子のふるまいにあると考えられているが、複雑に絡み合う量子状態はスーパーコンピュータを使っても厳密に計算することが難しい。しかし誤り耐性型汎用量子コンピュータがあれば、生物が行う反応中の量子状態を厳密に計算（再現）することができる。

持続可能な安全で豊かな社会

創薬、材料、室温超伝導、金融も

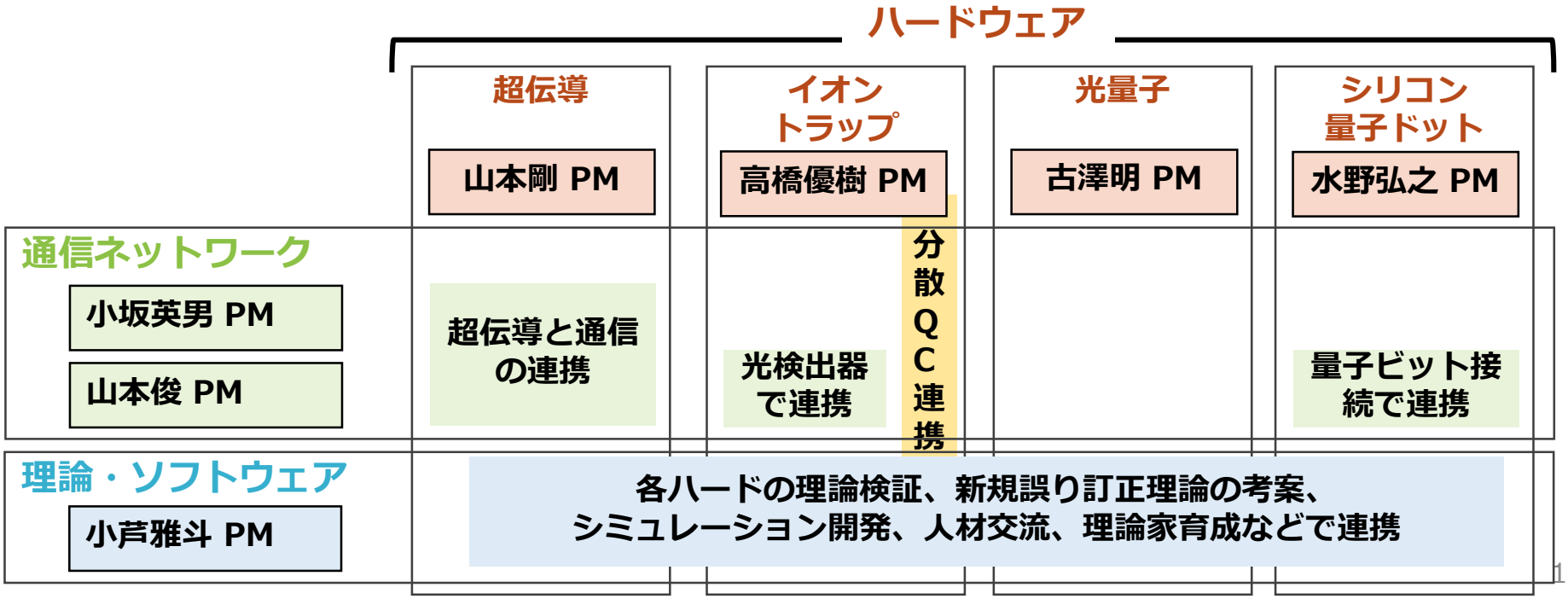
様々な反応の量子状態を厳密に計算し、物質の性質を正確に予言することが可能になるため、創薬や室温超伝導物質などの材料開発が飛躍的に加速する。

人工光合成の実現。太陽の光と水を使って、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を酸素と有機化合物に変える。

人工窒素固定の実現。省エネルギーでありながら、空気中の窒素から窒素化合物を効率よく合成できる。

2．プログラムの構成

PM	研究開発プロジェクト
山本 剛（日本電気株式会社）	超伝導量子回路の集積化技術の開発
高橋 優樹（沖縄科学技術大学院大学）	イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ
古澤 明（東京大学）	誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発
水野 弘之（株式会社日立製作所）	大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発
小坂 英男（横浜国立大学）	量子計算網構築のための量子インターフェース開発
山本 俊（大阪大学）	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
小芦 雅斗（東京大学）	誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発

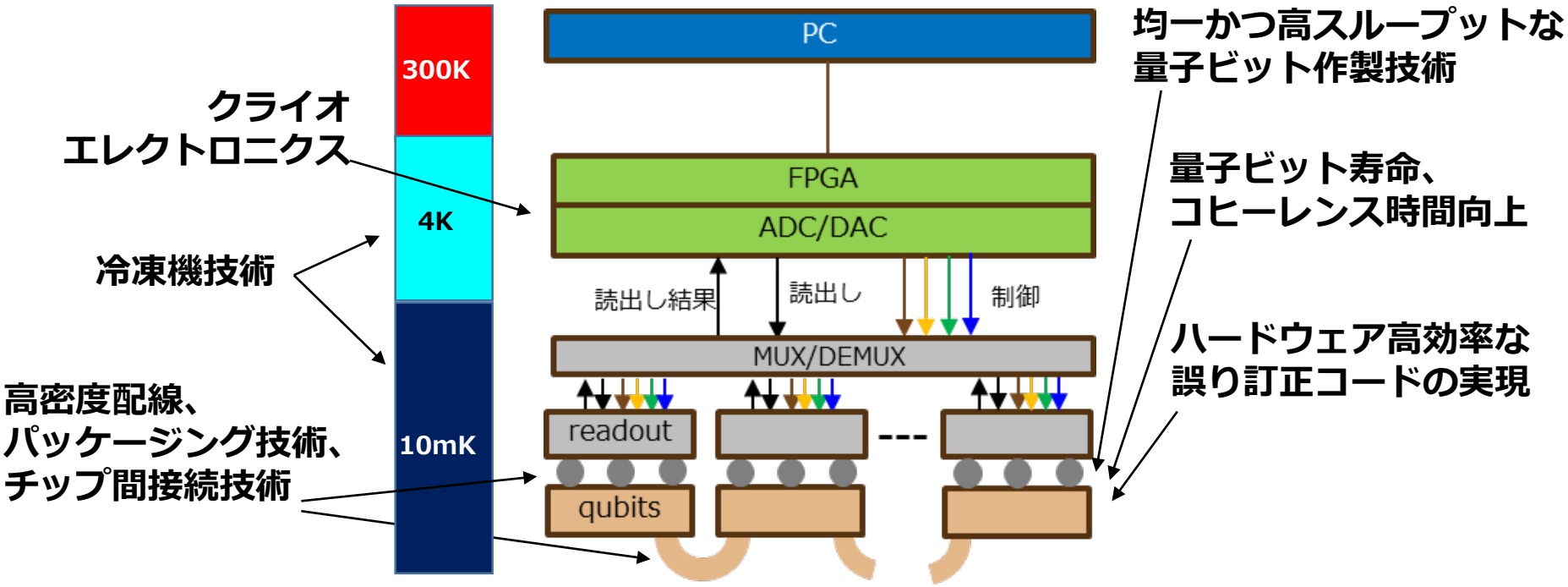


3．プロジェクトの進捗・成果（山本剛PM）

量子ハードウェア1　超伝導方式

超伝導量子ビットの高集積化と制御を可能とするための要素技術の開発が進展

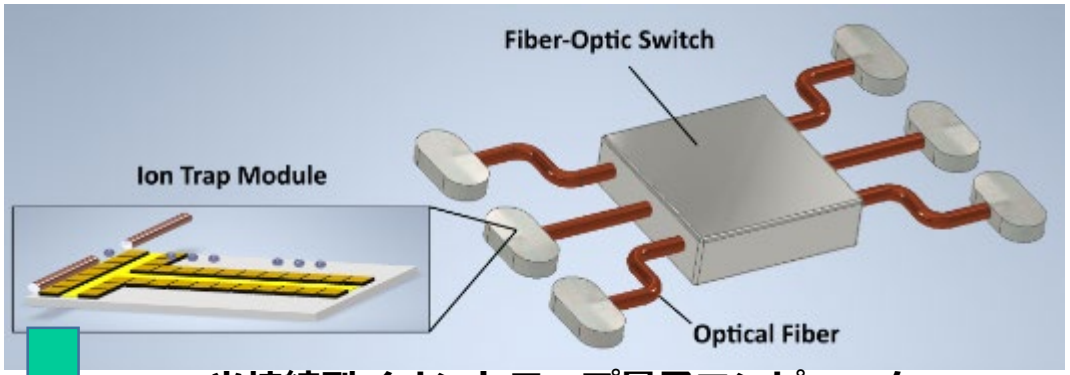
液浸露光装置を用いて従来より抵抗値ばらつきの少ない量子ビットを作成し、高集積化に貢献



3．プロジェクトの進捗・成果（高橋PM）

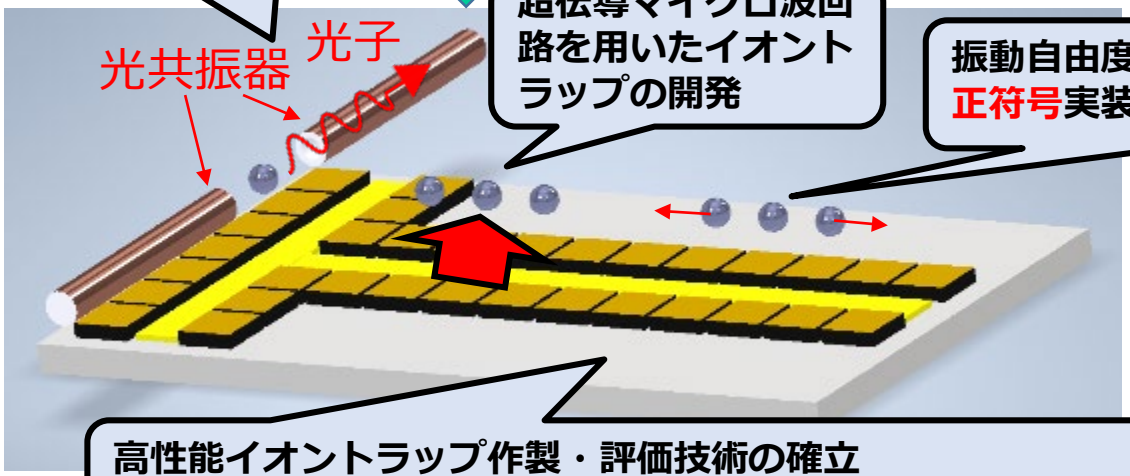
量子ハードウェア2　イオントラップ方式

イオントラップの作製と性能検証を完了し、量子誤り訂正符号実装のための研究開発に着手



光接続型イオントラップ量子コンピュータ

イオントラップの量子光接続に関する研究開発



超伝導マイクロ波回路を用いたイオントラップの開発

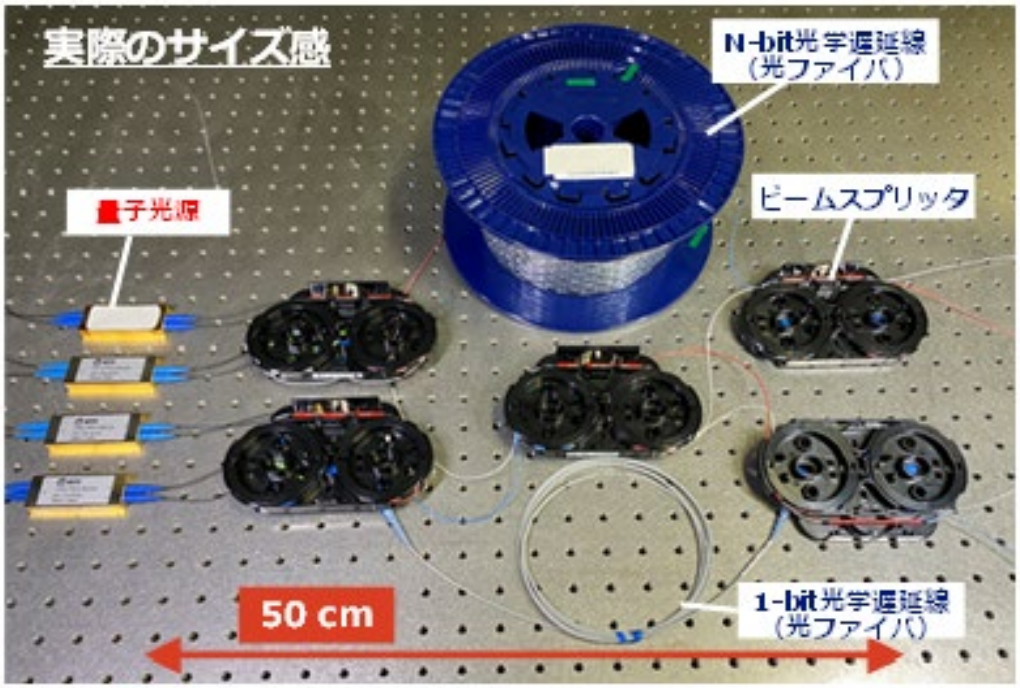
振動自由度を用いた量子誤り訂正符号実装のための研究開発

高性能イオントラップ作製・評価技術の確立
イオントラップ量子コンピュータのクラウド化基盤技術

3．プロジェクトの進捗・成果（古澤PM）

量子ハードウェア3　光量子方式

- ✓ **ラックサイズで大規模光量子コンピュータを実現する基幹デバイスを実現**
- ✓ 6THz以上の広帯域にわたって量子ノイズが75%以上圧搾された連続波のスクィーズド光の生成に、世界で初めて光ファイバ光学系で成功
- ✓ 光通信デバイスを用いた安定的かつメンテナンスフリーな、現実的な装置規模の光量子コンピュータ開発を可能とし、**実機開発を大きく前進**



基本構成部品

- ４つのスクィーズド光源
- ２つの遅延線（光ファイバ）
- ５つのビームスプリッタ

どんな規模の計算も実現可能

12/22プレス発表（NTT、東大、理研、JST）

出典：　https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211222-2/index.html

3．プロジェクトの進捗・成果（水野PM）

量子ハードウェア4　シリコン量子ドット方式

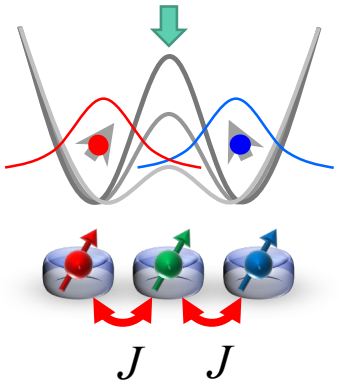
誤り耐性型シリコン量子コンピュータの実現に向けた研究開発が進展

世界初の３量子ビット ユニバーサル操作を実証

- ✓ **シリコン集積チップによる大規模量子演算の原理検証として重要な結果であり、今後の集積チップ開発にフィードバック。**

Si/SiGe三重量子ドット試料

交換相互作用をゲート電圧制御

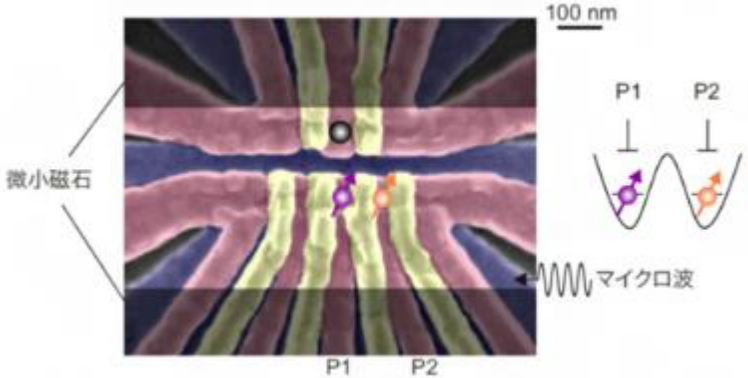


$$F_{\mathrm{GHZ}} = 88\%,\ |\mathrm{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\downarrow\rangle)$$

K. Takeda *et al.*, Nat. nanotechnol. **16**, 969 (2021)

シリコン量子ビットで高精度な ユニバーサル操作を実現

- ✓ **シリコン量子ドットデバイス中の電子スピンを用いて、高精度なユニバーサル操作を実証**
- ✓ **世界で初めて誤り耐性閾値以上の2ビット操作忠実度（99.5%）を実証**



用いた試料の電子顕微鏡写真

出典：https://www.riken.jp/press/2022/20220120_1/