

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 事後評価

研究総括: 荒川 泰彦

2024年2月13日(火)

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

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】

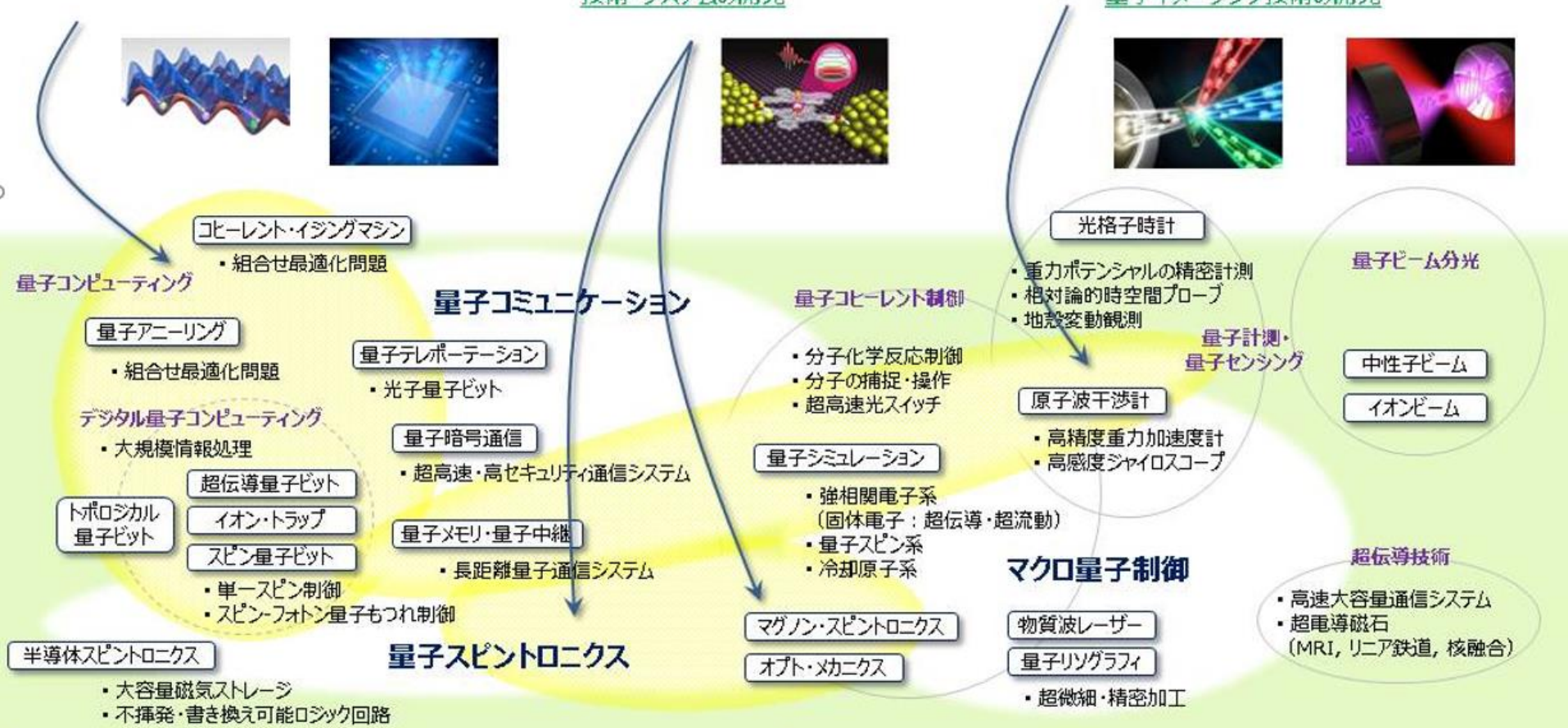
量子コヒーレント制御による量子シミュレーション・量子コミュニケーション要素技術の開発

【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



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 (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～

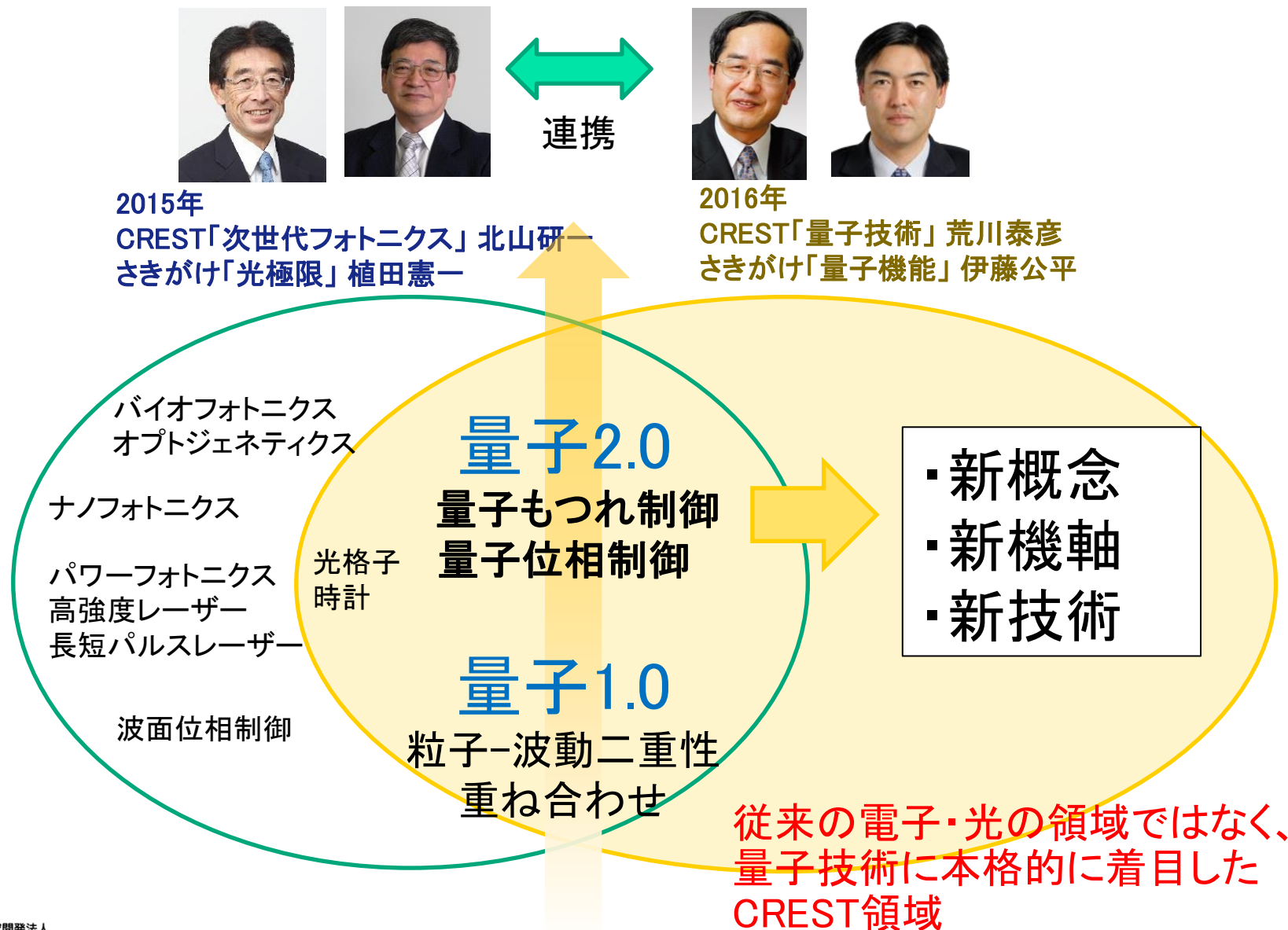
量子の孤立系から多体系、巨視的な凝縮体に至るまで、多彩な量子状態の高度制御を実現することにより、未知の物理現象や物質機能・物性の探索、新たな概念に基づく情報科学の開拓及び新技術シーズ創出を図る。

- 「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～

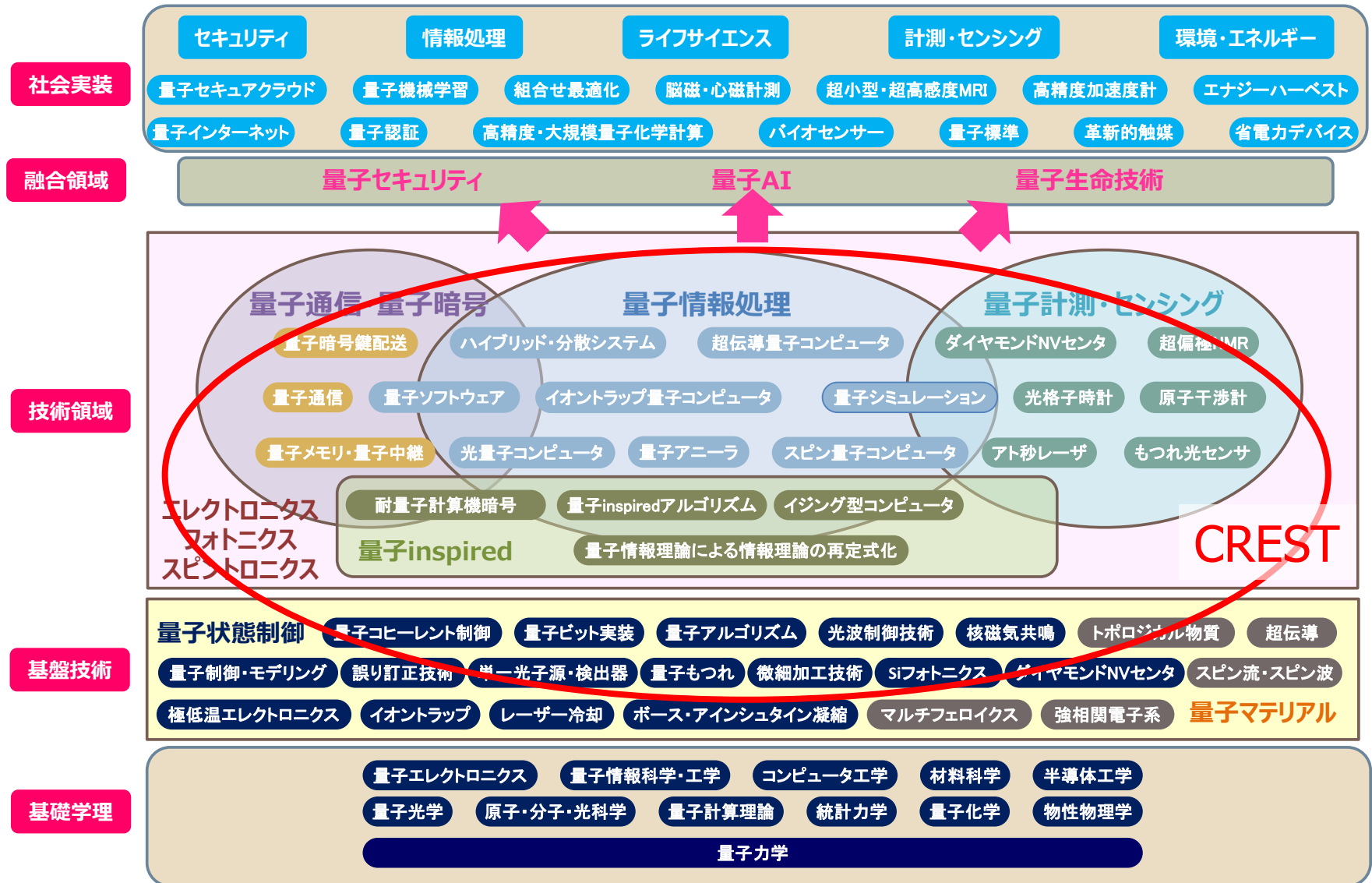
基盤的な量子技術・システムの開発により、既存技術分野（フォトンクス、エレクトロニクス等）の発展的融合・ブレークスルーを促すことを目指す。

1. 研究領域の概要

本研究領域の位置付け



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

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、赤:発足時からの変更)】

名前	所属	役職	専門分野
伊藤 公平	慶應義塾大学	塾長	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	常務理事	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	名誉教授	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

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

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 (2)	13 (1)	6	0.18	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 (2)	14 (2)	7 (1)	0.24	51.4	上記＋新量子技術	上記＋イオン、NVセ ンター、光量子
2018	37 (1)	14	6	0.16	46.5	上記	上記＋電子
合計	100 (5)	41 (3)	19 (1)	0.19			

()内の数字は女性の件数

- ・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)		齊藤 (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) (スピントロニクス)
	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

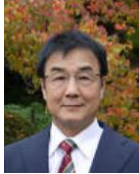


2017年採択課題



2018年採択課題

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  小坂 	竹内  小関 	青木  宗宮 
半導体	樽茶  山本 		長谷  大野 	田中(雅)  永長 

ANR



2016年採択課題



2017年採択課題



2018年採択課題

2. 研究領域の運営 (1) 研究課題の選考

採択年度	研究代表者	所属	役職	研究課題	研究費M¥
2016年	井元信之 (B)	大阪大学	教授⇒特任教授	グローバル量子ネットワーク	315
	北川勝浩 (A)	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	188
	高橋義朗 (A)	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	190
	竹内繁樹 (B)	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	315
	樽茶清悟 (A)	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	190
	蔡 兆申 (B)	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	315
2017年	青木隆朗 (A)	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	170
	神成文彦 (A)	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	170
	小坂英男 (A)	横浜国立大学	教授	ダイヤモンド量子セキュリティ	220
	齊藤志郎 (A)	NTT	特別研究員⇒ 上席特別研究員	超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング	170
	仙場浩一 (A)	NICT	上席研究員	超伝導量子メタマテリアルの創成と制御	170
	田中歌子 (A)	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	170
	田中雅明 (A)	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	170
2018年	大野圭司 (A)	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	170
	小関泰之 (B)	東京大学	准教授⇒教授	量子光源による超高感度分子イメージング	320
	宗宮健太郎(A)	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	182
	永長直人 (A)	東京大学⇒ 理化学研究所	教授⇒ グループディレクター	ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御	200
	長谷宗明 (A)	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	200
	山本倫久 (A)	理化学研究所	ユニットリーダー⇒ チームリーダー	半導体非局在量子ビットの量子制御	180

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

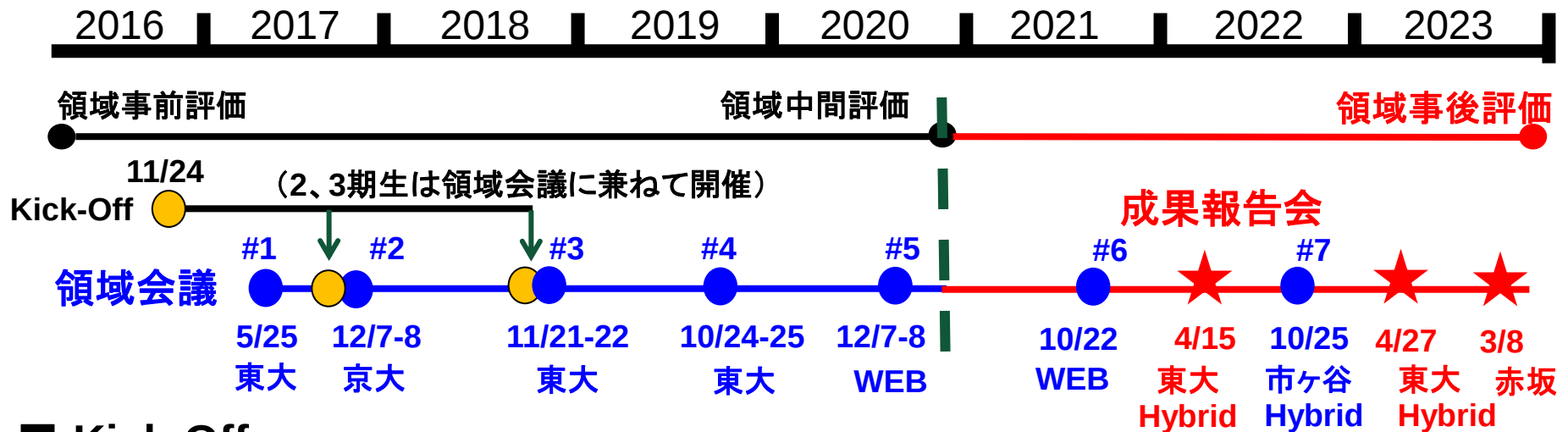
2018年度は、国際連携強化の観点から、新たな試みとして、フランス国立研究機構 (Agence Nationale de la Recherche: ANR)と共同で、日仏共同CREST課題の募集選考を実施。

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) 研究課題のマネジメント 領域会議



■ Kick-Off

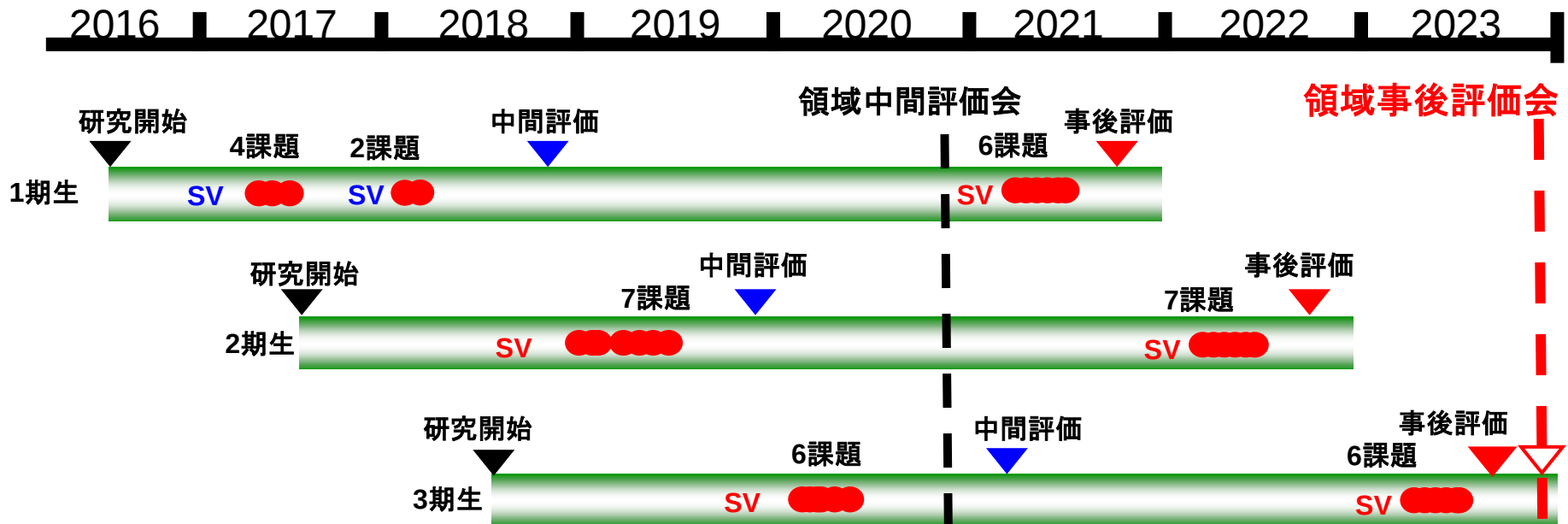
- ・総括方針を周知、研究代表者と総括、ADが研究計画・マイルストーンを共有。
- ・成果の学会発表、プレスリリースに加え知財権の重要性も強調。
- ・若手育成も研究代表者の重要なミッションであると伝えた。

■ 領域会議

- ・総括、アドバイザー、研究チームが一同に会し、進捗状況等を活発に議論した。
- ・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。
- ・第4回から7回までは、知財や未公開情報を扱うので非公開の領域会議として深く議論し、代わりに課題終了後に公開の成果報告会を設け情報発信に努めた。

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(SV)

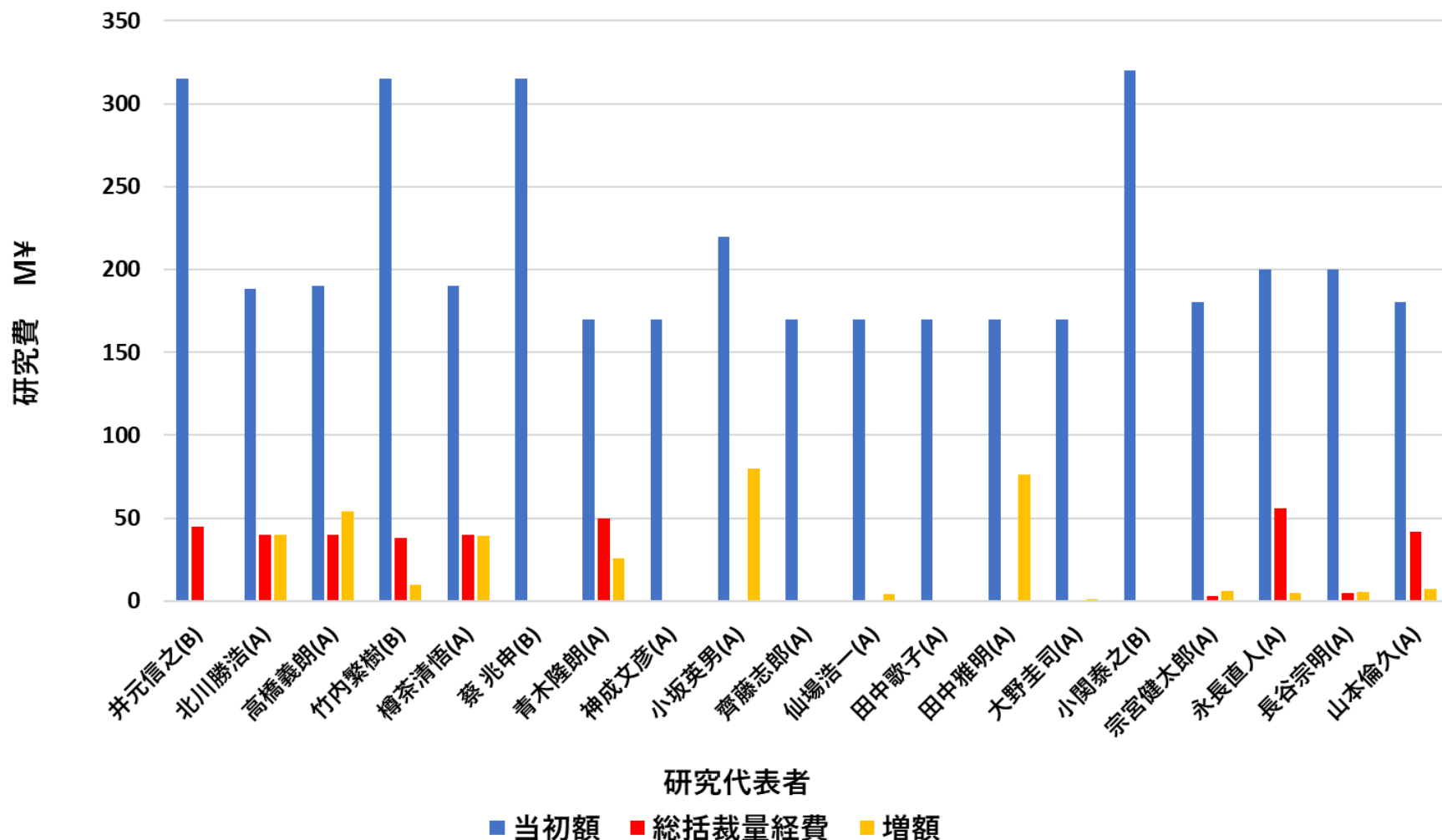


- ・総括、アドバイザー、JSTで各課題の研究機関を訪問
- ・進捗報告会と実験室見学を通じて研究内容や環境を詳細に把握
- ・互いに踏み込んだ議論を交わし、各課題への理解を深め、必要な助言を実施
- ・課題中間評価を1年前倒して資源配分や課題へのフィードバックに反映させた。
- ・2020年度以降はコロナ禍のためバーチャルサイトビジットとし、研究代表者だけでなく、主たる共同研究者のサイトもオンラインで訪問し、チーム内の進捗状況の把握や主たる共同研究者との議論も深めた。

2. 研究領域の運営

(2) 研究課題のマネジメント

当初研究費・総括裁量経費・増額



2. 研究領域の運営 (2) 研究課題のマネージメント

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、印ほか合計21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、さががけ「量子機能」の研究者など)。
- ・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

国際連携

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、日本での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、量子計測等の研究動向が紹介され、パネルディスカッションで、異分野との協働、基礎研究の重要性、共通課題が明らかになった。
- 本会議は、「量子技術イノベーション戦略」の国際的な戦略成果の一つとして位置づけられ、後続の国際シンポとして、Quantum Innovationが2021年度より毎年開催されるようになった。



2. 研究領域の運営

(2) 研究課題のマネジメント

国際共同研究

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Devitt Simon John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、 Ulm大学のFedor Jelezko教授
仙場浩一	2018年	招聘	カタールQEERIのS. Ashhab 博士、 スペインCSICのM. P. Garcia 博士
	2019年	招聘	Yale大学のMichel H. Devoret 教授、 MITのW. D. Oliver 教授、 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
宗宮健太郎 (ANR連携)	2019 ~ 2023年		LKB(仏)と宗宮課題の研究者間で5回ワークショップ、技術 交流、人的交流(2022年:特任講師と大学院生⇒LKB、 2023年:大学院生⇒LKB)
山本倫久 (ANR連携)	2019 ~ 2023年		Neel-CNRS(仏)と山本課題でのMeeting、共同での技術開発 (レビトンの実証、開発、評価、演算など)

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

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(国際)	Nature系	Science系	PRL・PRX系	成果発表	招待講演	特許出願
2016年	井元信之(B)	69	4	1	5	282	103	4
	北川勝浩(A)	21	0	0	0	145	25	8
	高橋義朗(A)	92	6	2	11	431	155	2
	竹内繁樹(B)	60	1	0	0	286	93	8
	樽茶清悟(A)	51	9	0	9	300	129	1
	蔡 兆申(B)	222	15	5	8	120	78	5
2017年	青木隆朗(A)	15	1	0	3	60	19	9
	神成文彦(A)	11	0	0	1	63	21	0
	小坂英男(A)	52	5	1	0	195	62	0
	齊藤志郎(A)	37	0	0	2	114	26	4
	仙場浩一(A)	13	0	0	1	112	24	2
	田中歌子(A)	9	0	0	2	73	18	0
	田中雅明(A)	102	7	0	1	456	95	2
2018年	大野圭司(A)	8	0	0	2	49	26	0
	小関泰之(B)	42	0	0	0	122	48	2
	宗宮健太郎(A)	26	0	0	5	124	38	0
	永長直人(A)	160	20	3	17	230	129	4
	長谷宗明(A)	43	0	0	0	180	34	3
	山本倫久(A)	13	2	0	2	100	21	2
合計		1033	70	12	66	3442	1144	54

Nature系: Nat., Nat. Commun., Nat. Nanotechnol., Nat. Photonics, Nat. Electron., Nat. Mater., Nat. Rev. Phys., Nat. Phys.

Science系: Science, Science Advances, PRX系: PRX, PRX Quantum、成果発表件数: 招待講演、口頭発表、ポスター発表の合計

3. 達成状況 表彰

主な受賞件数は141件であり、研究代表者：16件、主たる共同研究者：22件、研究者：67件、学生：36件（ただし研究科内等での受賞は除く）であった。次世代を担う中堅・若手研究者の大きな飛躍、学生の育成が十分になされたと思われる。また、国際的にも非常に栄誉な賞があった。

受賞者名	賞の名称	受賞年月	
高橋義朗	紫綬褒章	2020年11月	高橋課題
樽茶清悟	第18回応用物理学会業績賞	2018年3月	樽茶課題
蔡 兆申	紫綬褒章	2018年4月	蔡課題
蔡 兆申	朝日賞	2021年1月	
Franco Nori	Clarivate analytics Highly Cited Researchers	2017年11月	
神成文彦	第23回光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）	2022年3月	神成課題
Sahel Ashhab	IOP Trusted reviewer status	2022年9月	仙場課題
永長直人	Clarivate analytics Highly Cited Researchers	2019, 20年11月	永長課題
十倉好紀	文化功労者	2020年11月	
	Humboldt Research Award	2019年10月	
	Clarivate analytics Highly Cited Researchers	2019, 21年11月	
合田圭介、小関泰之 他	文部科学大臣表彰 科学技術賞	2020年4月	小関課題
重川秀実	紫綬褒章	2019年5月	長谷課題

3. 達成状況 人材育成(昇進等)

研究代表者、主たる共同研究者、参画研究者、学生において、合計で71名の者が昇進した。以下、主な昇進例

キャリアアップ状況	人数	研究者名
教授	15名 (2名)	井元課題: 玉木潔、山本俊、山下太郎(仙場課題も兼務)。竹内課題: ホフマンホルガ、岡寿樹。高橋課題: 藤井啓祐(井元、北川課題も兼務)。青木課題: 金本理奈*。齊藤課題: 上野祐子*、尾身博雄。仙場課題: 仙場浩一(NICTと兼任)。大野課題: 森山悟士。小関課題: 小関泰之、金磊。永長課題: 賀川史敬。山本課題: 山本倫久(理研と兼任)
特任准教授、准教授	12名	北川課題: 根来誠。高橋課題: 高須洋介、段下一平。樽茶課題: 大塚朋廣、米田淳。齊藤課題: 堀匡寛。宗宮課題: 高橋優樹、松本伸之。永長課題: 金澤直也、Max Hirschberger、石塚大晃。山本課題: 高田真太郎
講師、特任講師	4名	井元課題: 佐々木寿彦、田中雅明課題: Nguyen Thanh Tu、永長課題: 上田健太郎。山本課題: 阪野壘
助教、特任助教	14名 <3名>	井元課題: 小林俊輝、中田芳史。北川課題: 杉山太香典、御手洗光祐**、宮西孝一郎**、中村祐士。神成課題: 保坂有杜。齊藤課題: 久木田真吾、Le Bin Ho。小関課題: 小口研一。宗宮課題: 小森健太郎。永長課題: 佐藤拓朗、北折暁**。山本課題: David Pomaranski
上級管理職・上級研究職	8名	井元課題: 東浩司(特別研究員)。小坂課題: 寺地徳之(主席研究員)、加藤宙光(上級主任研究員)。青木課題: 後藤隼人(研究主幹)。田中歌子課題: 関根徳彦(室長)、早坂和弘(副室長)。齊藤課題: 齊藤志郎(上席特別研究員)。大野課題: 森貴洋(研究チーム長)
主任研究員等	3名	齊藤課題: 桶田啓、手島哲彦(研究主任)。山本課題: 岡崎雄馬(主任研究員)
学生 ⇒ 研究員等、	3名 (1名)	井元課題: 達本吉朗(研究員)。宗宮課題: 富永雄介(特定研究員)。永長課題: 藤代有絵子(基礎特別研究員)*

「人数」のうち ()内は女性の人数、< > 内は学生から助教への昇進



3. 達成状況 量子計算

「スピン量子計算の基盤技術開発」

研究概要

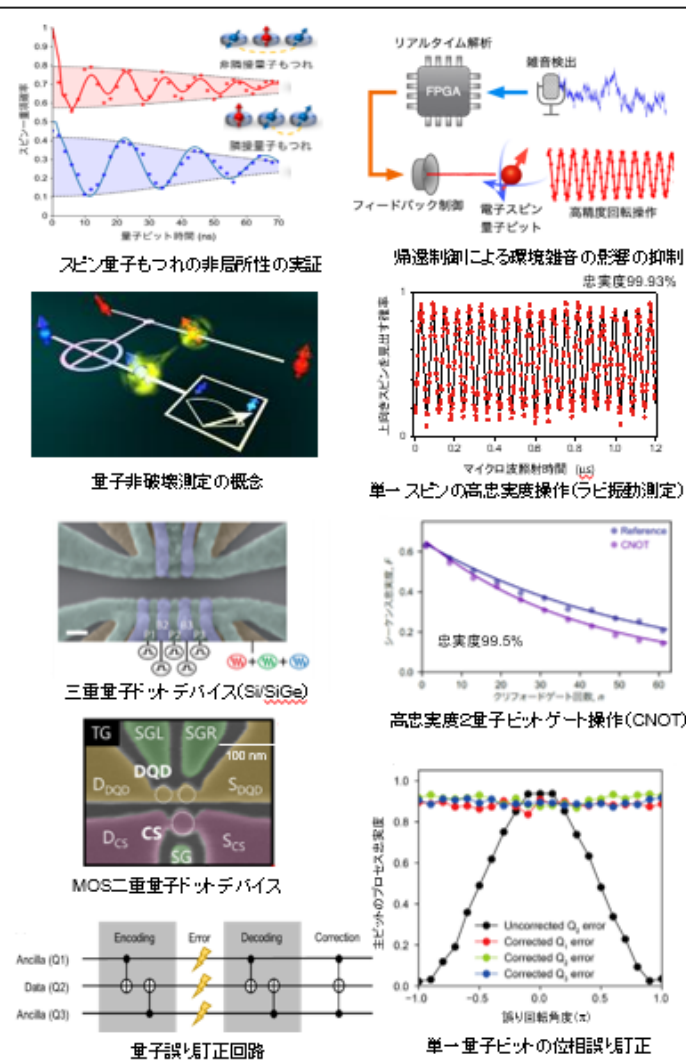
半導体量子ドット中のスピンの量子操作を基盤として、固体量子情報の新展開を導く概念・技術の開発を目指した。具体的には、GaAs、Siの量子ドットを用いて、多量子ビットデバイスの技術課題の抽出と対策の実施、スピン相関とデコヒーレンスの解明と制御法の開発、多量子ビット操作の基本となる3量子ビット操作の実装を行った。さらに、得られた知見と技術を集約することにより、誤り耐性量子計算に必要な各要素技術を格段に向上させた。

研究成果とインパクト

- 帰還制御を利用してデフェージング抑制と電荷計の安定化を達成した。
 - スピナー重項2電子の空間制御により量子もつれの非局所性を実証した。
 - 誤り耐性量子計算に必要な量子操作の忠実度条件を全てクリアした(単一量子ビット>99.9%、2量子ビット操作>99%、読み出し>99%、初期化>99%)。
 - 量子非破壊測定を実証し、読み出しと初期化に有用であることを示した。
 - 3量子ビットによる量子誤り訂正を構築し、位相誤り訂正の有効性を実証した。
 - 半導体産業と好相性のMOS量子ドットを開発し、スピン制御に成功した。
 - 大規模化に向けて、現実的なプロセスによる多量子ビットデバイスを提案した。
- 以上は、いずれも半導体量子ビットで初となる成果であり、半導体量子コンピュータの研究開発に大きく貢献した。

今後の展開等

- JST-QLEAP、文科省Moonshotにおける半導体量子コンピュータの研究開発に基盤技術として導入することにより同事業の推進に貢献できる。
- 海外半導体産業と連携することができれば、大規模化の開発を加速できる。
- 専用の量子回路アーキテクチャ、誤り訂正方式での特許取得は重要な戦略。



A. Noiri et al., "Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon", Nature 601, 338 (2022).

(上記論文のイメージ図がNatureの表紙を飾った。)

3. 達成状況 量子計算

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」



研究概要

光格子中の超低温原子集団が提供する興味深い強相関量子多体系に着目し、最先端光・原子制御手法を新規に開発し、理論グループと密に連携することで、大規模量子多体系の個別量子測定・制御能力を備えた高度な量子シミュレーターの基盤技術を創出した。特に、アンサンブル全体に対する量子シミュレーション技術の深化とともに、単一原子の個別量子測定・制御技術を融合させ、量子シミュレーション・量子制御を融合的に発展させた。

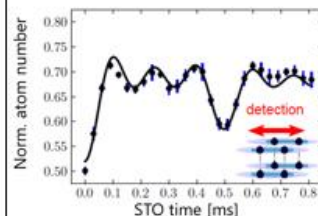
研究成果とインパクト

光格子中の極低温Yb原子の豊富な内部自由度を高度に制御し、1) 冷却原子フェルミハバードモデルの最低温度の実現、2) スピン空間量子輸送シミュレーターの開発、3) 非平衡量子クエンチダイナミクスの解明、4) 開放量子多体系における新奇量子相の創出、5) スピン分解量子気体顕微鏡の実現、6) 単一Yb原子2次元光トラップアレイの実現、7) トポロジカル量子現象の乱れ耐性の解明、など、多様な光格子シミュレーターを新規に実現した。

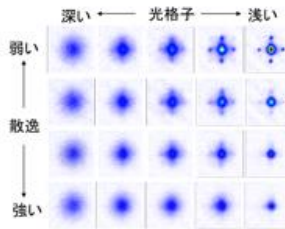
今後の展開等

- ・Q-LEAP/PRISM事業で、リモートおよびクラウド利用量子シミュレーターの社会実装へ展開する。
- ・CRESTで開発した単一Yb原子光トラップアレイを、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の実現へ展開する。
- ・超高分解能量子シミュレーターを量子センサー・基礎物理へ展開する。

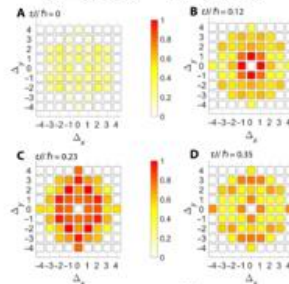
冷却原子フェルミハバードモデルの最低温度の実現



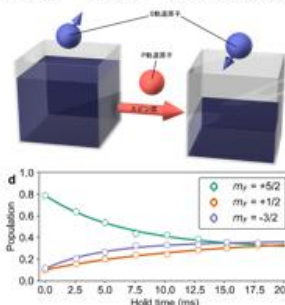
開放型ハバードモデルの量子相転移の解明



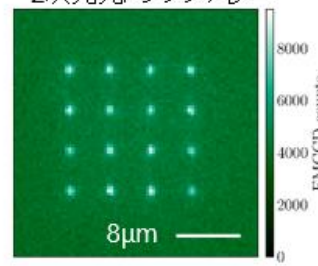
非平衡量子クエンチダイナミクス



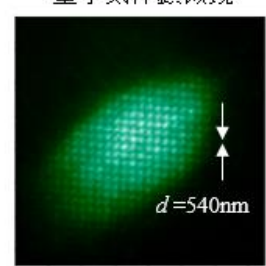
量子輸送シミュレーター：スピノールアトモトロニクス



単一Yb原子の2次元光トラップアレイ



Yb原子の量子気体顕微鏡



Y. Takasu et al., "Energy redistribution and spatiotemporal evolution of correlations after a sudden quench of the Bose-Hubbard model", Science Advances 6, eaba9255, 2020.

3. 達成状況 量子通信

小坂課題 「ダイヤモンド量子セキュリティ」



研究概要

本研究は、超スマート社会の実現に不可欠な情報セキュリティを物理的に保障する、量子暗号通信の長距離化・多重化・高機能化を目的とした。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、光子から核子への伝令付き量子テレポーテーション転写、電子と核子の誤り符号付きのホロノミック量子ゲート、シングルショットによる核子間の完全な量子もつれ読み出しなどを行い、量子セキュリティの実用化に道を開いた。

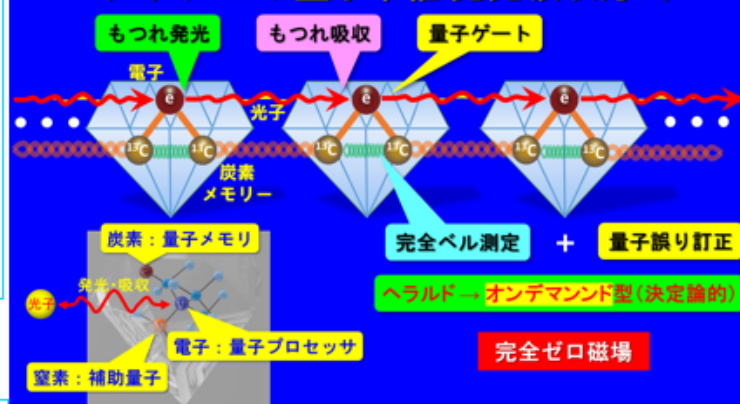
研究成果とインパクト

長距離の位相制御が不要な量子中継スキーム(発光吸収方式)を独自開発し、要素機能となる量子もつれ発光、量子テレポーテーション転写、量子もつれゲート操作、量子もつれ測定(完全ベル測定)、量子誤り訂正を全て完全ゼロ磁場下で実現し、量子インターネットの基礎を構築した。本研究の発光吸収方式は従来の光子干渉方式を遥かに超えるスケーラブルな量子暗号通信が可能となる。

今後の展開等

- ・内閣府/JSTのムーンショット研究開発事業を受託。プログラムマネージャーとして量子コンピュータネットワーク、量子インターネットの構築事業を実施。
- ・総務省委託事業「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」を受託。課題IIIとりまとめ機関代表として、量子中継システムの構築事業を実施。
- ・海外(QRX)および国内(QRTF)などの量子中継コンソーシアムと組織連携。

ダイヤモンド量子中継 発光吸収方式



ダイヤモンド量子中継器 要素機能の性能

機能	実績
① 万能量子ゲート忠実度(電子) 量子ゲート速度(電子)	99.97% 180 MHz
② 量子もつれ発光忠実度(電子-光子) 光子生成レート(ZPL)	98% 10 Kc/s
③ 量子テレポーテーション転写忠実度 量子メモリ時間(電子/核子)	94% 0.1s / 1s
④ 完全ベル測定忠実度(2炭素) 単一事象読み出し忠実度(炭素)	90% 99.7%
⑤ 量子誤り訂正忠実度(窒素+2炭素) 個別制御メモリ数(電子、窒素、8炭素)	83% 10

(Single NV @ 5K, B=0)

Y. Sekiguchi et al., "Optically addressable universal holonomic quantum gates on Diamond spins", Nature Photonics, 16, 662-666 (2022)

3. 達成状況 量子計測

竹内課題「大強度広帯域 周波数もつれ状態の実現と応用」



研究概要

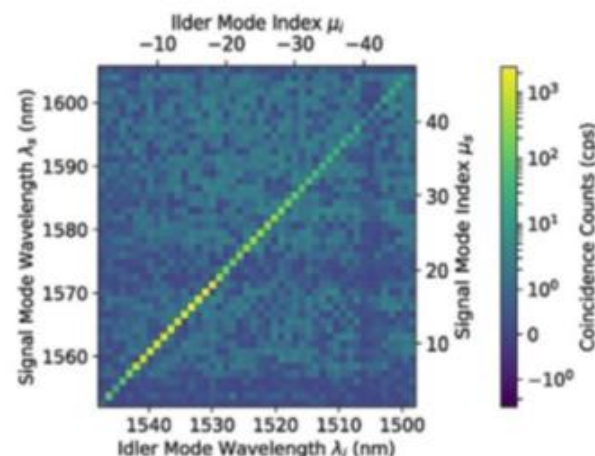
広帯域周波数量子もつれ光とは、2つの光子がそれぞれ広い周波数帯域(エネルギー)にわたり存在する状態である。本プロジェクトでは、導波路型チャープ擬似位相整合素子や窒化シリコンリング共振器を用い、広帯域周波数量子もつれ光を大量に発生する光源を開発、またそれらの量子光源を用い、高分解能で分散耐性をもつ量子・古典ハイブリッド光断層撮像システムや、量子もつれ時間分解分光法など、あらたな量子光計測技術の実現を目指した。

研究成果とインパクト

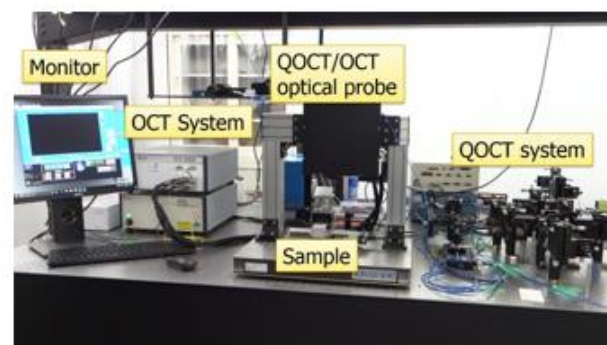
- リッジ導波路型チャープ擬似位相整合素子により、従来素子と比較して600倍～1200倍の効率で超広帯域量子もつれ光子対生成を確認。
- 全帯域で100nmと、最大の帯域のオンチップ量子もつれ光子対生成に成功。
- 1000倍高速な量子OCTと、古典量子ハイブリッドOCTシステムを実現。

今後の展開等

- 開発した高効率広帯域もつれ光源を活用し、非染色かつ高い分解能($1\mu\text{m}$)³で3次元断層撮像可能な量子OCTの開発を目指すと共に、生命科学等への応用を目指す。
- 広帯域オンチップ周波数量子もつれ光のさらなる広帯域化・高効率化と、量子情報処理や量子センシングへの応用を目指す。



広帯域オンチップ周波数量子もつれ光



量子・古典ハイブリッド光断層撮像システム

T. Kiyohara et al., "Direct and efficient verification of entanglement between two multimode-multiphoton systems", Optica, vol.7, No.11, 1517-1523 (2020).

3. 達成状況 新量子技術

田中(雅)課題 「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ndeバイスへの応用」



研究概要

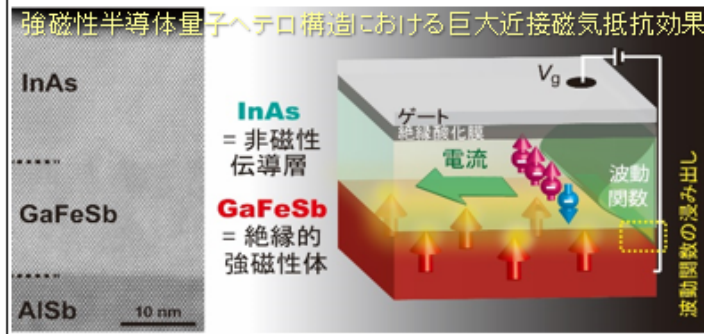
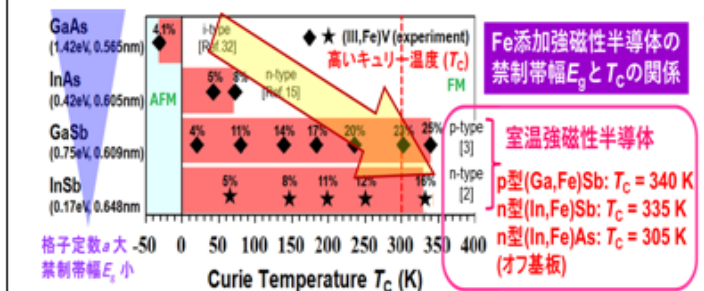
本CREST課題では以下の研究を行った：①従来の半導体デバイスでは持ち得なかった「不揮発性」「低消費電力」「再構成可能性」「情報処理の柔軟性」「非相反性」の機能をもつ材料、量子ヘテロ構造、ナノ構造を創製する。②半導体材料、量子ヘテロ構造・ナノ構造、デバイス中に磁性元素や強磁性材料を取込み、量子サイズ効果、トンネル効果、電荷・スピン輸送、スピン状態を制御し、不揮発・低消費電力スピndeバイスへ応用する。

研究成果とインパクト

①材料および②デバイスの両面において、当初計画以上に研究が進み、新しいn型およびp型室温強磁性半導体の創製、その物性機能制御、高 T_C 強磁性半導体設計指針の確立、巨大近接磁気抵抗効果や奇関数磁気抵抗効果など新量子現象の発見、電界効果による磁気抵抗制御など新機能の創出、縦型および横型スピントランジスタ等の作製と動作実証など顕著な成果を挙げた。

今後の展開等

本研究で明らかにした量子効果や量子物性は、トンネル効果、波動関数とスピン状態の制御、近接磁気抵抗効果、スピン注入・検出・輸送の制御など、豊かな物理現象、意義ある学術的内容と工学的応用の可能性を含むものである。また、強磁性半導体・超伝導体接合によるスピン三重項クーパ対、ジョセフソン効果、トポロジカル物質の開発などに展開しつつある。本成果を基礎にして、さらなる量子科学技術とデバイス応用の研究を発展させる。



K. Takiguchi et al., "Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic/nonmagnetic bilayers", Nature Physics 15, pp.1134–1139 (2019).

M. Jiang et al., "Artificial suppression of the field-like term and ultra-efficient magnetisation switching in a spin-orbit ferromagnet", Nature Electronics 3, pp.751–756 (2020).

3. 達成状況 新量子技術

永長課題「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御」



研究概要

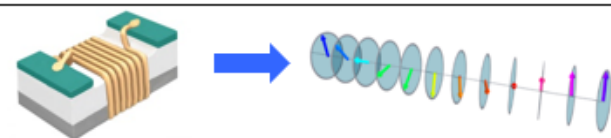
- ・ナノスケールのスピン構造に付随する量子力学的な位相から生じる実効的な電磁場—創発電磁場—を用いて、磁性体の量子機能を開拓する。
- ・具体的には非相反・非線形応答を用いた創発ダイオードと創発電磁誘導を用いた創発インダクタの開発を行う。

研究成果とインパクト

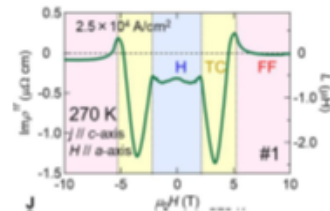
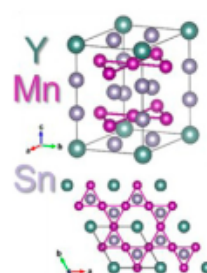
波としての電子の量子的な性質に基づき、熱の発生を抑えた非散逸性とナノスケールまで微細化可能性を持つ素子の基礎学理確立と原理実証デバイスの作成を行った。インダクタでは、微細化が困難であった従来のインダクタに対して、同程度のインダクタンスで**10万分の1から100万分の1のサイズダウン**を実現した。ダイオード効果では超伝導ダイオード効果の理論・実証と、**2次非線形光学応答**である直流シフトカレントが、フォノンやマグノン励起によって誘起されることを理論・実験から確立、テラヘルツ光検出器への途を拓いた。

今後の展開等

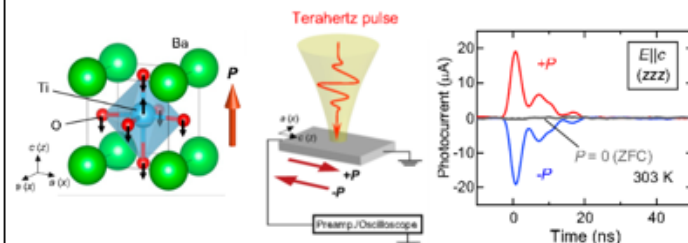
- ・知財ではすでに室温で動作する創発インダクタの特許申請を行ったが、さらに高周波数動作や材料開発を行い特許化を進める。
- ・実用化への道筋が見えた段階で企業との共同研究などを考慮。



コイル構造をナノスケールらせん磁性体に—創発インダクタ—



室温動作物質の結晶構造とそのインダクタンス



強誘電体のフォノン励起による直流シフトカレントの観測

T. Yokouchi et al., "Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet", Nature 586, 232–236 (2020).

期待される経済・社会貢献の例

- ・CREST「量子技術」からの特許出願件数は54件（国際：13件、国内：41件）
（なおPCT出願は先行する国内出願に加え、国際出願としてもカウントした。）
- ・青木課題（知財件数：9件）：CREST成果に基づき量子技術における国内初のハード系ベンチャーの設立

（株）Nanofiber Quantum Technologies <https://www.nano-qt.com/>

青木課題の研究代表者が共同創業者およびCSOとして参画している。

代表的知財：「量子計算ユニット、単一光子源、および量子計算装置」PCT/JP2021/25783（2021）
ナノファイバー共振器QED系による新規な量子計算の実装方法であり、圧倒的に大規模な量子計算を可能にする画期的な手法である。

- ・北川課題（知財件数：8件）：研究代表者や共同研究者が関与するベンチャー2社

（株）QunaSys <https://qunasys.com/>

北川課題の研究者であった根来誠、高橋課題の研究者であった藤井啓祐がベンチャーのアドバイザーとして、また北川課題の研究者であった御手洗光祐がCSOとして参画している。

キューエル（株） <https://quel-inc.com/ja/home/>

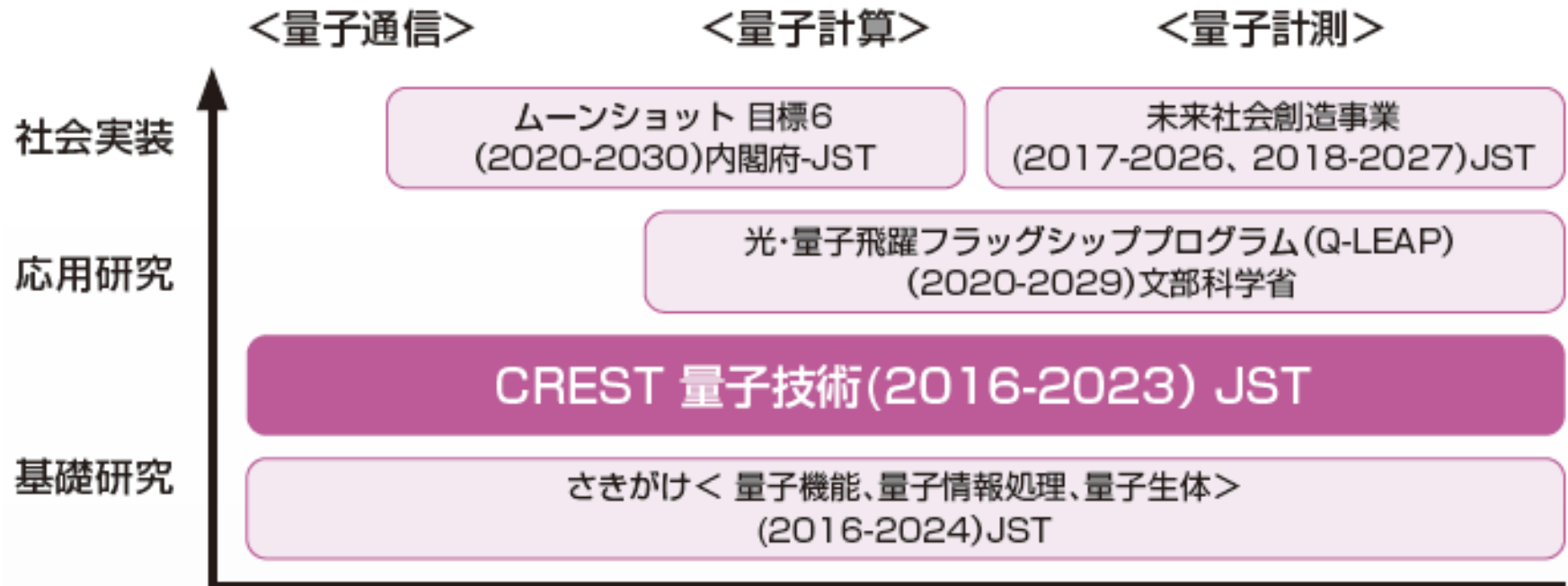
北川課題の研究代表者である北川勝浩が創業者として、根来誠が取締役CSOとして参画している。

CREST研究者の終了後の展開

採択年	研究課題	名前	CRESTでの役割	CREST中・後の展開
2016年	井元課題	井元信之	研究代表者	CREST「量子フロンティア」の研究総括
		小芦雅斗	主たる共同研究者	ムーンショット目標6のPM
		山本俊	参画研究者	ムーンショット目標6のPM
	北川課題	北川勝浩	研究代表者	ムーンショット目標6のPD
	高橋課題	高橋義朗	研究代表者	CREST「量子フロンティア」の研究代表者
	竹内課題	竹内繁樹	研究代表者	Q-LEAP基礎基盤研究の研究代表者
	樽茶課題	樽茶清悟	研究代表者	ムーンショット目標6のPM
2017年	青木課題	青木隆朗	研究代表者	ムーンショット目標6のPM
	小坂課題	小坂英男	研究代表者	ムーンショット目標6のPM
		寺地徳之	主たる共同研究者	Q-LEAP基礎基盤研究の研究代表者
2018年	大野課題	森貴洋	主たる共同研究者	Q-LEAP基礎基盤研究の研究代表者
	小関課題	小関泰之	研究代表者	CREST「革新的計測解析」の研究代表者
	宗宮課題	宗宮 健太郎	研究代表者	ASPIREの研究代表者
		高橋優樹	主たる共同研究者	ムーンショット目標6のPM

PM: プログラムマネジャー、PD: プログラムディレクター

CREST「量子技術」と他の大型PJ(JST関連)



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

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、原著論文（国際）：1033報（Nature系：70報、Science系：12報、PRL・PRX系：66報）への論文掲載、特許出願件数：54件（国際出願：13件）、招待講演件数：1144件（国際会議への招待講演：654件）であった。
3. 研究者の育成では、教授に昇任が14名（女性2名）、准教授（特任等を含む）への昇任が12名、講師・助教への昇進18名、学生から助教・研究員への昇進が6名（女性1名）であり、その他、公的研究機関や企業において多くの昇任があった。
4. 研究参画者の主だった受賞は全部で141件（研究代表者：16件、主たる共同研究者：22件、研究者：67件、学生：36件）であり、研究代表者や主たる共同研究者の国際的にも非常に栄誉な賞だけでなく、次世代を担う中堅・若手研究者の大きな飛躍、さらに若手研究者・学生の育成が十分になされた。
5. CREST研究成果（知財）を反映した国内初のハード系ベンチャーが設立（1社）された。

4. 総合所見（中間評価へのコメントと対応）

①「量子コンピューティング」をめぐっては一部の誇張された報道等から社会的に過剰な期待が先行する量子技術ハイプの様相も散見されるため、今後、研究成果やその意義について科学的に正確な情報発信を行うことを期待する。

⇒ 領域会議とは別に成果報告会として公開シンポジウムを3回開催した。

②女性研究者や産業界からの応募が少なかったので、ダイバーシティの観点から次世代の女性研究者の育成や産業界との連携を期待する。

③量子技術開発に関する成果の記述では、数値的な到達点とともにその到達点が、想定される応用や社会実装に照らしてどのような意義を有するかも併せて説明されることを心掛けていただきたい。

⇒ 引き続き女性研究者（学生）の育成に努めた。

⇒ CREST研究成果を反映した国内初のベンチャーが1社、研究代表者や主たる共同研究者の関与したベンチャーが2社設立され、産業界との連携を深めた。

⇒ CREST終了者がムーンショットのPM(6名)採択されており、本研究領域での成果が今後の社会実装に展開され、将来の社会的・経済的な発展に繋がることを期待する。

4. 総合所見（今後に向けて）

本研究領域が発足した時には予想が困難であったが、領域発足後、IBMが量子コンピュータを商用化し、Googleが量子超越性を示すと、国内外で量子コンピュータを中心とした量子技術の研究開発競争が急激に激化した。国内では量子技術イノベーション戦略の策定、Q-LEAP、ムーンショット、イノベーション拠点の形成、戦略的イノベーション創造戦略など、次々と新たな施策が展開された。この結果、中間評価時以降においても、量子技術関連分野への政府予算は年々増大し、補正予算等を含めると2023年度には約800億円が投入された。

このような状況下において、あらためて中長期的な視座から量子科学のフロンティア開拓を先導し、新しい産業や技術基盤を創出するための核となる量子技術を長期的に創成した本研究領域の存在意義は、タイムリーで、極めて重要であったと考える。

本研究領域の発足後に巨額な資金が量子技術分野に投入され、基礎から社会実装まで多くのプロジェクトが発足した。さらに、学会での量子関連の研究会、新産業創出に向けた産業界でのコンソーシアムなどが数多く設立された。本研究領域では、多様で横断的に研究課題が配置されていることから、今後、本研究領域で育った研究者が次のプロジェクトでも活躍し、本研究領域で得られた成果や知見が将来の社会的・経済的な発展に繋がることを期待する。

ご清聴ありがとうございました。