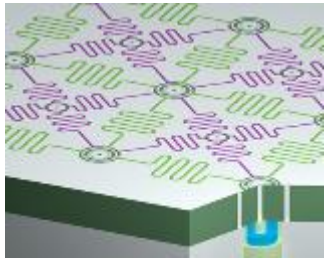
3．プロジェクトの進捗・成果（小坂PM）

量子通信ネットワーク1

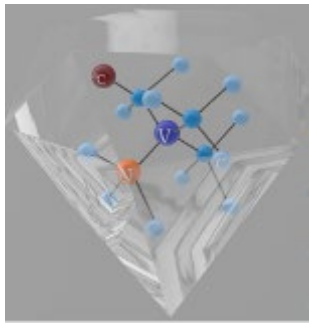
ノイズ耐性のある量子インターネットへの道を拓く

世界初、ダイヤ中の電子と光子の幾何学的な量子もつれの生成に成功



超伝導や半導体等の
量子ビット

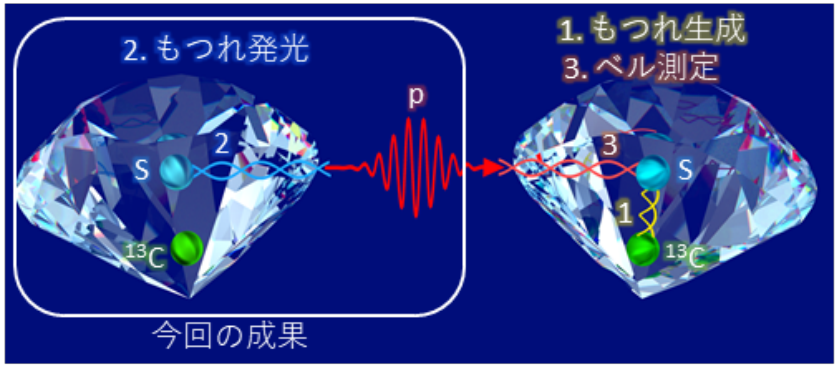
マイクロ波



波長変換や量子中継

通信波長光子

量子ネットワーク



遠隔ダイヤモンド間の量子もつれの
生成手順と今回の成果の概念図

本研究成果のポイント

- 異なる量子系と互換性の高いゼロ磁場での量子ビットと光子の量子もつれ生成に成功。
- 量子インターネットに必要な**量子中継器の実現に向け前進**。

12/15プレスリリース（横国大、JST）

出典： https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211215/index.html

3．プロジェクトの進捗・成果（山本俊PM）

量子通信ネットワーク2

「各ハードウェアと光との量子インターフェース」の基礎原理の実証、「多重化光子検出技術」のシステム検証のための立ち上げが進捗

- ✓ 様々な量子コンピュータを接続する手法をオールインクルーシブに研究
- ✓ 超伝導ナノワイヤ光子検出器(SNSPD)開発が順調に進み、10チャンネル冷凍システムが完成

原子/イオン

原子ネットワーク型技術

・光を介して伝送

高性能・大規模
超伝導光子検出器開発

光

光子ネットワーク型技術

・光子と光子の相互作用

半導体

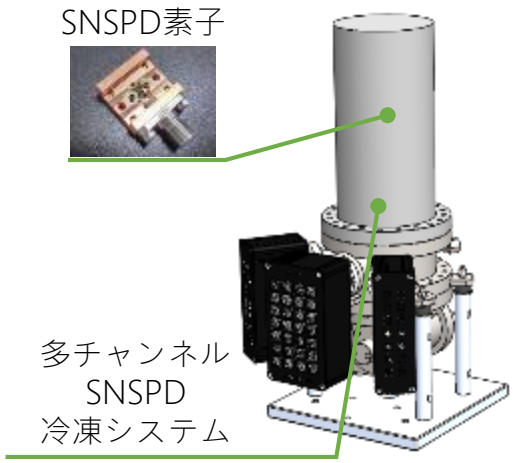
半導体ネットワーク型技術

・マイクロ波を介して伝送
・光を介して伝送

超伝導

超伝導ネットワーク型技術

・光を介して伝送



連携

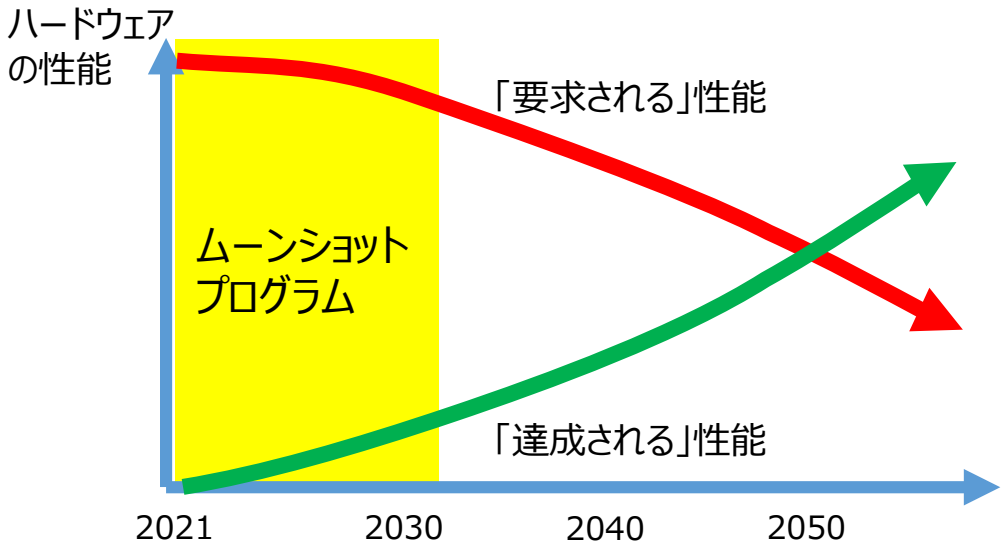
- 目標6内ハードウェア
- 誤り耐性

3．プロジェクトの進捗・成果（小芦PM）

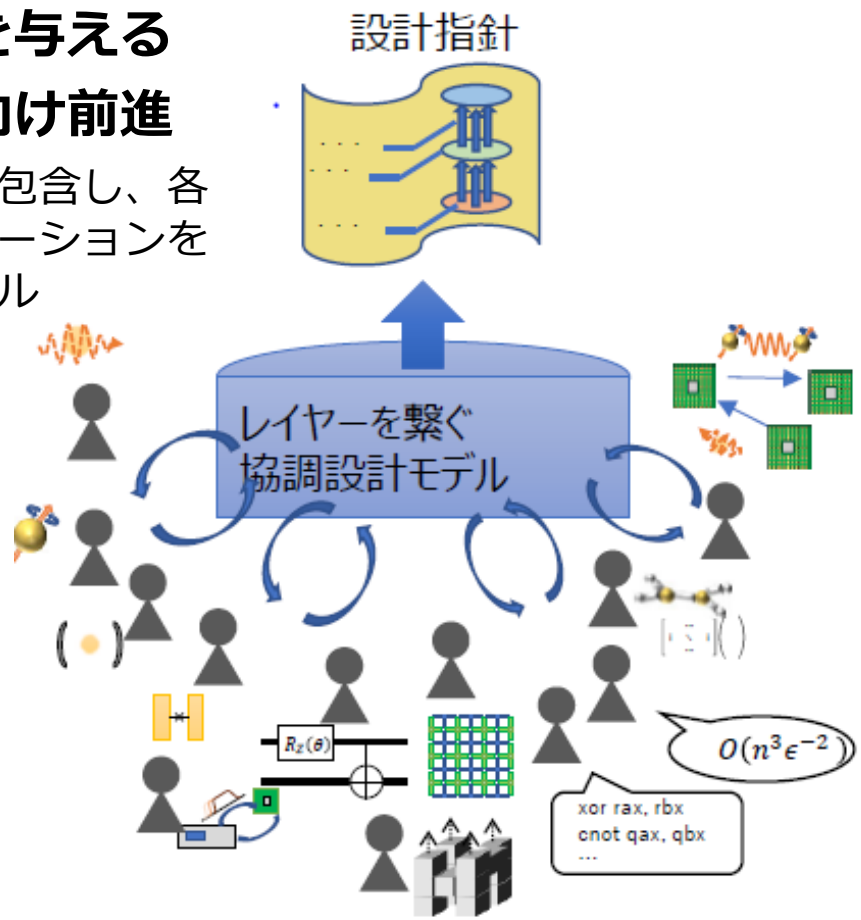
誤り耐性

誤り耐性型量子コンピュータの設計指針を与える
クロスレイヤー協調設計モデルの構築に向け前進

- ✓ 誤り耐性型量子コンピュータの様々なレイヤーを包含し、各レイヤーの性能指数をもとに、最適化やシミュレーションを通じてシステム全体としての性能を予言するモデル
- ✓ 超伝導NISQ*のミニマムモデルを構成



誤り耐性型量子コンピュータを大規模化するためのハードウェア要求性能を大幅に低減する



*NISQ:
Noisy Intermediate-Scale Quantum technology
小・中規模でノイズを含む量子コンピュータ

4．今後の方向性（1）

世界の量子コンピュータ開発状況

- ✓ 国益と情報セキュリティを念頭にした政府系資金の研究開発
- ✓ 先行者利益確保を狙う民間投資による開発競争
- ✓ 有望な４方式で量子ゲートが実現、半導体・中性原子以外は量子回路まで実現
- ✓ ただし**誤り耐性なし**

ハード方式	超伝導	イオントラップ	光量子	半導体	中性原子
特徴	回路構成 マイクロ波帯域	単一原子 理想的な光制御	ノイズ耐性 常温動作	回路構成 高集積性	高集積性 接続性
海外の状況	Google, rigetti, IBM, QuTech	IONQ, AQT, Honeywell	XANADU, PsiQuantum	intel, QuTech, Silicon Quantum Computing	atom computing, QuEra Computing Inc., PASQAL, ColdQuanta
波及効果、スピンアウト	超高感度磁気センサ、光子検出器	超高精度時計、ジャイロセンサ	量子ネットワーク、量子セキュリティ	量子ドットアレイセンサー	量子メモリ、量子シミュレータ
日本の強み	世界初の実現 (1999年;蔡,中村)	光結合技術 光格子時計など周辺	光量子計算創始者 (1998年;古澤)	量子ドット制御、集積回路技術	量子シミュレータ、光格子時計

NISQの範囲でさえ

- 世界的に**Winning方式が決まっていない**
- 世界が、どの方式でも、しのぎを削っている

4．今後の方向性（2）

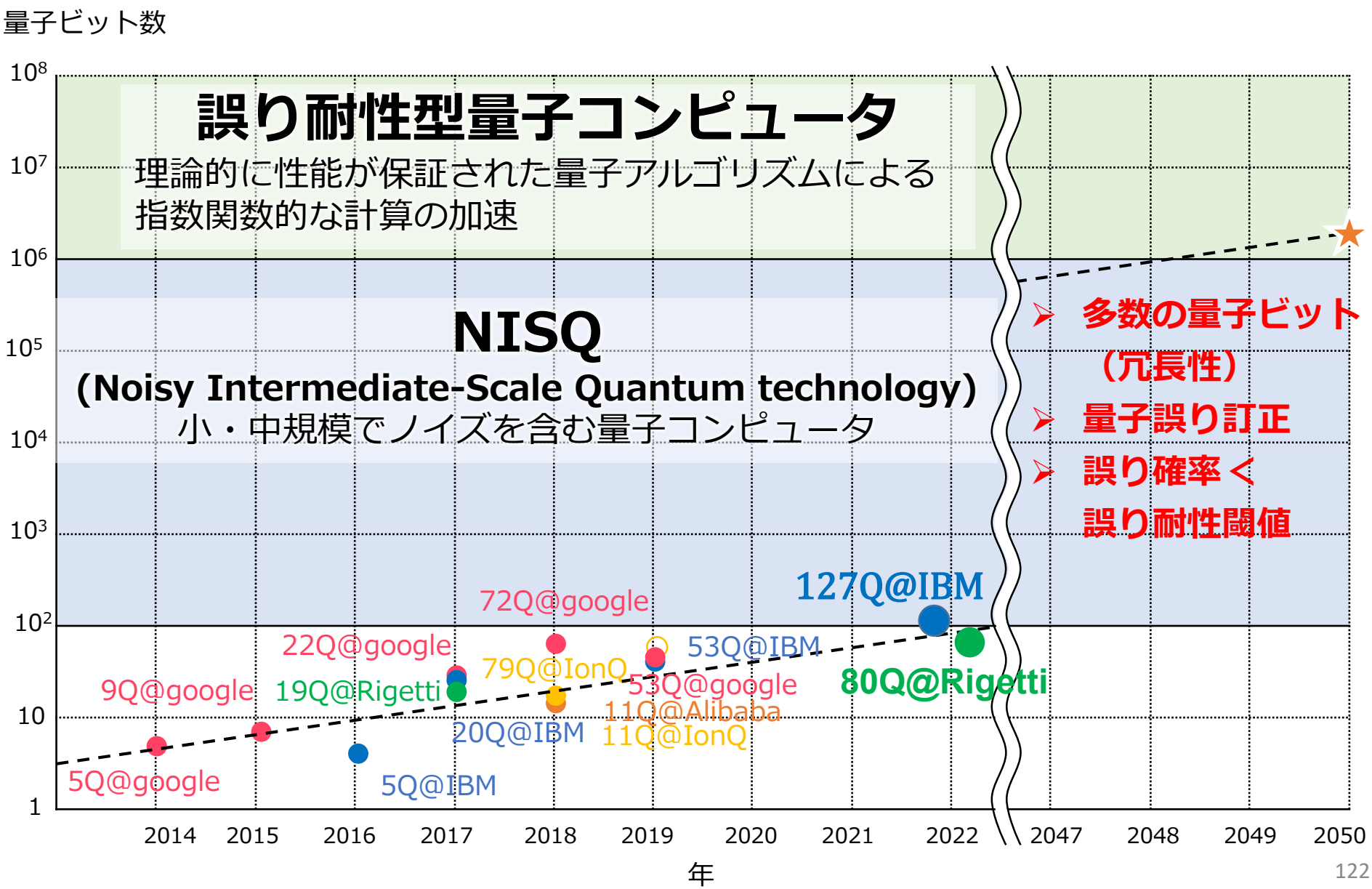
主要国の量子技術政策

～1,000億円/5年の政府研究開発投資

	政策動向	内容・予算規模
米	**「量子情報科学の国家戦略概要」** 発表（2018.9） **「国家量子イニシアティブ法」** 成立（2018.12）	**～1,400億円（$1.28B）/（2019- 5年間）** **「国家量子イニシアティブプログラム」** DOE：140億円（$125M）/年　量子情報研究センター (最大数5) NSF：56億円（$50M）/年　量子研究・教育センター (最大数5) NIST：89億円（$80M）/年　量子情報研究・計量標準、ワークショップ
中	**「科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画」**	**1,200億円/（2016- 5年間）** **「国家重点研究計画」** **「量子情報科学国家実験室」**（合肥市）第1研究棟完成（2020年）
EU	**「Quantum Manifesto」** （2016.5）	**～1300億円（€1B）/（2018- 10年間）** **「Quantum Flagship」**24課題が採択
独	**「ハイテク戦略2025」**（2018） 連邦教育研究省（BMBF） **「量子技術」**（2018.9） **「未来パッケージ」**（2021.1）	**～840億円（€650M）/（2018- 3年間）** **量子コンピューティング**、量子コミュニケーション、計測、量子分野の技術移転と産業の参画推進 **～2,600億円（€2B）/（2021- 5年間）** 量子通信、**量子コンピューティング**、量子センサおよび周辺技術（電子機器、光源、光学部品、材料、インターフェースなど）の研究開発
英	工学・物理科学研究評議会 **「National Strategy for Quantum Technologies」**（2014.12）	**第2フェーズ：～600億円（～£400M）/（2015- 5年間）** 「UK National Quantum Technologies Programme」 量子イメージング、量子センシング、量子通信、**量子コンピューティング＆シミュレーション**の４つのhubs構築など
仏	高等教育・研究・イノベーション省(MESRI) **「国家量子戦略」**公表（2021.1）	**～2,300億円（€1.8B）/（2021- 5年間？）** 量子戦略の7本の柱（**量子コンピュータ**、量子センサ、量子暗号通信など）を中心に、産業のバリューチェーン、人材育成・科学研究・技術実験を大幅に強化

参考：「量子技術関連の国内外の研究動向」(2021年3月、JST CRDS作成)

4．今後の方向性（3）


量子ビット数
10^8
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
誤り耐性型量子コンピュータ
理論的に性能が保証された量子アルゴリズムによる
指数関数的な計算の加速
NISQ
(Noisy Intermediate-Scale Quantum technology)
小・中規模でノイズを含む量子コンピュータ
➢ 多数の量子ビット
（冗長性）
➢ 量子誤り訂正
➢ 誤り確率＜
誤り耐性閾値
127Q@IBM
72Q@google
22Q@google
53Q@IBM
79Q@IonQ
9Q@google
19Q@Rigetti
53Q@google
80Q@Rigetti
11Q@Alibaba
20Q@IBM
11Q@IonQ
5Q@google
5Q@IBM
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2047
2048
2049
2050
年

4．今後の方向性（4）

量子技術全体を底上げしつつ、目標に向かってオールジャパン体制で研究開発

2050 大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現

2040 分散処理型NISQ量子コンピュータの実証　量子誤り訂正下での有用タスク計算

2030 一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証

<通信ネットワーク>

量子メモリの開発、光子と量子メモリ間の量子インターフェイス技術の確立や量子中継器・量子通信システム・テストベッド構築など

- 光源や検出器
- 量子メモリ
- 量子インターフェイス技術
- 量子中継器
- **量子通信システム**
- **テストベッド構築**

<ハードウェア>

量子誤り訂正システムの設計・実装、量子ビット・量子ゲート基盤の確立など

ステージゲート
実現可能性・将来性のある物理系を見極める

超伝導	イオントラップ	光量子	半導体	**新方式（固体・原子系）**

<誤り耐性>

○理論・ソフトウェア
○誤り訂正システム

低オーバーヘッド量子誤り訂正符号や量子アルゴリズム、誤り訂正システムの開発など

- 量子誤り訂正理論
- ミドルウェア、コンパイラー
- アルゴリズム、アプリケーション
- **誤り訂正システム**

新規プロジェクトの追加や計画前倒し等により、各カテゴリの研究開発を加速・強化

5．自己評価結果（1/3）

総括：
マイルストーン（目標値）の達成あるいは達成への貢献がある程度見込まれ、成果が得られている。

総合コメント
MS目標達成に向けたポートフォリオの妥当性（評価項目①）

「量子計算」の分野は、社会における主要課題の解決に繋がる可能性があるため、内外で大きな期待が寄せられており、米国・EU・中国を中心に、国や国家連合の支援体制の下で、または、大手企業の独自判断によって、研究開発が強化されている。内外でのこうした取組みで、国家間や研究組織間の競争的側面が強まっているが、目標達成への主要ルートは固まっておらず、当面は広い観点から複数ルートを探索する必要がある。また、産業面でも大規模な展開には至っておらず、真に価値のある技術に育てるには、国や組織を越えた相互の啓発や協力により、ルート開拓に努めることが必要とされている。そうした状況の中で、本プログラムを発足させ、ほぼオールジャパンに近い研究組織を作り、プログラム1年目として必要な基本的なポートフォリオの整備を行った。

特に、量子計算機の開発では、現存技術である程度までの機能を出せるNISQ（ある程度の誤りを容認する中規模の量子計算機）システムが当面の開発目標であるのに対し、本プログラムは、誤り耐性の高い量子計算機を目指しており、その要素技術の研究を進めることは、高い目標に到達するための戦略として適切であるだけでなく、同時にNISQの進展に寄与するものであると考える。

本プログラムの中核的な推進者は、量子計算の分野で研究を進めてきており、その基盤を基に、既に数件の注目すべき成果を挙げており、本プログラムの枠組みによる継続的財政支援で、一段と研究の進展が期待できる。また、プログラム内の相互の啓発や協力を推進することに配慮した研究推進体制が作られ、よく機能し始めており、マネジメントの点からも適切であると考える。なお、次年度以降に、関連予算の増強により、既存プログラムの推進の加速と取組み組織の拡大などを計画している。本プログラムの当初計画立案の際に検討した、より大規模なマスタープランの枠組みの中でしっかり位置づけて、若手育成に力を入れつつ進めていくことを検討する。

5．自己評価結果（2/3）

（1）プログラムの目標に向けた研究開発進捗状況（評価項目②）

1－1．なに挑か新取み価目 大胆想づく的革な評価 発基戦つ的組（項⑦）	本プログラムは、誤り耐性型の汎用量子計算機の実現を目指しており、この目標自体が極めて挑戦的なものである。事実、実現のためにたどるべき最善の道は現時点で明らかでなく、本プログラムでは、当初は４ルート（超伝導系、イオントラップ系、光量子系、シリコン量子ドット系）を通じて頂上を目指すために４チームを配するとともに、量子計算システムの構成要素間を繋ぐための量子インターフェースや量子ネットワークに関する研究を進める２チームと誤り訂正用のソフトウェア開拓のチームを作り、連携させる体制となっている。 本年度、7チームは、主に長期に亙って進める研究開発体制の整備を進めつつ、研究を推進したが、チームの幾つかでは、国際的にも注目すべきユニークな成果が達成されている。例えば、光量子のチームは、研究推進で重要な良質なスクイーズド光の発生法に関する顕著な成果を挙げ、シリコン量子ドットのチームは、世界で初めて3量子ビット動作を実現することに成功している。また、量子インターフェースのチームもダイヤモンド内のNVセンタの量子状態を外界に取り出すユニークな手法を見出している。 本プログラムでは、7チームの相互啓発と相互協力のための取組みが進んでおり、かつ、大学・国研の研究者が関連企業と密接に連携して成果を達成しつつあり、そうした取組を継続・強化できるように進める。
1－2．プログラム目標に向け今後の見通し価目 （評価項③）	本プログラムは順調に開始されており、当面は、当初計画に従って、目標達成への取組みが進展するのものと考えられる。なお、7チームの間の相互啓発や相互協力を積極的に進めることで、各チームが、その力量を高めあうことが期待できる。また、米国・EU・中国など、我が国よりも人口規模の大きな国や地域においてより多くの研究者や予算が投入されている量的な違いに目を奪われずに、むしろ、我が国の五分の一ほどの規模の国が、量子情報分野で、国際的なネットワークを活かしながら、卓越した成果を達成している事実に注目し、わが国独自の取組みを進めることに留意する。

5．自己評価結果（3/3）

（2）PDのプログラムマネジメントの状況（評価項目④）

2－1．研究資金の効果的・効率的な活用（官民の役割分担及びステージゲートを含む）（評価項目⑧、評価項目⑤）	a.産業界との連携・橋渡しの状況（民間資金の獲得状況（マッチング）スピンアウトを含む）	本プログラムには、企業出身のPMが参加しているだけでなく、個々のプロジェクトを推進するために、企業に所属する多くの研究者や技術者が参加している。これらの関係者が中核的な役割を果たすことで、強力な産学・官学の連携関係を構築している。特に、研究の推進に必要な超電導回路や光回路素子などの試作、単一光子検出器の提供など、広い範囲で協力が進んでおり、今後もさらなる協力関係を強化することを検討する。また、現在の協力や連携関係をさらに発展させるために、21年9月に「量子技術による新産業創出協議会：Q-STAR」が発足しており、NTTなど多くの企業との連携をさらに強めることを検討する。
	b.その他	特になし
2－2．国際連携による効果的かつ効率的な推進（評価項目⑥）		「量子計算」の分野は、学術界や社会における主要課題の解決に繋がる可能性があるため、大きな期待が寄せられ、米国・欧州諸国とEU・中国などで、国や国家連合の単位で、または、個別の企業や大学などで、研究開発が強化されている。この結果、国レベルや個々の研究組織の間で、競争的要素が強まっているが、その反面、研究開発の主要な方向性は固まっておらず、どの国でも、当面は広い観点からの試行錯誤が必要とされている。国や組織を越えた相互の啓発や協力によって、進めるべき方向を明らかにすることが必要とされる状況にある。 本プログラムでは、PDは勿論、PMの多くがそのような国際的な啓発と協力の重要性を認識しており、人的なネットワークが存在している。こうした認識と人的繋がりを活用し、国際シンポジウムの開催による情報交換、個別の研究チームによる国際的な研究連携などが進められている。今後、こうした取組みが、我が国のみならず、提携先の国において、研究の効果的・効率的な推進に寄与し、同時に、若手人材の育成にも繋がることが必要と考える。昨今、国際情勢の影響もあって、学術分野における国際交流の推進には、これまでよりも、慎重な対応が必要となってきているが、国を越えた相互啓発のお蔭で、卓越した成果が出る事例も少なくないので、調和のとれた対応を進めることを期待する。他方、国際的な流れに影響され過ぎて、独自の取組みが後退することがないよう留意する。
2－3．国民との科学・技術対話に関する取組み（評価項目⑨）		量子情報に関する研究開発については、現在、メディアを通じて社会に広く報道され、大きな関心を集めている。しかし、内容が難解なため、国民全般の理解を深めることは容易でない状況にある。今後、一般向けの講演会の開催や書籍の出版などを通じ、状況改善の取組みを進める。他方、理系の大学生と院生、企業で働く技術者や研究者、大学の理系教員には、量子情報に関心を持つ人が多く、その理解に要する素養も備えている人が少なくない。そこで、本プログラムの関係者は、Q-LEAPの関係者の企画した2021年9月のサマースクールに協力するなど、着実に貢献している。