



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

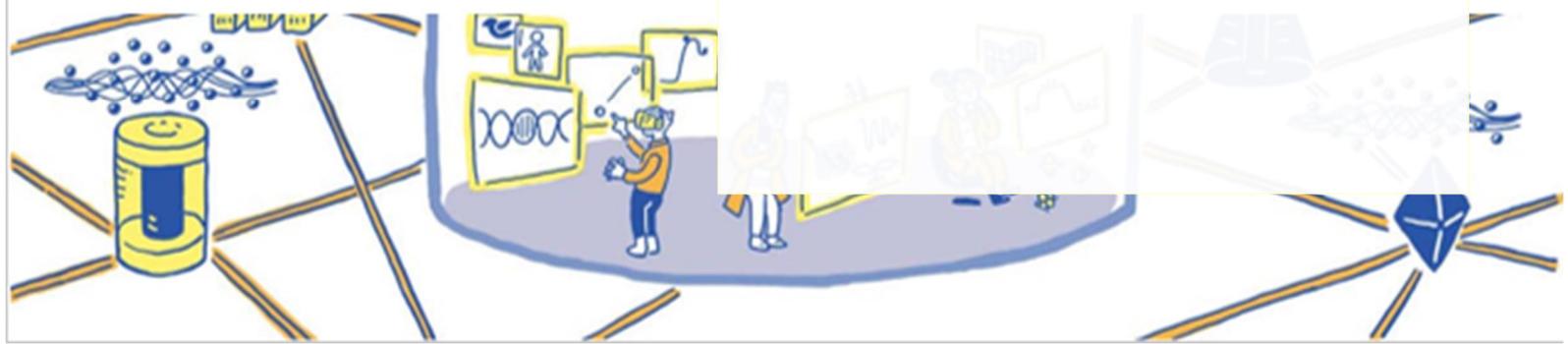
ネットワーク型量子コンピュータによる

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

 **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

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小中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。現在の技術から小中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。また、台頭する量子インターネットに向けた要素技術開発も実施する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

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、当初定めた方針に従って、研究開発を推進した。当初予見しなかった成果も見られるなど、順調に研究が進展した。研究開発項目ごとの当該年度の実施状況を下記にまとめる。

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・光多重量子ネットワーク技術

本研究開発課題では、原子と光子の量子もつれを利用した原子量子コンピュータのネットワーク化に関する研究開発を行っている。当該年度は原子アレイと光のエンタングルメント生成実験を行い、また一方で、原子アレイ上の2量子ビットゲートのための実験系を構築した。光子のルーティングに関しては、単一光子のルーティング動作の実証、さらには QFC に基づく単一光子のルーティング実証を行った。

● 研究開発課題 2: 多重化光子検出器開発

本研究開発課題では、多重化された超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の研究開発を行っている。当該年度は、昨年度に実施した SNSPD 内製化のための製造プロセスの条件出しに基づいて SNSPD を作製し、その性能を評価した。並行して、30 チャンネル規模の SNSPD を搭載可能な冷凍システムを作製し、これに内製 SNSPD を搭載した 30 チャンネル規模の SNSPD システムを開発した。

● 研究開発課題 3: 高性能光子検出技術開発

本研究開発課題では、SNSPD の高性能化および集積化に関する研究開発を行っている。当該年度は検出効率を向上するための要素を改善することによって SNSPD の高性能化を図り、検出効率 90%、暗係数率 1 カウント/秒以下を達成した。また、検出器システムのチャンネル数の大規模化に向けて、50 チャンネルの SNSPD が搭載可能となる冷凍機システムを開発した。

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

本研究開発課題では、ナノファイバー共振器 QED 技術に基づく光子量子ビットのネットワーク化に関する研究開発を行っている。当該年度では1次元光子量子ビット列生成の原理検証に取り組んだ。また、量子インターネットの基本ノードの実証に向けて、1対の原子間のエンタングルメント生成技術の開発を進めた。

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

本研究開発課題では、半導体量子ドット中の電子や正孔の持つスピンを量子ビットとする半導体量子コンピュータのネットワーク化に関する研究開発を行っている。当該年度は、光子とシリコン量子ビットを接続するための量子インターフェースとして、超伝導マイクロ波共振器の開発を行い、高インピーダンス NbTiN 超伝導共振器を設計・作製し、評価した。また、これと並行して、遠隔半導体量子ビット間を光接続するための基盤技術の開発を推進した。さらに、樽茶プロジェクトの藤田 PI のグループと連携して、1次元量子ドットアレイを用いたスピン量子ビット間の結合技術の開発に取り組んだ。

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

本研究開発課題では、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している。昨年度まで、マイクロ波共振器を組み込んだ複合共振器デバイスの設計および試作、評価を行ってきた。当該年度においては、まず誘電体を用いたマイクロ波共振器の極低温動作実証を行い、マイクロ波-光複合共振器デバイスの実証も行った。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

代表機関である大阪大学 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プロジェクトマネジメントを遂行した。課題推進者会議や各課題推進者との頻繁な情報交換、意見交換を通して、研究開発状況の把握に努め、円滑なプロジェクト運営を実施した。また、本プロジェクト内での連携、さらには他プロジェクトとの連携を積極的に推進した。国際連携強化に向けた取り組みとしては、プロジェクトメンバーをクイーンズランド大学、ウィーン大学、ミュンヘン大学、フランス・サクレ研究所に短期派遣し、研究協力体制を構築した。また、当該年度の優れた成果に対して 3 件のプレスリリースを行い(内 2 件は他プロジェクトとの共同プレス)、さらにプロジェクトホームページの公開、Nature 誌の Focal Point でのプロジェクト紹介記事掲載を通して、本プロジェクトに関する最新情報を国内外に発信した。アウトリーチ活動にも精力的に取り組み、G7科学技術大臣会合での SNSPD システムの実機展示、量子情報工学に関する国際ワークショップの開催などを実施した。

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: 本研究開発課題では、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、小中規模の原子アレイ量子コンピュータをネットワーク接続し、大規模化する手法を開発する。R4 年度では5年目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向けて、原子アレイからの単一光子生成、単一光子検出システムの検証、原子アレイ上の量子ビット操作のための装置の立ち上げ、さらに古典光でのルーティング動作の実証を行った。当該年度は原子アレイと光のエンタングルメント生成実験を行い、また一方で、原子アレイ上の2量子ビットゲートのための実験系を構築した。光子のルーティングに関しては、単一光子のルーティング動作の実証、さらにはQFCに基づく単一光子のルーティング実証を行った。

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: 量子コンピュータを接続して大規模なネットワーク型量子コンピュータを実現するためには、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の多重化が重要となる。NISQ 規模で想定される約 100 ノードに対応することを目指して、本研究開発課題では多重化された SNSPD システムの開発を進めている。開発した SNSPD システムは、山本俊プロジェクト内の各研究開発項目で利用するとともに、イオントラップの高橋プロジェクトとも連携して利用可能にする。当該年度は、昨年度に実施した SNSPD 内製化のための製造プロセスの条件出しに基づいて SNSPD を作製し、その性能評価を行った。並行して、30チャンネル規模の SNSPD を搭載可能な冷凍システムを作製し、これに内製 SNSPD を搭載した 30チャンネル規模の SNSPD システムを開発した。提供に向けては、山本俊 PI の研究に適した設置場所などを調整中であり、準備が整い次第提供する予定である。

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: 検出効率を向上するための要素を改善することによって SNSPD の高性能化を図り、当該年度のマイルストーンである検出効率 90%、暗係数率 1 カウント/秒以下を達成した。また、検出器システムのチャンネル数の大規模化に向けて、50チャンネルの SNSPD が搭載可能となる冷凍機システムの開発を実施した。

課題推進者：三木 茂人(情報通信研究開発機構)

(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 R5 年度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取り組んだ。また、量子インターネットの基本ノードの実証に向けて、1対の原子間のエンタングルメント生成技術の開発を進めた。

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、当該年度は当初掲げた結合法の検証を進めるため、光子との量子インターフェース開発と連動して超伝導共振器による結合の研究を優先して推進した。1次元量子ドットアレイによる結合は、樽茶 PM 藤田 PI グループと連携して開発を進めた。光子とシリコン量子ビットを接続する光子との量子インターフェース開発では、上記と連動して強結合化を目指し、多重量子ドットと結合する超伝導マイクロ波共振器の開発を行い、高インピーダンスNbTiN超伝導共振器を設計・作製し、評価した。遠隔半導体量子ビット間の光接続基盤技術開発では、Ge 正孔量子ビットの開発と並行して、自発的パラメトリック下方変換によるもつれ光子源の構築と冷凍機までの伝送、そして極低温光学系として2台の希釈冷凍機へのピエゾステージ導入を推進した。

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。昨年度まで、マイクロ波共振器を組み込んだ複合共振器デバイスの設計および試作、評価を行ってきた。当該年度においては、まず誘電体を用いたマイクロ波共振器の極低温動作実証を行い、マイクロ波-光複合共振器デバ

イスの実証も行った。

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(PM 補佐、事務補佐員3名)と共にプロジェクトマネジメントを推進した。
- 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。当該年度は該当案件なし。
- PM 主催で課題推進者会議を半年に1回のペースで開催した。各課題推進者から進捗状況についての詳細な報告を受け、さらにプロジェクト推進に向けての意見交換を行った。また、PM から各重要事項の連絡や報告を行い、円滑なプロジェクト運営に努めた。
- 上記の課題推進者会議とは別に、各課題推進者と頻繁に情報交換を行い、研究開発状況の詳細な把握に努めた。
- 令和5年5月31日に大阪大学産業科学研究所の大岩顕 PI の研究室へのサイトビジットを実施し、研究開発状況ならびに昨年度導入された大型装置(電子線描画装置システム)を視察した。

研究開発プロジェクトの展開

- 光子検出器の研究開発において、浜松ホトニクス株式会社 下井英樹 PI のグループによる SNSPD システムの内製化が進展した。これにはプロジェクト内連携として、三木茂人 PI のグループによるデバイス作製に関する技術協力、ならびに山本俊 PI のグループによる SNSPD 性能評価結果のフィードバックがうまく機能している。この連携体制を今後も維持しながら、光子検出器の研究開発を進めていく。
- プロジェクト間連携の一環として、理論の小芦プロジェクトとは目標6プログラムの開始当初より緊密な協力関係を維持している。また、各種量子ビットのネットワーク化に向けて、イオントラップの高橋プロジェクト、シリコン量子コンピュータの水野プロジェクト、樽茶プロジェクト、超伝導量子コンピュータの山本剛プロジェクト、光量子コンピュータの古澤プロジェクトとの研究連携を進めている。さらに、その他のプロジェクトとの連携可能性も模索している。
- 国際連携強化の取り組みとして、山本俊 PI のグループから研究参加者 3 名をそれぞれ、令和5年8月31日よりクイーンズランド大学、令和5年9月9日よりウィーン大学、令和5年10月3日よりミュンヘン大学に短期派遣し、本プロジェクトで研究開発を進めているネットワーク型量子コンピュータに関しての研究協力体制を構築した。一方で、久保結丸 PI と久保グループの研究参加者 2 名を令和5年11月30日よりフランスのサクレイ研究所(CEA-Saclay)に短期派遣し、共同研究に向けた準備を開始した。

(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

用会議を設置し、知財戦略の体制を整えた。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。ただし、当該年度は知財運用会議で協議すべき案件は生じなかった。

- 量子コンピュータのプラットフォームとなる物理系(超伝導、光、原子・イオン、半導体)での最新の技術動向の把握に努め、有益な情報は各課題推進者と共有した。

(3) 広報、アウトリーチ

広報活動の一環として、当該年度は下記のプレスリリースを実施した。

- プレスリリース (3 件)

- ① 【タイトル】 高性能超伝導ワイドストリップ光子検出器の開発に世界初成功 ～従来のナノストリップ型検出器の 200 倍以上の線幅で高性能を実現～

【発表日】 令和 5 年 10 月 30 日

【発表者】 三木 茂人 PI

【内容】 本研究開発プロジェクトのもと、SNSPD において、ストリップ幅を広くしても高効率に光子検出が可能となる新奇構造を創案し、ナノストリップ型に比べて 200 倍以上ストリップ幅が広い“超伝導ワイドストリップ光子検出器”の開発に世界で初めて成功した。

- ② 【タイトル】 伝搬する光の論理量子ビットの生成 ―大規模誤り耐性型量子計算への第一歩―

【発表日】 令和 6 年 1 月 19 日

【発表者】 古澤 明 PM (古澤プロジェクト)、三木 茂人 PI

【内容】 古澤プロジェクトと山本俊プロジェクトとの連携により、誤り耐性型量子コンピュータに必要な論理量子ビットを世界で初めて 1 つの光パルスを用いて生成させることに成功した。生成した量子ビットの性能をさらに向上させ、既存の大規模光量子プロセッサと組み合わせることで、大規模誤り耐性型高速光量子コンピュータの実現が期待される。

- ③ 【タイトル】 \誤り耐性量子コンピュータ開発を加速！ / 安定量子演算に対するショートカット法を実現 量子訂正技術などの複合量子回路に不可欠な要素に貢献

【発表日】 令和 6 年 2 月 20 日

【発表者】 藤田 高史 PI (樽茶プロジェクト)、大岩 顕 PI

【内容】 樽茶プロジェクトと山本俊プロジェクトとの連携により、半導体中の単一電子スピンに世界で初めてショートカット法を適用し、量子ビット情報を確実に操作する安定量子演算を高速化する手法を開発した。この技術により、誤り耐性付き半導体量子コンピュータの実現が大きく進展すると期待される。

その他の広報活動として、

- プロジェクトホームページの公開
(日本版 URL: <https://qcnqc.jp> 英語版 URL: <https://qcnqc.jp/en/>)

ホームページでは、プロジェクト概要、さらには各研究開発課題をコンパクトに分かりやすく紹介している。プロジェクトに関するプレスリリースやニュースなどを、このホームページを通じて、タイムリーに情報発信した。また、論文や学会発表などの研究成果は定期的に更新し、このホームページから最新の成果情報を入手できるようにした。

- Nature 誌の Focal Point でのプロジェクト紹介記事の掲載
ムーンショット目標 6 プログラムの紹介記事掲載に合わせて、小坂 英男 PM、永山 翔太 PM と共同で、量子ネットワークを担当しているそれぞれのプロジェクトの紹介記事を Nature 誌の Focal Point に掲載した。

紹介記事タイトル: Ushering in a new era in computing

URL: <https://www.nature.com/articles/d42473-023-00441-w>

主なアウトリーチ活動として、当該年度はプロジェクト成果物の展示、量子コンピュータに関連した国際ワークショップ、国際シンポジウムの企画運営、さらには量子技術に関するスクールの企画運営を実施した。

- プロジェクト成果物の展示 (2 件)
 - ① 【展示先】 G7 科学技術大臣会合
【展示日】 令和5年5月12日(金)
【場所】 宮城県仙台市秋保温泉 ホテル佐勘
【展示物】 32 チャンネル SNSPD システム 1台、SNSPD パッケージ、
展示パネル
【説明者】 山本 俊 PM、三木 茂人 PI、小玉 剛史(下井グループ研究参加者、
浜松ホトニクス株式会社)
 - ② 【展示先】 PHOTON FAIR 2023
【展示日】 令和5年 11 月16 日(木)~18 日(土)
【場所】 静岡県浜松市 アクティシティ浜松
【展示物】 32 チャンネル SNSPD システム 1台、SNSPD パッケージ、
展示パネル
【説明者】 下井 英樹 PI、小玉 剛史
- 国際ワークショップの開催
会議名: International Workshop on Quantum Information Engineering (QIE2023)
開催期間: 令和 5 年 10 月 11 日(水)~13 日(金)
開催場所: 沖縄科学技術大学院大学(OIST)
組織委員会 委員長: 大岩 颯 PI
会議概要: 量子情報工学の広範な分野のトップ研究者を招待し、ムーンショット目標 6 に参加する研究者を中心とした国内研究者との議論の場とともに、海外研究者との

連携を探る機会を提供する。

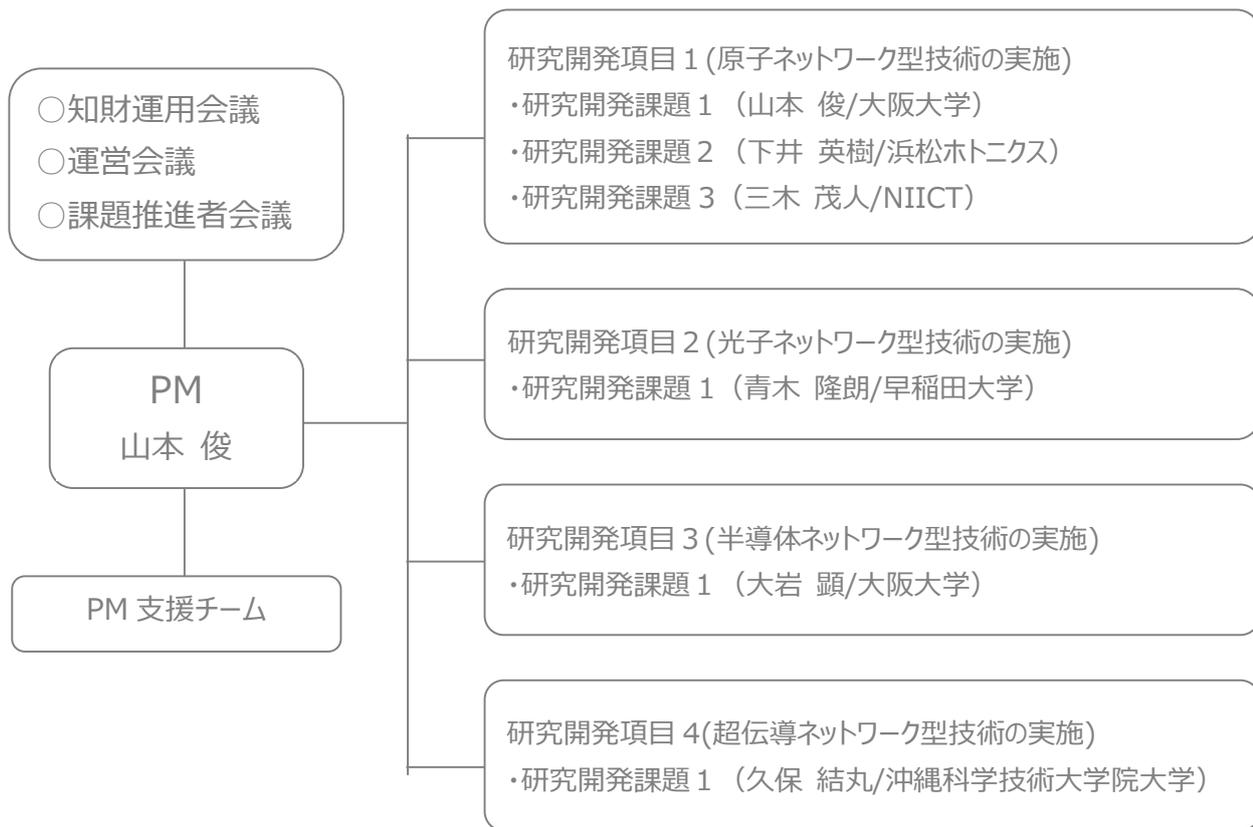
- 国際シンポジウムの企画運営
会議名： Quantum Innovation 2023(QI2023)
開催期間： 令和5年11月15日(水)～17日(金)
開催場所： 東京コンベンションホール
実施内容： ムーンショット目標6として、Quantum Computing Trackの企画運営を小芦プロジェクトと山本俊プロジェクトが共同で担当
- スクールの企画運営
名称： 2023年度 QIH-MS6 量子情報技術スプリングスクール
開催期間： 令和6年3月12日(火)～16日(土)
開催場所： 神奈川県三浦郡葉山町 湘南国際村センター
実施内容： ムーンショット目標6として、スクールの企画運営を山本俊PMが担当

これ以外にも、中学・高校への出張授業、大学イベントでのラボツアーや模擬実験、さらには一般社会人向けの講義などの様々なアウトリーチ活動を積極的に実施し、量子情報技術分野の普及に努めた。

(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、適切なデータ管理を実施した。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



課題推進者会議および運営会議

議長：山本俊 PM、 参加者：参画機関（課題推進者、JST 等）

実施内容：半年に1回のペースで課題推進者会議を開催し、進捗状況の報告や各種連絡、さらにプロジェクト推進に関して意見交換を行った。重要案件については、別途運営会議を開催し、決議を行う。

知財運用会議

議長：山本俊 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。

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	4	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	2	4	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	13	4	17
口頭発表	13	10	23
ポスター発表	12	16	28
合計	38	30	68

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	8	8
(うち、査読有)	0	8	8

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

受賞件数		
国内	国際	総数
1	0	1

プレスリリース件数
3

報道件数
22

ワークショップ等、アウトリーチ件数
17