



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

2023年度版

誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・

ソフトウェアの研究開発

小芦 雅斗

東京大学 大学院工学系研究科

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

量子情報、アーキテクチャおよび物理系の研究者を結集し、量子ビットの設計、誤り耐性方式の実装、効率的に計算を実行するためのコンパイラや言語までを包含した協調設計モデルを構築する。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

クロスレイヤー協調設計モデルの構築については、前年度にその雛形となるミニマルモデルとして、超伝導量子コンピュータを構成する多層のレイヤー全てを包含、連結したソフトウェア群を構築したが、今年度は、そこで顕わになった設計上の困難の解決を目指し、通常の計算機における構造を踏襲し必要な量子ビットを削減する方法の提案や、量子計算でボトルネックとなる操作の高速化を行った。また、ミニマルモデルの超伝導以外のハードウェアへの横展開を目指し、モデル構築を担当する項目1、個別物理系を担当する項目2が連携し、プログラムの各ハードウェアプロジェクトからも協力を得て、イオン系、量子ドット系、中性原子系、光系の課題抽出と解決に向けた取り組みを順次開始した。開発を支援するツールとしては、物理系のシミュレータ QuTiP の拡充も順調に進んでおり、GPUを用いた高速化への対応などを進めた。

量子誤り訂正の手法については、現在主流の表面符号とは異なる新たな符号に基づく全く別の可能性の開拓として、復号法の構築によるカラー符号の閾値改善や、非クリフォード操作として T ゲートではなく CCZ ゲートを実装可能なアーキテクチャの性能検討を進めた。また、広範囲の符号に適用可能な汎用的な複号法を構築し、シミュレーテッドアニーリングや富士通デジタルアニーラなどを用いて性能比較を行った。さらに、現在の実機の規模ではあるが誤り耐性のない NISQ 量子計算と、完全な誤り耐性を備えるが大規模なハードウェアを必要とする既定路線の FTQC の開発ギャップを埋めるものとして、その中間の規模で実現できる新概念の量子計算アーキテクチャの提案を行なった。

分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの可能性の開拓については、物理的な制約の下で誤りに耐性のある通信をする際の帯域の見積もり、ノード間に量子もつれを最小コストで供給する方式の提案、通信量を抑えて量子プログラムを複数のノードに分割する手法の提案、通信帯域がひっ迫するノード間の多重化手法の提案などを行った。また、量子 RAM (QRAM) が接続されたアーキテクチャの設計と性能評価を行った。

その他、萌芽的研究として、大規模な量子コンピュータを用いるセキュリティ関連アプリケーションの新規開拓、高速化やクロストークの抑制を目指した量子ビット制御手法の開拓を進めた、また、数理的な研究として、量子誤り訂正を念頭においた、対称性に基づく一般的な量子操作限界の導出の研究や、回路の最適化問題と代数構造との一般的な関係性の理解を目指す研究を進めた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

適切な研究開発体制の検討と構築、運営会議の開催、海外からの有力研究者の招聘、企業連携体制の整理、プロジェクト活動の広報、データマネジメントなど、必要なプロジェクトマネジメントを適切に遂行している。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

研究開発課題1-1:クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

当該年度実施内容:

令和5年度は、計画していた5つの課題について、以下のように取り組んだ。課題1:ミニマルモデルの他ハードウェアへの拡張、については、超伝導量子ビットで構築したミニマルモデルを他のデバイスに横展開した。また、各デバイスの実験PJや本PJの項目2の研究者と連携し、明らかとなった課題の解決に向けた取り組みを順次開始した。課題2:ミニマルモデルの実現においてあらわになった設計上の困難の解決、については、通常の計算機における構造を踏襲し必要な量子ビットを削減する方法の提案や、量子計算でボトルネックとなる操作の高速化を行った。課題3:アーキテクチャおよび回路設計の分野との連携の深化、については、量子計算を制御する回路の構築に必要な電力の見積もりを行い、必要となる回路の電力効率を定量的に明らかにしたほか、関連PJや項目3との連携を通し、アーキテクチャ改善のための提案を行った。課題4:システムの分散に対する対応、については、物理的な制約の下で誤りに耐性のある通信をする際の帯域の見積もりを行った。これに基づき、東京大学や項目4と連携し、必要な通信量を抑えつつプログラムを分割する手法や、ノードを多重化し通信がボトルネックとなる状況を回避する手法を提案した。課題5:ミニマルモデルに関連したソフトウェアの広い活用の促進、については、これまでに得られた成果を第三者でも利用可能にするためのソフトウェアのリファクタリングを行った。また、ドキュメントの整備を行った。

課題推進者: 徳永裕己(日本電信電話株式会社)

研究開発課題1-2:クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

当該年度実施内容:

令和5年度は、NTTと連携し、以下の3つの課題に取り組んだ。課題3:アーキテクチャおよび回路設計の分野との連携の深化、については、量子計算を制御する回路の構築に必要な電力の見積もりを行い、必要となる回路の電力効率を定量的に明らかにした。課題4:システムの分散に対する対応、については、項目4の研究者とも連携し、物理的な制約の下で誤りに耐性のある通信をする際の帯域の見積もりを行った。課題5:ミニマルモデルに関連したソフトウェアの広い活用の促進、については、効率的に量子計算のプログラム

を設計する手法について検討を行った。

課題推進者： 小芦雅斗(東京大学)

(2) 研究開発項目2:誤り耐性型量子コンピュータのハードウェア制御法の開発とその性能解析

研究開発課題1-1:量子ビットをベースとする要素技術の研究開発

当該年度実施内容:

半導体スピン量子ビット特有の課題抽出のため、シリコン/ゲルマニウム材料の谷自由度の影響や正孔スピンの利用で重要となるスピン・軌道相互作用およびg因子の解析を行なった。特に波数の3次に依存するスピン・軌道相互作用によるコヒーレント制御の特性とその忠実度について解析した。また量子状態読み出しに伴う熱の流入や、量子系と熱浴との間の熱流に関する原理的な限界について明らかにした。誤り耐性のあるミニマルなモデル構築の検討を項目1との連携のもとで進め、それに必要となる量子情報を転送する機構について検討を行なった。

課題推進者： 都倉康弘(筑波大学)

研究開発課題1-2:量子ビットをベースとする要素技術の研究開発

当該年度実施内容:

超伝導量子ビットの長寿命化および制御・測定時間短縮化については、高強度マイクロ波を用いた分散読み出しの数値解析を効率的に行う手法を開発し、論文として出版した(Phys. Rev. A 108, 033722)。提案手法では共振器に生じるコヒーレント状態の振幅をユニタリ変換により減らすことで解析に必要な状態の数を削減し、その分数値解析を効率的に行うことが可能となる。これに加え、量子ビット-共振機結合系の固有状態を、量子ビット状態と光子数によってラベル付けする方法の改善も行い発表した(arXiv:2401.16666)。

また、分散型の超伝導量子計算を見据え、マイクロ波光子を介した超伝導量子ビットの量子的連結を目指している。本年度は、非相反素子としての SIS ミキサの理論研究に着手し、動作原理を古典的な波動描像から理解することができた。

課題推進者： 越野和樹(東京医科歯科大学)

研究開発課題2:調和振動子モードをベースとする要素技術の研究開発

当該年度実施内容:

光による量子計算を実現するうえで、誤り耐性閾値、光子ロス耐性、リソースコストの3指標すべてに対して既存手法より優位な性能を持つ、ハイブリッドコードの量子計算方式を考案した。そしてGKP code 状態の実装手法として、光子数識別器を非線形性の獲得だけ

でなく光子ロスの検出に利用することで、ロス耐性を備えた実装手法を考案した。また、誤り耐性のあるミニマルなモデル構築の検討を項目1との連携のもとで進めた。

課題推進者： 小芦雅斗(東京大学)

研究開発課題3: デバイス研究推進のためのソフトウェア技術開発

当該年度実施内容:

QuTiP の開発として、本年度はまず ODE(常微分方程式)ソルバーの改善を行った。既存の解法に加えて、時間当たりのエラー蓄積に関してより効率の良い独自の解法を組み込んだ。また、前年度に導入した新しい data layer object の特長を生かし、GPU 計算に適した JAX data layer をサポートすることで、大規模な系のダイナミクスを 100 倍の性能で解くことができた。また、新しいマスター方程式ソルバーを追加し、非マルコフの場合のモンテカルロ計算を可能にした。さらに、量子制御ライブラリの統一的な新しいフレームワークを開発した。

課題推進者： Franco Nori(理化学研究所)

(3) 研究開発項目3: 誤り耐性型量子コンピュータの性能改善のための量子誤り訂正法の開発とその性能解析

研究開発課題1: 新たな量子誤り訂正方式の開発

当該年度実施内容:

カラー符号の閾値改善のために、フラッグ量子ビットを用いたシンドローム測定方法および、フラッグの情報を用いて重みづけを行う復号を構築した。また、復号方法全般に関しては、イジング模型の最適化問題に埋め込むことによって、符号に依存せず利用できる汎用的な復号方法を構築し、シミュレーテッドアニーリングや富士通デジタルアニーラなどを用いて性能比較を行った。また、NISQ と FTQC のギャップを埋めるための新概念量子計算アーキテクチャの提案を行なった。

課題推進者： 藤井啓祐(大阪大学)

研究開発課題2: 誤り耐性量子計算に必要なミドルウェアの設計

当該年度実施内容:

フォールトトレラント量子コンピュータのための誤り訂正符号の実装について、論理ゲートの実装方法を検討した結果、In-place CCZ ゲートを実装可能なアーキテクチャで Shor のアルゴリズムのサブルーチンを特定した。また、これまでに求めた一次元の量子計算機モデルを用いた量子回路の圧縮方法について適応範囲の拡張を議論した結果、一般的な二次元的配列などへの拡張においては、拡張によって表示の性質が大きく異なってくるた

め、一般化することは困難であることがわかった。一方で、測定型量子計算における回路表現であるグラフ状態の最適化において、新たに乱択性を用いたヒューリスティック手法を応用し、計算量を抑えつつより低コストに実装できる回路を求められることを示し、手法の有用性とその範囲を数値的に示した。

課題推進者： 根本香絵(沖縄科学技術大学院大学学園)

(4) 研究開発項目4:分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発
研究開発課題1:分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

当該年度実施内容:

表面符号に基づく分散型誤り耐性量子コンピュータの構築には、高忠実度の Bell ペアを、離れた量子ビットに対し、できる限り高いクロックレートで供給し、その Bell ペアに基づく分散型 CNOT ゲートを、離れたチップ間で実装することが基本であると考えられる。今年度は、量子計算から要求される分散型 CNOT ゲートの忠実度と実行可能レートを満たすために必要とされる量子もつれ生成の多重化数の推定を試みた。また、量子ビットを結びつける量子ネットワークのトポロジーやサイズによらず、ネットワーク上の2ノード間に定数エラーの量子もつれを最小コストで供給する方式についても提案を行った。

課題推進者： 東浩司(日本電信電話株式会社)

研究開発課題2:異種量子システムエリアネットワークの分散型誤り訂正の研究開発

当該年度実施内容:

令和5年度は、特に量子 RAM(QRAM) デバイスを対象とした高度なフォールトトレラント技術の構築により、量子マルチコンピュータアーキテクチャの設計を進めた。大規模な量子コンピュータが大きな問題を解くためには、古典的なデータセットをプログラムに組み込む仕組みが必要となる。これは、順次実行される多数の量子ゲートを介して完全にハードウェアで実行することも、古典的なデータを重ね合わせて読み取ることができるソフトウェアとハードウェアとのハイブリッドで実行することもできるが、後者を想定し、QRAM デバイスが量子相互接続(システム エリア ネットワーク)を介して量子コンピュータの他の部分に接続されるアーキテクチャの設計を行った。

課題推進者： Rodney Van Meter(慶応大学)

研究開発課題3:分散型量子コンピュータの物理アーキテクチャの研究開発

当該年度実施内容:

分散型量子コンピュータの各ノードに配置される小規模量子コンピュータの効率的な物理アーキテクチャの開発に向けて、3 つ以上の複数の小規模量子コンピュータノードを接

続した分散量子コンピュータネットワークにおいて光の量子もつれを効率的に生成・制御する新しいアーキテクチャと方式を設計し、その有用性を数値解析に示した。さらに、本方式を分散型の表面符号のアーキテクチャに適用する手法を提案した。

課題推進者： 武岡正裕(慶応大学)

(5) 研究開発項目5:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発
研究開発課題1-1:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

当該年度実施内容:

誤り訂正付き量子計算機が実現した際の重要なアプリケーションに量子暗号プロトコルがある。しかしながらこれまでの構成では耐量子暗号の仮定であるLWEをベースにするものがほとんどであった。LWE以外の耐量子仮定に基づいてプロトコルを構成することは安全性向上の理由から重要である。今年度は、一方向性関数より弱い仮定であるone-way puzzleから非効率なproofs of quantumnessを構成することに成功した。非効率なproofs of quantumnessは、通信中は古典多項式時間、通信後は必ずしも多項式時間でなくてもよいような検証者によるプロトコルであり、サンプリングや検索といった、これまで知られている量子の優位性を含む最も一般的な概念で、量子性の検証に有用である。

課題推進者： 森前智行(京都大学)

研究開発課題1-3:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

当該年度実施内容:

量子プロセス同士の相互の変換レート的一般理論の構築を目的に研究を開始し、関連する研究トピックについて成果を得た。Resource theory of Asymmetryの枠組みにおける純粋状態 iid 状態変換について、これまで解析が進んでいなかったU(1)群以外の群についての研究を大幅にすすめた。具体的には、任意有限群についての変換の一般論を完成させた。これは非可換群を含む完全に一般的な結果である。さらに任意コンパクトLie群に対しても、U(1)群の場合に変換レートを規定するリソース指標であるFisher情報量の一般化であるFisher情報行列によるレートの規定をconjectureとして提案し、converse partについては証明をした。このようなU(1)群にとどまらないRTAの拡張は、特にbosonic codeへのRTAの応用を考えると、非常に重要になることが予想される。

課題推進者： 田島裕康(電気通信大学)

研究開発課題1-4:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

当該年度実施内容:

量子状態を正確に制御することは量子コンピュータなどの量子テクノロジーの発展にお

いて不可欠である。また量子コンピュータにおいて、量子ビット数の増加に伴って生じる量子ビットの共振周波数の過密化 (Level crowding) は量子コンピュータのスケールアップの観点から問題となっている。本研究開発課題は「Level crowding 問題の解決に向けた研究」と「高精度量子ビット制御」の2つに大別される。当該年度、前者においてエネルギー準位間の不都合な相互作用を出来るだけ抑制しながら量子ビットの共振周波数を変える方法を量子系の時間発展速度を制御する手法である Inter-trajectory travel (ITT) を使って研究し ITT の性能や適応範囲を明らかにした。後者においては速い2量子ビットゲートを実現する方法を研究した。

課題推進者： 増田俊平 (産業技術総合研究所)

研究開発課題1-5: 誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

当該年度実施内容：

位相的場の理論・結び目理論の立場から具体的な量子ゲートの構成に着手した。昨年度までの研究において ZX カリキュラスの公理を理論的に整理し、特に Frobenius-Hopf 代数という代数構造に注目するにいたった。本年度はそれらの抽象論を具体的な代数に適用することで、より具体的な量子ゲートを議論した。

課題推進者： 山崎雅人 (東京大学)

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

- ・東京大学工学系研究科に PM 支援体制チームを構築している。事務系統は研究科の支援を受けている。
- ・研究開発プロジェクトの推進に関する重要事項について必要な連絡及び調整を行うため、運営会議を設置している。運営会議の構成は、PMを議長とし、参加機関等(代表機関、研究開発機関および JST)を参加者とする。3月に運営会議を開催し、研究開発プロジェクトの推進にて必要な連絡や課題推進者/研究開発機関追加の承認などを行った。企業を含む研究協力体制や知財の在り方について、関係する課題推進者、JST とオンラインミーティングにより検討した。
- ・課題推進者の研究の進捗状況の把握に努めた。

研究開発プロジェクトの展開

- ・項目1で、超伝導系を想定したミニマルモデルの雛形が計画からやや前倒しで完成したことを受け、その後の他の物理系への横展開を開始し、項目2、項目3との項目間連携を加速するとともに、プログラムのハードウェアプロジェクトとの連携を進めた。
- ・7月の Moonshot 国際シンポジウムに合わせて、この分野で高い業績を持つ米国デューク大学の Kenneth R. Borwn 教授を招聘した。課題推進者との意見交換を実施し、多数の貴

重なる助言を得た。

- 量子誤り訂正法の開発を行う項目3について、プロジェクト開始当初より、高い実績を持つ研究者に参画を打診していたが、所属する企業を本プロジェクトの参画機関とすることが難しく、これまで実現できなかった。今年度から、当該研究者が社外の研究機関の兼務となったことから、来年度より課題推進者として参画できる運びとなった。

(2) 研究成果の展開

- 知的財産権の運用について協議する場として、必要があれば、知財運用会議を設置することとしていた。知財運用会議の構成は、PM を議長とし、協議の対象となる知的財産権に直接的または間接的に利害関係を有する研究開発機関等の一部または全部、および JST を参加者とする。今年度は、知財運用会議を開催する案件は生じなかった。
- 本プロジェクトの参画機関でない企業との連携の話は複数挙がっており、ケースに応じて最善の形態を探っている。
- 横展開として、山本剛 PJ に参画する4機関(企業2、大学2)と、本プロジェクトの項目1 (NTT、東大)の間で、超伝導量子計算機の量子ビット以外の部分に関する包括的な低温アーキテクチャに関する研究の連携体制を昨年から進めているが、企業と一部大学における知財の扱いについて今年度に持ち越しとなり、引き続き調整を行った。
- 最新の技術動向の把握に務めた。

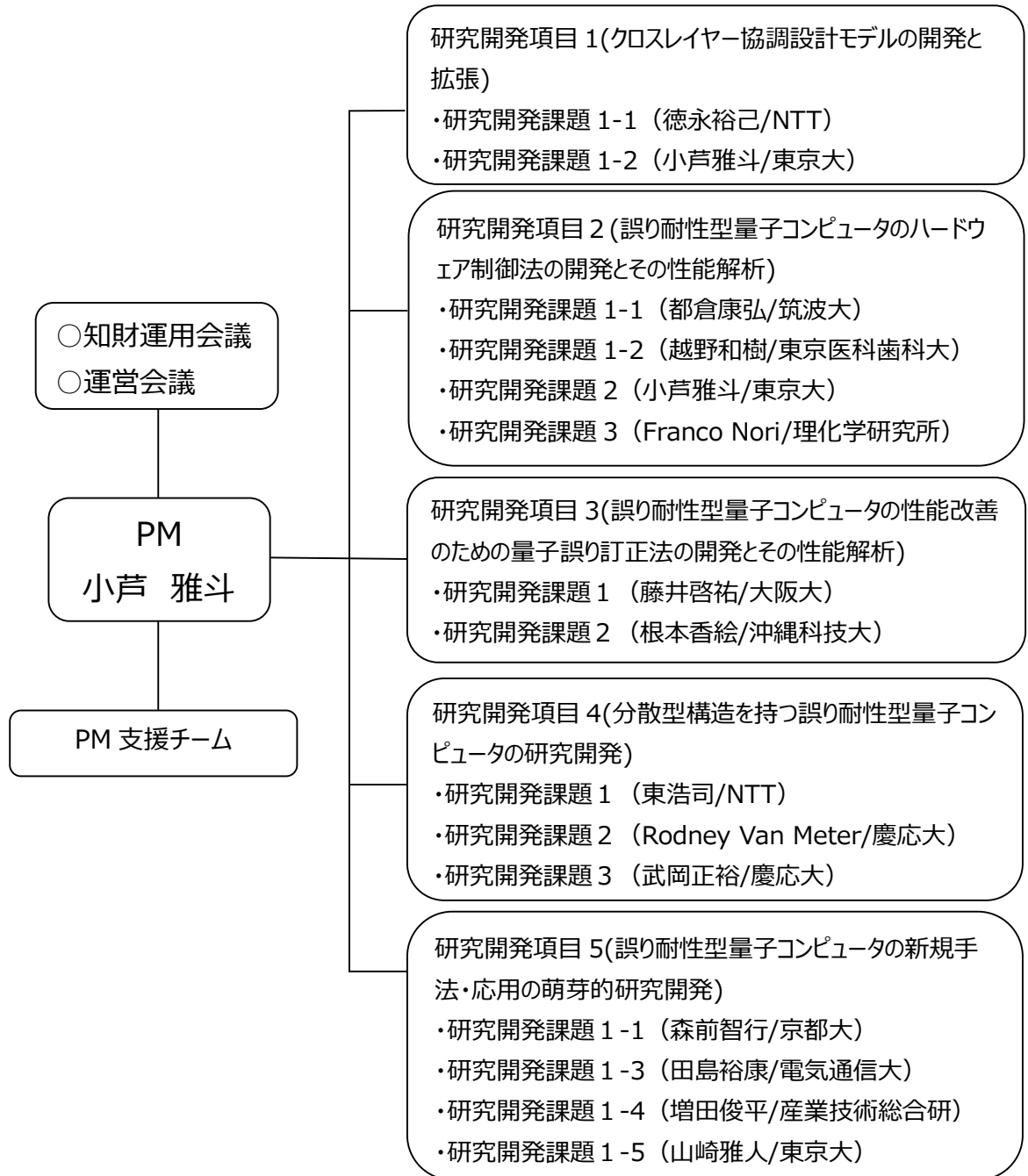
(3) 広報、アウトリーチ

- 山本俊 PJ とともに、量子技術に関する国際シンポジウム QI2023 の Quantum Computing Track に協力し、招待講演者の招聘などを行った。
- Nature 誌にプログラムの特集記事を掲載するにあたり、小林 PJ とともに Partner Contents の記事作成を行った。
- 参画機関の企業では、1か月の実習を行うインターンシップのプログラムを利用し、誤り耐性量子コンピュータ関連のテーマとして広く学生を募集し、多数の学生が参加した。この分野への若手の参入の契機になればと考えている。

(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に基づき、適切なデータ管理に務めた。報告すべき事項を課題推進者に周知し、年次計画開始時のプランに基づき、申告された案件の状況把握を行った。

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 構成機関と実施内容

議長:PM、参加者: JST および協議の対象となる知的財産権に直接的または間接的に利害関係を有する研究開発機関等の一部または全部。当該年度は該当案件なし。

運営会議 実施内容

3月に開催 新たな課題推進者/研究開発機関について承認した。

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	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	19	39	58
口頭発表	32	33	65
ポスター発表	11	25	36
合計	62	97	159

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	62	62
(うち、査読有)	0	62	62

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	7	2	9
書籍	0	0	0
その他	0	1	1
合計	7	3	10

受賞件数		
国内	国際	総数
3	3	6

プレスリリース件数
6

報道件数
8

ワークショップ等、アウトリーチ件数
3