

戦略的創造研究推進事業
—チーム型研究(CREST)—

「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」

(2016年度～2023年度)

研究領域 中間評価

研究総括: 荒川 泰彦

2021年2月24日(水)

報告内容

1. 研究領域の概要

- (1) 戦略目標、領域概要
- (2) 研究総括のねらい
- (3) 領域アドバイザー

2. 研究領域の運営

- (1) 研究課題の選考
- (2) 研究課題のマネージメント

3. 達成状況

4. 総合所見

1. 研究領域の概要 戦略目標に係る分野俯瞰図(2016年)

【達成目標①関連技術】

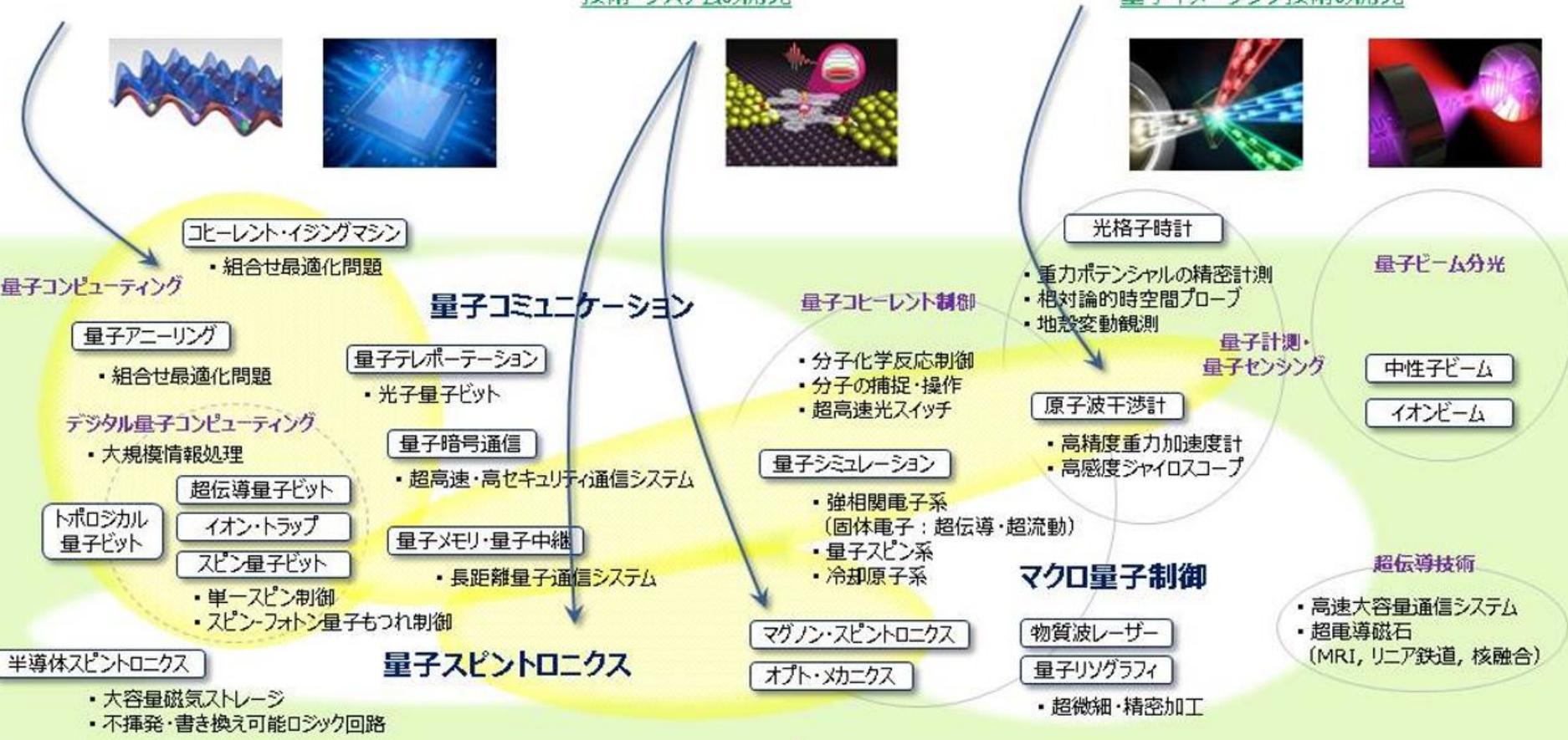
量子コヒーレント制御による量子シミュレーション・量子コミュニケーション要素技術の開発

【達成目標②関連技術】

量子スピントロニクスやオプトメカニクスなど多彩な物理・工学系をつなぐ基盤的な量子技術・システムの開発

【達成目標③関連技術】

先端量子光学やマクロ量子制御技術の応用による超感度・高精度な量子センシング・量子イメージング技術の開発



文科省資料より

1. 研究領域の概要 (1) 戦略目標、領域概要

2016年度 戦略目標「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」

達成目標

- 1) 量子情報処理・シミュレーションの高度化により、複雑な量子系の実験的な解析・描像解明に向けた基盤を構築するとともに、従来手法では不可能な大規模・省エネ情報処理に係る要素技術を実現する。
- 2) 多彩な物理・工学系をつなぐ基盤的な量子技術・システムの開発により、既存技術分野(フォトンクス、エレクトロニクス等)の発展的融合・ブレークスルーを促す。
- 3) 巨視的な量子効果や先端量子光学等の応用により、計測・解析技術を飛躍的に向上させ、従来精度・感度の限界を超えたセンシング・イメージング技術の革新につなげる。

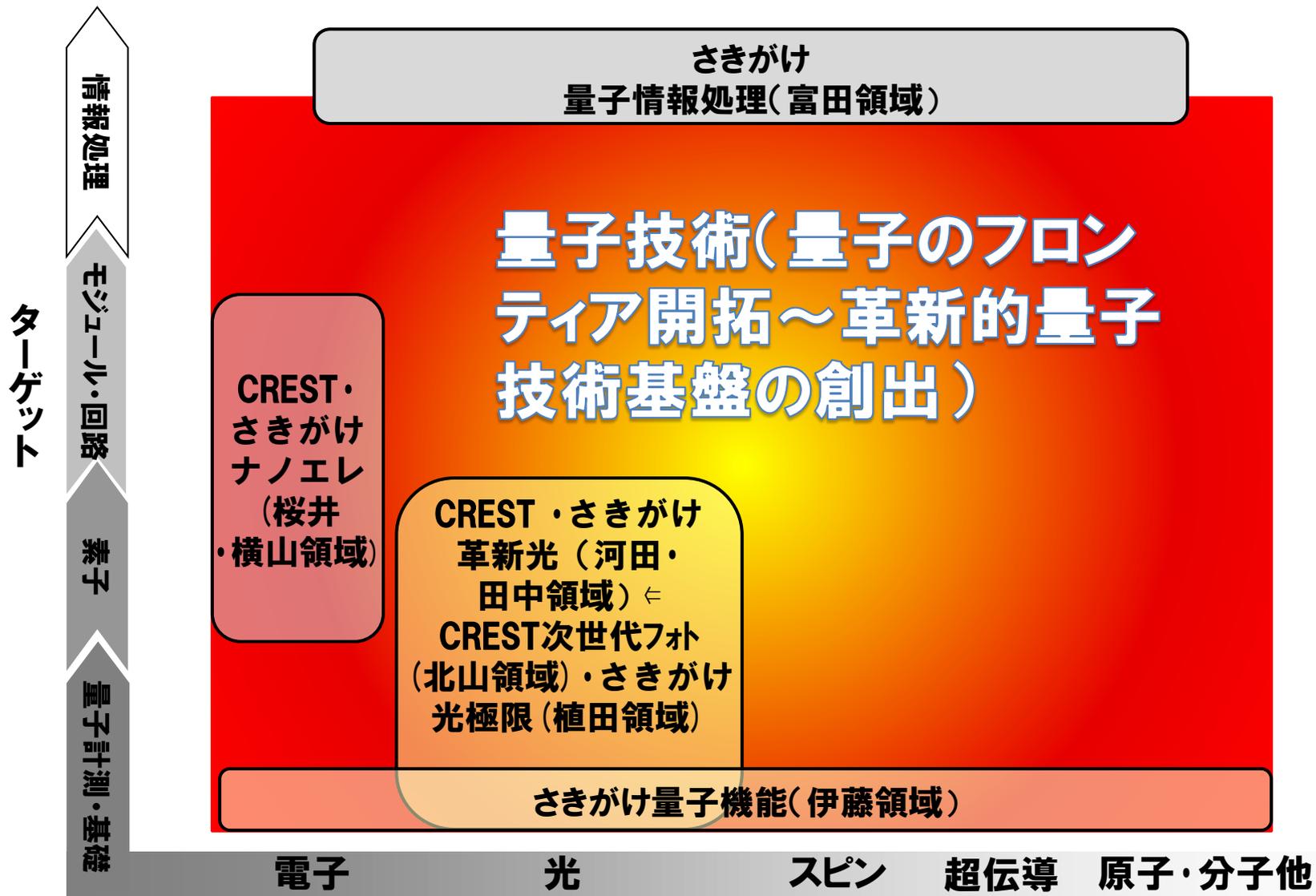
1. 研究領域の概要 (1) 戦略目標、領域概要

CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」

本研究領域は、光科学、物性科学、ナノ構造・材料科学、情報科学に立脚して量子状態の高度制御の物理と技術を探求し、量子科学のフロンティアを開拓するとともに、**新たな量子情報処理**や**従来性能を凌駕する素子・システム機能**を実現することにより、社会の発展に資する革新的量子技術基盤を創出することを目的としている。

本研究領域においては、量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「**新しい源流の創出**」と、将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「**革新的システム機能の創成**」を二本柱として、研究開発を推進する。**11111111**

1. 研究領域の概要 他の研究領域との関連



1. 研究領域の概要 (2) 研究総括の狙い

- 「新しい源流の創出」～量子状態制御の物理の探索とその技術展開～

量子の孤立系から多体系、巨視的な凝縮体に至るまで、多彩な量子状態の高度制御を実現することにより、未知の物理現象や物質機能・物性の探索、新たな概念に基づく情報科学の開拓及び新技術シーズ創出を図る。

- 「革新的システム機能の創成」～将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装向け～

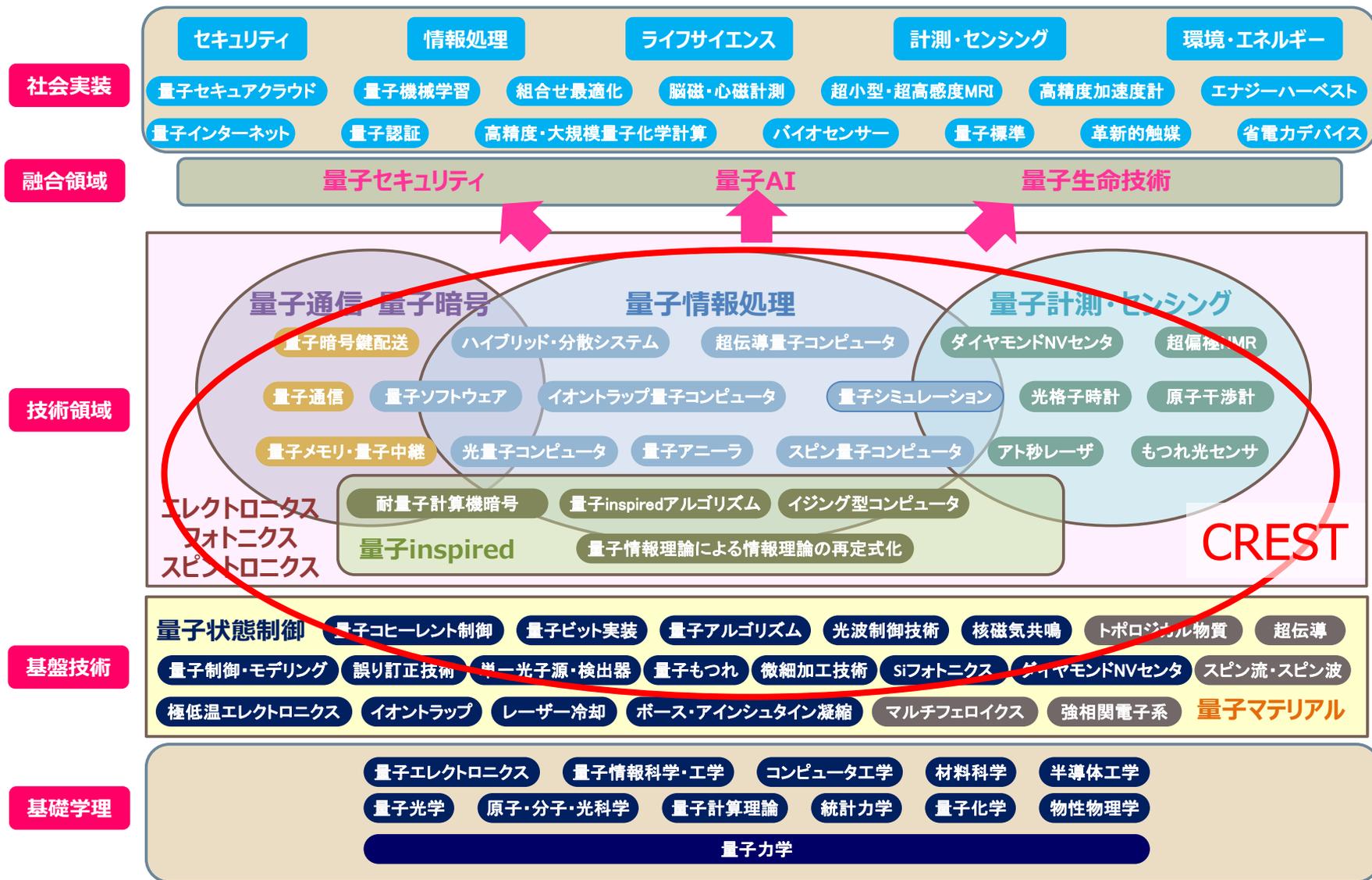
基盤的な量子技術・システムの開発により、既存技術分野（フォトンクス、エレクトロニクス等）の発展的融合・ブレークスルーを促すことを目指す。

1. 研究領域の概要 (3) 領域アドバイザー

【アドバイザー一覧(青:企業関係者)】

名前	所属	役職	専門分野
伊藤 公平	慶應義塾大学	教授	半導体量子物性、量子情報
香取 秀俊	東京大学	教授	量子エレクトロニクス、レーザー冷却・トラップ、極低温衝突、原子の精密計測・分光
寒川 哲臣	日本電信電話(株) NTT先端技術総合研究所	所長	量子光学、半導体量子ナノ構造の光・スピン制御
西野 哲朗	電気通信大学	教授	情報理論、コンピュータサイエンス
野田 進	京都大学	教授	光量子電子工学、ナノ光デバイス
平山 祥郎	東北大学	教授	半導体量子物性、スピン(核スピン)物性、キャリア相関
藤巻 朗	名古屋大学	教授	超伝導エレクトロニクス、超伝導回路
古澤 明	東京大学	教授	量子光学・量子情報、量子エレクトロニクス
山田 真治	(株)日立製作所 研究開発グループ	技師長	材料科学、ナノテクノロジー
山本 喜久	NTTリサーチ 量子計算科学研究所	所長	量子光学、量子情報処理

量子技術分野の概要



[出典] 「量子技術イノベーション戦略」、p.55、2020年1月

報告内容

1. 研究領域の概要

- (1) 戦略目標、領域概要
- (2) 研究総括のねらい
- (3) 領域アドバイザー

2. 研究領域の運営

- (1) 研究課題の選考
- (2) 研究課題のマネージメント

3. 達成状況

4. 総合所見

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

(A) 量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「新しい源流の創出」

(研究費上限: 総額2億円)

(B) 将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」

(研究費上限: 総額3.5億円)

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

研究例

- ① 多様な量子系の状態制御の高度化による量子情報処理要素技術の開発
- ② 革新的量子システム機能の実現によるスケーリング可能な量子情報処理技術の開発
- ③ 量子多体系の制御による新たな量子シミュレーション技術の開拓
- ④ 光子や電子の高度量子状態制御による量子通信要素技術開発とシステム実証
- ⑤ ナノ構造形成技術や新材料技術の開拓による新たな高度量子状態制御素子の実現
- ⑥ 巨視的量子効果や量子光学の高度な活用による超高精度計測・センサー技術の開発

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

年度	応募件数	面接件数	採択件数	採択率	平均年齢	分野	量子系
2016	34	13	6	5.7	57.5	量子計算、量子通信、量子計測、量子シミュレーション	もつれ光、冷却原子、超伝導、スピン
2017	29	14	7	4.1	51.4	上記＋新量子技術	上記＋イオン、NVセンター、光量子
2018	37	14	6	6.2	46.5	上記	上記＋電子
合計	100	41	19	5.3			

- ・2016年度～2017年度で、領域全体として分野のバランスと物理的多様性を兼ね備えた研究ポートフォリオを構築することができた。
- ・2018年度は上記分野や量子系の増強に加え、国際連携強化の観点でフランス国立研究機構(ANR)と共同で、日仏共同チームも募集した。

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

量子技術 物理・物質基盤	量子計算	量子通信	量子計測	新量子技術
原子・分子	高橋 (A) (冷却原子)		北川 (A) (NMR)	田中(歌) (A) (イオントラップ)
超伝導体	蔡 (B) (集積回路)		斉藤 (A) (磁束量子ビット)	仙場 (A) (メタマテリアル)
光量子	神成 (A) (波長多重)	井元 (B) (量子通信)	竹内 (B) (量子光OCT)	青木 (A) (ファイバー-QED)
		小坂 (A) (量子中継)	小関 (B) (ラマン分光)	宗宮 (A) (ANR) (オプトメカ)
半導体	樽茶 (A) (スピン回路)		長谷 (A) (NVセンター)	田中(雅) (A) (スピントロクス)
	山本 (A) (ANR) (非局在Q-bit)		大野 (A) (室温Q-bit)	永長 (A) (創発磁場)

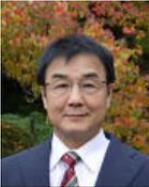
ANR: 日仏共同チーム

2016年採択課題

2017採択課題

2018採択課題

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

量子技術 物理・物質基盤	量子計算	量子通信	量子計測	新量子技術				
原子・分子	高橋 		北川 	田中(歌) 				
超伝導体	蔡 		斉藤 	仙場 				
光量子	神成 	井元 	竹内 	小関 	青木 	宗宮 		
半導体	樽茶 	山本 		小坂 	長谷 	大野 	田中(雅) 	永長 

ANR

2016年採択課題

2017採択課題

2018採択課題

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

採択年	研究代表者	所属	役職	研究課題	研究タイプ
2016年	井元信之	大阪大学	教授	グローバル量子ネットワーク	B
	北川勝浩	大阪大学	教授	室温超核偏極と量子符号化による超高感度生体MRI/NMR	A
	高橋義朗	京都大学	教授	冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発	A
	竹内繁樹	京都大学	教授	大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用	B
	樽茶清悟	理化学研究所	グループディレクター	スピン量子計算の基盤技術開発	A
	蔡 兆申	東京理科大学	教授	超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理	B
2017年	青木隆朗	早稲田大学	教授	スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー共振器QED系の開発	A
	神成文彦	慶應義塾大学	教授	波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ	A
	小坂英男	横浜国立大学	教授	ダイヤモンド量子セキュリティ	A
	齊藤志郎	NTT	特別研究員	超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング	A
	仙場浩一	NICT	教授	超伝導量子メタマテリアルの創成と制御	A
	田中歌子	大阪大学	講師	オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化	A
	田中雅明	東京大学	教授	強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と不揮発・低消費電力スピンデバイスへの応用	A
2018年	大野圭司	理化学研究所	専任研究員	シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット	A
	小関泰之	東京大学	准教授	量子光源による超高感度分子イメージング	B
	宗宮健太郎	東京工業大学	准教授	量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション	A
	永長直人	東京大学	教授	ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御	A
	長谷宗明	筑波大学	教授	ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング	A
	山本倫久	理化学研究所	ユニットリーダー	半導体非局在量子ビットの量子制御	A

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考(日仏)

日仏共同によるCREST課題

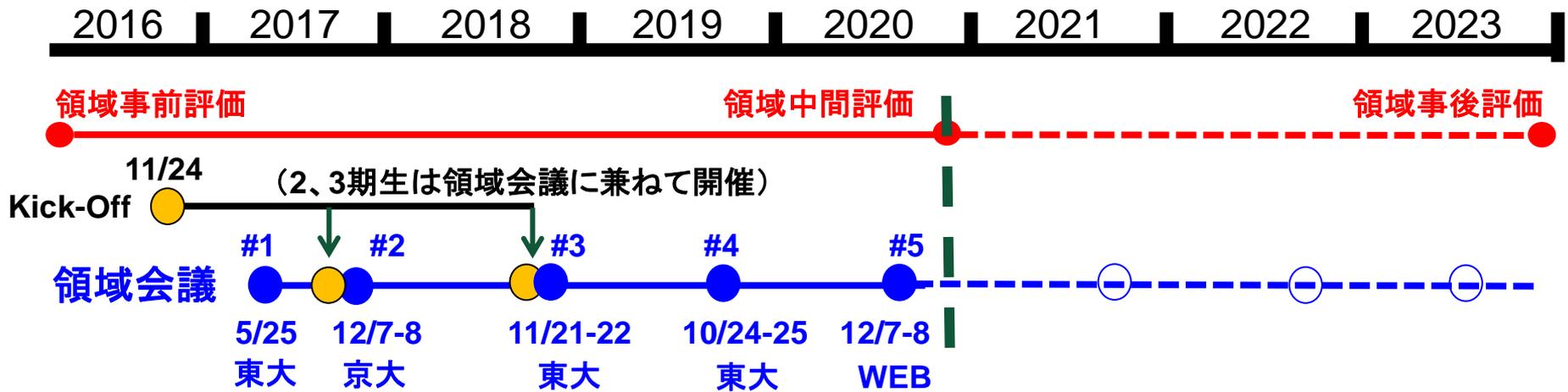
2018年度は、国際連携強化の観点から、新たな試みとして、フランス国立研究機構 (Agence Nationale de la Recherche: ANR)と共同で、日仏共同CREST課題の募集選考を実施。

選考経過

- ・7件の提案
- ・ANRがまず提案を評価
- ・JSTが、ANRの評価結果を踏まえて最終評価を実施
- ・採択課題2件を決定

宗宮課題、山本課題

2. 研究領域の運営 (2) 研究課題のマネージメント 領域会議



■ Kick-Off

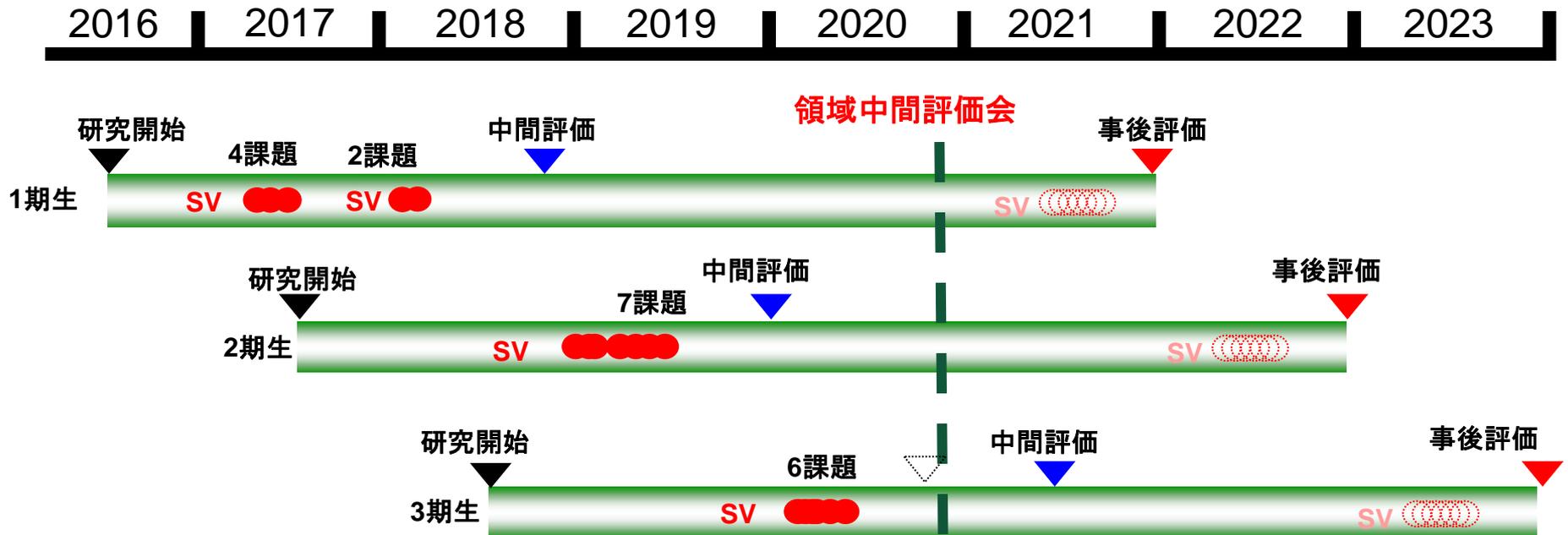
- ・総括方針周知、研究代表者と総括、ADが研究計画・マイルストーンを共有
- ・成果の学会発表、プレスリリースに加え知財権の重要性も強調
- ・若手育成も研究代表者の重要なミッションであると伝える

■ 領域会議

- ・総括、領域アドバイザー、各研究チームが一同に会し、研究進捗と今後の計画を発表し、活発な議論を交わした。
- ・第2、3回目は2日間で開催し、新規採択のKick-Offを兼ねた。
- ・第1回から3回までは、公開シンポとし、領域外研究者との情報交換も図った。

2. 研究領域の運営 (2) 研究課題のマネジメント

サイトビジット



- ・総括・AD・JSTで各課題の研究機関を訪問
- ・進捗報告会と実験室見学を通じて研究内容や環境を詳細に把握
- ・互いに突っ込んだ議論を交わし、各課題への理解を深め、必要な助言を実施
- ・中間評価を1年前倒して、課題評価や資源配分に反映させた

2. 研究領域の運営

(2) 研究課題のマネジメント

国際強化

国際強化支援のスキームを積極活用し、海外との連携を実施

研究代表者	年	人	内容
高橋義朗	2018年	派遣	Boston大学のAnatoli Polkovnikov教授
蔡 兆申	2018年	招聘	Sidney工科大学のS. J. Devitt講師
小坂英男	2018年	派遣	Delft工科大学のTim Taminiauグループリーダー
		派遣	Ulm大学のFedor Jelezko教授
仙場浩一	2018年	招聘	カタールQEERI（環境エネルギー研究所）のS. Ashhab 博士
		招聘	スペインCSIC（科学研究高等評議会）のM. P. Garcia 博士
	2019年	招聘	Yale 大学のPrincipal InvestigatorであるMichel H. Devoret 博士
		招聘	MITのW. D. Oliver 教授
		招聘	Delft工科大のJ. Mooij 教授
田中雅明	2018年	派遣	ユーリッヒ総合研究機構のPeter H. Dederichs 教授 およびRudolf Zeller博士

2. 研究領域の運営

(2) 研究課題のマネジメント

国際連携

Japan-EU Joint Workshop on Advanced Quantum Technology for Future Innovation

日時: 2018年9月3日-4日

場所: ソルボンヌ大学ピエール・マリーキュリーキャンパス

参加者: 日本-EUを中心に米、露、印ほか20ヶ国、合計120名

- ・日本側はCo-chair: 荒川研究総括、参加者数: 26名 (CREST量子技術の研究代表者、ERATOの中村泰信研究総括、さきがけ量子機能の研究代表者など)。
- ・日欧の研究戦略や研究成果の情報交換、今後の協力連携や方策についての議論および認識を共有した。



2. 研究領域の運営

(2) 研究課題のマネジメント

国際強化

EU-USA-Japan International Symposium on Quantum Technology (ISQT)

日時: 2019年12月16日-17日

場所: 京都

参加者: EU-米-日本を中心に合計10ヶ国、348名

- ・量子技術政策について、EU、米、日本における様々な取り組みや量子コンピューティング、量子コミュニケーション、量子計測・センシング等の研究動向を紹介。
- ・パネルディスカッションでは、技術を作る人だけでなく使う人の拡充、異分野との協働、基礎研究を深めることの重要性など、共通の課題が明らかになった。



報告内容

1. 研究領域の概要

- 1) 戦略目標、領域概要
- 2) 研究総括のねらい
- 3) 領域アドバイザー

2. 研究領域の運営

- 1) 研究課題の選考
- 2) 研究課題のマネジメント

3. 達成状況

4. 総合所見

3. 達成状況 論文成果・講演成果・出願特許

採択年	研究代表者	原著論文	Nature系	Science系	PRL	口頭発表	招待講演	特許出願
2016年	井元信之(B)	57	3	0	3	219	80	3
	北川勝浩(A)	12	0	0	0	47	19	7
	高橋義朗(A)	58	1	0	8	229	123	2
	竹内繁樹(B)	51	1	0	0	177	78	3
	樽茶清悟(A)	37	5	0	4	180	97	0
	蔡兆申(B)	146	12	0	27	62	49	4
2017年	青木隆朗(A)	10	1	0	2	29	15	4
	神成文彦(A)	8	0	0	0	29	15	0
	小坂英男(A)	46	4	2	0	79	36	0
	齊藤志郎(A)	25	0	0	1	55	21	0
	仙場浩一(A)	6	0	0	1	45	17	1
	田中歌子(A)	3	0	0	0	53	11	0
	田中雅明(A)	68	4	0	1	197	58	2
2018年	大野圭司(A)	5	0	0	2	17	11	0
	小関泰之(B)	7	0	0	0	42	29	1
	宗宮健太郎(A)	13	0	0	3	52	40	0
	永長直人(A)	48	7	0	6	63	49	0
	長谷宗明(A)	10	0	0	0	26	12	3
	山本倫久(A)	8	1	0	1	48	11	2
	合計	609	39	2	59	1651	775	30

3. 達成状況

表彰

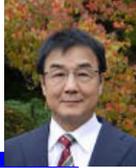
■ 主な表彰

受賞者名	賞の名称	受賞年月	
高橋義郎	紫綬褒章	2020年11月	高橋チーム
樽茶清悟	第18回応用物理学会業績賞	2018年3月	樽茶チーム
蔡 兆申	紫綬褒章	2018年3月	蔡チーム
蔡 兆申 中村泰信	朝日賞	2021年1月	
ノリ フランコ	クラリベイト・アナリティクス 高被引用論文著者	2017年11月	
永長直人	クラリベイト・アナリティクス 高被引用論文著者	2018年11月	永長チーム
十倉好紀	文化功労者	2020年11月	
	Humboldt Research Award クラリベイト・アナリティクス 高被引用論文著者	2019年10月 2019年11月	
合田圭介 小関泰之 新田 尚	文部科学大臣表彰 科学技術賞	2020年4月	小関チーム
重川秀実	紫綬褒章	2019年5月	長谷チーム

3. 達成状況

人材育成

キャリアアップ状況	人数	研究者名
助教・特定准教授、准教授、主任研究員 ⇒ 教授	7名	井元チーム: 玉木潔、山本俊、藤井啓祐(高橋チームも兼務)、竹内チーム: ホフマンホルガ、岡寿樹、齊藤チーム: 上野祐子、尾身博雄
助教、主任研究員 ⇒ 准教授	6名	井元チーム: 山下太郎、高橋チーム: 高須洋介、段下一平、樽茶チーム: 大塚朋廣、宗宮チーム: 高橋優樹、永長チーム: 石塚大晃
助教、研究員 ⇒ 特任准教授	2名	北川チーム: 根来誠、樽茶チーム: 米田淳
助教 ⇒ 講師	1名	井元チーム: 佐々木寿彦
学生、研究員 ⇒ 助教	4名	井元チーム: 中田芳史、北川チーム: 御手洗光祐、中村祐士、神成チーム: 保坂有杜
ユニットリーダー ⇒ チームリーダー	1名	山本チーム: 山本倫久
研究主幹員 ⇒ 主席研究員	1名	小坂チーム: 寺地徳之
主任研究員 ⇒ 研究主幹	1名	青木チーム: 後藤隼人
研究員、研究主任 ⇒ 主任研究員	2名	井元チーム: 小林俊輝、山本チーム: 岡崎雄馬
研究員 ⇒ 研究主任	2名	齊藤チーム: 桶田啓、手島哲彦
ポスドク ⇒ Research Fellow	1名	蔡チーム: Simon J. Devitt
学生、研究員 ⇒ 特任助教	2名	井元チーム: 小林俊輝、北川チーム: 杉山太香典
学生、教務補佐員 ⇒ 研究員、常勤研究職、特定研究員	6名	井元チーム: 浅野元紀、達本吉朗、竹内勇貴、水谷明博、鈴木康成、高橋チーム: 山下和也

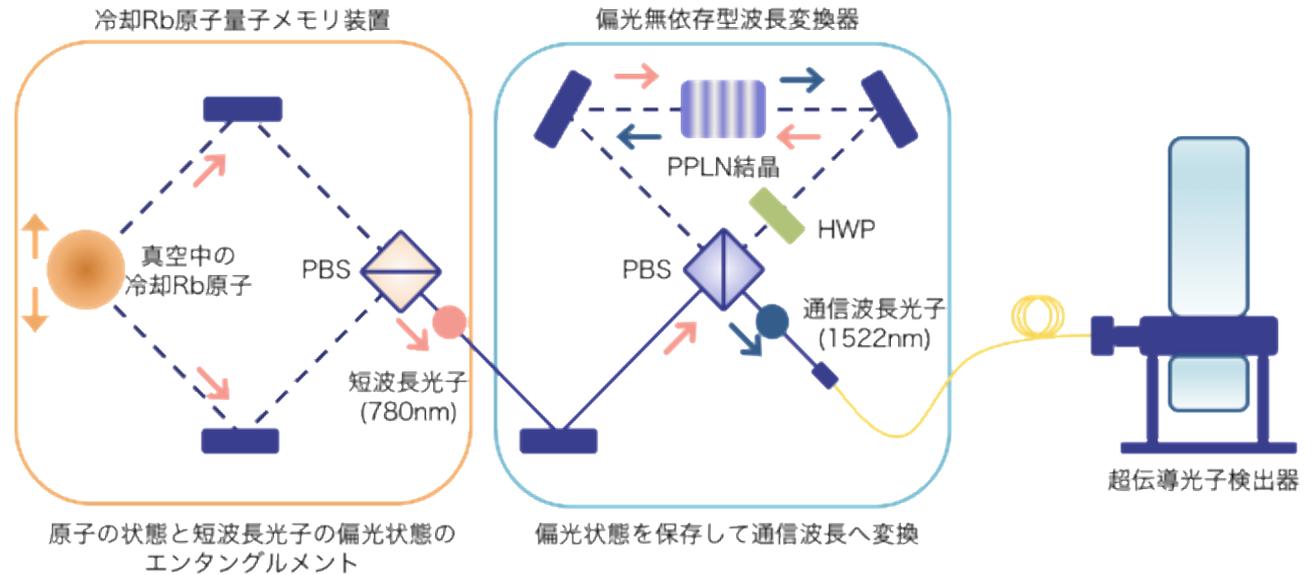


3. 達成状況 (1) 井元課題 「グローバル量子ネットワーク」

目標: 量子インターネット実現に向け、鍵となる「量子中継」の要素技術を開発。

- ・量子メモリと通信波長光子の間の偏光エンタングルメントを実証し、原子量子メモリが長距離量子通信に利用可能であることを示した。
- ・量子光波長変換器をイオン発の単一光子に初めて適用し、10kmの長距離伝送に成功(当時の世界最長記録)。
- ・「適応ベル測定」を世界で初めて実現し、「全光」量子中継の動作を実証。

[1] R. Ikuta et al., Nature Communications **9**, 1997 (2018).
 [2] T. Walker et al., Phys. Rev. Lett. Vol. **120**, 203601 (2018)
 [3] Y. Hasegawa et al., Nature Communications **10**, 378 (2019).



原子量子メモリの長距離通信用ノード

3. 達成状況 (2) 北川課題

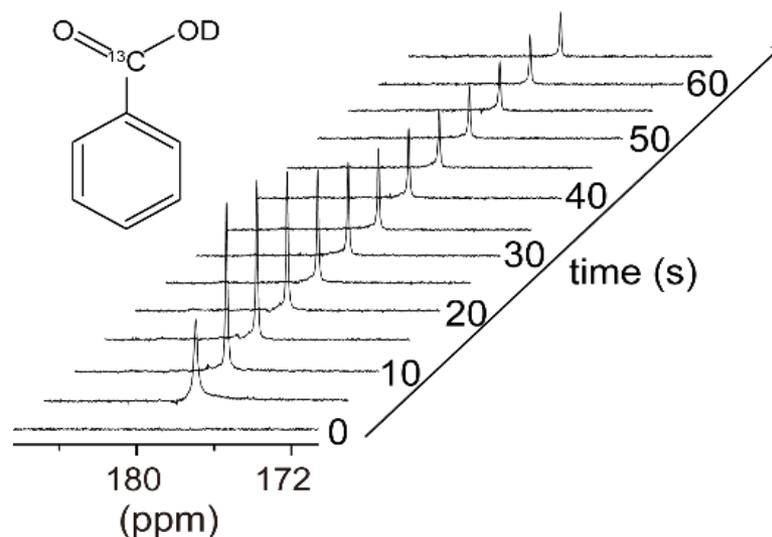
「室温超核偏極と量子符号化による 超高感度生体MRI/NMR」



目標: 量子技術で核磁気共鳴(NMR)と核磁気共鳴画像法(MRI)の感度を向上させ、生体内の微量分子の代謝などを可視化できる革新的技術を創出する。

- ・トリプレットDNPをNMRへ応用するための装置開発を行い、高分解能なNMR信号を取得し、220倍の信号増大に成功。
- ・ペンタセンが添加可能な安息香酸と添加が困難なセンサー分子を共晶化させることで生体応用につながるセンサー分子の高偏極化に成功。
- ・量子符号化ではトリプレットDNPで高偏極化した p -クロロ安息香酸において、縦緩和時間と比較して2倍以上の高偏極状態を維持できることを示した。

- [1] A. Kagawa, et al., J. Phys. Chem. A, **122**, 50, 9670-9675 (2018).
[2] A. Kagawa, et al., J. Magn. Reson., **309**, 106623-1-6 (2019).
[3] K. Miyanishi, et al., Quantum Science and Technology, **5**, No. 2, 025004-1-7 (2020).



α - ^{13}C 安息香酸NMRスペクトルの時間変化



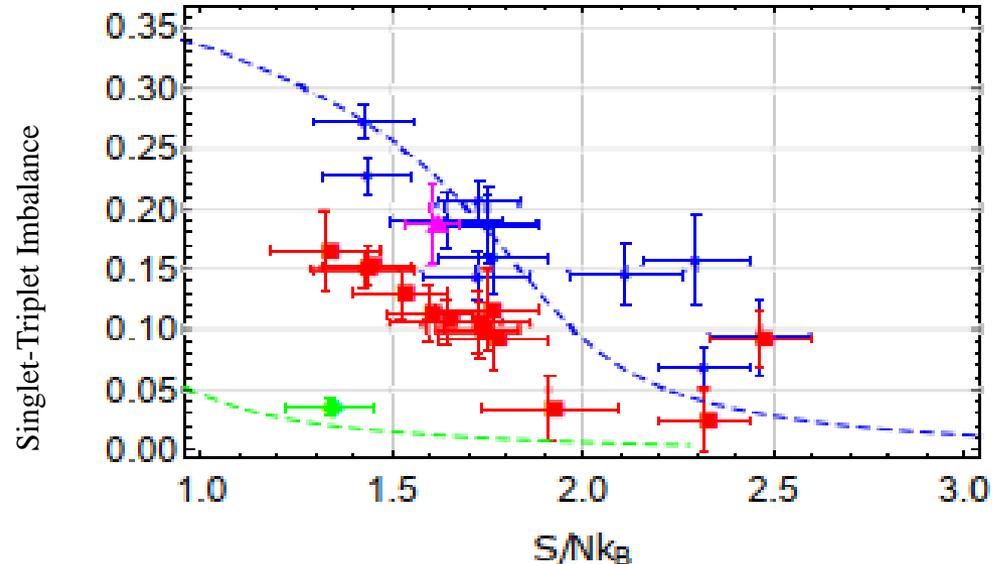
3. 達成状況 (3) 高橋課題

「冷却原子の高度制御に基づく革新的
光格子量子シミュレーター開発」

目標: 量子多体系の量子シミュレーション技術を深化させるとともに、構成する
単一原子に対しての最先端の量子操作技術を開発する。

- ・量子多体系の最高難易度であるフェルミハバード模型の量子シミュレーションにおいて、1次元系での冷却原子フェルミハバード模型の最低温度を更新。
- ・4サイトからなる「プラケッ」構造に原子系を導入することで4つの異なるスピンの量子エンタングルした状態を生成させ、さらに、反強磁性スピン相関を強磁性的なものに動的に制御することに成功。

- [1] T. Tomita, et al., Science Advances, **3**, e1701513 (2017).
- [2] S. Taie, et al., Nature Communications, **11**, 257 (2020).
- [3] Y. Takasu, et al., Science Advances, **6**, eaba9255 (2020).



SU(6)フェルミハバードでの量子磁性の初期エントロピー依存性



3. 達成状況 (4) 竹内課題

「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」

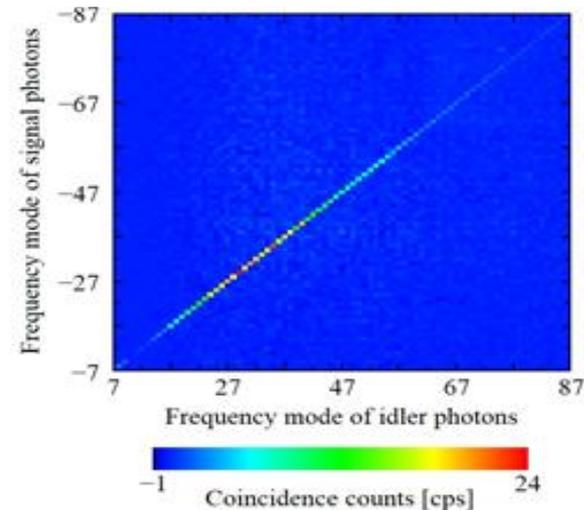
目標: 導波路型チャープ擬似位相整合によるもつれ光の実現し、高分解能量子光断層撮影(OCT)するとともに、量子もつれ時間分解分光の実現する。

- ・超広帯域もつれ光(量子OCT分解能 $0.84 \mu\text{m}$ に相当)の発生に初めて成功し、従来比で500倍以上、当初目標の100倍を大きく上回る効率を確認。
- ・従来型光源による量子OCTの50倍の高速化を実現し、現在、導波路型光源と組み合わせ、当初目標の1000倍の高速化を進めている。
- ・量子もつれ光子対間に時間遅延をつけ和周波発生と相関時間短縮に成功した。
- ・4.世界最大のモード数(59)と帯域(23.6nm)をもつ量子もつれ光源の開発に成功。

[1] K. Sugiura, et. al., Applied Physics Letters, vol. **116**, 224001 (2020).

[2] T. Kiyohara, et. al., Optica, vol. **7**, 1517 (2020).

[3] T. Ono, et. al., Scientific Reports, vol. **7**, 45353 (2017).



オンチップもつれ光子対源

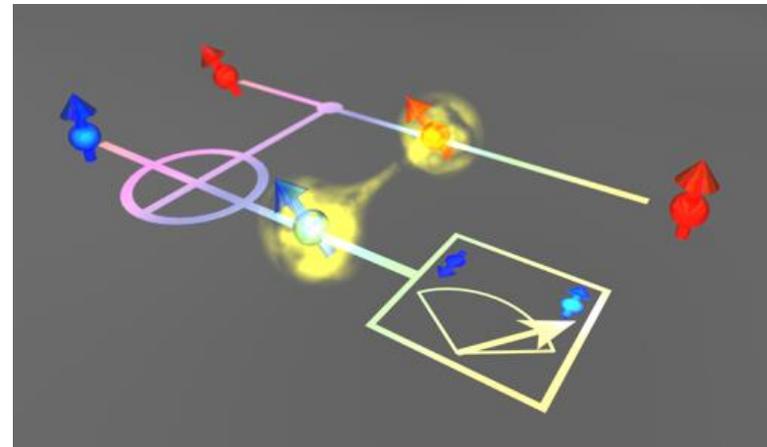


3. 達成状況 (5) 樽茶課題 「スピン量子計算の基盤技術開発」

目標: 量子コヒーレンス・もつれの物理解明と新量子技術の開発、量子操作 (ビット操作、読み出し、初期化) における誤り耐性閾値を達成するとともに、誤り訂正の基盤技術開発を開発する。

- ・GaAs量子ドットを用いて、世界に先行して量子ビット多重化を達成。
- ・3重ドットによる量子もつれ制御法を新開発し、交換結合を利用した非隣接スピン間の量子もつれ生成、異なる符号化の2ビットによる制御位相ゲートの高速化、量子テレポーテーションの原理実証に成功。
- ・Si系においても、初めて3量子ビットもつれ状態の生成に成功。
- ・高忠実度での非破壊読み出し、測定結果の帰還による初期化も達成。

[1] T. Nakajima, et al., Phys. Rev. X **10**, 011060-1-11 (2020).
[2] K. Takeda, et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 117701-1 – 5 (2020).
[3] J. Yoneda, et al., Nature Communications, **11**, 1144 (2020).



量子もつれを利用した量子非破壊測定概念図

3. 達成状況 (6) 蔡課題

「超伝導人工原子を使った光子ベースの量子情報処理」



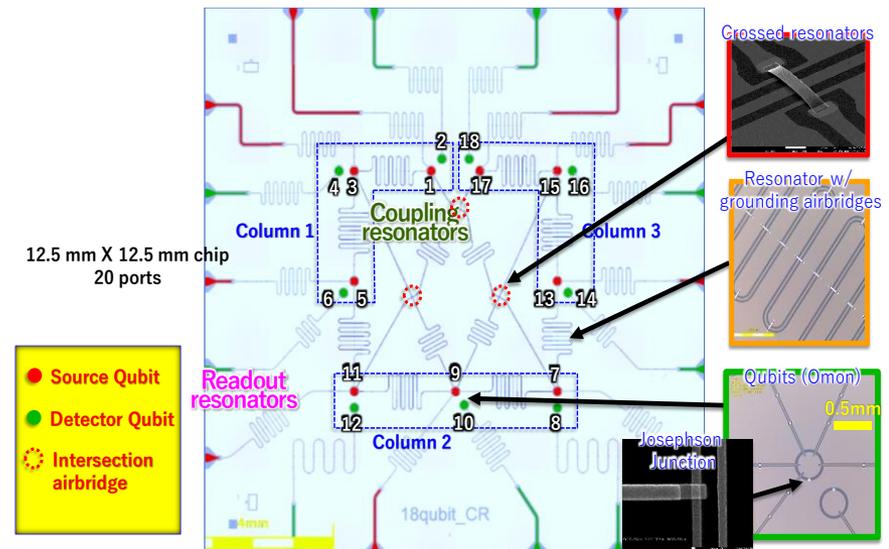
目標: スケーリングに有利な、従来の平面配線技術が利用できる新規量子コンピュータアーキテクチャを実現する。

- 超伝導体量子回路のアーキテクチャについて、一方向量子計算とゲートモデル量子計算の両方に対応できる新規回路を探索。
- 一方向量子計算機はクラスター状態生成回路であり、完全にゲート操作のみで実現する回路である。18量子ビットを使い、 3×3 の量子ビットアレーを実現。
- 表面符号アーキテクチャに対応できるゲートモデル量子回路は擬2次元ネットワークを取り入れた回路方式で実現。

[1] H. Mukai, et al., New J. Phys., **22**, 043013 (2020).

[2] Y. Zhou, et al., Phys. Rev. Appl., **13**, 034007 (2020).

[3] R. Stassi, et al., Phys. Rev. A **97**, 033823 (2018).



試作した一方向量子計算機 3×3 のアレー相当で、18物理量子ビットを含む

3. 達成状況 (7) 青木課題 「スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー共振器QED系の開発」



目標: 超低損失ナノファイバー共振器の開発と、光学的量子計算の要素技術をナノファイバー共振器QED系で実現する。また、誤り耐性量子計算のアーキテクチャ全体の最適化を推進する。

- ・超低損失ナノファイバー共振器で、シングルパスの内部損失がわずか0.7%の共振器の作製に成功。
- ・大規模な量子計算を可能とする分散型量子計算機の実現に向けて、2つの共振器QED系を結合した全ファイバー結合共振器QED系を構築。
- ・全ファイバー結合共振器QED系において、特異な固有モードである共振器暗モードの観測に成功。

- [1] S. Kato, et al., Nature Communications **10**, 1160 (2019).
[2] D. White, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 253603 (2019).
[3] H. Goto, et al., Phys. Rev. A **99**, 053843 (2019).



結合ナノファイバー共振器QED系



3. 達成状況 (8) 神成課題

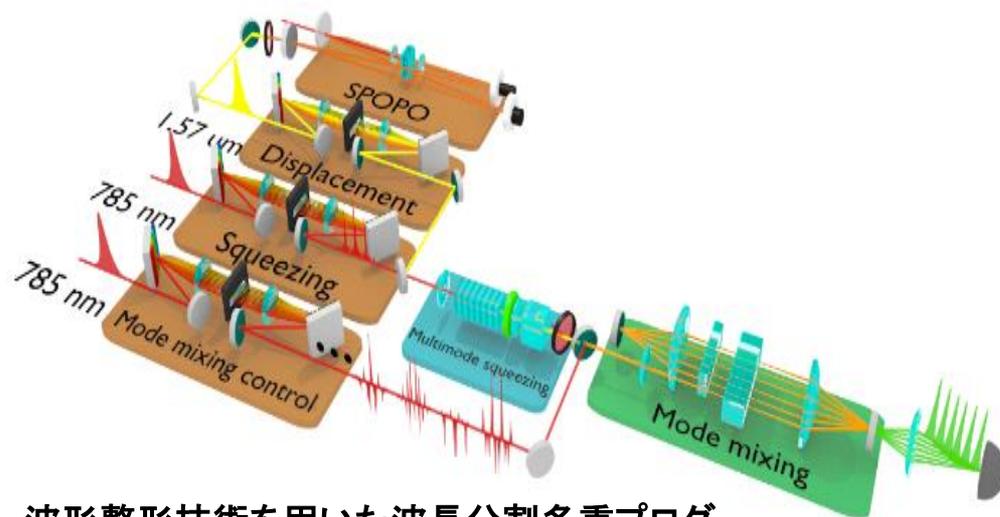
「波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ」

目標: 波形整形技術を用いることで多重周波数モードの生成過程ならびにモード間量子干渉の制御性を実証し、周波数域での大規模な量子干渉を用いたプログラマブルな量子シミュレータの構築を行う。

- 要素技術として、波長1550 nm帯で独立した周波数モードで複数のスクイズド光パルスを生成し個々にその位相と振幅を制御できることを明らかにした。
- 波長多重量子状態の任意のモード混合(量子ゲート)について、本手法が10モード程度のプログラム可能な線形回路に応用可能であることを実証。
- 直交周波数モード間のHong-Ou-Mandel干渉を実証し、任意の線形量子干渉が周波数域においても可能であることを明らかにした。

[1] K. Wakui, et al., Opt. Express **28**, 22399 (2020).

[2] 保坂 他, レーザー研究 **48**, 472 (2020).



波形整形技術を用いた波長分割多重プログラマブル量子シミュレータ実験装置図

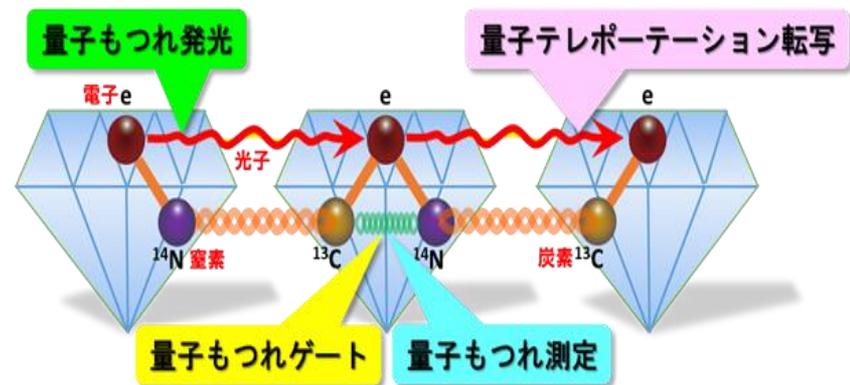


3. 達成状況 (9) 小坂課題 「ダイヤモンド量子セキュリティ」

目標: ダイヤモンド中の窒素空孔(NV)中心における光子と電子の自発的な量子もつれ発光・吸収を基礎とし、量子セキュリティの実用化に道を開く。

- ・量子もつれ発光では、狭帯域のゼロフォノン線を用いた偏光もつれ生成に成功。
- ・量子テレポーテーション転写では、単一光子から単一炭素への転写に加え、複数の炭素で構成されたアダプティブなマルチメモリー転写に成功。
- ・量子もつれゲートでは、電子スピンと核スピンの間の量子もつれをマイクロ波で操作するホロノミックな万能量子もつれゲートに成功。
- ・シングルショット量子もつれ測定を行い、古典相関を遥かに上回る75%以上の忠実度の完全ベル測定に成功。

- [1] K. Nagata, et al., Nature Communications, **9**, 3227 (2018).
[2] K. Tsurumoto, et al., Communications Physics, **2**, 74 (2019).
[3] P. Siyushev, et al., Science **363**, 728-731 (2019).



YNU方式スキームの量子中継



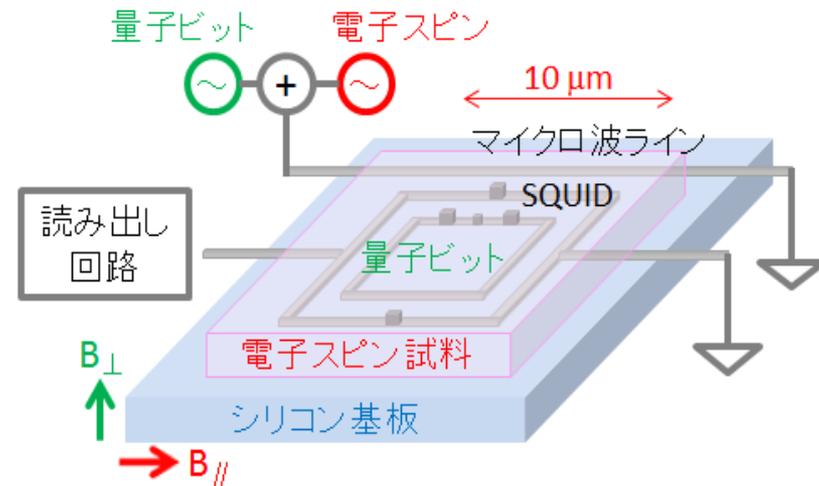
3. 達成状況 (10) 齊藤課題

「超伝導量子ビットを用いた 極限量子センシング」

目標: 量子状態制御技術の応用として量子センシングに操作性・拡張性に優れた超伝導磁束量子ビットを活用し、高感度・高分解能な量子センサを実現する。

- ・センサ部を超伝導量子干渉計から磁束量子ビットに変更し、読み出し回路もジョセフソン分岐増幅器に変更することで、スピン検出の性能指数が検出感度 10^6 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、最小検出体積 100 fL から、 20 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、 6 fL まで向上。
- ・感度向上に向け、磁束量子ビットのコヒーレンス時間を延長し、磁束量子ビットにおける世界最高のコヒーレンス時間 ($T_1 = 90 \mu\text{s}$ 、 $T_2 = 130 \mu\text{s}$) を記録。

- [1] H. Toida, et al., Commun. Phys. **2**, 33 (2019).
- [2] R. P. Budoyo, et al., Appl. Phys. Lett. **116**, 194001 (2020).
- [3] L. Abdurakhimov, et al., Appl. Phys. Lett. **115**, 262601 (2019).



磁束量子ビットを用いた局所ESR測定系

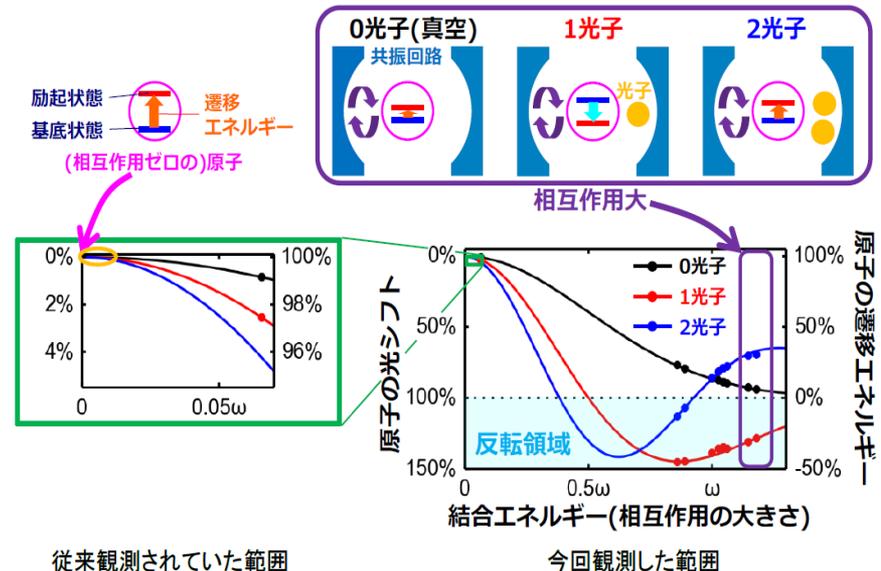


「超伝導量子メタマテリアルの創成と制御」

3. 達成状況 (11) 仙場課題

目標: 超伝導量子メタマテリアル(分子や量子デバイス集合体)の創成とそのコヒーレント制御を探究する。

- 量子ビット・共振器系の量子状態の増幅と修復に関する新プロトコルを開発。
- Si基板上に極薄TiNバッファ層を介したNbNのジョセフソン接合プロセス確立。
- 窒化物超伝導体NbN及びトンネルバリア層に磁性薄膜を用いたジョセフソン接合が π 位相シフターとして機能することを確認。
- 深強結合回路QED技術では、従来より100倍以上の巨大な量子的光シフト(Lambシフト、Starkシフト)を観測。



LC共振回路中の光子数が0個、1個、2個の時の人工原子の遷移エネルギー

[1] Q. Wei, et al., Appl. Phys. Exp. **13**, 126501 (2020).

[2] T. Yamashita, et al., Sci. Reports **10**, 13687 (2020).

[3] F. Yoshihara et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 183601 (2018).

3. 達成状況

(12) 田中(歌)課題

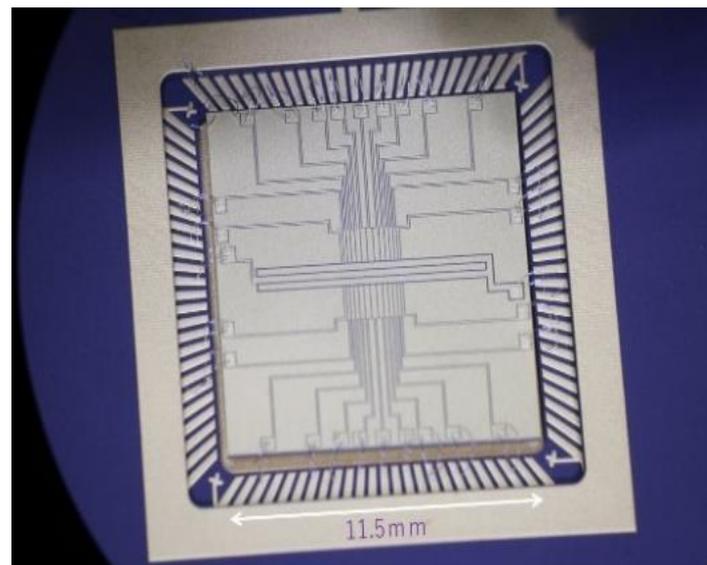
「オンチップ・イオントラップによる 量子システム集積化」



目標: イオントラップ電極のオンチップ化、集積化量子システムを用いた可搬型光クロックを開発する。

- ・イオンを等間隔に配置する電場が周波数シフトのばらつきを解消する魔法のトラップ電場であることを見出した。
- ・電場を生成するオンチップ・イオントラップ電極を設計・実装し、イオン数35個までの等間隔性の向上に成功。

[1] K. Hayasaka, et al., 2nd Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS-2019) Korea 2019/2/22



魔法トラップ電場を生成するオンチップ・イオントラップ電極

3. 達成状況

「強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創と
不揮発・低消費電力スピndeバイsへの応用」



(13) 田中(雅)課題

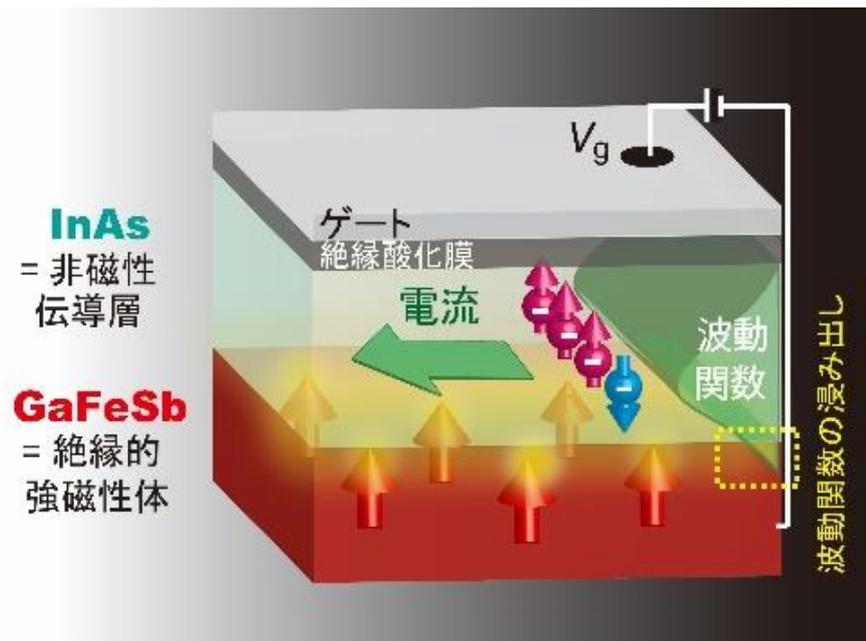
目標:「不揮発性」「低消費電力」「再構成可能性」「情報処理の柔軟性」
「非相反性」を有する半導体材料とデバイsを創製する。

- ・室温以上のキュリー温度 (T_C) をもつp型 (GaFeSb) およびn型 (InFeSb) の強磁性半導体を作製。
- ・従来より2~3桁低い電流密度での磁化反転機能創出に成功。
- ・縦型およびスピントランジスタの作製と動作実証に成功。

[1] K. Takiguchi, et al., Nature Physics **15**, 1134 (2019).

[2] M. Jiang, et al., Nature Communications **10**, 2590 (2019).

[3] M. Jiang, et al., Nature Electronics **3**, 751 (2020).



InAs/(Ga,Fe)Sbヘテロ構想における近接巨大磁気抵抗効果と電界制御

3. 達成状況 (14) 大野課題

「シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット」



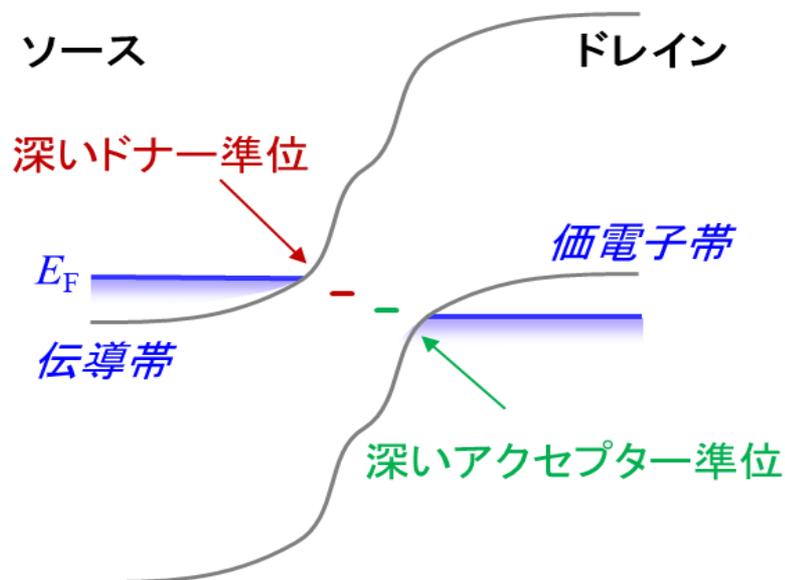
目標: 意図的に導入した2種の深い不純物準位を有する量子ビット素子”により室温動作可能な高感度磁場センサを開発する。

- ・トンネル電界効果トランジスタ素子構造に深い不純物準位 (Al-N対) を導入、室温までの単一電子伝導特性と温度10Kまでの量子ビット動作を確認。
- ・深い不純物としてBe、S、およびZnを検討中、Be導入素子において室温SET特性と低温スピン量子ビット動作を確認、Beが既存Al-N対と同様に深い不純物量子ビットとなることを示した。S・Znの両者を導入した素子はプロセス中。

[1] K. Ono, et al., Scientific reports **9**, 469 (2019).

[2] K. Ono, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 207703 (2019).

[3] K. Ono, et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 166802 (2020).



素子ソース・ドレイン方向のポテンシャルと2種の深い不純物

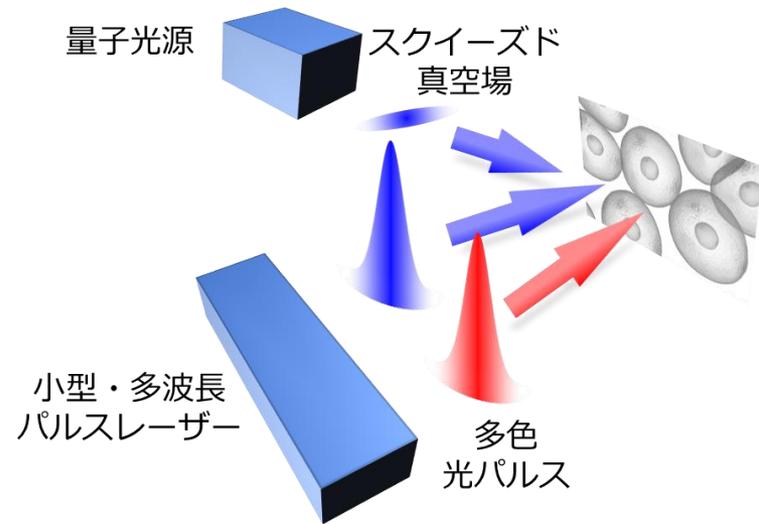


「量子光源による超高感度分子イメージング」

3. 達成状況 (15) 小関課題

目標: スクイズド真空場を用い、標準量子限界感度を上回る超高感度性を有する誘導ラマン散乱(SRS)顕微鏡を開発する。

- 量子光源ではスクイーピングのための光パラメトリック増幅器が動作し、波長843 nmにおいて6 dB程度の光利得を観測。
- 多波長パルス発生のためのファイバーレーザー光源では、光ファイバーベースの波長1.5 μm 帯のパルス光源とチャープドパルス増幅、波長800 nm帯への波長変換に成功。



量子増強SRS顕微法のイメージ

[1] Y. Ozeki, et al., J. Opt. Soc. Am. B **37**, 3288 (2020).

[2] Y. Taguchi, et al., J. Opt. Soc. Am. B **37**, 1535 (2020).

[3] N. Ochiai, et al., J. Opt. Soc. Am. B **36**, 1342 (2019).

3. 達成状況 (16) 宗宮課題

ANR 「量子制御を用いたオプトメカ結合型
連携 調和振動子のマニピュレーション」



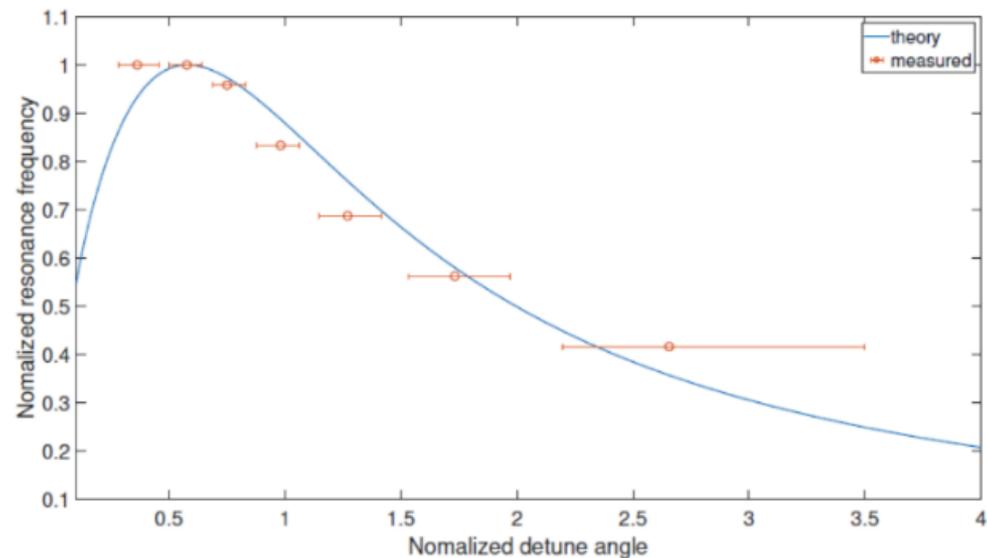
目標: レーザー光の輻射圧を利用したオプトメカニカル結合の「光バネ」に量子フィルタを導入し、光バネの実部と虚部を操作する技術を開発する。

- ・原理検証実験として「光バネの観測」を単光共振器実験において成功。
- ・暗縞制御したマイケルソン干渉計の信号取得側に高反射鏡を設置した信号リサイクル干渉計実験も構築。
- ・フランス側ではフォノンニック結晶を用いたマイクロディスク実験で基底状態の数十倍まで迫る感度を実現。

[1] T. Kawasaki, et al., Phys.Rev.A, **102**, 053520 (2020).

[2] S. Catano-Lopez, et al, Phys. Rev. Lett. **124**, 221102 (2020).

[3] K. Usami, et al, Phys.Rev.Research **2**, 043200 (2020).



光共振器の離調角を変えて光バネの共振周波数がシフトしていく様子を観測

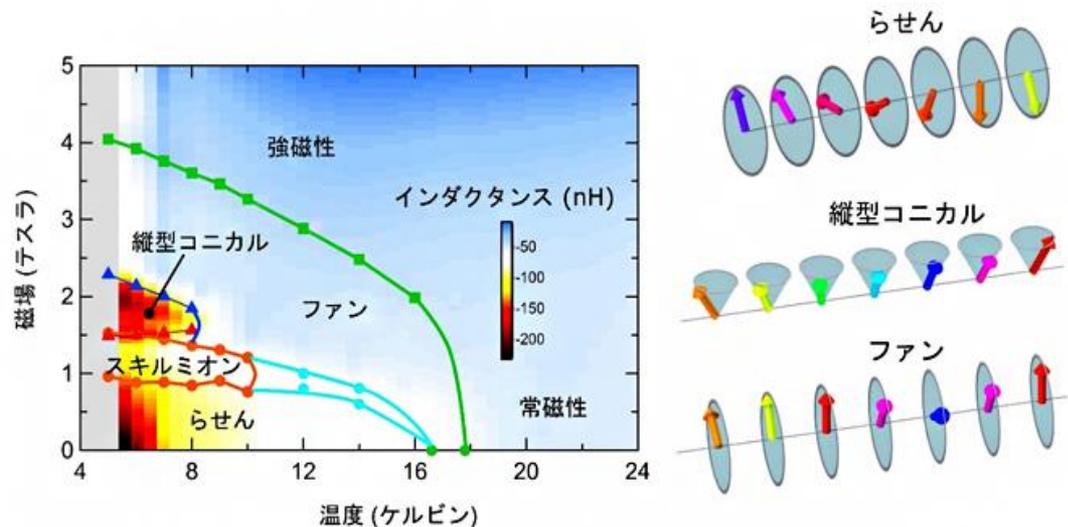


3. 達成状況 (17) 永長課題

目標: ナノスピ構造を有する物質開発、創発電磁現象の開拓、およびデバイス化への創発電磁機能の開拓により、創発インダクタと創発ダイオードの原理実証を行う。

- ・インダクタ機能開拓では、伝導電子に媒介された磁気相互作用であるRKKY相互作用をもつ希土類化合物 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ で、 $\sim 2\text{nm}$ スケールの短周期らせん構造等が現れることを、共鳴X線散乱法により明らかにした。
- ・ダイオード機能に関しては、スピンの非共線構造が磁場下で電気抵抗の非相反性をもたらすことを理論的に明らかにした。

[1] N. Nagaosa, et al., Jpn J. Appl. Phys. **58**, 120909 (2019).
 [2] T. Yokouchi, et al., Nature **586**, 232–236 (2020).
 [3] K. Yasuda, et al., Nature Nanotechnology **15**, 831–835 (2020).

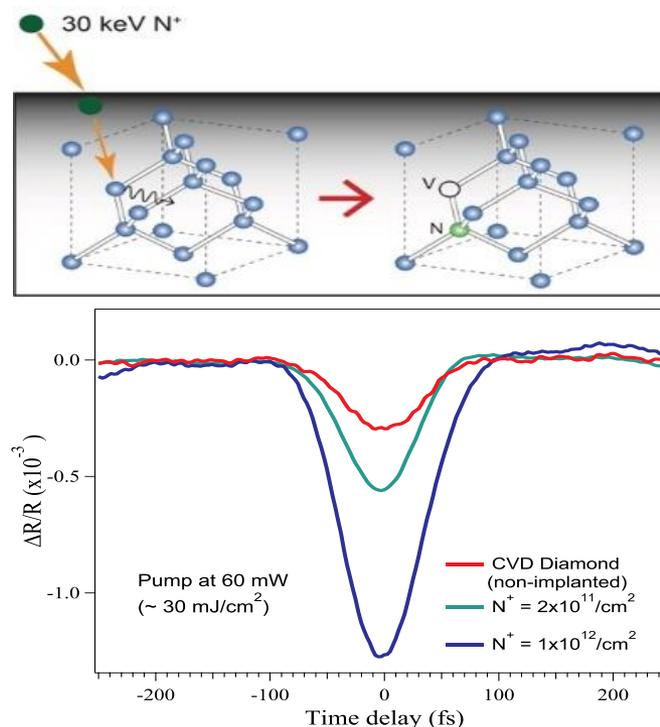


(左) 希土類化合物 $Gd_3Ru_4Al_{12}$ におけるインダクタンスの温度と磁場の依存性。(右) 磁気構造の模式図



目標: 新規ダイヤモンド光機能を用いることにより、時空間極限量子センシング技術を開拓する。

- ・3次の非線形光学効果である光カー効果(電気-光学効果)のカスケード過程により増強されることを見いだした。
- ・表面下約30 nm程の層に複数のNVセンターを作成したバルクダイヤモンド単結晶表面上にネオジウム磁性粒子を固定し、光検出磁気共鳴法により磁性粒子からの漏洩磁場の三次元磁気ベクトルイメージングが可能であることを示した。



[1] K. Ono, et al., Scientific reports **9**, 469 (2019).

[2] K. Ono, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 207703 (2019).

[3] K. Ono, et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 166802 (2020).

異なるイオン注入量の試料において得られた反射率変化

3. 達成状況 (19) 山本課題

ANR 「半導体非局在量子ビット
連携 の量子制御」



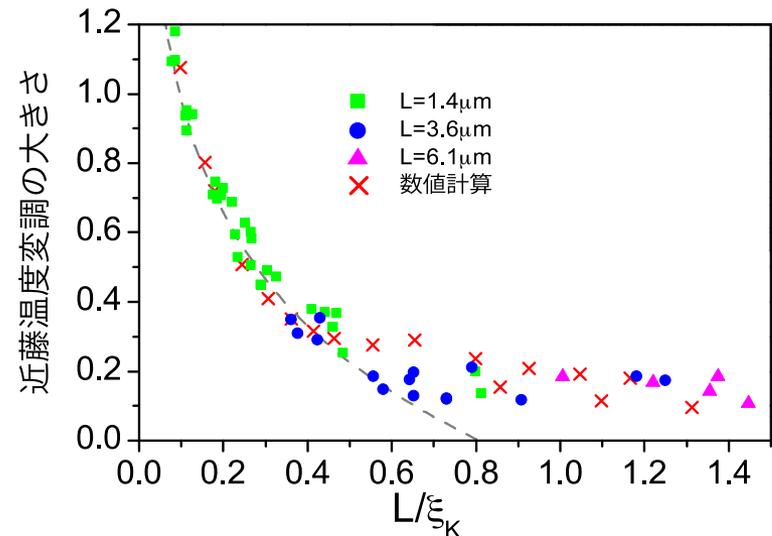
目標: 電子間相互作用などによるデコヒーレンスを受けない準粒子「レビトン」を用いて電子の飛行量子ビットの高精度制御するとともに、局在スピンと電子波の結合制御技術を開発する。

- ・仏Neelグループが周波数コムを用いた新しいパルス信号発生手法を開発し、当初予定以上の純度でレビトンを生成。
- ・局在スピンと電子波の結合制御に関しては、局在スピンと電子波の結合状態(近藤雲)の空間的な広がりを初めて解明。

[1] R. Sakano, et al., Phys. Rev. B **99**, 155106 (2019).

[2] I. V. Borzenets, et al., Nature **579**, 210-213 (2020).

[3] Y. Teratani, et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 216801 (2020).



実験的に得られた近藤雲の形状(横軸は局在スピンからの距離 L を近藤雲の大きさ ξ_K で割った値、縦軸は近藤雲の密度に対応する)

期待される経済・社会貢献の例

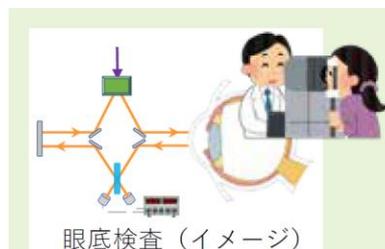
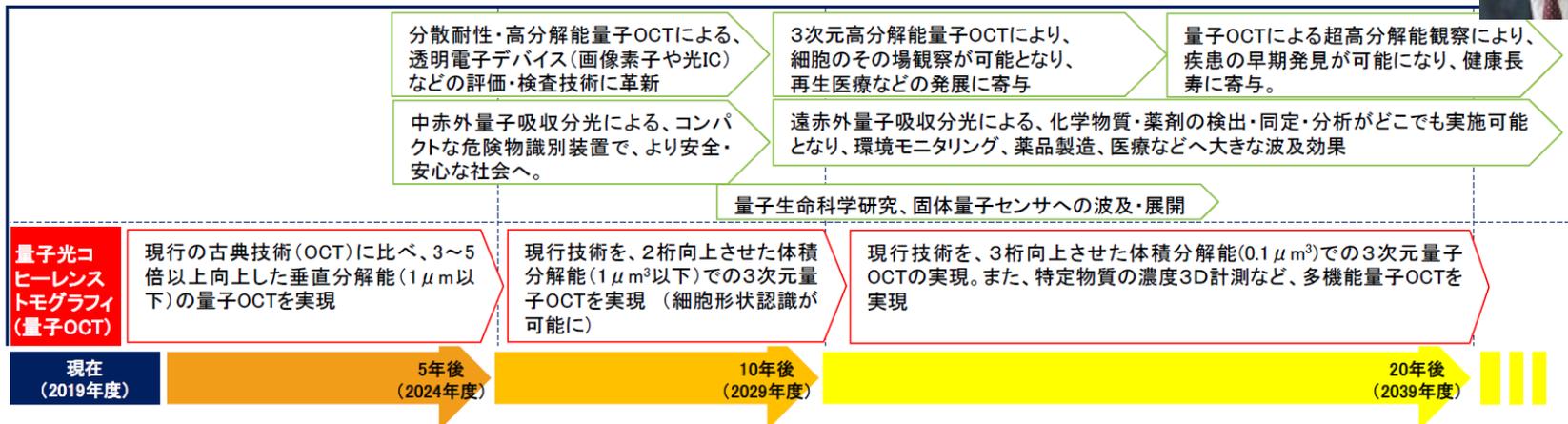
出典:「量子技術イノベーション戦略」ロードマップ

⑨量子もつれ光センサ

- 細胞の非侵襲観察や網膜厚みの精密計測など医療技術の進展や、高感度化学物質検知により、安全・安心社会に貢献
- 10年後に量子OCTで体積分解能 $1\mu\text{m}^3$ 以下を実現。また、可視光検出器で遠赤外域までの量子赤外吸収分光を実現
- 可視・赤外量子もつれ光源の開発、光子検出器の高速化や赤外域での長波長化、統合的な高速信号処理の開発を進める



経済・社会
インパクト



量子もつれ光イメージング

- ✓ 量子もつれ光をイメージングに活用
- ✓ 従来光のS/N比を超える高感度・高精細な計測により毛細血管等の細部観察が可能に



眼科疾患や動脈硬化の超早期診断が実現

期待される経済・社会貢献の例

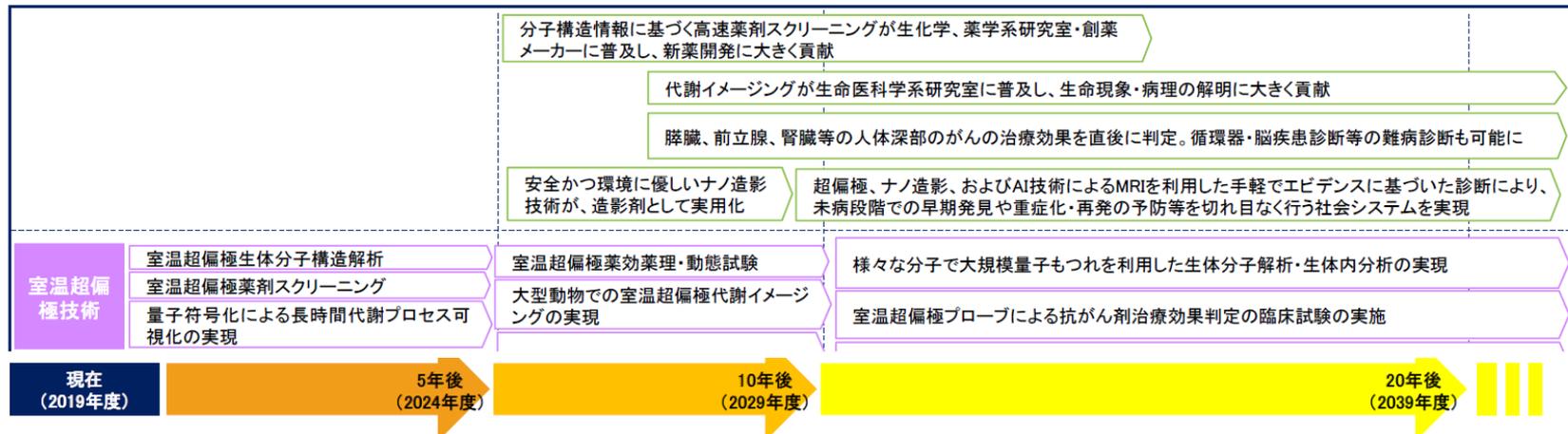
出典:「量子技術イノベーション戦略」ロードマップ



③量子生命科学（量子技術を用いた超高感度MRI/NMR）

- 薬剤スクリーニングによる新薬開発への貢献、代謝イメージングによる深部がん治療効果判定や難病診断、早期発見等が期待
- 5年後、室温超偏極による薬剤スクリーニングや長時間代謝過程可視化が実現。10年後、医療診断が実現、臨床治験が開始
- 超偏極化、量子符号化、ナノセンサ造影技術等の開発により、超高感度化を進める。また、多種分子の超偏極化技術も開発

経済・社会
インパクト



超偏極核磁気共鳴技術

- ✓ 核スピンの方向をそろえたスピン偏極化合物をMRI検査に活用
- ✓ 感度が従来法の千倍以上に向上。MRI検査時間の短縮やリアルタイム代謝イメージングが可能に



革新的MRI診断技術

MRI検査の健診への導入や、がん治療の効果判定が実現

報告内容

1. 研究領域の概要

- 1) 戦略目標、領域概要
- 2) 研究総括のねらい
- 3) 領域アドバイザー

2. 研究領域の運営

- 1) 研究課題の選考
- 2) 研究課題のマネジメント

3. 戦略目標達成に向けた状況

4. 総合所見

4. 総合所見（成果状況）

1. 100件（3年間3期）の応募があり、領域アドバイザー、外部選考委員の協力を得て、「量子技術」領域として幅広い分野から19課題（日仏共同課題：2件）を採択することができた。
2. 研究成果として、総論文数：609報（Nature系：39報、Science系：2報、Phys. Rev. Lett.：59報）への論文掲載、特許件数：30件（国際特許：8件）、招待講演件数：775件（国際会議の招待講演：445件）であった。
3. 研究者の育成では、教授に昇任が7名、准教授に昇任が6名、他にも多くの昇任があり、クラリベイト・アナリティクスでの高被引用論文著者に3名が選ばれ、国内外での多数の受賞があった。
4. 国際連携ではJapan-EU Joint WorkshopやEU-USA-Japanの国際シンポジウムを開催し、国際強化では海外派遣4人、国際招聘6人を実施し、量子技術分野における日本からの情報発信と海外連携を進めた。また、ANRとの日仏共同課題を2件選定した。

4. 総合所見（今後に向けて）

1. 本研究領域が発足した後、Googleの量子超越をはじめとする量子技術の研究が進み、日本でも様々な施策（量子技術イノベーション戦略の策定、Q-LEAPやムーンショットなどの新プログラム）が展開されてきた。しかしながら、CRESTとしての研究開発の推進は依然として意義深く、研究課題の多様性が量子技術の今後の発展に貢献するものと確信する。
2. 個々の課題の進展状況については、レベルの高い研究成果が多々達成され、主要学術雑誌にも多くの論文が掲載されている。さらに優れた成果の創出に向けて、総括としては今後も指導を進める所存である。
3. 本研究領域の研究者が、Q-LEAPやムーンショットプログラム等にも参画しているが、これは、CREST終了後も成果や人材が継承されるという観点から望ましいことと考える。
4. 量子技術分野において研究成果の社会的・経済的貢献を論じるのは次期尚早であるが、(B)カテゴリーの研究課題では、社会実装の見通しを与える可能性がいくつか出始めており、今後の発展に期待している。