

# 研究開発プログラムを取り巻く状況(世界の研究開発動向)

## 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
- ✓ 超伝導、イオントラップはNISQとして提供 (誤り耐性なし)
- ✓ 誤り訂正の初歩的な実験

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					
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

# 研究開発プログラムを取り巻く状況(主要国の量子技術政策)

	政策動向	内容・予算規模
米 	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子情報科学の国家戦略概要 (2018.9)</li> <li>国家量子イニシアティブ法 (2018.12)</li> </ul>	~1,400億円 (\$1.28B) / (2019-24) 「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 	<ul style="list-style-type: none"> <li>科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画 (2016)</li> </ul>	> 1,200億円 / (2016-20) 「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 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quantum Manifesto (2016.5)</li> </ul>	~1,300億円 (€1B) / (2019-28) 「Quantum Flagship」20課題が採択
独 	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイテク戦略2025 (2018)</li> <li>BMBF「量子技術」(2018.9)</li> <li>未来パッケージ (2021.1)</li> </ul>	~840億円 (€650M) / (2019-22) 量子計算、量子通信、計測、量子分野の技術移転と産業の参画推進 ~2,600億円 (€2B) / (2021-2025) 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 	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子技術国家戦略 (2014.12)</li> </ul>	~600億円 (~£400M) / (2015-19) 「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 	<ul style="list-style-type: none"> <li>MESRI「国家量子戦略」(2021.1)</li> </ul>	~2,300億円 (€1.8B) / (2021-25?) 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

出典：内閣府「第10回量子技術イノベーション会議」資料

# 目標達成に向けた追加公募の狙い

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

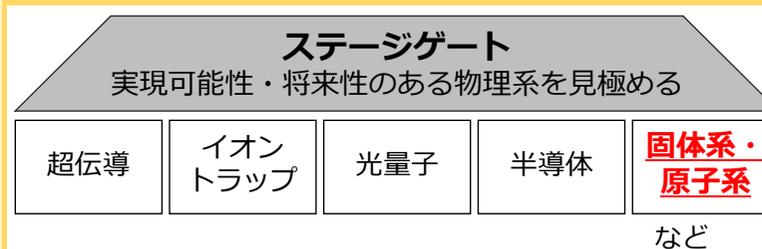
## <通信ネットワーク>

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



## <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
- アルゴリズム、アプリケーション
- **誤り訂正システム**

新規PJ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

# 追加採択PM・プロジェクト一覧

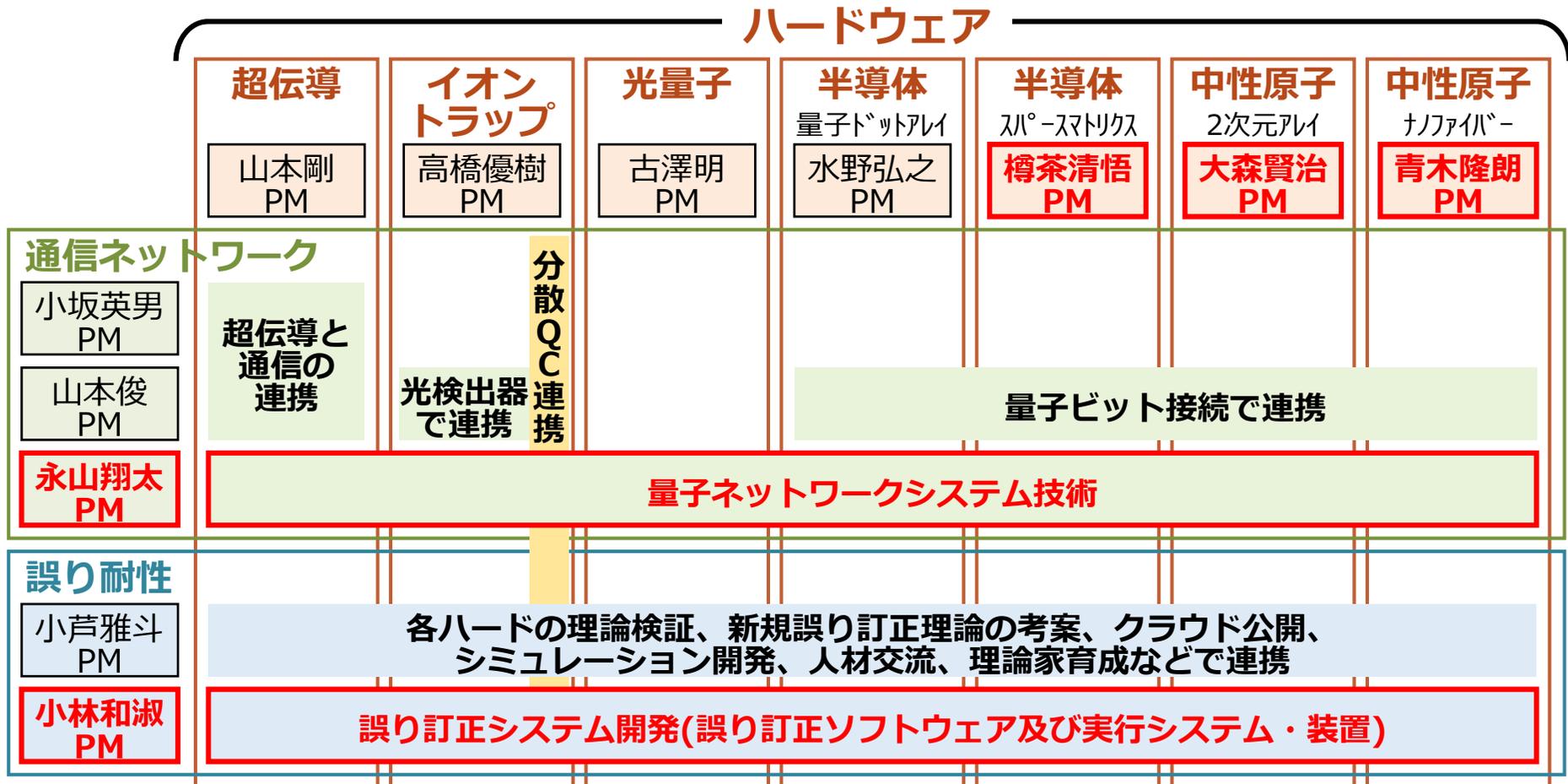
	PM	研究開発プロジェクト名	研究開発プロジェクト概要
ハードウェア (半導体)	樽茶 清悟 (理化学研究所 グループディレクター)	拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発	シリコン量子コンピュータは産業技術との互換性や集積性の点で優れていますが、まだ大規模化への展開が見えていません。本研究では、 <b>スパースな集積化と中距離量子結合により拡張性のある単位構造を作製し、その繰り返しにより量子コンピュータを大規模化します。</b> 2030年までに大規模化に適した基盤技術を開発し、その後半導体産業と連携して開発を加速し、2050年には汎用量子コンピュータを実装します。
ハードウェア (中性原子)	大森 賢治 (自然科学研究機構分子科学研究所 教授/研究主幹)	大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ	光ピンセットを用いて大規模に配列させた <b>冷却原子量子ビット</b> の各々を、 <b>自在かつ高速に移動させつつゲート操作、誤り検出・訂正を行う動的量子ビットアレーを実装</b> します。さらに、緊密な産学連携の下で全ての構成要素を統合・パッケージ化し、従来に無い高い安定性とユーザビリティを達成します。これらのイノベーションにより、2050年までに経済、産業、安全保障に革新をもたらす誤り耐性量子コンピュータの実現を目指します。
ハードウェア (中性原子)	青木 隆朗 (早稲田大学 教授)	ナノファイバー共振器QEDによる大規模量子ハードウェア	日本発の独自技術である <b>ナノファイバー共振器QEDに基づく新方式の量子コンピュータハードウェアを開発</b> します。単ユニットの10,000物理量子ビット程度までの大規模化とその分散化、さらに最終的な社会実装までを推進します。それにより、2050年には、圧倒的に大規模な量子ビット数を持つ分散型の誤り耐性汎用量子コンピュータと量子インターネットの実現を目指します。
量子ネットワーク	永山 翔太 (慶應義塾大学 特任准教授/ (株)メルカリ シニアリサーチャー)	スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム	分散型大規模量子コンピュータの主要技術である汎用量子通信ネットワークのテストベッドを構築し、実運用を見据えた <b>通信アーキテクチャやプロトコル等の原理・技術実証にハードウェア・ソフトウェアを統合して取り組みます。</b> 本プロジェクトの成果は分散型大規模量子コンピュータのみならず量子インターネットにも繋がり、両者を両輪とする、量子情報を自在に生成・流通・分散処理する世界の実現に貢献します。
誤り耐性 (誤り訂正システム)	小林 和淑 (京都工芸繊維大学 教授)	スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発	誤り耐性汎用量子コンピュータを実現するために、 <b>エラー訂正のための古典ハードウェア向けアルゴリズムとスケーラブルバックエンド、スケーラブルな量子-古典間入出力フロントエンド、それらのLSI化、量子-古典入出力の高帯域・低電力化のための極低温動作光集積回路の技術課題</b> に取り組みます。それにより2050年に100万物理量子ビット規模の汎用量子コンピュータの誤り訂正システムを実現します。

※研究開発プロジェクト名及び概要は作り込みを経て変更される場合があります。

# 研究開発の進め方等について(1)

(プロジェクト構成の考え方、資金配分方針【助言・承認】)

- 世界最先端グループの中で競争できる**統合的な**量子コンピュータ開発を加速。
- **量子誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数を増やす技術**を開発し、適した**量子誤り訂正方式の開発**を目指す。
- 量子通信を用いた**分散型など量子コンピュータの大規模化を可能にする技術**を開拓する。
- **誤り耐性に必要な技術**を先回りして**研究開発**に取り組んでいく。
- 国内外の研究開発動向やプロジェクトの進展を踏まえ、**民間、その他の研究開発投資の活用**も含め、進め方を判断。



## 研究開発の進め方等について(2)

(社会実装に向けた方策・国際連携促進等【助言】)

- ✓ 可能な限り早期に**クラウド公開**※など、外部への公開を検討し、**社会実装の早期実現**を目指す。
- ✓ **数理科学分野の研究者と連携**し、研究者層の充実・強化と、理論研究の更なる発展を促す。
- ✓ 2050年までの息の長い研究開発に相応しい、若手PMがイニシアティブを取れる**未来志向の研究体制を構築**する。
- ✓ タイムリーな情報発信、アウトリーチにつとめ、量子ネイティブな人材育成を行うとともに、産業界との協業も広く求めていく。
- ✓ **日米欧国際会議**を通じた、国際連携と国際競争。
- ✓ 各PMの作成するデータマネジメントプランに基づき、適切な研究データの管理・利活用を図るようプロジェクトの実施体制を整備する。

※クラウド公開: 量子コンピュータにインターネットからアクセスして利用できるようにするサービス

# 以下、参考資料

# 【参考】公募等に関する基礎情報

## 追加募集テーマ

募集する研究開発テーマ	新規プロジェクトに求める要件
誤り耐性獲得に有望な量子ハードウェア(固体系)の研究開発	<p>誤り率の小さい高性能な量子ビットを量子誤り訂正に適した配置で2次元的に拡張し、2030年までに誤り訂正を実証するために十分な規模まで拡張可能な固体系量子ハードウェアの研究開発プロジェクトを募集します。具体的には、少なくとも量子ハードウェア単体として1000物理量子ビット程度まで拡張可能な固体系量子ビットの提案を期待します。</p> <p>シリコン半導体製造技術やその周辺技術などを駆使し、高集積なシリコン量子コンピュータの実現を目指す研究開発プロジェクトを実施しています。これに対して、例えば、半導体系において数ビット程度の小規模な高品質の量子ビットの集積性を向上させるアプローチにより目標達成を目指す研究開発が考えられますが、半導体に限らず、固体系で誤り耐性に適した拡張可能な量子ハードウェアの研究開発プロジェクトの提案も歓迎します。</p>
誤り耐性獲得に有望な量子ハードウェア(原子系など)の研究開発	<p>誤り率の小さい高性能な量子ビットを量子誤り訂正に適した配置で2次元的に拡張し、2030年までに誤り訂正を実証するために十分な規模まで拡張可能な原子系量子ハードウェアの研究開発プロジェクトを募集します。具体的には、少なくとも量子ハードウェア単体として1000物理量子ビット程度まで拡張可能な原子系量子ビットの提案を期待します。</p> <p>例えば、近年、冷却原子系で数百物理量子ビットのアナログ量子シミュレータが実現し、大規模な量子ビット系としても注目されており、量子誤り訂正可能な量子コンピュータとして動作させるような研究開発が考えられますが、原子系に限らず固体以外で誤り耐性に適した拡張可能な量子ハードウェアの研究開発プロジェクトの提案も歓迎します。</p>
大規模量子通信ネットワークのテストベッド構築と実証的研究開発	<p>新設・既設は問わないが量子通信ネットワークのテストベッド環境において、高品質で高密度な量子情報の通信を可能とする大規模量子通信ネットワーク技術やシステム構築に係る実証的研究開発を行う研究開発プロジェクトを募集します。</p> <p>早期に量子通信ネットワークの実証的研究開発を進めるために、既存の通信ネットワークの研究開発プロジェクトと密接に連携し、これらの研究開発プロジェクトの成果を活用することが望まれます。また、理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトや量子ハードウェアの研究開発プロジェクトとの連携により、大規模分散型量子コンピュータの実現に貢献することを期待します。</p>
量子誤り訂正用情報処理システムの研究開発	<p>誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向け、量子誤り訂正のためのエラーシンドローム解析を高速に行う古典的な情報処理システムを開発する研究開発プロジェクトを募集します。量子誤り訂正による量子優位性の獲得と誤り耐性獲得の実現を加速する大規模で高速な情報処理システム(ハードウェアおよびソフトウェア)を実装する提案を求めます。具体的には、2030年までに量子誤り訂正による量子優位性を実現するために、100~1000論理量子ビットを量子アルゴリズムで利用可能とする量子誤り訂正システムを実装し、さらに、分散型を含む1000論理量子ビット以上の誤り耐性型汎用量子コンピュータに拡張可能な誤り訂正システムの提案を歓迎しますが、提案されるシステムの実装規模や構成などはこれに限るものではありません。</p>

# 【参考】公募・選考等に関する基礎情報

## 1. 公募期間、審査・採択スケジュール

(公募期間) 令和4年3月1日～令和4年5月10日

(審査・採択)	令和4年5月11日～6月	書類選考
	6月25日、26日	面接選考
	7月28日	採択

## 2. 応募者

11人

## 3. 採択者数

5人(大学等の公的機関 4人、民間企業等 1人)

## 4. その他

8月～ 作り込み (ポートフォリオ構築に向けた研究計画の見直し) ※

10月以降 契約・研究開始

## 5. 研究開発規模・実施期間

(研究開発期間) 2022年度～2025年度の4事業年度

(研究開発規模) 研究開発期間中の総額最大20～30億円(間接経費を含む)を目安。

※作り込みで実施する内容:

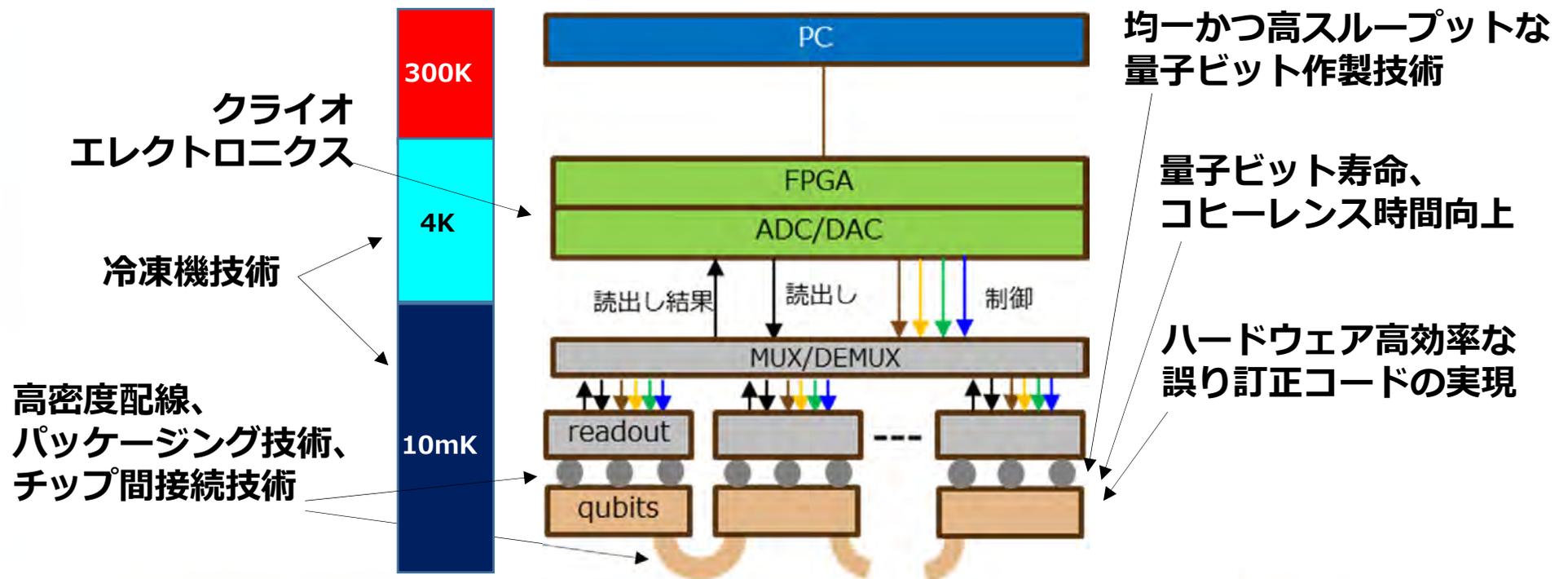
- ✓ 研究開発プロジェクトの内容のブラッシュアップ(見直し及び具体化)
- ✓ 具体的な研究開発計画及び研究開発体制の立案
- ✓ 研究開発体制の構築 など

# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(山本剛PM) ※2022年3月時点

## 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

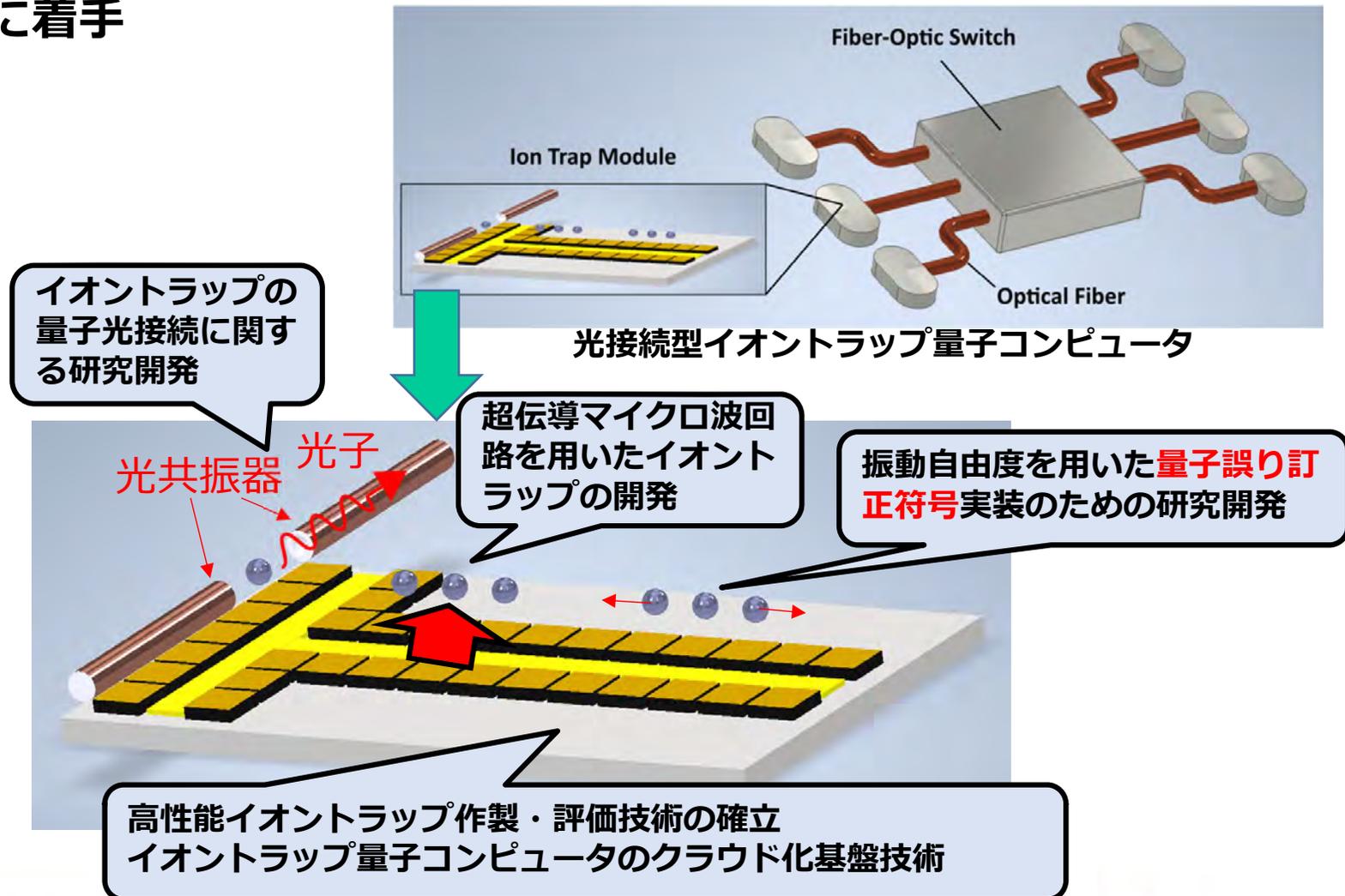


# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(高橋PM)

※2022年3月時点

## 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



# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(古澤PM)

※2022年3月時点

## 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>

# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(水野PM)

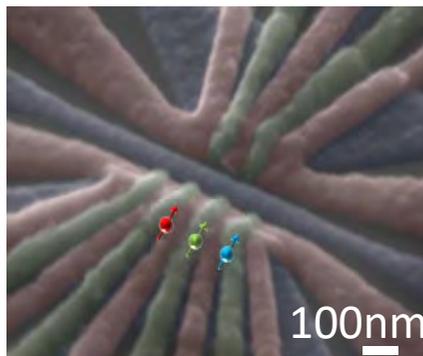
※2022年3月時点

## 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

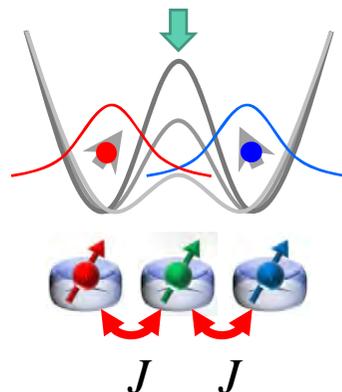
#### 世界初の3量子ビット ユニバーサル操作を実証

- ✓ 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

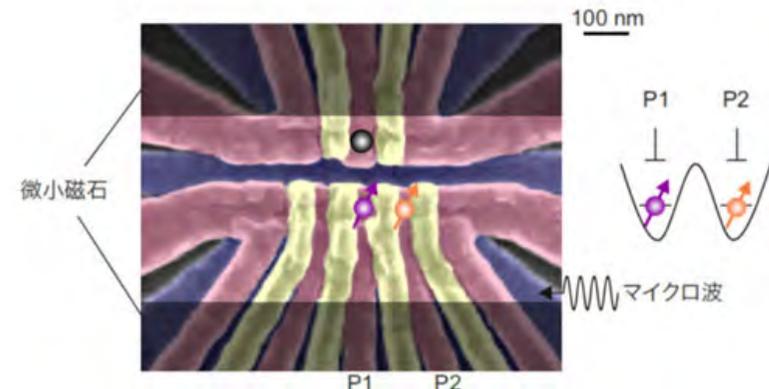


$$F_{\text{GHZ}} = 88\%, |\text{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\downarrow\rangle)$$

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証

- ✓ 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

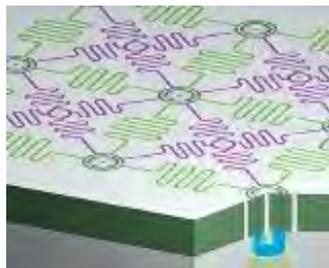
出典：[https://www.riken.jp/press/2022/20220120\\_1/](https://www.riken.jp/press/2022/20220120_1/)

# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(小坂PM)

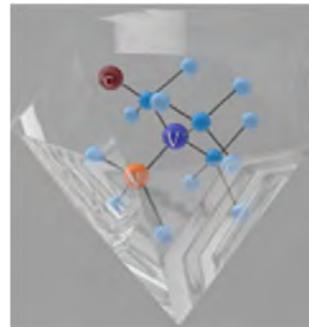
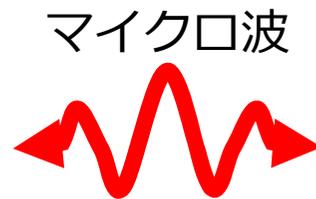
※2022年3月時点

## 量子通信ネットワーク1

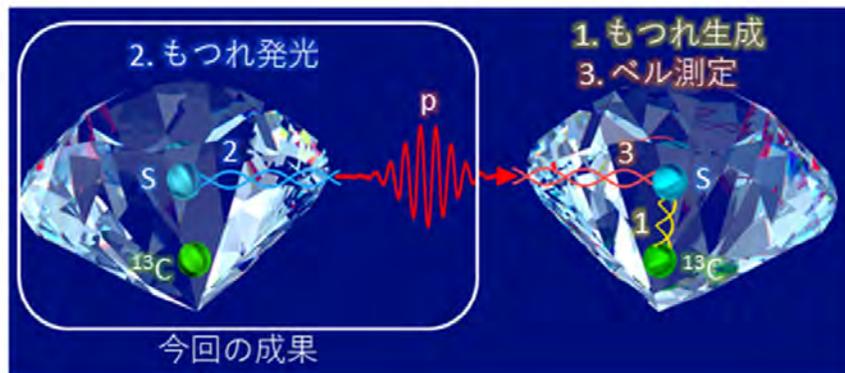
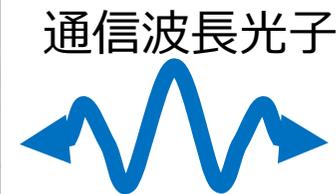
ノイズ耐性のある量子インターネットへの道を拓く  
**世界初、ダイヤモンド中の電子と光子の幾何学的な量子もつれの生成に成功**



超伝導や半導体等の  
量子ビット



波長変換や量子中継



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

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

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**。

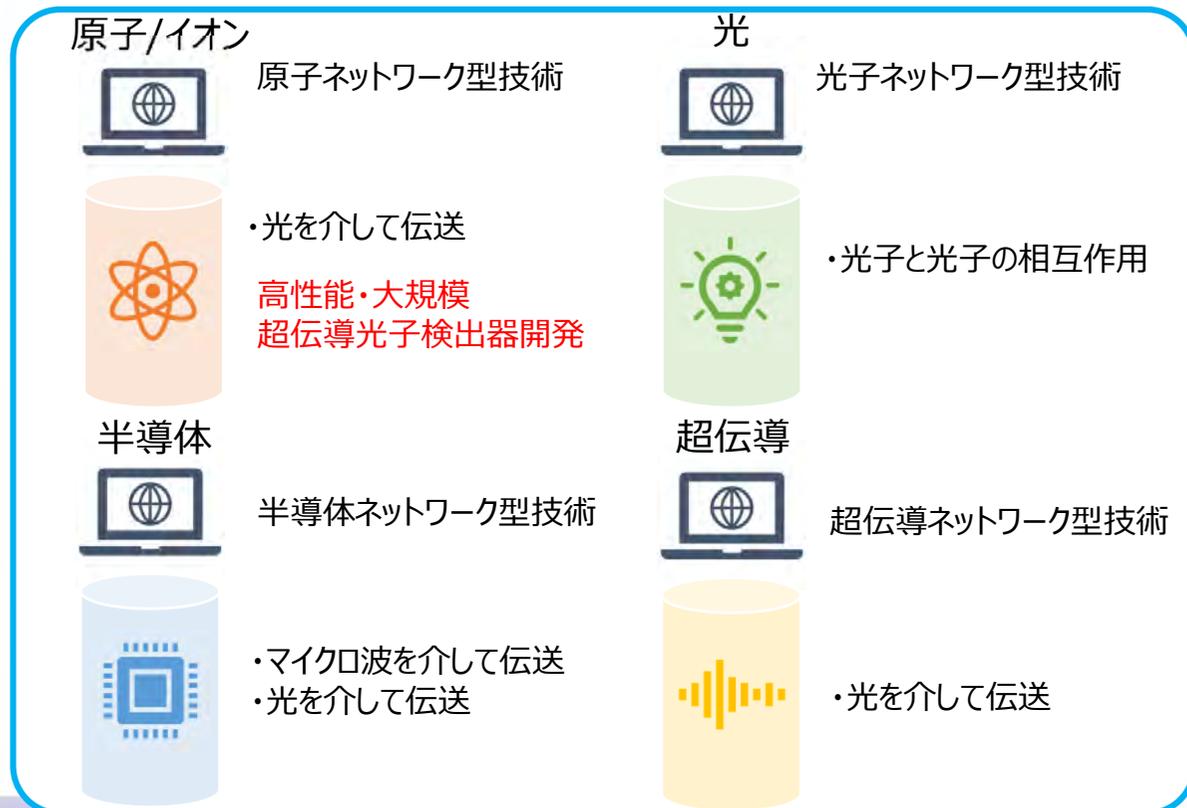
12/15プレスリリース (横国大、JST)

# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(山本俊PM) ※2022年3月時点

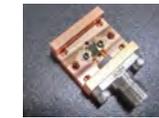
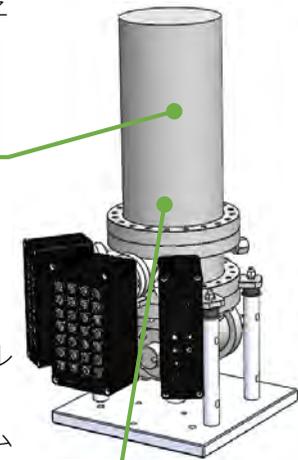
## 量子通信ネットワーク2

「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**

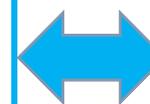
- ✓ 様々な量子コンピュータを接続する手法をオールインクルーシブに研究
- ✓ 超伝導ナノワイヤ光子検出器(SNSPD)開発が順調に進み、**10チャンネル冷凍システムが完成**



SNSPD素子

多チャンネル  
SNSPD  
冷凍システム

連携



- ・目標6内ハードウェア
- ・誤り耐性

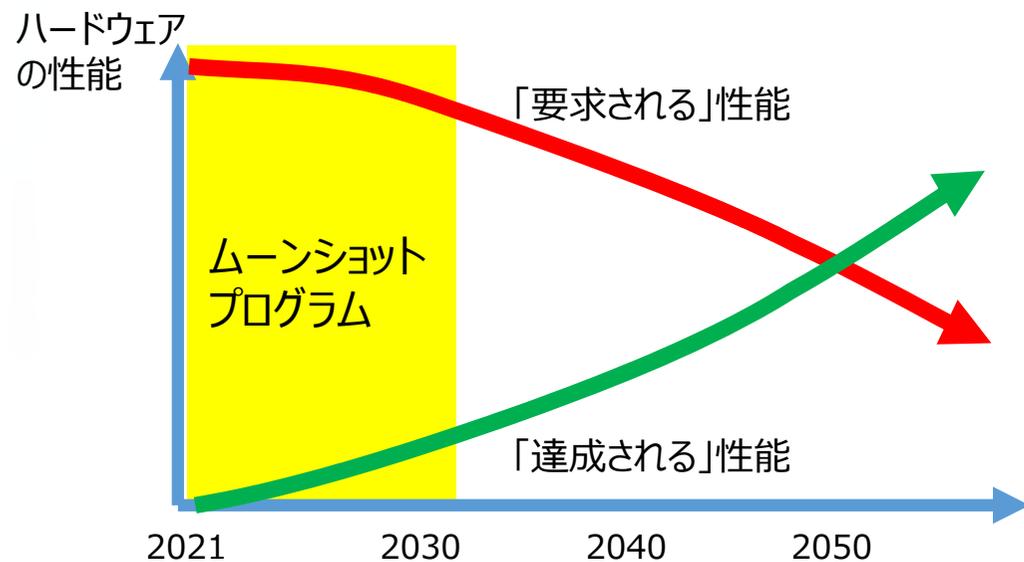
# 【参考】既存プロジェクトの進捗・成果(小芦PM)

※2022年3月時点

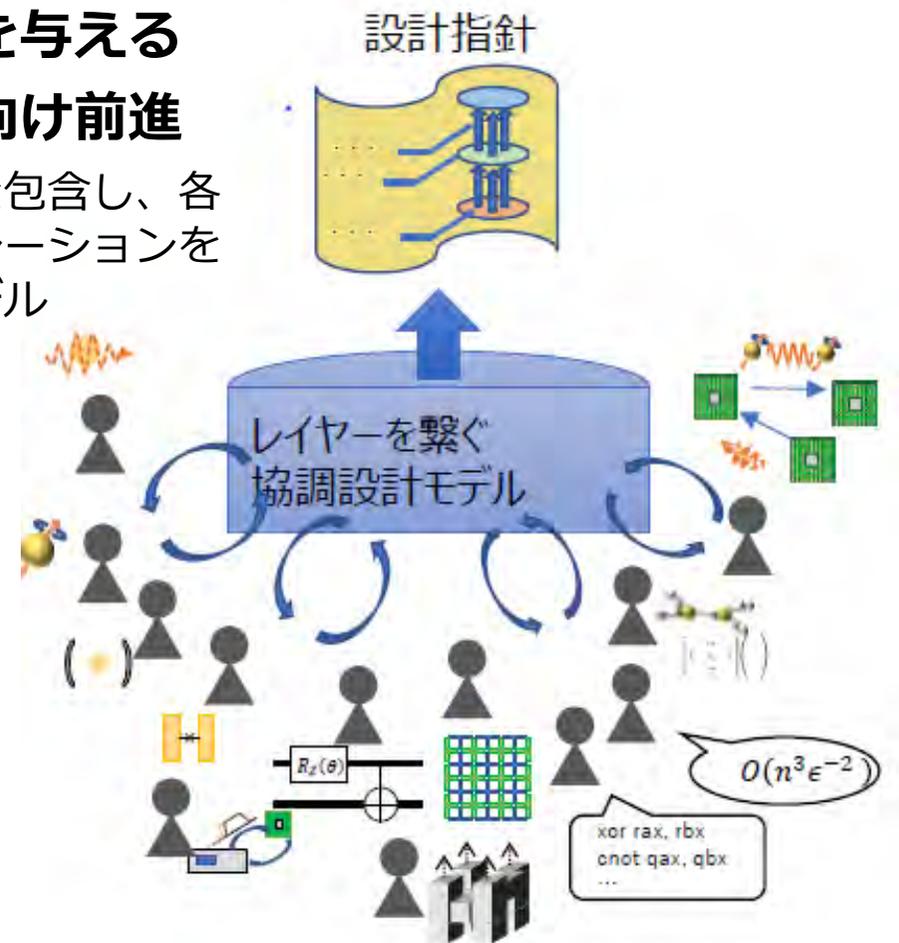
## 誤り耐性

### 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測するモデル
- ✓ 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

# 目標3における 研究開発の進め方等について

第六回戦略推進会議(令和4年9月9日)

プログラムディレクター 福田 敏男

(名古屋大学 名誉教授)

# 目次

- プログラムディレクター(PD)について
- 研究開発プログラムの概要
- これまでの取組状況
- プログラムを取り巻く状況
- 目標達成に向けた追加公募の狙い
- 追加採択PM・プロジェクト一覧
- 研究開発の進め方等について
- 【参考】公募等に関する基礎情報

# プログラムディレクター(PD)について



## 福田 敏男

名古屋大学未来社会創造機構 客員教授

知能化ロボットシステム研究の先駆者であり、微小から大規模で複雑なシステムまでを統一的に扱えるシステム研究の第一人者。

1977年 東京大学 大学院博士課程 修了

1977年 通産省工業技術院 機械技術研究所 研究員 主任研究官

1983年 東京理科大学 工学部機械工学科 助教授

1989年 名古屋大学 工学部機械工学第2学科 教授

2002年 名古屋大学 大学院工学研究科

マイクロシステム工学専攻・機械システム工学科教授

2013年 名古屋大学 名誉教授、名城大学理工学部メカトロニクス工学科 教授

2019年 名城大学大学院理工学研究科 教授

2022年 名古屋大学未来社会創造機構 客員教授

IEEE President-Elect(2019年)、President and CEO(2020年)、Past President(2021年)

2005年文部科学大臣表彰科学技術賞、2013年度産学官連携功労者表彰文部科学大臣賞、2015年紫綬褒章受章、2022年瑞宝章中綬章受章

# ムーンショット目標3

## 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現

### <ターゲット>

- 2050年までに、人が違和感を持たない、人と同等以上の身体能力をもち、**人生に寄り添って一緒に成長する** AIロボットを開発する。
- 2030年に一定のルールの下で一緒に行動して90%以上の人が違和感を持たないAIロボットを開発する。
- 2050年までに、自然科学の領域において、自ら思考・行動し、**自動的に科学的原理・解法の発見を目指す** AIロボットシステムを開発する。
- 2030年までに特定の問題に対して自動的に科学的原理・解法の発見を目指すAIロボットを開発する。
- 2050年までに、人が活動することが難しい環境で、**自律的に判断し、自ら活動し成長する** AIロボットを開発する。
- 2030年までに、特定の状況において人の監督の下で自律的に動作するAIロボットを開発する。

### 人とロボットが共生する社会

- 2050年までに、人と同じ感性、同等以上の身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長するAIロボットを開発。



参考：総合科学技術・イノベーション会議有識者議員懇談会（令和2年1月30日）会議資料