

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

＜研究課題からの報告＞

1. 研究課題の目的及び意義

シリコンカーバイド（SiC：炭化ケイ素）は、シリコン（Si）に比べ、絶縁破壊電界強度や熱伝導度が高いといった物性を有し、現行の Si デバイスでは扱えない、1 万ボルト以上に対応可能な超高耐圧・高性能パワーデバイスを実現できる可能性を秘めている。超高耐圧 SiC パワーデバイスの実現により、50Hz/60Hz 周波数変換所や高圧直流送電の高効率化と変換設備の小型化、太陽光発電や風力発電と既存電力システムとの効率的連携や柱上変圧器の固体化による小型化・高機能化等につながり、エネルギーの有効活用や環境負荷低減の観点から、大きく貢献できると期待されている。

このため、このような超高耐圧・高性能 SiC パワーデバイスの実現は、SiC 半導体の材料、デバイス両面で究極の課題であり、本研究課題では、最先端技術の確立とそれを支える知の体系化を目的として研究開発を実施した。

具体的な研究目標として、以下の項目を掲げ研究開発を推進した。

- ① 耐圧 13kV-オン電流 20A（13kV-20A）級の SiC PiN ダイオード（P 層/高抵抗層/N 層構造のダイオード）の実現
- ② 耐圧 13kV-オン電流 20A（13kV-20A）級の SiC IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor：絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）の実現
- ③ SiC PiN ダイオードと SiC IGBT を用いた 250°Cにおける 5kV-20A のスイッチング動作の実証
- ④ 高品質・厚膜・多層 SiC エピウエハ技術の確立
- ⑤ 材料及びデバイス技術を支える基盤的学理研究の深化

2. 研究成果の概要

① 13kV-20A 級 SiC PiN ダイオードの実現

高品質・厚膜の SiC エピウエハを用い、超高電圧に耐える電界集中緩和構造と表面保護膜などを採用することによって、目標の 13kV-20A 級を凌駕する耐圧 15.5kV、オン電流 30A（15.5kV-30A）級の PiN ダイオードを実現した。3 インチウエハで 6-8mm 角のダイオードを作製した場合、耐圧 10kV 以上を示す歩留まりは、90%以上と高い値を得た。

② 13kV-20A 級 SiC IGBT の実現

n チャンネル IGBT と p チャンネル IGBT の両方をシミュレーション及び実験で比較検討し、n チャンネル IGBT の方が優れることを見出した。高品質・厚膜・多層 SiC エピウエハを用い、酸化膜/SiC の界面制御、微細加工、高精度シミュレーション技術などを集約することにより、超高耐圧 SiC IGBT を作製した。特に、独自の低抵抗 p 型コレクタの作製、フリッププロセスによるチャンネル移動度の高い (000-1) 面の採用、イオン注入とエピタキシャル成長を組み合わせた独自チャンネル構造の採用などにより、目標である 13kV-20A 級を大きく上回る、世界最高性能の耐圧 16kV、オン電流 60A 級の IGBT (8mm 角チップ) を実現した (図 1)。

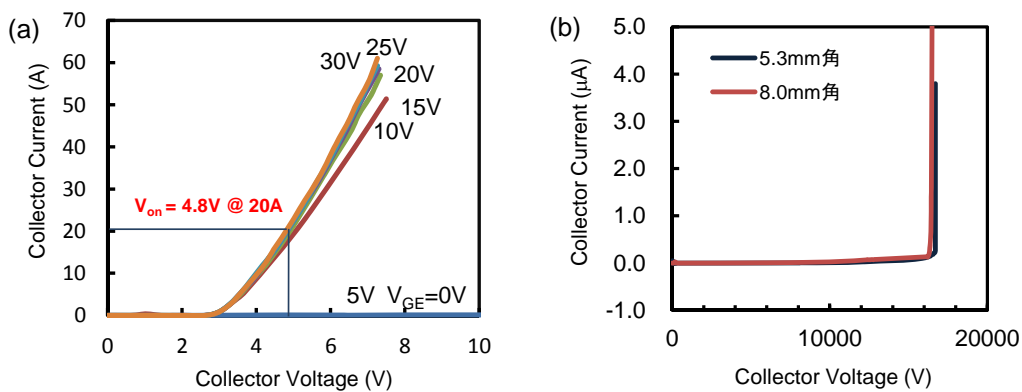


図 1. 作製した SiC n チャンネル IE-IGBT (a) オン特性、(b) 耐圧特性

③ SiC PiN ダイオードと SiC IGBT を用いた 250°C における 5kV-20A のスイッチング動作の実証

開発した SiC IGBT と PiN ダイオードを用いて特性を評価し、250°C の高温で当初目標を大きく上回る 12kV-20A、6.5kV-60A (1 素子) や 10kV-100A (4 素子並列、200°C) の高速 (約 1μs) スwitching 動作を実証した (図 2)。本結果を用いて大容量インバータの電力損失を試算し、Si デバイスに比べて損失を顕著に低減できることも示した。

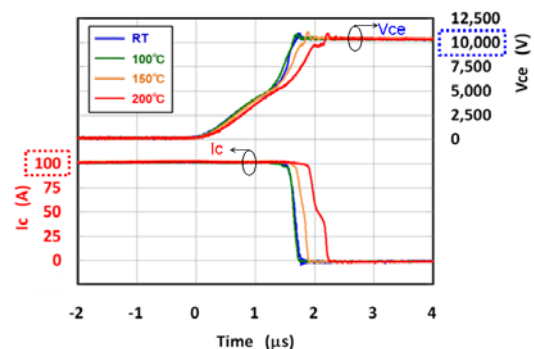


図 2. SiC IGBT を用いた 200°C での 10kV-100A スwitching 動作の実証

④ 高品質・厚膜・多層 SiC エピウエハ技術の確立

独自の結晶成長装置を改良することで、従来の約 10 倍の厚さ (100-150μm) と 10 倍の純度 (10^{14}cm^{-3}) を有する均一な SiC エピウエハ (3 インチ) の作製に

成功するとともに、高濃度 Al ドーピングによって、従来に比べ約二桁低い超低抵抗 ($0.013\Omega\text{cm}$) p 型 SiC 厚膜結晶を得ることに成功した。SiC エピウェハ内の拡張欠陥を非破壊・高速に検出する手法を確立するとともに、低オフ角基板上的成長条件を改善することで、SiC バイポーラデバイスの信頼性に悪影響を与える基底面転位密度を従来の $1/10$ 以下 (0.09cm^{-2}) に低減した。また、独自に開発した炭素原子拡散現象を活用することによって、n 型、p 型 SiC とともに最高のキャリア寿命 ($10\text{-}20\mu\text{s}$ 以上) を達成した (図 3)。

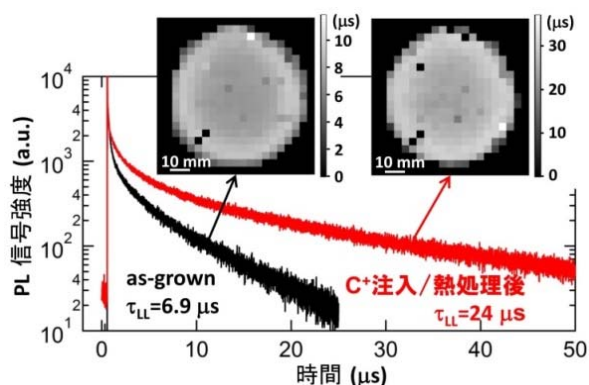


図 3. 炭素原子拡散により最高のキャリア寿命を達成

このキャリア寿命増大の効果が超高耐圧 SiC PiN ダイオードの顕著な特性改善につながることを実証し、SiC バイポーラデバイス作製における根幹となる技術を確認した。

⑤ 材料及びデバイス技術を支える基盤的学理研究の深化

SiC における炭素拡散と炭素空孔消滅現象の解明とモデル化、極めて長いキャリア寿命の達成 ($33\mu\text{s}$ 以上)、低エネルギー電子線照射によるキャリア寿命制御、独自の接合終端構造を用いた極限的な素子耐圧 (27kV) の達成、室温から高温での衝突イオン化係数の精密決定、SiC IGBT 及び PiN ダイオードの回路解析用モデルの開発と当該モデルを用いた電力回路シミュレーションの確立、SiC MOS 界面近傍に存在する欠陥のモデル化、SiC パワーデバイスの特徴を生かせる電力変換回路 (双方向絶縁形 DC/DC コンバータ) の提案、などの成果を得た。

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

現行の Si では実現できない超高耐圧・高性能パワーデバイスを SiC で実現することを目指して、 $13\text{kV}\text{-}20\text{A}$ 級 SiC PiN ダイオードの実現、 $13\text{kV}\text{-}20\text{A}$ 級 SiC IGBT の実現、 250°C における $5\text{kV}\text{-}20\text{A}$ のスイッチング動作の実証を目標に掲げ、高品質・厚膜・多層の SiC エピウェハ技術など、材料及びデバイス技術を支える基盤的学理研究も併せて実施し、多くの顕著な成果が得られたと判断される。

耐圧 15.5kV 、オン電流 30A 級の SiC PiN ダイオードの実現、世界最高性能となる耐圧 16kV 、オン電流 60A 級の SiC IGBT の実現、 250°C での $12\text{kV}\text{-}20\text{A}$ 、 $6.5\text{kV}\text{-}60\text{A}$ 素子の高速 (約 $1\mu\text{s}$) スwitching 動作の実証など、各目標をそれぞれ大きく

上回る成果が得られており高く評価される。

また、研究開発を進める過程で、10kV 以上の超高電圧に耐え得る結晶のあるべき姿を示し、結晶の評価技術とともに、パワー素子としての評価技術までも構築されており、その点も高く評価したい。

2. 研究推進・支援体制の状況

研究推進体制については、京都大学を中心とした基盤研究グループ、電力中央研究所を中心としたエピ成長グループ、独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）を中心としたデバイスグループが有機的に連携したことにより、大きな成果に結びついたと判断される。

研究支援体制については、支援機関である産総研だけでなく京都大学にも支援室を設けて日常業務の支援をし、物理的に離れている関係者間の意思疎通を図るための手段として TV 会議システムの導入を行うなど、適切に機能したと判断される。

知的財産権に関する取組については、中間評価までの出願数はやや少なかったものの、特許動向調査やパテントマップの作成、知財プロデューサーの配置などの改善策が講じられ、出願数の増加に努めた点は評価される。

若手研究者の育成状況については、著名な国際会議での発表機会を設けるなど、十分な取組がなされた。この分野の研究人材を継続的に確保するため、長期展望の下で、今後更なる若手研究者の育成に期待したい。

3. 研究成果の今後の展開

現在、SiC によるパワーデバイスは、1,000V 以下の領域で市場に出始めたばかりであるが、今回の研究成果の中には、現在でも使える要素技術が十分に含まれていると考えられる。さらに、パワーデバイスは今後の産業基盤の一つとも言えるもので、SiC による小型化、低コスト化、低損失化の実現は、社会的に大変大きな意義がある。

SiC パワーエレクトロニクス技術の社会還元を目指す民活型研究開発コンソーシアム TPEC（つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション）が設立され、産業界が協力して量産技術を共同開発し、社会に普及させる事業体制が整いつつある。TPEC の活動の中で、本研究成果の実用化に向けた活動や海外との連携も予定されており、TPEC の効果的な機能は、我が国はもとよりグローバルにも大きなインパクトを与えられようと考えられる。

4. 総合所見

本研究課題は、超高耐圧・高性能 SiC パワーデバイスの実現を目指し、13kV-20A 級の SiC PiN ダイオード及び SiC IGBT の実現、250°Cにおける 5kV-20A のスイッチング動作の実証等を具体的な目標として研究開発を実施した。その結果、15.5kV-30A 級の PiN ダイオード及び世界最高性能の 16kV-60A 級の IGBT を開発し、さらに 250°Cの高温における高速スイッチング動作の実証など、掲げた数値目標を上回る成果が得られており、高く評価できる。また、超高電圧に耐え得る結晶のあるべき姿や、結晶の評価技術まで構築したことも評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

今後の課題は、それぞれの成果を、実際の小型・超高耐圧・高性能パワーデバイス適用に向けていかに迅速・確実に進めていくかである。その点において、TPEC が組織され、産業界からの大きな支援の下、実用化に向けた歩みの着実性は期待されるが、信頼性、歩留まりの向上など、実用化に向けた解決すべき課題も多いと考えられる。早期サンプルの提供など、産業界との継続的な連携を図りながら、研究開発を一層加速していくことを期待する。

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	慶應義塾大学

<研究課題からの報告>

1. 研究課題の目的及び意義

平成 32 (2020) 年の東京オリンピックに向け、スーパーハイビジョン (4K/8K) の時代が到来し、家庭内でもテレビ、PC、タブレットを始め多くの家電製品は、従来の電線、無線では達成できない毎秒数十ギガビットの高速光通信でつながることが必要不可欠になっている。

中心研究者らは、世界に先駆け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提案し、その基本特許を取得しており、本研究課題では、これらの基本特許を基に、圧倒的なビットレートを有する世界最速の GI 型 POF と、圧倒的な高画質を実現する大画面ディスプレイ用の光学フィルムについて、普及実用化のための研究開発を総合的に進め、これら成果の集大成として、高精細リアルタイム映像と、大画面ディスプレイがもたらす圧倒的な臨場感溢れる「Face-to-Face コミュニケーション産業の創出」につなげることを目的として研究開発を実施した。

具体的な研究目標として、以下を設定し、研究開発を推進した。

- ① 世界最速プラスチック光ファイバーの開発
- 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
- ③ Face-to-Face コミュニケーションシステム開発

2. 研究成果の概要

① 世界最速プラスチック光ファイバーの開発

光ファイバーの伝送速度限界を決める材料分散が、ガラスに比べ、はるかに小さいというプラスチック材料の特性に着目し、GI 型 POF の特性を最大限に引き出すための材料設計、屈折率分布制御技術、溶融押出技術に基づく格段に低コストな大量生産プロセスを確立し、結果的に、既存のガラス製マルチモード光ファイバー (MMF) をも上回る、100 メートルで毎秒 40 ギガビットの世界最速の伝送速度を実現し、サンプル出荷、上市までに至った。

また、本技術を利用して、スーパーハイビジョンの 8K 映像非圧縮伝送を可能とする超高速 12 芯 GI 型 POF ケーブルを新たに提案、開発した（図 1）。本ケーブルでは、毎秒 120 ギガビットまでの超高速データ伝送が可能であり、実際に 4K/8K 映像の伝送に成功した。さらに、GI 型 POF が持つ、材料の柔軟性、簡単接続性というガラス製光ファイバーにはない価値を最大限に生かすため、ボールペンから生まれた技術で、光学レンズを GI 型 POF の端面につける、という全く新しい概念による「ボールペン型インターコネクタ」を開発した。



図 1. 8K 非圧縮伝送に必要な従来のメタルケーブル（左）と超高速 12 芯 GI 型 POF ケーブル

4K/8K 映像の放送計画が具体化する中、非圧縮伝送のみならず、テレビ放送用の圧縮映像信号を伝送する汎用同軸ケーブルの帯域不足が懸念されており、Radio over Fiber (RoF: 電波信号を光信号に変えて光ファイバーで伝送する技術) による、同軸ケーブルの光化に対する要求が高まっている。従来のガラス製 MMF では雑音が問題となって実現できなかったが、本研究課題では、MMF の雑音がポリマー材料固有のミクロな不均一構造に依存することを見出し、大幅に雑音を低減した新規材料による GI 型 POF の開発に成功した。

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

液晶ディスプレイで問題となっているカラーシフト（色変化）や虹むらを抑えた偏光板用のゼロ複屈折ポリマーフィルムと、超複屈折ポリマーフィルムの開発に成功した。

ゼロ複屈折ポリマーフィルムは、配向複屈折と、光弾性複屈折をいずれも発現しないポリマーを新たに設計し、偏光板に使用したことでカラーシフト・虹むらを抑えている（図 2）。

一方で、超複屈折フィルムは、その発想を逆転し、複屈折を限りなく大きくすることで同様の効果を得ている（図 3）。通常の液晶ディスプレイでは、ディスプレイ前面の偏光板を通過した光は直線偏光であり、偏光サングラスなどを着用すると、角度によっては真っ暗に見えてしまうが、これに超複屈折フィル

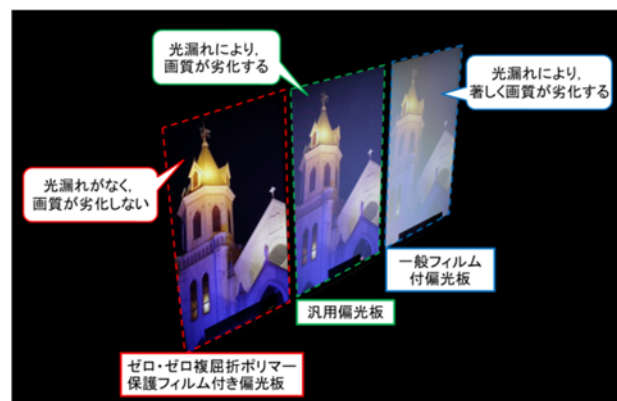


図 2. ゼロ複屈折ポリマーフィルムと従来フィルムの比較

ムをディスプレイ前面に配置することで、本来の像を見ることが可能になる。屋外でスマートフォン、タブレットなどを扱う機会が増えている中で、今後このような機器のディスプレイに必須なフィルムになると期待される。

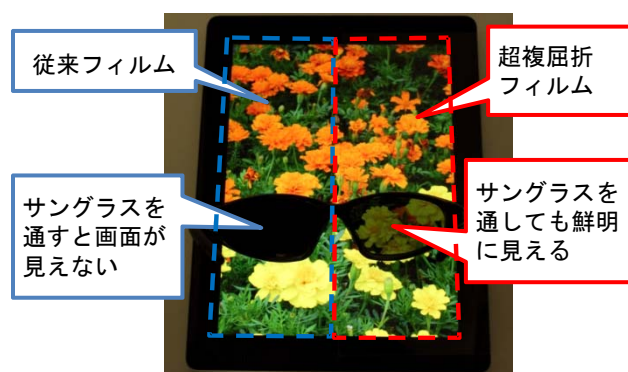


図3. 超複屈折フィルムによる虹むら解消・視認性改善

③ Face-to-Face コミュニケーションシステム開発

世界最速 GI 型 POF と、高精細・

大画面ディスプレイを組み合わせた Face-to-Face コミュニケーションシステムを、慶應義塾大学医学部腫瘍センター及び同解剖学教室に導入した。高精細映像の高速でリアルタイムな伝送を可能にし、医療や医学教育の現場で圧倒的に高い評価を得ている。また、本研究課題のコンセプトである「光の毛細管構想」を具現化する「ギガハウス」を、慶應義塾大学理工学部新棟内に完成させ、GI 型 POF を利用したハイビジョンを超える、世界でも類を見ない高画質で遅延のない「高精細大画面映像高速光伝送システム」によって、先進的な授業や研究を展開することができた。

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

中心研究者の優れたトップダウンマネジメントにより、GI 型 POF の開発では、100メートルで毎秒 40 ギガビットの世界最速の伝送速度の実現、コンシューマー用インターフェースを考慮した新たな超高速 12 芯 GI 型 POF ケーブル（最大伝送速度 120Gb/s）の開発とそれを使用した 4K/8K 映像の伝送の成功、RoF 伝送が可能な新規 GI 型 POF の開発が行われ、フォトニクスポリマーの開発では、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、ゼロ複屈折ポリマーと光散乱導光ポリマーの組み合わせによる高画質ディスプレイの作製の成功、さらに、Face-to-Face コミュニケーションシステムの開発では、「高精細大画面映像高速光伝送システム」の大学内での試行実験の成功など、多くの研究成果を上げている。

ただし、実用化に近い成果が多く、共同開発する企業との機密事項に触れるためか、研究成果が何によって可能となったのか（例えば、GI 型 POF では世界最速の伝送速度を実現した要因が、材料なのか、加工条件なのか、構造なのか）について鍵となる技術の特徴や材料の詳細が明示されず、信頼性を含め市場への広がりが予測しにくい、といった点が見られた。

2. 研究推進・支援体制の状況

研究推進体制については、中心研究者のトップダウンマネジメントの下、参加した組織の役割分担も明確化され、サブテーマ 1~3 が相乗的に機能する仕組みが構築されている。

研究支援体制については、慶應義塾大学フォトニクス・リサーチ・インスティテュート（KPRI）が設置され、その中に専任の研究支援チームが組織され、中心研究者がより研究開発に専念できる支援体制が取られた。また、KPRI 内にプロジェクト推進のための評議会が設置され、中心研究者の研究開発活動を大学として支援する体制が生まれ、十分な研究支援が行われたと判断される。

知的財産権に関する取組については、もともと中心研究者の特許を基に始められた研究課題でもあり、大学の十分な支援体制の下、特許出願や権利化の取組がなされている。今後は、材料の特質を踏まえた作製方法や機能応用などでの基本特許を掘り起こしていただきたい。

3. 研究成果の今後の展開

本研究課題は、中心研究者の持つ発明、特許のオリジナル技術を基盤として、参画企業群との間で委託契約によって開発研究を進める実施体制が当初より構築していたため、実用化・市場投入への道筋は計画しやすいと思われた。委託企業 13 社側との機密事項に触れるためか、その戦略がはっきりと見えない点が懸念されるが、社会還元に向けた方策は立てられていると判断される。

一方、開発された技術・成果は、コミュニケーションの根幹をなす重要な領域であるが、競合技術も多いことから、その社会的インパクトに関しては、社会実装の状況を見なければ判断できない面もある。

今後は、フォトニクスポリマーが持つ固有の特質や、ポリマーならではの屈折率分布型の作製方法などにおいて、他材料と差別化が期待できる技術・特徴を明確にし、特許化や産業化へ取り組むことが必要である。その上で、市場のニーズや、ポリマーの優位性を見極め、企業との連携の下で、用途にあった研究開発を進めることが重要と考えられる。

4. 総合所見

本研究課題は、フォトニクスポリマーのコア技術を駆使した世界最速の光ファイバーや高画質ディスプレイの開発等を目的として研究開発を実施した。その結果、世界最速の GI 型 POF ケーブルの開発に成功するとともに、ゼロ複屈折ポリマー

と光散乱導光ポリマーを組み合わせた色変化・虹むらを解消した高画質ディスプレイの作製や「高精細大画面映像高速光伝送システム」の大学内での試行実験に成功したことなどは高く評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

今後は、フォトニクスポリマーが、他材料と差別化できる技術・特徴を明確にし、特許化や産業化への取組を進めるとともに、市場のニーズやポリマーの優位性を見極め、企業との連携の下、用途にあった研究開発を進めていくことを期待する。

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

<研究課題からの報告>

1. 研究課題の目的及び意義

低炭素社会の実現には、再生可能エネルギーの導入拡大が不可欠である。中でも、太陽光発電は、二酸化炭素をほとんど排出せず、資源も枯渇しない再生可能エネルギーとして期待が高まっている。現在の太陽光発電に使用される太陽電池は結晶シリコン型が主流であるが、シリコンは原料が比較的高く、製造自体にエネルギーが掛かるといった課題もある。

このため、本研究課題では、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ことを目的として研究開発を実施した。

研究課題全体としては、有機系太陽電池の変換効率と耐久性の向上、国際標準化活動の推進を目的として、「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」、「計測法・標準化」という4つのサブテーマを構成（中間評価後に整理）し、具体的な研究目標として、

- ① 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 12%の変換効率、屋外耐久性 10 年相当以上の達成、
- ② 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 年相当以上の達成、
- ③ 有機無機ハイブリッド太陽電池では、革新的な増感色素材料技術や固体型電解質材料、有機半導体材料等を集約し、完全固体型や蓄電機能付きハイブリッド型太陽電池セル・モジュールを世界に先駆け実現すること、
- ④ 有機系太陽電池性能評価法と国際標準化の推進

を設定した。

なお、中間評価において、「改善事項として中心研究者の革新的技術を明確化し、それを実現するための道筋を明らかにして研究資源の重点投入を図る研究計画の見直しを求める」との指摘を受け、平成 25 年度から研究実施体制を変更し、色素増感太陽電池及び有機薄膜太陽電池のそれぞれの実用化に向けた性能向上だけでなく、広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池の実現に向けた技術・材料の集約など、研究リソースの投入・強化を行った。

2. 研究成果の概要

有機系太陽電池の実用化加速に向けて、色素増感太陽電池及び有機薄膜太陽電池について世界トップクラスの実績を持つ研究者をオールジャパンで結集し研究を進めた結果、個々のサブテーマにおいて、以下の結果を得た。

① 高効率・高耐久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

小面積セルで 15%の変換効率を実現するための要素技術を開発することを目的として研究開発を実施した結果、従来の光化学の常識を覆す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が可能な新規色素 DX (図 1) を開発し、1,050nm に達する長波長光電変換に成功。これを用いた分光タンデムセル (図 2) で変換効率 15% (低照度 1/3sun) を達成した。また、高耐久化を可能とする擬固体電解質を開発し、セル変換効率 11.5%を達成した。さらに、色素増感太陽電池の 10cm 角モジュールの加速試験で連続光照射 15,000 時間 (屋外設置 15 年相当) 効率低下率 20%以内の耐久性を確認し、現在もデータを更新しつつある (世界最高記録)。また、一層の低コスト化を目指し、コストの高い透明電極膜を使わないセルで、透明電極膜を使った場合とほぼ同等の変換効率を得られるセルの開発に成功した。

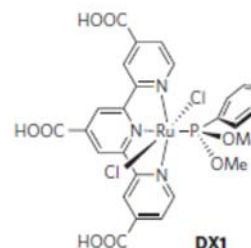


図 1. 開発した新規色素「DX1」の構造

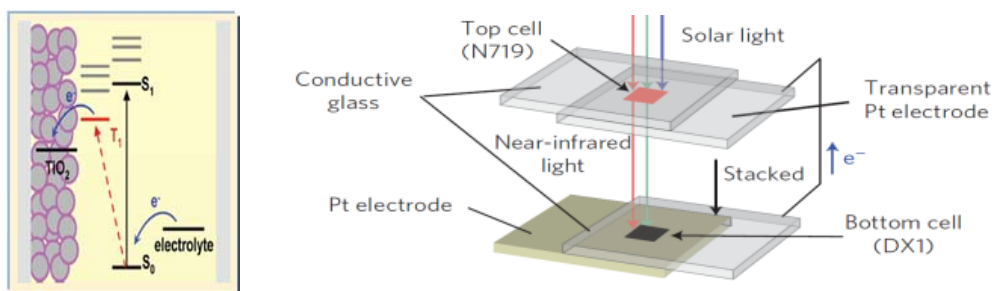


図 2. 広帯域色素増感太陽電池 (タンデム型) の原理

また、色素増感太陽電池の内部に蓄電機能を組み込み、発電した電力を太陽電池内に蓄えられる新しい発想の太陽電池デザインパネル「アナベル」を開発・試作した (図 3)。太陽光が当たらなくても安定して電力を取り出せるといった特長を持ち、いろいろな用途への応用が期待されている。



図 3. 蓄電機能内蔵太陽電池デザインパネル「アナベル」

② 高効率・高耐久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

有機薄膜型は、高効率化と高耐久化設計指針を確立し実用化につなげ、小面積セルで 12%の変換効率の実現を目指して研究開発を実施した結果、新規ドナー材料を開発し、セル変換効率 10.6%を達成した。また、有機薄膜太陽電池モジュールで、屋外設置 10 年相当の加速試験条件下で、性能保持率 80%以上を確認し、現在もデータを更新しつつある（世界最高記録）。

③ 広帯域波長可変ハイブリッド太陽電池の開発

色素増感型（高効率）と有機薄膜型（全固体）の長所を合わせ持つ有機無機ハイブリッド型では、変換効率の目標値は定めずに、中心研究者が有する革新的な増感色素材料技術や固体型電解質材料、有機薄膜太陽電池グループが開発する有機半導体材料等を集約し、完全固体型や蓄電機能付きハイブリッド型太陽電池セル・モジュールを世界に先駆け実現することを目標とし、中間評価による見直し以降、かなりの研究リソースを投入し強化を図った。その結果、研究課題全体のセル変換効率の目標を大幅に上回る 17.3%の変換効率を達成した（世界最高記録）。また、スピン反転光励起を用いた色素増感太陽電池とペロブスカイト太陽電池をタンデム化した結果、17.7%の変換効率を達成した（事後評価ヒアリング時点では 18.9%を達成）。

④ 性能評価のための計測法の開発と標準化活動の推進

色素増感太陽電池の性能評価法、色素増感太陽電池・有機薄膜太陽電池の耐久性評価法を開発した。また、色素増感太陽電池の性能評価法の標準案を作成し、国際ワークショップを開催した。

<評価小委員会による所見>

1. 研究目標の達成状況

有機系太陽電池の実用化加速のため、色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、ハイブリッド型太陽電池に対して、数値目標が掲げられ、変換効率向上と耐久性向上、低コスト製造プロセスの実証（試作製造ライン構築）の研究開発が推進された。研究目標としたセル変換効率の目標値 15%はクリアし、最終的に世界トップの 17.3%の変換効率を達成した。また、有機系太陽電池において世界初の分光タンデム構造を導入し、17.7%という変換効率も達成した。これらの数値の達成には、中心研究者らが見出した新原理（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、広帯域光電変換に成功してタンデム型などにおいて成果を蓄積したことや、有機薄膜太陽電池や研究分担者等が開発したペロブスカイト太陽電池開発と並んで、タンデム化を進めたことの貢献が大きく、評価される。

一方で、数多くの企業と共同で進めた成果として数値目標が達成されているが、FIRST の目的を考慮すると、中心研究者のアイデアがどのように関わっているのか、いま一步明確にする必要がある。例えば、最近注目されるペロブスカイト型太陽電池について、どのような関連性があるか分かりにくく、こうした点の明確化が必要である。

2. 研究推進・支援体制の状況

中間評価における指摘を踏まえ、サブテーマの統合（14→4）といった研究推進体制の見直しが行われた結果、ハイブリッド型太陽電池に研究資源が集中的に投入され、一定の成果につながったと評価できる。

知的財産権に関する取組については、中間評価における「アカデミアによる革新的技術の基本特許についての取組は不足しており、一層の努力と工夫を期待する」との指摘を受け、最終的には、アカデミア側で計7件の出願が行われた。全体としては多数の特許出願が行われているものの、企業からの出願に偏り、中心研究者が所属する大学からの特許出願数が少なく、研究支援担当機関がサポートして策定した知的財産戦略が十分であったかが、やや見えにくい。ただし、近赤外吸収色素の特許や、室内用途用の高効率色素増感太陽電池の材料特許など、大学で開発した一部の特許は企業に実施許諾されており、短期間で実用化につながった点は評価できる。

3. 研究成果の今後の展開

本研究課題は、平成23年に本研究課題のコアメンバーと関連企業とともに立ち上げた有機系太陽電池技術研究組合（RATO）に技術移転し、実用化を目指すこととしている。また、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトにより、実用化を更に加速することとしている。

太陽電池の開発では、有機はもとよりこれ以外にも有力な候補が多数存在しているが、例えば、シリコン系太陽電池との各種ベンチマーク比較（安定性、耐久性、デバイス寿命などの優位性）や評価技術の構築に係る取組が現時点では十分とは言えない。シリコン系が抱える課題を解決するか、あるいは有機系のユニークな特長を生かした全く別の大きな市場が広がる可能性を示すなど、進められたプロジェクトの真の優位性を明らかにするとともに、将来のターゲットとなる適用分野・製品や市場見込みを明確化し、実用化に向けて戦略的に進めていくことが期待される。

さらに、実用化に向けては、より基本的なハイブリッドにおける無機／有機界面でのキャリアの寿命の評価技術や、特徴である大きいVoc（開放電圧）の原因解明など、メカニズムの更なる解明を行う必要がある。

4. 総合所見

本研究課題は、低炭素社会に資する有機系太陽電池を産学官のオールジャパン体制で開発することを目的として研究開発を実施した。その結果、有機系太陽電池で初めて分光タンデム構造を導入し、最終的に変換効率 17.7%を達成したことなどは高く評価される。

以上のことから、本研究課題は目標を達成しており、世界をリードする世界トップ水準の研究成果が得られたと判断される。

一方、開発した有機系太陽電池のシリコン系太陽電池に対する優位性が示されていない現状においては、低コスト再生エネルギー技術が求められている社会に対して大きなインパクトを与えるか、という観点においては、今一歩足りない面がある。

得られた成果の優位性を明確にしつつ、将来のターゲットとなる適用分野・製品や市場見込み等、実用化に向けて戦略的に活動展開していくことを期待する。