

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年1月20日

評価委員：（敬称略、五十音順）

中島 章 東京工業大学 物質理工学院 材料系 教授

宮山 勝 東京大学 大学院工学系研究科 応用化学専攻 教授

山口真史 豊田工業大学 スマートエネルギー技術研究センター シニア研究スカラ

確定年月日：平成29年4月7日

プロジェクト名	次世代太陽電池の研究開発
研究責任者の所属・役職・氏名	エネルギー・環境材料研究拠点 太陽光発電材料グループ・上席研究員・韓礼元
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>本プロジェクトは4つのサブテーマから構成されている。いずれのサブテーマも、革新的なナノ構造材料技術および最先端のナノテクノロジー等を駆使することによって、太陽電池の高効率化に資する基礎研究である。</p> <p>サブテーマ1「色素増感太陽電池の研究」では、ナノ計測と数学的モデルで得られた計測・シミュレーション結果を踏まえ、分子レベルの光電変換メカニズムの解明を進めるとともに、材料とデバイスの開発を行う。さらに、色素増感太陽電池から派生されたペロブスカイト太陽電池の研究を行った。サブテーマ2「有機薄膜太陽電池の研究」では、発電メカニズムを解明することにより、高効率化に向けたアプローチを明確化し、フレキシブルで効率の高い有機薄膜太陽電池の材料開発を行う。サブテーマ3「量子ドット太陽電池の研究」においては、量子ドットの離散準位を介する多段光吸収を利用した光電変換効率40%以上の超高効率太陽電池の実現を目指す。サブテーマ4「界面光励起電子移動反応の基礎物性研究」では、ナノ界面における光励起プロセス・電子移動プロセスのメカニズムについて、過渡吸収高速分光法および新規第一原理計算手法を用いて理論的に解明を進め、高効率化のためのデバイスと材料の設計指針を見出すことにより、上記太陽電池の高性能化に貢献する。</p> <p>「次世代太陽電池の高効率化」を達成することは、太陽電池産業の自立化を促し、持続可能な低炭素社会の実現に貢献する。またその過程において、発電メカニズムの解明が必須であるとともに、分子の配列・組織化構造などのナノ構造と光電変換特性との相関の解明は、学術的にも非常に価値が高い。</p>
研究内容	<p>本プロジェクトの具体的な研究内容は次の通りである。サブテーマ1では、ナノ界面での電子輸送メカニズムの解明と制御手段の開発、解明したメカニズムに基づく新規材料の開発とハイブリッド型ペロブスカイト太陽電池を含めたデバイス構造の研究を行う。サブテーマ2では、励起子生成、電荷分離、キャリア輸送のメカニズムの解明と、分子化学に立脚したp型、n型有機半導体材料の開発、ナノレベルでの構造制御の研究を行う。サブテーマ3においては、中間バンド型量子ドット太陽電池の物理解明と高効率化のための材料・構造の開発を行う。サブテーマ4では、固液界面における電子移動・励起状態計算のための新規第一原理計算手法の開発・確立と界面計測を行う。</p>
ミッションステートメント (具体的な達成目標)	<p>本プロジェクトの達成目標は次のようになる。サブテーマ1では、メカニズムの解明による材料とデバイス開発を行い、変換効率15%の可能性を見極める。サブテーマ2では、高光捕集能・高キャリア移動度を兼ね備えた新材料開発による変換効率15%へのアプローチを明確化する。サブテーマ3では、変換効率40%以上の中間バンド型量子ドット太陽電池の動作原理の検証と高効率化の見通しをつける。サブテーマ4では、界面光励起電子移動過程について、過渡吸収高速分光法による解析およびシミュレーションを行う。さらにシミュレーション結果を計測結果または電池性能と対比しながら検討することで、新材料とデバイス構造の設計指針を得る。</p>

<p>平成23年度～平成27年度までの主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</p>	<p>1) 主な研究成果(アウトプット) :</p> <p>本プロジェクトでは、色素増感太陽電池を中心に、有機薄膜太陽電池および量子ドット太陽電池について研究を行ってきた。これまでに色素増感太陽電池の研究では、メカニズムの解明による材料とデバイスの開発により、エネルギー変換効率の記録更新を2回達成した。有機薄膜太陽電池では、メカニズムと材料の研究を着実に進めてきた。量子ドット太陽電池では、基礎的な研究に成果を出してきた。また中間評価のコメントに基づき、プロジェクトの後半からペロブスカイト太陽電池の研究をスタートした。ペロブスカイトのモフォロジーの制御、新規無機電子輸送材料とホール輸送材料および新規デバイス構造の開発により、世界最高変換効率を2度達成し、それらの成果をまとめた論文が最高レベルの科学誌 Science、Nature Energy 誌に掲載された。次世代太陽電池の研究における NIMS の研究レベルの高さを世界に示すことができた。また、論文は 229 報が掲載されるとともに、特許は 20 件の出願となった。これらの成果は定年制研究員 8 名という少人数の集団で達成したものである。</p> <p>2) 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト) :</p> <p>1) 色素増感太陽電池の変換効率の世界記録を2回更新し NIMS のプレゼンスを示すとともに、変換効率15%へのアプローチを明確にした。またメカニズムを科学的に解明するとともに、今後の研究指針を提供した。</p> <p>2) 量子ドット太陽電池の基礎的で本質的な研究成果は、実デバイスにおける今後の研究の方向指針を提供した。</p> <p>3) ペロブスカイト太陽電池では、新規セル構造と新材料を社会に広めるとともに、1cm²セルで世界最高変換効率 18.2%の達成、実用化の目安とされる光連続照射に対する信頼性テストをクリアしたのはペロブスカイト太陽電池の実用化に大きな一歩を踏み出した。</p>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い :</p> <p>本プロジェクトでは、変換効率 15%を目指して次世代太陽電池のメカニズムの解明による材料とデバイスの開発を行った。その結果変換効率 18.2%を得、目標を大きく上回った。</p> <p>1) 色素増感太陽電池の変換効率の世界記録を2回更新した。さらに、変換効率 15%へのアプローチを明確にした。</p> <p>2) 有機薄膜太陽電池では高性能のホール輸送材料を多数に開発し、ペロブスカイト太陽電池のドーパントフリーのホール輸送材料の開発につながった。</p> <p>3) 量子ドット太陽電池において基礎的な研究に成果を得た。</p> <p>4) ペロブスカイト太陽電池について、新規セル構造と材料開発により、世界最高変換効率 18.2%を達成するとともに、優れた信頼性を実現した。</p> <p>5) 科学論文に 229 報が掲載されるとともに、特許 20 件が出願された。NIMS の次世代太陽電池研究のレベルの高さをアピールした。</p> <p>自己点検・評価 :</p> <p>本プロジェクトでは、ペロブスカイト太陽電池、色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、量子ドットの4種類の次世代太陽電池について、メカニズムの解明による材料とデバイスの開発を行い、変換効率 15%を目指した。その結果、ペロブスカイトのモフォロジーの制御、新規無機電子とホール輸送材料と新規デバイス構造により、世界最高変換効率 18.2%を達成し、それらの成果をまとめた論文が最高レベルの科学誌 Science と Nature Energy 誌に掲載された。また、論文 229 報が掲載され、特許 20 件が出願された。これらの成果が定年制研究員 8 名という少人数の集団で達成されたことは大いに評価できる。</p>

【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携 (事前・中間評価の結果を受けて、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中間評価のコメントに基づいて、プロジェクト後半にペロブスカイト太陽電池に注力する体制に修正し、短い期間にもかかわらず優れた成果を挙げた。 ・ 中間評価の結果に基づき、有機ペロブスカイトを用いた太陽電池への迅速な方針変更により、優れた成果を挙げている。 ・ ロードマップの変更は適切であり、サブグループ間、特にサブテーマ1（色素増感太陽電池の研究）とサブテーマ2（有機薄膜太陽電池の研究）が効果的に連携することにより、世界に冠たる優れた成果を挙げたことは本プロジェクトにおいて特筆に値する。 ・ 計画・体制の修正とその運営が適切に行われた好例といえる。 ・ 選択と集中を効果的に進めることで高い成果に繋がった好例であり、極めて優れたマネージメントが行われたと考える。 ・ ロードマップは、良く考えられているが、状況の変化に合わせて、変更する必要があろう。 ・ 国内外機関との連携もなされ、評価できる。 ・ そういう意味で、色素や有機薄膜太陽電池のリソースを集中して、ペロブスカイト太陽電池の研究開発にシフトしたのは、妥当と考えられる。 ・ 国際連携もきちんと戦略をもって行われている。 ・ 少人数集団（定年制研究員8名）で、高い被引用件数320を含む229報の論文、特許20件など、世界トップレベルの成果が得られており、高く評価できる。 ・ 外部資金の獲得にも努力している。 ・ 次世代太陽電池の研究開発の重要性は認められる。
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 (目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 当初の目標を超える十分な成果が得られており、学術的価値は極めて高い。 ・ 色素増感太陽電池でターゲットとしていた変換効率15%への開発指針を明確化でき、ペロブスカイト太陽電池では標準面積セルで世界最高の変換効率を確認した。 ・ 色素吸着状態の解析や共増感色素の改良による色素太陽電池の高効率化、ペロブスカイト層のモフォロジー制御や傾斜ヘテロ接合構造の導入によるペロブスカイト太陽電池の高効率化において、いずれも、世界最高効率を2回更新するなど、次世代太陽電池の研究開発で、学術的にも高い成果が得られ、評価できる。 ・ これらから目標を十分達成しているといえる。 ・ 理論計算を有効に利用しており、理論と実験が効果的に融合している。 ・ 本プロジェクトのタイプは目的志向型基礎研究であり、経済的価値の創造に関しては、今後の検討に委ねられる。 ・ ペロブスカイト太陽電池で得られている高信頼性の特性を発現する作製プロセスの開発は、学術的価値に加えて、材料作製技術の高度化に繋がる。 ・ 色素太陽電池やペロブスカイト太陽電池で、優れた成果が得られているが、実用化に向けた道筋が不明確である。 ・ 特に、量子ドット太陽電池の高効率化は、極めて難しく、基礎研究の継続はあるにしても、研究テーマの位置づけ等に関する再考が必要であろう。
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 少人数の集団（定年制研究員8名）で、高い被引用件数320を含む学術論文229、招待講演171、特許出願20など、高い学術的研究成果が得られている。 ・ 国際会議で、論文賞を受賞するなど、評価されている。 ・ 世界トップの変換効率を色素増感太陽電池、ペロブスカイト太陽電池で達成し、世界をリードする高い研究レベルであることを示している。 ・ 色素増感太陽電池と有機ペロブスカイト太陽電池に関しては、世界トップレベルの研究成果が数多く得られており、予算を超える優れた内容である。 ・ 色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池の高効率化は難しく、ペロブスカイト太陽電池の研究開発にシフトしたのは妥当と考えられる。

	<ul style="list-style-type: none"> ・しかし、大面積モジュールでの高効率化、安定性や信頼性向上など、課題は多く、実用化に向けた展開が必要であり、産学連携を含めて、課題の明確化と研究開発計画の再考が必要であろう。 ・量子ドット太陽電池に関しても、基礎研究としては一定水準の成果が得られていると判断される。 ・量子ドット太陽電池の高効率化は、極めて難しく、基礎研究の継続はあるにしても、研究テーマの位置づけ等に関する再考が必要であろう。
<p>④見込まれる直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト) (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・国際的に評価の高い学術雑誌に多くの論文が掲載され、また数多くの引用がなされている。 ・高レベル雑誌への論文や多くの解説、また多くの講演など、成果の公表を積極的に行っている。 ・研究成果の波及効果は申し分ない。 ・これらは、国内外の太陽電池の研究開発レベルを全体的に向上させることに貢献している。 ・また、太陽電池開発の重要性を社会認識として高める効用もある。 ・各デバイスの学術的、或いは実用的フェーズが大きく異なるため、今後の展開で基礎と応用の注力度合いや切り分け等に工夫が必要になるかもしれない。 ・無機材料とハイブリッドした有機ペロブスカイトのモジュール、成分傾斜を利用したモジュールは、いずれも極めてユニークである。 ・色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池の高効率化は難しく、ペロブスカイト太陽電池の研究開発にシフトしたのは妥当と考えられる。 ・しかし、ペロブスカイト太陽電池の研究開発においても、大面積モジュールでの高効率化、安定性や信頼性向上など、課題は多く、実用化に向けた展開が必要であり、産学連携を含めて、課題の明確化と研究開発計画の再考が必要であろう。 ・これまでの色素、有機、ペロブスカイト太陽電池の研究開発に関する優れた実績、知見や経験をもとに、上記課題の打破とペロブスカイト太陽電池など次世代太陽電池でのリーダーシップを期待したい。
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>9.0点 (小数第二位四捨五入)</p>
<p>その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ペロブスカイト太陽電池の今後の研究開発方針を明確に有しており、今後の発展が期待される。 ・色素増感太陽電池やペロブスカイト太陽電池の研究開発において、いずれも2回、世界最高効率を更新し、高い被引用件数320を含む学術論文229など、優れた学術的成果も得られ、高く評価できる。 ・ペロブスカイト太陽電池の研究開発においては、大面積モジュールでの高効率化、安定性や信頼性向上など、課題は多く、実用化に向けた展開が必要であり、産学連携を含めて、課題の明確化と研究開発計画の再考が必要であろう。 ・量子ドット太陽電池の高効率化は、極めて難しく、基礎研究の継続はあるにしても、研究テーマの位置づけ等に関する再考が必要であろう。 ・これまでの色素、有機、ペロブスカイト太陽電池の研究開発に関する優れた実績、知見や経験をもとに、上記課題の打破とペロブスカイト太陽電池など次世代太陽電池でのリーダーシップを期待したい。

第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		