

(4) 数物・情報領域

研究課題名	複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用
中心研究者名	合原 一幸
研究支援担当機関名	独立行政法人科学技術振興機構

1. 研究課題の概要

本研究課題は、現実の諸問題を数理的な解析対象とし、数理工学、カオス工学の観点から、様々な科学技術の問題を解くための数理モデル学の構築及び多分野を横断するその具体的な応用研究を同時に展開することによって、多様な複雑システムの理解、さらには予測、制御、最適化を目指すシステム科学技術の数理的基盤を構築することを目指している。

本研究課題は、[1] 複雑系数理モデル学の基礎研究、[2] 複雑系数理モデル学の工学応用研究及び[3] 基礎研究と応用研究の融合による複雑系数理モデル学の体系化の3つのサブテーマから構成されている。

[1] 最先端複雑系制御理論

- ① 複雑ネットワーク系の予測・制御のための低次元化理論
- ② 超ロバスト制御の基礎理論

[2] 複雑系数理モデル学の工学応用研究

- ① 複雑系情報処理システム
- ② β 写像に基づく新しいA/D (アナログーデジタル) D/A 変換回路
- ③ 複雑ネットワークの工学応用
- ④ 産業プロセスへの最先端数理モデル応用

[3] 基礎研究と応用研究の融合による複雑系数理モデル学の体系化

- ① 複雑ネットワーク理論
- ② 時系列解析理論
- ③ 脳や生命システムの数理モデリング
- ④ 疾病の数理モデル
- ⑤ 複雑系数理モデル学の体系化

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 当事業は、数理工学やカオス工学を基にして、複雑系数理モデル学の構築とその様々な分野横断的科学技術応用を目指しており、数理モデリングを現実の諸問題に適用する過程で体系化し、複雑システム科学の一般化された基盤を築くことが目的とされている。今回の自己評価資料においては、中間評価の際に議論があった前立腺癌のテララーメイド間欠的内分泌療法、90nm ノードの技術を用いた集積化 A/D 変換器のほかにも、余震解析や、喜連川プロジェクトとの連携によるビッグデータ解析などが紹介さ

れており、分野横断的科学技术応用、及び数理モデリングの現実問題への適用に関する進捗状況は良好であることが分かる。各課題においてロードマップ、マイルストーンを設定していることも、事業推進に対して良い影響を与えていると判断される。すなわち、プロジェクト終了時に、個別テーマに関しては、世界トップ水準の成果が見込まれると評価する。

一方で、複雑システム科学の一般化された基盤「複雑系数理モデル学」を構築することに関しては、相変わらず当事業外部には分かりにくい状況にある。自己評価資料の図3「各サブテーマとその統合」、図4「複雑系数理モデル学の理論的プラットフォーム」は概念的であり、実際の個別テーマがどのように共通的な学理の元に解決されているのかが分かりにくくなっている。

当事業残り半年間においては、是非、サブテーマ3、研究項目i「複雑系数理モデル学の構築と体系化」にエフォートを集中し、当事業の成果が、当事業終了後も持続的に花開く素地を整備していただきたいと考える。

- 本プロジェクトは数理的研究であることもあり、数値目標の設定はそぐわず、総体的な評価を行うことが必要であると思われる。FIRSTプログラムとして、本プロジェクトは21世紀の最重要課題に対して、多面的アプローチを必要とする複雑系として捉え、数理世界での複雑系数理モデル学を構築して、分野横断的科学技术への応用研究に取り組むものである。

学術的な成果の指標の一つとして、顕著な数のジャーナル論文数が示されており、またジャーナルも多岐にわたっており、世界の複雑系のこれまでの研究所等に比べても、十分優位性を示すものとなっている。また、世界的にも著名なリーダーや、国内は産業界メンバーも含めた国際アドバイザリーボードを構成し、3回の国際会議を通じたフィードバックも得て、世界トップ水準の成果であることを逐次確認している。

また、本プロジェクトの構築した理論体系の有用さは、ライフイノベーション、グリーンイノベーション、そして震災後の課題といった複雑な諸問題に対して、系統だった応用展開がそれぞれ課題の複雑性に合わせて再適用することによって実現できていることから優位性が見て取れる。

- 複雑な現象を、少ない数のパラメータで表現できる時、その表現型式により、根源的に共通な原理で説明できることを意味する。この提案でも様々な分野で、現象論を乗り越えた共通のモデリングの手法で、実用的な対処療法など世界でも注目される大きな成果ができるものと期待された。中でも個別課題を数理モデル化し、複雑系数理モデル理論を適用することで予測を可能とする理論プラットフォームが目指された。これまでのところは個別課題で成果を上げているが、今後はこれを共通する学理として確立し、幾つかの異なる分野へ応用が初めて可能になることが期待される。

- 本プロジェクトでは「複雑系数理モデル学」の構築と、分野横断的科学技术への応用研究を行うものである。学術雑誌 276 編、国際会議等 938 件のアウトプットを出しており、基礎理論、工学応用の両面から、世界をリードする研究開発が進展していると思われる。とくに、定量的なベンチマークは難しいものの、国際シンポジウム (International Symposium on Innovative Mathematical Modelling) を主催し、トップ水準にあることを自ら確認しながら研究を進めていることは評価できる。計画の

進捗もほぼ順調であり、プロジェクト終了時にもトップ水準であることが期待される。

- 研究業績などから判断すれば、現状において、世界をリードする研究開発が展開されていると考えられ、プロジェクト終了時に世界トップ水準になることが見込まれる。ただし、課題はある。

本研究解題は、「複雑系数理モデル学の基礎理論構築」とその「分野横断的科学技术応用」の二つの課題から構成されている。前段の目標として設定されている基礎理論構築に関しては、過度の統一理論を追求することの過去の失敗の歴史に学び、三つの階層を想定して、それらの各レベルに対して適切な理論を採用し、それらを統合的に用いる提案がなされている。つまり、対象とする複雑系システムの構成要素レベルでは「非線形時系列解析理論」、それらの構成要素が組み合わさった中間レベルの複雑ネットワークレベルでは「複雑ネットワーク理論」、さらにシステムをメタなレベルで捉えた全体レベルでは「最先端複雑系制御理論」を用いるという構図である。

中間評価において、複雑系システムを上記のように三つのレベルに分けた場合に、各レベルに対応する理論体系が、何故そのレベルに対して最もふさわしいのか、ということが不明確であった。今回の提出資料においても、上記の三つの階層に関する説明と、応用分野に関する話題が混在して錯綜としており、本研究課題の総体的な内容を明解に理解するのは容易でない状態である。

今後、本研究課題の全体の内容に関する、より一層明解で分かりやすいシナリオの策定が必要であり、そのシナリオの下で研究を進めることが肝要である。そのような本研究課題に関する成果の説明の仕方に関する工夫が、事後評価において非常に重要になってくると考える。

- 「複雑系数理モデル学」の構築とその具体的な分野横断的科学技术への応用研究に関し、Scientific Reports の 15 編、Nature Materials の 1 編、Nature Communications の 1 編の論文など、世界トップレベルを含む査読付き学術雑誌に 276 編の論文、国際会議等発表 938 件、著書 13 編を創出しており、世界をリードする研究開発が展開されていて、かつプロジェクト終了時に世界トップ水準の成果が見込まれることは確実である。

応用面から見ても、アナログ集積回路等のハードウェア、前立腺癌治療や動的ネットワークバイオマーカーを含む医学応用、余震等の様々な実データ解析応用が、基礎理論研究とインタラクティブに展開されていて、国民の幸福・安全に具体的に寄与している意義はある。

多くの解題を解決するために、統一的な理論と個別に特異な理論がわかりやすいように整理すれば、実用化、産業界への展開がスムーズに進むと期待する。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 従来の複雑系研究の枠を越えて社会に還元できる応用研究成果を挙げるという観点については、実際の個別テーマへの説明がなされていることをもってして、「順調」と評価する。補足資料(1)にあるように、サブテーマ3、研究項目 i 「複雑系数理モデル学の構築と体系化」は、当事業の全5年間にわたり実施されることになっているが、一

方で、自己評価資料の図7においては、平成30年度以降に実現されることになっており、課題を先送りにした（所期の目標が達成されない）と見られてしまうおそれがある。よって、当事業の残り半年の期間においては、この研究項目3-iをどのように仕上げていくのか、その検討と実施に重点化すべきと考える。

- 複雑系数理モデル理論と応用の中で顕著なものを挙げると、サブテーマ1では、ハイブリッド力学系の基礎理論とその生命・医学システムへの応用では、それまで否定的な結果が示されていた大規模複雑ネットワーク系に対して制御・予測のための低次元化の理論を構築して、適用することで初めて前立腺癌の間欠的内分泌療法への応用で肯定的な成果を出すことに成功している。このような理論と応用の中で、プロジェクト内の他テーマの動的ネットワークバイオマーカー研究にもつなげており、本研究の目指すところの典型を示している。

サブテーマ2では微細半導体集積回路における不確実性を許容するアナログ回路に関して新しいパラダイムを理論から示し、実際にプロトタイプチップ集積回路実装を開発しつつ特許を多数出願し、マルチベンダーが参加するオープンプログラムへと昇華している。さらに神経振動子集積回路の実現、再生可能エネルギーの導入可能量の増大実現可能性の提示も行っている。

サブテーマ3は理論研究と応用開発に横串をさしたものであり、上記の課題でも貢献しているところである。

このようなことから、最初にまとめた本プロジェクトの目標は十分に達成されるものと判断する。

- 研究の進捗状況については、ほぼ順調である。具体的な個別課題で良い成果が出ている。例えば、難病の診断・治療や病態悪化の予兆検出が可能になる様な新しいバイオマーカーの探索が可能になった。

所期の目標達成については、今後、これまでに成功を収めた理論的プラットフォームを、様々な現象に適した取扱いに注意しながら、応用を進めることができれば、目標達成ができると思われる。

- 研究の進捗はほぼ順調であり、所期目標達成は概ね可能であると思われる。

本プロジェクトの基礎理論研究では、要素還元論だけでなく、また全体論だけでなく、複雑系の階層構造に着目しながら、ダイナミクス、ネットワーク構造、観測データの数理モデルの構築が重要との視点で研究を展開している。そして、ダイナミクスを制御するための「最先端複雑系制御理論」、ネットワークの最適化を行う「複雑ネットワーク理論」、観測されたビックデータを基に予測を行う「非線形時系列解析理論」の3理論からなるプラットフォームを構築している。さらに、これを参照しながら、具体的な課題の解決を展開しており、個々の課題については順調に推移していると思われる。

中間評価で指摘のあった、複雑系数理モデル学の体系化については、各課題の位置付けと整理が行われている。これにより、本プロジェクトのサブテーマ間の位置付けは、より明瞭になったと言えよう。ただ、各個別の応用課題と、基礎的な理論プラットフォームとの関係の説明はまだ十分ではないと思われる。

すなわち、『3つの基礎理論プラットフォームから、各展開課題に関する知見をあら

たに引き出してそれに適応するように活用することによって、個別の数理モデルと数理的手法をその各展開課題の複雑性にうまく合うように再構築することが不可欠である』としているが、その再構築プロセスの手法までには踏み込んだ説明が行われていないと思われる。複雑系ではない、通常の課題に対しても同様の課題解決プロセスは行われており、複雑系において何が変わるのか、特徴を明らかにすることが望まれる。

アナロジーとして、マクスウェル方程式と個々の電磁気学の問題との関係でいえば、マクスウェル方程式が電磁気学の基本方程式（群）であるのと同様に「3つの基礎理論プラットフォーム」が複雑系数理モデル学の基礎理論となりえているのか、あるいは異なる意味合いであるのかなどの説明が必要であると思われる。

- 研究の進捗状況については、本研究課題は、「複雑系数理モデル学の基礎理論構築」とその「分野横断的科学技术応用」の二つの課題から構成されている。前段に関しては、論文業績において成果が出ており、後段については、論文業績に加えて特許出願も格段と増加している。そのような観点から、研究の進捗（達成）状況に関し、順調であると判断する。

所期の目標達成については、中間評価以降、所期の目標達成のためのマイルストーンの明確化が図られている。そのような過程を経て、提出資料を読む限りでは、所期の目標達成が射程距離に入ってきていると判断する。

ただし、後段の「分野横断的科学技术応用」に関して、「前段の方法論を採用したからこそ対象とする複雑系システムに関する課題が解決した」という要因を、本プロジェクト関係者以外の方々にも容易に理解してもらうことが重要である。そのような工夫が、本研究課題の事後評価において非常に重要になってくると考える。

- 研究の進捗状況については、順調である。多数の学術論文を輩出するとともに、A/D 変換技術、前立腺癌治療法、高精度余震予測手法等に具体的な応用展開が進行している。所期の目標達成については、複雑系のダイナミクスを対象に制御等を行う最先端複雑系制御理論、複雑系のネットワーク構造を考慮して最適化等を行う複雑ネットワーク理論、複雑系から観測されるビッグデータを元に予測等を行う非線形時系列解析理論の3理論から成る共通モデリングのための理論的プラットフォームを構築し、個別応用課題に対する基本数理モデルと数理的手法を創生する基本戦略の基に、理論研究と応用研究が粛々と並行推進されていて、目標達成は確実である。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- やや厳しい見方をすると、A/D 変換回路の実用化、神経振動子集積回路の成果以外は、モデルやシミュレータを開発し、それらを現実的な社会課題に適用したところまでで終わっている。FIRST プログラムの狙いから考えると、そのレベルにとどまるのではなく、例えば、従来技術と比較して格段の精度で問題解決指針が得られる、あるいは、全く新しい解決手段を提示することが求められているので、モデルやシミュレータを適用することで、課題解決がなされるところまでを100%の達成度とすべきと考える。

事業の残り期間が半年になった現時点で、各サブテーマ実施の必要性和有効性を評価することは適切ではないが、むしろ、それらの実施を加速し、問題解決の実例を挙

げることには注力すべきと考える。

前立腺癌の間欠療法については、中間評価の際に一般化が困難であるとの議論があった。今回、治療薬に耐性を生じる癌に適用可能性があることが明らかになったとの説明があるが、事業終了時にはその内容を確認すべきと考える。

○ 治療薬の投薬時期の最適化、A/D 変換器の開発など、いくつかの分野で、高く評価される先端的成果が産み出されていると見られる。

○ 各サブテーマの研究は概ね順調に推移していると思われる。最終目標に対する進捗度の自己採点で一部に遅れがあるようであるが、既に達成しているものもあり、最終的には所期目標を達成するものと見込まれる。

最近の主な成果としては、サブテーマ1（基礎研究）では、複雑ネットワーク制御のための低次元化とネットワーク不安定化の基礎理論、サブテーマ2（応用研究）では、 β -A/D 変換の提案と実装、サブテーマ3（基礎と応用の融合）では数理モデルによる前立腺癌の内分泌療法の実用化に向けた開発などである。

他のプロジェクトと比べると、各サブテーマ間の相互有効性は分かりにくい内容と言わざるを得ないが、知的な刺激を相互に与えているように見受けられる。前立腺癌の内分泌療法などでは、サブテーマ1と3との協調により、研究の幅が広がっていると思われる。

○ 本研究課題には、以下の三つのサブテーマのグループが設けられている。

グループ1：複雑系数理モデル学の基礎研究

グループ2：複雑系数理モデル学の工学応用研究

グループ3：基礎研究と応用研究の融合による複雑系数理モデル学の体系化

これら三つのサブテーマの構成については、それらの必要性および有効性ともに妥当であると判断する。

各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通しについては、問題のない状況であると判断する。

○ 順調に進捗しており、今後における研究開発においても、所期の目標達成は可能である。

サブテーマ1の複雑系のダイナミクスを対象に制御等を行う最先端複雑系制御理論、サブテーマ2の複雑系のネットワーク構造を考慮して最適化等を行う複雑ネットワーク理論、サブテーマ3の複雑系から観測されるビッグデータを元に予測等を行う非線形時系列解析理論の3理論から成る共通モデリングのための理論的プラットフォームが構築され、個別応用課題に対して戦略的、統一的な取組が粛々と並行推進されている。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

（有識者からのコメント）

○ 研究支援体制については、若手研究員を JST が雇用し、研究内容に応じて各大学の研

研究室への配属が行われており、素晴らしい試みと考えられる。実際は、どの程度の頻度で異動が行われているのか、日常の業務・勤怠管理や安全管理をどのように実施してきたのかを示してほしい。

知的財産権に関する取組については、中間評価の際には、特許出願が必ずしも多くないことが指摘されていたが、事業後半では出願件数が増えてきており、中心研究者の指導力が発揮された結果であろうことが推察される。

若手研究者の育成状況については、各研究者と中心研究者との1対1の進捗報告会が行われており、素晴らしい試みと考えられる。現在、34名の若手研究員がいる中で、どのように報告会を実施してきたのかを示してほしい。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、半導体理工学研究センター（STARC）における実用化研究プログラムには、6社が参画されているとのこと。FIRSTプログラムを含め、7者のバググラウンド IP（プログラムに参加する前から保有していた特許）をどのように取り扱うことにしたのか、その概要を示してほしい。

- 知的財産権に関する取組については、中間評価での指摘にも対応して、出願件数の増加効果が出ている。また、研究支援担当機関との間での協定書も締結され、このような巨大プロジェクトでの知財の扱いとして適切な対応がなされている。

若手研究者の育成状況については、若手研究員を34名雇用し、それらが優れた成果を創出して巣立つポジティブサイクルを実現しており、成果を上げている。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、本プロジェクトの多様なアプローチ全体の中から具体的な個別テーマを3つ程度選定し、社会還元に向けた具体的な取組を開始しており、特にこれらは知財をpushした上での展開で、社会還元が進むことが期待できる。

- 知的財産権に関する取組については、出願件数が大きく増加し、努力が認められる。成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、企業との共同研究とその成果活用の試みがなされており、順調に行われている。

科学・技術対話の取組は進められているが、一般社会への本プログラム主導での講演会などによる情報発信が少ないように見える。

- 研究実施・推進体制については、産業界からのアドバイザリーボードへの参画は良い点と考えられるが、同時にその効果も具体的に示してほしい。

知的財産権に関する取組については、特許マインドが少ない学術的なプロジェクトにおいて、その意識高揚を図った点は評価できる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、プロジェクト終了後の実行体制まで踏み込んだ検討が今後必要と思われる。

科学・技術対話の取組については、数学という意味での数多くのアウトリーチ活動を行っており評価できる。

- 研究実施・推進体制については、本研究課題の実施・推進のためにさまざまなタイプの会合が頻繁に開催され、サブテーマ間や研究メンバーの連携・協働が積極的に図られていることは評価できる。特に、本研究課題が最終の段階を迎えるにあたり、国際アドバイザリーボードによる外部評価も兼ねたコメントが重要になってくる。その際、

成果の社会還元に関する評価を受ける観点からは、そのボードメンバーとして産業界からも複数名メンバーが参画していることは重要である。また、理論研究中心の本研究課題では、その特色に合致した研究者を充実することが重要であり、その採用には十分な配慮が求められる。本研究課題では、公募を積極的に行い、広範囲な対象者から、本プロジェクトに合致した優秀な研究員の採用が図られてきたことは高く評価する。

研究支援体制については、中心研究者の意にかなった「オーダーメイドな支援体制」が構築できていると判断する。本研究課題に関しては、JST および東京大学が本部の研究推進部内に「最先端研究支援課」、また、生産技術研究所内に「最先端研究開発支援室」を設置して、中心研究者への支援体制を構築している。その体制内で、JST の支援本部の研究支援統括者は、支援員と毎週進捗レビューを行うとともに様々な助言を行っている。その下で各支援員は、内閣府および日本学術振興会との連絡、各共同事業機関との連絡、その他 JST 本部が関わる必要がある案件に対して積極的な支援を行っている。また、東京大学の支援組織は、共同事業機関として主に経費の執行を担当している。

以上のような組織体制の下で、中心研究者と支援要員による「ヘッドクォーターミーティング」を毎週 1 回開催しながら、積極的な支援を実現するための環境整備がなされてきたものと評価する。

知的財産権に関する取組については、今回のフォローアップにおいて特に顕著な進展が見られる。中間評価前の出願件数が合計 5 件であったのに対して、平成 25 年 9 月末現在での出願件数が 22 件と 4 倍以上になっており、積極的な特許出願が行われている。このような積極的な取組が今後も継続的に行われることを求める。

若手研究者の育成状況については、本研究課題遂行に参画し、重要な役割を担う欠くことのできない要員である 34 名の若手研究員等(研究員・特任助教)のほとんどが、公募で慎重かつ厳しい選考を経て採用された人材である。その人材の育成面については特に重視し、国内外の国際会議等での積極的な研究成果発表や様々なセミナー等を通して多分野の研究者との議論や共同研究の奨励がなされている。既に 14 名の研究員等が本研究課題から巣立ち、新たな活動を展開していることも評価できる。以上より、十分な状況であると判断する。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、本研究課題においては、後段の目標である「分野横断的科学技术応用」の観点から、「前立腺癌の数理モデルに基づくテーラーメイド間欠的内分泌療法」、「再生可能エネルギー大量導入時の電力システムの安定性と制御」、「電気電子応用技術の基盤となる A/D 変換器」、「地震予報の ETAS モデルおよびその改良モデル」などに関する研究が推進され、社会還元に向けた方策の検討がなされている。平成 24 年度において、これらの方策はさらに深化され、実社会での有効な応用が図られ、特許の出願に至っていることは高く評価はできる。ただし、本研究課題の成果である方法論を採用したからこそ、対象とする複雑系システムに関する課題が解決したことに関する明確で分かりやすい説明が求められる。

科学・技術対話の取組については、様々な機会を捉えて、さらに自らが多くの企画を行って、これまでに合計 50 件のアウトリーチ活動を行ってきており、総じて十分に なされていると判断する。対象とする年齢層が広いことも特記に値する。

○ 研究実施・推進体制については、東京大学生産技術研究所内の最先端数理モデル連携

研究センターを中心とし、産業界3社を含む推進体制が確立し、月1回の研究員進捗報告会を開催して推進されている。

研究支援体制については、JST 研究支援室、東京大学最先端研究支援課、生産技術研究所最先端研究開発支援室による研究支援体制が構築されており、さらに海外研究者との交流のための短期海外研究派遣及び日本科学未来館を通じたアウトリーチ活動も推進されている。

知的財産権に関する取組については、平成25年9月末時点で22件の出願件数を実現しており、研究支援担当機関であるJSTによる出願体制も確立している。

若手研究者の育成状況については、現在34名の若手研究員等が従事、国際会議等での積極的な研究成果発表が推進されるとともに、毎月1回の進捗報告会での指導が行われている。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、社会的緊急性及び経済産業上の重要性・必要性の高い複雑系問題解決として、前立腺癌治療、再生可能エネルギー大量導入時の電力システムの安定性と制御、A/D変換器への応用が具体的に推進されている。多くの課題を解決するために、統一的な理論と個別に特有な理論が分かりやすいように整理すれば、産業界への展開がスムーズに進むと期待する。また、個別課題それぞれのベンチマークがあれば、理解しやすい。

科学・技術対話の取組については、若者に向けた最先端研究の公開シンポジウム（FIRSTサイエンスフォーラム）、岩波書店ウェブサイト、日本数学教育学会など合計50件のアウトリーチ活動を通じて広く一般に研究内容を公開している。

研究課題名	フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発
中心研究者名	荒川 泰彦
研究支援担当機関名	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所

1. 研究課題の概要

本研究課題は、従来の集積回路（LSI）では限界とされている省電力化、高速化、小型化等の産業技術を構築するため、光をLSIに導入し、光子と電子が協調・融合した従来にない光電子集積化技術基盤（フォトニクス・エレクトロニクス融合システム）の確立を目指している。

本研究課題は、[1] 先端デバイス技術及び[2] 光電子集積化技術の2つのサブテーマから構成されている。

[1] 先端デバイス技術

- ① シリコン・ナノレーザ、シリコンゲルマニウム光変調器、フォトニクス・ナノ構造光変調器、シリコン直接光源の技術
- ② 光変調器、受光器、光源実装の基本素子

[2] 光電子集積化技術開発

- ① アモルファス3次元配線、光ナノ構造配線、光配線基盤の技術
- ② 光配線導波路の集積化技術
- ③ 集積プロセス基盤、LSIとの最適分担設計、デモ実証による統合化技術

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

○ 大量の情報を低消費電力で高速に処理することが、我々の社会における喫緊の課題となっている。米国をはじめとする世界各国でその研究開発が活発に行われる中、当事業の成果は世界初・世界最高の伝送密度を達成しており、さらには最終年度を待たずに所期目標値を超える 30Tbps/cm² の性能実証を達成している。学術論文数がやや少ないものの、当該目標を達成するためには、様々な要素技術にブレイクスルーが必要であったことは明らかであることを加味して、本事業は十分に世界のトップ水準の成果を出したと評価する。

一方で、この成果が、本当に社会に実装されていくものとなるか、また、当事業終了後も持続的に世界トップレベルを維持できるかについては、以下の点が重要な課題と思われる。事業の残り半年においては、これらの課題に重点的に取り組まれることを期待する。

- ① 発熱の問題を解決するための量子ドットレーザの開発とシリコンフォトニクス集積回路への実装と性能評価
- ② 1.3μm帯への切り替えの見通し評価

- ③ フォーラム標準への取り組み
- ④ 【最重要課題】国内ファブの確保

○ 次世代集積回路として光電子回路が融合したフォトンクス・エレクトロニクス融合システム技術の研究開発に取り組み、伝送帯域密度 10Tbps/cm² という数値目標性能を終了年度に達成するという申請で採択されたプロジェクトである。プロジェクトでは同時にそれを実現し、また将来に資する基礎研究開発にも取り組んでいる。光配線回路と融合することにより、2025 年度ころに現在のデータセンターの機能がオンチップで実現されると、産業的にも非常にインパクトが大きい。

欧米各国での研究開発も進められており、当初段階ではボード間に適用可能な伝送帯域密度 100Gbps/cm² であるところを、本プロジェクト終了時点で上記数値目標を光源搭載型シリコンフォトニクス回路で達成するという顕著に優位性を有した目標設定がされている。

プロジェクトの順調な進展により、当初の数値目標は昨年度末にはクリアして世界トップの伝送帯域密度 30Tbps/cm² を達成しており、世界トップ水準のレベルをさらに強化している。また、本プロジェクトも世界的に認識されており、これからのさらなる産業化に向けての取り組みが注目されている。

○ 超高速計算機のために、光回路と電子回路が融合した革新的デバイスを開発し、伝送帯域密度 10Tbps/cm² を実現し、世界の先端を切り拓くことを目標にした。そのための幾つかの要素技術をサブテーマとして立て、それを総合して目標達成を目指した結果、すでに、上記目標値を上回った成果で世界をリードした。

○ 世界をリードする研究開発が展開されており、またプロジェクト終了時においても、世界のトップ水準の成果になることが見込まれる。

プロジェクトのスタート時点での目標であった、「伝送帯域密度 10Tbps/cm²」の光電子集積回路を、H24 年度に 1 年前倒しで実現しており、本研究プロジェクトが 30Tbps/cm² の世界最高性能記録を保持している。H25 年度は、更に挑戦的な課題に挑んでおり、LSI 搭載に向けて温度安定性や光伝送特性を確保すべく、1.3μm 帯量子ドットレーザを開発し、これを搭載した集積シリコンチップの試作（第 4 次）を行っている。

現状で、すでに最先端の成果を挙げており、最先端を走り続けるための更なる手を打っているところであり、プロジェクト終了時においても優位性を確保していると期待される。

○ 世界をリードする研究開発が展開されており、プロジェクト終了時において世界のトップ水準の成果になることが十分見込まれる。事実、所期の達成目標である 10Tbps/cm² の能力を有する集積化技術に対して、平成 24 年度末に既に 30Tbps/cm² という性能を、1 年前倒しで達成している。

本研究課題全体の所期の目標は、10Tbps/cm² の能力を有する集積化技術と、それらを構築する小型で高性能な先端光デバイス群（光源、光変調器、受光器、導波路）を実現し、最終的にフォトンクス・エレクトロニクス融合革新技術を確立することにより、将来の「オンチップ・データセンター」の実現可能性を明らかにすることである。

現時点において、世界各国の主要研究開発機関において、シリコンフォトニクス回路の研究が凌ぎを削りながら、進められているが、本研究課題が目指す「光源搭載型シリコンフォトニクス回路で 10Tbps/cm² を達成する」という目標は未踏であり、現時点でも優位性を維持している。

本研究課題は、東日本大震災と計画的停電に起因するさまざまな困難を各種の挽回策を講じて克服し、結果として世界最高性能を達成していることは高く評価できる。

- 平成 24 年度末に開発目標としてきた 10Tbps/cm² を大幅に超える 30Tbps/cm² 性能を 1 年前倒しで達成。現状、化合物デバイス回路により世の中で実現されている 100Gbps/cm² を大きく凌駕している。更に平成 25 年度には温度安定性や光伝送特性確保に向け 1.3 μm 波長帯を用い量子ドットレーザを組み込んだ新しい光電子集積回路構造に挑戦している。これが実現されれば更に大きく他の技術に水を開けることになる。世界をリードする FIRST での成果は評価に充分値する。

ICT 分野はこれまで世界標準は欧米に取られて場合が多かったため、現時点での世界をリードする成果をもとに世界標準獲得に向けた検討を行い、社会に実装していくことが重要である。

また FIRST の展開として、平成 24 年秋から経産省未来開拓型研究開発プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」を推進し、わが国の強い産業を創出する技術であると期待する。具体的には 10 年間プロジェクトとしてオンチップサーバのプロト実現を目指し、開発成果適用製品により市場創出を図ることを目的としているが、共同研究を進めている各企業の将来の製品ロードマップや企業の投資計画を示していくことが必要であろう。

世界をリードする技術であることと、本テーマ関連分野にかなりの研究予算を過去と将来に渡って投じていることを考慮し、社会への実装の時期、わが国への産業と経済的効果、などを具体的かつ定量的に検討する必要がある。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 本事業は、すでに所期目標を越える 30Tbps/cm² の目標を達成している。
一方、中間評価の際にも指摘があったように、この目標を達成したことによって、どのような社会が実現されるのかを、新聞記事と同等のレベルで、わかりやすくご説明いただくご準備をお願いしたい。
- 既に目標を達成しており、さらに LSI 搭載に向けて、さらなる温度安定化や、よりよい光伝送特性を有することを目指して研究開発がされている。
- これまでの研究の進捗は順調で、達成目標を上回る成果を得ている。具体的には伝送帯域密度 10Tbps/cm² という目標に対し、30Tbps/cm² を 24 年度末に達成している。
今後も量子ドットレーザを搭載したシリコンフォトニクス集積回路の開発を進めており、更なる省電力化が期待される。
- 研究は順調に進捗しており、所期の目標以上の成果が見込まれる。これまでの主な成

果として、

- ・ 光源搭載フォトニック回路で、30Tbps/cm²の世界最高伝送帯域密度を達成済み
- ・ 異種基板直接接合による、シリコン上1.3μm波長帯量子ドットレーザで、110°Cの世界最高温度動作を実証
- ・ フォトニック・ナノ構造シリコン光変調器で、動作温度範囲が100°C(19°C~124°C)を超え(世界最高)、温度に依存しないことを実現

などが挙げられるが、2本柱とする「先端デバイス技術」および「光電子集積化技術」の融合も視野に入れて、所期目標を上回る課題に挑戦している。

- 本研究課題のこれまでの研究の進捗状況は順調である。世界各国の主要研究開発機関において、シリコンフォトニクス回路の研究がお互いに凌ぎを削りながら推進されているなかで、東日本大震災と計画的停電に起因するさまざまな困難を各種の挽回策を講じて克服し、結果として世界最高性能を達成している。

所期の目標達成は可能と見込まれる。本研究課題全体の目標として掲げた10Tbps/cm²の能力を有する集積化技術については、平成24年度末に既に30Tbps/cm²の性能を、1年前倒しで達成している。それらを構築する小型で高性能な先端光デバイス群(光源、光変調器、受光器、導波路)の研究開発においても、世界最高性能を達成しつつプロジェクトが進行しており、結果として所期の目標の実現も目処が立ったものと判断する

- 平成23年度以来、常に世界トップの集積密度を実現してきており、極めて順調である。所期の目標である「光源搭載型シリコンフォトニクス回路で10Tbps/cm²を達成する」は3倍の性能で既に達成されている。

最終年度目標である“1.3μm量子ドットレーザを用いたデモ実証を行い発熱問題に耐え得るシリコンフォトニクス回路基盤技術を確立する”ことはこれまでの実績を基に可能と考えられる。

最終年度でLSIを搭載した形でのデモ実証を期待したいところである。

さらに社会への実装の具体的な効果や計画などを示していただきたい。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗(達成)状況と所期の目標の達成見通し

- [1] 先端デバイス技術

シリコン光変調器の温度範囲100°Cを越える温度無依存動作実証等、優れた成果が出ていると判断したが、一方で、シリコン・ナノレーザ、シリコン直接光源に係わる成果が見えにくいので、当事業の残り半年間で、これらの革新的技術が今後、どのように実装されていく技術となり得るのかについての見通しが明らかになることを期待する。

- [2] 光電子集積化技術開発

30Tbps/cm²性能の実証の過程で実施された光変調器、受光器、光源実装、光配線導波路等に関する各要素技術の開発におけるボトルネックと具体的な課題解決の過程を整理し、可能な範囲で開示していただくと、国プロジェクトの成功例として貴重な資料になるのではないかと考えている。

- サブテーマ1が先端デバイス技術、サブテーマ2が光電子集積化技術で、それぞれにおいてシステム実証と革新的技術の探求の両立がめざされている。

システム実証の点では、上述のように申請時数値目標を既に達成する成果を挙げている。革新的技術の探求では、更なる高性能化を次に実現可能な研究推進を行っている。

- [1] 先端デバイス技術

1.5 μm から1.3 μm へ短波長化できる要素技術の開発を進めた。光源としての量子ドットレーザ、低電力の光変調器、受光器もふくめた光集積シリコンチップ製作に向けて研究を進めている。

- [2] 光電子集積化技術開発

集積化には光配線導波路、素子の微細加工など集積に必要な全プロセスを確立することで、目標の実現をはかっている。

- [1] 先端デバイス技術

基本素子テーマにおいては、H24年度に40Gbpsクラスの高速性を、光変調器、受光器、光源実装、光配線導波路で達成している。より具体的には、光変調器では従来1/2の消費電力を、受光器では世界最高レベルの高速性と高効率を、世界で初となるシリコン導波路と量子ドットレーザアレイのハイブリッド実装を、各々達成している。

革新的技術テーマにおいては、シリコンの発光といった超難問の課題にも挑戦している。

- [2] 光電子集積化技術開発

集積化テーマでは、1.5 μm 帯に加え1.3 μm 帯の低損失光導波路開発を行っており、新たに量子ドットレーザ搭載の集積試作を行っている。

統合化テーマでは、光集積シリコンチップの第3次試作で、前記の成果に貢献している。また、量子ドットレーザ搭載に向けた、第4次試作を行っている。

革新技術テーマでは、強い光入力でも安定動作が期待される、SiC材料を用いたフォトリソニック結晶型共振器の試作に成功している。光配線基盤技術に関しては、1 μm を超える多層配線間で83%の強度結合を達成している。

最終目標はすでに達成しているものの、超高密度によるノイズやLSI搭載時の温度特性の課題などが更に明らかになっており、これらを解決するために各サブテーマが研究を進めている。

- サブテーマとしては、「先端デバイス技術」および「光電子集積技術」の2本柱を設定し、「革新的技術の探求」と「システム実証」の両面から同時並行して研究開発が推進できる体制になっており、有効に機能していると考えられる。

その上で、各サブテーマの研究の進捗状況と所期の目標の達成見通しについては、全体の成果がサブテーマの成果に直結していることから、2-2の評価と同様に順調に進展しており、所期の目標を達成できるものと確信する。

- (革新的技術の探求)

「先端デバイス技術」ではシリコン上1.3 μm 量子ドットレーザの110 $^{\circ}\text{C}$ 動作、フ

オプトクス・ナノ構造光変調器の 20°C~120°C温度無依存動作を実証、
「光電子集積化技術」ではアモルファス 3 次元配線において 3 次元層間を 1.8dB
の低損失で伝送可能な層間トランスファードバイスを実現、層間距離 1 μ m を越え
る多層配線間で 83%の強度結合を達成し、50Gbps 伝送を実現。

(システムの実証)

「先端デバイス技術」では光変調器の 50Gbps 1.96V 動作、ゲルマニウム受光器の
50GHz 量子効率 60% 光結合長 10 μ m 動作、シリコン導波路と量子ドットレーザ
アレイのハイブリッド実装での 25°C~100°C 低結合損失 3.9dB を達成、

「光電子集積化技術」では 40Gbps 光集積シリコンチップ試作(4.5 \times 4.7mm²)、チャ
ネル当り光素子面積 0.07mm²/ch で 20Gbps 動作による 30Tbps/cm² を達成。

プロジェクト最終年度目標達成に必要な要素技術が大筋で開発完了している。シリ
コン上 1.3 μ m 量子ドットレーザの 110°C動作、フォトクス・ナノ構造光変調器
の 20°C~120°C温度無依存動作を実証。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 研究実施・推進体制については、優れた取組みとして、事業化に向けた準備を挙げる。
本事業の成否は、開発された技術が、製品として社会に実装されるか否かにかかっ
ている。生産能力を持ったファブ、ビジネスモデルを持つ企業への技術移転を柔軟に推
進していただきたい。

知的財産権については、標準化に関しては、フォーラム標準のみならず、革新的技
術に関してはデジュール標準（公的標準）を目指すことも検討してはどうか。知的財
産の事業化適合性を積極的に評価している試みは特筆に値する。

- 研究実施・推進体制については、特に問題がない。フォローアップでの指摘への対応
も十分になされており、そこでも独創的な取組みがなされている。

知的財産権についても、特に問題ない。事業適合性判定の申請も行って、結果を得
ている。また、標準化活動でも当該グループの Editor を担当することなど進展してい
る。

成果の社会還元については、後継の 10 年間プロジェクトが採択されており、まさし
く 2025 年での産業展開を目指した取り組みが行われている。それまでの過程でも、距
離の長い電気配線から順次光配線に置き換わることへの対応を想定して、FIRST 成果の
社会還元をすることも検討している。

- 研究実施・推進体制については、テーマ間、組織間の連携が有機的に行われ問題ない。

- 研究実施・推進体制については、特に大きな問題は認められない。

中心研究者の意思が反映しやすい体制になっている。また、つくば集中研においては、
企業の枠を超えた連携が行えるように機敏な体制を指向しており、評価できる。

知的財産権については、法律特許事務所を知財顧問とした知財戦略の構築活動は評
価できる。ただし、H23、H24 の出願数（国内／国外）は、競争領域の研究であること

を考えると、少し寂しい。今期の出願に期待したい。

- 研究実施・推進体制については、特に問題がない。特記すべき点は、二つのサブテーマが、「革新的技術の探求」と「システム実証」の両立を目指しながら同時並行的に推移していることであり、本研究課題のような内容のプロジェクトにおいては実効的であると判断する。プロジェクトが最終段階に近くなるにつれて、「PECST つくば集中研」が大きな役割を果たしながら、その両者の成果を集約する機関となって密な連携関係を構築していることは評価できる。また、平成 24 年 9 月末より、経済産業省の未来開拓研究プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システムの開発」を 10 年間プロジェクトとして開始していることは、本研究課題を成果の本格的な事業化に向けた活動として高く評価できる。

知的財産権については、平成 24 年から平成 25 年にかけて特許出願が大幅に増加し、特に、積極的な海外特許戦略が開始されていることは高く評価できる。また、国際標準化に関わる活動は、本研究課題が技術的に世界をリードしている現況において主導権を握るべく、非常に重要なことであるが、その活動が展開されつつあるには良いことである。本研究課題の優位性を維持する観点からも、今後とも特許活動、標準化活動が積極的に展開することが重要である。

- 研究実施・推進体制については、企業 5 社の研究者、国内 4 大学、海外 3 大学が参加、TIA スーパークリーンルームを活用し企業の壁を越え、一つの組織のように研究開発を進めており、特に問題が無い。

知的財産権については、中間報告時に比べ特許出願件数も増加し、研究支援機関が中心となって戦略的な特許を取得できるよう研究チームリーダーと活動しており、評価に値する。産業への出口も想定した上で、特許網をも構築し、戦略的な特許戦略をもって引き続き進めていただきたい。

研究課題名	省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発
中心研究者名	大野 英男
研究支援担当機関名	東北大学

1. 研究課題の概要

本研究課題は、高速・高書換え耐性・微細化可能でかつ配線層に埋め込むことができる不揮発性スピントロニクス素子を半導体集積回路と融合させて、従来の論理集積回路より遥かに高性能で省エネルギーのスピントロニクス論理集積回路を実現することを目指している。

本研究課題では、スピントロニクス材料開発、デバイス開発、集積プロセス開発、回路 IP 開発、設計手法ツール開発を一貫して行うとしており、サブテーマは設定していないが、以下の7つの研究開発項目を設定して研究開発を推進している。

- [1] スピントロニクス材料開発
- [2] スピントロニクスデバイス開発
- [3] 革新的スピントロニクス材料・デバイス研究開発
- [4] スピントロニクス集積プロセス開発
- [5] スピントロニクス論理集積回路動作検証・IP 開発
- [6] スピントロニクス論理集積回路設計手法・設計ツール開発
- [7] スピントロニクス論理集積回路実証・拠点形成

上記の研究開発による統合成果として、スピントロニクス論理集積回路の統合実証チップを試作し、同一デザインルールの CMOS チップと比較して、面積比×性能（遅延時間）比×消費電力比で 1/64 以下に基本性能が向上することの実証を研究課題全体の所期の目標としている。

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- VLSI シンポジウムや、2013 年の ISSCC においても採択が決定しているとのこと。また、素子単体に対するプロセス技術の高度化を、ウェハレベルの信頼性とばらつきで評価できる体制が構築されており、プロジェクト終了時には、世界トップ水準の所期成果が見込まれる。
- スピントロニクス論理集積回路の研究開発で、材料研究・デバイス開発から論理回路設計までを中心拠点の東北大学とつくば分室で実施できる世界で他に存在しないレベルの研究グループにより、遂行された FIRST プロジェクトである。自己評価書に示されている国際会議発表の率やジャーナル論文数等よりも、そのことを十分に確認できる。

○スピントロニクス素子を論理集積回路に組み上げることで世界をリードすることが期待される。本研究課題により、スピントロニクス材料開発、デバイス開発、集積プロセス開発・回路 IP 開発・設計手法ツール開発を一貫して進める事で、欧米の開発に負けない成果を出して行ける。

○すでに、世界をリードする研究開発が展開されており、プロジェクト終了時に、世界のトップ水準の成果になることが見込まれる。

本研究開発領域は国際的な競争が激しく、競争領域の開発に入りつつあるため、必ずしも最新の成果が学会などで公表されないことも考えられるが、それを差し引いても、システム LSI の分野において、材料・物性・デバイスから回路、LSI 設計まで手掛けている研究機関はほとんどなく、また、半導体分野では良く知られた世界一級の国際会議（それも、材料、デバイス、LSI の各方面において）に論文が採択されていることから、世界をリードする研究開発が非常に幅広く行われていることが、客観的にも窺われる。また、研究進捗も計画通り推移しており、プロジェクト終了時においても、優位性が保たれていることが期待される。

○世界をリードする研究開発が展開されており、またプロジェクト終了時に、世界のトップ水準の成果になることが見込まれると判断する。

本研究課題では、既存の CMOS 集積回路に対して、面積比×性能（遅延時間）×消費電力費で 1/64 以下のスピントロニクス論理回路の性能実証を目標として、スピントロニクス材料開発、デバイス開発、集積プロセス開発、回路 IP 開発、設計手法ツール開発を一貫して行い、スピントロニクス論理集積回路の動作実験が計画されている。このように一貫した研究開発を推進し、動作実証が可能なグループは世界で唯一であり、さらに上記の目標性能値を達成することが実現すれば世界をリードすることが可能である。平成 24 年度は、上記性能の性能実証チップの設計がほぼ終了した。平成 25 年度に入って、性能実証チップ設計および試作を行い、6 月に該当分野におけるトップレベルの国際学会で実証結果の成果発表を行っている。以上のような状況から、計画通りの進捗が達成されており、プロジェクト終了時において世界のトップ水準の成果になることが見込まれる。

○材料、集積プロセス、回路設計技術までの一貫した開発を行い、スピントロニクス論理集積回路動作実証が可能な世界で唯一のグループとなっており、世界をリードする研究開発が展開されている。VLSI Symposia 等の国際学会で最も多く当分野の発表を行っている。

最終年度である平成 25 年度には面積比×性能比×消費電力費で既存の CMOS 集積回路比で 1/64 以下を実証予定であり、世界トップ水準の成果が見込まれる。

さらに、スピントロニクスを導入したことによる効果に関して、特に省エネルギーが顕著に示すことができるアプリケーションを具体化し、定量的な効果を実証し、産業・経済的効果を示していただくことを期待する。

FIRST の展開として、東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センターにて本プログラムにて開発した技術を移行した SIT-MRAM の産学共同研究を開始している。現時点で詳細は不明であるが、最終年度までに具体的な技術の展開や産業への出口イメー

ジが具体化することを期待する。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 中間評価時になされた「スピントロニクスデバイスの特長を十分に活かす具体的な用途の検討、実用化を行う企業とのさらに強力な連携構築、実用化に必要なスペック（目標性能、デザインルール等）の詳細検討」について、一定の回答がなされているものの、参画するどの企業が、どのような具体的な用途でスピントロニクスデバイスを実用化する見通しを持っているのかが必ずしも明確でない。むしろ、デバイスではなく、プロセス技術を装置メーカーに技術移転することも視野に入れてはどうかと考える。

また、「デファクトスタンダードに向けた統合実証」に関しては、「最終目標を達成する見込み」と記載されているものの、やや厳しい見方をすると、その根拠としてあげられている4項目は、どれもデファクトスタンダードを獲得するためには不十分な取り組みと思われる。むしろ、フォーラム標準、あるいはデジュール標準の取得を目指した方が良いのではないかと考えられる。

- 東北大学の震災被害等があった中、遅れを取り戻す努力がなされ、最終年度において順調に最終数値目標を達成したところである。
- スピントロニクス素子自身の開発、これを集積回路に搭載する技術開発、回路設計法の確立、総合特性測定法の確立など、24年度までの目標はほぼ達成され、25年度も予定通り達成される見通しが立てられている。

- 全体として順調に推移しており所期の目標を達成見込みであると認められる。

H24年度の主要成果として、2重 CoFeB/MgO 界面記憶層と Synthetic ferro 参照層とを開発し、直径 29nm の MTJ を試作し、熱安定性指数として 59 という高い値を達成している。また、回路開発においても、H23年度に開発した自動設計ツールを活用し、ロジックインメモリ構造の論理集積回路に適用し、IP 実証チップを設計・試作し、その優位性を示している。材料から論理 LSI までを一貫して行える研究開発機関は殆どなく、本研究PJでは、これを有効に活用して最先端の研究開発を行っている。

- 本研究課題のこれまでの研究の進捗は順調である。「材料・素子製造技術開発」、「回路設計技術開発」については最終目標を達成する見込みが立っており、「スピントロニクス論理集積回路の統合実証」については既に最終目標を達成している。研究成果の国際的なベンチマークの一環として、該当分野における代表的な国際学会である VLSI Symposia における論文発表に関する統計によれば、スピントロニクス技術に関する論文が世界的に増加する傾向の中で、本研究課題からの発表が過半数を占めている。特に、本研究課題拠点は、スピントロニクス技術関連の論文のみで、質・量ともに世界の有力大学と肩を並べている状況であり、その卓越性が伺われる。

所期の目標達成は可能と見込まれる。本プロジェクト全体の目標として掲げた、面積比×性能（遅延時間）×消費電力費で 1/64 以下のスピントロニクス論理回路の性能実証の達成に向けた実証チップ設計、試作が計画通り進捗しており、平成 24 年度は、

上記性能の性能実証チップの設計がほぼ終了した。平成 25 年度に入って、性能実証チップ設計および試作を行い、6 月に該当分野におけるトップレベルの国際学会で実証結果の成果発表を行っている。このように、現況においても世界最高の性能を有する状態での開発が進んでいる。結果として、所期の目標の実現の目処がほぼ立ったと判断する。

- これまでの研究開発の成果として VLSI Symposia 等の国際学会で最も多く当分野の発表を行っている他、IEDM(2012)及び ISSCC(2013)での招待講演の対象ともなっており、世界トップレベルの成果が広く認められている。

材料、集積プロセス、回路設計技術までの一貫した開発により、最終年度である平成 25 年度に面積比×性能比×消費電力費で既存の CMOS 集積回路比で 1/64 以下を実証する目標達成は十分可能と見込まれる。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗(達成)状況と所期の目標の達成見通し

注)本研究課題では、サブテーマを設定していないが、「1. 研究課題の概要」に挙げた7つの研究開発項目等について何点かコメントがあったので、以下に記載する。

- 各研究開発項目において、残り半年間で重点的に検討していただきたい点を挙げる。

- ・革新的スピントロニクス材料・デバイス研究開発

電界による磁化制御、新規磁性半導体の低消費電力スピントロニクス論理集積回路応用について、所期計画通りの進捗とのことであるが、BiFeO₃や(In, Fe)Asをどのように回路に取り込むのか、また、従来技術に対してどのような優位性があるのかについて、必ずしも明らかに示されていない点がある。残りの事業期間で、その見通しが明らかになるように成果がまとめられることを期待する。

- ・スピントロニクス論理集積回路設計手法・設計ツール開発

設計ツールの開発がほぼ完了し、設計手法のデファクト標準化を推進するとのことであるが、その具体的な戦略が明らかになっていない。残りの事業期間で、計画立案及び具体的な標準化活動を進めていただきたい。

- ・スピントロニクス論理集積回路の実証

所期の目標設定では、(2) 回路設計、(3) スピントロニクス論理集積回路の実証を行う試作環境の利用を、国内外の研究者に認める体制を構築することが目標とされていた。事前に課題側より提出された資料においては、(2)及び(3)の目標は達成見込みとの表現となっている。(2)、(3)のどれをとってみても困難な課題が多いと予想されるものの、所期目標の達成に向け、エフォートの重点的な配分を期待したい。

- テーマは1つである。これは、中心研究者の強いリーダーシップのもとで、材料開発・デバイス開発から設計ツール開発までを一貫して行う方針からで、実際にそれが機能している。

- (1) スピントロニクス材料開発

反平行結合参照層を用いた素子の開発に成功し、デバイスおよび集積化の目標達成

に向け、その基盤を確立できている。

(2) スピントロニクスデバイス開発

23年度末の90nm回路を達成したのを更に進め、30nm回路への道筋をたてることができている。

(3) 革新的スピントロニクス材料・デバイス研究開発

省電力論理集積回路に向けてこれまで順調に開発が進んでおり、終了時点までに目標達成の指針も確立できている。

(4) スピントロニクス集積プロセス、動作検証研究

回路チップの試作、評価、極微細加工・エッチング手法確立、集積回路の安定・高速動作技術の確立への研究が予定通り進行している。

- 各研究開発項目ともに、計画通りに進捗しており、目標を達成見込みと認められる。材料関連においては、参照層の漏洩磁界を減少できる反平行参照層を開発し、MTJの熱安定性を向上させることを実証した。また、30nmスケール以下のMTJ材料として、 $L1_0$ -MnAlを開発しており、高磁気異方性と低ダンピング定数を示した。

デバイス開発では、2重MgO構造で29nm直径のMTJ素子を試作し、熱安定性指数59という高い値を実証した。集積プロセスでは、つくばTIAでの300mmウェハ開発ラインを立ち上げ、回路IPチップの試作が可能となった。

スピントロニクス論理集積回路の研究開発では、不揮発連想プロセッサなどの設計・試作を行って、高速性と低電力性を示した。画像処理プロセッサの設計も行っている。また、設計ツール・フローの開発では、不揮発性論理ゲート回路と通常のMOS回路が混在した場合の自動設計（論理合成）が、市販ツールを用いて行える環境を整えた。

- 本研究課題については、中心研究者の強いリーダーシップのもとで、スピントロニクス材料開発・デバイス開発・集積プロセス開発・回路IP開発・設計手法ツール開発を一貫して一つのサブテーマ構成の体制で実施されており、効率的な連携が取られている。その観点からは、サブテーマは設けない形態で実施されており、この項目は該当しない。

なお、一つのサブテーマの中に、七つの研究開発項目が設けられ、各項目にリーダーを配置して、責任分担を明確にしている。

- 以下により所期の目標達成は十分可能な見込。

- ・ 材料・素子製造技術開発: CoFeB/MgO MTJ素子をCMOS回路上にて動作実証。TIA 300nmラインにおける試作環境整備。40nm世代及び以降向けCoFeB/MgO電界効果素子実証。
- ・ 回路設計技術: 設計フロー/ツール、細粒度パワーゲーティング方式、信号処理IP、ばらつき制御方式を開発。
- ・ 論理集積回路統合実証: 面積比×性能比×消費電力費で既存のCMOS集積回路比で1/64以下とするチップ設計を完了。
- ・ デファクトスタンダード統合実証: 300mm試作環境、設計フロー/ツールの他、基板技術体系教育提供開始。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 研究実施・推進体制については、特に問題がない。

国際標準化に関しては、中間評価による指摘には従わず、デファクト標準に特化することが記載されている。中心研究者としてのご判断があったものと思われるが、どのように市場に受け入れさせて、高いシェアを獲得するのか、その戦略と計画、そして具体的な成果が期待される場所である。

若手研究者の育成状況については、多くの若手研究者が受賞されている、とのことから、中心研究者の育成指針を端的に示しており、優れた取組みと評価できる。

- 研究実施・推進体制については、特に問題がない。中間評価での産業化への出口に向けた課題については、実用化を行う企業とのさらなる連携を深めている。参加企業が、それぞれの事業展開を想定したスピントロニクス論理集積回路を設計・試作・評価しており、それらは学会等で発表の予定とされている。

- 研究実施・推進体制については、二つの研究拠点（東北大、つくば）が密接に連携して研究を進めている。新たな参画機関も増え、研究実施体制は十分に組織、運営されている。

科学・技術対話の取組みについては、一般社会に対してはやや説明のしにくさもあると思われるが、もう少し努力する事は可能かもしれない。

- 研究実施・推進体制については、特に問題はない。スタート時点の6参加組織に加え、新たに5機関を共同研究機関として加えることができたことは特記に値する。研究加速、標準化、研究の広がりが期待できる。また、東北大学拠点とつくば拠点との有機的な連携を図っている。

成果の社会還元については、東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター（H24.10.1 設立）に、本PJの技術が展開される予定。不揮発ロジックをシステムLSIに組み込んで製品化してゆくためには、企業における実用化研究（とくにデバイス・インテグレーション）と設備投資が更に必要であり、この分野での競争力が低下している日本で花開くかは未知数だが、国際競争力を取り戻す一つの鍵になる可能性はゼロではない。

- 本研究課題の特徴として、全体を一つの研究テーマとして実施し、サブテーマを設定していない。その観点からは、中心研究者の意向がプロジェクト全体に直接的に伝わる利点がある。なお、サブテーマは設定していないものの、実際には7研究開発項目のチームが設定され、各チームにはリーダーが配置されて研究開発が推進されており、そのような小振りなチームの総合体としてのプロジェクトをいかに推進するかは、重要な課題であると考えられる。産業界からの研究参加機関については、半導体メーカー（大企業の場合は、半導体製造部門）が主であり、システム構築メーカー（大企業の場合は、システム構築部門）の参画が弱いのは問題である。つまり、本研究課題の成果の

企業における出口を探る観点からは、後者のメーカー（部門）の参画が不可欠と考える。参画企業の数が増えることは良い傾向であるが、今後は参画企業の特性を考えることが重要である。

知的財産権については、研究支援担当機関である東北大学が、本研究課題の知的財産権の確保が将来にわたって重要性と考え、特許動向調査に関して知的財産部が費用を負担し、特許マップの作成についても、支援機関として東北大学が主体的に取り組んだことは評価できる。また、積極的な海外特許戦略が開始されていることは、本研究課題の内容からすれば非常に重要であり、今後、さらにその方向が加速されることを期待する。特に、特許戦略においては、どの部分を押さえておくべきかという戦略が重要であり、十分な検討を要する。

科学・技術対話の取組みについては、テレビ、新聞、雑誌（学術誌を除く）などによる広報活動の実績が平成 23 年度から大幅に伸びたが、平成 24 年度に関しては減少してしまっていることは問題である。このような産業界との連携した広報活動は効果的であると思われ、今後ともさまざまな工夫を行いながら、継続的かつ積極的な活動がなされることを期待する。

- 研究実施・推進体制については、材料・デバイス・集積プロセス・回路 IP・設計手法ツールの各開発を一貫して行う体制を構築、研究開発項目毎に責任分担を明確に推進していることもあり、レイヤーにわたる新たな知見が得られていることを評価する。

知的財産権については、材料・素子・回路技術に関しては知財権獲得を目指す一方、製造技術等はノウハウとしてブラックボックス化、設計ツールはデファクト標準化を目指す戦略を運用していて、評価に値する。

科学・技術対話の取組みについては、国際シンポジウムを東北大学において 22-24 年度各 2 日間にわたって実施。FIRST サイエンスフォーラムでも講演。その他東北大学イノベーションフェア、オープンキャンパス、電気通信研究所公開等で研究成果を積極的に公開している。

研究課題名	超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発と当該エンジンを核とする戦略的サービスの実証・評価
中心研究者名	喜連川 優
研究支援担当機関名	東京大学

1. 研究課題の概要

本研究課題は、将来、爆発的に増える膨大な情報量を処理することが可能な非順序型と呼ばれる実行原理に基づき、平成 25 年度末までに従来比 1,000 倍程度（当初の 800 倍から目標上積み）の処理能力を持つ非順序型最高速データベースエンジンの開発を目指している（日立製の旧来の商用データベースソフトウェア及びオープンソースウェアを比較基準としている）。

本研究課題は、[1] 超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発及び[2] 超巨大サイバーフィジカルシステム基盤のための情報創発技術とその戦略的社会的展開をサブテーマとしている。

[1] 超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発

- ・ 超大量非同期入出力の発行、ストレージ駆動型非順序型の実行、実行時動的入出力スケジュールの処理

[2] 超巨大サイバーフィジカルシステム基盤のための情報創発技術とその戦略的社会的展開

- ・ サーバー情報とセンサー情報を融合した大規模データからの潜在情報の抽出、サイバーフィジカルシステムの実現・実証

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 世界的な市場を形成していない日立製の従来ソフトでベンチマークを行っている点に不安が残るものの、データベースエンジン解析速度の 1,000 倍の高速化は達成される見込みであり、かつ、世界トップレベルの水準であろうことが期待される。むしろ、当事業においては、巨大データ及びそのデータベースの有効活用に関して、時代を先取りして研究開発を開始したことを評価すべきであると考えている。

一方、平成 22 年度研究進捗フォローアップにおいても指摘したが、中心研究者が連名となった学術論文が相変わらず少なく（平成 24 年度は 3 報のみ）、やや不自然に思える。

- ビッグデータ時代の基幹システムとなる超巨大データベースに関して、商用データベースの能力評価という難題がある中、日本 IT 企業を代表する日立のデータベースシス

テムを軸にすえて、最終的に当初申請時の 1,000 倍の高速化を実現する見込みで、明確に世界レベルで優位性のある成果をあげている。また、実世界応用との接点として、サイバーフィジカル応用を推進し、センサーデータなど新タイプ大量データの実応用を展開しており、1つのプロジェクトの中でビッグデータ処理を可能にするハードから実世界につなぐソフトまでを研究開発するプロジェクトとして顕著な優位性を有している。

○ 非順序型実行原理に基づくと、現行ソフトウェアと比べて 1,000 倍程度に高速化が可能になると想定される。これにより、まもなく訪れる「超巨大データベース」時代において、十分世界をリードすることが期待される。

○ 本プロジェクトは、中心研究者が提案した「非順序型実行原理」に基づく超高速データベースエンジンの開発を目指している。

商用ソフトウェアの性能ベンチマーク結果は、ソフトライセンスによって厳しく禁止されているため、厳密な意味での優位性評価はできていない。しかしながら、本プロジェクトが基準としている日立製の（プロジェクト開始時点での）商用データベースに対して、700 倍の高速化を達成しており、世界をリードする研究開発が展開されていると思われる。

また、所期の目標は、予算の縮減により 800 倍程度としていたが、プロジェクトの努力により 1,000 倍の目標を再々設定している。現在、700 倍まで到達しており、研究自体に遅延は見られないため達成できると見込まれる。

本プロジェクトの成果の一部は、日立により H24 年 5 月に製品化されており（予定より 1 年前倒し）、データベースエンジンの高速性に高い評価を得ているとのことであるため、それを更に発展させて、プロジェクト終了時にトップ水準を維持しているものと考えられる。

○ 本研究課題は、中心研究者の考案した非順序型実行原理に基づく超高性能データベースエンジンの開発を目指すものであり、問合せの種類により高速化率に差を生じる可能性はあるものの、現行ソフトウェアと比べて、ペタバイト級データベース環境における主要な解析系問合せ処理を 1,000 倍程度に高速化し、データベース性能において世界のトップを達成することを目標としている。海外ベンダの動向としては、現行のデータベースエンジンを手に入れることは避け、むしろ応用層にシフトしており、ハードウェア・ソフトウェア一体型のソリューション提供に終始しており、本研究課題の所期の目標の優位性については十分にあると判断する。

最先端プログラム全体の予算の削減、さらにはタイにおける洪水によるディスクドライブ供給が極めて限定されたことなどによって、ソフトウェア自体は 1,000 倍の性能向上を達成するものを開発しつつ、中間評価時点では、本プロジェクト終了時において 800 倍程度までの実証に止まることが予測された。しかし、所謂ビックデータブームによる大規模ストレージマシンの市場投入が急速化し、ディスクドライブの価格低下の傾向が顕著になってきており、このままの状態では当初の予定通り、期間内に 1,000 倍の実証が確実にできてきている。

また、この超高性能のデータベースエンジンを核とする戦略的サービスの実証・評価については、平成 23 年度のフォローアップ時と比較して大幅な進捗があり、特に、

医療サービス分野における実証実験およびその評価に関する研究開発が展開された。これら戦略的サービスの実証・評価については、実データの提供機関を探るところから始めなければならず、相当な困難が予想されるにもかかわらず、中間評価後も着々と研究開発が進行し、社会的にも意義ある結果が得られていることは、本研究課題の推進に関する卓越性を示すものと評価できる。

以上より、世界をリードする研究開発が展開されており、またプロジェクト終了時に、世界のトップ水準の成果になることが十分に見込まれる。

- 現行ソフトウェアと比べて、ペタバイト級データベース環境における主要な解析系問合せ処理を 1,000 倍も高速化するポテンシャルが確認されており、世界トップ水準の成果が達成されることが確実である。

ビッグデータ処理・活用は保険医療から国防技術に至るまで、国民の幸福・安全に極めて重要となりつつあり、当分野における世界最先端の技術開発を推進し、成果を創出してきた意義は非常に大きい。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 従来型ソフトウェアに比較して、700 倍の高速化に成功し、さらに 1,000 倍の高速化を達成しようとしていることから、事業の進捗状況は順調であると判断される。一方、当該事業における研究開発、特に強化費と平成 25 年度予算執行が物品費に大きく偏っていることから推察されるように、この事業が製品開発助成になっているのではないかという疑問が残っている。

- 当初申請予算から交付予算がかなりの縮減のもと、基づくシステムからの高速化の数値を当初の 1,000 倍から若干下げたものに設定せざるを得ないところもあったが、最終的にその 1,000 倍を実現しており、震災・タイ水害（IT 生産拠点での災害）などもあったところを、種々の工夫・機動的対応で克服している点は非常に高く評価できる。最終年度の自己評価書提出段階で、かなり所期達成目標に近い数値が達成されており、外挿することにより十分年度内に所期目標の達成が可能であると判断できる。

- 23 年度までに 300 倍までの性能向上が達成された。その後の 700 倍の性能が確認され、課題終了までに 1,000 倍の目標達成が可能だと思われる。

- 研究は順調に推移しており、所期目標の達成が可能であると考えられる。

データベースエンジンの開発では、すでに 700 倍の高速化を実証している。また、CPS（サイバーフィジカルシステム）応用についても、共通基盤技術である行動識別、匿名化、圧縮などの開発に成功しているほか、具体的な応用への展開も順調に行われていると判断される。

- 本研究課題の達成状況は順調である。平成 24、25 年度には既に従来のソフトウェアと比較して 700 倍を超える高速性を達成したほか、プロジェクト終了時までに 1,000 倍を達成することが確実になっている。当初の計画より前倒しで、平成 24 年 5 月には、

協力企業により研究成果を柱とする戦略ソフトウェアの製品化に成功し、複数の大手企業と導入に向けた実験が進展している。応用層の共通基盤要素技術の開発についても、医療サービスを中心に予定通りに進捗している。

所期の目標達成見通しについては、目標達成が可能と見込まれる。最先端プログラム全体の予算の削減、さらにはタイにおける洪水によるディスクドライブ供給が滞ったことなどによって、ソフトウェア自体は 1,000 倍の性能向上を達成するものを開発しつつ、中間評価における自己評価シート記載時点では（本プロジェクト終了時において）800 倍程度までの実証に止まることが予測された。しかし、平成 24 年 3 月 29 日の米国オバマ政権のビックデータ・イニシアティブ構想発以来、該当分野の研究開発が大きなブームとなり、大規模ストレージマシンの市場投入が急速化し、ディスクドライブの価格低下の傾向が顕著になってきている。そのような追い風を受けて、このままの状態では当初の予定通り、期間内に 1,000 倍の実証が現実となってきている。

一方、該当の高性能のデータベースエンジンを核とする戦略的サービスの実証・評価については、平成 23 年度のフォローアップ時と比較して大幅な進捗があり、特に、医療サービス分野における実証実験およびその評価に関する研究開発が展開された。中間評価後も継続して、社会的にインパクトのある戦略的サービスの実証・評価実験が推進されてきており、その成果が期待できる。

- 研究の進捗状況に関しては、極めて順調である。23 年度までに従来比 300 倍の高速性能が実証された。また本技術に基づき、従来比 100 倍の性能のソフトウェア製品を市場に出せた。

所期の目標達成に関しては、25 年度成果として 1,000 倍の性能が実現できることが確実視される。1,000 倍達成の課題が数万の非同期入出力の処理方式であることを解明し、対策を推進中である。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 今後の半年間で明らかにしていただきたい点を記載する。

[1] 超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発

当初予算の削減により高速性の目標値が 800 倍になっていたところ、ハードウェア市場動向の変動に対して機動的に研究計画を調整したことで、目標値を上積みし、1,000 倍にできたとのこと。柔軟な計画変更は FIRST 事業ならではのものではあったと思われる。一方、そこにはハードウェアの増強だけではなく、何がしかの技術的なボトルネックの解消があったのではないと思われる。この点が明らかになることによって、当テーマの必要性が示されることと考えられる。

[2] 超巨大サイバーフィジカルシステム基盤のための情報創発技術とその戦略的社会展開

従来技術に比べ 100 倍高速な匿名化技術の開発に成功したとのことだが、100 倍の高速化によって本質的に変わることはあるのか？また、退院の遅延要因に関して、従来の手法では発見できなかった要因を発見するに至ったとのことだが、実際にどのような改善が医療現場に期待されるのか？これらを明らかにしていただくことに

よって、当テーマの有効性が明らかになるものと思われる。

○ サブテーマ 2 については、FIRST プロジェクトの過程では、予算削減のしわ寄せもあり種々検討点があったところであるが、中間評価においても実世界との接点の重要性を指摘され、それに応じたセンサーデータ解析などでメタ学習技術を適用することにより実用に耐える成果を挙げるなどしており、またサブテーマ 2 のチームの匿名化・圧縮検索などの個々の成果も着実に上がっており、総合するとソフト面での高速化・実現可能性を高めることに成功しており、目標を達成しているといえる。

○ [1] 超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発
本課題の最重要テーマである。本課題によりマルチコアプロセッサの活用が可能になり、予定通りの性能を持つデータベースエンジンを完成させた。これにより 700 倍の目標高速化が達成された。

[2] 超巨大サイバーフィジカルシステム基盤のための情報創発技術とその戦略的社会展開

データクラスの識別を進める上でメタ学習技術を開発することにより、識別率を 30%から 70%に向上させる事に成功した。その他にも新アルゴリズムの創案により、高速な読み書きが可能になった。

○ 研究は順調に推移しており、所期目標の達成が可能であると考えられる。

メインのサブテーマである、「超高速データベースエンジンの開発」においては、H23 年度までに、機能限定版ながらマルチコアプロセッサ資源を有効に使った非順序型データベースエンジンの開発を実施し、約 300 倍の高速化を達成している。その後、更なる高速化と本格的なソフト実装を目指して研究を進め、700 倍を超える高速化に成功している。1,000 倍を達成するには数万規模の非同期入出力を滞りなく処理する必要があるが、研究の遅延はなく、達成できると思われる。

「GPS 共通基盤技術とその戦略的な社会展開」テーマについては、当初、予算の関係から大幅な縮小を余儀なくされていたが、データ分析技術では、「メタ学習技術」の開発や「密度比推定に基づく転移学習」などの新手法などを考案し、情報匿名化技術では、100 倍高速な k 匿名化手法の開発など、革新的技術の創出に至っている。さらに、アプリケーション実証でも、保健医療、農業、経済などの各分野で GPS シナリオの構築を進めており、プロジェクト終了までに複数の実社会サービス実証を達成できるものと見込まれる。

本プロジェクトにおいて、超高速データベースエンジンの開発（サブテーマ 1）が肝であるが、その有用性を示すためには、GPS での実証研究（サブテーマ 2）が必要になる。

○ 二つのサブテーマの進捗状況および所期の目標達成が可能については、特段の問題はない。

二つのサブテーマの関連については、サブテーマ 1 によって、超高性能のデータベースエンジンを開発し、サブテーマ 2 でその開発エンジンを用いた社会応用のための基本技術の構築と、さらにそれらを統合的に用いた社会的応用を戦略的に展開していくことが計画されている。FIRST の趣旨からも、単なる基幹技術のみでなく、社会的な

課題の解決に向けて、戦略的なサービス展開を考えることは非常に重要であり、その両輪を二つサブテーマで実行することは必要かつ有効である。

なお、社会応用のための基本技術の構築については、サイバーフィジカル(CPS)においては、データ分析技術が要となるが、データを予め定義したクラスに識別する分類問題を対象に、「メタ学習技術」に挑戦して大きな成果を得ている。また、CPS では、情報匿名化技術が欠かせないが、このテーマに関しても新たな卓越したアルゴリズムを提案しており、サブテーマの革新的 CPS 共通基盤技術においても部分的には世界トップレベルの革新技术創出に至っており、期間内の目標達成も十分に見通しが立っている。

- サブテーマ1であるデータベースエンジンの高速化は定量的に成果が実証されてきており、最終目標も実現確実である。

サブテーマ2のサイバーフィジカルシステム(CPS)共通基盤技術開発と先進的応用分野における CPS シナリオ構築が、保健医療、農業、経済の各重要応用分野において進行中で、最終目標も実現確実である。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 研究実施・推進体制および知的財産権については、専任の知財戦略担当者が着任している一方で、特許出願、プログラム著作権の件数がやや少ない状況にある。平成24年度について言えば、全件PCT出願に留まっている。27回開催されているという知財戦略会議の活性化を指摘しても良いのではないかと考えられる。

成果の社会還元については、事業の残り半年間で、特に、非順序型実行原理に基づいて開発されたソフトウェアのオープンソース化事例が出ることを大いに期待している。

- 知的財産権については、国際特許申請を基本とし、十数件という多数の申請を実現している取り組みは賞賛に値すると思われる。

成果の社会還元については、日立による製品展開による大規模企業に対するインパクトに加え、オープンソースソフトウェアとしての展開も推進して中小規模企業でのオープンソースを通じた波及効果をもたらし、さらにオープンソースのサポートのための東大拠点のベンチャーも設立されているなど、非常にしっかりとした取り組みがなされている。

- 研究実施・推進体制については、研究ユニット間の連携の体制もできており、出口指向を補強するための体制改良など、適度な対応も取られており問題ない。

- 研究実施・推進体制については、とくに大きな問題はないと思われる。実社会での実証研究では、機敏に体制を強化していることは、良い点。

知的財産権については、熾烈な競争領域であるため、戦略的な特許出願を心がけており、人員の強化、訴訟リスクなども想定した優位性確保の検討、知財の活用を意識

した一元的な管理などは優れていると思われる。

若手研究者の育成については、大学において、若手研究者が中心研究者の指導を直接受ける体制になっている。また、若手研究者を積極的にステアリング委員会や特許委員会に出席させることにより、研究から出口までが見られる人材の育成に配慮しているのは良い点と思われる。

- 研究実施・推進体制については、サブテーマ 1 では、中心研究者である喜連川優（東京大学）の統括のもと、喜連川教授の主催する研究グループと、我が国で唯一本格的なデータベースソフトウェア製品を開発している日立製作所が連携して、超高速データベースエンジンの開発が進展している。サブテーマ 2 では、上田修功（国立情報学研究所（NII）・客員教授、NTT コミュニケーション科学基礎研究所・元所長/上席特別研究員）の統括のもと、NII を柱とし、6 大学、2 研究所、1 企業の強力な連携体制のもとで、GPS 応用の創出を目指した情報創発技術の研究が進められている。

以上のことに加えて、中間評価後にもいくつかの研究実施・推進体制に関する新たな取り組み、改善がなされており、特段の問題はない。

知的財産権については、特に優れている。本研究課題に関する基幹技術に関する特許が、日本、米国で登録されたことは大きな成果と言える。また、関連特許を含めると国際 15 件、国内 4 件の知財を出願し、既に国内 2 件は登録に至っている。さらに、研究成果に基づき実際に協力企業により製品化が行われ、プロジェクト期間内に大学発のアイデアに基づく知的財産権が実際に活用されるにいたっていることは特筆すべきことである。

- 研究実施・推進体制については、6 大学、2 研究所、1 企業の体制が明確に構築され、推進されている。

若手研究者の育成については、中心研究者の研究拠点に 17 名の若手研究者を集約して研究グループを組織、設計と実装を推進していて、世界トップレベルの研究成果が既に達成されている。

研究課題名	強相関量子科学
中心研究者名	十倉 好紀
研究支援担当機関名	独立行政法人理化学研究所

1. 研究課題の概要

本研究課題は、強相関電子（固体中で強く相互作用する多電子系）のもつ多自由度の絡み合いと、「波動」の持つ非局所性・剛性・敏感性を、よくデザインされた「電子の感じる時空構造」の中で巧みに生かすことによって、省エネルギー・創エネルギー・送エネルギーに関係した夢の極限的機能、すなわち、超低消費電力エレクトロニクス、超低損失エネルギー輸送、超高効率エネルギー変換等の実現への道程を学術的に明らかにすることを目指している。

本研究課題は、以下の3つのサブテーマから構成されており、それぞれのサブテーマにおいては以下のような研究開発を行うとしている。

[1] モットロニクス基礎

光・電場制御モット転移、強相関光発電、電界誘起超伝導を到達目標として、強相関電子系の金属-絶縁体相転移（モット転移）を高速の状態変数スイッチとして活用する電子技術学理を構築する

[2] 強相関創発物性

新原理熱電材料、巨大電気磁気効果、電荷・軌動秩序の動的機能を到達目標として、強相関電子の多自由度（電荷、スピン、軌道）による創発性によって、電気-磁気-熱-光の作用と応答の相関を巨大化するための物質学理を構築する

[3] エネルギー非散逸性電子技術原理

トポロジカル電流機能、量子多重秩序の完全解析、超構造超伝導を到達目標として、散逸を伴わないトポロジカルカレント（スピン流、分極流）に基づく量子状態操作の原理を構築する

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 当事業の成果を学術的観点から評価した場合には、間違いなく世界トップ水準にある。数多くの Science、Nature 関連誌ほか、インパクトの高い学術誌に研究成果が掲載されており、質量ともに十分な研究成果の外部発表が、世界をリードする研究開発が行われていることを端的に示す証拠となっている。

補足資料によると、ほとんどの研究項目が平成 25 年度まで継続されるという計画に見直しされている。このことについては、限られた予算内でテーマが発散していると評価するのではなく、本事業によって強相関電子系材料の様々な新奇物性が明らかに

なったことによるものと評価した。

- 中間評価でも高い評価を受けたプロジェクトであり、中間評価後のジャーナル論文数も従来をしのぐものとなっており、まさしく強相関量子科学をテーマとする世界に冠たるプロジェクトであり、その研究成果で十分な優位性を理解できる。

- 数十 nm の薄膜を用いて室温でスキルミオンを実現したことに端を発し、新しい素子の物理の解明と、これを用いた超低電流のメモリ素子等実用へ向けた研究開発が一気に展開された。これはこの現象自体を発見した本研究代表者が世界をリードする研究であり、その成果は世界の注目するところである。更にはモット転移を用いた素子、モットロニック素子の開発も含め、強相関電子系を用いた先端的研究を展開している。

- 世界をリードする研究開発が展開されており、すでに世界トップ水準の成果を数多く挙げている。プロジェクト終了時にも、世界のトップ水準にあることが見込まれる。

本研究プロジェクトの目的は、「超低消費電力エレクトロニクス」「超低損失エネルギー輸送」「超高効率エネルギー変換」の実現に向けた道程を学術的に明らかにすることにある。強相関係の特徴を網羅するために、「モットロニクス基礎」「強相関創発物性」「エネルギー非散逸性電子技術原理」の3テーマを設定し、各テーマ間の強い連携を前提として研究を進めている。

成果の客観的なデータとしては、本プロジェクトからの論文投稿に顕著に現れている。最も権威があり、論文インパクトファクターが最高レベルの Nature 系専門雑誌に数多く投稿し採択されている(28報)。論文の平均インパクトファクターが7.2であり、驚異的な数字と言えるだろう。16報については、被引用件数1%論文になっており、我が国の研究レベルの牽引に一役買っていると言えよう。

中心研究者への Nature Conference 組織の依頼は、当該領域における FIRST の活動成果が高く評価されていることの証左でもある。

- 本研究課題は、プロジェクト終了時には世界のトップ水準の成果になることが十分に見込まれる。本研究課題の所期の目標は、『固体中で強く相互作用する多数の電子は、多くの驚くべき物性・機能応答の創発(emergence)を示す。これら強相関電子のもつ多自由度の絡み合いを制御して、エネルギーの高効率変換やエネルギー消費を伴わない量子状態(情報)の制御など、未踏かつ革新的な電子物性機能を創製することを目指す。』ことである。このような研究開発が実現すれば、「省」エネルギー、「創」エネルギー、「送」エネルギーに関係した夢の極限的機能、すなわち、超低消費電力エレクトロニクス、超低損失エネルギー輸送、超高効率エネルギー変換などの実現への道程を学術的に明らかにすることが可能となる。このような社会的有用性に資する基盤的学問としての強相関量子科学の研究は、国内外で鎬を削って行われており、世界的に激しい競争が行われている重要な研究分野である。そのような厳しい状況の中で、本研究課題の卓越した研究成果が、Nature およびその姉妹誌、Science 誌などに中間評価後も継続的に掲載されており、また、それらの公表論文の被引用数のデータなどから世界をリードする研究開発が展開されていると高く評価する。

- 平成 25 年 9 月末までに本研究課題「強相関量子科学」の成果として Nature 及びその

姉妹誌 28 報、Science 誌 7 報を含む論文 332 報を発表。平均インパクトファクター 7.2 と極めて高く、世界をリードするトップ水準のものであることを示している。さらに本研究課題の最終締め切りとして、平成 26 年 1 月に FIRST の成果と今後の展開を俯瞰する国際シンポジウムの開催が決定している。最終年度に向けて、FIRST ならではの 3 つの分野からのシナジー的な大きな研究成果が得られることを期待する。

また工学分野や産業界との実用をターゲットとした議論を更に進めていただきたい。研究のみならず優秀な人材育成も含めて、わが国への経済的な貢献を具体的に示していただけることを期待する。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 強相関電子系材料の様々な新奇物性を明らかにし、世界をリードする研究成果を上げるという観点からは、事業計画は全く問題なく順調に推進されている。所期の計画では、研究項目の進捗見通しが悪い場合には適宜見直すことが記載されており、その意味からも目標達成がなされないということは無いと考えられる。
- 自己評価書の図 2 に設定目標と現在までの成果がまとめられている。対応する文章では、各論文成果がまとめて述べられており、図 2 の目標は十分に達成されているものと認識できる。
- 個々の研究者が大本の共通原理から様々な応用分野に展開しているという、分野の特性と開発研究フェーズ特有の状況かもしれないが、個別のテーマ全体を貫くような戦略が見えにくい。大きなプロジェクトなので、研究総括では、まとめ方を工夫されることを勧める。
- 所期の目標は、強相関量子現象の深化、創発物性の体系化を行い、未来のエネルギー技術・環境技術の革新の起点を開拓することにある。サブテーマ間の緊密な協調をベースとし、出口を見据えた技術課題として、①スキルミオニクス、②モットロニクス、③トポロジカルエレクトロニクス、④マルチフェロイクス、⑤エネルギー変換、の 5 課題を抽出している。各々のサブテーマで着実な進展を見せており、全体として順調に進捗していると認められる。また、所期の目標は十分に達成可能と判断される。
- 研究の進捗状況については、中間評価後も卓越した研究成果の公表は継続的に増えており、平成 25 年 9 月までに本研究課題の成果の総計として、Nature 及びその姉妹誌 28 報、Science 誌 7 報を含む論文 332 報（和文誌等含む）の発表がなされている。これらの論文の平均インパクトファクターは、7.2 と極めて高い数値になっている。これは、世界的に認知された物理系、応用物理系の専門誌 Phys. Rev. Lett.、Appl. Phys. Lett. のインパクトファクターがそれぞれ 7.4、3.8 であることを考えると、本研究課題の成果が世界をリードするトップの水準のものであることを示している。また、これらのうちの 16 報は被引用数トップ 1% の論文になっており、その水準が極めて高いことを明瞭に示している。以上のような状況からも、これまでの研究の進捗は順調である。

所期の目標達成については、中間評価後も卓越した研究業績を継続的に公表していることに加え、平成 23 年度のフォローアップで指摘された知的財産権獲得に関する体制的整備、さらに企業との連携・共同研究に関する取組も開始され、社会還元への道筋の確立も順次図られつつある。このようなことから、所期の目標達成が可能と見込まれる。

- 研究の進捗状況については、モットロニクス基礎、強相関創発物性、エネルギー非散逸性電子技術原理の 3 つのサブテーマに対し、理論設計、物質合成・物性評価、量子ビーム計測の 3 者を戦略的・統合的に重畳することによって、高い水準の成果を創出する方針が浸透し、チーム間、テーマ間の垣根を取り払ったコヒーレントな研究スタイルが確立しているため、世界的にも高レベルである論文が輩出されており、これまでの研究進捗状況は順調である。

所期の目標達成については、3 つのサブテーマの出口は(1)スキルミオニクス（次世代磁気メモリ）、(2)モットロニクス（ReRAM）、(3)トポロジカルエレクトロニクス（超低消費電力エレクトロニクス、超低損失エネルギー輸送）、(4)マルチフェロイクス（電場による磁気情報操作可能なデバイス）、(5)エネルギー変換（太陽光発電、熱電変換技術）のいずれかに収斂させるよう明確に位置付けられており、実用的にも高い価値が見込まれる。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 事業の残り期間が半年になった現時点で、各サブテーマ実施の必要性和有効性を評価することは適切ではないが、当事業の残り半年間で、その推進を大いに期待したい個別テーマを挙げて必要性の評価に換える。

サブテーマ 2：「強相関創発物性」

平成 24 年度実施状況報告書には明確に記載されていないものの、事前に提出された資料（及び東京大学工学系研究科のホームページ）によると、 Bi_2Te_3 と同等の電力因子を備えた熱電材料の開発に成功したとのこと。この成果は、当事業における研究成果の社会還元を強力に推進するものである。当事業期間内において重点的に研究開発を進めるとともに、関係する材料及び技術の権利化（特許出願）を早急に進める価値のある成果であると評価している。

- 三つのサブテーマ、「モットロニクス基礎」「強相関創発物性」「エネルギー非散逸性電子技術原理」において、個々には大変高い成果が得られており、総体として本プログラムで期待された成果を十分出している。

- サブテーマである、「モットロニクス基礎」「強相関創発物性」「エネルギー非散逸性電子技術原理」は、中心研究者のリーダーシップのもとで強く連携し、新現象の発見とその深堀研究を行っている。当該分野において、世界トップレベルの成果を上げており、各サブテーマが有効に機能していると認識される。

中間報告からの主な一部成果（出口を意識した成果まとめ）は以下のとおり。

スキルミオニクスでは、スキルミオンの実空間観測を行うとともに、メモリ素子の

基礎的な理解に向けてスキルミオンの外場駆動の研究を行った。

モットロニクスでは、強相関酸化物と電気二重層を用いたFETを開発し、1Vという低電圧での電子相転移を室温で誘起することに成功した。

トポロジカルエレクトロニクスでは、理論・実験の両面で、数多くの最先端成果を挙げており、表面・界面電子状態の観測と設計・制御の学理を構築している。

マルチフェロイクスでは、電場磁化反転を実現した鉄酸化物において、磁場でPE曲線を電場軸方向にバイアスできるという新現象を発見している。その他にも、多彩な成果を挙げている。

エネルギー変換では、太陽光発電として、モット転移を活用して1光子から多数の電子正孔対を外部に取り出す多重生成機構などの研究を進めている。多重キャリア生成機構の量子シミュレータを構築し、また、増幅電流を外部に取り出す手法などを明らかにしている。

- 各サブテーマは順調に進捗しており、今後の研究開発により、所期の目標達成が可能と見込まれる。

本研究課題は、三つのサブテーマである「モットロニクス基礎」、「強相関創発物性」、「エネルギー非散逸性電子技術原理」で構成され、これら三つのサブテーマの下で世界最先端の理論、物質合成評価、量子ビーム計測技術を戦略的・組織的に重畳して強力に推進されている。このような観点から、上記の研究課題全体の研究の進捗（達成）状況は、三つのサブテーマの総合的な成果によるものである。

- 以下の研究戦略により各サブテーマとも良好に進捗、所期の目標達成見込み。

サブテーマ1：①光・電場制御モット転移、②強相関光発電、③電界誘起超伝導に理論設計、物質物性、先端計測の研究手法を重畳。

サブテーマ2：強相関電子系において創発する広範なスピン・電荷・軌道・格子秩序とそこから生じる電気-磁気-熱-光に関する巨大交差相関応答の基礎的学理を構築し、電子デバイスの革新へとつなげる。

サブテーマ3：①トポロジカル絶縁体、ラシュバ物質等のトポロジカルバンド構造と物性、②スピントクスチャ等の実空間トポロジカル構造と非散逸性電流、③誘電体、磁性絶縁体における分極電流、熱流の機能開拓に対して、理論設計、物質物性、先端計測の手法を統合。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 知的財産権に関する取組については、特許出願件数が順調に増えていることは、中間評価時の指摘事項に適切に対応していると判断される優れた点である。特に、熱電材料に関する特許出願を強力に推進すべきである。一方、国内出願に比較して、国外への出願件数が極めて少なくなっていることが課題と考えられる。熱電材料に関しては、PCT出願でもよいので、早急な対応が求められる。

若手研究者の育成状況については、積極的に民間企業から若手研究者を受け入れていることが高く評価される。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、強相関有機デバイスに関して、民間企業との間で、特許の実施許諾契約を締結したことは、本事業がアカデミックサイドに軸足を置いていたことから考えて、特筆に値する優れた取組であると評価できる。

科学・技術対話の取組については、積極的に成果発信がなされており、FIRST プログラムのプレゼンス向上にも貢献している。

- 知的財産権に関する取組については、特に問題がない。中間評価における指摘にも対応している。

若手研究者の育成状況については、理研東大連携講座という仕組みを通して、大学での研究活動を実現している。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、理化学研究所でのセンター設立も中心研究者が主体となって行われ、社会還元へつなげる核ができています。また、産学連携で知財も活用した取組も行われている。

- 研究実施・推進体制については、中間評価時の助言を受けて、サブテーマ間の交流を高めるべく努力をしておられる。

知的財産権に関する取組については、新たに企業からの人材も得て、2名の専任スタッフを置いて強化に努めている。

若手研究者の育成状況については、定員の研究者への就職と共に循環が進んでいる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、成果を特許取得に結びつける努力をしている。

科学・技術対話の取組については、分野の特性から容易ではないと思われるが、プログラム自身で一般社会への紹介イベントなどの努力を勧める。

- 研究実施・推進体制については、特に問題は認められない。中心研究者のリーダーシップで、3つのサブテーマに分けながらも、理論・材料・物性・先端計測の研究を横串的に行うことで、チームの垣根を越えた連携研究が行われ、数多くの一流の成果を上げていることは特筆に値する。

研究支援体制については、必要な機能が組織化され、研究支援が実効的に運営されている。

知的財産権に関する取組については、大きな問題は認められない。中間評価後に、指摘を受けて2名の知財人材を採用し、パテント動向調査、パテントマップ作成、特許戦略の策定を行っており、特許出願を増大させたことは優れた取組と言える。

若手研究者の育成状況については、特に問題は認められない。若手研究者を積極的に登用して、研究の第一線を担わせており、また、育った若手は大学・研究所に上級ポストを得て転進している。若手の育成と流動化に配慮している。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、適切な対応を検討しており、特に問題はないと認められる。本プロジェクトの成果は、新たに設立された理研「創発物性科学研究センター」において、応用展開し、社会還元につなげる計画。電機会社、化学会社、自動車会社とも連絡を取り合い、応用可能性を議論している。実用化までは、時間と更なるブレイクスルーが必要と思われるが、我が国発の基礎研究や発見が、より多くの新デバイスにつながることを期待したい。

科学・技術対話の取組については、特に問題は認められない。専門研究者の国際会議での発表以外に、一般市民を対象にしたフォーラムや、展示会での講演などを行っている。また、プレスリリースも 28 回行っており、成果の発信に寄与している。

- 研究実施・推進体制については、特に問題がないと考えられる。本研究課題が、国際的に顕著な成果を挙げることができたのは、研究実施・推進体制が上手く機能した成果と評価できる。すなわち、課題全体の研究テーマを三つのサブテーマに分けながらも、量子設計理論、物質創製・物性開拓、先端量子計測の手法を戦略的・包括的に重畳させて研究を行うというスタイルを採用することにより、研究手法間、チーム間、サブテーマ間の垣根が取り払われ、横断的な連携研究が有機的に行われたことに起因すると考えられる。特に、その横断的な連携研究の推進に大きな役割を果たしてきたのが、理化学研究所において毎週行われるミーティングをはじめ、より広範囲なメンバーが集まる筑波地区で開催する合同ミーティング、さらには、年に一度、本研究課題の全研究者が一堂に会する全体会議など、階層的に組織されたミーティング体制であり、その効果は評価できる。ただし、一堂に会する全体会議が、年に一度だけの開催では少なすぎると考える。

研究支援体制については、特に問題がないと判断する。研究支援機関である理化学研究所を中心に、複数の補助事業機関において、研究支援チームを結成し、研究者が研究に専念できる環境の構築が推進されたと判断する。特に、平成 23 年度フォローアップ、さらには平成 24 年の中間評価において指摘された産業応用への道筋の構築については、重要課題・社会的なニーズを踏まえた戦略的研究開発を進めるために、企業との連携・共同研究を拡大すべく、人事的な強化を行い、直ちに支援活動を開始したことは評価できる。

知的財産権に関する取組については、中間評価後、改善されている。本研究課題の国際的に顕著な研究業績からすれば、特許等に関する知的財産権の獲得は非常に重要な課題である。その観点からも、平成 23 年度実施されたフォローアップ、平成 24 年の中間評価における課題または留意点等として、本研究課題の成果を産業へ応用する道筋がより明確化されることにより、産業界の企業研究開発戦略を担う人材層との対話の機会を積極的に設けていくことへの期待が示された。そのための産学連携体制の強化策の一環として、本研究課題のグループ内に 2 名の人材を採用したことは評価できる。このような強化策の結果、特許出願件数が中間評価時の 7 件から 19 件に大幅に増加し、実施許諾契約が成立した特許も 1 件あり、中間評価後の改善が十分になされているものと評価する。今後も積極的な知的財産権に関する取組が展開されることが期待される。

若手研究者の育成状況については、「未来技術アカデミア」事業、「理化学研究所東京大学連携講座」、「強相関理論フォーラム」など通じて、国際的な視野を有する次世代の研究開発リーダーの育成が行われていると判断する。特に優れている点として、これらの若手人材の中から、大学・研究所に上級ポストを得て転進している研究者も多く、若手研究者の育成と人事流動性は極めて良い状況であると考えられる。また、本研究課題に関与する研究者数は、平成 22 年度末の 56 名、中間評価時の 72 名、さらに平成 25 年 9 月には 79 名と順調に推移している。これは優れた研究成果の求心力の証左であり、本中心研究者ならびに研究リーダーの強いリーダーシップのもとに、本研究課題のシステムが良く機能していると評価できる。以上より、若手研究者の育成は十

分に行われていると判断する。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、特に問題はない。成果の社会還元の組織的な取組として、本研究課題による研究開発の期間内に、理化学研究所においては、平成 25 年度からの第 3 期中期計画に合わせて、本中心研究者が主体となって「創発物性科学研究センター」が設立された。そのセンターを中心に、グリーンエネルギー、低消費電力デバイス等々へ、本プロジェクトの成果を応用展開・社会還元することが計画されていることは高く評価できる。今後、本研究課題における卓越した研究成果として導出された新たな原理に、どれだけ多くの企業群が飛びついてくるかが、本研究課題の社会還元が成功するためのキーファクターであり、上記のような強化策が今後大きな効果を発揮していくことを期待する。

科学・技術対話の取組については、中心研究者を始めとして、一般向けの講演会等、科学・技術対話に積極的に取り組み、また、多くのプレスリリース、報道発表もなされている。特に、海外の報道発表も相当数あることは、国際的な情報発信の観点からも高く評価できる。以上より、十分になされていると評価する。

- 研究実施・推進体制については、課題全体の研究テーマを 3 つのサブテーマに分けながらも、量子設計理論、物質創製・物性開拓、先端量子計測の手法を戦略的・包括的に重畳させて研究を行うことにより、研究手法間、チーム間、サブテーマ間の垣根が存在せず、横断的な連携研究を有機的に行っている。

研究支援体制については、理化学研究所、東京大学、産業技術総合研究所、高エネルギー加速器研究機構による研究支援体制が確立されている。

知的財産権に関する取組については、パテント動向調査・パテントマップ作成・特許戦略・知財確保等を人材補強、理研知財部と協働で注力、特許出願を 19 件達成した。

若手研究者の育成状況については、サブテーマ 1 が担当する「未来技術アカデミア」事業における企業から若手研究者を理研・産総研に受入れによる次世代研究開発リーダー育成、サブテーマ 2 が担当する「理研東大連携講座」運営、サブテーマ 3 が担当する「理論フォーラム」における外国人研究者長期滞在及び国際会議・シンポジウム・セミナー実施などにより若手研究者の育成が推進されている。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、理化学研究所では平成 25 年度から本中心研究者が主体となって「創発物性科学研究センター」が設立され、本プログラム成果の応用展開及び社会還元が計画されている。具体的な実用化を議論し、産業界への貢献の具体化が進むことを期待する。

科学・技術対話の取組については、理研主催の科学講演会、FIRST サイエンスフォーラム、ナノテクフェア、中学・高校の出前授業、地域啓蒙活動、理研一般公開等への積極参画を進めている。

研究課題名	宇宙の起源と未来を解き明かすー超広視野イメージングと分光によるダークマター・ダークエネルギーの正体の究明ー
中心研究者名	村山 齊
研究支援担当機関名	東京大学

1. 研究課題の概要

本研究課題は、米国ハワイ島のすばる望遠鏡に改造を加え、超広視野のイメージング用超高性能カメラ（超広視野イメージング）及びロボットを使った自動制御で2,400銀河を同時に観測できる分光器（超広視野分光）の2つを製作することを通じて、宇宙の9割以上を占めるとされる正体不明のダークマター（暗黒物質）とダークエネルギーの性質の解明を目指している。

本研究課題は、「超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究」と「超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究」の2つのサブテーマから構成され、それぞれのサブテーマについては、以下を具体的な研究要素としている。

[1] 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

- ①国際協力体制による2,400銀河を同時観測する多天体分光装置（プライムフォーカスペクトログラフ）の設計・製作

[2] 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

- ①すばる主焦点広視野カメラ（ハイパーシュプリームカム）の製作
- ②同カメラによる銀河大規模観測研究
- ③2億個の銀河の光度・形状に関する詳細カタログの作成

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 宇宙の起源を探るという極めて挑戦的な課題を我が国の研究者が先導することに対して、極めて大きな期待を持っていた。また、すばる望遠鏡に新型カメラを設置してダークエネルギーの存在を明らかにし、さらには超広視野分光器を製作して、ダークエネルギーの増加割合を測定するという目標にも大きな夢がある。

一方、サブテーマ1、2共に、成果発信がほとんどなされていない。平成24年度には学術論文が19件出ているが、実施状況報告書の論文リストには中心研究者の名前はなかった。

世界をリードする研究開発が展開されているか、またプロジェクト終了時に、世界のトップ水準の成果になることが見込まれるかについて、現状では全く判断できない。

- プロジェクトの目標を、今後継続される国際チームによる研究によって設定されている目標であると想定するならば、十分な説得力をもって目標の優位性が認識される。課

題があるとするれば、FIRSTの終了時点での達成目標・達成成果の優位性を検討する際に難点があることである。本プロジェクトは「出口を見据えた研究開発」ではないということで、大本のFIRSTプログラムの設計と関係する課題であるかもしれない。

また、優位性を示すのに、世界動向との比較という点では、巨額プロジェクトであるためか米国の1プロジェクトのみとの比較となっており、その米国プロジェクトが2020年以降になるとして、サブテーマ1の今後の国際チームによる継続研究推進が順調に進んで初めて、サブテーマ1と2をあわせた高精度達成を世界に先駆けて実現できることになる。

○ すばる望遠鏡が世界の大望遠鏡と競争して行けるのは、主焦点カメラによる、サーベイ観測であることが明確になってきている。これをさらに一桁増強した、超主焦点カメラ(Hyper Suprime-Cam: HSC)により10~20年間、世界をリードするデータを提供すると期待される。更に広い視野を持つ事でデータ量は格段に高まる。同時に多天体分光器で銀河の奥行き情報を備える事で他の追従を許さない観測データセットが得られる事、その結果、宇宙の膨張の歴史を解明することが期待される。

○ 本研究プロジェクトは、超高視野多天体分光器(PFS)と超高視野カメラ(HSC)の2つの装置を企画・設計・製作し、HSCによるイメージング(サブテーマ2)とPFSによる分光(サブテーマ1)の両者を備えた銀河の観測を行うことで、正体不明のダークマター(暗黒物質)とダークエネルギー(暗黒エネルギー)の性質の解明を目指している。

サブテーマ1では、PFSの製作終了が、FIRST終了時における所期の目標である。国際共同研究のパートナー構築に時間を要したが、必要不可欠な装置設計にこぎ着けている。サブテーマ2では、すばる望遠鏡搭載のHSCが完成し、良好な初期特性を得ている。ただし、震災や望遠鏡のトラブルなどの外的な要因も大きく、ファーストライトに約1年の遅れが生じている。

全体として当初の計画に対して遅れはあるものの、競争相手の米国LSST(Large Synoptic Survey Telescope)計画の完成は2020年以降となることがほぼ確定しており、本研究分野で世界の第一線から出遅れている日本が、世界トップに出られる可能性は高く、所期の目標の優位性を保っていると認められる。

○ 以下のような二段階のシナリオで推進されている本研究課題は、その目標が達成してプロジェクトが終了した後は、世界のトップに立てることが十分に見込まれる優位性を有している。

1) 宇宙における「暗黒エネルギー(ダークエネルギー)」の解明に関する研究分野で世界の一線から出遅れている日本において、すばる望遠鏡に新型カメラ(HSC)を開発・設置し、約1億個の遠方銀河を観測してその形状を精密に測り、物質(目に見えないダークマターも含む)の重力が光の進路に影響を及ぼす効果を利用して、物質の空間分布とその時間的变化から宇宙膨張の歴史の情報、即ちダークエネルギーの存在と進化の情報を間接的に導き出す。この手法での研究でまず世界レベルに到達する。(サブテーマ2「超広視野イメージング」に該当)

2) その次に、それら銀河の正確な距離情報を得るために、並行して「超広視野分光」において、2,400個の銀河を同時に分光する装置(PFS)の製作を行う。この分光器

を使えば、宇宙初期の「さざ波」が凍結して宇宙空間に無数に貼付いた、いわば固有の「標準物差し (BAO : Baryon Acoustic Oscillation = バリオン音響振動)」までの距離を宇宙の年齢に沿って測ることで、膨張を後押ししているダークエネルギーが増加する割合を測定することが可能となる。ここまできると断然、世界のトップに立てるという目標である。(サブテーマ1「超広視野分光」に該当)

- 本研究の目的とする宇宙の膨張現象の解明は、新しい宇宙像や物理学の基本法則の導出にもつながり、基礎学術上重要な課題である。最先端の広視野イメージング技術と、超広視野分光技術の適用により、宇宙膨張現象の解明が進めば、最先端光学応用技術の物理学への寄与としての意義は極めて大きい。

さらに、高精細撮像技術や、多目標同時分光技術は、宇宙天文学以外にも、航空・国防技術上も極めて重要な技術であり、超広視野イメージングと、超広視野分光における極限までの性能推進を目指す意義は大きい。

FIRST ならではの成果が得られたことを明確にすることを期待する。

超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究に関してはこれまでの研究においては計画より遅延が見られるが、25 年度内には予算執行完了見込であり、プロジェクト終了後にはなるが、観測への実適用が期待される。

超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究に関してもこれまでの研究においては計画より遅延が見られるが、2014 年 2 月から観測開始見込であり、プロジェクト期間内の観測結果取得が期待される。課題目標にもあるように、超広視野イメージングは FIRST ならではの成果として示されることを期待する。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗 (達成) 状況と所期の目標の達成見通し

- 本プロジェクトはサブテーマ1、2の2つから構成されており、最終的には相乗的効果をもたらして多大な成果につながるものの、FIRST プロジェクト期間内においては独立して推進できるものである。

サブテーマ2については、プロジェクト最終年度の最後から2月の段階で、システム納入が実現される見通しで、システム納入をもって目標を達成したとみなすならば、天変地異等のあった状況でここまでの状況に持ってきたことは高く評価される。一方、実際の目標をその納入システムの観測結果によって得られる研究成果獲得とした場合は、プロジェクト終了後の適当な段階で再評価とすることになるかもしれない。

以上の点については、中間評価での指摘に対する解答単体では最終的な評価に時間がかかるというで、プロジェクト側の終了時点での達成目標設定と FIRST プログラム制度の若干のミスマッチであるかもしれない。プロジェクト側がなお一層の説明責任を果たすことも望まれるであろう。

サブテーマ1については、当初よりの全体構想の中で、国際共同チームを構成して、核となる部分の調達を概念設計仕様で可能なもので行うということで、FIRST プロジェクト単体で見たときには成果がその時点で見えない点もある。これはさらに先の適当なタイミングで、成果を再評価する必要性を示しているかもしれない。

- 研究の推進状況は、様々な困難な状況の中で、やや遅れはあるものの、計画は最善を

尽くしている様に見られる。

国際協力を取り付けて、研究開発が進められている。国際協力について拠点長の努力もあるが、しっかりした枠組みができれば、少々の遅れがあっても、世界をリードする成果を産み出すことが十分期待できる。

- 全体として当初の計画に対して遅れがあるものの、国際共同開発の調印といった相手がある交渉の遅れや、すばる天文台でのトラブルといった外的要因を考慮すると、概ね順調に推移していると判断される。

本研究課題は、FIRST 終了後も 5 年程度の観測とその解析が継続される予定であり、本科学分野における日本のプレゼンスを示すとともに、人類にとって重要となる科学発見を行う下地を作るという意味では、目標達成が可能であると思われる。

- 本研究課題の進捗に関しては、これまで国際共同研究のパートナー構築、東日本大震災の影響、さらには望遠鏡のトラブル等で遅れが生じていたが、中間評価以降の進展により、本プロジェクト終了時点までにはその遅れを取り戻せるまでの状況にきていると判断する。

今後、特段の大きな障害がない限り、多少の遅れは生じる可能性はあるものの、これまでさまざまな要因で生じていた遅れを取り戻せる状況にきていると判断する。しかし、特に、サブテーマ 2 で予定されていたイメージング観測とデータ解析を本格的に行うには至っておらず、そのために必要不可欠な装置作製という段階まで留まる現状からは、所期の目標達成は困難と判断する。

- 提出された自己評価資料には具体的な研究成果の記載がほとんどないため、当事業における研究開発の進捗は確認できない。補足資料によると、平成 25 年度において、物品費に約 5 億円、その他に約 5 億円という巨額の予算が投入されることになっていることがわかるが、所期目標の達成見通しが明らかになっていない状況において適正な予算執行になっているのかどうか明らかにする必要がある。

- これまでの研究においては計画より若干の遅延が見られるが、25 年度内には装置作成は完成見込であり、26 年 2 月から開発装置の一部を適用した観測開始の見込みがあることから、プロジェクト期間終了後も含めた研究目標の達成が期待される。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- [1] 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

事前提出資料には、「PFS 詳細設計評価会議を開催し、評価委員会から極めて高い評価と賞賛の声が寄せられた」との記載があるが、概念設計と装置の詳細設計のどこが、どのように優れていたのかが示されていないと評価ができない。

- [2] 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

性能評価のための試験観察が行われ、世界最高レベルの性能が立証されたとのことだが、そうであるならば、従来の観察結果と比較したベンチマーキング等が示されるべきと考えられる。

○ [1] 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

各国の寄与の確定に手間取っていたが、合意に達し、ハードウェアの完成・納入のスケジュールが立っている。ただ、多くの国で開発した機器を組み合わせるため、その I/F など組上げた時に全体として期待通りに機能するかどうかは今後も注意が必要である。

[2] 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

すばる自身の故障、震災の影響、カメラ接合部の変型問題が発生し、First Light は1年遅れが出てしまった。完全な観測運用に向けて必要なプログラムなどを整備して、観測時に役立てる努力がされている。学術的成果の発信が待たれる。

○ [1] 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

PFS 制作に関しては、中心研究者のリーダーシップで、国際共同研究のパートナー構築に成功し、詳細設計を行って、国際的な著名専門家により高い評価を受けるに至っている。また、分光器の基幹部品の調達契約の調印まで至っている。

[2] 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

HSC のファーストライトに約1年の遅れが生じたものの、遅れを取り戻すために、データ解析ソフトウェアの準備体制を拡充している。試験観測の結果、1.5 度角という広視野全面で、結像性能 0.48 秒角という世界最高レベルの精度が得られている。

なお、両サブテーマで作製の装置による銀河の観測は、ダークマター、ダークエネルギー解明の両輪であって、両者が揃うことで初めて有効になる。

○ [1] 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

国際共同研究のパートナー構築に時間を要し、詳細設計の完成が約1年半遅れたが、詳細設計の完了を待たずに、概念設計の仕様で調達可能な、リーディングタイムの長い部位を先行発注することで装置製作の工程を確保することが可能になってきており、必要な調達契約・委託契約に関しては、平成24年度内に遅れを取り戻した。

[2] 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

東日本大震災、望遠鏡のトラブル等の外的要因が主でファーストライトに約1年の遅れが発生した。一方で、データ解析のソフトウェアをパイプライン化する等、観測データ解析の準備を拡充することにより成果達成を加速することが行われてきた。サブテーマ1およびサブテーマ2に関して、以上のように中心研究者の粘り強い国際共同研究のパートナー構築に関する交渉、および望遠鏡作成に関するさまざまな工夫により、今後、特段の大きな障害がない限りにおいて、多少の遅れは生じる可能性はあるものの、遅れを取り戻せる状況まで漕ぎ着けている。ただし、本プロジェクト終了時点までには必要不可欠な装置作製という段階まで止まり、当初予定されていたイメージング観測とデータ解析を十分に行うには至らないと判断する。

○ [1] 超広視野分光によるダークマター・ダークエネルギーの研究

これまでの研究においては計画より遅延が見られるが、25年度内には予算執行完了見込であり、プロジェクト終了後にはなるが、観測への実適用が期待される。

[2] 超広視野イメージングによるダークマター・ダークエネルギーの研究

これまでの研究においては計画より遅延が見られるが、2014年2月から観測開始見込であり、プロジェクト期間内の観測結果取得が期待される。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 研究実施・推進体制については、国際共同研究チームを組織し、機能させるに当たっては、中心研究者のイニシアチブが発揮されたであろうと推察される一方で、事前提出資料の9～10頁に記載されている多数の方々が、当事業においてどのような課題を担当し、どのように解決して、そして、どのような成果が出ているのかが全く記載されていない。当事業の残り半年間で、事業参加者の貢献内容が見えるようにする必要がありと考えられる。

知的財産権については、FIRST資金が原資となって成立した知的財産権に関して、その特許情報が民間企業から得られていないという状況にある。中心研究者は、これが極めて大きな問題であると認識すべきであり、研究支援担当機関は早急に事態の改善を図るべきである。

若手研究者の育成状況については、若手研究者が、当事業においてどのような成果を出してきたのかが明らかになっていないので、たとえ「10人以上のポスドクが就職できている」という説明が事前提出資料にあったとしても、その育成が適正に行われたかどうかを判断することは難しい。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、「出口を見据えた研究開発ではない」と主張されているが、国税が投入されている以上、事業評価時には、「出口としての夢を、わかりやすく語る責任がある」と考えられる。

- 研究実施・推進体制については、FIRSTプロジェクト内部については特に問題ないと思われる。一方、当初より国際共同チームを構成して、FIRST期間を超える長期にわたっての開発を目指していた点については、FIRST期間内での適切なマイルストーン設定がなされるとよかったと思われる。

研究支援体制については、IPMUを核とした研究支援を得て、ここまでの調整・調達を可能としている。

知的財産権については、中間評価後に進めた知財の取り組みで、委託先企業でそれなりの数の特許出願件数が出ていることを確認したということで、評価できる。一方、登録特許・海外出願件数は示されていない。このようなデータの積み上げがあってこそ、ビッグサイエンスの経済波及効果が正しく評価できるのであり、大まかな試算に頼らない説明が望まれる。

成果の社会還元については、社会還元で、科学的成果が得られるのが終了した数年後ということで、この点でのプロジェクト期間内での評価は難しい。

- サブテーマ1の研究実施・推進体制については、分光器部分の開発を多くの国のチームで実施するには、十分な連絡体制、組み合わせ試験計画、それら进行评估するチームなど、しっかりした研究体制とそのコントロールが必要である。今年度末にハードの納入が行われるので、これからのアッセンブルのプロセスをコントロールする体制、

問題発生時の対応の体制を期待する。サブテーマ2の研究実施・推進体制については、現状の体制で問題ないと思われる。

成果の社会還元については、本テーマのための高い技術開発は今後の一般応用に役立つと思われる。

- 研究支援体制については、特に問題はない。中心研究者が機構長を務めるカブリ IPMU では、若手が6割であること、また、国際的なキャリアパスの開拓が行われている。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、FIRST 終了後の観測研究と科学的成果の刈り取りのための、国際研究チームにおける費用分担と人員配置は、チーム全体で分担することが了承されている。中心研究者がカブリ IPMU 機構長として引き続き、国際チームを発展させてゆく計画になっており、問題ないと思われる。

科学・技術対話の取組みについては、高校生を中心とした若手に対して市民講演会を行うなどしており、理科系離れを軽減する一助になっていると思われる。

- 研究実施・推進体制については、特に問題ないと判断する。

まず、研究実施の体制については、サブテーマ1と2の研究組織は分離独立したのではなく、両サブテーマは車の両輪であり、極めて高い補完性・一体性を有する。約50名の研究者、とりわけ中心研究者をはじめとする推進のリーダー役を担う研究者は両方のサブテーマ組織に参加している。このように両サブテーマにまたがって研究を展開することは、大規模観測による本格的なデータ取得・解析の時期にズレがあるため、可能かつ望ましいことと判断する。

次に、研究推進の体制については、平成23年度のフォローアップのヒアリング以降、中間評価までにさまざまな体制強化が図られ、さらに平成24年度においても継続的に推進体制の強化が行われている。

研究支援体制についても特に問題ないと判断する。平成23年度のフォローアップにおけるコメントを真摯に受け止め、さまざまな体制強化が中間評価までになされた。

知的財産権については、本研究課題の資金による委託事業等による知的財産に関する中間評価の指摘を受けて、契約企業等における特許出願状況に関する調査がなされていることは一歩前進したと考える。望遠鏡等に関するメーカーの装置開発は、本研究課題の研究者との共同作業によって推進されるものであり、ある意味では典型的な産学連携活動と言える。その観点からすれば、単に上記のような調査に止まらず、開発装置に関わる知的財産権については共同出願に持ち込むような、より積極的な姿勢で臨むべきである。

若手研究者の育成状況については、中心研究者が機構長である東京大学 Kavli IPMU は、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の実施機関であり、「現代基礎科学の最重要課題である暗黒エネルギー、暗黒物質、統一理論(超弦理論や量子重力)などの研究を数学、物理学、天文学における世界トップクラスの研究者の連携によって進め、目に見える国際研究拠点の形成」を目標としている。この目標は、本研究課題である「ダークマター・ダークエネルギーの正体の究明」と基本的には同一であると考えられる。これまで、本研究課題に関して報告されている若手研究者の育成状況は、国際的なキャリアパスの開拓を含めて優れており、高く評価できる。ただし、それがFIRSTプログラムによる純粋な成果なのか、WPIにおける拠点構築活動の一環として行われているかなどが明確でなく、厳密な評価は難しい。一度、これらの相互の

関係を整理することが求められる。

以上の観点から、若手研究者の育成十分なされているが、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)との関係(棲み分け)をより明確にすべきである。

成果の社会還元の検討状況については、自己評価書には、何ら意義あることは記されていないのに等しく、『村山プロジェクトは「出口を見据えた研究開発」ではない。』と締めくくられている。ただし、このような考え方は、あまりにも狭い視野で「成果の社会還元」を捉えていると考える。本研究課題の場合は、他の課題と異なり、年齢層を問わず「科学に対する夢を与えること」に大きく貢献する可能性を有しており、さらに、中高校生の理科系離れに歯止めをかける大きな役目を果たし得る可能性が多分にある。その観点からは、日本の科学技術立国に向けた社会還元に大きく資することができると思う。

また、本研究課題における極めて高度な技術を必要とする装置開発を実現するに当たって、国内産業が持つ技術の重要性と技術開発へのインセンティブ、および波及効果など、本研究課題が国内産業のイノベーション創出に与える影響は大きな社会還元と考えるべきである。

科学・技術対話の取組みについては、中心研究者らによる講演会、一般向け書籍、ホームページなどを通じて、科学・技術対話の取組みが積極的に行われてきている。

- 本プロジェクトの最も困難な課題が国際協力参加機関の多様な性格であるとの概念設計評価会議指摘への対応として、装置開発に知識と経験を有する研究者を中心に研究推進・研究支援の両方にまたがるプロジェクトオフィスを立上げ、研究課題の整理と装置製作の中心的役割の遂行を行っていることは、計画遅延の拡大防止に寄与していると考えられる。しかし現実的には遅延が起こっているため、その対策を考える必要がある。

研究支援体制については、プロジェクトオフィスがカブリ数物連携宇宙機構事務組織と連携し、研究支援にあたっているが、さらなる体制強化を期待する。

知的財産権については、平成25年9月末時点で特許出願5件を実現している。広視野分光、広視野イメージングとも光学・信号処理に関し、多様な知財発掘の可能性があると考えられ、開発技術の中から更なる特許出願を進めることが期待される。またテーマの性質からして、国際特許の出願を加速すべきである。

若手研究者の育成状況については、約40名の若手研究者が本プロジェクトに従事し、サブテーマ毎のプロジェクト会合においてこれら若手研究者の参加・発表が進められており、若手研究者の育成に寄与しているものと考えられる。

成果の社会還元の検討状況については、本プロジェクト終了後の2.5~3年の装置組上げ・調整・試験・試験観測期間及びその後の5年間程度の観測研究における科学的成果刈取りによる学術成果発表が期待される。

科学・技術対話の取組みについては、FIRST基金による市民講演会、若者への対話型集会等の公開活動は毎月開催されており好評とのことで継続発展が期待される。

研究課題名	量子情報処理プロジェクト
中心研究者名	山本 喜久
研究支援担当機関名	情報・システム研究機構国立情報学研究所

1. 研究課題の概要

本研究課題は、情報、通信、半導体産業の活性化を図るとともに、量子情報処理技術で世界をリードする観点から、主に、世界に先駆けて誤り耐性のあるデジタル量子コンピューターのアーキテクチャを明らかにするとともに、これを実現し得るハードウェア素子からなる小規模なシステムを実証することを目指している。

併せて、次世代の標準技術として光格子時計のシステムの実証、量子通信を支える多者間量子通信プロトコルの確立、単一光子、単一スピンの検出器、非古典光、非古典物質波の発振器を開発等としている。

本課題は、以下の8つのサブテーマから構成されている。

[1] 量子情報システムの研究

- ・動的ボーズアインシュタイン凝縮現象を利用した量子シミュレーション及びアナログ計算、トポロジカル表面コードを利用したデジタル量子計算

[2] 量子計測の研究

- ・光子検出/量子情報処理赤外光源開発、半導体量子ナノ構造による量子計測素子、光重ね合わせ状態を用いた高感度計測技術の開発

[3] 量子標準の研究

- ・光格子時計、高精度周波数リンクによる次世代時間標準の応用

[4] 量子通信の研究

- ・量子マルチパーティ通信、量子インターフェース

[5] アナログ量子コンピューター/量子シミュレーションの研究

- ・光格子中の冷却原子、固体電子系と光の結合系、イオントラップを対象とした量子シミュレーション

[6] 理論の研究

- ・量子情報処理を実現するためのシステムとその基本素子に関する理論

[7] 超伝導量子コンピューターの研究

- ・量子万能ゲートを基にした計算方式、量子ビットの回路方式、アルミ超伝導量子ビット集積回路技術

[8] スピン量子コンピューターの研究

- ・半導体スピン又は分子スピンを基にした小規模量子システム、スピン量子ビットと超伝導、光子量子ビットの結合制御

なお、中間評価での指摘を受けてサブテーマの構成を見直し、平成25年度からは、以下のサブテーマで研究を進めている。

[1] 量子情報システム

[2] 超伝導量子コンピューター

- [3] スピン量子コンピューター
- [4] 量子シミュレーション
- [5] 量子標準
- [6] 量子通信

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見 （有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

○ 当事業においては、量子コンピューター、量子シミュレーション、量子通信網を開発する道筋を明らかにすることが目標として設定されている。どの課題も多くの困難が予想される中、事前に提出された資料に記載されているように、インパクトの高い学術雑誌において多数の成果発表がなされている。世界被引用件数 Top1%論文も数多く、最先端研究開発支援プログラムならではの世界をリードする研究開発が展開され、プロジェクト終了時には世界トップ水準の成果が見込まれると判断する。特に、超伝導量子コンピューター、コヒーレントコンピューター、量子シミュレータに関しては、有意義な動作実証まであと一歩というところまで到達されていることから、当事業の残り半年間における進捗が大いに期待されることとなっている。

○ 事前に提出された資料に本邦発の量子情報処理技術が挙げられているように、日本における研究開発によって、量子情報処理技術で世界に先駆けた成果を出してきており、それが認められた点も FIRST として採択されることにつながっている。FIRST の研究期間において、それをどこまで伸ばしており、それにより世界のリーダーとしてのポジションをキープしているか、そして更なる展望が開かれたかが評価における論点であると思われる。

国際的な競合機関と比較した結果が、自己評価によって与えられている。総じて妥当なもので、リード・競合している状況を達成していることは素晴らしく、高く評価される。

一方、個々の評価の点では8サブテーマが設定されていることから細部の論点が残る。第一に、世界初の量子コンピューターとして喧伝されている D-Wave に関するところで、D-wave の主張どおりの現代コンピューターを凌駕する能力を有しているかは引き続き検証中のところであるため、本研究課題の評価において厳格な比較はできないところではあるが、一つの見方は、数年から10年というスパンで小規模汎用量子コンピューターでなく中規模専用量子コンピューターを目指した D-Wave の戦略は参考になると思われる。例えば、量子シミュレータでは、汎用計算ではなく量子力学のシミュレーションという専用マシンを開発するものであり、そこでの短中期的戦略の立て方に資すると思われる。また、コヒーレントコンピューターで解く最適化問題というのは、D-Wave の解く対象と同じであると思われ、その点ではスケール効果が重要であることが顕在化する。第二に、量子コンピューター・アーキテクチャに関する検討では、ネットワークでの OSI 参照モデルでも明らかのように各層の性能が全体に影響するところで、本プロジェクトのアーキテクチャ提案は優れているものの、一方でこのような

巨大プロジェクト全体で全層がカバーされていたかどうかという観点を顕在化させている。第三に、量子中継での比較に現れているように、総じて量子通信に近い技術開発では競合している状況であり、計算と通信を一体とした量子インフラストラクチャまでを本プロジェクトの範囲内のみで目指せるのか課題である。第四に、物理的 Church-Turing テーゼの否定的解決を目指すコヒーレントコンピューター等の研究は野心的で評価できるものの、その研究が50年前の P vs. EXP パラダイム確立以降の計算数理論の発展に基づく現在コンピューターのシステム・理論を凌駕するのかが解決されているわけではなく、D-Wave の量子コンピューターに関する毀誉褒貶とは全く違った様で、新しい発見として認められる努力を払うことが望まれる。第五に、量子標準のようにそれ自体独立し得るもので、国として優位性を保っていく重要性をもっているものに対して、出口のマーケットまで見据えた検討は本プロジェクト内に余地を残しているかもしれない。研究成果の発表状況には、極めて優れた論文が成果として出ていることから、世界の中で優位性が確保できていることが確認できる。

- 量子情報処理の新しい技術開発を基に、4つの項目でそれぞれ現在のホットなテーマで世界最先端の目標を設定している。

量子コンピューター：量子ビット素子の開発と誤り耐性アーキテクチャの構築により素因数分解、量子化学などある種の周期性のある問題を取り上げて世界をリードしようとしている。

コヒーレントコンピューター：NP 問題を多項式時間のマッピングにより解くことをめざし、コヒーレントコンピューターを開発する。これにより、これまでにないサイズの問題に挑戦する。

量子シミュレータ：新材料の機能を予測するため、量子多体系モデルの中でシミュレーションを実施することになっている。

光格子時計：これまでのマイクロ波を用いた原子時計より5桁高い周波数で実現し、次の世界標準を目指している。

- 量子情報処理に関する研究は、量子力学の根本問題というだけではなく、未来社会を支えるインフラとなる可能性があるため、世界的に注目され活発に研究されている。日本の研究グループはオリジナル技術を数多く出しているとはいえ、米国に比べれば研究者の数は圧倒的に少なく、個々のデバイスや個別技術を大きなシステムにまとめる総合力がなければ、これからの長い研究の道のりで世界のリーダーとしてのポジションをキープできない。本プロジェクトの主な目的は、この点に関する国家戦略の確立にある。

本プロジェクトにおけるメインのサブテーマである「量子情報システム」において、誤り耐性機能をもった量子コンピューターを実現する、5層の階層を持つアーキテクチャが、世界に先駆けて提案された。これによって、各階層における研究の方向が示された意義は大きく、システムの構想で世界をリードしていると考えられる。

本プロジェクトの成果は、論文インパクト係数の大きい Nature 系の専門誌や Physical Review Letters などの一流専門誌に掲載を許可されており、トップレベルの成果を既に上げている。デバイス実現に向けては、量子ドットスピン系、コヒーレントコンピューター、励起子ポラリトン量子シミュレータ、光格子時計などで、世界をリードしており、プロジェクト終了時に、世界のトップ水準の成果になることが見込

まれる。

- 本研究計画の所期の目標（つまり、本研究計画の予算確定時における目標）としてハードルが高く設定されている研究開発が、もし、順調に進んでいたら、プロジェクト終了時において、世界のトップ水準の成果になることは十分に見込まれる。
[留意点] 中間評価時において、所期の目標が書き直されていること、また、サブテーマが所期の5項目の目標に対応していないことが指摘され、中間評価後においてサブテーマの見直しが行われている。

- 本プロジェクトは、本邦発の量子情報処理技術（超伝導量子ビット、電界制御型半導体スピン量子ビット、光パルス制御型半導体スピン量子ビット、コヒーレントコンピューター、冷却原子量子シミュレータ、励起子ポラリトン量子シミュレータ、差動位相シフト量子暗号、光格子時計）を要素技術として、現代のコンピューターや通信網では処理できない膨大な計算や安全な通信を実現する能力を持つ量子コンピューター、量子中継、量子シミュレータ、量子標準を開発する道筋を明らかにすることを目指している。量子コンピューターにおいては5層からなる階層アーキテクチャと、各層の要素技術、想定した応用で必要な量子ビット数、計算時間を推定するとともに、必要な大規模量子ビット数を達成するために固体量子ビット技術に特化し 99.9%のゲートフィデリティ実現を目標とした。このように、従来と異なり、FITST ならではの取組として、開発すべきシステムの全体像を明らかにして、そこから必要な要素技術の目標とアプローチを明確化していこうとされており、最終年度では世界をリードする成果が得られることを期待する。さらに、応用や産業への展開をするには、信号をいかに取り出すか、というシステムの考えが必要であり、量子論でカバーできるかどうかなどの詳細な検討を示していただくことを期待する。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 本事業では、高い独立性をもったサブテーマ運営になっているが、その中であってもコヒーレントコンピューターという新しい概念の提案は、本事業のサブテーマが協調的に機能した結果によるものと評価している。事前提出資料によると、小さなサイズの問題を解くプロトタイプ機を開発すること。平成 25 年度中に、要素技術開発の体制が整備されることを期待する。
事前提出資料には、「本プロジェクトの本当の強みは、世界レベルにある参加グループが一つにまとまって共通の目標を達成しようとする強い意志にある」と記載されている。量子情報技術の開発においては妥当なプロジェクト運営であると考えられる一方、事業終了時には、身近に感じられる、そして、分かりやすい当事業の代表的成果が社会に向けて発信されることを期待している。

- 研究の進捗状況については、FIRST の制度をフルに活用して、中心研究者の計画・取組を組織全体に反映できること、中間評価等を通してプロジェクト側とファンディング側での検討・確認してきたことから、平成 25 年度からのサブテーマの構成見直し等も可能となっている。そこでは、中心研究者のリーダーシップが発揮されていることが

十分認識され、当初計画での分散的組織の課題も克服されている。

所期の目標達成については、上記の再構成の効果もあり、十分に可能となっている。量子標準のように、定量的評価が可能なのはその定量部分から達成を確認でき、他のテーマについては新規構想の構築・新しい方式の開発という点も高く評価できることから確認できる。

- それぞれのサブテーマで進展は見られるが、全体として要素技術のレベルでの成果が多く、システムとして目指したところまで到達した印象が少ない。今後の発展を期待したい。書類上、所期の目標と、現状のサブテーマの構成が入り組んでいるように見られる。
- これまでの研究は、順調に推移していると判断される。全体としては、誤り耐性量子コンピューターの5層アーキテクチャを提案できたことが大きい。これにより、今後の量子情報処理研究の進むべき方向性を打ち出すことができ、所期の研究戦略の方向性を示すとの目標達成が可能と見込まれる。
- 該当分野の競争の厳しい現行の技術動向からすれば、現時点までにすべてのテーマについて、国際的にリードする立場を占めていないと、ハードルが高く設定された所期の目標の達成は困難であると考えられる。このような状況から判断すると、例えば、自己評価書に示された国際的なベンチマークとの比較をしたこれまでの研究の進捗状況において、すべて「リードしている」となっていることが求められる。実際にはそのような状況ではなく、本プロジェクト終了時において、所期の目標である世界のトップ水準の成果を達成することが可能かどうかは確信できない。
- 研究の進捗状況については順調である。これまでの3年半の成果として、Nature、Science、PNAS といった社会へのインパクトが大きい論文が掲載される雑誌に13件、Physical Review Letters、Review of Modern Physics といった学術レベルの高い論文が掲載される雑誌に54件、両者の中間に位置する Nature Physics、Nature Chemistry 等の雑誌に25件発表され、このうち世界被引用件数トップ1%論文が19報、トップ0.1%論文が1報ある。また、研究成果を広く世界へ発信するため、国際会議を平成24年度2回、平成25年度1回開催、平成25年度中にFIRSTの他の2つのプロジェクトとともに国際シンポジウムを開催予定である。これらにより世界レベルの研究開発が行われていることが示される。

これらの実績を基に、今後における研究開発においても所期の目標達成は十分可能と考えられる。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 事業の残り期間が半年になった現時点で、各サブテーマ実施の必要性和有効性を評価することは適切ではないが、どのサブテーマも順調に進捗し、学術的に見て優れた成果を発信していると判断した。本事業の成果が社会に還元されるという観点からは、超伝導量子コンピューター、コヒーレントコンピューター、量子シミュレータの3つ

のテーマが重要と思われる。特に量子シミュレータに関しては、冷却原子ガス、半導体励起子ポラリトンの2つの系で開発が行われており、事前提出資料によると、これら2つの全く異なる系で同じ問題を量子シミュレーションすることが計画されているようである。平成25年度中に、その比較がなされることを期待する。

- 量子コンピューター：量子ビット素子の開発と誤り耐性アーキテクチャの要素、量子ビットとそのもつれ状態の出現などに成功しており、具体的な問題への取組を始めている。

コヒーレントコンピューター：半導体の量子ビットの開発が進み、量子もつれによる中継、コヒーレンスへの道も拓けてきた。

量子シミュレータ：光格子量子と、スピンプローブによる磁力計の開発に重要な成果を上げて来ている。

光格子時計：これまでのものより高い安定度を実現し、必要積分時間を1/50に短縮できた。

- サブテーマ1「量子情報システム」において、誤り耐性量子コンピューターの5層アーキテクチャを提案することができ、未来の研究の方向性が固まってきている。その結果、大規模化が必要との認識から、「量子情報システム」「スピン量子コンピューター」「超伝導量子コンピューター」「量子シミュレータ」へリソースの集中を図った。第1層（物理層）の実現に向けては、光パルス制御量子ドットスピン、超伝導磁束量子ビット、などのスケラブルな固体技術の開発を進め、ゲートフィデリティの改善への道筋をつけた。量子シミュレータでも新たな現象の発見や新たな観測システムの構築など、順調に推移している。

- 現況においては、概して言えば順調に進捗しているようにも判断され、所期目標が不確実ながら達成されるかもしれない、という程度しかコメントできない。

- 研究の進捗状況については、量子情報システム、超伝導量子コンピューター、スピン量子コンピューター、量子シミュレータ、量子標準、量子通信の各サブテーマとも良好な成果を報告しており、順調である。これらの実績を基に今後における研究開発においても所期の目標達成は十分可能と考えられる。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 研究実施・推進体制については、中間評価での指摘を受けて、平成25年度から、サブテーマの構成を見直している。その準備は平成24年度内に行われたはずなので、今回のフォローアップにおいて、意欲的な取組であると評価する。

知的財産権に関する取組については、現時点において、特許出願による権利確保の効果が明確なほどには当該技術が成熟していないものの、有効期限内に大きなブレイクスルーがないとは言えないことから、特許出願は重要であると考えられる。中心研究者によるプロジェクト参加者への知財創出推進のアナウンスなど、意欲的な取組が

なされたと評価した。

若手研究者の育成状況については、当事業に参画した若手研究者は、延べ 602 名という極めて多人数となっている。そして、年に 1 回、中心研究者と分担研究者が 10 日間寝食を共にする夏期研修会が実施されるなど、若手研究者の育成について意欲的な取組がなされている。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、コヒーレントコンピューター（注入同期レーザーネットワーク）のプロトタイプ機開発が計画されており、成果の社会還元に向けた方策が検討されていると判断した。

- 研究実施・推進体制については、平成 25 年度でのテーマ再構成もなされ、中心研究者のリーダーシップも発揮されているところであり、現時点で大きな課題はないと考える。もしかすると、テーマ再構成をもう 1 年早くできると、更なる効果があったかもしれないが、これは単なる予想で確認できないところではある。

若手研究者の育成状況については、他プロジェクトに見られない活発な活動がなされている。一方、これを中心となる幹事機関なり学会なりの組織を構成して、プロジェクト終了後も継続できる体制の構築が望まれる。

知的財産権に関する取組については、国内特許出願はそれなりの数ですが、PCT 出願 1 件、米国出願 2 件は FIRST としてどうかは議論があるところかもしれない。その際には、単なる他プロジェクトとの比較ではなく、対象テーマに関する違いも十分認識されるべきである。

若手研究者の育成状況については、上述のように優れた取組があった。若干、研究プロジェクトという観点から、スポット的なイベントに頼るところがあり、永続的な若手研究支援等は難しい点を感じられる。特に博士課程学生については、スクール等での最新成果獲得・交流だけでなく、連携海外機関での研究その他も期待されるが、それらは FIRST の枠組みでは難しいと思われる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、コヒーレントコンピューターをより実用化が近いものとして記述されているが、その対象とする最適化問題は基本的には D-Wave 量子コンピューターと同じである。D-Wave マシンについては毀誉褒貶がある中で、正当な比較はできないところであるが、そこで公称されている性能を十分に踏まえた上で、それを凌駕するスケールでの実現可能性が十分に検討されるべきである。

量子標準については、ぜひとも世界標準を取るべく取り組まれない。

科学・技術対話の取組については、SSH での講義などよく取り組まれており、問題ない。

- 知的財産権に関する取組については、一定数の特許が出願され成果が上がっている。国内、米国における特許動向調査とパテントマップを作成して申請時の情報として活用されている。

若手研究者の育成状況については、10 日間の夏期研修会で研究者が若手と交流するほか、若手自身によるセミナー等を計画し実施している。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、コヒーレントコンピューターの実用化にむけて新しい枠組みを構築している。

科学・技術対話の取組については、出前授業など「サイエンスアウトリーチ」にま

とめられているように、しっかりと情報発信が行われている。

- 研究実施・推進体制については、特に問題はないと思われる。「量子情報システム」「スピン量子コンピューター」「超伝導量子コンピューター」「量子シミュレータ」ヘリソースの集中を図ったことは、大規模量子ビットのシステムが必要との観点から、適切な対応であると思われる。

研究支援体制については、特に問題はないと思われる。研究推進のための技術参事、人材育成を担う技術参事を置くことは、本プロジェクトが多岐の学問領域にわたっていることを考えると、適切な対応であると思われる。

知的財産権に関する取組については、特に問題はないと思われる。まだ具体的な量子システムが見えていない段階でのプロジェクトであるため、多くの特許を期待することはできないと考える。

若手研究者の育成状況については、特に問題はないと思われる。夏季研修による、大学横断の若手研究者による密なディスカッションの場の提供などは優れた取り組みと言える。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、プロトタイプ機の開発を目指す新体制を模索中であり、期待したい。

科学・技術対話の取組については、小・中・高校への出張授業などで、量子力学を楽しめるよう努めており、高校生のサイエンスキャンプ、市民講座なども含め、科学・技術対話に努めている。我が国の理工離れの歯止めには貢献していると思われる。

- 6つのサブテーマに関連して、非常に多くの研究者（500名以上と考えられる）から構成されている本研究課題の研究実施・推進体制が、FIRSTとして適切かどうかを評価することは重要と思われる。その背景には、「できるだけ広く網を張って成功確率を上げておきたい。」「できるだけ多くの研究・教育機関に研究グループを設置し、高いレベルを維持しておきたい。」という考えがある。「できるだけ広く網を張って成功確率を上げておきたい。」という観点から多くの研究者が関わる実施・推進体制では、5年間でFIRSTが求める成果を得ることは無理のように思われる。加えて、FIRSTは人材育成プログラムではなく、あくまでも最先端の研究開発を支援するプログラムであり、「できるだけ多くの研究・教育機関に研究グループを設置し、高いレベルを維持しておきたい。」という視点についても検討をする必要があると考える。

研究支援体制については、支援機関である国立情報学研究所(NII)が、研究所長を筆頭にFIRSTの重要性を強く意識して、十分な体制を構築していることを評価する。

知的財産権に関する取組については、量子情報処理技術は未だ「本命」が登場せず、どこでもいつブレイクスルーが起こるか予測がつかない状況であるからこそ、可能な限り知的財産活動を積極的に行い、該当分野で我が国が、将来、主導権を取れる体制を確立しておくことがFIRSTの趣旨からも重要である。平成23年度のフォローアップ、さらに中間評価の指摘を受けて、知財創出支援体制を強化がなされていることは評価する。これらの強化策の一環として、中間評価後に、本研究課題に参画しているすべてのメンバーの知的財産権に関する意識改革を促しているが、その動きを継続的に推進することが重要である。

若手研究者の育成状況については、本研究課題では、若手の研究者の育成を重視した事業の推進がなされており、特段の問題はないと判断する。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、上記項目3に記しているように、量子情報処理技術は未だ「本命」が登場せず、どこでもいつブレイクスルーが起こるか予測がつかないという現況では、現実的な使用に耐え得るまでには、長い期間を要すると考えられる。したがって、成果の社会還元に至るのは、相当先のことと判断する。

科学・技術対話の取組については、積極的に優れた取組がなされており、高く評価できる。小、中、高校への出張授業、学校教師へのアウトリーチ、サイエンスキャンプ、市民講座、ニュースレターの発行など、様々な企画がなされ、実行されていることは高く評価できる

- 研究実施・推進体制については、量子情報システムサブテーマでシステム全体を考察し、5つの量子情報技術サブテーマへ研究開発の指針を与える戦略のもと、各サブテーマは年2回のサブテーマ会議を実施。並行して、関東関西にチャプターを形成し、年4回の研究会にて具体的な重要情報を共有するほか、全体会議を年1回開催、中心研究者、領域アドバイザーのコメントが参加研究者に直接伝達される体制が確立されている。

研究支援体制については、研究推進、人材育成、社会連携推進、知財創出の研究支援体制を確立し、年2回サブテーマ会議、年4回チャプター研究会、年1回研修会をサポートしている。

知的財産権に関する取組については、プロジェクト開始以降現時点までに、知財創出支援担当の下、国内出願13件、PCT出願1件、米国出願2件を行っている。知財創出支援担当は量子コンピューター、量子シミュレータに関する国内・米国における特許動向調査、パテントマップ作成を行いプロジェクト内全研究者に配信するとともに、先行技術調査・明細書作成支援を個別に推進し、出願強化を図っている。

若手研究者の育成状況については、本プロジェクトに参加した若手研究者は602名に及ぶので、世界に通用する人材に育成するための組織的体系的な活動として年1回10日間に及び夏季研修会により、講義・ポスターセッション、ディスカッションにより量子情報処理の基礎概念から最先端の実験までを習得する機会を提供している。さらに年4回のチャプターにおいてゼミ研修会・訪問見学会等の活動を推進している。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、NP完全問題を解く注入同期レーザーネットワーク（コヒーレントコンピューター）を現在のフォトニクス技術で実装することが最も実用化に近いテーマである。また光格子時計を平成31年以降に行われる秒の定義に採択させることも目指している。残りの量子コンピューター、量子中継、量子シミュレータについても、プロジェクト終了までに社会還元に向けた研究開発方針と体制を固める計画である。

科学・技術対話の取組については、国民との科学・技術対話活動として、小・中・高校への出張授業、学校教師へのアウトリーチ、サイエンスキャンプ、市民講座等を積極的に推進している。

(5) 機器・システム開発領域

研究課題名	マイクロシステム融合研究開発
中心研究者名	江刺 正喜
研究支援担当機関名	東北大学

1. 研究課題の概要

本研究課題では、これまで困難であったヘテロ集積化（異種要素の集積化）を実現するとともに、その量産技術を開発することにより、高付加価値 MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）量産技術を世界に先駆けて確立する。また、超並列電子線描画装置のプロトタイプをヘテロ集積化により実現することにより、MEMS や LSI の生産技術を革新し、世界の優位に立つことを目指している。

具体的には、MEMS 技術と MEMS の実用化・量産化技術に関する5つのサブテーマを設けて研究開発を進めている。

[1] 超並列電子線描画装置

- ・100×100 配列のナノクリスタル Si 電子源の試作、超並列電子線描画装置プロトタイプ
の試作

[2] ヘテロ集積化初期試作

- ・ウェハへ異種要素を集積化する技術の開発

[3] 試作コインランドリ

- ・次世代微細加工プロセス技術の開発、試作コインランドリ利用者へ提供

[4] ヘテロ集積化量産試作

- ・8インチ以上の大口径ウェハによるヘテロ集積化デバイスの量産試作、プロセス・評価
技術の開発

[5] 高効率 MEMS 融合製造技術

- ・異種デバイス・異種材料のヘテロ集積化デバイスの作成

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 当初の1000×1000から100×100の電子源アレイに変更されたEB描画装置は可能性実証の段階。世界の開発状況と比較して、ヘテロ集積化の具体例として試作した無線関連デバイスは世界的に高い評価を得ている状況から、世界をリードする研究開発が実施されていると評価する。ヘテロ集積量産化試作やコインランドリ等と併せてMEMSの研究拠点として世界トップ水準の成果を継続的に生み出すことが期待できる。当初より困難さが指摘されていた超並列電子線描画装置については、期間内での完成は難しいと思われるが、研究開発のレベルでは世界トップ水準のものになるとと思われる。

○ 「超並列電子線描画装置の開発」や「ヘテロ集積化プロセス技術」、「可変 SAW (surface acoustic wave) フィルタの試作」など、各サブテーマにおいて、世界初ないしは世界最高水準の開発成果が得られており、世界をリードする研究開発が展開されていると判断される。また、全サブテーマについて所期の目標を達成できる見込みであり、プロジェクト終了時には、世界トップレベルの成果が得られるものと判断する。

さらに、本プロジェクトの目的の一つである国内の MEMS 産業の活性化については、「試作コインランドリ」の体制確立により、本プロジェクトの開発成果や大学の研究成果を用いて企業が速やかに製品化できる仕組みを活用し、今後、民間企業から世界をリードする製品が多く生み出されることで、わが国の MEMS 産業の活性化に繋がることが期待される。

○ 本研究課題では、MEMS 技術を発展的に付加価値の大きなシステムに結びつけ、実用化に資する装置や機器の開発を達成しようとする目標を掲げている。サブテーマは 1～5 が設定されており、このなかで世界をリードする研究開発という視点からは、サブテーマ 1 「超並列電子線描画装置」、サブテーマ 2 「ヘテロ集積化初期試作」、サブテーマ 5 「高効率 MEMS 融合製造技術」であろう。その他のサブテーマは、支援技術、拡大技術であり、既に概ね確立している技術の展開である。

事前に提出された資料によれば、上記 3 つのサブテーマとも概ね予定通りに進捗しているとされている。しかしながら、「超並列電子線描画装置」については最終的にどの程度の仕様になるのか明示されていないので、世界水準の成果になるかどうかについては明確に判断できないが、全体の印象としては、今少しの進展がなければ到達は厳しいと思われる。最も重要なポイントは、欧米で開発が進んでいるマルチビーム方式の仕様と比して、どれだけ優位性があるかであろう。欧米のシステムも未だ市場に出る段階ではないと評価しているが、仕様と市場に出せる時期を自己評価して初めて優位性を担保できると思われるので、この点を確認する必要がある。

「ヘテロ集積化初期試作」については、具体的な試作例が提示されており、かなり世界的なレベルに到達していると判断できる。例えば、IC や SAW デバイスの上に高温成膜が必要な機能性材料で構成された微小機械要素を集積化すること、異なる種類の結晶基板を組み合わせることでデバイスを構成すること、異なるダイサイズの異要素をウェハ面積の無駄なしにウェハレベルで集積化することなど、である。

「高効率 MEMS 融合製造技術」については、低ダメージ接合による集積化技術と射出成形を用いた MEMS デバイス作製が重要な要素技術であろう。いずれも当初の予定通りに進捗していると判断でき、かつ期待される機器の開発に結びついており、世界のトップ水準の成果になることが見込まれる。

○ これまで日本がやや遅れを取ってきた MEMS の分野で、大学、公的研究機関と企業が有機的に連携して、世界のリーダーシップをとることを目標としている。事前に提出された資料を総合的に検討した結果、世界トップ水準のデバイス開発が可能になることが大いに期待される。

○ 所見を行う前提として、本課題は、当初より、1) 最先端のマイクロシステムの研究開発と、我が国が遅れをとっている 2) 大学・研究機関と企業の密な連携による最先端製品開発の体制の確立、というふたつの側面があったと認識している。このため、1) に

については、世界をリードする研究開発についての評価であるが、2)については、必ずしもこの基準で判断するものではないと考えるため、そのような視点での評価となっている。

まず、サブテーマ1の超並列電子線描画装置については、当初の1000×1000の電子源の開発はできなかったが、困難な課題に対して新たな技術的な展開を行った点は高く評価される。サブテーマ2で実施した、幾つかの多様化による高付加価値な集積技術、また、サブテーマ5で実施した、印刷と射出成型によるMEMSデバイス作製技術はともに優位性があり、これらの成果は世界トップレベルの成果であると考えられる。サブテーマ3の試作コインランドリは、設備投資なしで企業が大学のノウハウを活用してマイクロシステムを製品開発ができる有効な方策であり、それらを実証した意義は大きい。

本課題は、製造技術についての研究開発であり、成果を企業が製品の製造プロセスで利用可能であることの実証が求められる。このため、企業との共同研究、試作、ノウハウ共有化の仕組みが必要である。一方、このような活動は、評価において、目標達成度を客観的に評価するのが困難な場合が多く、評価が分かれることも多いが、本課題の研究開発は総合的に見て、所期の目標が概ね達成された、と考える。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 当初より困難性が予測されていた超並列電子線描画装置において一部に計画変更や、重要部品の試作上の課題はあったが、他のサブテーマについては個々の目標を達成しつつある他、新しい技術開発や、試作コインランドリのような「実用上の成果を上げているものもあり、全体として進捗は順調と判断する。

超並列電子線描画装置については可能性実証、他のサブテーマについては個々の目標達成がそれぞれ期待でき、世界トップレベルの成果が期待できる。

- 一部の研究項目に進捗遅れがあるが、全体としては、前倒しで進捗ないしは終了した研究項目もあり、ほぼ計画通りに進捗していると判断される。一部、遅れが発生している研究項目についても、遅れの原因となった開発項目はクリアできており、プロジェクト全体としては、所期の目標を達成可能であると判断する。
- 事前に提出された資料の対照表によれば、全体的には、一部試作に難航している例や予定を変更した例や既に所期の目標を概ね達成した例もみられ、概ね計画通り進行していると判断できる。
一部に試作に難航している例も見られるが、技術的に克服可能な内容のものが多く、所期の目的は達成可能と見込まれる。ただし、一部のサブテーマ「超並列電子線描画装置」では、所期の目標設定がやや曖昧であったのか、予定通り進んでも世界をリードする技術となるかどうか不確かな内容もある。
- 5つのサブテーマそれぞれに順調に進んでいると判断される。特にコインランドリが有効に活用されれば、企業からユニークな成果が期待できる。

- 研究開発として中心的な位置づけである、超並列電子線描画装置は当初の計画に対して、順調とは言い難いが、現在までに得られた内容でも大きな進展であり、評価できる。可能なら、今後とも継続して超並列電子線描画装置の研究開発が継続でき、世界をリードできる状況を維持していただくのが妥当と考える。

試作コインランドリ、量産試作については、達成度の評価が困難であるが、導入した機器を活用して、実施者が継続して産学連携の拠点として運営されることが望ましい。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

○ [1] 超並列電子線描画装置

電子源アレイの規模の縮小、加速電圧の変更等があったが、光学系の設計製作と露光実験、露光装置全体の設計等が進められ、結果は学会に発表されている。露光装置のプロトタイプの試作までが期待できる。

[2] ヘテロ集積化初期試作

IC上への圧電型スイッチ、SAW フィルタ・発振器の試作、ICと異材 SAW 共振子のウェファ接合による一体化等、様々な無線通信用のデバイスのヘテロ集積に世界で初めての成果が得られている。選択的ダイ・トランスファ技術の開発等も進んでおり、所期の目標は達成可能。

[3] 試作コインランドリ

ユーザーは日本全国に加え外国にまで広がっており、試作ラインの整備も進んでいる。ゾルゲル法による PZT 薄膜形成やエピタキシャルポリシリコン成膜技術等も開発された。順調に進んでおり、当初の目標は達成可能。

[4] ヘテロ集積化量産試作

マイクロ流体バイオチップ、マイクロリアクタについては量産技術、マイクロ粘性センサは製品プロトタイプ、静電気センサについては IC との集積化等に目処がつきつつあり、信頼性評価技術の量産試作への活用も年度末に予定されているので個々の目標達成は可能と思われる。

[5] 高効率 MEMS 融合製造技術

サイズフリー集積化技術では異形 TEG チップの一括接合転写に成功、大口径貫通配線基板製作技術では 300mm 基板での試作・評価が進んでいる。射出成型と印刷技術による低コスト作成技術の開発により、MEMS ミラーデバイスが試作されている。

○ [1] 超並列電子線描画装置

試作したアクティブマトリクス集積回路の動作不良の原因の究明に時間を要したため所期計画に対しては半年遅れでの完了となる見込みであるが、最終段階である今年度実施の 3rd 駆動 LSI の開発が計画通り完了できれば、プロジェクト終了時において所期目標は達成可能と判断する。

超並列電子線描画装置は、世界的にも類を見ない装置で、実用化できれば LSI 産業に大きなインパクトを与えるものであり、プロジェクト終了後も装置メーカーとの共同研究を継続し、実際に使える描画システムとして完成させることを期待したい。

[2] ヘテロ集積化初期試作

各実施内容のうち2項目は前倒しで研究を終了し目標を達成しているなど、サブテーマ全体としては、ほぼ計画通りの進捗で成果が得られていると共に、民間企業との共同開発により実用化への道筋もできており、最終的に所期の目標は達成可能であると判断される。

また、各実施内容は、いずれも携帯端末や無線通信システムへの応用が期待されるものであり、わが国の MEMES 産業や半導体産業の国際競争力強化に繋がるものであると考えられるため、プロジェクト終了後も企業との共同研究を継続し実用化に繋がることを期待する。

[3] 試作コインランドリ

利用企業が150社にのぼり、試作したデバイスが企業ユーザーにより量産化され、また、試作コインランドリにおける実用化支援の取り組みが評価され経済産業大臣賞を受賞すると共に、試作コインランドリで開発した成膜技術などを他のサブテーマに応用するなど、順調に進捗しており、所期目標は達成可能と判断する。今後、試作コインランドリにより本プロジェクトの開発成果や大学の研究成果を用いて企業が速やかに製品化できる仕組みを活用し、我が国の MEMS 産業が活性化されることを期待する。

[4] ヘテロ集積化量産試作

「実施内容①：ポイントオブマイクロ流体バイオチップの開発」および「実施内容④：マイクロ静電気センサの開発」において、全体計画に対し半年程度の遅れはあるが、ネックとなった技術開発はクリアできており、プロジェクト終了までには所期の目標は達成可能と判断される。他の2つの実施内容については、順調に進捗しており、所期の目標を達成可能と判断される。

[5] 高効率 MEMS 融合製造技術

3つの実施内容について、共に、ほぼ計画通り順調に進捗しており、民間企業との連携により実用化の検討も進められていることから、所期の目標は達成可能であると判断される。

また、全サブテーマは本プロジェクトの研究課題の目標を達成する上では必要かつ有効であると考ええる。

○ [1] 超並列電子線描画装置

事前に提出された資料によれば、順調に推移している。それぞれの個別のテーマについては、計画通りに進行している。最初に設定した目標を下げた結果として、計画通りに進行している内容になっていないか。また、事前資料によれば、本テーマは「きわめて難しいテーマである」との記述があり、「鋭意努力して完成に近づいている」ようであるが、他の欧米で開発中の機器と比較して、仕様の点でその優位性あるいは世界をリードできる内容であるかどうかの判断ができない。

現状では、試行錯誤の上、特に問題となった3rd 駆動 LSI の開発に至ったようであるが、この成果いかんによって、まずは当初の目標が達成されるかどうかの結論に達するであろう。今回の報告書の内容では、明確には判断できない。たとえば、予定通りの進行で、組立が行われたとしても、どの程度の仕様になるのか、提示して自己評価してもらう必要がある。

[2] ヘテロ集積化初期試作

異なる種類の要素で、従来は一体化することが難しかったもの同士をウェハレベル

で集積化することを主眼においており、当初設定した研究項目は計画通り進行し、いくつかの試作品ができ、実証も行われている。具体的には、標準 CMOS IC 上への PZT 圧電駆動 MEMS の集積化および IC と LiNbO₃ 単結晶基板とを組み合わせた実働デバイスなどである。その他、可変 SAW フィルタや集積化 BAW (bulk-acoustic wave) 発信器、集積化可変パワーアンプなどの試作例が紹介されており、順調に進んでいる様子が伺われる。また、中間評価において指摘した内容であるが、初期試作において開発を進めてきたデバイス (PZT 圧電駆動の RF-MEMS スイッチを指すと思われる) を量産試作に橋渡しする事例も生まれてきつつある。

一部 RF-MEMS スイッチを用いたミリ波集積化フェーズドアレイアンテナの原理実証デバイスの試作については、当初計画より遅れているようである。開発において大きな障害となる事項も無いようなので、成果を期待したい。

[3] 試作コインランドリ

中間評価の際も指摘した点であるが、企業参加の開発プロセスとしては大変有用なシステムと内容であり、今後とも有効活用によって我が国の MEMS 技術の開発の効率化と促進につながると思われる。しかしながら、世界をリードする研究開発の展開の視点からは、異質である。このシステムを活用している企業の数も順調に増え、成果も見えているので、一定の評価は与えていいと思う。

目標が「次世代に必要とされる微細加工プロセスの技術開発を行い、企業ユーザー等に提供」し、「企業の製品化」を支援することになっており、この点からいえば、既に目標を達成している。利用する企業数は、これからも増えることが期待されるので、今回のプロジェクトとは異なった目的の支援が必要ではないか。

[4] ヘテロ集積化量産試作

ヘテロ集積化の視点では、既にある程度確立した技術があり、量産試作が重点であろう。その意味では、世界をリードする研究開発の点からは、やや見劣りはするが、実用化の視点からは重要である。技術的に難しい初期試作から量産試作への技術の橋渡し例も出てきつつあるので、所期の目的は概ね達成していると判断できる。マイクロ流体デバイスや圧電 MEMS デバイスを中心に試作例がいくつか見られる。

マイクロ流体バイオチップやマイクロ静電気センサの開発の一部において遅れが見られるが、基本設計や方針は確立していると判断できることから、このままの進捗によって所期の目的は達成可能であると見込まれる。

[5] 高効率 MEMS 融合製造技術

このプロジェクト中ではかなり鍵になる技術の開発であり、特に射出成形を用いた MEMS デバイス作製は大変重要で世界をリードできる内容を含んでいると思われる。幸いにも、これに関連した開発はやや前倒しで進行しており、早期の実用化を期待する。その他、サイズフリー集積化技術、大口径貫通配線基板作製技術も当初の予定通りに進行している。

一部大口径貫通配線基板作製技術において、「選択メッキ技術開発」に関する研究テーマの追加があり開発期間が延長されているが、特に大きな支障となる課題も無いようであり、予定通りの進捗が期待できる。

- サブテーマ 1 (並列型電子線描画装置の開発)、サブテーマ 2 (ヘテロ集積化初期開発)、サブテーマ 3 (コインランドリ)、サブテーマ 4 (ヘテロ集積化量産)、サブテーマ 5 (高効率 MEMS) とともに順調に成果を出している。

- サブテーマ2（ヘテロ集積化初期試作）は、概ね順調であり、所期の目標達成は可能であると思われる。
サブテーマ4（ヘテロ集積化量産試作）は、目標とする個々の技術開発は概ね順調のようであるが、開発した計測技術やプロセス管理手法が、今後どのようにマイクロシステムの産業活性化に活用できるのか、得られた成果の活用方法をわかりやすく説明してゆく必要がある。
サブテーマ5（高効率 MEMS 融合製造技術）は、概ね順調であり、所期の目標達成は可能であると思われる。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

（有識者からのコメント）

- 研究実施・推進体制については、隔月の研究会、課題全体の運営委員会、サブテーマにおける隔月の打合せ、第三者による諮問委員会等、マネジメントは適正に行われている。
研究支援体制については、東北大学、産総研及び企業（複数）が非常にうまく連携して成果を挙げていると思われる。
若手研究者の育成については順調に進んでいると推測できるが、キャリアパスへの配慮や結果のフォローが望まれる。
成果の社会還元については、それぞれ出口側企業との連携が進められており、検討は進んでいる。
科学・技術対話の取組みについては、公開研究会や国際シンポジウム、展示会への出展等、積極的な取組みが進められている。
- プロジェクトの進捗状況把握と推進のための研究会と運営委員会を隔月で開催しているとのことであるが、プロジェクトの各サブテーマに関し、進捗遅れの対策も含め、課題解決に対して適切な取組みがなされているかについてのフォローを十分行うことが必要であると考え。開催頻度、委員のメンバー構成は不明ではあるが、第三者の意見・助言を求めるための諮問委員会を設置しているのは良い取組みであると考え。
知的財産権に関する取組みについては、全体として51件の特許出願がなされており問題は無いと判断するが、今後は、外国出願の推進と、出願特許の権利化を確実に図っていくことをお願いしたい。
若手研究者の育成については、海外の連携機関に積極的に派遣するのは良い取組みであると考え。

成果の社会還元については、「ヘテロ集積化初期試作」の実施内容④：「集積化可変アンプの試作」において企業の共同研究先が無く、開発成果をどう実用化し社会還元するのかが不明確である。
その他のサブテーマは、民間企業と共同研究を実施しており、今後の実用化に向けた検討も開始されており、成果の実用化による社会還元の道筋は明確であると考え。

- 研究実施・推進体制については、中間評価で指摘させていただいた、「企業や大学等の実施機関任せのプロジェクト内容のように見える」点について、中心研究者が巡回し、また、研究推進内容等についても第三者の意見・助言を求める諮問委員会を設置されている。また、研究会や運営委員会も適宜開催され、順調に推移している。参加している研究者の数も 98 名にのぼり、メンバーも第一線の研究者が加わっている。研究を集約する意図から、東北大学内に「マイクロシステム融合研究開発センター」を置き、部局としての扱いとともに機能が一元化し、効率的に機能している。また、内部監査が実施されており、経費の適切な使用に関して第三者からの評価は大変重要である。

知的財産権については、東北大学内の産学連携推進本部ならびに産業技術総合研究所の知的財産部が対応する体制がとられており、平成 24 年度には国内外合わせ 23 件の特許出願があった。25 年度は最終年度ということもあるのか、これまでの勢いがなく、9 月末時点で 1 件であった。しかしながら、今後とも国内出願を基礎として外国出願を行う計画を持っており、全体的には、しっかりとした取組になっている。

若手研究者の育成については、学生や若手研究者育成のための「相談会」、「談話会」、セミナー、講義の実施、さらには国際連携機関への派遣などが実施されている。しかしながら、どの程度の人数の若手研究者が育成され、どのような機関とポジションで活躍しているのかの内容が不明。

成果の社会還元については、サブテーマの内容に応じて関連企業と密接な関係をもって進めており、試作品の完成をもって企業化を実施する体制になっている。このような連携によって、我が国の技術レベルの向上、海外に対しての主導的立場の顕示を通して社会還元が行われることを期待する。サブテーマの中でも実質的で企業を通して社会還元がもっとも効率的に実施されており、今後も期待できるのは「試作コインランドリ」のシステムであろう。多くの企業が継続を期待しており、何らかの形で支援を継続する制度を構築することが必要である。

科学技術対話の取組については、公開の研究会、シンポジウムが開催され、成果を一般に公開している。また、国際シンポジウムも開催され、成果を世界に発信するとともに海外の第一線の研究者との情報交換や連携を図っている。国内の展示会への出展も企業や一般の方へのアピールとしては大変重要であり、効果のある取組である。

- 東北大学、産総研、及び企業（複数）が非常にうまく連携して成果を挙げていると思われる。

知的財産権については、特許出願件数 51 件と多く、非常にしっかりと知財確保がなされていると思われる

- ヒアリング時にも指摘があったが、サブテーマの構成やその名称については、必ずしも分かりやすいとは言い難く、評価を難しくしているのではないか。他の研究資金で可能な個別的研究を整理し、FIRST ならではの部分（例えば、超並列電子線描画装置）に集中するなどの方策もあったのではないかと、という印象を受ける。

研究課題名	Mega-ton Water System
中心研究者名	栗原 優
研究支援担当機関名	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

1. 研究課題の概要

本研究課題は、21世紀で求められる持続可能でかつ大型の水処理基幹技術の構築を目指し、低環境負荷化、省エネルギー（創エネ）化への対応及び低コスト化に配慮した海水淡水化及び下水処理システムについて、要素技術とシステム技術の強化を図り、世界トップレベルの国際競争力（価格、性能、信頼性）を有する水処理システムの開発を目指すものである。

本研究課題では、高効率膜モジュールの開発及び大型施設の建設関連技術の開発をベースに、環境・エネルギー配慮型巨大淡水化技術の実用化システム（100万トン規模の大規模逆浸透膜海水淡水化プラント）と下水処理システム（10万トン規模）の開発を行う。また、海水淡水化メガプラントシステムの構築に要する設備コスト（10万 m^3 /日規模で1,500米ドル/ m^3 /日）及び造水コスト（1米ドル/ m^3 ）について、メガトン規模のシステムにおいて半減させることを目標（図1）としている。

本研究課題は、以下の8つのサブテーマから構成されている。（図2）

<要素技術>

[1-1] 高効率・大型分離膜エレメント・モジュール

低圧海水淡水化スパイラル型RO（Reverse Osmosis：逆浸透）膜の開発、大型エレメントの最適設計、中空糸型RO膜モジュールの開発

[1-2] 海水取水技術に関する調査研究

深層海水の取水適地調査、大規模深層海水取水施設ガイドライン作成

[1-3] 濃度差エネルギー回収技術の開発

従来型CTA系中空糸膜モジュール等抗圧浸透膜モジュールによる濃度差エネルギー回収システムの開発

[1-4] 国内初の高効率エネルギー回収技術開発

海水と濃縮海水の直接接触によるエネルギー回収装置の開発

[1-5] 低コスト・高耐久性配管の開発

配管コスト削減、腐食防止、樹脂製高耐久性配管の実用性評価

<システム技術>

[2-1] 100万 m^3 /日規模大型プラント構成最適化に関する設計

システム構想・コスト評価、全体システム最適設計、ROモジュール大型化、モジュール工法開発、ファウリング予測技術構築

[2-2] 資源生産型革新的下水統合膜処理システムの開発

コンパクト膜分離活性汚泥法次世代型システム開発

[2-3] 無薬注海水淡水化システムの設計

原海水に対する無薬注海水淡水化システム構築のためのプロセス設計指針の確立

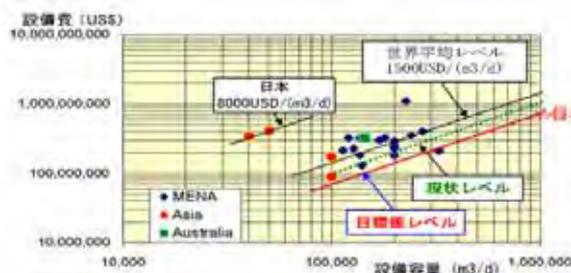


図 1. 設備コストの現状比較及び目標



図 2. 海水淡水化システムにおけるサブテーマの位置づけ

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見 （有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

○ 現行の 10 倍の規模であるメガトン／日規模海水淡水化プラントにおいて、コスト半減化の見通しが得られ、併せて 20%超の省エネルギーの目処を得ている。また、環境負荷低減についても前処理プロセス実証が進められており、世界トップ水準の成果が期待できる。

○ 造水コスト半減はチャレンジングな目標であり、実現できれば世界トップ水準となる。しかしながら造水コストは諸条件で大きく変動し、大型 RO プラントでは現段階でも大きな差がある。どのような設計条件の造水コストを、技術的課題をクリアすることでどのようにコストダウンするのか、具体的にもっと細かく技術課題にブレークして目標をクリアにするべきと考える。またブレークダウンした課題が達成された時、最終的な目標をどう達成するのか定量的な説明が十分なされていない。達成した内容と達成すべき仮定の値の区別が明確でないところがある。各技術課題の目標のブレークダウンがなければ判断はできないものと思われる。

○ 水処理技術は世界的に需要の大きな領域であり、特に中近東などの砂漠地域の多い国や、汚染の進んだ地域などでは海水の淡水化や汚染水処理が求められている。また、東日本大震災時のように緊急時における水道施設の破損に伴う水の供給システムの構築（これは本研究課題のように大量の水を処理するシステムとは趣旨が異なるが）など、水処理技術の向上と省エネルギー、低環境負荷、低コスト化は絶えず要求される要素である。

本プロジェクトでの目標は、水処理膜の高性能化に基づく、省エネルギー、低環境負荷に配慮した低コスト化であり、目標値は世界トップ水準に設定されている。また、プロジェクト終了時においては、新たに開発された高性能低圧海水淡水化 RO 膜と昇圧二段高収率 RO システムの組み合わせにより所期の目的が達成される可能性が高いと判断できる。ただし、現時点では個別の要素技術が確立している段階であり、これを 10 万トン／日の性能をもつシステムに組み立てて性能の検証を行ない、さらにメガトン／日のレベルまで上げた上での実証が求められる。この点は、一気に目的レベルまで

上げることは難しいので、小型稼働実機での要素の検証を積み重ね、なるべく大型の試験装置へと着実に展開していくことが求められる。特に注意を要する点は、我が国のもつ優れた膜技術を担る要素技術として海外の企業等に利用されないための十分な戦略をたてておくことである。

- 事前に提出された資料を総合的に判断した結果、本プロジェクトは中心研究者の的確なリーダーシップのもと、順調に成果を挙げていると判断できる。
ただし世界的に競争が厳しく、かつ我が国自体にはそれほど大きな市場ニーズは望めないため、世界戦略的な取り組みが不可欠である。
- 省エネルギー、低環境負荷について世界トップ水準にあり、個々の要素が統合された10万トンのユニットが完成できれば、所期の目標が達成できたと言える。特に、低圧膜での流量の確保技術については優位性が認められる。
- 低圧海水淡水化膜、高効率エネルギー回収装置、昇圧2段方式によって低費用での海水淡水化を可能として、現段階において、価格競争力を発揮している。メガトン海水淡水化プラントの目途もついている。本研究のシステムが形成されれば、少なくとも一定の期間世界トップの水準を保ちうる。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 個々のサブテーマでは当初目標を上回る結果も得られており、進捗は順調と評価できる。全体設計の最適化が技術的にどこまで達成できるかは課題と思われるが、全体では当初目標のメガトン/日、コスト半減の目標は達成可能と評価する。
- 各個別の案件、特にコンポーネントに関しては、順調に開発が進んでいると思われる。それ以外に関しては、事前提出資料を見る限り、コンセプトの段階であり、今後実証に進むと思われるが、どのような形で実証するのかは明確に示されていない。
各コンポーネントの性能が達成された場合最終的な目標である造水コスト半減が達成できるかは、定量的に検討しておく必要がある。
造水コストの目標達成状況については、エネルギー削減が20%でなぜ動力費が2/3程度になるのか等不明の点もあり、現時点で判断はできない。
- 研究課題全体としては、低コスト化、省エネルギー、低環境負荷の大きな3つの項目が設定されている。低コスト化については、低圧海水淡水化膜と昇圧二段高収率ROシステムの組み合わせによって、設備コスト半減、造水コスト半減の見通しが得られている。
省エネルギーについても、同様のシステム構成によって20%を超える削減達成の目処がたっている。低環境負荷については、既に需要が予想される世界各地海水のバイオフィウリングリスクマップが完成しており、このデータに基づいた水の前処理プロセスの実証実験が行なわれている状況にある。以上の進捗状況から判断して、概ね順調に推移していると判断できる。

今後の予定としては、膜性能を十分発揮するための調整とか、無薬注のパイロットプラント試験の結果に基づいてプロセスのガイドラインの完成やシステムコストの試算などのつめ作業が予定されており、これまでの進捗状況から判断して目標達成は可能であると思われる。なお、本プロジェクトが終了した後も、成果を生かすためにも実機への適用と海外展開へ向けた戦略が必要であり、この点も既に検討されているようであるので、早期の実施を期待したい。

- 本プロジェクトでは海水淡水化と処理システムを、セットで開発することにより、他との差別化を図っている。

他と比較しての優位性に関しては、モデルプラントによる実証が不可欠である。

- 個々の技術要素の実験に留まり、それらを組み合わせた 100 万トン規模大型プラントの実現を確実なものとするには至っていない。ただ、参加メンバーが今後も継続して研究開発を行えば、所期の目標を達成することは可能と思われる。

- 本システムの核になる低圧海水淡水化膜、エネルギー回収装置、昇圧 2 段方式などの技術開発は終えており、研究開発計画が順調に推移しているといえる。

100 万トン/日のプラントを実現するための、機器や部品を全体システムの中で適切に機能させる点が課題である。しかし、基本的には並列的なシステムなので、根本的な課題はないと思う。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- [1-1] 高効率・大型分離膜エレメント・モジュール

膜技術によって省エネルギー、低コスト、膜ろ過流量の増大でそれぞれ目標達成の目処が得られるまでの結果が得られており、目標達成は可能と考える。

- [1-2] 海水取水技術に関する調査研究サブテーマ

深層海水取水についてのケーススタディにより大規模深層海水取水施設のガイドラインを作成し既に目標を達成している。

- [1-3] 濃度差エネルギー回収技術の開発

エネルギー効率では世界最高値が得られている。運転コストを除けば当初目的を達成、所期の目標達成が期待できる。

- [1-4] 国内初の高効率エネルギー回収技術開発

性能的には当初目標を上回る結果が得られており、安定性の確認が残っているだけである。

- [1-5] 低コスト・高耐久性配管の開発

性能評価を修了し、フィールドテストなどにより実用化の目処づけを進めている。進捗は順調と評価。

- [2-1] 100 万 m³/日規模大型プラント構成最適化に関する設計

昇圧二段高収率 RO の提案やシミュレーション技術の開発など個々の開発は進んでいる。全体最適化設計をどう実現するかが課題。

- [2-2] 資源生産型革新的下水統合膜処理システムの開発

膜技術に関してはそれぞれ目標に沿った進捗となっており、設備コストが課題としているが、目標達成が期待できる。

[2-3] 無薬注海水淡水化システムの設計

代表的海域でのバイオフィウリングリスクのマッピングなどによりプロセス設計ガイドラインへの反映、海洋細菌検出装置の試作等が進んでいる。

○ [1-1] 高効率・大型分離膜エレメント・モジュール

高効率型スパイラル R0 膜は順調に開発が進んでいる。高効率中空糸 R0 膜は初期の目標は達成されているが、全体システムの中での位置づけが不明確である。高効率型中空糸 UF 膜は造水量については目処が得られているが、低ファウリングに関しては未実証であり、今後の課題と考えられる。今後の実証が計画されており、その結果が待たれる。

[1-2] 海水取水技術に関する調査研究サブテーマ

取水場所はユーザーが決めるものであり、場所が限定される深層水前提のシステムでは成り立たないが、限定された条件下では適用可能。

[1-3] 濃度差エネルギー回収技術の開発

目標は計画段階から下水を処理した水と濃縮水での発電であったか。そうであれば下水を処理した水が近くにあるプラントでしか活用できないことになり、システムで考えた場合、限定された使い方となる。目標に対しては順調に進捗している。

[1-4] 国内初の高効率エネルギー回収技術開発

所期目標がすでに市販されているエネルギー回収装置のカタログ値より小さいが、国産の装置としては、世界レベルにキャッチアップできていると思われる。今後の耐久性確認が待たれる状況と思われる。

[1-5] 低コスト・高耐久性配管の開発

順調に進捗しており、目標達成。圧力容器関連の規格に準じた耐久性実証が今後必要と考える。

[2-1] 100 万 m³/日規模大型プラント構成最適化に関する設計

電力コスト 20%低減で造水コスト半減に結びつくのかの説明が不十分である。事前評価シミュレータ、バイオフィウリング評価に関しては目標を達成。ただしシステムの中での位置づけ全体目標達成への貢献が不明である。

[2-2] 資源生産型革新的下水統合膜処理システムの開発

水熱ガス化システム以外の項目に関しては数値目標を達成。水熱ガス化システムは定性的な記述であり目標達成可能かどうかは不明である。

[2-3] 無薬注海水淡水化システムの設計

新しい指標による各地域の海水のマッピング、R0 システムでの微生物群集構造の解析、塩素の効果の基礎データ取得等、現象理解は進んでいる。具体的なシステムの成立性に関しての方向性、具体的提案がなく目標達成の判断ができない。

○ [1-1] 高効率・大型分離膜エレメント・モジュール

膜技術の高性能化に関して 3 種類の膜（高効率スパイラル型 R0 膜、高効率中空糸型 R0 膜、高効率大型中空糸 UF 膜）に対して所期の目標となる省エネ、低コスト化等を達成している。これらの高性能膜作製技術は、低圧運転を可能とし、結果として配管にプラスチック管の使用が可能となり、低コスト化に大きく貢献した。これま

での経緯から見て、順調に推移していると判断できる。

本サブテーマを通して、要素技術は概ね確立したので、これをシステム化する段階にあり、最適設計やそのためのシミュレーション技術、およびそれに基づく実証評価が今後予定すべき課題である。プロジェクト終了までの期間が短くなっているため、全てを達成することは難しい状況にあるが、基本技術は概ね確立しているので、時間をかけても確実に成果を上げてほしいし、達成可能な状況にあると思う。

[1-2] 海水取水技術に関する調査研究サブテーマ

深層海水の取水適地を抽出してケーススタディを行なうとともに、取水施設の計画指針となるガイドラインを作成して、平成 23 年度に目標を既に達成している。願わくは、本ガイドラインを生かして、実証試験あるいは実機への適用例を早期に具現化することを期待する。

[1-3] 濃度差エネルギー回収技術の開発

中空糸膜と濃度差エネルギー回収システムを開発することを念頭に技術開発が進められ、実験室レベルではあるが、目標を上回る高いエネルギー回収に成功している。これと並行して新規膜素材による中空糸膜モジュールの開発を目指し、最終的な性能評価には至っていないが、着実に膜開発を行なっており、目標達成に必要な透水量の性能を得ている。このテーマに関しては、中間評価後、運転コストの試算に注力ということで推移している。また、本内容はサブテーマ 2-1 に統合されている。

今後の課題として、モジュール評価の最適化や回収システムの運転コストの試算などがあるが、いずれも達成可能であろう。

[1-4] 国内初の高効率エネルギー回収技術開発

エネルギー回収装置の開発と評価を目標に実施され、装置の開発並びに当初の目標を上回る性能のエネルギー変換効率が確認されている。現在、耐久性試験が実施されているようであり、本サブテーマは順調に進んでいる。

実証プラントにおいて連続運転の下、機能や性能安定性の評価試験が実施されている状況にあり、プロジェクト終了までには一定の評価が可能であろう。

[1-5] 低コスト・高耐久性配管の開発

従来の配管部品であるステンレス配管に比べ、プラスチック管によるシステム構成が可能となり、低コスト化に大きく貢献していることが分かる。これは、低圧で海水淡水化膜を機能させることが可能になったことが大変大きな要因である。本内容に関しても、順調に進んでいる。

今後の課題として長期間使用の際の性能評価が挙げられており、この点はプロジェクト終了までに結論を出すことは難しいかもしれないが、このまま検討を継続し、いい成果を期待したい。

[2-1] 100 万 m³/日規模大型プラント構成最適化に関する設計

この項目がプロジェクトの内容として、最も期待したい項目であるが、システムの構成を含めて、要素技術がシステム全体に与える影響を詳細に検討する必要がある。現時点での結果は、道半ばか。昇圧二段高収率 RO システムの開発や、前処理システムの改善などによって部分的には成果が得られているが、事前提出資料の段階では当初の目標である大型プラントの設計には至っていない。少なくとも、評価のためのシミュレータの早期の確立が必要であろう。バイオフィウリングセンシング技術に関しては、既に装置を製作済みであり、平成 23 年度に目標を達成している。

メガトンモジュールの作製による評価系の構築には、なおも時間を要すると思わ

れるので、プロジェクト終了までにこの項目の達成は厳しい状況にある。

[2-2] 資源生産型革新的下水統合膜処理システムの開発

当初の目標とした3つのテーマは個別には、概ね目標とする性能を達成しているが、中間評価を元に設備コスト試算に注力することになり、統合的なシステムへの展開は途中段階にある。

ヒアリングにおいて、コスト試算の結果として、エネルギーの創出とか再生水活用、有価物回収というような大きなメリットを得られる技術的な見通しが得られたようであるが、この設備コストがまだ高いという課題がある。コスト改善の余地があるのかどうかを早々に検討する必要があるが、これはプロジェクト終了後の課題ということになろう。

[2-3] 無薬注海水淡水化システムの設計

薬品を使わないで海水を淡水化するシステムの重要性は、環境問題とも密接に関係しており、早期の解決が期待される。本プロジェクトにおいて、海水淡水化を必要としている地域において、それぞれの地域による差異や特徴などが概ね把握されたとみていいであろう。その結果に基づいて、実証試験が実施されており、順調に推移していると見なせる。海洋細菌の新センシングシステムの構築に関しては、試作までたどり着いており、早期のシステム完成を期待する。

今後の課題としては、バイオフィアウリングリスクに応じたプロセス設計のガイドラインの策定や、新しい海洋最近の検出システムの完成など、実用化に向けた課題が残っているが、これまでの経緯から見て、計画通りに進行しており、概ね達成可能な状況にある。

- 要素技術 (5 サブテーマ)、システム化 (3 サブテーマ) とサブテーマ数が多いが、各サブテーマに関して、所期目標、達成状況、課題がしっかりとまとめられており、全体としてほぼ順調に進捗していると判定される。
- 中間評価での指摘を受けて、サブテーマを整理し成果を上げたことは評価できる。
- サブテーマ「高効率・大型分離膜エレメント・モジュール」、「海水淡水技術」、「濃度差エネルギー回収」、「低コスト・高耐久性配管」「100万 m³/日規模大型プラント構成最適化」等のうちで、濃度差エネルギー回収、下水処理システムについては、コスト試算に集約した。これらを含めて、全体システムの実用化に欠かせない。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 研究実施・推進体制については、必要に応じた再委託先の人的増強、情報共有や課題把握のためのWSの開催、計画の見直し等、有効に機能している。
研究支援体制については、STL会議、発明審議会、実施権管理規約の検討等有効に機能していると思える。また、担当ラインの強化も図られた。
知的財産権に関する取組みについては、実施管理組合の設置に向けた設立準備作業部会が設置され、実施管理規約の検討を進めており、適切に進んでいると評価する。

若手研究者の育成については、180名の70%を占める若手研究者の育成状況のフォローとキャリアパスの検討が望まれる。

成果の社会還元については、小規模国内パイロット実証と海外実規模実証の計画、実施母体の形成と資金手当て、特許の実施管理規程による一括交渉等の検討が進められており、実用化を目指した取り組みとなっている。

科学・技術対話の取り組みについては、国際水ソリューション展への参加、講演、ポスター展示を行っている。限られた対話となっているが、テーマの性格上やむを得ないと思う。

- 研究実施・推進体制については、コンポーネントはそれぞれ成果が出つつあるが、全体のシステムに関しては、いまだ成果が不明瞭であり、システムの検討の強化が必要と考える。

成果の社会還元については、次ステップでは具体的なユーザーとの検討を計画している故、取り組みの加速が必要と思われる。

- 研究実施・推進体制については、中間評価において指摘された事項を踏まえ、サブテーマの統合と担当者の見直しが図られており、適切な対応がとられている。

研究支援体制については、NEDOの支援を中心として、中心研究者が研究開発活動に専念できる環境が整備されている。また、複数の企業が参画している本プロジェクトでは、発明に対する取り扱いならびにプロジェクトの成果を実施する際の問題など、検討すべき課題があるが、いずれも「発明審議会」を発足させ、また「実施権管理規約」の制定を目指して適切に対応している。

知的財産権については、特許の出願は比較的順調に行なわれている。本プロジェクト終了後に知財を実施する際に想定される問題に対処し、かつ成果の社会還元の視点から「実施権管理組合」を設立するための作業部会が発足して、検討を行っていることは評価できる。この組合の下、実施権管理規約に基づいて適切に成果が生かされ社会に還元されることを期待する。

若手研究者の育成については、どのような背景をもった若手研究者がどのように育成されたのか、この報告書からは全く分からない。

成果の社会還元については、企業が中心となって技術開発を行なう本プロジェクトでは、製品化と実用化が大きな社会還元であろう。本プロジェクトは学術的な意義も大きい内容であるので、国際誌への論文発表を期待したいが、現時点では学術論文が非常に少ない。報告書にも記載されているように、最終的な出口としての実用化という意味では、早期のメガトンのプロセス技術の実証が必要であり、提案されている二本立ての海外展開戦略が早い機会に実施されることを願う。

科学・技術対話の取り組みについては、東日本大震災時の水問題とも密接に関連する科学的・技術的問題でもあり、もっと一般へのアピールがあってもいいのではないかと考える。

- 知的財産権については、特許、特に海外特許の確保を促進してほしい。

成果の社会還元については、海外市場をにらんで、海外企業との競争に生き残るという視点も重要であるが、我が国における海水淡水化システムの市場ニーズ開発も行う必要がある。

- 知的財産権については、特許だけでなく、一定期間ノウハウとして参加企業間で共有する方法をとられるとのことだが、適切な対応と思われる。

研究課題名	健康長寿社会を支える最先端人支援技術研究プログラム
中心研究者名	山海 嘉之
研究支援担当機関名	筑波大学

1. 研究課題の概要

本研究課題は、健康長寿社会を支える最先端テクノロジーとして、脳神経科学、神経生理学、ロボット工学、IT 技術、再生医療等が融合したサイバニクス化技術を駆使することにより、ロボットスーツ等の最先端人支援技術を開発することを目指している。具体的な目標としては、以下のとおりである。

- (1) 随意的制御、自律制御の融合であるサイバニック制御系の理論体系と実装技術の確立
- (2) ロボットスーツによる次世代リハビリテーションの挑戦と脳活動計測による機能回復過程の評価
- (3) 国内外の医療関連機関にて 30 体（臨床用 14 体・福祉用 16 体）を実稼働、実証実験を実施

上記の目標に対して、以下の[1] 生理系支援技術、[2] 動作支援技術の 2 つから構成され研究されている。

- [1] 脳神経系から身体系に至る生理系支援技術
 - ① 生体電位信号の取得・処理／活用技術高度化
 - ② 生理・運動系の分析・管理
 - ③ 次世代リハビリテーション支援
- [2] 身体機能を拡張・増幅・補助する動作支援技術
 - ① ロボットスーツ及び全身運動支援機器の研究
 - ② サイバニック制御の理論体系化と実装技術の確立
 - ③ 次世代リハビリテーション支援（運動療法）

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見 （有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 1) サイバニック制御系の理論体系化と実装技術の確立、2) ロボットスーツによる次世代リハビリテーションの挑戦と脳活動計測による機能改善過程の評価、3) 国内外の医療機関での 30 体の実稼働、実証試験の実施、という目標に対して症例の蓄積、HAL を使った様々な実験による新たな知見、fMRI による実際の効果の確認、慢性脳卒中患者によるフィージビリティ等が進められ、特許表彰や世界の有力研究機関・病院からの臨床試験の申込、標準化への貢献等から見ても世界をリードする研究が進められていると評価でき、終了時には世界トップクラスの成果になると考える。
- 中枢からの運動意思の信号と、感覚信号が中枢神経に戻る閉ループでの機能改善が再現性よく実証されたのであれば、画期的と考えられる。

- 本プログラムで開発・推進しているロボットスーツは、世界的に見ても画期的なアイデアと実績を有しているが、従来は単に肉体的な補助ロボットの感をめぐりきれなかった。しかしながら、ロボットスーツの発展的活用として、今回の提案は、1) 疾患と治療法の間を理論体系づけて、実装技術の確立、2) リハビリテーションへの新たな展開によりヒト機能の抜本的な改善、を図ることを主たる目標としている。さらに、これらの目標を内外の医療機関において実稼働、実証する内容が盛り込まれており、我が国発の技術として世界をリードする研究開発が展開される内容になっている。

これらは国際的に見て、いずれも世界をリードする内容になっており、また着実に実施されており実現の可能性が高い。早期の実現が望まれる。しかし、プロジェクト終了時点でトップ水準に到達するには、医療関係の独特の問題も内在しており、なおも時間を要すると思われる。

- ロボットスーツの開発とその利用技術の高度化を通して、社会的にきわめて貢献度の高い研究開発がなされている。

- 研究開発の基盤であるロボットスーツ HAL は、従来から当該分野で世界をリードするもので、身体機能の支援・増幅・拡張の分野で顕著な成果が達成されていた。今回の FIRST 研究資金によりインタラクティブなバイオフィードバック制御系（サイバニック制御系）の理論検討とリハビリテーションのための治験を目標に進められていたが、EU の医療機器認証、各国の代表的な医療機関との連携など具体的な進展があり、世界をリードする研究開発となっていると言える。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 目標 1（サイバニック制御系の理論体系化と実装技術の確立）については、70 の症例データの蓄積、治療制御の体系化から治験プロトコルの策定まで進んでいる。欧州では既に医療機器として認証されたとしており、現在様々な病名・病態に対する適用を検討している。個々に実験を積み上げ、検証する形で進捗している。

目標 2（ロボットスーツによる次世代リハビリテーションの挑戦と脳活動計測による機能改善過程の評価）については、医薬品と複合したロボットスーツによる医薬医療機器複合療法の研究開発を推進、脊髄損傷患者での効果の確認等が進められた。また、非接触型の生体電位計測技術、マスタースレーブ型の HAL 等の開発が進められた。更に、脳機能の改善状態を確認するための fMRI による計測等、多くの進捗があった。

目標 3（国内外の医療機関での 30 体の実稼働、実証試験の実施）については、人体内部でのインタラクティブなバイオフィードバックによる機能改善の治療法を確立するために国際臨床試験を開始、スウェーデン、ドイツ、日本で、ロボットスーツを用いた臨床試験・治験が実施されている。既に、スウェーデン、ドイツでは効果を確認する結果が得られており、進捗は順調と見なせる。

ロボットスーツについても新たな開発が進められており、小型軽量化、高信頼化を図るとともに、用途に応じたバリエーションや、様々な要素技術の開発も進められている。何がどこまで実現されれば当初目標を達成したことになるのかが、当初から明

確であったとは言い難いが、現在の進捗状況から見て、斬新な発想に基づく世界最先端の研究成果が出し続けられていると評価できる。

○ 脳・神経・筋疾患で、治療効果が認められないのであれば、ロボットスーツ手法にこだわる必要はないと思われる。

○ 目標 1（サイバニック制御系の理論体系化と実装技術の確立）については、サイバニック制御系が提唱されており、ヒトとロボットの間での制御信号のやりとりがヒトの脳に刺激を与え、活性化することにより機能改善を期待する内容である。理論の確立には時間を要するが、仮説の実証は比較的早くできるのではないかと期待される。このプロジェクトでは、対象者を病名別に分類し、仮説に基づく治療制御法を適用している。現時点では、治療結果は得られていないが、特に大きな支障は無いようであり、効果と結果の解析が期待される。

また、病気の対象をさらに拡大して治験を実施予定であり、なお時間を要するが医療機器においては、避けられない問題である。一步一步着実に歩んで、成果に結びつけてほしいものである。

目標 2（ロボットスーツによる次世代リハビリテーションの挑戦と脳活動計測による機能改善過程の評価）については、従来のリハビリテーションは、残念ながら理論的背景に乏しく、試行錯誤的な要素が強かったように思う。目標（1）の成果に基づけば、ロボットスーツによりどのような訓練を施せば、早期の機能回復に結びつくかの方法論の確立が期待される。これまでの治療では、回復が困難であった例に対しても、一部の患者に対してのフィージビリティスタディにおいて薬物投与との複合療法によって効果が期待できる事例が少しずつ出てきているようである。

目標 3（国内外の医療機関での 30 体の実稼働、実証試験の実施）については、目標 1 の仮説に基づく内容を国際臨床試験する段階にあり、我が国発の技術の立証という視点からも、所期の目標に進んできていると判断できる。海外では、スウェーデンおよびドイツの病院、国内では国立病院機構新潟病院が参画しており、一部フィージビリティスタディでの良好な結果が得られている。なお現在治療が継続中のものもあり、良好な結果を期待したい。

今後の研究開発により、所期の目標達成の可能性は高い。一部、医療適用の関係で時間経過を要する事項もあるが、特に問題となる事項は見当たらない。

○ ロボットスーツを対象となる患者の状況（ポリオ、脳卒中など）に応じて、適合させるための研究が進んでいることは評価できる。基本的には順調に進捗していると判断する。

○ ヒアリング時点では、「サイバニック制御系の理論体系化と実装」について、達成できたかどうかの判断が困難であったが、今回の資料から、順調に推移していると判断できる。これは、第三機関の認証により EU 全域でロボットスーツ HAL を医療機器として販売できるようになったこと、ISO13485、ISO/DIS13482 などの国際規格の取得ができたことなどがその理由である。

○ ロボットスーツの具体的な活用に関する成果は比較的可見だが、「サイバニック制

御系の理論体系化と実装技術の確立」の成果をより分かりやすくまとめて頂きたい。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

（サブテーマの設定がないため、2-2 項を参照）

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

（有識者からのコメント）

- 研究実施・推進体制については、利益相反に対する配慮も行われており、研究推進体制としては外部評価機関による評価や諮問委員会の設置など第三者のチェック体制も取られており、特に問題はない。

研究支援体制については、利益相反を避けるための透明化に配慮が見られ、特に問題はない。

若手研究者の育成については、フォローアップが望まれる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、標準化や認証取得に努力が見られる。研究成果は今後の高齢化社会での活用が望まれる。

科学・技術対話の取組みについては、報道機関への積極的広報、HPの活用、見学デモンストレーション等、積極的に取り組んでいる。

- 研究実施・推進体制について、専門部会等で討議内容が議事録として整理されているか確認してもらいたい。

知的財産権については、国際的に連携して進められている研究のため、国内産業育成のためにも積極的に海外出願を進めてもらいたい。

成果の社会還元については、本研究の成果が本格化されれば、ロボットスーツビジネスが国内産業に寄与すると考えられるため、国内産業が優位になれるような措置を考慮して推進してもらいたい。

科学・技術対話の取組みについては、筑波大学以外での普及活動も推進してもらいたい。

- 研究実施・推進体制については、研究の委託、協力を含めて、全44名が参加したプロジェクトである。そのうち外部及びポスドクの占める割合が高く26名である。専任の研究者がやや少ない感はあるが、研究開発の進捗状況から見て、適切に機能していると判断される。なお、海外の医療機関、新潟病院等で臨床治験に当たっている医師、医療従事者等の参加形態が実施体制の中に記載されていないようである。どのような体制で協力を仰いでいるのか。

研究推進体制については、運営会議、課題ごとのミーティングを中心に実施されており、比較的コンパクトな体制となっている。また、このプロジェクトに関しては、利益相反が大変重要な事項となるので、大学全体でアドバイザリーボードを設置するとともに学内の内部監査も実施されており、適切に対応している状況が伺われる。

研究支援体制については、筑波大学内に独立部局としての「サイバニクス研究コア」を設立し、専任の担当者を配置して、効率よく支援している。その他、知的財産、外為法等の安全保障貿易管理に関する事項にも対応しており、特に海外の機関との連携においては重要な視点である。本課題の場合、実施内容の点から今後とも国際的に研究開発活動を継続していく必要があり、国際イノベーション拠点の視点から対応しようとしている点は評価できる。

特許出願については、本プロジェクト期間中で国内外を含めて全 29 件であり、積極的に申請しようとしている。本プロジェクト開始以前にもロボットスーツ関係の特許があり、これらを含めて関連知的財産は大学によって一元管理されているようである。特に、大学内の産学連携本部が専門的なスタッフを要して、支援しているようである。

若手研究者の育成については、研究会やセミナーを定期的実施するとともに国際シンポジウムなどを通して、海外の研究者との交流を図っている。特に特徴的なのは、医療活動経験者や医師が研究員として参加しており、工学系の若手研究者が医療活動を直に体験できる環境にある。このような視点から見れば、国際的な活躍・発展を促す取組として、若手研究者を海外のスウェーデンやドイツでの臨床治験現場に派遣するとさらにいいと思われるが、実施に当たって何か障害となる事項はあるか。

成果の社会還元としては、これからの高齢化社会に直結した内容を含んでいる。特に運動器のリハビリテーションは深刻な問題となりつつあるので、一日も早い実用化、製品化が望まれる。また、世界戦略の点からも、我が国発の技術や世界をリードする技術として確立される可能性が高い。安倍政権の大きな柱に医療機器の世界戦略も位置づけられていることから、時宜を得た研究開発内容であるということが言える。

科学・技術対話の取組みについては、科学館や各種展示を通して、一般市民や企業への周知を図っている。専門家集団に対しては、リハビリテーションを含む医療関係や医療機器関係の学会への積極的な参加や講演要請があり、適切に対応している。特に政府要人の視察やマスメディアの出演などは科学技術の進歩や革新を一般の人に理解してもらう上で効果が大きい。

- 利益相反マネジメントについては概ね適切に実施されているようであるが、前回は指摘したが、責任体制、チェックの具体的な実施項目等について常に明らかにして、国民の誤解を招かないように、今後も十分留意して進めていただきたい
- 知的財産権については、これまでに 14 件の特許を出願と記載されているが、筑波大学単独の出願か。もしも中心研究者が代表者でもある「サイバーダイン」との共願で、同社が独占実施権を有するとなると、あまり良いことではない。FIRST の成果は広く利用されるべき。

研究課題名	次世代質量分析システム開発と創薬・診断への貢献
中心研究者名	田中 耕一
研究支援担当機関名	独立行政法人科学技術振興機構

1. 研究課題の概要

本研究課題は、世界最高性能を有する次世代質量分析 (MS) システムを開発し、これを実証するために、がんやアルツハイマー病の新たな診断方法等の確立に向けたバイオマーカーの発見やがん創薬のための標的分子候補発見を目指すとされている。

産学官連携・共同、異分野融合により実施・推進されており、プロジェクト全体の目標と研究グループはそれぞれ以下のとおり構成されている。

(プロジェクト全体の目標)

- [1] 次世代 MS システムの開発によるプロテオーム解析技術の飛躍的向上
- [2] MS を用いた医療・創薬への貢献

(研究グループ)

- [1] 革新的前処理法の開発
- [2] 超高感度イオン化技術の開発
- [3] 次世代のイオン分離/検出/測定技術(ハードウェア)の開発
- [4] データベース・解析ソフトウェアの増強
- [5] MS 技術・システムの性能検証・評価

平成 25 年度末までに、プロジェクト全体の最終目標として、タンパク質濃度などの生物学情報の選択性・検出感度の総合において従来性能比最大 1 万倍の世界最高性能を有する次世代 MS システムを開発する。その際、次世代 MS システムの高性能化・高機能化に係る有用性を実証するためのツールとして、従来では計測不能だった生物学情報を新たに取得し、診断、創薬などへの応用研究課題の解決あるいは解決への道を拓くことを全体の計画としている。

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

(有識者からのコメント)

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 次世代質量分析システムの開発をベースに血漿中からのバイオマーカーの選出や、様々な化合物に対して従来比最大 10,000 倍の高感度検出に成功しており、装置の高速化や分析手法の開発等が進められている。応用目的である乳がんのバイオマーカー同定での局在分子種の発見や、アルツハイマー病早期診断技術においても進展がみられる。MS は世界トップ性能と評価でき、それをを用いた応用においても世界トップクラスの成果が得られるものと期待できる。
- 微量のバイオマーカー (100amol 程度) を質量分析技術によって選択的に検出することを目的としており、当初、選択性×感度で 1,000 倍以上の向上を目指していたものを、

10,000 倍以上とする目標に引き上げた上で、それに成功している。また、乳がんやアルツハイマー、前立腺がんのバイオマーカー候補も発見しており、世界トップ水準であると判断される。

- 我々の体の病気等の早期の診断や治療において精度の高いバイオマーカーの検出は大変に有用な指標になる可能性がある。田中プロジェクトでは、次世代質量分析システムの開発を通して、従来法よりも数オーダーのレベルで感度の高い検出法の開発を目指している。これらの内容は、検出技術の点でも、また対象とする乳がん・前立腺がんやアルツハイマー病などの具体的な疾患に対して、その有用性が明示できれば、世界をリードする研究開発となることが期待できる。
- サブテーマ1に集約されて、世界最高レベルの質量分析システムを開発するという目標が明確になった。
- 本課題のうち、次世代質量分析システムについては、当初の目標を上回る性能が得られることが予想され、装置の性能としては世界をリードする研究成果であると判断できる。プロジェクト終了時まで、血液によるアルツハイマー病発症前診断への貢献が認められれば、医療分野の質量分析システムとして高い評価を得られることになると思われる。一方、創薬・診断への応用の部分については分担研究者の離脱により、成果は限定的であり、当初の目標からすれば課題全体としては、半分達成できないことになるが、去年のヒアリング等により、次世代質量分析システムの性能向上に資するものに限定するようにサブテーマを見直し、新たな研究実施体制を認めたということで、課題自体の目標が訂正された、と判断・評価している。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 次世代 MS システムの開発は目標を上回る性能も得られており、順調に進捗している。各研究グループについては途中での方針変更の影響はあるが、個々に有益な成果が得られていると判断でき、進捗に遅れがあるとは言えない。

所期の目標達成については、次世代 MS システムは総合的に見て所期の目標を上回る成果が期待できる。応用であるバイオマーカーや診断技術については、有望な候補や重要な知見が得られており、必要な知見の手続きなどを考えると、それぞれ確立という段階までは至らないと予想されるが、確立のベースとなる技術や知見の確立は期待できる。
- 研究の進捗状況については、質量分析技術の開発において、当初目標の選択性向上 X 感度向上で 1,000 倍以上の選択性/感度向上を目指していたものを、目標を 10,000 倍以上に引き上げて、目標を達成している。

所期の目標達成については、体制変更により、京都大学医学研究科や長寿医療研究センターが直接中心研究者とやり取りすることで、これまでに前立腺癌のバイオマーカー検出やアルツハイマー病関連物質検出物質の検出にめどをつけており、目標達成は可能と考える。

- 研究の進捗状況については、次世代質量分析システムの開発に関して、新規抗体の開発により目的物のみを fishing 可能な技術が開発され、併せて高感度イオン化法の新たな開発も所期の計画通りに進んでおり、目標達成の見込みが高い。一方、具体的な疾患を対象としたバイオマーカーの検出と優位性の検証については、全体的に遅れ気味であり、かつ目標達成可能なデータ分析まで至っていないものが多く、厳しい。

所期の目標達成については、「診断への貢献」に関し「当初予定よりも優れた結果が期待できる」旨の記載をしているが、その根拠に乏しい。必要なサンプル数とデータの解析が今年度中に時間的に間に合うかどうかの問題であるようだ。中間評価での指摘のように、マーカーとなり得る可能性をどのように判断するかは依然として問題である。もし、データ解析の結果が所期の目的に対して不十分である場合、次善の策としてどのように対応する予定であるか不明であり、所期の目標達成の可能性については判断できない。ただし、アルツハイマー病関係については、新しいアミロイド形成内因性の種について試行中であり、年度内の到達は難しいにしても、他の疾患についてもこのような展開を期待したい。

- 世界最高性能の質量分析システムの開発については、順調に開発が進められていると認められる。このまま継続することによって、世界レベルの装置開発が達成されると見込まれる。

- ハードウェアの性能については順調であるが、バイオマーカー検出については具体的な病理に関連した成果が認められず、必ずしも順調とは言い難い。プロジェクト終了までの成果により判断されるため現時点での評価は難しい。

2-3. 各研究グループの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 【次世代 MS システム開発グループ】：前処理による高感度化と選択性の向上、イオン化研究で開発した微量検出・構造解析手法の実検体への適用、強疎水性ペプチドのイオン化マトリクスの開発・実用化が進められている。ハードウェアの開発では10倍以上の高感度化と測定時間を短縮し更に5倍の高感度化を目指している他、ソフトウェアのデータ解析機能開発も完了。

【前立腺がんグループ】：尿中のマーカー候補タンパク質の測定結果を多変量解析により、がん群と非がん群に分別、尿中 PSA 糖鎖構造をマーカーとする病態診断については検討中。全体としては目的に合った結果が得られつつあると言える。

【乳がんグループ】：臨床検体採取と臨床情報の収集システムの構築、併せてマーカーの探索が進んだ。

【早期診断グループ】：疾患特異的バイオマーカー探索のため、疾患別データベースのひな型を構築、動作試験を実施している。

【アルツハイマー病グループ】：血液によるアルツハイマー病発症前診断法確立を目指してアミロイドベータタンパク質 ($A\beta$) 計測について高感度・高速化が進められたが、それに加えたアミロイド形成内因性の種の検出試行を進めている。診断法確立に向けた有用な基盤形成が期待できる。

- 【次世代 MS システム開発グループ】：世界で始めて血液から Aβ 群の検出を可能とし、微量検出についても一万倍以上の感度、選択性向上に成功。全く問題ない。今後の見通しについても、データ解析ソフトを前倒して公開しており、問題ない。
 - 【前立腺がんグループ】：サブテーマ 2：前立腺がんと前立腺肥大症（非がん）の識別を可能とした点を評価する。順調に進捗。分別の確実性についてはどの程度の精度を目指しているのか記載がほしい。臨床応用に向けて研究を進めており、問題ないと判断する。
 - 【乳がんグループ】：乳がん細胞に特異的な PI（ホスファチジルイノシトール）の絞込みが可能になった点などの進展があり、順調と判断。今後、例数を増やす予定で、問題ないと思われる。
 - 【早期診断グループ】：情報基盤の構築をほぼ順調と思われる。
 - 【アルツハイマー病グループ】：血液によるアルツハイマーの発症前診断法の確立を目指しているが、進展しているかどうか、やや疑問。今回の研究成果の目指す最終的な姿を定量的に示しておく必要がある。ハードルが高いのかもしれないが、事前に提出された資料を読む限り、目標達成はやや難しい可能性がある。どの程度の資料数を最終的には判定し、見通しをどのようにつけるのか定量的な説明が必要かと思う。
- 【次世代 MS システム開発グループ】：本システム開発に関しては、既に前処理やイオン化に関する技術が確立されつつある。一部は既に目標に到達した技術もある。具体的な例として血漿中からの Aβ 群の検出や糖タンパク質等のバイオマーカー物質の高感度検出の実証実験が進行中であり、順調に推移している。またハードウェアでも感度の改善が既に図られている。
- Aβ 群の検出に関し、事前提出資料の中に検出性能が「ELISA 法と同等以上」という表記があり、気になる。ELISA 法は、簡便さ、迅速性、費用などの点で勝っている一方、質量分析は ELISA 法では識別できない鎖長の異なる Aβ 群を識別できる等の特長があるので、この特長を生かす努力が必要である。イオン化に関しては、バイオマーカーに関する現在検証中の実検体での実験により、当初目標である高感度での検出結果が出ることを期待する。また、今後の研究開発の点では、引き続きハードウェア、ソフトウェアの開発が継続されており、感度の向上が期待できる。Aβ 血漿中濃度と疾患の関係については、不確定な内容であり、技術開発とは別次元での評価となり、見通しについては判断できない。
- 【前立腺がんグループ】：前立腺がんと非がん群との識別が可能なマーカーの選別が進んでいるようであるが、まだ的が絞り切れていないようである。尿中ペプチドや組織切片を用いたマーカー候補の探索の段階であるので、このままの推移では今年度中の目標達成は厳しい状況にあると言わざるを得ない。
 - 【乳がんグループ】：HER2 糖鎖解析によって乳がん検出の可能性が出てきたことは評価できる。症例数を増やして HER2 解析が進行中で、また尿バイオマーカーについても探索中である。未知分子についても処理方法の検討の段階であり、今年度中の当初目標達成は厳しい状況にある。
 - 【早期診断グループ】：プロジェクト全体の中での位置付けは分かるが、具体的な内容が不明である。今後の進捗状況についても、年度内にどの程度進む見込みであるの

か分からないので、見通しの判断はできない。

【アルツハイマー病グループ】：A β への取組については順調に推移している。その他の可能性のあるバイオマーカーの探索が検討されていることは評価できる。血液バイオマーカーの検出に向けて、進捗しており、第一弾の結果は今年度中に得られるであろう。世界初のバイオマーカーとなることを期待したいが、現状では判断の根拠に乏しい。年度内にはまだ、最終結論に到達する状況にはないとみられる。

○ 装置開発と創薬への応用の両面で成果が出ており、大いに今後の成果が期待できる

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

○ 研究実施・推進体制については、中間評価時の指摘に基づいて、研究体制を島津製作所に集約し、適切なマネジメント体制や経費管理の体制が構築されている。特に問題はない。

研究支援体制については、プロジェクト運用マニュアルが発行され、改定も行われていることは評価できる。

若手研究者の育成状況については、若手や女性研究者を積極的に採用し、発表を優先的に行わせる等、育成に配慮している。キャリアパスについての配慮も見られ、育成が図られている。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、多くの疾患へのMSの応用展開、微生物同定による感染予防等、成果の水平展開が想定されている。

○ 研究支援体制については、整っていると考える。

知的財産権に関する取組については、研究成果が最終的に出てくる時期に差し掛かっており、特許出願が加速してきている。内容のレビューは特許の専門家を含めて充分レビューしてほしい。

若手研究者の育成状況については、若手や女性の研究者が育ってきている点の評価したい。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、実際の患者の診察に使えることが最も有効であり、今後の重要な課題だと思う。本プロジェクト終了後、この装置を使った臨床研究が活発になることを期待する。

○ 研究実施・推進体制については、最先端研究開発支援推進会議の検討結果を踏まえ、大きく見直された。その結果、中心研究者が直接に指導・統括できる体制になり、これを上手にいかして進めていると思う。研究推進委員会を設置し、協力体制にある研究機関の主要メンバーが参加しており、また併せて研究進捗報告会が開催され、全体的な研究の推進と個別テーマの進捗に関して意思の疎通が図られている。

研究支援体制については、企業の特質に合わせた支援グループが島津内に迅速に設定されており、効率的に機能している。一方、JSTの支援体制も生まれ、島津に専任の現地支援員1名が派遣されている。

知的財産権に関する取組については、知的財産権の扱いに関して企業内において適

切な対応体制が確立しており、それに沿った手続きが行われている。特に評価できるのは、平成 23 年度以降の特許出願数である。正に加速度的に増加している。中間評価でも指摘された、海外への特許出願も進められており、国際的な優位性を促進するためにも、引き続き意識を持って実施されることを期待する。

若手研究者の育成状況については、多くの若手研究者（32 名）を雇用し、質量分析を中心にした研究活動に携わってきている。彼らに対し、種々の研究指導・管理体制が敷かれ、日常的にトレーニングを実施する仕組みがみられる。特に、プロジェクトの終了を前に、個々人の技量や関心に合わせた進路設計を行っているようであり、彼らの研究開発実績をいかすよう進路が得られることを期待する。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、本プロジェクトで開発中の次世代質量分析システムは、完成の暁には当初計画の医療向けの微量バイオマーカー検出器としての活用が期待できるが、事前提出資料にも記載の通り、正式な製品化までには未だ数年を要する。社会還元の意味からは、その間の活用が重要な視点であろう。国内での拠点作りを提案しておられるが、ぜひ実現可能な案を作成して、実行に移していただきたい。現状での MS 解析用ソフトウェアは広く活用可能な状況になっており、このような活動を通して国際標準になると機器の今後の展開にもいかすことができる。また、現在開発中の新規抗体やバイオマーカーの実用化が一日でも早く実現すると、それだけ早い社会還元と世界展開が可能であり、期待したい。

科学・技術対話の取組については、多くのプロジェクトメンバーがいる割に、アウトリーチの実施状況の数は少ない印象である。学会発表は、平成 23 年度以降、かなり積極的に行われているが、プロジェクトメンバー数からみて、学術論文数についてはやや少ないようである。ウェブサイトを活用した情報発信は、日常的に行われる体制が生まれ、利用者の視点に沿った内容となり、その効果も現れているように見受けられる。

○ 研究実施・推進体制については、新たな体制のもと、しっかりとなされていると判定する。

○ 研究実施・推進体制については、当初から、中心研究者が名実ともに中心となって事業を推進する体制であれば、より分かりやすかったと思われる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、質量分析装置の感度が当初を凌駕したことは良いことではあるが、それが国民にとってどのような意味を持つものか（本当に有効なところまで達したのか、まだなのかを含め）、具体的な事例で説明する必要がある。

研究課題名	原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発とその応用
中心研究者名	外村 彰（代行：長我部 信行）
研究支援担当機関名	独立行政法人科学技術振興機構

1. 研究課題の概要

本研究課題では、電子線ホログラフィー技術を用い、原子レベルでのゲージ場（ベクトル・ポテンシャル）を可視化する世界初の観察装置の開発を目指している。

数Åの原子の姿を捉える世界最高の空間分解能を持つ電子顕微鏡と微細な3次元電磁場分布を電子の位相情報により可視化する電子線ホログラフィーの特徴を兼ね備えた装置で、研究課題は、（1）電子顕微鏡本体開発及び要素開発、（2）予備実験・応用実験の2つから構成されている。具体的な研究目標としては、以下の通りである。

- [1] 世界最高点分解能（0.04nm）及び世界最高輝度（ $5 \times 10^{10} \text{A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）の達成
- [2] 位相検出精度 1/1,000 波長 を達成し、位相を用いた原子像観察を実現
- [3] 3次元像構築が可能なホログラフィー機能により3次元原子配列の観察、微細な3次元電磁場分布観察を実現

なお、昨年度のフォローアップ結果及び中心研究者の逝去に伴う「今後の取扱いに係る聴取」での指摘を踏まえ、（2）予備実験・応用実験について見直しをなされ、「予備実験」では「解析手法の高度化」とし、3次元再構成及び高精度位相計測を実現することとし、「応用実験」では「将来の装置活用に向けた応用実験」として、本研究課題にて開発される観察装置による新規の成果を創出することが研究課題として確認された。

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見 （有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 1.2MV 電子顕微鏡の所期目標の点分解能、輝度ともに世界最高性能であり、研究開発は、途中トラブルがあったにもかかわらず、当初の予定通りの完成を目指して進められている。終了時には世界トップ水準の電子顕微鏡の完成と測定技術の基盤構築が期待できる。
- 目標は、国内の理学、産業レベルアップにとって、非常に有意義なものと考えているので、目標達成に向け努力してもらいたい。
- 電子線ホログラフィー技術を用いて原子レベルでのゲージ場を可視化する世界初の電子顕微鏡装置を目指している。その仕様としての空間分解能は数Åの原子の姿を捉えることを目指し、また微細な3次元電磁場分布をも可視化可能とする性能を有する。このようなレベルの電子顕微鏡は間違いなく世界トップクラスであり、一部若干の遅れはあるようであるが、今年度末までに所期の目標である装置の完成により 1.2MV ビ

ーム放出は概ね達成可能な状況にある。ただし、一部所期の目標とした超高分解能を含む基本性能の確認は、次年度にずれ込む計画となっており、残念であるが、目標達成を期待したい。

- 装置開発上、トラブルが多々発生はしているものの、最終的には世界トップ性能の超高分解能電子顕微鏡ができると予測でき、ハードウェア開発の視点では高く評価できる。

ただし完成した装置の性能や投資金額に見合う基礎あるいは応用研究成果が出せるかどうか、注意深く見る必要がある。

- 様々なトラブルによりプロジェクト期間内に当初の目標を達成することは困難ではあるが、世界最高の空間分解能を持った電子顕微鏡・電子線ホログラフィー装置として、世界をリードする研究開発が展開されてきていると判断できる。装置が完成しなければ、応用実験において期待された世界的なインパクトのある観察結果についても、期間内の達成は困難である。したがって、本課題への評価は分かれる可能性があるが、研究実施者らが自ら継続して今後も本課題に取り組むならば、装置として世界トップ水準の成果となることは期待できる。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 加速管や電源でトラブルに見舞われたものの、本体・要素開発ともに、また、予備実験、応用実験ともに目標達成の見込みで、進捗はほぼ順調と見なせる。

サブテーマがそれぞれ目標を達成する見込みであり、完成したものが所期の目標を達成できない要素は今のところ見出せない。

- ”ベーキングチャンバ内部に残っていた微小異物から発生した塩素と判明”、”この塩素が銀と反応し塩化銀となり絶縁低下”とあるが、本当か。手違いで物を残したままベーキングしてしまった可能性はないか。もし、本当に微小異物が原因だとしたら、次は絶対に入らない対策が必要と思うが、そのあたりの記述が見当たらない。

- 一部加速管の金属汚染によるトラブルと試作ステージの性能不足が判明し、計画が8ヶ月程度遅れる見込みとなっている。いずれも不測の事態ではあるが、原因解明も終了している。また、所期の性能達成に向けて必須であった収差補正器は、本体組み込みを確認済み等の表記はあるが、本体への搭載とその状態での動作確認が遅れているようである。この点については、性能と直結する内容であり、早い機会の検証を期待する。応用実験については、新規に開発中の電子顕微鏡を用いた実証実験を期待したが、現状では厳しい。ただし、その基盤となる予備実験では成果が得られつつある。

現時点で当初の計画よりも遅れている内容とその原因は把握されており、今年度中の目標達成については一部難しい点も含まれているが、今後の開発計画は綿密に練られており、若干の遅れをもって当初の性能は達成可能と見込まれる。応用実験については、装置開発後の展開を期待する。時期的に本プロジェクトが終了後の展開となるため、現在検討されている共同利用形態を早期に確立して実効的な活用をお願いした

い。

- おおむね予定通りに進行しているが、高電圧系のトラブルや、試料ホルダーの不具合など、場合によっては電子顕微鏡の基本性能に影響しかねないトラブルも発生しているようで、残り期間での頑張りに期待したい。
- 装置開発については、研究実施者の工程表にあるように、継続して発生したトラブルにより、順調とは言い難く、プロジェクト終了時の目標達成は困難である。ただ、発生したトラブル原因の究明と対応が堅実に実施されており、研究実施者が事業終了後も継続するならば、当初の性能を達成する可能性は大いにある。ただし、応用研究については、中心研究者の逝去の影響が大きいようで、世界的にインパクトのある観察結果が得られるかについては、資料から判断できない。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

注）本研究課題では、サブテーマを設定していないが、個別の研究開発項目について何点かコメントがあったので、以下に記載する。

- 本体開発については、加速管碍子の汚染トラブルがあったが対応済。レンズ性能、高圧タンク性能は確認、高圧電源・レンズ電源でもトラブルはあったが、電源安定度の確認に至っている。ほぼ順調な進捗と見なせる。
要素開発については、試料ステージの完成度が今一步のところ。高電圧安定度、低擾乱環境の構築についてはほぼ目処が立っており、収差補正も含めて目標達成が期待できる。
解析手法の高度化（計画時は予備実験）については、観察技術精密化、新干渉技術の開発が300kV電子顕微鏡で進められ、3次元試料ホルダーの安定性、1/1,000波長相当の位相変化検出実験が進められている。
将来の装置活用に向けた応用実験（計画時はなし）については、ナノ領域電磁場観察技術によって実験データの処理と解析技術の開発が進められ、300kVと1MV電子顕微鏡による応用実験が目標達成の見込み。
- サブテーマとしてはひとつであるが、「本体開発」、「要素開発」、「解析手法の高度化」の3パートで構成されている。事前提出資料で判断する限り、まだ本体の電子ビームが安定して得られる状況にはなっていないようであり、このため3パートが連動して成果を出せる段階ではないと判断される。
また理研における予備観察研究に関しては、現時点ではまだオリジナリティーにおいて弱いところがあると言わざるを得ない。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

（有識者からのコメント）

- 若手研究者の育成状況については、研究会での発表、本プロジェクト主催の国際会議

でのポスター発表、若手向けのチュートリアルなど育成への配慮が行われている。

成果の社会還元に向けては、民間企業内に設置された装置になり、その利用形態についての特別な検討が必要で、具体的な方策の検討が進められている。

- 若手研究者の育成状況については、故外村先生の意味でもある「ものづくりの伝承と継承」がよく生かされていると思う。
- 不幸にも平成 24 年 5 月に中心研究者の外村彰博士が急逝された。その後長我部信行博士が急遽中心研究者代行として研究実施・推進体制を整備され、それを日立製作所が日立中央研究所企画室内に FIRST 企画チームを発足させて支援する体制が整った。併せて、共同研究体制を採る理化学研究所においても組織再編があり、対応する組織として量子情報エレクトロニクス部門・創発現象観測技術研究チームが発足し、チームリーダーも新たに進藤大輔東北大学教授が招聘された。このチームは FIRST 終了後もチームとして存続することが決まっており、今般開発されている電子顕微鏡の応用研究の継続と発展的活用が期待される。電子顕微鏡本体の開発を担当する日立中央研究所電顕開発グループと応用技術開発を担当する理研グループとが緊密な連携をとっていることが伺われる。特に、理研グループが同一の研究サイトに常駐し、日常的にも空間的にも緊密な連携をとっている。このことは本プロジェクトにとって必須であり、効率的に開発が進められている。

研究支援体制については、JST を介在して、共同事業機関である日立製作所と理化学研究所が協働して支援に当たる組織が機能している。特に理研の元単量子操作研究グループに属し、副グループディレクターを務めていた小野博士が JST の一員として理研チームの支援に当たっているのは、大変効率的に機能しているとみられる。

知的財産権については、知財権の扱いに関する協定は規約等が厳格に作成され、適用されている。現時点までのデータでは必ずしも多いとは言えないが、今後の準備と申請予定が記載されており、この予定に従って進められることを期待する。

若手研究者の育成状況については、大型プロジェクトに若い研究者・技術者を参画させ、ベテラン技術者の指導の下、電子顕微鏡の設計から製造までの製品開発を経験させる企画は大変すばらしく、このような貴重な機会を提供することは若手研究者等にとって有意義である。また、世界の第一線の研究者と交わる国際会議の開催は、世界をリードする電子顕微鏡を開発している我が国及びこのプロジェクトチームならではの企画であろう。このような環境で育ってきた若手研究者や技術者の数や、プロジェクト終了後の活躍の場についての情報があると良い。

成果の社会還元については、本プロジェクトで開発される見込みのある電子顕微鏡は文字通り世界最高水準の仕様を有した機器であり、その後の活用と組み合わせて初めて成果が評価されるであろう。したがって、今後の応用研究を含めた活用を期待する。そのためにも「電子顕微鏡利用検討委員会」において有効な活用方法を提言してほしい。事前提出資料にも記載の通り、民間企業が所有する大型装置を公的研究の発展に資するために開放した例がほとんどないとのことであるが、本開発研究に当たっては公的資金が使われているわけであり、所属を理化学研究所の管理下に置くとか、新たな柔軟な知恵を出してほしい。

科学・技術対話の取組みについては、一般向けの講演会や国際会議において研究成果の公表を行っている。特に評価される事項はウェブサイトの活用であろう。海外を

含めて、最先端の研究内容を求める声は強く、知財に関係の無い内容については積極的な情報提供を行ってほしい。学术论文の発表については、残念ながら少ないと言わざるを得ない。今後機器の完成に伴って、新しい電子顕微鏡の活用によって世界水準の研究成果が生み出されることを期待する。

- 研究実施・推進体制については、外村氏の逝去という事態にも関わらず、長我部氏を中心に、しっかりした体制で、継承されていると認められる。

知的財産権については、特許出願件数が6件、準備中が4件と、やや増えてはきたが、外国特許をより積極的に取得する必要がある。

成果の社会還元については、完成後の装置の一般ユーザーへの開放について、具体的な形がまだ見えていないように思われる。

- 研究実施・推進体制については、継続して発生したトラブルが研究プロジェクト運営上の問題に起因するものなのか、最先端研究に必然的に伴うリスクの範囲であるのか、判断が困難であるが、昨年度のヒアリングや提出資料等から、後者であり、運営に特段の問題は無かったと判断している。

科学・技術対話の取組みについては、インターネットを通じた事業の一般への理解促進のための活動は、わかりやすく良い取り組みであると感じた。

研究課題名	日本発の「ほどよし信頼性工学」を導入した超小型衛星による新しい宇宙開発・利用パラダイムの構築
中心研究者名	中須賀 真一
研究支援担当機関名	東京大学

1. 研究課題の概要

本研究課題では、中心研究者が提唱する「ほどよし信頼性工学」の汎用的な理論体系の構築を学術研究の目的とし、その体系に基づき、低コスト・短期開発・最適性能を実現する世界一の超小型衛星（50kg 以下）技術を確立し、新しい宇宙開発・利用のパラダイムを世界に先駆けて拓くことを目指している。具体的な研究目標としては、以下のとおりである。

- (1) 超小型衛星に適した「ほどよし信頼性工学」や開発プロセスの構築
- (2) その開発を支える国内のサプライチェーンネットワークの構築と人材育
- (3) サイズ比の性能が世界レベルの要素機器・先進的地上局の研究開発
- (4) それらの超小型衛星により、従来にない新しい宇宙利用コミュニティおよび利用法を開拓し、衛星開発・利用産業につなげる

目標達成に向けて、本研究課題は8つのサブテーマを設けて研究を進めている。

- [1] 超小型衛星用信頼性工学の構築と衛星開発を通じた先進的衛星開発・試験・運用利用手法に関する研究
- [2] 産業化を目的とする超小型衛星技術の実用化とものづくりインフラの構築
- [3] 先進的超小型衛星設計論と要素技術に関する研究
- [4] 革新的光学系および地上情報処理技術に関する研究
- [5] 超小型衛星用の先進的・非可動型地上局に関する研究
- [6] 地上試験手法に関する研究
- [7] 実践的宇宙教育・人材育成に関する研究
- [8] 科学への応用法とミッション系先進インターフェースに関する研究

2. 研究課題の目標及び進捗（達成）状況に関する所見

（有識者からのコメント）

2-1. 研究課題の所期の目標の優位性等について

- 50kg 級衛星で、2.5m 分解能（新目標）、光通信装置搭載等の設定目標は世界最高水準であり、性能から見たコストや開発期間の短さも世界に例を見ないものである。個々の要素技術や重要な要素であるサプライチェーンの構築等、目標達成に向けて所要の成果が得られていると見なせる。研究開発の基本構想である「ほどよし信頼性工学」についても各段階で学会発表が行われており、浸透が図られている。衛星はいわば科学技術の総合的な成果であり、打ち上げてみないと目標達成の確認ができない。現在、1号機の打ち上げが打ち上げを委託している相手国の事情で遅れており、実証という意味では計画に遅れがみられる。また、打ち上げ費用の高騰により、打ち上げ衛星も 5

機から 4 機に削減せざるを得なくなっている。しかし、本プロジェクトの集大成という位置づけである 4 号機についてもフライトモデルの段階に進んでおり、総合的な結果確認は打ち上げ後になるとはいえ、サブテーマの達成状況から見ても、終了時には世界最高水準の成果が得られることが期待できる。

○ 実環境での最終実証は、プロジェクトとは関係ないロケット打ち上げ予定遅延で遅れているが、衛星コスト含め、世界でリードできる水準の衛星と考えられる。

○ 所期の目標として挙げられている項目ごとに記載する。

超小型衛星に適した「ほどよし信頼性工学」や開発プロセスについては、これからの世界の需要を考えると、短期間・低価格で提案・供給可能なシステムが構築されれば世界をリードすることが可能。性能として、50kg 級衛星での 5m の分解能、その他高速通信機、イオン推進機、姿勢制御機器の小型化など、高性能と小型化の視点で世界レベルの具体的目標が設定されており、設計段階ではプロジェクト終了時点での目標達成は見込まれる。また、所期の目標に入っている超小型衛星開発に関する費用 3 億円、2 年以内の開発期間については達成可能。ただし、世界的にアピールするためにも、プロジェクト終了時には、当初の成果が実機で得られていることと、ほどよし信頼性工学の学問としての確立が必要であるが、これらの点では今年度末までの達成は時間的に厳しい。

開発を支える国内のサプライチェーンネットワークの構築と人材育成については、大きな目標を支援するための基盤となるもので、これ自体は世界をリードする目標ではないが、基盤および国内問題としては大変重要な課題である、現状で浸透しつつあり、達成可能。

サイズ比の性能が世界レベルの要素機器・先進的地上局の研究開発については、先に記載したように、要素機器の小型化・高性能化は世界レベルに達するものが期待できる。また、先進的地上局についてもメンテナンスフリーのアンテナの開発は世界レベルにあり、達成可能。

超小型衛星により、従来にない新しい宇宙利用コミュニティおよび利用法を開拓し、衛星開発・利用産業につなげることについては、国内の企業・地方自治体・研究機関からの利用申請の実態からみて、今年度末の期間内での実績は厳しいが期待の持てる展開が見えている。今回のデータのみからは、世界をリードする状況に至るかどうかは不明であるが、時間をかけて展開されることが期待される。

○ 今回も実際の打ち上げがなされていないようなので、やや判断しにくいですが、これまでに提出された資料の内容等から、研究開発は順調に進んでいると判定される。

○ 前回の評価でも記載したが、課題名にある「ほどよし信頼性工学」については、その定義が明確とは言い難く、また、衛星の開発が「ほどよし信頼性工学」の適用の成果ではなく、さらに、現時点で一台の衛星も打ち上げできていない状況では、プロジェクト終了時点で、本課題が世界をリードする研究開発であるかは判断できない。

大学が連携してオープンな環境で超小型衛星開発を行うことは、意義のある活動であると思うが、最先端プログラムで実施すべき課題であったかどうかは疑問が残る。また、海外に発射を委託するという困難さがあるにせよ、現時点で衛星を打ち上げら

れていない状況は、研究開発実施体制に改善すべき点があったのではないか。

2-2. 研究課題全体の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- 打ち上げ国の事情により打ち上げが延期されており、総合性能の確認という意味では遅れている。しかし、個々のサブテーマは部分的には所期の目標を上回る成果を上げており、研究自体の進捗は順調と見なせる。
最終的には様々な成果の総合が衛星打ち上げまで確認できないという課題はあるが、研究レベルでは打ち上げを待つことなく所期の目標の達成が可能と思われる。
- ロケット打ち上げ予定遅延にあるが、プロジェクト計画は、予定通り進んでいると判断する。ただ肝心の「ほどよし信頼性工学」が依然あいまい。信頼度とコストの関係を具体的にどのように最適化しようとしているのか不明である。
- 小型衛星の開発ならびに周辺機器や支援機器の開発は、概ね順調に推移している。しかしながら、ほどよし1号機の打ち上げがほぼ1年遅れの状態にあり、2013年度中の打ち上げも確定していないようである。ほどよし2号機も開発途上であり、かつ打ち上げ予定も立っていない。この影響は今後打ち上げ予定の3・4号機にも影響を与える恐れがあり、全体的な開発と成果の公表の遅れにつながる。当初の目標も4号機の打ち上げによる成果を得て、達成されると期待されるが、この点からは期間内の目標達成は厳しいと言わざるを得ない。
衛星打ち上げの遅れが全体的に大きな影響を及ぼしており、この点を早い機会にクリアしないと所期の目標達成の自己評価、外部評価も難しい。
- 実際の打ち上げに至っていないように思えるが、ある程度外的要因なので仕方ないが、全体的にやや遅れている印象がある。
- 明らかに進捗は遅れており、プロジェクト終了時点でどのような達成度となるか判断できない。所期の目標達成は困難であろう。

2-3. 各サブテーマの研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通し

- [1] 超小型衛星用信頼性工学の構築と実衛星開発を通じた先進的衛星開発・試験・運用
利用手法に関する研究
影響ファクタの見極め、設計手法、開発プロセスにおける信頼性維持手法、等について検討が進められ、学会発表を通じて積極的な発信も行われている。光学観測のビジネスモデルや利用方法についても各国のニーズを吸い上げつつあり、30か国以上に地域コーディネーターを設置する等の進捗がみられる。
- [2] 産業化を目的とする超小型衛星技術の実用化とものづくりインフラの構築
従来の常識にとらわれないサプライチェーンの構築が進み、コストダウンや国内

での全機器調達の達成等に結びつけている。

[3] 先進的超小型衛星設計論と要素技術に関する研究

展開構造、新しいアーキテクチャ、材料と評価法、熱設計・制御、衛星間光通信、等の要素技術について所要の成果が得られていると評価する。

[4] 革新的光学系および地上情報処理技術に関する研究

革新的光学系及び地上情報処理技術に関する研究については、小型化の達成、5mの分解能の開発と併せて2.5m分解能の光学系開発も進められており、超小型衛星では最高水準の性能が期待できる。

[5] 超小型衛星用の先進的・非可動型地上局に関する研究

世界初の人工衛星地上受信利用となるアクティブ・フェイズド・アレイアンテナの開発は所期の目標通り進んでいる。

[6] 地上試験手法に関する研究

地上実験装置を九州工業大学に集約し、短期の多くの打ち上げ経験から豊富なデータの蓄積が進んでいる。

[7] 実践的宇宙教育・人材育成に関する研究

高校生・大学生の宇宙教育サポート、海外教員の招請研修プログラム、国際レベルの競技会、ジャーナルの発刊等多彩な取り組みが進められている。

[8] 科学への応用法とミッション系先進インターフェースに関する研究

ミッションの公募により各国から提案された中から2号機搭載のペイロードを決定。チューナブルフィルタの開発、SPA 準拠の搭載機器開発等が進められ、所期の目標に向かっている。

○ 本プロジェクトは、きちんとサブテーマ毎に、開発項目と責任分担が整った体制であること、及び、各サブテーマの結果が衛星という最終目標に結びつく体制であったことが良かったと考えられる。サブテーマを持たない他のプロジェクトより、お互いに切磋琢磨してプロジェクトが順調に進められたと考えられる。

○ [1] 超小型衛星用信頼性工学の構築と実衛星開発を通じた先進的衛星開発・試験・運用利用手法に関する研究

1号機の打ち上げから遅れており、しかもその時期が確定していないのは致命的である。このテーマに関しては、要素技術開発や試験・運用・利用手法の実証がかなり重要な要素として組み込まれている。また、学問的にも「ほどよし信頼性工学」の実証、評価の点でも、これらの内容を実施できない状況になっている。現状では、順調に推移しているとは言えない。

ただし、実機打ち上げ以外の視点から「ほどよし信頼性工学」について検討が加えられており、ある一定の水準には到達しているとみられる。利用ミッションの開拓に関しては、いくつかの関心のあるテーマが上がっている。「超小型衛星ミッションアイデアコンテスト」は興味ある企画である。中長期的な内容を包含したものもあるが、放射線モニタリングなど早期に実施してほしいテーマもいくつか見られる。

実機の打ち上げに関係した事項以外は、順調に進捗しており、まずは1号機の打ち上げ期日の確定を急いでほしい。

[2] 産業化を目的とする超小型衛星技術の実用化とものづくりインフラの構築

実施体制として次世代宇宙システム技術研究組合を既に立ち上げ、組合企業8社、

協力企業 177 社が参加しており、かつ講習会や実習を通して、所期の成果があがり、目標とする短期間で安価な機器開発のめどがたち、試作を通して機器開発が終了し、フライト品の製造も終わり、当初の計画通り進捗している。特筆すべき内容は、開発した機器を海外へ販売開始している点であろう。

このまま継続して、開発した機器の品目を増やしたり、より性能向上を目指してほしい。

[3] 先進的超小型衛星設計論と要素技術に関する研究

設計論や要素技術については、既に概ね完成し、地上における予備検証実験もほぼ終わっており、所期の目的を達成しているが、1号機、および3、4号機による実証評価が実施できない状況にあり、この点については大幅に遅れており、目標達成の見込みはついていない。

現在達成されていない項目は全て、実機の打ち上げ時期に依存している。

[4] 革新的光学系および地上情報処理技術に関する研究

高空間分解能と広視野を両立した光学観測システムの開発を目指しており、概ね目標を達成している。本プロジェクトで最終目標とする高機能の5mの分解能を有するカメラも製作中であり、順調に進んでいる。

事前提出資料に記載の手順を進めば、高機能のカメラの開発は達成可能である。さらに、分解能を2.5mとしたカメラも本年度中に試作モデルが完成するとの見通しで進んでおり、期待したい。

[5] 超小型衛星用の先進的・非可動型地上局に関する研究

本テーマで目標とする非可動式フェイズド・アレイ方式の地上アンテナに関しては、順調に開発が進み目標を達成している。一方、地上受信用アンテナにもアクティブ・フェイズド・アレイ・アンテナを採用し、世界レベルの性能を有するアンテナとなる可能性がある。これについては、既に海外からの高い評価もあり、今後の発展が期待できる。順調に推移しており、このまま開発を継続してほしい。

[6] 地上試験手法に関する研究

地上試験装置が九州工業大学に集約され、ワンストップサービスが受けられる体制が構築された意義は大きい。サービスの開始によって既に多くの成果が出ているようであり、予定通りに進捗している。また、この利点を生かして超小型衛星に関する標準化を進めており、我が国がリードする国際標準化を達成してほしい。

順調に推移しており、標準化に関する取組の促進を期待する。

[7] 実践的宇宙教育・人材育成に関する研究

CanSat や気球を使った実践的な内容によって、国内の高校生や大学生に宇宙教育を実践している内容は素晴らしい。また、海外からも教員レベルの方を招いて研修を実施しているようであり、先進的な取組によってリーダーシップを発揮していることが伺える。また、英文ジャーナルを創刊し、超小型衛星に関する情報発信と普及に努めていることは評価できる。テキストの作成については、予定よりも大幅に遅れている。

全体的には順調に推移しているので、テキストの作成に注力し、今年度末までの完成を目指してほしい。

[8] 科学への応用法とミッション系先進インターフェースに関する研究

ほどよし2号機に搭載するミッションに関しては、前倒しで公募し、選定を終えて機器の開発も進み本年度末までのフライトモデルの完成を目指している。しかし、

打ち上げ予定の大幅な遅れから、当初予定していた運用支援・評価は達成できない。
現在の開発体制で2号機に搭載する機器の試作を急ぎ、今年度末までのフライトモデルの完成を期待する。

- 8つのサブテーマとも、細部に予定とのずれはあるものの、おおむね当初予定通りに進行していると判定される。
- サブテーマ1については、衛星の信頼性を評価するためには、実際の衛星で評価するより他はなく、衛星がない状況では達成は困難である。
 - サブテーマ2については、技術研究組合が設立され、衛星機器の国内調達できる環境が整い、目標はある程度達成したようである。
 - サブテーマ3については、完了した項目もあるようであるが、26年度以降に実施する項目も多く、期間内での達成は困難である。
 - サブテーマ4については、2.5m分解能試作カメラは、計画通りに25年度末には目標達成予定である。
 - サブテーマ5については、システムの完成が25年度末とあり、目標達成予定である。
 - サブテーマ6については、地上試験装置は運用が開始されているので完了している。
 - サブテーマ7については、人材育成は実施されたようであるが、これをサブテーマとして扱うべきか疑問がある。
 - サブテーマ8については、科学ミッションは公募され決定されたようであるが、衛星が稼動しない状況で達成度の判断は困難である。

3. 研究実施・推進体制等に関する所見

(有識者からのコメント)

- 若手研究者の育成状況については、海外教員の招請教育プログラムや国際競技会、ジャーナル発刊等、多くの試みは特筆すべきもの。若手研究者のキャリアパスに関しても配慮がなされている。
 - 成果の社会還元については、既に国家予算が獲得できているもの、競争的資金への申請、民間資金導入、国規模の計画への参画、インフラ技術展開など多彩な検討がなされている。
- 研究実施・推進体制については、特に問題ない。定期的な、全体報告調整会、研究成果報告会が機能したと推測される。
 - 研究支援体制についても、特に問題なし。年4~5回程度の会合を持たれており、研究者と支援体制との意思疎通が順調に進み、研究支援されたものと推測される。
 - 知的財産権についても、特に問題なし。宇宙分野は特許にすべきか、海外出願をどこまですべきか難しい分野と考えられるが、外部コンサルを活用し適宜判断して進められていると考える。
 - 若手研究者の育成については、本プロジェクト終了後の就職先等は、苦慮されていると思うが、技術伝承含め手を打たれているように見受けられ、特に問題ないと考えられる。

プロジェクト開始時から国内でのサプライチェーン構築を意識しながら進められており、国プロとして社会還元に結びついていると考える。また、衛星ビジネスを拡大する上で必要な、衛星応用ビジネスの拡大に尽力し、現時点では問題ないと考える。

科学・技術対話の取組みについては、本プロジェクトでの活動で問題なし。「はやぶさ」の成功以後、世論の関心は高まっているが、ブームに終わらないよう今後も継続した啓蒙活動体制を構築してもらいたい。

- 研究実施・推進体制については、全体報告調整会、研究成果報告会などを通してプロジェクト内の連携を図っている。全体の方針や年間の成果などは、このような対応で十分であろうが、各プロジェクトやサブテーマの進捗、課題などについては、中心研究者が各参加機関へ出向き直接対話することは重要ではないかと思う。巡回は全く実施されず、スカイプや電話での連絡となっているが、現地に出向いてこそ把握できる事項もあるはずである。中間評価時の指摘事項である JAXA との連携が一步でも進んだ状態ができたことは大いに評価できる。

研究支援体制については、中心研究者の所属する東京大学本部と工学系研究科の担当事務が支援に当たっている。また、サブテーマを担当する各機関においても支援体制がとられている。開発内容から見て、特にロシアとの対応、安全保障輸出管理関係の内容は大変重要であり、今後とも密接な連携が必要である。

知的財産に関して、外部コンサルタントを招聘するのは1つの方法であり、成果が上がることを期待する。特許出願に関しては、平成 24 年度は 14 件と比較的多いが、その他の年度を含め全体的には研究者数の割に少ない。他大学共同研究機関へも特許出願の要請をしているとのことであるが、企業との連携も促進されており、その場合の特許戦略はどのようにとられているのか。

若手研究者の育成については、実機の衛星開発が行われる貴重な場に若手研究者がおり、体験できる環境は大変すばらしい。また、国際的（ベトナム衛星開発が例示）にも貢献できる人材が育成、ベンチャー会社への転身された例が出てきており、成果が見られる。併せて今後プロジェクト終了後衛星関連会社の技術者・研究者あるいはアカデミックポストへの実例が出てくることを期待する。

成果の社会還元については、実機が完成し、実用化されて、成果が得られるのが最も望ましい社会還元であるが、既に多くの企画や申請予定の事項があつて、どの項目も一日も早い実現が求められる内容である。世界をリードする面からいえば、ISO 国際標準化や海外からの機器や企画の受注が促進されることを期待する。

科学・技術対話の取組みについては、超小型衛星に関して、中・高校生などの生徒や一般向け講演などは大変魅力的なテーマであり、報道実績も多い。今後とも一般への情報宣伝活動が求められる。一方で、大変多くの大学関係者が関与しているプロジェクトの割に学術論文数が非常に少ない。特許との関係で現時点で少ないのかどうかは分からないが、学術成果も積極的に公表されることを要望する。

- サブテーマが多く、研究者の所属も多岐にわたるが、中心研究者の所属する東京大学初め各機関がしっかりした体制を構築している。

研究支援体制については、知的財産、総務・経理の各部門で、東大をはじめとする 11 研究機関の担当部署がしっかりしたサポート体制を用意している。

知的財産権については、平成 24 年度に 14 件の特許を出願したということで、しっ

かりした知財対応がされている。ただし海外特許がまだゼロである点で、やや不満が残る。

- 衛星の打ち上げが遅れることが予見された時点で、プロジェクト期間内に達成すべきことと、実施せず残すべき課題を峻別し、計画の見直し等の研究開発運営を行うべきであろう。

上記の問題点について、適切な助言を行うことができなかった支援体制にも問題があったのではないか。