



## ムーンショット目標 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

# 実施状況報告書

## 2021年度版

2021年4月～2022年3月

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

**山本 俊**

大阪大学 大学院基礎工学研究科 /  
量子情報・量子生命研究センター



## 研究開発プロジェクト概要

光、原子、半導体等の量子コンピュータハードウェアをネットワーク化するための要素技術を開発し、複数の中小規模量子コンピュータを接続した「ネットワーク型量子コンピュータ」を構築します。それにより、2050年には、さらなる大規模化を進め、汎用的な量子コンピュータの実現を目指します。

[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/66\\_yamamoto.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/66_yamamoto.html)

## 課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
山本俊	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授
下井英樹	浜松ホトニクス株式会社 電子管事業部	グループ長
三木茂人	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所	主任研究員
青木隆朗	早稲田大学 理工学術院	教授
大岩顕	大阪大学 産業科学研究所	教授
久保結丸	沖縄科学技術大学院大学 サイエンス・テクノロジー・グループ	サイエンス・テクノロジー・アソシエイト

## 1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

本研究開発プロジェクトは必ずしも単体では「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」を実現するほどではないNISQ(中小規模の量子)計算機を量子接続し、大規模化するためのネットワーク化技術に貢献する。それと同時にネットワーク化することにより分散型量子コンピューティングを含む任意の量子アルゴリズムを可能にするとともに、「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」により顕在化する情報セキュリティの脅威も同時に解決することを目標に研究を進めている。現在の技術からNISQ 規模量子コンピュータの候補となるハードウェアとして、超伝導、光、原子・イオン、半導体の各物理系が想定される。これらの量子コンピュータをネットワーク接続することでネットワーク型NISQ 規模量子コンピュータを実現し、光と協調して動作するNISQ 規模量子プロトコルを実装する計画である。当該年度は各ハードウェアと接続するための基盤的な技術に関して、前年度に定めた方針に従って、第1段階の研究を推進した。

## 2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

### (1) 研究開発項目1:原子ネットワーク型技術

#### 研究開発課題1:原子・光多重化量子ネットワーク技術

##### 当該年度実施内容:

原子量子ビットをネットワーク接続するための量子インターフェースを開発し、NISQ 規模の原子アレイ量子コンピュータを接続する。当該年度では5年後のマイルストーンである原子アレイ間のエンタングルメント生成に用いる原子アレイ系のためのトラップビームの生成と、冷却原子系の立ち上げを行った。当初計画では予見しなかった展開として、光子のルーティング技術に利用できる“Optical frequency tweezers”を提案および実証し、論文掲載に至った。

課題推進者:山本俊(大阪大学大学院基礎工学研究科)

#### 研究開発課題2:多重化光子検出器開発

##### 当該年度実施内容:

多重化された光検出システムを実現するために、SNSPD の開発環境を整備するため、当研究機関で SNSPD が作製できるように製造設備を導入した。並びに 12 チャンネルの SNSPD を 2.3K 以下まで冷却するための冷凍システムを作製し評価を行い、提供できるものにできた。SNSPD を搭載した光子検出システム (SNSPD システム) の各研究開発項目への提供については、提供先の課題推進者及び PM と協議を重ねた結果、さらなる研究の加速のため、より光子検出効率が高い SNSPD を作製、搭載後に提供することとしている。

課題推進者:下井英樹(浜松ホトニクス株式会社)

#### 研究開発課題3:高性能光子検出技術開発

##### 当該年度実施内容:

超伝導ナノワイヤ光子検出器(SNSPD)における検出効率は、超伝導ナノワイヤを構成する窒化ニオブチタン(NbTiN)薄膜の結晶性や超伝導特性、さらには、ナノワイヤのパターン精度の均一性に依存する。そこで、本年度は様々な条件下で成膜した NbTiN 薄膜

を用いた SNSPD 素子を作製し、NbTiN 薄膜成膜条件に対して高検出効率の実現に向けて有益な知見が得られた。また、超伝導ナノワイヤ形成プロセスの最適化を実施し、ナノワイヤパターンのエラーや線幅均一性に対する明確な改善を確認した。

課題推進者: 三木茂人(情報通信研究機構)

(2) 研究開発項目2:光子ネットワーク型技術

研究開発課題1:共振器 QED 量子ネットワーク化技術

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、光子量子ビットをネットワーク接続するための量子インターフェースを開発し、NISQ 規模の光子量子コンピュータを実現する。当該年度では3年後のマイルストーンである1次元光子量子ビット列生成の原理検証に向けて、ナノファイバー共振器 QED 系における単一原子のトラップを実現した。

課題推進者: 青木隆朗(早稲田大学理工学術院)

(3) 研究開発項目3:半導体ネットワーク型技術

研究開発課題1:半導体量子ビットの量子ネットワーク化技術

当該年度実施内容:

NISQ 規模の半導体量子コンピュータの接続を目指したシリコン量子ビット間結合の開発については、今年度は前年度開始したスピン量子ビット間接続方法の検討を継続し、特に断熱量子転写(AQT)の素子設計と試作、そして動作確認を開始した。光子とシリコン量子ビットの接続では光子との量子インターフェースとして有望なゲルマニウム量子ビットの作製と量子ドット動作を実現することができた。その他、表面プラズモンアンテナによる光子と量子ドット中のキャリアとの変換効率の向上を実証し、量子インターフェース開発の基盤技術を開発した。

課題推進者: 大岩颯(大阪大学産業科学研究所)

(4) 研究開発項目4:超伝導ネットワーク型技術

研究開発課題1:超伝導量子ビットの量子ネットワーク化技術

当該年度実施内容:

本研究開発課題においては、超伝導量子コンピュータのネットワーク化技術に向けて極低温で動作する量子トランスデューサーをダイヤモンド結晶中の不純物スピンを用いて開発する。当該年度においては、その実現に必須な要素技術である光共振器の低温動作に向けて必要な準備や予備実験を行った。

課題推進者: 久保結丸(沖縄科学技術大学院大学)

### 3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

- 大阪大学 量子情報・量子生命研究センターの下に構成した PM 支援体制チームと共に進捗状況の把握に努めた。

- 重要事項の連絡・調整を行うために運営会議を実施した。構成員は議長：山本俊 PM、参加者：参画機関等（課題推進者、JST 等）である。2021 年 10 月 14 日に第 2 回運営会議をオンライン開催し、実施規約の改訂について意見交換を行った。さらに、2022 年 1 月 19 日に第 3 回運営会議を開催し、実施規約の改訂について審議した。
- プロジェクト内での課題推進者会議を 2021 年 9 月 28 日に実施し、各課題推進者から進捗状況に関して詳細な報告を受けた。
- プロジェクトの参加研究開発機関の一つである浜松ホトニクス(株)の豊岡製作所へのサイトビジットを 2021 年 12 月 14 日に実施した。研究設備の視察や打合せを通して、進捗状況を正確に把握した。

#### 研究開発プロジェクトの展開

- 当該年度も引き続き研究体制を早期に整えることに注力した。
- プロジェクト間の連携を促進させるためのミーティング(2 件)を実施した。
  - ① 山本剛 PJー山本俊 PJ 連携ミーティング (2021 年 9 月 14 日オンライン開催)
 

【内容】 山本俊 PJ と山本剛 PJ との間での研究協力について、内容と今後の方針について、打ち合わせを実施した。

【参加者】 山本剛 PM、山本俊 PM をはじめ、両プロジェクトから関係者 5 名が参加。
  - ② 高橋 PJー山本俊 PJ 連携ミーティング (2021 年 9 月 24 日オンライン開催)
 

【内容】 山本俊 PJ と高橋 PJ との間での研究協力の一環である、光子検出器に関する打合せを実施した。

【参加者】 高橋優樹 PM、山本俊 PM をはじめ、両プロジェクトから関係者 10 名が参加。
- プロジェクト内の研究連携を促進させるため、プロジェクトの参加メンバーを対象とした研究会を企画した。プロジェクト内のチームから数名発表し、メンバー間で活発な議論を行うことで、量子技術関連の知識を共有し、さらにはプロジェクトの目標達成を目指す。当該年度は 2022 年 1 月 19 日に第 1 回研究会をオンライン開催し、山本俊チームから 3 名が研究発表を行った。研究会への参加者は 21 人であった。このプロジェクト研究会は次年度以降も 3～4 か月に 1 回の頻度で定期的開催する予定である。

#### (2) 研究成果の展開

- 研究開発プロジェクトにおける知的財産権の運用について協議する場として知財運用会議の体制を整える。構成員は議長：山本俊 PM、参加者：JST および知的財産権の利害関係者とする。
- 国立国会図書館からの委託を受け、「量子情報技術」と題した調査報告書を出版した。この報告書には「量子技術の概要」、「研究開発の動向」、「社会実装(実用化)と社会への影響及び課題」、「世界各国の政策」といったムーンショット目標 6 プログラムと密接に関係した内容が含まれており、今後、プロジェクト成果の展開戦略を立案する際にはこの調査結果も役立てていく。

### (3) 広報、アウトリーチ

- 量子技術の普及を目指した非専門家向けアウトリーチとして

- ① 【活動】 量子力学×文学 コラボカフェ

『デンマークの絵本から見る、量子力学の世界』

【開催日】 2021年6月20日（オンライン開催）

【実施者】 山本俊 PM

【内容】 2021年にニールス・ボーア研究所が100周年を迎えることを記念して、デンマーク大使館の協力のもとに日本語訳された絵本『フィン・フォトンさんと量子力学』（原題 Finn Foton og Kvantefysikken）を紹介するオンラインイベントにおいて、絵本に描かれた量子力学の不思議な世界を非専門家に解説した。

- ② 【活動】 バイリンガルニュース (Bilingual News) - 488. 特別編 Kubo 11.18.21

【配信日】 2021年11月18日

【実施者】 久保結丸(課題推進者)

【内容】 無料で配信されるPODCASTの番組「バイリンガルニュース」にゲスト出演し、英語と日本語の「バイリンガル形式」で一般視聴者を対象として、量子コンピュータを紹介した。

- ③ 【活動】 第36回 大阪大学大学院基礎工学研究科 産学交流会 での講演

【開催日】 2021年11月24日開催

【実施者】 山本俊 PM

【内容】 大阪商工会議所や生産技術振興協会の非専門家を対象として、「量子インターネットから量子サイバースペース」と題した講演を行った。

- ムーンショット目標6達成を担う人材育成に向けたアウトリーチとして、

【活動】 JST スーパーサイエンスハイスクール事業

武庫川女子大学附属高等学校での授業

【開催日】 2021年5月27日（オンライン開催）

【実施者】 三木茂人(課題推進者)

【内容】 高校生を対象としてオンラインで出張授業を行った。授業では超伝導の不思議な現象を分かりやすく解説し、さらに、超伝導を応用して「絶対に破ることのできない暗号通信」や「スーパーコンピュータを上回る新しい量子コンピュータ」などの未来技術を実現しようとする最先端の研究開発を紹介した。

- その他のアウトリーチとして

【活動】 量子技術イノベーション戦略の戦略見直し検討ワーキンググループ(第4回)

【開催日】 2021年12月6日（オンライン開催）

【実施者】 山本俊 PM

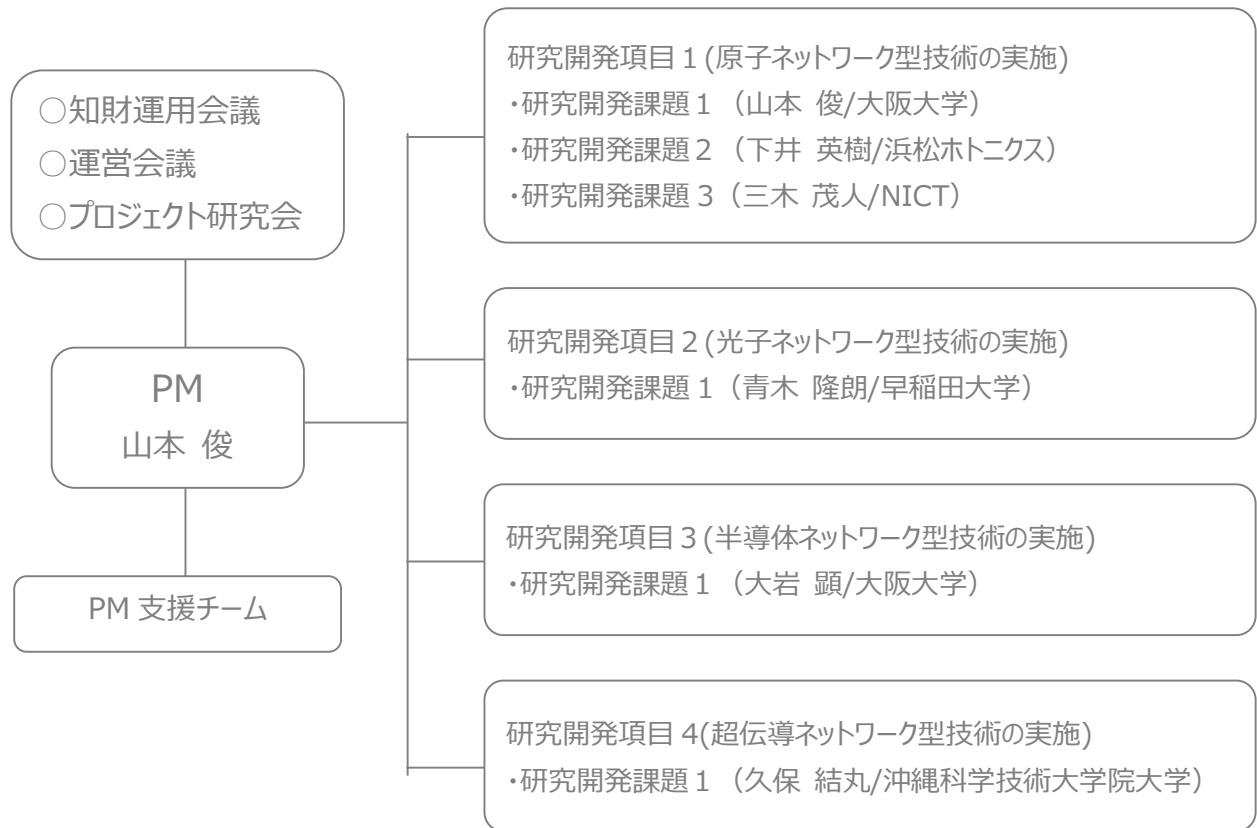
【内容】 内閣府主催の「量子技術イノベーション戦略の戦略見直し検討ワーキンググループ(第4回)」において、有識者としてワーキンググループの構成員に対して、量子インターネットに関する講演を行った。

- 広報活動の一環として、プロジェクトホームページの作成を企画した。令和 4 年度にはホームページが完成する予定である。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- データマネジメントプランを作成し、適切なデータ管理に務める。

#### 4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



##### 知財運用会議

議長：山本俊 PM、 参加者：JST、利害関係者

実施内容：研究開発プロジェクトにおける知的財産権の運用および知財戦略について

##### 運営会議

議長：山本俊 PM、 参加者：参画機関等（課題推進者、JST 等）

実施内容：重要事項の連絡・調整、さらに実施規約に関して

##### プロジェクト研究会

参加者：山本俊 PM、課題推進者、プロジェクト参加者、関係者

実施内容：プロジェクトの参加メンバーを対象とした研究会であり、3～4 か月に一回のペースで開催する。プロジェクト内のチームから数名発表し、メンバー間で活発な議論を行うことで、量子技術関連の知識を共有し、プロジェクトの目標達成を目指す。



## 5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	2	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	2	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	4	3	7
口頭発表	7	1	8
ポスター発表	0	0	0
合計	11	4	15

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	5	5
(うち、査読有)	0	5	5

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	1	2	3
その他	0	0	0
合計	2	2	4

受賞件数		
国内	国際	総数
3	0	3

プレスリリース件数
0

報道件数
2

ワークショップ等、アウトリーチ件数
13