

### (3) 物質材料領域

研究課題名	スーパー有機 EL デバイスとその革新的材料への挑戦
中心研究者名	安達 千波矢
研究支援担当機関名	九州大学

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、革新的有機 EL 材料の創出による第 3 世代スーパー有機 EL デバイスの実現を目的としている。また、これに伴う知的財産権の確保と産業化の促進に貢献することも目指している。

本研究課題では、平成 21 年 3 月の研究開始から平成 24 年 3 月までの期間をステージ 1 と位置付けて 10 の探索的なサブテーマが同時並行的に進められていたが、その中で第 3 世代有機 EL として熱活性化遅延蛍光 (TADF) の開発に世界に先駆けて成功している。この成果を発展させるため、ステージ 2 と位置付けられた平成 24 年 4 月以降の研究期間では、中心研究者のリーダーシップにより全てのサブテーマを「TADF 発光材料の開発と有機 EL デバイスへの展開」に集約するという大胆な計画変更を行い、研究資源を集中させた研究開発が推進されている。

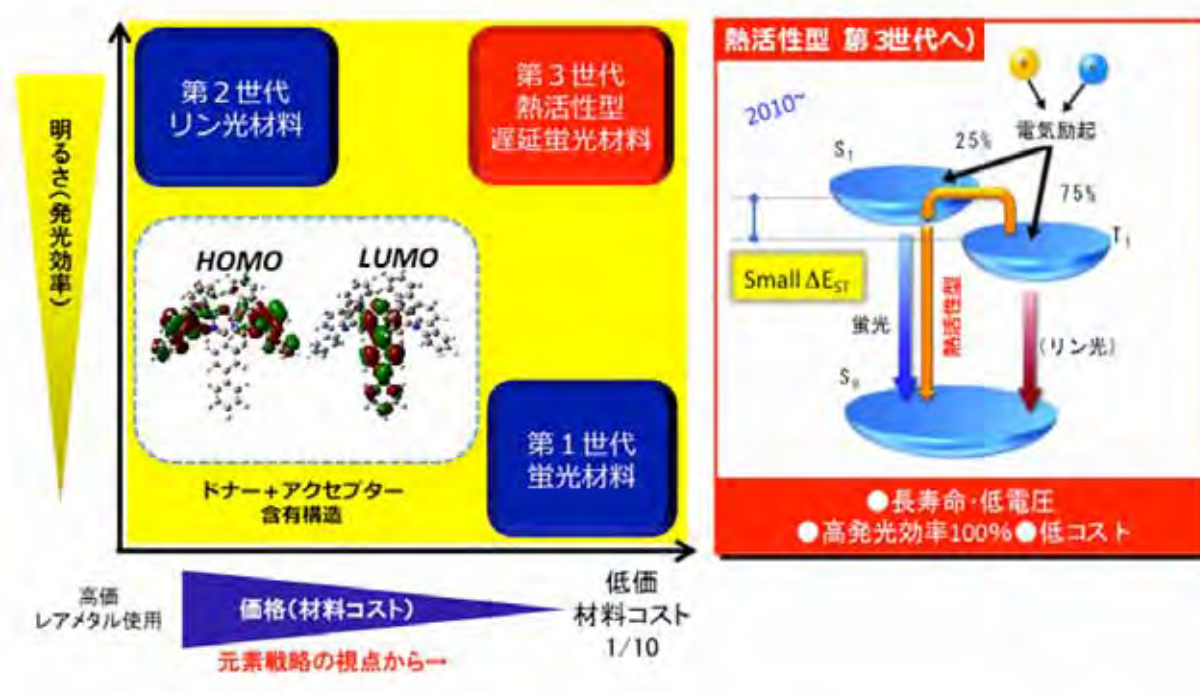


図 1. 既存の有機 EL 材料と研究目標の位置付け (※)

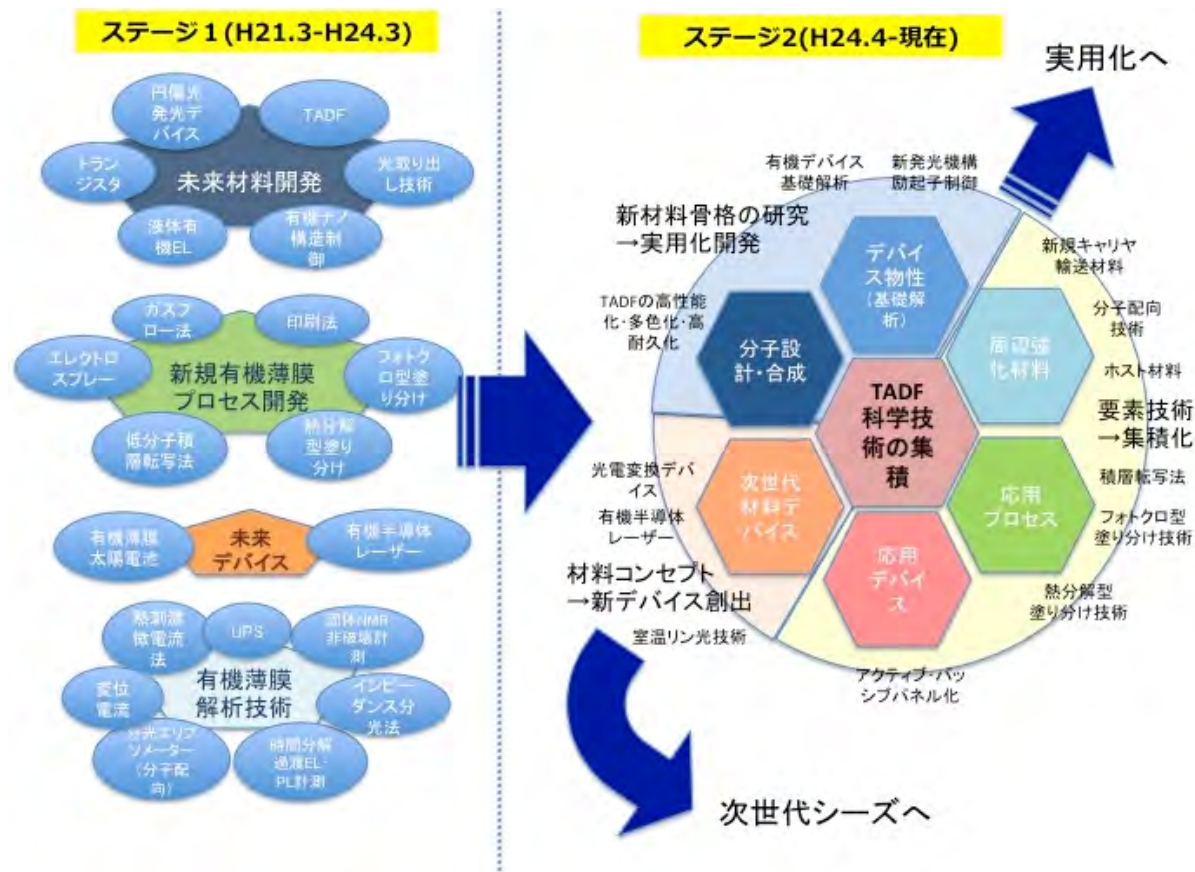


図2. 新旧サブテーマ・研究項目の対照表

## 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

- 申請者のリーダーシップで進める第3世代有機ELデバイスに必要な熱活性化遅延蛍光（TADF）の開発に、世界に先駆けて成功している。特に、RGB三原色のTADFの開発に成功したことは評価できる。これは、中間評価時点において、TADFの研究開発を直接的あるいは間接的に加速しない研究テーマを打ち切るなど、大胆なプロジェクトの練り直しを実行した効果が大きい。すなわち、H24.4以後、テーマの選択と集中を実行して、プロジェクトの成果に結びつける努力を行ったことで、世界トップ水準の成果が得られることを十分に期待できる。
- 課題の選択と集中を進めた結果、概ね順調に進捗しているものと判断される。
- 中心研究者が申請時に提案した一重項と三重項励起エネルギーの差をほぼゼロとする有機材料設計指針に基づいて、全く新しい有機材料である熱活性化遅延蛍光（TADF）材料の開発に成功したことは特筆される。また、その材料開発に合わせて当初のサブテーマおよび組織構成の選択と集中をはかり、プロジェクト期間後半には、TADF材料に特化する体制をトップダウンで構築したマネジメント力も大変評価される。

赤色、緑色、青色にわたるフルカラー発光材料に関して、外部量子効率 10~20%、内部量子効率はほぼ 100%の TADF 材料が開発されており、すばらしい成果であると判断される。また、課題であった材料信頼性・耐久性についても、輝度  $1\text{kcd}/\text{cm}^2$  の動作で 1000 時間を達成しており、従来のリン光材料と同等であることを実証した。このことは、中心研究者のチームが有機 EL 発光材料において世界を牽引する地位を築いたということを示すものと思われる。

また、TADF 新材料に対する特許戦略は、九州大の事務局が全面的にサポートする体制を構築し、中心研究者らが提唱する材料設計指針に沿って網羅的に申請を進め、167 件の特許出願を行い、本分野における日本の優位性を確保しようとする試みも高く評価される。

- 熱活性化遅延蛍光 (TADF) という新しい概念の有機 EL 発光材料の開発に成功しており、この分野では世界をリードする研究開発が展開されている。現時点で既に 100%に迫る内部 EL 量子効率が得られており、早期の実用化を目指して高い目標も設定されていることから、このまま順調に研究が進捗すれば、プロジェクト終了時に、世界トップ水準の成果が得られると期待できる。
- コストに優れる蛍光材料から明るさに優れるリン光材料へと変遷した有機 EL において、コスト、明るさの両方に優れる TADF に特化して目標を設定している。第 3 世代の有機 EL 発光材料の創出という点で、世界最先端の研究成果が期待される。発光効率のみならず、耐久性などの実用上重要となる指標についても深堀されており、プロジェクト終了後には世界トップ水準の成果とな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いると判断される。蛍光、リン光に次ぐ第 3 世代の熱活性化遅延蛍光 (TADF) に基づく新規有機 EL 材料は、世界で最先端のレベルにある。研究成果として上記 TADF に基づく高効率な有機 EL 材料が見出されてきており、プロジェクト終了時には世界のトップ水準の成果が期待される。

## 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

- 順調と判断してよい。ただし、このプロジェクトは新しい有機 EL 材料の開発に主眼があるので、デバイスとしての耐久性を含む評価は今後の課題として良いと思われる。実用デバイスにおいては耐久性や劣化が問題となることは、どのような新材料開発でも必定である。中心研究者が注目する純度は一つのパラメータに過ぎない。実用のデバイスでは、デバイス構造・作製プロセスに関連する耐電圧・耐久性などの課題もある。しかし、こうした問題は本プロジェクト内で解決するのは難しく、さらなる実用化段階での課題として良いものと思われる。

第 3 世代有機 EL デバイスに必要な熱活性化遅延蛍光 (TADF) の開発に世界に先駆けて成功しており、これを伸ばす研究と支援体制なども整えていることから所望の成果が期待される。

- 順調に進んでおり、所期の目標は概ね達成される状況である。
- 中心研究者の提案する新しい材料の開発と高信頼性化に成功した点で、順調に進捗しているものと考えられ、所期目標は達成するものと判断される。  
 中間評価時点では、緑色、青色に関しては、中心研究者が提案する一重項および三重項励起子エネルギー差を小さくする指針に従って、ほぼ目標値の TADF 材料の開発に成功していたが、赤色発光材料に関しては未達成であった。中間評価以降においても、当初の材料設計指針に従い、緑色・青色と同等な外部量子効率を持つ TADF 材料の開発に成功した。これにより、フルカラー化可能な有機 EL 材料の開発に成功した点も高く評価される。  
 耐久性試験から 1000 時間以上の寿命を実証し、従来材料に匹敵することを示した点でも実用化可能な新有機 EL 材料を開発したと判断される。
- 熱活性化遅延蛍光 (TADF) という新しい有機 EL 発光材料に関して、現時点で既に 100% に迫る内部 EL 量子効率が得られており、研究は順調に進捗していると考えられる。また、中間見直しでテーマの重点化を図った結果として、達成目標がより明確となり、目標達成可能性も非常に高いものとなった。
- 困難と思われた赤色についても、新規材料開発により成功し、RGB 全ての色の TADF 材料を開発しているなど、順調に推移していると思われる。TADF を中心とした研究体制に推移した以降についても、効率、耐久性、プロセス、デバイス開発の視点で材料開発、プロセス開発を進めており、順調に進んでいると判断される。平成 24 年 4 月以降、研究体制を TADF に集中した結果として、Nature などの著名学術誌に多く掲載されており、本プロジェクト成果のレベルの高さが実証されたものと判断される。また実用化に向けた加速についてはさらに大学発ベンチャーなどの実用化ステージも検討されており、今後の体制づくりを見守りたいところである。
- ステージ 2 (H24.4-H25.9) において下記の成果が得られており研究の進捗 (達成) は順調に進んでいると判断される。
  - ① TADF の基礎発光特性については目標値に近いレベルに到達しつつある。
  - ② TADF 素子の耐久性については未だ目標値未達であるが、改良が進みつつある。
  - ③ 分子配向技術、④ TADF 応用プロセス・デバイスの開発についても順調に推移していると判断される。
 青色発光素子、赤色発光素子については目標値に対して改良が必要であるが、その改良方向は見出されている。素子の耐久性についても改良の方向は見出されており、今後の研究開発により所期の目標達成は可能と判断される。

### 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

- TADF に特化したため、このラインでのサブテーマの進捗は非常に良い。切り捨てた有機トランジスタ材などのテーマは、発光トランジスタの中で一部継続の状況となった。

プロジェクト本体が選択と集中をはかり、新材料開発に重きが移った結果、主伝導 FET 関連など緊急性のないものは整理され、発光トランジスタの研究は有機 EL の視点から進められるようになった。EL 発光プロジェクトに集中が図られたため、発光トランジスタとしての到達点は不明ではあるが、特に問題とはならない。

- 各サブテーマ毎に進捗の優劣はあるものの、基礎的な研究開発、論文成果などは申し分ない。但し、実用化ステージへの移行には幾つかの課題がある。企業との連携強化が望まれる。
- 平成 24 年 4 月より、新 TADF 材料に特化するチーム編成を再構築したマネジメント力は評価されるべきと思われ、所期目標を達成できるものと判断される。
- 所期の研究内容は多岐にわたっていて達成目標も細分化され、わかりにくかったが、見直しを行った後は研究サブグループも 5 つに集約され、それに対応したサブテーマの達成目標も設定され、それぞれのサブテーマの目標達成へ向けての体制が整ったように思われる。特に、熱活性化遅延蛍光 (TADF) 材料の基礎発光特性に関しては高い目標が設定され、それへ向けて顕著な成果も得られていることから、このまま研究が進捗すれば目標達成は十分に可能であると考ええる。また、熱活性化遅延蛍光剤材料の早期実用化を目指して、明確な目標を設定して耐久性の向上取り組んでいる点も評価できる。今後、企業との連携を強めながら研究を進めて行けばこの点に関しても目標達成は可能と考える。その他のサブテーマについても著名な論文誌で発表するなど顕著な成果が上がっていることから、目標達成は可能であると考ええる。
- TADF を用いた第 3 世代のスーパー有機 EL デバイスの実現を目指し、TADF 発光材料の開発に集中するために研究体制の変更を行い、サブテーマもその変更に沿って変更している。基礎研究から実用化までを包含した研究体制となっている。九大のコア研究チームとサブテーマの研究機関との連携推進を順調に進めるために九大の各研究チーム内にサテライト・連携研究機関を設置し、より密接な研究開発体制を確立するなど、ともすれば独立研究になりがちなサブテーマとの連携を効果的に進めようとしている点は高く評価される。
- ①TADF 分子設計材料合成
  - 緑色素子：ほぼ目標値を達成している。
  - 青色素子：有機 EL 最大の課題である青色発光素子も目標値に近いレベルに到達しており、今後の開発で目標達成と判断される。
  - 赤色発光素子：目標値を達成できそうな基本骨格が見出されており、今後の開発で目標達成と判断される。
- ②TADF デバイス物性
  - TADF 素子の耐久性については実用的耐久性評価、劣化機構解明が進みつつあり、キャリア再結合位置の制御などの耐久性向上の方向が明らかにされており、今後の開発で目標達成と判断される。
- ③TADF 周辺強化材料

自己組織的分子配向技術や成膜温度変調による分子配向技術などが見出されるなど順調に推移していると判断される。

④TADF 応用プロセス

実用的に重要なウエットプロセスや画素塗り分け技術など順調に推移していると判断される。

⑤TADF 次世代材料デバイス

光変換材料、有機半導体レーザー、室温りん光デバイスなど次世代技術については順調に推移していると判断される。特に室温りん光デバイスの発見は無機蓄光材料にはない新しい特性として将来に期待できるものと判断される。

### 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、TADF の研究開発を直接的もしくは間接的にも加速しない研究テーマを打ち切って、的を絞っており問題はない。ただし、海外連携において特に CSIRO を選択して連携した理由が明確ではない。国内の先端知的財産を強める目的として、また、このプログラムの成果を発展させる施策として、この連携が強みとなるか明確にすべきである。

知的財産権については、特許出願についての方針が明確になっており、特に問題はない。ただし、出願した基礎出願 37 件が基本特許として十分であるかを分析し、足りなければ更に申請するなど、万全を期するべきである。

若手研究者の育成については、若手 11 名、テクニカルスタッフ 11 名、企業からの若手研究者 17 名に対して、平成 24 年度データにおいて論文総数 25、第一著者 13、国際学会 9 件の発表は十分な数字とは言えない（一人年 1 報としても）。しかし、発表した内容の質は高く、学会賞を取るなど育成に貢献している様子がうかがえる。また、外国人の受け入れなど、国際化に対する取り組みも見られる。

- 研究実施・推進体制については、研究体制の見直しを図ったことで、全体的に統一されたが、協働機関との連携強化が望まれる。

知的財産権については、精力的に獲得に努力している。

- 研究実施・推進体制については、テーマの選択と集中、統廃合をはかり、組織体制を変更し、所期目標達成に向けて問題はないと判断される。

知的財産権については、国内 96 件、外国 71 件、合計 167 件を申請しており、中心研究者の材料設計指針を基に知財チームと連携することによって、特許戦略も順調に進めていると判断される。

若手研究者の育成状況については、特任助教を含むポスドク研究員 21 名を雇用して研究を進めており、いずれも中心研究者が開拓した有機材料分野を発展させる人材として期待できる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、中間評価時点で、参画企業やベンチャー企業設立を含めて TADF 材料の工業化を計画していたが、現時点で実現し



ていない。H24. 4月に設立した実用化開発センターのサポートも含め H26. 3月までに大学発ベンチャー企業を設立する計画であり期待したい。

科学・技術対話の取組みについては、中高生を含む一般人へのセミナー・イベント・広報活動を積極的に進めており、この方針を進めることで問題ないと思われる。

- 研究実施・推進体制については、最先端有機光エレクトロニクス研究センター(OPERA)を設立するなど、初期の段階から研究推進のための体制が整えられていたと評価するが、研究対象が多岐にわたっていたこととテーマが細分化されていたため、研究の方向が見極めにくいという面もあった。しかし、サブテーマと研究グループの見直しを行った後は、テーマが重点化され目標も明確となって、強力な研究実施・推進体制が構築されたように思う。共通の達成目標へ向けての連携関係も明確となった。

研究支援体制については、プロジェクト支援室や広報・戦略企画室が設置されるなど、最先端有機光エレクトロニクス研究センター(OPERA)を中心とした研究支援体制が構築され、研究支援活動が活発に行われていると評価する。

知的財産に関する取組みについて、知財戦略として産学連携による取組みが行われ、これまで、96件の国内特許出願と、71件の海外特許出願が行われている点は高く評価できる。

成果の社会還元に向けた検討については、ベンチャーを設立して成果を社会へ還元しようとする取組みは評価できる。しかし、本プロジェクトの成果に基づく技術による市場の創製や市場拡大のためには、ベンチャー活動だけでは限界があるので、民間企業との連携を強化して頂きたい。

- TADFで優れた結果を得られた時点で、TADF開発に特化した研究体制に変更するなど中心研究者のリーダーシップに敬意を表したい。

知的財産権については、TADF基本特許を中心に技術マップを構築し、大学と民間の役割も考慮しつつ、進めている。外国出願も積極的に行っており、特に問題は感じられない。

若手研究者の育成については、若手研究者のキャリアパスも開拓し、助教採用など実績も上げている。積極的な取組みとして評価される。

成果の社会還元については、大学発のベンチャーを設立し、そのベンチャーを通じた実用化を進め社会に成果還元を考えている。成功すれば素晴らしいが、筆者も記載している通り、実用化への課題は多い。特に国プロの成果を活かすという観点で透明性、公平性を鑑みる必要があるが、純粹に事業を成功させるという視点で考えると、矛盾が生じる可能性が危惧される。国プロの成果の事業化における共通の課題であるが、グローバルな競争に勝つ必要があることを考えると、海外のメーカーとのアライアンスなども必要であり、柔軟な対応が望まれる。

- 知的財産に関する取組みは十分になされていると判断される。



研究課題名	1分子解析技術を基盤とした革新ナノバイオデバイスの開発研究－超高速単分子 DNA シーケンシング、超低濃度ウイルス検知、極限生体分子モニタリングの実現－
中心研究者名	川合 知二
研究支援担当機関名	大阪大学

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、高度予防医療やオーダーメイド医療の実現に向けて、DNA やタンパク質等の生体分子の1分子解析技術に関するコア技術群の完成度を高め、ウイルスやアレルギー原因物質等の超高速・超高感度検出によって、がん・感染症等の超早期診断等が可能となるナノバイオデバイス群を開発することを目指している。本研究課題は基礎研究からデバイス開発、製品普及に向けた標準活動まで含めた一貫した研究開発を行うとしており、以下の6つのサブテーマから構成されている。

### 「基盤科学技術」

- [1] ゲーティングナノポアによる1分子検出・識別技術の開発
- [2] ナノピラー・ナノウォールによる1分子分離・解析技術の開発

### 「応用技術開発」

- [3] 極限ウイルス検査チップの開発
- [4] 超高感度 RNA 診断チップの開発
- [5] 呼気診断センサ技術の開発

### 「標準化」

- [6] 1分子解析技術の産業利用及び臨床応用に向けた標準化研究開発

また、コア技術群のシステムインテグレーションを通して作製するナノバイオデバイス群の実用化に向けて、たとえばウイルス検査チップ及び RNA 診断チップにおいてはトータル検査時間 15 分以内、ライフアシスト呼気診断センサにおいては ppt レベルの高感度といった諸性能の達成目標を定め、研究開発に取り組んでいる。

## 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

- 蛋白質や DNA など生体分子の一つ一つを分離、検出、解析する技術を発展させ、ウイルスやアレルギー原因物質を超高速で検出するシステムを開発するものであり、基盤技術に関係する2つのサブテーマ、応用開発に関係する3つのサブテーマ、それから標準化に関係する1つのテーマの6つが、中心研究者のリーダーシップのもと、有機的に繋がりがプロジェクトが推進されている。

基盤技術の2つについては中心研究者の行うゲーティングナノポアを用いた1分子検出・識別技術、ならびに共同提案者の推進するナノピラー・ナノウォールを用いた1分子分離・解析技術に関連して、世界トップレベルのジャーナルに成果を発表するなど世界をリードする成果が生まれている。また、応用技術では、基盤研究の成果のもと、インフルエンザウイルスの1分子検出、CTC分離回収デバイスの試作、ナノポアデバイスを用いたcAMP結合型蛋白質のアロステリック変化の検出など、大学と企業がうまく連携して目標を達成している。さらに、標準化では、1分子解析技術のために塩基配列と分子数を担保した標準物質の開発を行うなど、世界をリードする研究開発が展開されている。

- 所期の目標設定は適切に行われている。世界をリードする研究開発が成されており、世界のトップ水準の成果になることが見込まれる。
- 中心研究者と共同提案者（阪大および名大）が進めるナノポアおよびナノピラー・ナノウォール構造による1分子解析技術を利用した超高速・超高感度のDNAやRNA検出は、従来の10倍以上の検出感度を実現しており、所期目標に向けて順調に成果を挙げしており、世界トップ水準の成果になるものと判断される。

一方、所期目標である実用化および市場投入をはかるためには、前段および後段技術の完成が、プロジェクトの成功の鍵を握るものと思われ、トータルな検出技術を生み出すために、参画する民間企業が分担する分離回収技術、濃縮技術、および一体化技術等を含めた最終的なプロトタイプデバイスの完成ができるかによると思われる。それぞれの民間企業の明確な実用化構想を中心研究者と計画している点は評価される。また、H25.1月に設立したベンチャー企業QB社が、DNAシーケンサーの製品化に向けた活動を開始した点も高く評価される。
- 超高速DNAシーケンシング、超低濃度ウイルス検知、極限生体モニタリングの実現を目指して、ゲーティングナノポア、ナノピラー・ナノウォールを用いた1分子検出・識別技術、1分子分離・解析技術を確立するとともに、これらの技術を応用して、新しいウイルス・病原菌検査システム、RNA検査DNAチップ、呼吸診断チップを開発しようとするプロジェクトであり、世界をリードする研究開発が展開されていると考える。それぞれ研究項目に対して高い目標も設定されており、目標の優位性も高いと言える。このまま研究が進捗すれば世界トップ水準の成果も期待できる。
- タンパク質やDNAなどの生体分子の一つ一つを分離、検出、解析するプラットフォームを開発し、各種のウイルスやアレルギー原因物質などを高速に検出するシステムの実現を目指している。基盤技術となるナノポア、ナノピラーの技術は世界トップクラスのレベルの技術であり、技術が確立したときにはインパクトが大きなものになると思われる。DNAシーケンサー、DNA分離技術、DNAチップ検査時間、CTC分離回収技術などの競合との比較も行われており、トップレベルの目標と立ち位置であることがわかる。
- 本研究は「ゲーティングナノポア」を用いた1分子検出・識別技術、「ナノピラー・ナ

「ナノウォール」を用いた1分子分離・解析技術を応用したウイルスやアレルギー原因物質等を超高速検出するシステムの開発を目標としたもので世界最先端を行くものである。本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見込まれる。

## 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

- 基盤技術に関係する2つのサブテーマ、応用開発に関係する3つのサブテーマ、それから標準化に関係する1つのテーマの6つが、中心研究者のリーダーシップのもと、有機的に繋がリプロジェクトが順調に推進されている。世界的な科学雑誌での成果発表や製品レベルに繋がる大学と企業との連携も十分であることから順調と判断される。更に、標準化についても前向きに進められていると判断される。

実用化を目指した阪大発ベンチャー企業の設立、63件の応用開発特許の取得や標準化の動きも活発であることから所期の目標達成が可能と見込まれる。ただし、JMAC（バイオチップコンソーシアム）による標準物質について、検出限界の定義や検出限界の決定手法などの規格原案化については、終了時までにはプロジェクトの研究を確固たるものにするためのものとするべきである。

- 概ね順調に進捗している。基本概念の構築と実現可能性の実証に成功しており、所期の目標達成が可能と見込まれる。

- 中心研究者と共同提案者（阪大、名大）が進めるナノポアおよびナノピラー・ナノウォール構造を用いる1分子解析技術を利用した超高速・超高感度のDNAやRNA検出については所期目標に向けて順調に成果を挙げていると判断される。

①超高感度RNA診断チップ開発、②呼気診断センサ開発、③極限ウイルス検査チップ開発、即ち参画企業群との連携成果から、市場投入まで進むかどうかは未定であるが、その道筋や方策を参画企業群と構築していることも評価される。

- 所期の目標が達成されている項目も多く、研究の進捗は順調であると考えられる。残された課題も明確になっており、対策も考えられていることから、研究がこのまま進捗すれば所期の目標達成は十分可能と判断する。

- 全体として順調に進んでいると判断される。ゲーティングナノポアでは、マイクロからナノメートルの幅広い大きさの生体分子を検出する技術を前倒して達成し、Nature関連誌に採択された。この技術は企業に技術移転し、サブマイクロ領域でウイルス検出に成功している。ナノピラーではDNAとmiRNAを60 $\mu$ 秒で分離することに成功するなど高速分離技術を確立している。複数の企業との共同研究で具体的なウイルスやDNAなどの高速検出を実証している。

- これまでの研究の進捗は順調に推移していると判断される。世界をリードする「ゲーティングナノポア」と「ナノピラー・ナノウォール」という基盤技術を基軸に極限ウイルス検出チップ、呼気診断技術、超高感度RNA診断チップの開発が順調に進んでいる

る。

今後の大きな課題として、本技術がより鎖長の長い DNA・RNA にも使えるようにするという点と超高速検出の課題となっている濃縮技術の高速化があるが、その解決の方向性は見出されており、所期目標の達成は可能と判断される。

### 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

- 2つの基盤技術である中心研究者の行うゲーティングナノポアを用いた1分子検出・識別技術、ならびに共同提案者の推進するナノピラー・ナノウォールを用いた1分子分離・解析技術に関連しては、世界トップレベルのジャーナルに成果を発表するなど世界をリードする成果が生まれており、順調である。

また、この成果は応用技術であるウイルス・病原菌検査システムの開発、RNA 検査 DNA チップ開発、呼気診断センサの開発に取り入れられ、企業との共同により世界をリードする成果を生んでいる。以上のように、各サブテーマは必要性および有効性において高いと判断される。

標準物質の開発においては、質量分析技術を用いた配列担保手法の確立のもと、単一ターゲット1分子を含む標準物質を開発している。さらにナノポア技術を用いた1分子分の注入装置ナノポアソータの基本概念を構築するなど順調であると判断される。

- [1] ゲーティングナノポアによる1分子検出・識別技術の開発  
順調に進捗しており、所期の目標は達成される見通しである。検出頻度の増加が今後の課題となる。
  - [2] ナノピラー・ナノウォールによる1分子分離・解析技術の開発  
1分子分離・解析技術は、幾つかの未達な課題が見込まれる。
  - [3] 極限ウイルス検査チップの開発  
順調に進捗しており、所期の目標は達成される見通しである。
  - [4] 超高感度 RNA 診断チップの開発  
シーケンス制御の最適化の課題が残る。
  - [5] 呼気診断センサ技術の開発  
高感度・高選択性ケミカルセンサ開発における一体化デバイスの評価に課題が残る。
  - [6] 1分子解析技術の産業利用及び臨床応用に向けた標準化研究開発  
順調に進捗しており、所期の目標は達成される見通しであるが、標準物質の品質保証手順の開発に課題が残っている。
- 
- 1分子解析技術を利用した超高速・超高感度の DNA や RNA 検出技術の基礎テーマとその応用技術である、①超高感度 RNA 診断チップ開発、②呼気診断センサ開発、③極限ウイルス検査チップ開発、さらには④1分子解析技術の標準化、の各サブテーマは相互に必要であると判断される。
- 
- [1] ゲーティングナノポアによる1分子検出・識別技術の開発

所期目標もほぼ達成され研究は順調に進捗していると判断する。顕著な成果も上がっているが、本研究プロジェクトにおける基幹技術であることから、今後、更なる成果を期待する。

[2] ナノピラー・ナノウォールによる1分子分離・解析技術の開発

所期目標達成へ向けて研究が順調に進捗していると判断する。顕著な成果も上がっており、このまま研究が進捗すれば所期目標は達成されると思われる。

[3] 極限ウイルス検査チップの開発

所期目標達成へ向けて研究が順調に進捗していると判断する。このまま研究が進捗すれば所期目標は達成されると思う。実用化デバイスの位置づけが不明確。実現しようとしているのは実用化の可能性を評価するためのプロトタイプデバイスのように思われる。

[4] 超高感度 RNA 診断チップの開発

所期目標が達成されつつあり、研究が順調に進捗していると判断する。このまま研究が進捗すれば所期目標は達成されると思う。

[5] 呼気診断センサ技術の開発

所期の目標が定量的に設定されていない部分もあるので、目標達成に対する評価が難しい部分もあるが、研究は順調に進んでいると考えられるので、所期の目標は達成されるものとする。

[6] 1分子解析技術の産業利用及び臨床応用に向けた標準化研究開発

技術的な目標は達成可能と思われるが、今後、標準化をどのように推し進めていくかが課題とする。

○ それぞれのサブテーマも予定通り進捗していると判断される。ゲーティングナノポアでは、トンネル電流による DNA と RNA の1塩基分子識別技術を実証した。ナノスリットでは16万塩基以上の1本鎖 DNA の1分子伸長技術に成功している。これらの基盤技術は、応用技術のサブテーマに活用されて、それぞれのサブテーマで実験体や CTC などの検出に成功している。

○ 下記理由により開発は順調に推移していると判断する。

[1] ゲーティングナノポアによる1分子検出・識別技術の開発

トンネル電流による塩基配列決定、ゲート電圧による任意 DNA 分子数の分取などの成果が得られている。

[2] ナノピラー・ナノウォールによる1分子分離・解析技術の開発

生体分子の100 $\mu$ 秒分離の世界最高水準を実現などの成果が得られている。残された課題もあるが今後の開発で目標達成できると判断される。

[3] 極限ウイルス検査チップの開発

ナノポアデバイスによるインフルエンザウイルスの分離とナノピラーによる粒子の捕捉・分離・回収などの成果を見出し、ハイブリッドデバイスの方向性を見出している。残された課題もあるが今後の開発で目標達成できると判断される。

[4] 超高感度 RNA 診断チップの開発

CTC 捕捉モジュールでの静置細胞捕捉や課題である前処理技術での miRNA の量比を保持できる回収技術の開発などの成果が得られている。残された課題もあるが今後の開

発で目標達成できると判断される。

[5] 呼吸診断センサ技術の開発

疾病マーカーの特定と静電噴霧濃縮技術での高効率濃縮などの成果が得られている。残された課題もあるが今後の開発で目標達成できると判断される。

[6] 1分子解析技術の産業利用及び臨床応用に向けた標準化研究開発

標準物質による検出系評価指標の基本手順の開発などの成果が得られている。残された課題もあるが今後の開発で目標達成できると判断される。

### 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、特に問題は無い。必要な雇用（特任助教や企業研究員の博士課程入学、会社からの研究員の派遣含む）が順調に実施されている。ただし、微細加工技術者や臨床研究など現場レベルでの人的配置は不足のようであるが、人数の単なる増加でなく重要テーマの絞り込みなども必要と考えられる。

若手研究者の育成については、世界的にインパクトのある研究に携わることができている結果、学会賞獲得や次のステップへの異動に繋がり、若い人材が順調に育っている。また、研究の成果が新しい企業化へと繋がる施策ができています。

- 研究実施・推進体制については、中心研究者と共同提案者を中心とするアカデミアおよび応用技術と標準化を担当する民間企業群からなり、問題がないと思われる。

若手研究者の育成については、若手研究者の165件以上の国際会議発表と国内合わせて46の若手受賞に繋がっていることから、十分な若手研究者の育成がはかられているものと思われる。

成果の社会還元については、中心研究者の所属する阪大では、1分子DNAシーケンサーのベンチャー企業設立を完了しており、市場投入に向けた準備が行われている。また、最終的なバイオデバイス群の社会還元はこれからの進捗状況にかかっているが、十分な道筋が議論されていると判断される。

- 研究実施・推進体制については、技術開発に対する研究実施・推進体制はそれなりに構築されていると考えるが、成果の実用化を考えた場合、臨床研究・臨床試験のための体制強化が欠かせない。プロジェクトの中でもこの点の重要性について触れられており、それを意識した体制の構築も行われているようであるが、実用化に必要な臨床データとそれを取得するための取り組みについても明確にして頂ければと思う。

研究支援体制については、プロジェクト支援事務室を設置して、全体を統括するための事務局業務や会計/総務、シンポジウム企画・運営などの業務を支援する体制が構築されており、研究者が研究活動に専念できる環境が整えられていると考える。

知的財産権については、特許出願促進のための取り組みが行われ、結果として、現在までに63件の特許が出願されていることは評価できる。今後は海外出願を増やして頂きたい。

○ 研究実施・推進体制については、必要に応じて特任助教などを採用し、体制強化が図られている。特に臨床研究や治験の経験を有している人材は貴重であり、彼らを獲得できたことは応用研究の成功のためには重要なステップであったと考えられる。

大阪大学、名古屋大学中心の基盤技術研究と、企業中心の応用研究がうまく連携できているように見える。人材もそれぞれの研究機関で交流し、技術の移転がうまく進んでいる。

若手研究者の育成については、プロジェクトで若手を積極的に採用し、いくつかの大学への新規採用もなされるなど、キャリアパス形成の努力は評価される。ただし、プロジェクトでかなりの数の若手を採用しているが、プロジェクト終了後に彼らのキャリアパスが見えているのかが不明。今年度で終了するプロジェクトであるので、若手の今後をしっかりと面倒見る必要がある。

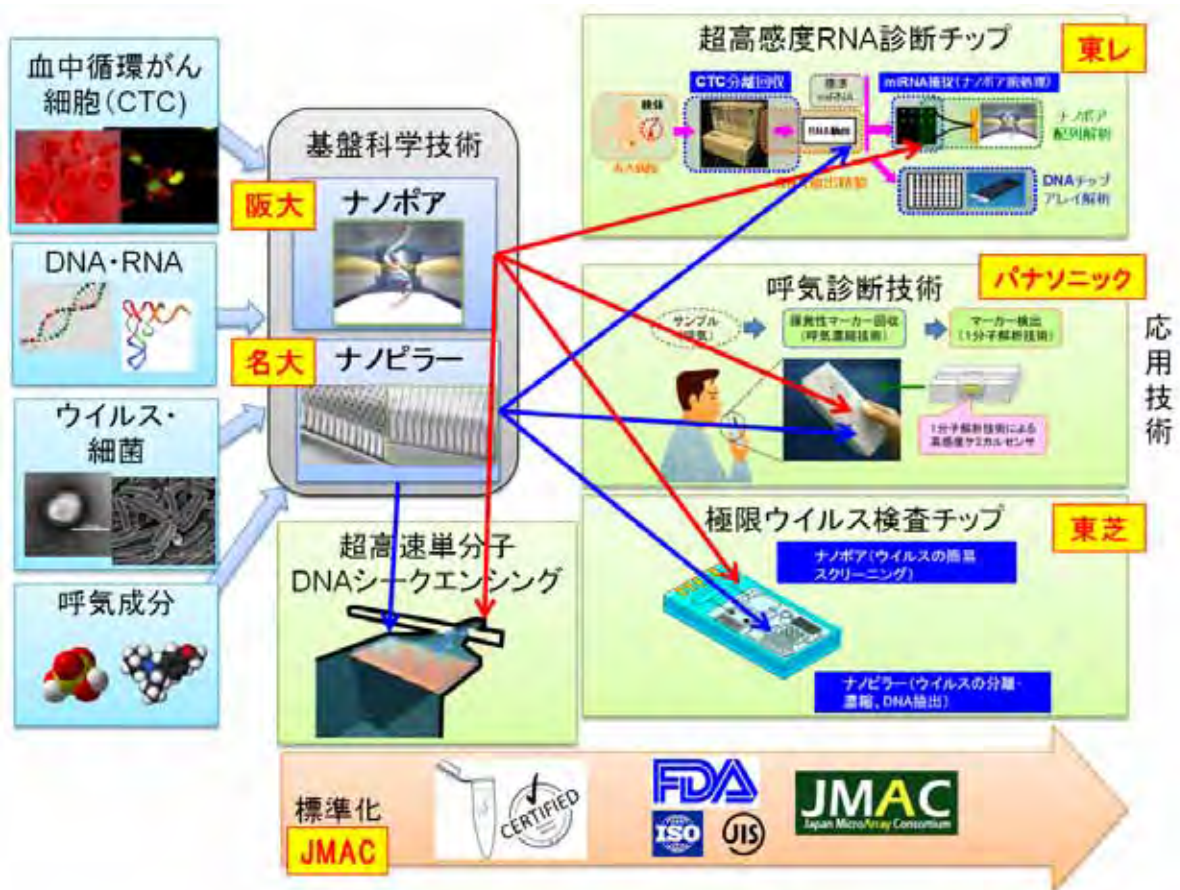


図1. 本研究課題で実施される基盤科学技術、応用技術開発、標準化



研究課題名	低炭素社会創成へ向けた炭化珪素 (SiC) 革新パワーエレクトロニクスの研究開発
中心研究者名	木本 恒暢
研究支援担当機関名	独立行政法人産業技術総合研究所

## 1. 研究課題の概要

パワー半導体デバイスは、発電から送電、最終使用に至るまでの様々な用途（送電網設備、家庭用電化製品、自動車等）で、電力エネルギーを制御する電力変換器（交流・直流変換器、昇圧・降圧回路等）に用いられている。炭化珪素 (SiC) は、現在のパワー半導体材料の主流であるシリコン (Si) を凌ぐ絶縁破壊電界や熱伝導率といった材料特性を備えており、優れた耐電圧性、低電力損失性、耐熱性をもつ次世代パワー半導体材料として期待されている。

本研究課題では、SiC の結晶成長技術からデバイス、回路に至るまでの様々な要素技術の完成度を高めることで、小型特殊用途にとどまらず大電力制御用途にまで普及対象を拡大させ、電力エネルギーの熱損失を大幅に低減し、省エネルギー化に貢献することを目指している。また、次世代電力インフラ用の超高耐電圧 SiC パワー半導体デバイスを実現するために以下の3つの目標を設定している。

- 「1」13kV-20A 級の SiC PiN ダイオード（P層／絶縁層／N層構造のダイオード）、IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）の実現
- 「2」250℃、5kV スwitching動作の実証
- 「3」上記を可能とする材料科学、デバイス物理、結晶技術の確立

これらの目標を達成するため、以下の3つのサブテーマを推進するとしている。

- [1] SiC の欠陥・物性制御とデバイス基礎（基盤研究）
- [2] 超厚膜・多層 SiC エピウェハ技術（エピ成長）
- [3] プロセス基礎・超高耐圧 SiC デバイス技術（デバイス）

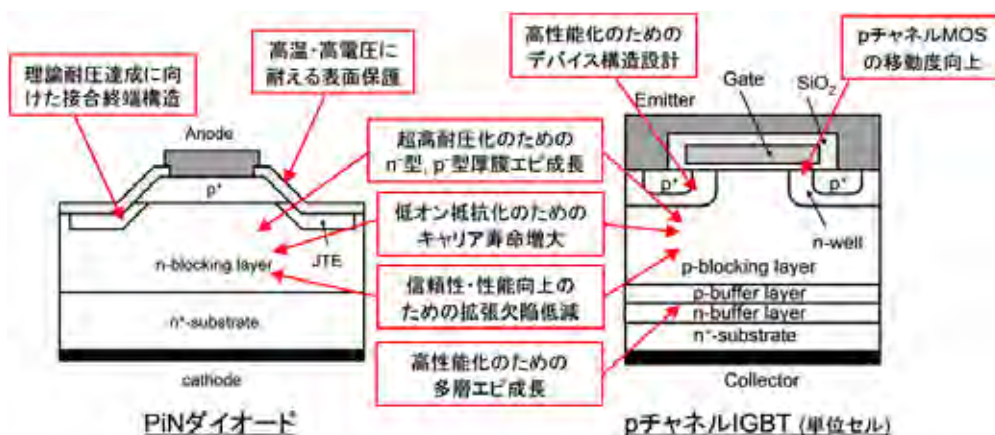


図1. 目標とするデバイス構造と技術解決に取り組む諸課題例

## 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

- 超高圧（10kV 超級）SiC パワーデバイスの構築は、大規模電力ネット構築の鍵となるものである。配電系統に用いられる 6.6kV 交流の電力変換器では、現在多段の Si サイリスタが用いられているが、13kV 耐圧の SiC デバイスの実現は、これを解決する鍵となる素子である。このプロジェクトでは、高品質の欠陥密度の少ない SiC 結晶成長をはじめとし、仕様に耐えるデバイス作製に成功しており、世界のトップ水準の成果であると判断される。  
なお、この取り組みは、欧州や米国、中国・韓国などでもなされているが、プロジェクトでの成果（デバイスの特性値）はいずれも世界最高水準にあると判断される。
- 今回の目標設定は、ベンチマークから見て世界のトップレベルである。  
成果の見込みは、サブテーマなどの具体的な進捗を鑑みた場合、3つのサブテーマのうちの3つ目の評価遅れであるが、既にサンプルの試作を終えているため成果達成は見込まれる。
- 本拠点は、高品質の SiC の結晶成長、物性制御、超高耐圧デバイスのいずれの分野に於いても世界最高水準にあると言える。今後、得られた知見と結晶・デバイス技術を結集することで、SiC 材料、デバイスの両面で、世界トップレベルの研究開発拠点を形成できるものと期待される。
- H25 年 9 月時点における各 3 グループが進めるそれぞれ要素技術の達成性能値は、いずれも世界レベルで最高水準である。更に、最終目標であった 13kV、30A 級の PiN ダイオードや 16kV、20A 級の IGBT を 3 インチウェハレベルで開発に成功し、所期目標は達成できたことは大きく評価できる。一方、同時期に進行している米国における同様デバイスの性能は更に高性能を実現しており、その違い考察・解析を含め、今後所期目標以上に性能向上への努力が期待される。
- 多くの目標が記載されているが、それぞれの目標の重要度に関する優先度や関連が非常にわかりにくい。最終的な目標が超高耐圧 SiC パワーデバイスの実現にあるのであれば、開発したデバイスの性能や耐圧が最優先の達成目標になるかと思われる。しかし、PiN ダイオード性能、IGBT 性能に関しては、現時点で本プロジェクトの最終目標を超える結果は得られているが米国の研究グループの結果と比較すると劣っている。逆に耐圧はより高い値が得られているので、総合的にみると世界トップレベルの成果が得られていると言えるのかもしれないが、本プロジェクトで設定された目標値は明らかに米国の研究グループの結果よりも低い値となっているので、所期の目標値の優位性は高いとは言えない。しかし、結果的にはこの目標値を超えた成果が得られているので、成果としては顕著な成果が得られていると評価できる。また、このまま研究が進捗すれば世界のトップ水準の成果が得られると期待できる。

- 将来のエネルギー国家戦略を考える上で、パワーデバイスの存在はきわめて大きな価値を持つ。本プログラムで目標とする 10kV 超級のパワーデバイスは将来の電力ネットワークを構築するうえで重要なデバイスであり、その候補として SiC の開発は大変重要であると認識している。SiC デバイスの開発に必要な基板については、これまで米国メーカーの独占であり、低コスト化が大変難しく、普及の妨げとなっていた。SiC 基板の結晶成長技術、超高耐圧デバイスの実現は、インパクトの大きな目標として、またその目標数値も世界的な優位性を保つものとして重要であると思われる。また、材料開発のみならずデバイス開発も重要であるが、本テーマの目標としてのスイッチング素子や IGBT の開発は大変重要であると考えます。
- 国際的なベンチマークと本プロジェクトで掲げる目標値を比較して世界をリードするものであると判断する。  
本プロジェクトではこの目標値を既に達成している項目も多く、プロジェクト終了時にはトップ水準の成果になると判断する。

## 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

- これまでの研究の進捗（達成）状況に関し、順調と判断する。3つからなるサブテーマに対して所期目標を上回る結果が得られている。
- 研究の進捗に関しては、順調と判断。所期の目標達成に関しては達成が見込まれる。  
理由) 基盤研究 (G1)、エピ成長 (G2)、デバイス (G3) の各グループにおいて殆どが高い目標に拘らず達成され、また唯一未達の PiN ダイオードと IGBT の組み込みにおける 250°Cでの実証であるが、PiN ダイオードの特性は単独では目標が達成されているため全体での実証も達成が見込まれる。
- 平成 24 年度後半から加速的に研究が進展し、最終目標 1 (13kV-20A 級の SiC PiN ダイオードを実証し、その基本特性を明らかにする)、最終目標 2 (13kV-20A 級の SiC IGBT を実証し、その基本特性を解析する) を達成している。概ね順調に進捗しており、最終目標 3 (高温絶縁封止および超高耐圧スイッチング特性計測の基本技術を確立し、超高耐圧 IGBT の 250°Cにおける 5kV, 20A スwitching動作を実証する) の達成も期待されるところである。
- 最終目標であった 13kV、30A 級の PiN ダイオードや 16kV、20A 級の IGBT を 3 インチウエハレベルで開発に成功しており、所期目標は達成できている。また、他の目標である高温動作時におけるスイッチング特性の達成も十分に見込めると判断する。
- 他のプロジェクトとの結果の比較を別とすると、最終目標 3 以外は本プロジェクトで設定された所期の目標が現時点で大部分達成されているので、プロジェクト終了までには所期目標は達成すると思われる。できれば、プロジェクト終了までには 9 項目の最終目標すべてで他のプロジェクトを凌駕するような成果が得られることを期待する。

- 概ね順調に研究が推進されていると理解する。結晶成長にも一定の成果が見えており、 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  の超高純度を達成するとともに、n 型、p 型ともに  $10^{14} \text{cm}^{-3}$  のドーピング制御を確立できている。これ以外の最終目標もほぼ達成しており、順調な研究進捗といえることができる。今後の課題は IGBT を作製し、スイッチング動作を実証することであり、予定通りに結果が出ることを期待したい。また、中間報告で指摘のあった発表論文の少なさも 24 年度以降急増しており、25 年度も順調のようである。
- 研究の進捗に関しては、キャリア寿命の向上、厚膜化などの基盤技術開発とデバイス開発などで成果をあげてきており、順調と判断する。  
所期の目標達成に関しては、今後の課題と解決方向も明確にされており、今後における研究開発により、達成可能と判断する。

### 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

- 3 つのサブテーマは必要であり、かつ順調に進められている。
  - [1] SiC の欠陥・物性制御とデバイス基礎（以下、基盤研究）  
SiC の欠陥・物性制御において目標をクリアしている。
    - ・ P-SiC の寿命において従来の 30 倍のライフタイムを達成
    - ・ 超薄膜成長層の欠陥低減による高品質化を達成
    - ・ IGBT の高性能化
    - ・ 高温度・高電圧実証
  - [2] 超厚膜・多層 SiC エピウエハ技術（以下、エピ成長）  
超薄膜・多層 SiC エピ成長において目標値を達成する結果を得ている。  
キャリア寿命  $4.7 \mu\text{s}$ 、膜厚  $160 \mu\text{m}$ 、n-type ドーピング濃度  $1-2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  の特性、キャリア寿命  $2.4 \mu\text{s}$ 、膜厚  $180 \mu\text{m}$ 、p-type ドーピング濃度  $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  の特性の達成など。
  - [3] プロセス基礎・超高耐圧 SiC デバイス技術（以下、デバイス）  
プロセス基礎超高耐圧 SiC デバイス技術において、 $13\text{kV}$ 、 $120\text{A}$ 、 $300^\circ\text{C}$  での動特性半導体評価装置を開発し、 $5\text{kV}$ - $250^\circ\text{C}$  での目標の 4 倍の電流値  $80\text{A}$  での PiN ダイオードの逆回復特性を得るなど順調である。
- [1] 基盤研究  
研究の進捗に関しては、順調と判断。所期の目標達成に関しては、達成可能と判断。  
理由) SiC の物性制御、デバイス原理実証において当初計画以上に達成している為。
- [2] エピ成長  
研究の進捗に関しては、順調と判断。所期の目標達成に関しては、達成見通しと判断。  
理由) 本サブテーマの 4 つの具体的な開発目標に対して達成しており、今後は更なる高品位化や物性制御後術の高度化のため、所期目標は達成出来る見通しは高い。
- [3] デバイス  
研究の進捗に関しては、順調と判断。所期の目標達成に関しては、達成見通しと判断。

理由) 本サブテーマの4つの具体的な開発目標に対して3つは達成しており、PiNダイオードとIGBTの組合せでのスイッチング特性の評価が未だであるが、サンプルは試作済みであり、評価のみのため達成の見込みが高い。

○ [1] 基盤研究

SiC 超厚膜の欠陥制御、物性制御と超高耐圧デバイスの原理実証については期待以上に進展している。残された課題についても工程表が示され、達成されることが期待される。

[2] エピ成長

順調に進捗しており、低損失 IGBT 作製に向けた超厚膜・多層 SiC エピウェハの作製、実証、デバイスグループへの提供に取り組んでおり、所期の目標は達成される予定である。

[3] デバイス

世界最高水準の PiN ダイオード、IGBT の開発に成功している。最終目標の 250°C で 5kV 以上のスイッチング動作の実証を目指している。

○ [1] 基板研究グループの点欠陥密度の低減技術開発およびライフタイムの長寿命化技術、[2] エピ成長グループにおける結晶成長技術および高速成長技術開発、さらには [3] デバイスグループにおけるシミュレーションによる最適 IGBT 構造設計、の各チームの目標設定は問題ないものと思われる。PiN ダイオードや IGBT の所期性能達成は、各3グループ間の密接な連携によるものと判断する。

○ 各サブテーマごとに数値目標ではない目標も含めて多くの目標が設定されており、達成度が定量的につかみにくい目標も多い。たとえば、「・・・基底面転位や界面転位の振る舞いを明らかにして、低減する手法を提示する」という目標に対して、進捗結果が「・・・SiC エピ成長層における転位低減に貢献した」とあるが、記述が定性的過ぎて達成度を定量的に把握できない。しかし、それぞれの項目に関しては成果が上がっていると考えられるので、研究の進捗は順調であると評価する。また、所期の目標も達成できると考える。

○ 各サブテーマの研究進捗もおおむね良好に推移している。

[1] 基盤研究

超厚膜 SiC エピ成長中の主要な転移および積層欠陥を体系的に分類し、非破壊検出を可能とした。エピ成長のメカニズムを評価することは重要で、その結果、転移低減に貢献している。

200  $\mu\text{m}$  以上の領域でライフタイムキラ欠陥を消滅させ、室温で 33  $\mu\text{s}$ 、250°C で 47  $\mu\text{s}$  という従来の 30 倍以上のキャリア寿命を達成している。加えて、低エネルギー電子線照射によってライフタイムキラ欠陥を選択的に形成できることを見出し、キャリア寿命制御を実現した。

PiNダイオードで27kV、BJTで23kVという半導体素子として最高の耐圧を達成した。SiC 物性やデバイス構造に考慮して Si デバイスの回路モデルを改良し、SiC IGBT 及び PiN ダイオードのコンパクトモデルの開発に成功した。

[2] エピ成長

高純度かつ極めて低い点欠陥密度を有するエピ膜の成長条件を明確にし、キャリア寿命  $2.4\mu\text{s}$  の超厚膜、高純度 p 型エピ層を得ることに成功した。

デバイスの信頼性に悪影響を与える拡張欠陥の低減のため、エピ膜内拡張転移の 3D 観察に成功した。IGBT プロセスと整合する多層エピウエハを実現し、デバイスグループへのエピ膜供給にも取り組んでいる。

### [3] デバイス

SiC PiN ダイオードを試作し、10kV 以上の歩留まりとして 92%を得た。24 年度に得た結果をもとにデバイスシミュレーションによる最適設計を行い、IGBT を試作し、3mm 角素子で 3A 素子が得られるとともに、15kV 耐圧を実現した。

さらに IGBT のゲート形成では IE 構造を作製し、オン抵抗  $11.3\text{m}\Omega$  と世界最高レベルの結果がえられている。

今後は  $250^\circ\text{C}$  で 5kV 以上のスイッチング動作の実現を目指す

## ○ [1] 基盤研究

下記理由により開発は順調に推移していると判断する。

熱酸化、C イオン注入等の方法でキャリア寿命の大きな向上（室温で  $33\mu\text{s}$ 、 $250^\circ\text{C}$  で  $47\mu\text{s}$ ）を実現している。基礎分野でも転位・積層欠陥を体系的に分類し非破壊検査を可能にするなどの成果をあげている。

今後の課題として p-SiC のキャリア寿命増大、SiC MOS 界面の安定性向上、高電圧・高速スイッチング回路などの残された課題もあるが、その解決の方向性は見出されており今後の開発で目標達成できると判断する。

### [2] エピ成長

下記理由により開発は順調に推移していると判断する。

膜厚  $100\mu\text{m}$  でのキャリア寿命  $5\mu\text{m}$  以上の目標値は達成しており、また超厚膜成長層の高品位化、IGBT プロセスと整合する多層エピウエハの実現などの点でも目標値につながる大きな成果を得ている。

今後の課題として超厚膜成長層の高品位化、IGBT プロセスとの整合技術開発、超高性能 IGBT 用ウエハ供給などの残された課題もあるが、その解決の方向性は見出されており今後の開発で目標達成できると判断する。

### [3] デバイス

下記理由により開発は順調に推移していると判断する。

13kV-20A の PiN ダイオード、13kV-数 A の p チャネル IGBT、13kV-20A の n チャネル SiC IGBT などの目標値を達成している。

今後の課題として PiN ダイオードの高性能化、IGBT の高性能化、高温・高温スイッチング実証などの残された課題もあるが今後の開発で目標達成できると判断する。

## 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、特に問題は無い。

研究支援体制については、TV 会議を行うなどハード面での取り組みがなされ、意思疎通が図られている。また、研究人材発掘と育成の面からサマースクールへの取り組

みがなされている。

知的財産権については、出願特許が 14 件と中間評価時の 5 件よりも増加しており、改善がなされていると判断されるが、さらなる増加を期待したい。

- 研究実施・推進体制については、特に問題無い。3 グループの連携を G1 が中心となつてうまく連携しながら進められている。

研究支援体制については、開発を進める上でのコミュニケーションの重要性を認識され、TV 会議システムの導入など努めている

知的財産権についても、特に問題無い。デバイス開発の場合の IP において、知財化すべきかノウハウで残すべきかが重要になる。その点についても良く議論されている。

- 研究実施・推進体制については、特に問題がない。

知的財産権については、30 億円投入にしては、特許出願が少ない。

- 研究実施・推進体制について、参画企業、産総研、大学基盤チームの 3 つの研究グループ体制は問題ないものと判断できる。

知的財産権については、特許出願 14 件、ノウハウ登録を含めて終了時までには 20 件の知的財産権の登録はやや少ない印象を持つが、本分野が半導体産業として実用間近な段階からスタートしたプロジェクトであることに起因していると判断できる。

若手研究者の育成については、サマースクール開催を含め、材料、デバイス、システムまでを一気通貫に研究を進めることができる人材育成を目指しており、十分評価できると判断する。

成果の社会還元については、つくばパワーエレクトロニクスコンステレーションの設立をはじめ、企業群共同体を配した工業化への道筋を進めており、高く評価できる。

- 研究実施・推進体制については、三つのサブテーマに対応して京都大学、産総研、電力中研の研究者をサブテーマリーダーとしたグループが形成され、互いに連携しながら研究を推進していく体制が取られていることは大変結構かと思いますが、将来の実用化を踏まえて、民間企業とのより緊密な連携が必要であるように思われる。

研究支援体制については、TV 会議システムの導入やコミュニケーションの活性化に向けた施策など、研究プロジェクトを効率的に進めるための方策は示されているが、これらの方策を実施するための専任スタッフを設けたり、研究プロジェクト推進のための事務処理をサポートするための研究支援室を設置するなどといった具体的な研究支援体制構築に対する取り組みは示されていない。

知的財産権については、産総研を中心に、特許化促進や知財の有効活用に関する取り組みが行われていると考える。但し、その結果として出願特許数が大幅に増えたようには見えない。今後、海外出願も含めてより積極的に特許出願を行って頂きたい。

- 研究実施・推進体制については、京都大学と産総研、電中研の 3 グループ体制で運営しており、それぞれが連携して研究を進めている。特に産総研には企業からの研究者が派遣されており、産学官の連携が進んでいる。一方で、サブテーマが独立しやすいものであることもあるが、それぞれの拠点の連携は定期的な情報交換が主力であり、やや工夫が足りない感じを受ける。



若手研究者の育成については、海外へも含めて複数のキャリアパスが準備されている。本テーマの注目度が高いこともあるが、グローバルにポスドクが集まっている。

研究課題名	世界最速プラスチック光ファイバーと高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーが築く Face-to-Face コミュニケーション産業の創出
中心研究者名	小池 康博
研究支援担当機関名	学校法人慶應義塾

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、これまでに屈折率分布型プラスチック光ファイバー（GI 型 POF）、光散乱導光ポリマー、ゼロ複屈折ポリマーといった斬新なアイデアを元にした基本特許を取得している中心研究者により、新産業創出を目指して総合的な研究開発を産学連携で推進するものである。光物性の基礎学理を指導原理としたポリマー不均一構造制御による新たな差別化技術の創出や、製品用途に応じたフォトニクスポリマー改良研究や生産技術開発によって企業での早期実用化の実現を目指している。本研究課題は、サブテーマ1において情報通信用途、サブテーマ2においてディスプレイ用途のフォトニクスポリマーの分子設計の学理から低コスト生産技術までの一貫した研究開発を行い、サブテーマ3において周辺技術の開発や実証実験を実施する構成としている。各サブテーマにおいては以下の研究開発項目を推進している。

### [1] 世界最速プラスチック光ファイバーの開発

- ・家庭内ギガビットネットワーク用 GI 型 POF の開発
- ・超高速情報家電用 GI 型 POF ケーブルの開発

### [2] 高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーの開発

- ・ゼロ複屈折ポリマーによる新規プラスチックフィルムの開発
- ・光散乱導光ポリマーによる薄型・超低消費電力バックライトの開発

### [3] Face-to-Face コミュニケーションシステム開発

- ・超高速・高精細双方向映像伝送技術開発
- ・高速・低価格家庭内光ネットワーク開発
- ・Face-to-Face コミュニケーション産業の創出

## 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

- 中心研究者の持つ基本特許、世界最速屈折率分布型プラスチック光ファイバー（GI 型 POF）、ゼロ複屈折ポリマー、光散乱導光ポリマーをベースに研究が展開されている。ノイズフローが極めて低い GI 型 POF の作製、色変化・色むらを解消するゼロ複屈折ポ

リマーの技術をベースに、情報通信分野とディスプレイ分野で世界をリードする基礎から応用までの研究が展開されている。「屈折・反射」、「散乱」、「分極」、「吸収・放出」など、ミリメートルからオングストロームの領域でのポリマーの制御が光に関する物理をベースに展開されている。その結果、不純物を加えることで透明化が達成されるGI型POF、散乱を用いることにより明るくするなど、従来にない斬新的な発想による研究となっており、世界をリードしていると考えてよい。中間評価以後、研究の進捗とニーズなどを見極めながら、計画の見直しがなされていることから、プロジェクトの終了時点では、中心研究者のアイデアの元に世界のトップ水準の成果となることが十分に見込まれる。

- 具体的な開発項目のベンチマークが無い為、技術レベルの判断が難しい
- FIRST プログラム開始前に、プラスチックファイバーに関して世界をリードする基本特許を取得しており、優位性は十分である。
- 中心研究者のトップダウンマネジメントを通して、参画企業群のコーディネートを進めながら、世界最速の屈折率分布型プラスチック光ファイバー（GI型POF）と液晶ディスプレイ用のゼロ複屈折ポリマーおよび光散乱導光ポリマーの開発を進めており、実用化に向けたメドを含めて、世界トップ水準となるものと判断できる。また、Face-to-Face コミュニケーションシステムのための、超高速インターフェースに対する設計と試作は120Gbpsを達成して終了したことは高く評価することができる。
- プラスチック光ファイバーと大画面ディスプレイ用フォトニックポリマー、およびそれらを応用したコミュニケーションシステムと、一見、異なる研究テーマを合わせた研究プロジェクトのように見えるが、その根底にはポリマー材料の本質にまで立ち返って新しい機能、性能をもったポリマー材料を創製し、実用化まで結び付けて世の中を変えたいという強い思いが感じられ、独自性、独創性の高い研究となっている。実用化を意識して目標も高く設定されており、優位性も高い。このまま研究が進捗すれば、世界のトップ水準の成果が期待できる。実用化でも世界に先鞭をつけることを期待する。
- 本課題は中心研究者の発明であるGI型POF、ゼロ複屈折ポリマー、光散乱導光ポリマーを用いたRadio over Fiber、液晶ディスプレイの提案と実証が主である。ポリマーの不均一構造の大きさをmmからnmさらにはオングストロームと制御することで、従来の光の世界の常識を覆したものとなっている（不純物を加えたPOF、散乱を用いてより明るくするディスプレイ、など）。すなわち単なる世界トップの研究成果を目指す研究ではなく、これまでの伝送やディスプレイの破壊的イノベーションを目指す研究として、大きな意味があると考えられる。中心研究者によれば、すでに世界的に中心研究者の提案は受け入れられ、中核となる国際会議でも多くの招待講演を求められるなど、今後のグローバル展開への期待が持てる。

本質的に低コスト化が可能で、本質的に性能向上が目指せる技術は世の中を変えることは可能だと思う。ディスプレイ事業はいわゆるコンシューマ事業であり、技術そのものの革新のみで事業が変革されるとは限らない。従って、中心研究者の技術を展

開する共同研究先をさらに広げ、コンシューマ製品を手掛ける企業なども仲間に加えることを期待している。パネルメーカーの期待も高いということであり、より積極的な連携を期待したい。

- 例えば光ファイバーの伝送雑音の低減など純技術的には世界をリードする研究開発が展開されていると判断する。ただ、テーマが商品開発指向、システム開発指向の強い設定になっているので、応用分野の価値判断に甘さを感じる。

## 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

- 研究の進捗は順調と判断される。基本技術について世界をリードするとともに、その成果を支えるサブテーマ研究が、中心研究者のリーダーシップのもとに企業との間で遂行される体制となっている。

所期の目標達成に関しては、残された研究課題を抽出し、より具体的に技術課題を絞っていることから、達成は見込まれると判断する。

- 研究テーマのシステムの目標値はあるが、それを実現する開発すべき技術目標が定量的でない為、達成の見通しがつけがたいという問題点がある。
- 全体的には順調に進捗している。市場の変化に対応して、研究開発の優先度も見直している。残された課題も多いが、それに対するロードマップも作成している。
- 所期目標である世界最速の屈折率分布型プラスチック光ファイバー（GI 型 POF）、ゼロ複屈折ポリマー、および光散乱導光ポリマーの開発は参画企業群の成果として達成しており、サブテーマ 1 および 2 は、所期目標が達成できると判断する。サブテーマ 3 のコミュニケーションシステム開発は既に 120Gbps の試作を完了することによって目標達成がなされたものと判断する。
- 研究が順調に進捗し顕著な成果が上がっていると考えられる。研究が進捗するにつれて新たな進展が見られ、課題の追加や見直しも行われたため、最終目標達成まで傾倒すべき課題も残されているが、目標達成は十分可能と考える。
- サブテーマ 1 で GI 型 POF、サブテーマ 2 で高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーを開発し、サブテーマ 3 で上記サブテーマの効果を実証するというものである。中間評価時点では各サブテーマの成果の集合であったように思うが、H24 年度の結果をみると、サブテーマ 3 に、サブテーマ 1 と 2 の開発成果を組み合わせる実証が行われているようであり、期待が持てる。
- 純技術的には研究の進捗は見られるが、応用用途分野の不確実性が感じられる。

## 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

- [1] 世界最速プラスチック光ファイバーの開発
  - 基礎原理に基づくポリマー設計からファイバー作製技術の開発にこぎつけている。
- [2] 高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーの開発
  - 原理確認と実証、さらに実用化要求仕様達成のための研究を遂行している。
- [3] Face-to-Face コミュニケーションシステム開発
  - 達成困難であった 40Gbps の映像伝送に成功するなど、順調な進捗である。
  - 各サブテーマは、ポリマー情報通信分野とディスプレイ分野の基本となる必要なものである。とくにプラスチック光ファイバーの有効性を示すためには、これらのサブテーマは必要である。
  - 最終目標の設定が困難なのはテーマ3であるが、パイロットライン的な試みであるが、テーマ1と2の成果に基づきながら応用の具体的ターゲットを決めていることから、有効性を示すには必要である。
  
- 各サブテーマについても、技術目標が定量的でない為進捗、達成の判断がしがたい。
  
- サブテーマ1の世界最速の屈折率分布型プラスチック光ファイバー（GI型POF）開発は、家庭内の超大容量通信を実現する通信網を築く革新性、さらにサブテーマ2は液晶ディスプレイの革新技術として日本メーカー企業群の復活をもたらす可能性を秘めており、中心研究者の構想に賛同する。また、サブテーマ3のコミュニケーションシステム開発は、サブテーマ1&2の応用の帰結として実証システムとして必要であり、既に目標を達成したことは高く評価できる。
  
- サブテーマ1については、研究が順調に進展し、顕著な成果も上がっている。研究の進捗とともに、RoF技術の確立や周辺技術の開発など新たな課題も追加されたため、達成すべき目標が所期の目標よりも増えているが、このまま研究が進めば最終目標は十分達成可能と考える。
  - サブテーマ2については、研究が順調に進展し、顕著な成果も上がっているが、プロジェクトの最終目標達成へ向けて課題も残されている。しかし、目標達成へ向けての考え方も明快であり、最終目標は十分達成可能と考える。
  - サブテーマ3については、研究は順調に進展していると思われる。新たな検討課題も追加されているが、目標達成は可能であると考ええる。
  
- [1] 世界最速プラスチック光ファイバーの開発
  - フォトニクスポリマーの基礎原理に基づき、連続押し出し法による低コスト生産プロセスの開発（40Gbpsの伝送が可能なPOFの連続生産技術の開発）、家庭内ギガビットNW用POFの開発（サンプル出荷）、全フッ素化材料による世界最速プラスチックファイバーの開発（40Gbpsの伝送が可能なPOFの開発）、光HDMIケーブルの開発に成功している。現時点までは計画通りに進んでいるということであるが、品質向上のみならず、技術の市場展開を考える時期であり、マーケティングなど、より事業に精通したパートナーの選定が重要であると考ええる。
- [2] 高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーの開発
  - 前半では原理実証、後半では実用化に向けた要求仕様達成が目標である。配向複屈

折と光弾性複屈折の両方がゼロであるゼロ・ゼロ複屈折ポリマーを用いた溶融押し出し成膜、ゼロ複屈折粘着剤の開発、偏光レーザーバックライトの設計、実証に成功するなどの成果が出ている。複屈折を発現しないゼロ・ゼロ複屈折ポリマー及びゼロ複屈折接着剤を用いれば、液晶ディスプレイの黒表示時の光漏れを抑制でき、今後の技術向上に貢献することも確認された。最終製品としてディスプレイに展開するためには、今後、ディスプレイメーカーとの連携が重要になるであろう。ディスプレイメーカーあるいはセットメーカーとの連携を期待する。

[3] Face-to-Face コミュニケーションシステム開発

慶應義塾大学病院に高精度大画面映像高速光伝送システムを構築し、Face to Face コミュニケーションシステムを実証中である。実際に病院という高精度が必要とされる環境で本研究課題が実証されたことは高く評価する。H25 年度には本プログラムのコンセプトを実証するギガハウスが実現されるということであるが、単なるきれいな絵が見えただけではなく、高精細の画像伝送により、どのように医療の現場が変わったかというインパクトを示してほしい。

○ [1] 世界最速プラスチック光ファイバーの開発

ポリマー材料のマイクロ不均一構造制御による大幅な伝送雑音の低減を実現し、GOF では不可能であった高品質映像伝送を可能にした点は大きな進捗と判断する。今後の研究開発により目標を達成することは可能と思うが、本プロジェクトの成果が生かせる応用分野がどの程度あるかが、やや疑問に感ずる。

[2] 高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーの開発

事前に提出された報告書を見る限り、特に大きな研究の進捗は見出せない。研究開発により、所期の目標達成が可能と見込まれるかの判断以前に、このサブテーマで掲げる高精細・大画面ディスプレイの用途が不透明な感がする。

[3] Face-to-Face コミュニケーションシステム開発

[1]世界最速プラスチック光ファイバーの開発と[2]高精細・大画面ディスプレイのためのフォトニクスポリマーの開発を融合したシステム開発で独自性は高いものと判断する。医療分野への応用が進み、医学会で高い評価を得ていることは研究の進捗と判断する。これが更に発展し遠隔コミュニケーションシステムに応用が繋がれば有意義と判断する。ただこれをプロジェクト終了時までには実現していける道筋は明確にはなっていない感がする。

### 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、適切に評議会や運営委員会が開かれている。また、全体会議も開かれるなど、プロジェクト遂行の体制が整えられている。また、目標達成のためサブテーマ1と3も連携の強化など、目標達成に向けた体制となっている。慶応大学がコアテクノロジーを提供する体制となっているが、具体的応用課題の多いサブテーマ3関連では、企業への移転についても視野に入れるべきではないか（報告書では明確でない）。

若手研究者の育成については、このプロジェクトで育った若手の次のステップへの取り組みにも力を入れるべき（報告書では、この点が明確でない）。

成果の社会還元については、企業との連携は必須と思われる。一方、新しい産業の芽としてこの分野が展開することを期待するためには、国際標準化に向けた活動が実をむすぶことを期待したい（ファイバーがすべてプラスチックに置き換わることはないと思われるが、確実に優位性を発揮できることも多いので、特に、きめ細かく取り組んでほしい）。

- 中心研究者のトップダウン体制で企業群をマネジメントする研究実施体制にて特に問題がないものと判断する。しかしながら、中心研究者の活動自粛により、技術移管を含め、企業群への対応をどうするかが課題であり、その対応策を記述すべきであると判断する。

知的財産権については、初期段階から、中心研究者が発明した GI 型 POF 技術（特許出願 285 件）が光情報通信網の潮流となる気運が醸成されていたため、慶應大学のトップマネジメントを通して参画企業群にすべてを委託開発させることができるプロジェクトの組織形態を構成できた点が大きな特徴と思われる。更に本プロジェクトによって、56 件の特許出願を行っており、高く評価できる。

成果の社会還元については、本プログラムの特徴として、中心研究者の持つ発明、特許 285 件のオリジナル技術を基盤として、参画企業群に委託契約で開発研究を進める実施体制を当初より構築しているため、実用化・市場投入への道筋はたてやすいと思われる。その反面、委託企業 13 社サイドの機密事項に触れるため、その戦略ははっきりと見えない点が懸念点であるものの、社会還元に向けた方策は十分立てていると思われる。

- 中心研究者の強いリーダーシップのもとに、研究を実施・推進する体制が構築されていると考える。実用化を意識して、参画企業間の連携を積極的に推進する研究体制の強化に腐心している点は評価できる

知的財産権については、研究支援チーム内の知財担当者、委託研究先の知財部門の協力のもとに、特許出願を促進するための取り組みがなされている。しかし、実用化につながる重要な内容が多く盛り込まれていることを考えると、もっと多くの特許出願、特に海外出願、があっても良いように思われる。

若手研究者の育成については、プロジェクトへの参加、研究成果発表等を通して若手研究者の育成に取り組んでいる様子が窺われるが、より活発で多角的な育成活動があっても良いように思われる

成果の社会還元については、単に研究成果を挙げるというだけでなく、研究成果を実用化という形で社会に還元しようと試みは高く評価できる。

- 中心研究者と慶應大学を中心に、関連する材料メーカーとの連携により進められているプログラムであり、技術開発の時点では問題はない。実際に製品への適応を考えた時には、マーケティング、事業戦略など、セットメーカーとの連携が重要になるであろう。より連携の広がりを望む。

知的財産権に関しては、システムの知財についてセットメーカーとの連携が必要ではないかと思う。



成果の社会還元については、本成果は技術的には世界的にトップレベルにあり、素晴らしい。ただ、その出口はディスプレイ領域や光通信ファイバー領域であり、すでに確立した技術で市場が出来上がっている領域である。その市場をさらに広げることが期待したいが、そのためには単なる技術競争以上に戦略的な取り組みが必要ではないか。

研究課題名	低炭素社会に資する有機系太陽電池の開発 ～複数の産業群の連携による次世代太陽電池技術開発と新産業創成～
中心研究者名	瀬川 浩司
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、次世代低コスト太陽電池として期待される有機系太陽電池を、産学官連携体制で開発し、早期実用化と世界市場獲得を目指すとしている。本研究課題は有機系太陽電池の変換効率と耐久性を向上し、早期実用化を図るとともに国際標準化活動を積極的に進めるとしており、以下の4つのサブテーマから構成されている。

- [1] 高効率・高耐久性色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発
- [2] 高効率・高耐久性有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発
- [3] 色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池をハイブリッドした革新的太陽電池創出のための基盤研究
- [4] 計測法の開発と標準化活動の推進

研究課題全体の最終目標として、色素増感太陽電池においては小面積セルで15%、サブモジュールで10%の変換効率、屋外耐久性10年相当以上、有機薄膜太陽電池においては小面積セルで12%、サブモジュールで8%の変換効率、屋外耐久性5年相当以上の数値を達成するとしている。これらはいずれも中間評価時点における有機系太陽電池の目標としては妥当と認められる。他方では国内太陽電池メーカーは厳しい状況にあり、また事業環境の変化も激しいため、シリコン(Si)系等を含めた太陽電池全体の市場動向等に絶えず留意する必要がある。

## 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

- 中間評価において、研究課題終了時までには、色素増感太陽電池において小面積セルで15%、サブモジュールで10%の変換効率、屋外耐久性10年以上相当、有機薄膜太陽電池において小面積セルで12%、サブモジュールで8%の変換効率、屋外耐久性5年以上相当が達成できれば、世界をリードするトップ水準になると評価した。これに対して、事前に提出された資料にあるように、色素増感で小面積セル変換効率14.5%、屋外耐久性15年相当、有機薄膜で変換効率10.6%、屋外耐久性10年以上相当を達成している。また、11.7%の効率の完全固体型のハイブリッドセルの試作も達成しており、順調に進められれば、世界最高水準の成果が見込まれる。特に、中心研究者が見出した新原理（基底一重項状態から励起三重項状態へのスピン反転光励起）に基づく新規色素を開発して、広帯域光電変換に成功し、タンデム型などにおいて成果を蓄積して

いること、さらに有機薄膜太陽電池やペロブスカイト太陽電池などのタンデム化を進めるなどを行っていることから、トップ水準の成果が期待される。

ただし、敢えて言えば、FIRSTの目的にかなうように、中心研究者の推進する研究からプロジェクト研究が広がっているということが更に明確になると良いように思われる。(例えば、ペロブスカイト型太陽電池においてどのように関連しているかなど)

○ 有機系太陽電池で変換効率 15%以上というのは世界のトップ水準で有り、現状の薄膜では無機も含めて 10%前後であることから、優位性がある。

○ 中心研究者に期待されていた学術的な牽引力と実用化への研究開発力が必ずしも十分に発揮できていたとは言えない部分がある。

○ 中間評価以後、スピン反転励起型の Ru 錯体色素および界面電荷移動錯体を用いた有機太陽電池を開発し世界最高値の量子効率 14%を達成したこと、更に最終的な有機系太陽電池材料の姿が、色素増感型と有機薄膜型のハイブリッドタイプが理想像であると判断し、コアコンピタンスが広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池に力点を置くような資源配分・体制を構築したことは大きく評価できる。世界トップ水準の研究開発を進めていると判断される。

○ それぞれの項目について高い目標が設定され、世界水準の研究が展開されている。個々の性能に関して世界トップ水準の成果が得られ、学術的にも優位性の高い成果が得られている。しかし、国際的な競争の激しい中で、他の技術に打ち勝って本研究の成果が実用化されるためには、技術の更なる差別化と企業との密接な連携が欠かせない。そのような観点から、差別化技術としてのハイブリッド太陽電池に期待したい。

○ 色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池では、それぞれ効率 14.5%、10.6%を達成し、世界トップレベルの研究成果と思われる。またハイブリッド型では 11.7%の効率を達成するなど、世界をリードする成果と思われる。特に色素増感太陽電池で長波長化に適した色素を開発したことは、高効率化のために大変有意義な結果である。論文のサイテーションや招待講演の数など、この分野で世界から認知されていることは疑うべくもない。

しかしながら、寿命などの信頼性データとのアンドがとれたデータがないことは残念である。国内の太陽電池の普及、世界市場への展開に関しては、すでにグリッドパリティに近い Si 系太陽電池など現状の製品に対してのコスト優位性を示す必要があり、単に印刷工程が簡便というだけでは不十分という印象を受ける。また壁面など Si 太陽電池では十分な効率が得られないところへの設置で優位性をうたっているが、実面積での実測値を示されるとより効果が明確になる。

○ 本プロジェクトでは色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池の世界トップクラスの研究者が結集されており、スピン反転光励起可能な新規色素を見出すことによる広帯域光電変換に成功するなど世界トップ水準の成果が得られている。

課題であった耐久性の面では全固体化などによる改良の方向性を見出しており、この特徴を生かした完全固体化ハイブリッド太陽電池に研究開発の焦点を絞り込んでい

くことにより、本プロジェクト終了時には世界トップ水準の成果になることが期待される。

## 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

- 研究は数値目標達成において順調であると判断される。特に、プロジェクトが新原理に基づく色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、ハイブリッド太陽電池の3部構成になっているなか、新原理と原理に基づく新素材開発をベースに、広帯域のハイブリッド太陽電池実現に向けた取り組みがなされたためと判断される。

サブテーマを担う研究開発チームとの連携により、当初目標値に近い結果が得られていることから、目標の達成は可能とみられる。

- 数値目標の達成という意味では順調と言える。ただ本テーマはデバイスの開発そのものを目標に上げている。その意味ではデバイス特性を決める生成されたキャリアの寿命に関する検討が弱く、今後の進展を期待したい。

ヒアリングでは変換効率14%を超えたペロブスカイトセルは、バラツキの中のたまたま一部に有ったという内容であった。中心研究者が高効率化および高寿命化の可能性が有ると言うハイブリッドは、無機/有機界面が有り、そこにキャリアの寿命の問題が潜まれている。

是非安定して15%以上を再現性よく実現する為の技術開発を進めて欲しい。

- 基底一重項から励起三重項へのスピン反転光励起が可能な色素を開発するなど一部に於いてブレイクスルーがあるものの、今後、中心研究者に期待されている、学術的な牽引力をより発揮して欲しい。

- スピン反転励起型のRu錯体色素および界面電荷移動錯体を用いた有機太陽電池を開発し量子効率14%を達成したことから、色素増感太陽電池に関する所期目標値は達成できると思われる。

中間評価以降、サブテーマ3のハイブリッド太陽電池に集約したことも含め目標達成は可能であると判断される。

- 推進計画が見直され、課題が整理されて研究の重点化が行われるようになった結果、研究も順調に進捗するようになったと思われる。現時点で所期の目標に近い成果が得られており、このまま順調に研究が推移すれば目標達成は十分可能であると考えられる。

- 色素増感太陽電池および有機薄膜太陽電池の効率という点では順調に推移している。効率と信頼性のデータがそろっていないため、終了までにデータをそろえることが求められる。

また現時点での成果はまだ要素別の成果となっている印象である。ハイブリッド型への注力を中心研究者の意思で舵切りしたということであり、ハイブリッド型での大型成果が終了までにまとまることが期待される。

- これまで色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池共通の課題は、変換効率と耐久性の向

上であった。変換効率の向上については、色素増感太陽電池において、スピン反転光励起可能な新規色素による長波長領域の有効利用が可能となり、従来色素とのタンデム化により 12.8%、分光タンデム化により 14.5%の変換効率を達成しており、順調に目標値 15%に近づきつつある。耐久性については、液体電解液を用いる限り根本的解決は困難と思われるが、有機薄膜太陽電池、ペロブスカイト太陽電池との融合による固体型ハイブリッド太陽電池という解決方向が見出されている。このハイブリッド太陽電池の変換効率は目標値には到達していないが、11.7%と高いレベルを実現しており、ほぼ順調に研究は進捗していると判断される。

研究の主軸を全固体型ハイブリッド太陽電池に絞り込んでいくことにより、本プロジェクト終了時までには所期の目標達成の可能性があると判断される。

### 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

- 中間評価以後、中心研究者のリーダーシップのもと、チーム構成に変更が加えられ、全体の目標との整合性をはかるため、4つのサブテーマの目標に絞られ、順調に進捗している。具体的な4つのサブテーマは、

[1] 高効率・高耐久性色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
透明導電電極の上に酸化チタンのナノ粒子、電解液、対極をはさみ合わせて発電する全固体セル

現状：小面積セル 14.5%、低光量 15%を達成

[2] 高効率・高耐久性有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
透明導電電極の上に有機のドナーアクセプターをハイブリッドして発電層にはさみ合わせて発電する塗布型全固体セル

現状：小面積セル 10.6%

[3] 色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池をハイブリッドした革新的太陽電池創出のための基盤研究

[1][2]を併せ持つ固体セル

現状：11.7%の完全固体型ハイブリッドセルを創出

[4] 計測法の開発と標準化活動の推進

現状：評価法の確立と国際標準化にむけた活動を展開中。

以上のように、現状、全体目標の達成に向けて、サブテーマは有効に機能していると判断される。

- サブテーマ 3 のハイブリッド型のデバイスとして、基本パラメータの安定的な再現性を実現する為の物性的なメカニズムが抑えられない可能性がある、と言う点が不安材料である。

○ [1] 高効率・高耐久性色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
1050nm まで光電変換する色素を開発し、タンデムセル変換効率 14.1%を達成するものの、15%の達成は微妙である。

[2] 高効率・高耐久性有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
モジュール高効率化が遅延しており、エネルギー変換効率 12%の達成は微妙である。

- [3] 色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池をハイブリッドした革新的太陽電池創出のための基盤研究  
ハイブリッド型モジュール開発に遅延している。
- [4] 計測法の開発と標準化活動の推進  
IECへの提案に漕ぎ着けるかどうかは現段階では不明であるが、ぜひ達成してほしい。
- サブテーマ2の有機薄膜太陽電池が世界最高水準の効率10.6%を達成しているものの、所期目標に未達である。終了時までの進展が期待される。  
サブテーマ3の広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池に研究資源を投下し、ソニー・早大・京大・桐蔭横浜大の従来チームに加え、他の企業群を参加させる体制に変更したことは評価される。ハイブリッド型のシナジー効果として、新原理・革新性が現れるものと期待される。
- [1] 高効率・高耐久性色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
世界トップ水準の成果が得られ、研究の進捗は順調である。このまま進めば目標達成は十分可能と考えられる。
- [2] 高効率・高耐久性有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
モジュール高効率化に遅れが見られるが、成果も上がっており目標達成は可能と考えられる。
- [3] 色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池をハイブリッドした革新的太陽電池創出のための基盤研究  
興味深い成果が上がっているが、残された時間の中で目標達成できるよう頑張ることが期待される。
- [4] 計測法の開発と標準化活動の推進  
活動内容は評価される。実効が得られるよう取り組むことが期待される。
- 各サブテーマについては、それぞれの目標を達成あるいはほぼ達成のレベルにある。しかしながら、本テーマでの注力ポイントはハイブリッド型太陽電池にあり、サブテーマを超えた連携をより強く推進することが期待される。
- [1] 高効率・高耐久性色素増感太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
基底一重項状態から直接励起三重項へ励起するスピン反転光励起可能な新規色素を見出すことにより長波長領域での高感度化に成功し、従来色素とのタンデム化により12.8%、分光タンデム化により14.5%の変換効率を達成したのは大きな成果であり、変換効率という点では順調に進捗している。但し、耐久性という点では色素増感太陽電池では限界があるので、本プロジェクト終了時までの期間に本サブテーマで得られた成果を全固体型ハイブリッド太陽電池に最大限に活用していくことにより所期の目標を達成することが期待される。
- [2] 高効率・高耐久性有機薄膜太陽電池のための原理究明と材料・モジュールの開発  
高性能新規ドナーポリマーの開発により有機薄膜太陽電池では世界最高レベルの10.6%という変換効率の実現や電極層材料改良により大幅な高耐久化の実現などは大きな研究成果である。但し、有機薄膜太陽電池の変換効率は競合製品に比べ低い。

本サブテーマで得られた成果を高変換効率の期待できる全固体型ハイブリッド太陽電池に最大限に活用していくことにより所期の目標を達成することが期待される。

[3] 色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池をハイブリッドした革新的太陽電池創出のための基盤研究

有機無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池を世界に先駆けて開発するなど順調に研究開発は進捗していると判断される。ハイブリッド太陽電池は高耐久性が期待でき、変換効率は現時点で 11.7%程度であるが、本プロジェクトのサブテーマ 1、2 で得られた成果をこのハイブリッド太陽電池に活用していくことで所期の目標を達成することが期待される。

[4] 計測法の開発と標準化活動の推進

色素増感太陽電池に関する性能評価法の標準素案の作成など地道ではあるが順調に進捗しており、本プロジェクト終了までには I E C への提案など所期の目標は達成できると判断される。

### 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)

- 中間評価後に、全体のプロジェクトが、新原理に基づく色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、ハイブリッド太陽電池の 3 部構成となり、広帯域の太陽電池実現に向けた取り組みのための研究実施・推進体制となっており、特に問題がない。

ただし、FIRST の目的にかなうように、中心研究者の推進する研究からプロジェクト全体が広がっているという研究実施体制がさらに明確になっている必要があると思われる。(例えば、ペロブスカイト型太陽電池の中に、どのような形でそれが活かされているかと言った点)

知的財産権については、ヒアリングでも議論になったが、中間評価後、特許が増加していること、また、その支援体制も十分に整っていることから問題ないと思われる。

ただし、プロジェクトに参加する研究者・企業が多いことから、FIRST の成果を明らかにするために、中心研究者の関係した特許、その他などについて整理する必要がある。

また、海外特許についても更に力を入れる必要がある。

若手研究者の育成については、研究成果発信の機会や国際会議・研究会、特許指導など育成に努力している。ただし、学術論文数はもう少しあってもいいように思われる。

成果の社会還元に向けた検討については、現状の活動（シンポジウム、ユーザーとの意見交換会）を更に活発化すべきと思われる。

- 研究実施・推進体制については、特に問題ない。高効率化へのコンセプトは興味深く、またそれを原理からものにまで実現出来る体制になっていると思われる。  
成果の社会還元に向けた検討については、有機系太陽電池で 15%以上の効率にすることができれば、現状のポリ Si に匹敵する為、応用は拡大されると思われる。

- 研究実施・推進体制については、原著論文の質と数、特許数に於いて中心研究者の顔

が十分に見えていないように判断される。

知的財産権に関する取組みについては、中心研究者の寄与が少ないように見受けられる。

若手研究者の育成や成果の社会還元に向けた方策等については、今後より積極的な取組みを期待したい。

- 研究実施・推進体制については、H25年9月末時点における体制は、産学独を巻き込むオールジャパン体制のチーム構成であり、サブテーマ3への体制集約を含めて、個々のサブテーマの目標を達成していく上では問題ないと思われる。

研究支援体制については、NEDOが事務局で契約マネジメントや契約・検査関連業務・知的財産業務を支えるシステムを構築しており、評価される。

知財財産権に関する取組みについては、出願特許52件（外国9件）であり評価される。

若手研究者の育成については、80名（企業42名、アカデミア38名）の若手研究者が参加しており、国際会議・各種シンポジウムへの積極的参加、人材交流も積極的に進めていると思われる。

成果の社会還元に向けた検討については、NEDOの支援の下に、有機系太陽電池技術研究組合を立ち上げ、実用化・事業化を加速させる仕組みも構築しており、積極的に展開していると思われる。

- 研究実施・推進体制については、研究体制の見直しと重点化が行われ、重要なターゲットである広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池実現へ向けて、大学、企業の研究者が連携して研究を推進する体制が構築されたと考えられる。

研究支援体制については、NEDOを中心とした研究支援体制が構築されたことは、研究の効率的な推進に大きく貢献したと評価される。

知財財産権に関する取組みについては、研究支援担当機関(NEDO)による支援体制が構築され、特許動向調査や特許出願促進・管理が効率的に行われていると評価される。その結果として52件の特許も出願されている。その後の追加資料によると、海外出願も含めて追加の特許出願がなされているようであるが、今後は海外出願をより積極的に行うことが期待される。

若手研究者の育成については、若手研究者に国際的な場で活躍する機会を与える試みや、成果の特許化を意識させる試みは評価される。

成果の社会還元に向けた検討については、シンポジウムが計2回というのは少ないと思われる。シンポジウムやユーザーとの意見交流会以外にもいろいろな社会還元の方法が考えられることから、今後の検討が期待される。

- 研究実施・推進体制については、中心研究者のもと、各分科会が協力する体制となっている。材料開発とデバイス、モジュール開発を並行して行っているため、それらの時間軸を合わせることが難しいと思われる。現時点での結果はやや個別成果の集合体のような印象がある。

研究支援体制については、NEDO中心に支援体制がとられ、特に問題はないと思われる。

知財財産権に関する取組みについては、中間評価でのアカデミアによる基本特許の



取り組みが不足している、との指摘はあまり改善していないように思われたが、補足資料で中心研究者の知財活動が示されており、改善されてきているように思われる。

若手研究者の育成状況については、特に活発な活動ではなく、通常のとどまっている印象を受ける。

成果の社会還元に向けた検討については、本成果は再生可能エネルギーの普及という大きな社会還元の目的がある。現段階ではシンポジウム、ユーザー意見交換会などであるが、一般消費者への啓蒙活動なども必要と思われる。一般消費者にとって、太陽電池はすでに身近なものであり、Si系、化合物系では屋根置きが一般的な認識である。有機系が認知されるにはその優位性をいろいろな場面で周知することが重要であると思われる。

研究課題名	新超電導および関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用
中心研究者名	細野 秀雄
研究支援担当機関名	東京工業大学

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、これまでに IGZO TFT として実用化された透明アモルファス酸化物半導体の開発や鉄系超電導物質の発見といった材料科学分野で顕著な研究業績を有している中心研究者の独創性や洞察力を基に、以下を達成することを目指している。

<超伝導転移温度 ( $T_c$ ) 77K 以上の新規物質および新機能の探索>

1.  $T_c > 77K$  の新超電導物質の探索
2. 物質的に広がりのある新しい超電導物質の発見
3. 際立った関連機能の発見

<産業応用に向けた高性能な線材（薄膜線材、デバイスを含む）作製技術の確立>

4. 低温で  $10^5 A/cm^2$  以上の臨界電流密度 ( $J_c$ ) を示す鉄系及び新超電導物質のメートル長級線材の実現
5. 鉄系及び新超電導物質薄膜を用いたジョセフソン接合、デバイスの実現

本研究課題は、以下のサブテーマから構成されている。

- [1] 共有結合性層状遷移金属化合物および無機エレクトライドの超電導と新機能の探索
- [2] 超高压合成を活用した新規超電導体の探索
- [3] 低温合成法を基軸とした高温超電導および関連機能の開発
- [4] 層状およびカゴ状構造を有する新規高温超伝導体の開発
- [5] 新超電導物質の線材・機器等応用技術の研究開発

新超伝導物質・新機能探索に関しては、研究期間の前半2年は、各サブテーマリーダー等の裁量に委ね、各自の得意なアプローチ等によって物質探索を行い、後半2年では有望材料に絞り込んで徹底的な探索を進める研究計画としている。

## 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

- 中心研究者が世界で初めて発見した鉄系超伝導体をベースとする研究展開は、トムソンデータに現れるように、引用論文数も数千を超えるなど世界で注目されている。結果、本プロジェクトの目標である  $T_c > 77K$  の新超電導物質の探索、新しい超電導物質の発見、低温で  $10^5 A/cm^2$  以上の臨界電流を示す鉄系および新超電導物質のメートル長

級線材の発現、さらにこれら物質でのジョセフソン接合、デバイスの実現において、世界をリードする研究開発が展開されており、さらに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見込まれる。

ただし、液体窒素温度を上回る温度領域 ( $T_c > 77\text{K}$ ) での超伝導物質の探索は非常にチャレンジングであり、プロジェクト終了時までの目標数値達成は困難かもしれないが、研究は固体化学をベースに取り組みられていることから、その方向での筋道がつけられる成果が見込まれる。同じく、低温で  $10^5\text{A/cm}^2$  以上の臨界電流を示す鉄系および新超電導物質のメートル長級線材の発現という数値目標は、物材研との連携の下、PIT法をベースに、経験と英知を結集してその筋道が得られると判断される。

○ 鉄系高温超伝導材料は、将来の実用化に対してコストパフォーマンスの点からプロミッシングな材料である。また、我が国初の材料の発見であり、プロジェクト終了後も世界トップ水準になることが見込まれ、またそれを維持して行く必要が有る。

○ 研究課題の所期の目標の優位性は問題無い。

○ 新超電導および関連材料の探索を主目標とし、既に超電導物質として 60 種類の新物質、その内 20 種類の新母物質を発掘し、更に新しいエレクトライド物質や鉄系超電導線材開発にも成功しており、世界トップ水準の成果になるものと判断される。

○ 高い所期目標が設定され、世界をリードする研究開発が展開されていると考える。目標が高い分、それが達成されるかどうか危惧される部分もあるが、これまでに顕著な成果も多く上がっていることから、プロジェクト終了時には、世界トップ水準の成果が達成されると期待できる。

○ 高温さらには室温超電導体の発見は人類の夢であり、物理の最後のフロンティアの一つと言えられる。応用される環境温度の観点から見ると、ノイズの大きな厳しい環境で超電導の優位性が保たれるのか疑問は残るが、高温超電導体の発見は、理論物理の進展、材料科学の発展を促し、日本の物理科学の大きな発展につながることは間違いないと思われる。

超電導材料の発現メカニズムはまだ完全に解明されたわけではなく、高  $T_c$  材料の探索は大変チャレンジングなテーマであると言える。 $T_c 77\text{K}$  以上の超電導体として銅酸化物がすでに存在するが、材料の安定性や作製容易性の観点で実用化には至っていない。中心研究者が発見した鉄系超電導体は、これまでの理論では説明困難な超電導発現機構を有する可能性があり、さらに高い  $T_c$  の発現が期待される。

またその応用として線材応用を取り上げたことは将来の送配電網の課題の一つである損失低減の観点などから適切であると思われる。特に高  $J_c$  材料の開発は線材応用の観点で重要な課題である。デバイスへの応用は競合デバイスとの競争関係からみて超電導が価値を生む状況は少ないと思われる。応用を強く志向するのであれば、高  $T_c$  にはこだわらず、応用領域に最適な材料探索を目指すべきである。

関連機能としてアンモニア合成触媒に関する優れた知見が得られるなど、関連材料の開発でも期待以上の成果が得られており、材料探索の方向性として興味深いものがある。

- 鉄系超電導体では世界をリードしており、本プロジェクト終了時に  $T_c > 77K$  が実現するかどうかは不明であるが、その道筋が見えるようになってきていると判断される。

## 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

- 研究の進捗は順調であり、数値目標 ( $T_c > 77K$ ) は達成できないかもしれないが、筋道はつけられると判断される。
- 順調であり、達成が見込まれる。 $T_c > 77K$  は得られていないものの、鉄系超伝導体の  $T_c$  の理解や新材料の発見などその他の部分では大きく進んでいる。また、線材やデバイス応用など着実に進められている。材料開発の場合は数値もさることながら、メカニズムなどの理解を深めることが重要である。
- $T_c$  が 77K 以上の超伝導体は開発されておらず、その達成は困難と思われる。それ以外については、幾つか厳しい状況にあるものの、概ね達成される状況である。
- 所期目標として  $T_c > 77K$  の新超電導物質の探索、低温で  $J_c = 10^5 A/cm^2$  以上の超電導物質探索、およびそれらのメートル級線材化を数値目標として挙げており、鉄系超電導物質を発展させるとともに、既に 60 種類の新物質およびその内 20 種類の新母物質を発掘し、所期目標を達成するものと判断される。また、鉄系新超電導体のメートル級線材化の道筋も見出しており、実用化に向けて進展しているものと判断される。
- 新超電導材料の探索と関連機能の実証という難しい課題設定の中で高い目標を設定して顕著な成果も得られており、研究は順調に進捗していると考えられる。しかし、 $T_c > 77K$  の超電導材料の探索という目標に関しては、目標値が高いこともあって、目標達成のためには、更なる努力が必要であると思われる。
- 材料探索の面では、世界をリードする研究開発がなされているが、高  $T_c$  材料 (77K 以上) はまだ見出されていない。高  $T_c$  材料の発見はどんなに論理的に材料探索を行っても、簡単に見出せるものではないので、この点から本課題の世界に対する優位性を議論することは適当ではないと考えられる。  
材料開発の面では、酸化物イオンへの H イオン置換による電子ドーピングというオリジナルな手法を確立し、超電導物質探索の指針を広げたことは、新物質探索の可能性を広げたということで今後に期待が持てる。C12A7 エレクトライドなど希少元素を含まない超伝導体の発見など新たな展開もある。さらにアンモニア合成・分解触媒を見出したことは産業応用的には大きな発見と考えられる。  
また線材応用についても 10T の磁場中で  $10^5 A/cm^2$  に近い  $J_c$  を持つ線材を開発するなど一定の進展が見られている。ただし、デバイス応用に関しては SNS ジョセフソン効果を確認するにとどまっており、具体的なアプリケーションイメージが伴っていないのが気になる。

- 新規超電導体の発見や線材化技術の向上など研究の進捗は順調と判断される。またアンモニア合成触媒などの新機能探索も順調と判断される。  
プログラム終了時点で  $T_c > 77K$  という所期の目標が本当に達成されるかは別として、超電導発現機能解明が進んでおり、少なくともその道筋は見えつつある状況である。

### 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

- サブテーマ1から4は新しい新超電導物質の探索であるが、サブグループはそれぞれ固体化学をベースとして、4つのグループが高圧合成、低温合成、薄膜合成などにおいて、互いに補完的関係を構築しながら研究が進められている。いずれにおいても着実に研究が進展しており、終了時までには所期目標を達成するための筋道が得られると判断される。

5つのサブテーマはいずれも超電導物質探索を軸とする本研究を推進する上で必要なものである。テーマによって、進捗と成果に差が見られるが、良い方向で研究が進んでいると判断され、概ね目標に向けた成果が期待できる。

- サブテーマ1～4は新規高温超電導材料の開発であり、 $T_c$  に関しては非常に厳しい状況であるが、超電導化のプロセスや新たな触媒反応など大きな成果も出つつある。また新しい超電導材料も見つかりつつある。ただし、新材料開発の場合、時間軸に対して計画的に成果を生み出すことは予想し難い面が有り、順調や見込みと言った表現にはあまり意味が無いものと思われる。

サブテーマ5は、順調であり、達成が見込まれる。ジョセフソン接合も既に作製され、また結晶流の配向が無くても実用レベルの高い  $J_c$  が得られることが見出されており、鉄系材料としてのデバイス応用が順調に進められている。

- サブテーマ1： $T_c 77K$  以上の超電導体開発以外は、概ね達成の見通し。  
サブテーマ2：超電導転移温度に関しては極めて低く物足りない。新規な超電導体の開発と言うには今一步の感が否めない。  
サブテーマ3：高い  $T_c$  を得るには至っていない。  
サブテーマ4：Hf系において26Kの超電導体の発見に成功している。この値はこの系においては極めて高く特筆に値する。  
サブテーマ5-1：目標値の  $J_c$  を持つ1m級の薄膜線材の達成は困難か、と思われる。  
サブテーマ5-2：目標値の半分程度までは来ているが、達成は困難か、と思われる。

- サブテーマ新超電導物質の発掘は既に60種類の新物質を発見しており、十分な成果を挙げていると思われる。この中で  $T_c 77K$  以上の新超電導物質の発見は、中心研究者が指摘するように、予測原理や理論が存在しないために、探索的な目標となると判断される。薄膜線材法やPIT法を用いたメートル級線材化への道筋も明らかになりつつあり、所期目標を達成できるものと判断される。

- サブテーマ1：鉄1111系へのH-添加による超電導の発現と機構の解明などで、顕著な成果が上がっている。また、二次元エレクトライドの発見とアンモニア合成・分解

触媒への応用など予期せぬ成果も上がっており、研究は順調に進捗していると考え

る。  
サブテーマ2：いろいろな材料の可能性が示され、成果も上がっていることから研究は着実に進捗していると考え。最終目標である新規超電導体の発見へ向けて研究の更なる加速を期待する。

サブテーマ3：研究が進捗し成果も上がっていると評価するが、最終目標達成へ向けて研究の更なる加速を期待する。

サブテーマ4：層状およびカゴ状構造を有する種々の材料について検討し、それなりの成果も得られていると考え。しかし、高温  $T_c$  の実現にまでは至っていないので、今後の研究の更なる進展を期待する。

サブテーマ5：顕著な成果も上がっており、目標達成へ向けて研究が順調に進捗していると判断する。

○ サブテーマ1：鉄系超電導系が本テーマの主力課題であり、新たな新超電導体の発見の指針が見いだせており、今後に期待が持たれる。また、112 型の新超電導体の発見など鉄系の分野でも新たな発見があった。特筆すべきは C12A7 エレクトライドの触媒応用に関する研究成果で、アンモニア合成、分解触媒として効果があることが明らかとなった。これは産業応用に対して、より大きな期待が持たれる。

サブテーマ2：超高圧合成を活用した新超電導体の探索では、鉄ニクタイト、カルコゲナイドなどの高温超電導体の開発、空間反転対称性の破れた新しい超電導体の発見、金属でありながら、強誘電構造相転移を起こす物質の発見など、新たな発見はあるものの、大きなインパクトに欠ける。自己評価でも述べられている通り、影響力のある新超電導体の発見という目標には今一歩という印象である。

サブテーマ3、4について、低温合成法も新超電導体を発見するための手法の一つであり、層状、カゴ状構造の検討も材料探索の一つと理解されるが、それぞれ、各サブテーマリーダーのコンセプトに沿っての実施が重要と思われる。サブテーマ2についても同様であるが、中心研究者のコンセプトとの整合がみえず、新物質発見の方法がやや発散傾向に感じる。

サブテーマ5について、5-1 では、低温で  $0.1\text{MA}/\text{cm}^2$  以上の  $J_c$  を示すメートル級線材の開発という目標に対して、それを期間内に達成可能と判断できる指標が得られている。また、5-2 では  $4.2\text{K}$ 、 $10\text{T}$  で  $69,000\text{A}/\text{cm}^2$  という実用レベルの高い  $J_c$  が得られており、大きな進展が見られている。ただし、メートル級という目標は、実際の製造プロセスの開発も含めてかなりの困難が予想される。期間内の成果達成に向け、集中した開発をお願いしたい。

○ 下記理由により順調に推移していると判断する。

サブテーマ1：共有結合性層状遷移金属化合物および無機エレクトライドの超電導と新機能探索については、新規な超電導体が見出されており、研究は順調に推移していると判断される。残念ながら  $T_c > 77\text{K}$  という究極目標には届いていないが、目標達成への道筋は見えてきていると判断される。新機能探索もアンモニア合成触媒機能の深化、二次元性エレクトライドの探索においても順調に推移していると判断される。

サブテーマ2：鉄系超電導体ナノウイスキーが明瞭なジョセフソン効果を有すること

を明らかにするなどの成果が得られており、研究は順調に推移していると判断される。

サブテーマ3：d1 電子正方格子を有する新超電導系  $\text{BaTi}_2\text{Sb}_{20}$  の発見に加え、他に 2 系統の新超電導を発見などの成果が得られており、研究は順調に推移していると判断される。

サブテーマ4：新規層状窒素化物超電導体の探索において  $\beta$  型層状結晶  $\text{HfNCI}$  へのインターカレーションで  $T_c=26.0\text{K}$  を見出すなどの成果が得られており、研究は順調に推移していると判断される。

サブテーマ5：PIT 線材では鉄系における最高  $J_c$  を実現するなどの成果が得られており、研究は順調に推移していると判断される。

### 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)

- 若手研究者の育成については、参画している若手が着実に力をつけていることが、国内外研究発表実績、論文発表状況、各種受賞データなどから分かる。組織的な育成体制は無いと考えられるが、プロジェクトの中で若手は、国際会議発表や、ラボ内での英語による討論などで切磋琢磨して伸びている。また、若手の昇格や常勤職への採用、他機関での常勤職での採用など、着実な貢献が認められる。

成果の社会還元に向けた方策等の検討状況については、実用化を念頭においた平成 26 年以降後の展開が示されている（たとえば、後継の「文部科学省元素戦略プロジェクト」「JST 戦略的研究推進事業」での推進など）。線材化では企業との連携で、さらに一歩進めることが期待される。

科学・技術対話の取組みについては、情報発信は十分であり、国際ワークショップ、サイエンスフォーラムなど、専門家や一般市民・高校生等にむけ、バランス良く情報の発信がなされている。また、International Workshop on Novel Superconductors and Super materials のような試みもあり、若手研究者育成も考慮されている。

- 研究実施・推進体制については、材料探索の場合、開発体制の適切な規模感の考え方があるのかは不明であり、判断できない。
- 知的財産権については、製造特許が中心であり、物質特許が少ないなど、取り組みが必ずしも十分とは言えないのでは。
- 研究実施・推進体制については、中心研究者を核として、種々合成法・線材化・物性物理のチームを構成しており、特に問題はないものと判断される。

知的財産権については、60 種類の超電導新物質発見および 269 編もの論文発表に対して、特許 21 件は少ないと思われる。中間評価時点でのコメントと同じであるが、新母物質 20 種類の発見も含めて、包括的な特許出願をすべきと判断される。また、東工大 & ISTE C 事務局の特許出願体制は既に構築されているので、これらの研究支援チームと協力して積極的な特許戦略を実施することを希望する。

若手研究者の育成については、ポスドク研究員や若手特任助教および特任准教授の

積極的な国際会議発表、招待講演およびテニユアポストへの再就職の実績を含め、活発な育成活動を試みていると判断される。

成果の社会還元に向けた検討については、研究成果の実用化・市場投入への検討および道筋は、他のプロジェクトに比べてやや消極的と思われる。超電導物質の探索研究から線材化研究の成果は、実用化への戦略を立てることが難しくなるのはやむを得ないものとも思うが、鉄系超電動体線材の実用化への道筋を更に明確化することが必要と判断する。一方、関連物質として発見された C12A7 エレクトライドを三菱化学と共同でアンモニア触媒合成法に実用化する試みは評価できる。

科学・技術対話の取組みについては、一般人を対象にしたオープンセミナー、スクール、講演会、演示会を積極的に開催・参加しており、十分な科学・技術対話がなされていると判断される。

- 新超電導物質の探索という大きな課題に対して、4つの異なったアプローチを選択し、それぞれサブグループを編成して協力しながら研究を進めるという効率的な研究実施・推進体制が築かれていると考える。また、新超電導材料の実用化促進を考えて、線材応用チームが形成されている点も評価できる。但し、民間企業との連携がもっとあっても良いように思う。

知的財産権については、特許出願の取組みはなされているが、出願件数が多いとは言えない。材料探索に関する研究プロジェクトであるため、特許出願の難しさはあるが、応用と組み合わせるなどして、できるだけ権利化を目指して頂きたい。

成果の社会還元に向けた検討については、本研究プロジェクトの成果である C12A7 エレクトライドに関して、アンモニア合成・分解触媒としての実用化を目指すことによって、成果の社会還元に向けた取組みがなされている。鉄系超電導材料に関して、成果の社会還元を考えて、線材化による実用化を目指した検討が行われている。

- 研究実施・推進体制については、中心研究者のリーダーシップは強力なものがあると思われるが、各研究機関の成果からは、中心研究者により開発された材料が応用に活かされるなどの連携にやや難点が見られる。中間評価の際には後半のベクトル合わせをお願いしたが、あまり改善はされていないと思われる。

若手研究者の育成については、多くのポスドクが参加しているプログラムであり、多くの成果を出した結果として昇格、常勤への採用など、若手研究者の育成に確実に成果を上げている。

成果の社会還元に向けた方策については、超電導材料は産業への応用のインパクトはやや小さいものの、関連事業として取り組んできたアンモニア触媒の材料開発は、産業応用に大きなインパクトを与えるものと思われる。



研究課題名	高性能蓄電デバイス創製に向けた革新的基盤研究
中心研究者名	水野 哲孝
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、既存の電池材料にとらわれず、電池材料を原子・分子レベルで設計・合成することによって革新的蓄電デバイス、ポストリチウムイオン電池の要素技術を世界に先駆けて開発することを目標としている。

本研究課題ではサブテーマを設定していないが、中間評価時点において以下の4つの研究項目の中で24の小テーマを設定して研究を進めている。

- ① 新原理蓄電池（リチウムイオン電池と異なる新しい原理に基づく蓄電池）の開発
- ② 新型蓄電池（既存の電池の性能を新しい材料等で向上させる蓄電池）の開発
- ③ 原子・分子レベルでの合理的デバイス材料設計
- ④ 高度な分析・解析技術の開発および材料計算・シミュレーション技術の開発

また移動体用途蓄電池における代表的な開発指標の一つである重量エネルギー密度に関して、高エネルギー密度型電池では350 Wh/kg、全固体電池では550 Wh/kg、金属空気電池では700 Wh/kgが見込める蓄電池の要素技術を研究課題終了時まで確立するとしている。

## 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

- 中間評価においての結果は、「研究課題終了時までには、新原理蓄電池の実用化に向けて要素技術の完成度を着実に高め、また、合わせて電池を組んだ状態での性能評価を進めることができれば、世界をリードするトップ水準の成果となると見込まれるが、そのためには、中心研究者の革新技術の明確化が鍵であり、そこに集中する必要がある」と説明があった。今回、中心研究者の世界をリードする革新技術であるリチウム高級酸化物電池の動作実証・性能向上に成功し、プロジェクトの方向性を明確化したことから、十分に世界をリードする研究開発が展開できる状況となっていると判断される。また、プロジェクト終了時には、新原理蓄電技術・方法論の開発を初めとし、電池材料の開発や設計についての指針と新電池の解析が進むことから、学術的にも展開が期待され、それは世界のトップ水準の成果に繋がると見込まれる。
- 現状の革新的蓄電池の国プロでも目標容量が500 Wh/kgであり、本プロジェクトの目標は世界トップ水準であり、世界をリードする目標である。

- 中心研究者は無機化学、固体触媒研究における第一人者である。優れた実績を持つ研究者が国家的な重要課題の異分野に参入することはたいへん望ましい試みである。電池研究はノウハウなどが必要な分野であることもあり、最終年度までの実用化に至りそうな大きな成果は無い。その一方で、この半年間で新しいリチウム高級酸化物電池の基本動作を確認しており、大変興味深い。これが実用技術となりうるかは現段階では不明であるが、今後の展開に期待したい。
- 中間評価時点までに、革新的なポストリチウムイオン電池の開発を目指して、個々のテーマ、酸素シャトル電池、金属イオン酸素電池、リチウムイオン—空気電池、および有機固体電池開発を推進しており、有機固体電池において容量密度およびエネルギー密度が目標値を超える材料として実用化が進められている。更に、中間評価以後、新原理電池として、リチウム高級酸化物電池に集約する体制を構築し、現状のリチウムイオン電池の重量エネルギー密度および重量容量密度において凌駕する性能を実現しており、世界を先導する成果になるものと思われる。  
しかしながら、コアコンピタンスとして選定したリチウム高級酸化物電池の性能理論値に対する到達達成度を最終的には明確にすべきと判断される。
- リチウム高級酸化物電池はエネルギー密度、容量密度の点でこれまでの電池を凌駕する新原理の電池であり、動作機構の解明も含めてその優位性を示す成果が蓄積されつつある。しかし、大幅な計画変更の後で漸く顕著な成果が生み出されるようになったことから、残された時間で更にどれだけの成果が積み上げられるか、期待と不安が入り混じるところであるが、このまま研究が推移すればプロジェクト終了時に、世界のトップ水準の成果が得られると見込まれる。
- 酸素シャトル電池から検討を始め、デュアルイオン電池という新原理の電池を提案し、動作を確認していることは面白い結果である。従来の革新電池と言われる空気電池は開放系であり、ハンドリング、安全性などの面で使いづらいところがあることは間違いがなく、本電池で理論的に予測するエネルギー密度が達成できると世界トップのデータとなるものと思われる。  
しかしながら、まだ電池としての性能を確認し始めて3か月であり、電池性能、信頼性など、本提案の電池のポテンシャルを議論するには早すぎる。特にリチウム酸化物は安全性には十分に注意を要する材料であり、電池としての信頼性評価が出た後に、本電池の可能性を議論するべきと思われる。また、電池は大型になればなるほど課題が増すことは周知であり、ポテンシャル評価は小型電池での評価でも良いが、製品としての実力を議論する場合はある程度の大型の電池での評価が望まれる。  
プロジェクト終了後には目標である現行電池の3倍のエネルギー密度を見通せるように基本特性の確認を完了するということであるが、ポテンシャルの高い材料提案であるので、拙速に結論を求めることをせず、基礎研究フェーズとして長期展望をもった研究と位置づけるべきと思われる。
- これまで本プロジェクトは高性能蓄電デバイスの創製に向けて24のサブテーマを設定し研究開発を進めてきたが、中間評価結果で焦点を絞って新原理蓄電池の創出に向けて取り組むべきとの指摘がなされた。現在、その指摘に沿った方向で研究開発が見直

され、新原理電池として金属/高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池が提案されている。この金属/高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池は原理が見出されて日も浅く、特性面、信頼性などのデータに乏しく、どの程度の可能性を秘めているかは判断が難しいが、本プロジェクト終了時に期待通りの成果が得られれば世界のトップ水準の成果になると思われる。

## 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

- リチウム高級酸化物電池が実際に作動することを見いだしたのが約3か月前ということであるが、これは、本プロジェクトのエンドの目標に近く、研究の進捗は順調と判断される。この発見に基づく商品化に企業（トヨタなど）と足並みをそろえて研究開発が進捗することが期待され、その結果として目標の達成が見込まれる。
  
- 先日のヒアリングで、3か月前に目標を達成可能な材料を見出したということから、時間的な観点から達成は難しい。しかし、本来、本プロジェクトは材料探索がメインなテーマで有り、その観点に鑑みると非常に進めるべきテーマであると思われる。  
本来ならデバイスの実証まで行うべきところであるが、もしそれが難しいのであるのならば、今回の基本特性を達成したメカニズムの深堀、すなわち触媒作用や酸化還元反応での体積変化率などのミクロな現象を明確にすべきであると思われる。
  
- いろいろなテーマを並列に進めている中で、有機全固体電池が現行の3倍となる目標エネルギー密度 350 Wh/kgを超えており、更に実用化に向けた取り組みを進めており、所期目標値は達成できるものと判断される。  
中間評価以降において、過酸化物イオン—酸化物イオン間の可逆変化を利用したリチウム高級酸化物電池の発明とその開発に研究資源を集中配分することにより、新原理ポストリチウムイオン電池の開発目標を達成できものと判断される。しかしながら、中心研究者が見積もっている理論重量エネルギー密度および重量容量密度のどのレベルに達するかの見通しを明らかにする必要があると思われる。
  
- 当初はポストリチウムイオン電池の開発ということで研究が進められていたが、期待される成果の位置づけが必ずしも明確とは言えなかった。しかし、研究が進捗する中で当初想定されていなかった成果が生み出され、その成果をもとに研究計画の見直しが行われて、目標と期待される成果の位置づけが明確になった。残された少ない時間で今後どれだけ成果を積み上げられるか気になるところであるが、他の技術を凌駕する可能性を持った技術に関する研究であり、研究内容も興味深い。計画変更後の目標達成が期待され、その可能性は十分高いと判断される。
  
- 新しい原理の電池への舵切りのため、順調とは言い難い。しかしながら、挑戦的なテーマであり、今後の研究成果が期待される。残りの研究期間でどこまでのポテンシャルが示せるか不透明な点は残るが、空気電池に代わる密閉型の革新電池の可能性が出てきたことは面白い。

- 本研究課題は中間評価結果での見直しにより、新原理蓄電池として金属/高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池に研究テーマの絞り込みが行われ、それに伴い4つのサブテーマが設定されている。但し、金属/高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池そのものが見出されてから日も浅く各サブテーマに関しては、これから進められる内容であるので各サブテーマ毎の研究の進捗（達成）状況と所期の目標の達成見通しの評価は行わず、研究課題全体での評価のみを行う。

研究の進捗状況としては、これまで発散気味に進められてきた新原理蓄電池の探索研究の中から、金属/高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池という新原理蓄電池が見出されてきたことは大きな成果であると判断される。

現時点で得られている金属/高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池に関する成果をまとめると以下の通りである。

#### <成果>

- ・高エネルギー密度が期待できる金属/空気電池と類似の電池であるが、正極の空気極の代わりに $\text{Li}_2\text{O}_2$ などの高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池を用いることにより、完全密閉型の電池にできること。
- ・出発材料である $\text{Li}_2\text{O}$ を微粒子化したこと
- ・触媒物質である $\text{Co}_3\text{O}_4$ を選定したことで $\text{Co}_3\text{O}_4$ が $\text{Li}_2\text{O}$ と固溶し電子伝導性となる思いがけない発見により、その効果でスムーズな充放電反応が可能になったこと。
- ・電解質としてLiFSI（リチウムビスフルオロスルホンイミド）電解液溶媒としてアセトニトリルを選定したこと
- ・現行リチウムイオン電池の約3倍の700 Wh/kgのエネルギー密度が期待できること。

#### <所期の目標の達成見通し>

高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池が見出されてから日が浅く、電池特性、信頼性、電池反応機構など未だ不明な点が多い。本プロジェクト終了時にまでに以下の課題を解決できれば目標は達成できると判断される。

- ・現状のエネルギー密度は期待値の半分程度であるが、これを期待値に到達させること。
- ・長期サイクル性などの電池特性の確認と実用レベルに到達できる見通しを得ること。
- ・過酸化物 $\text{Li}_2\text{O}_2$ などの熱安定の確認と安全性に与える影響のないことの確認。
- ・充放電反応機構の明確化

この高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池は間違いなく本プロジェクトで世界に先駆けて見出された新原理蓄電池である。未だ未知な点が多々あるが本プロジェクト終了時までに上記課題を解決し、所期目標を達成していただきたい。

#### 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

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4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。

- 中間評価後、研究項目について適切な変更が加えられており、金属・高級酸化物（リチウム高級酸化物電池）を中心とした、動作確認、特性向上に向けたチーム編成とテーマ設定がなされている。その結果、効果的に最終目標に向けた成果が整いつつある

と思われる。

- ・ リチウム高級酸化物電池の作製：酸素シャトルのアイデアに基づく新原理電池の開発について、基礎原理がわかり、作動原理が放電および充電反応ともに実証されている。繰り返し再現性の必要はあるが十分に目途がついている段階である。
- ・ 動作原理実証：微粒子化、放電容量の増大（触媒とリチウム酸化物の混合方法を工夫して達成）などが実証されている。
- ・ 反応機構実証：充電過程における過酸化物生成を分析的に捉え、放電段階で過酸化物が減少して、最後の段階ではコバルト三価が二価になることなどを実証。さらに、4配位のコバルトがリチウムのサイトにランダムに配置し、効果的に機能していることなども実証している。
- ・ 特性向上では、大理論容量密度、高作動電圧、密閉型で高安全性、高サイクル特性（15 サイクルでも性能低下無し）、短時間充電（10 分以内）であり、現行のリチウムイオン電池製造プロセスが利用可能などの成果が得られている。

以上のように、中間評価以後、プロジェクトの方向性を明確化したことから、最終目標の達成が見込まれる。

- 研究の進捗（達成）状況に関しては、時間的には難しいが、基本的なメカニズムの明確化の実現が期待される。

所期の目標の達成見通しについては、各テーマが小テーマ化されているため、今回の新材料の組合せに対して非連続的な発見が評価の対象になるとと思われる。

- 個々のテーマについて言及するのは避けるが、研究者も研究開発内容も総花的に進めてきた所為で、所期の目標達成の見込みは低い。当初から、課題を絞って、シャープに進めるべきであった。

- 新原理電池開発グループに対して、分析・解析グループおよび設計グループがサポートする形で開発研究を進めている。中間評価以降で、リチウム高級酸化物電池の開発に重点化する研究体制を構築しており、所期目標の達成は可能と思われる。

- 中間評価後の研究計画の見直しによって途中で中止になった研究項目・小テーマもあるので、所期目標の達成見通しという点から評価すると必ずしも順調な進捗とは言えないが、研究計画見直し後は目標も明確になり、研究対象も重点化されたので、研究も順調に推移し、興味深い成果も得られるようになってきている。残りの研究機関で、更に顕著な成果が生み出されることが期待される。

- サブテーマは設けず、中心研究者のリードのもと新原理革新電池の開発を進められている。各グループを構成するが、小テーマ毎に中心研究者が進捗を管理する体制となっている。

中心研究者らが提案する電池コンセプトを、新材料設計グループ、分析・解析グループ、デバイス評価グループ、新原理電池グループの4つのグループが連携して実施しており、それぞれの得意な分野での研究が進められていると思われる。しかしながら、全体進捗で述べたとおり、大変挑戦的なテーマであり、それぞれのグループで本質的な理解に基づく検討が重要と考えられる。それぞれの結果は理解できるが、それ

らがどのように最終ゴールに結びつくかがややわかりにくい。個々の技術開発が集約されることが電池開発には不可欠であり、それぞれのグループで得られた知見が最終結果を結びつくことが期待される。

### 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、中心研究者のもと、4つのグループ（新原理電池、新型蓄電池、新材料設計、分析・解析）の構成であったが、中間評価後は、金属/高級酸化電池の開発に特化した研究体制となり、研究連絡会会議などの機会を持ち、効果的に研究が推進されている。日本触媒など企業研究者も東大に派遣されるなど、実用を見据えた研究実施体制となっている。

研究支援体制については、グループが少数（14名の担当研究者）で、テーマが特化されている。これを支援する体制とするための事務補佐員なども配備されている。グループが小さいことから十分に機能していると判断される。

若手研究者の育成状況については、このプロジェクトに加わった若手は十分に機会を与えられていると判断される。他方、中心研究者が指摘しているように、このプロジェクト分野の将来の展開を考えると、もう少し多くの若手（専門・非専門）の研究者が集められてもよいように思われる。

成果の社会還元に向けた方策については、FIRST 終了後のビジョンも示されるなど、特に問題はない。

科学・技術対話の取組みについては、サイエンスフォーラム、公開シンポジウムなど、十分な取組みがなされている。

- 研究実施・推進体制について、特に問題ない。今は体制の変更等より、この新材料の2次電池としてのデバイスに繋がる評価解析を早急にすべきである。当然コストに依存するが、エネルギー容量目標値は社会的に非常に望まれる内容である。

- 研究実施・推進体制については、様々な問題がある。総花的な体制が難である。

研究支援体制については、多種多様で勝手な動きをしたがる大学研究者からなる集団を、強かに統率する支援体制を構築するべきであったと思われる。

知的財産権については、まずまずであるが、さらにPCT出願を進めるべきである。

- 研究実施・推進体制については、中心研究者をリーダーとして、4つのグループ（新原理蓄電池、新型蓄電池、新材料設計、分析・解析）にそれぞれ日本を代表する研究者が研究分担者として参画して、有機的な連携により学際的融合を図る研究組織を構成している体制については、問題ないと思われる。更に、中間評価以後、リチウム高級酸化電池の開発に重点化する研究体制を構築しており問題ないと判断する。

支援体制についても現行の東京大学が事務局としてサポートする形で問題ないと思われる。

知的財産権については、計34件（国内28件、国際6件）の特許を出願し、当該プロジェクトで産み出した新原理電池及び新型電池のコア技術に係る基本特許も含まれ

ており、評価できる。

若手研究者の育成状況については、無機材料と電気化学に偏っている研究者を材料設計・合成のための化学、物性予測やメカニズム解明のための基礎物理をバックボーンとした多数の若手電池研究者の育成に努めており、国内の若手電池研究者を育成しているものと思われる。

成果の社会還元に向けた方策については、目標達成見込みがある新型有機固体電池は、参画企業であるトヨタ自動車株式会社・株式会社日本触媒(産)を通して市場化に向けた試みを進めており評価できると判断される。

科学・技術対話の取組みについて、種々公開講座、シンポジウム、およびセミナーを開催しており、続けて進めていくべきと思われる。

- 研究実施・推進体制については、金属/高級酸化物電池の開発という明確な目標へ向けて大学の研究者と企業の研究者が一体となって研究を進める体制が構築されている。但し、将来の実用化を考えると企業の研究者の関与がもっとあっても良いように思われる。

支援体制については、プロジェクトの円滑な遂行に対する支援体制と支援環境が整えられていると考えられる。

知的財産権については、特許出願に対する取り組みは認められるが、必ずしも十分とは言えない。重要な内容が含まれているので今後とも特許出願、特に国際特許出願を積極的に進めて頂きたい。

若手研究者の育成状況については、国際シンポジウムの開催や国際会議等での発表を通して育成は行われているが、それ以外の取り組みがあっても良かったと思われる。

成果の社会還元に向けた方策については、報道機関を通しての広報活動やホームページを介した情報発信等により、成果の社会還元に関する取り組みがなされている。

- 研究実施・推進体制については、サブテーマを設けずに、中心研究者を中心に4つの研究グループ（新原理電池、新材料、電池評価、材料分析）で研究を進めている。かなり挑戦的な研究テーマであり、そのやり方自体は問題ないと考えられる。

知的財産権に関する取組みについて、東京大学中心にしっかりと取り組んでいる。

若手研究者の育成状況については、特に活発な活動ではなく、通常の取り組みにとどまっている印象を受ける。

成果の社会還元に向けた方策について、本研究成果を早期実用化するために共同研究者のトヨタが積極的に実験に参加している点は評価される。是非、新原理電池の信頼性評価を進めることが期待される。

- 研究実施・推進体制については、各研究グループの研究役割分担が不明確に感じる。高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池に焦点が絞られたので各グループのプロジェクト終了までの役割を再度検討することが期待される。

知的財産権について、高級酸化物（リチウム高級酸化物）電池の基本特許の権利化をしっかり進めることが期待される。

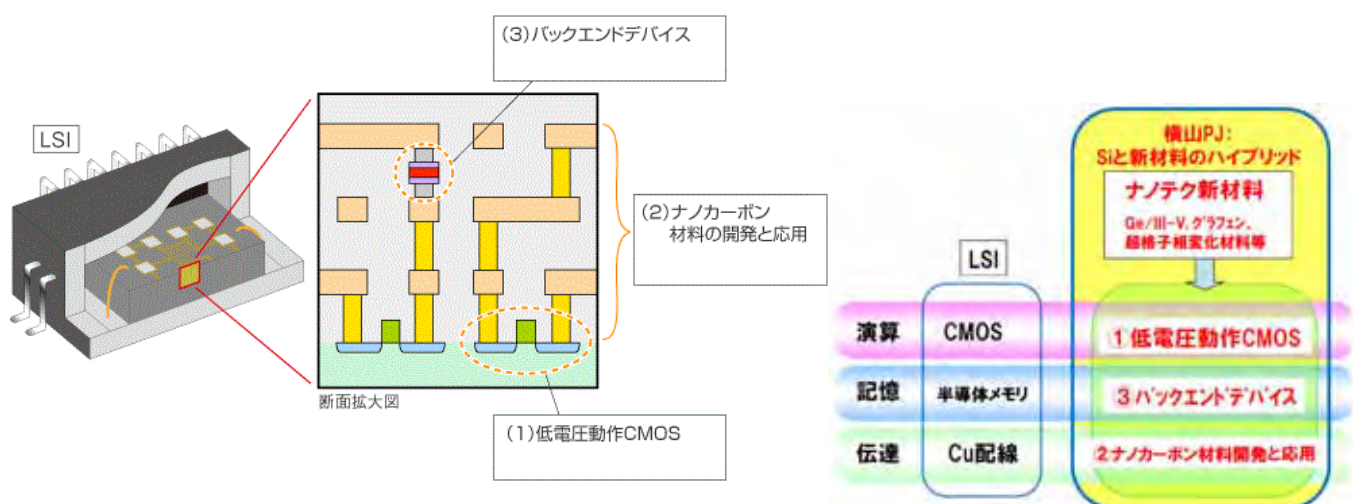
研究課題名	グリーン・ナノエレクトロニクスのコア技術開発
中心研究者名	横山 直樹
研究支援担当機関名	独立行政法人産業技術総合研究所

## 1. 研究課題の概要

本研究課題は、LSI の 0.5V 以下の低電源電圧動作と高機能・高集積化のコア技術を開発し、LSI およびエレクトロニクス機器の消費電力を従来技術比で 1/10~1/100 に低減することを目指している。本研究課題は LSI を構成する 3 つの主要機能部（CMOS で構成される演算部、半導体メモリで構成される記憶部、Cu 配線で構成される情報や電力の伝達部）を研究開発対象とし、それらに対応した 3 つのサブテーマを設定している。

- [1] 低電圧動作 CMOS
- [2] ナノカーボン材料開発と応用
- [3] バックエンドデバイス

LSI 関連産業は世界の有力企業による桁違いの投資による猛烈な開発競争が続いている非常に過酷な分野であり、我が国の産業競争力、研究開発力の維持・創出に向けては戦略的取組みが必要である。本研究課題では産学の研究者らがつくばイノベーションアリーナ（TIA）に結集し、将来の低消費電力化につながる次世代コア技術候補群の中で新材料開発、新原理実証等に研究資源を充当して研究開発を推進している。



## 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

○ 0.5V 以下の LSI 低電圧動作を実現するとともに、消費電力を 1/10 から 1/100 に低減す



ることを目標として、ナノテク材料とシリコン技術を融合するもので、米国や欧州のプロジェクト目標を凌駕するものであり、世界をリードする研究開発が展開されている。

研究成果の出口像を明確とするため、システム分野やアプリケーション分野の企業を巻き込んだプロジェクトとして組み替えを実施している。また、低電圧動作 CMOS 0.2V 動作実証や SS 値 27 mV/dec 達成、多層グラフェン横配線で抵抗率  $4.1 \mu \Omega \text{cm}$  を達成するなど、所期目標に迫る成果を出している。また、バックエンドデバイスにおいて、相変化超格子素子開発で、所期目標を上回る 1/1500 の消費電力実証をするなど着実な研究展開が認められる。

以上より、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。

○ LSI の低電圧化についてはベンチマークからも分かるように目標として派生のトップレベルである。またそれらに付随するバックエンドまで含めた開発は新規材料の為のプロセス開発のため、プロジェクト終了時には世界のトップレベルの水準になる可能性が高い。

○ 2025 年の世界目標である 0.6V よりも小さな 0.5V 動作を目指しており、優位性は十分である。

○ 所期申請に設定した各サブテーマ①低電圧動作 CMOS 開発、②ナノカーボン材料開発、および③バックエンドデバイス開発、それぞれにおいてトップ水準の成果が得られていると判断する。特に③バックエンドデバイスにおける相変化メモリデバイスの低消費電力性や磁気抵抗効果に大きな発見的成果も見られ、世界を先導する分野に発展すると思われる。

しかしながら、シリコン ULSI 分野への革新的寄与を与えるべきと判断すると、設定する 3 つのサブテーマの成果を統合化した新 ULSI を試作するか、またはシナリオを提示するような包括的成果が必要であると思われる。

○ それぞれの研究に対しては高い目標が設定され、研究も順調に進んで顕著な成果が得られている。しかし、本研究プロジェクトは将来の高集積・低電力 LSI のためのデバイス技術に関わる研究であり、デバイスに関わる個々の目標が達成されたからと言ってそのまま採用されるわけではない。LSI の高性能化、低電力化のためには、デバイス技術だけでなく、回路技術、システム技術と連携しながら広い視野から研究開発を進めることが重要となる。LSI の分野で世界をリードするためにはこの点が非常に重要であると考えられる。本研究プロジェクトでは、回路研究者、システム研究者とも連携を取りながら研究開発を進めているので、プロジェクト終了時には、世界をリードする成果が得られるものと期待できる。

○ 0.4V 以下の動作電圧を有する低電圧 CMOS、その場合に LSI 化で必須となる低抵抗配線、さらにはバックエンドデバイスとして低電圧化が可能な相変化デバイス、の実現を目標としている。それぞれ世界に比して優位性を発揮できる目標であると思われる。それぞれを統合した出口イメージとして 2015 年アプリ指向低電圧 LSI、2020 年低電圧動

作サーバーをあげており、目標実現の際の社会へ与えるインパクトは大きなものがある。

本プロジェクトと類似の目標を上げるグローバルなプロジェクトとのベンチマークにより、その目標の優位性、あるいは数字だけの比較でなく、実用化をにらんだ目標数値の妥当性を検証しており、目標の優位性は明確であると判断する。

また、研究成果の出口までの道筋の明確化のために、企業や大学との連携推進・共同研究を進めるなど、積極的な出口検討がみられる。

- 世界の他機関に比べて高い目標設定がなされており目標の優位性は十分認められる。またこれまでの研究開発で大きな成果が見出されており、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と判断する。

## 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

- これまでの研究の進捗（達成）状況はほぼ順調と判断される（下記の通り）
  - ・ 低電圧動作 CMOS において所期目標の 90%を達成
  - ・ ナノカーボン材料を用いた低抵抗配線技術において、所期目標の 80%を達成
  - ・ 低消費電力の相変化超格子素子開発を達成理由) 前記の順調な進捗から判断すると、システム分野やアプリケーション分野の企業を巻き込んだプロジェクトとして再編したことから、所期目標は達成できると判断する。
- 研究の進捗は順調と判断する。所期の目標達成に関しては、達成に期待したい。理由) 3つのサブテーマについて 80%以上の達成状況であり、サブテーマ3においては想定外の巨大磁気抵抗効果などの発見が有り、100%を超えている。ただし、個々の要素での目標値は達成しているもののインテグレートを行った場合のリスク、つまり個々の要素が独立ではなくお互いに影響を及ぼしあい性能がでないことが多い。しかしその定量化が困難であるため非常に挑戦的な試み故、達成することを期待したい。
- まずまずの進捗状況か。期待以上の感はない。
- 研究の進捗状況については、3つのサブテーマの内、所期目標の達成度の順で、③バックエンドデバイス、②ナノカーボン材料開発、①低電圧動作 CMOS であり、概ね順調に進んでいると判断する。特に③バックエンドデバイスでは、超格子相変化デバイスにおける巨大磁気抵抗やトポロジカル絶縁性等の発見を生み出し、所期目的を達成している。所期の目標達成については、シリコン ULSI 分野への革新的寄与を考えると、設定する3つのサブテーマの成果を統合化した新 ULSI を試作するか、またはシナリオを提示するような包括的成果を期待したい。
- 所期の目標達成に向けて研究は順調に進捗していると考え。顕著な成果も得られて

いる。このまま進めば所期の目標達成は十分可能であると判断する

- 低電圧動作 CMOS では、Ge-pMOS で世界トップのピーク移動度  $1922\text{cm}^2/\text{Vs}$  実証、InGaAs-nMOS で Si の 6.2 倍の移動度、SS 値  $<80\text{mV}/\text{dec}$  の実証、それらを組み合わせた CMOS 0.2V 動作実証、Si 系 TFET で SS 値  $27\text{mV}/\text{dec}$  の実証、など所期目標の 90% を達成。ナノカーボン材料の開発では、多層グラフェン横配線で抵抗率  $4.1\mu\Omega\text{cm}$  実証、低抵抗 CNT ビア実現、プロセッサへの排熱応用の提案、など所期目標の 80% という自己評価。バックエンドデバイスでは消費電力  $1/10\sim 1/100$  を可能とする相変化超格子素子材料の開発を行って、目標以上の成果が得られている。

以上のように所期の目標の達成には見通しが得られているが、産業応用の観点で見ると具体的なアプリケーションに対して適した性能を達成できるかが重要であり、企業との連携やシステムサイドとの連携による出口からの目標設定が重要と考える。

- 研究の進捗状況については、各サブテーマにおいて一部既に目標値を達成するなど十分な成果を見出しており、研究は順調に推移していると判断する。

所期の目標達成については、上記理由によりプロジェクト終了時には所期の目標達成は十分可能と判断する。さらに想定外の成果も見出されているのも注目すべきと判断する。

### 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] 低電圧動作 CMOS

LSI の高機能・高集積化に必要な技術目標であり必要である。移動度増大率と SS 値で、個別指標で世界トップの値を出している、これらを融合する技術に取り組んでいることから有効と判断する。

- [2] ナノカーボン材料開発と応用

低抵抗配線を実現するために必要である。

高温成長 CNT とドーピング技術により CNT ビアの低抵抗化を達成するなど、順調である。

- [3] バックエンドデバイス

$\text{Sn}_{10}\text{Te}_{90}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子材料で  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  の  $1/1500$  の消費電力を実現するなど、順調である。さらに、トポロジカル絶縁体の基礎研究とデバイス応用ではスピントロニクスへの展開も視野に入ってきている。

以上のように、3つのサブテーマは、必要な構成部分からなり必要であり、研究も有効である。

ただし、産業への展開が不明瞭である。成果の社会還元の見通しにみられるように、[1]と[2]のサブテーマにおいて商品実用化可否判断が平成 28 年で、製品化目標が平成 32 年というように、プロジェクトの終了との間に少し距離があるように思われる。（「平成 30 年までに低電圧動作積層 CMOS 集積化技術の開発、平成 32 年までに商品化」、「ナノカーボン応用で線幅 10nm 以下の LSI 配線適用について平成 28 年までに実証、32 年までに商品化」など）

○ [1] 低電圧動作 CMOS

進捗に関しては順調と判断。所期の目標達成に関しては、達成に期待したい。

理由) pMOS と nMOS の個別性能の目標が達成されている。さらに、貼り合わせによりインテグレートされた CMOS としての動作の確認がなされている。

[2] ナノカーボン材料開発と応用

進捗に関しては順調と判断。所期の目標達成に関しては、達成に期待したい。

理由) 残課題である、グラフェンの横配線とビアのコンタクト抵抗の低抵抗化や MOS チャンネルへの応用する為の定電圧化についての具体的な対策が描ききれていることに目標達成を期待したい。

[3] バックエンドデバイス

進捗に関しては順調と判断。所期の目標達成に関しては、達成見込みと判断。

理由) 超格子材料については既に 24 年度には目標を達成しており、さらに想定外の室温巨大磁気抵抗効果などの発見も有り、サブテーマ 3 としては目標達成が見込まれる。

○ 各サブテーマの報告では、ポジティブな成果は感じられない。可能性が示されたとか、○○を凶るとかが多い。報告書を読む限りでは、大きな成果は得られていないのではないか。多額の研究費をつぎ込んでいる割には成果が見えない。

○ 所期目標の達成度の順で、③バックエンドデバイス、②ナノカーボン材料開発、①低電圧動作 CMOS であり、順調に進んでいると思われる。課題としては、これら 3 つのサブテーマにおいて開発した技術を統合化して、次世代シリコン ULSI の試作に展開するかまたは、資金的に難しいならば、その道筋を構築することが必要であると判断する。

○ 本研究プロジェクトは 3 つサブテーマから成っているが、それぞれが目標達成へ向けて順調に進捗していると考ええる。しかし、この分野は世界的に競争の激しい分野で大型プロジェクトもいくつか走っていることから、今後とも他と差別化できるような成果を生み出していくことを期待する。

[1] 低電圧動作 CMOS

Ge-MOS、InGaAs-MOS、Si-TET をターゲットとして高い目標値を設定し、顕著な成果も得られている。しかし、世界の半導体デバイス研究者も同様な研究を行っており、競争が激化している。この分野で世界をリードするためには所期目標値の達成が必須となる。達成の可能性は十分高いと思われる。

[2] ナノカーボン材料開発と応用

ナノカーボン材料を用いた配線や排熱は将来の高性能 LSI 実現のための重要技術として期待される。そのため、世界的に研究開発競争も激化しているので、所期目標値を達成し、世界をリードする成果を挙げて頂きたい。その可能性は十分高いと考ええる。

[3] バックエンドデバイス

所期の目標を超えた想定外の成果が得られており大変興味深い。差別化技術として新しい不揮発性メモリの実現へと結び付けて頂きたい。このような不揮発性メモリ

を使った低電力回路なども考えられるかと思えます。

以上のサブテーマに関して、それぞれ顕著な成果が得られており、プロジェクト終了時には所期の目標は十分達成可能と考えるが、成果の位置づけが必ずしも明確ではないので、それぞれの技術の住み分けが明確になるようなロードマップを作成して頂ければと思います。たとえば、トランジスタに関しては、Ge-MOS、InGaAs-MOS、Si-TET、CNT/グラフェントランジスタと、何種類ものトランジスタが検討されていますが、一つの LSI に全てのトランジスタが搭載されるわけではないと思います。回路技術との関連も含めてこの点を明確にして頂ければと思います。

#### ○ [1] 低電圧動作 CMOS

消費電力を 1/10 にするという目標に対して、動作電圧を 0.4V とすることで目標達成を目指す。そのため立体チャネル構造を採用した。ひずみ Ge の trigate チャネル pMOSFET を試作し、Si よりも十分大きな移動度は得られているが SS 値が不十分であり、Si-core/Ge-shell 型のひずみ Ge デバイスを作製し、目標達成を目指す。nMOSFET に関しては InGaAs-on-Insulator をもとに trigate 型 nMOSFET を作製している。良好な SS 値は得られているが、デバイスの実現にまでは至っていない。今後、これらの要素技術のインテグレーションにより目標達成を目指すとしており、結果に期待したい。一方、TFET においては SS 値が 27mV/dec の急しゅん TFET を実現している。CMOS 研究は集積化してこそ価値があるものであり、デバイスメーカーとの共同研究が大変重要と思われる。すでに連携を開始しているが、量産プロセスに適応可能なデバイスプロセスを開発してほしい。

#### [2] ナノカーボン材料開発と応用

CNT 縦配線においては、別基板において高温で作成した CNT を配線用のプラグ、ビア用の穴に転写、挿入する技術を開発し、IEDM でも採択された。グラフェンについてはエピタキシャル触媒を用いた高品質多層グラフェン合成に成功している。新たな応用として LSI の低電力化を図った排熱応用を検討している。CNT の高い熱伝導特性 (260W/mK) を利用して従来構造に比べ熱抵抗が 5.8% 低減することを実証している。しかしながら、排熱応用では配線抵抗の低さがどれだけシステム性能に影響するのか、システム的な試算が重要であると思われる。システム側との連携によりシーズアウト的な目標設定にならないことを望む。

#### [3] バックエンドデバイス

SnTe/SbTe 超格子材料を用いた相変化メモリの開発を進め、 $T_c$ 150°C、消費電力は従来の 1/1000 であることを試算し、従来の実績より大幅に性能向上する不揮発メモリの可能性を示した。しかしながら、メモリは大容量化が最終的な価値を決める。その観点からの性能評価を行うことが重要であり、今後の進展に期待したい。

それぞれのサブテーマは目標に対し、かなり充実した結果を得られている。しかしながら、CMOS、LSI、不揮発メモリなどは集積して初めてその価値を実証できるものであり、本プログラムの期間内の集積化し、歩留まりや信頼性などの評価を行うことは難しいと考える。これらの成果の今後の展開を検討する必要がある。

#### ○ [1] 低電圧動作 CMOS

下記理由により研究は順調に推移していると判断する。

・ 0.3V 目標 CMOS :

Ge-pMOS でピーク移動度が Si の 10 倍、InGaAs-nMOS で Si の 6.2 倍を達成するなどの成果を見出し、目標値領域に近づいてきている。目標値を達成するための方向性も明確にされており、プロジェクト終了までに所期の目標は達成されると判断する。

#### [2] ナノカーボン材料開発と応用

下記理由により研究は順調に推移していると判断する。

多層グラフェン横配線で低効率  $4.1 \mu \Omega \text{cm}$  の達成という他機関を凌駕する成果を見出し、研究開発は順調に推移していると判断する。今後の課題と解決への道筋も明確にされており、プロジェクト終了までに所期の目標は達成されると判断する。

#### [3] バックエンドデバイス

下記理由により研究は順調に推移していると判断する。

SnTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 新超格子材料で従来比 1/1500 の消費電力を実証するなど既に目標を達成する成果を見出している。さらに GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> で巨大磁気抵抗の発見とその応用の超低電力不揮発多値メモリの可能性を見出すので想定外の成果も見出している。

### 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)

- 研究実施・推進体制については、特に問題はない。中間評価で指摘されたことが考慮され、出口イメージの明確化のための施策がなされた。

若手研究者の育成に関しては、国内外国際会議発表、科学技術論文投稿、特許などについて、積極的な取り組みがなされている。

成果の社会還元については、全体のテーマ並びに3つのサブテーマについて社会還元の目標が定められている。ただし、FIRST プログラム終了後から商品化までの時期に開きがあるように思われる。

- 研究実施・推進体制については、特に問題ない。想定外な結果が出た時も柔軟に対応して、研究開発が継続出来るようにしている。

成果の社会還元については、テーマが非常に基礎的なところが多い。そのためこのプロジェクトの成果を実用化する為の新たなプロジェクトが必要。

- 研究実施・推進体制については、中間評価後、各サブグループ①低電圧動作 CMOS、②ナノカーボン材料開発、③バックエンドデバイス間の密接な連携や研究成果へのシナジー効果をはかるような体制・仕組みに変更しつつあることから、問題ないと思われる。文部科学省等が進める共用設備事業の研究支援を受けている場合は、その事実を謝辞等、報告すべきと判断する。

研究支援体制については、中心研究者を長とする研究センター（GNC）を設立し、研究支援組織として、つくばイノベーションアリーナ推進部を新設するとともに、産総研支援体制の一元化を図り、特許事務を含む種々事務後方支援体制を整えており、評

価できる。

成果の社会還元については、産総研および TIA ナノにおいて、実用化へ向けた新しいプロジェクトを立ち上げる計画、および各サブテーマの成果を参画企業が持ち帰り自社製品に適用することを提案しているが、項目 1 および 2 に記述したように、3つのサブテーマを統合してシリコン ULSI 技術としての方向性を提示した上での道筋を構築することが必要と判断する。

- 研究実施・推進体制については、本研究分野では世界的に大規模な研究プロジェクトがいくつか発足しているため、これらのプロジェクトとの競争に打ち勝って将来の LSI 実現のためのデバイス技術を生み出すためには、産官学一体となった研究実施・推進体制が必須である。本研究プロジェクトではその点を十分に意識した体制が構築されていると評価する。

研究支援体制については、産総研を中心とした研究支援体制が構築されている点は評価できる。しかし、世界との競争に打ち勝つためには、装置導入の迅速化や予算の裏付け等で課題も残されている。

若手研究者の育成については、産総研、筑波大学と連携した若手研究者の育成活動は評価できる。しかし、日本における本研究プロジェクトの重要性と役割を考えると、全国レベルの若手研究者の育成活動を展開して頂きたかった。

成果の社会還元については、成果の実用化を目指して関連企業と協力体制を構築しながら、プロジェクト終了後に、他のプロジェクトの成果をも統合したグローバルなプラットフォームづくりを考えている点は高く評価できる。

- 研究実施・推進体制については、TIA 及び産総研への集中研方式で研究リソースを集中させたことで、新しい材料からの挑戦に対して多くの成果が得られたと理解している。最先端の CMOS-LSI の開発は莫大な投資が必要であり、本プログラムの集中投資でも一桁小さいと思われる。その点では複数のサブテーマをインテグレーションにまで完成度を高めることは無理があったかと思われる。ただ、個別にみると大変良い成果が得られており、成果の今後の活かし方が問われると思われる。

研究支援体制については、産総研の支援体制は、要素技術開発に対しては十分に機能を果たしている。しかしながら、インテグレーション実証などはグローバル競争にさらされており、スピード感が最も重要である。独法であるが故の仕組みの限界は理解するが、グローバル競争の時代に、世界の拠点と比してフレキシビリティがやや欠けることは残念である。

成果の社会還元については、本プログラムの成果は実際に LSI にインテグして初めて還元されたと言える。しかもその結果がグローバルに見たときの競争力があるか否かが重要である。スピード感をもって実証するためには、国内だけでの集積化実証にこだわらず、グローバルでの成果実証を考えてもいいのではないか。LSI はいろいろな産業の基盤であり、本成果のグローバル実証の結果が基盤となって国内の他の産業の競争力が高められることも社会還元のひとつではないか。