

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：平成25年12月24日

評価委員：（敬称略、五十音順）

小長井 誠 東京工業大学大学院理工学研究科 教授
 重里有三 青山学院大学大学院理工学研究科 教授
 西方 篤 東京工業大学大学院理工学研究科 教授

確定年月日：平成26年2月7日

プロジェクト名	次世代太陽電池の研究開発
研究責任者の氏名・所属・役職	韓 礼元 太陽光発電材料ユニット長
実施予定期間	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を解明することによって、材料とデバイスの開発を行う。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明らかにし、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り、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バックコンタクト型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（過渡吸収高速分光法）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可能性を見極める。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で解析とシミュレーションを行い、シミュレーション結果は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、新規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25年度中間評価時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： 本プロジェクトのサブテーマ1では、TiO₂表面における色素吸着状態とキャリア輸送の解明により色素の吸着状態を制御できる高性能な色素を開発できた。その知見に基づき、新しい共吸着剤を用いた共吸着型色素増感太陽電池を開発し、5年ぶりに変換効率記録を更新できた。また、共吸着剤の光吸収を長波長化することにより、変換効率を11.6%まで向上させることができた。一方、電解液中の添加剤によるTiO₂の擬フェルミ準位等の電気特性の影響を明らかにし、色素開発以外の方法で変換効率向上につながる道筋をつけることにつながった。サブテーマ1で論文80篇以上が専門誌に掲載された。サブテーマ2では、新規p型高分子材料として、空気中で安定な高分子の開発に成功し、高い電気伝導性を有することが分かった。また、n型材料として、系統的なフラレン誘導体の合成と評価により、理論計算結果を検証し、高電圧が得られるn型有機半導体材料が実現可能な分子構造の1つを提案するに至った。サブテーマ3では、低歪GaNAs/AlGaAs 新量子構造を用い、中間バンド太陽電池の基本動作である2段階光吸収による光電流生成の実証を行った。またGaAs/AlGaAs超格子太陽電池を用い、中間バンド形成のための電子状態の結合によって光電流が抑制されることを見出した。サブテーマ4では、大規模第一原理計算を用いてTiO₂界面におけるRu色素の吸着構造を明らかにした。さらに電子状態や光吸収スペクトルなどの吸着構造依存性も求めることにより、界面電子移動の微視的制御に関する知見が得られた。</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）： 色素増感太陽電池の変換効率更新はNIMSの太陽電池研究レベルを示すのみならず、その分野の研究活性化につながった。本プロジェクトの研究成果を踏まえて、日本企業が高効率色素増感太陽電池の開発・試作に成功した。またその成果をNIMSとフランスのサンゴバン社との共同研究に生かし、透明な色素増感型太陽電池モジュールを開発・試作し、光発電ウインドウ実用化への道を拓いた。また、NIMSで行われた科学計算とナノ計測は、メカニズムを解明し太陽電池の高効率化につながり、基礎研究の重要性を示したものである。国内での基礎研究の研究環境の改善にも有意義である。</p>
<p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>中間評価時の進捗状況： 本プロジェクトでは、色素増感太陽電池の変換効率の更新、有機薄膜太陽電池の空気中で安定な材料の開発、量子ドット太陽電池において多数の積層が可能な無・低歪量子ナノ構造を用いた太陽電池の作製と基本動作の検証の成功、TiO₂界面におけるRu色素の吸着構造の解明など、予定を上回って研究を進めている。</p> <p>自己点検・評価： 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の研究を行っている。メカニズムの解明による材料とデバイスの開発により、3年弱の期間において、色素増感太陽電池のエネルギー変換効率の記録を2回更新できた。また、後発の有機薄膜太陽電池研究を軌道に乗せ、メカニズムと材料の研究を順調に進めている。量子ドット太陽電池において基礎的な研究に成果を出しつつある。特に色素増感太陽電池の変換効率の記録更新は、次世代太陽電池の研究におけるNIMSの研究レベルを世界に示した成果といえる。また、プロジェクト全体で、定年制研究員8名という少人数の集団で論文141篇が専門誌に掲載され、特許10件が出願されたことが大いに評価できる。</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>

<p><u>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携</u> (研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 持続可能な社会を実現するための基盤技術開発のため、ナノテクノロジーを駆使するという考え方が堅持されて研究計画が立てられている。 ・ プロジェクトは4つのサブテーマから構成されており、①NIMSの強みを発揮できる色素増感太陽電池、②低コストとして期待されているものの安定性が悪く、実用化には時間のかかる有機薄膜太陽電池、③いわゆる原理検証レベルの量子ドット太陽電池、ならびに④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関するものに分けた研究実施計画となっており妥当である。 ・ これまでの開発状況から判断すると、①は極めて妥当であるが、②については、かなり先の将来に至る長期計画が必要である。③については、その実現性を含めて見直しが必要ではないか。④は、プロジェクト全体を跨ぐ共通項目として欠かせないものである。 ・ 研究計画、実施体制、マネジメントについては見直す必要はない。 ・ 変換効率の目標値も定量的に高く設定されており、評価できる。 ・ ロードマップに関しては、良く考えられ構成されている。 ・ 海外、国内の機関との連携については、それぞれの役割が評価資料を見る限りでは十分理解できないが、必要に応じて進めることが望ましい。
<p><u>②研究開発の進捗状況及び進め方</u> (進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し(継続・変更・中止等)、研究資源(資金・人材)の再配分、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 色素増感太陽電池については、色素の吸着状態の理解から始まり、変換効率を向上させるための新提案や、その有効性実証に至るすべての過程で世界最高水準を維持しており、ここまでは、極めて優れた成果が得られている。 ・ 有機薄膜太陽電池については、高効率を得られる高分子系は安定性に欠け、信頼性が高いと期待される低分子系は、変換効率が高いという状況が続いており、方向性の再検討が必要であろう。特に、最近、ペロブスカイト太陽電池で変換効率15.8%が報告されるなど、この分野での進展が急であり、NIMSとしての対応を考える必要がある。 ・ 量子ドット太陽電池については、超長期計画であるが、現状、世界的にはGaAsのシングル接合太陽電池でも28.8%の変換効率を得られていることを考えると、どこに焦点を絞っていくか、さらに検討が必要である。 ・ サブテーマ4は材料設計という面で機能しているように思える。 ・ それぞれのサブテーマにおいて、着実に研究成果が出始めている。 ・ 自己点検・評価にあるように、各サブテーマとも計画通りあるいはそれ以上に進展している。したがって、研究の進め方や体制を見直す必要はない。 ・ サブテーマ間の連携をさらに深めていくのが課題であると考えられる。
<p><u>③論文・特許等の直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</u> (研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレンディピティー、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ オリジナリティーの高い研究成果が得られている。 ・ 色素増感太陽電池について、5年ぶりに変換効率記録を更新し11.6%まで向上できたことは高く評価できる。 ・ 色素増感太陽電池に関する論文発表は、極めて優れている。研究責任者の韓氏の執筆による論文の被引用回数は、際立っており、高く評価できる。 ・ いわゆるセレンディピティーに対応するものよりも、色素増感太陽電池の研究開発を着実に進めているとの印象である。これから変換効率15%まで向上させるには、もう一つ、ブレークスルーが必要である。 ・ 応用面でも、企業と集積構造のモジュール作製を行っているようであるが、早く電力応用を目指したモジュール開発を展開すべきである。世界の太陽電池の生産量が30GWを超えている現在、新しい太陽電池がマーケットを広げていくには、1年でも早い方がよい。 ・ 研究成果は、権威ある欧文誌を含め多数の論文掲載(141篇)がなされており、国内外での学会発表も活発に行われていることから、十分な研究成果の発信も行われていると判断できる。

<p>④総合評価 (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・研究全体としては順調であり、今後、研究をさらに加速することにより、さらなる性能向上が期待される。 ・研究全体としては総合的・系統的に高性能太陽電池に応用できる機能性ナノ材料が精力的に研究・開発されており、研究成果も多数発信されているので高く評価できる。 ・これまでの色素増感太陽電池に関する経験をもとに、優れた研究が実施されている。デバイス動作のメカニズム、損失過程、それを克服する手法の提案、新提案の有効性の実証など、いずれの面でも評価される。 ・今後、色素増感太陽電池の変換効率を15%まで向上させようとする、もう一段のブレークスルーが必要であり、次に打つ手が明確には見えない。 ・世の中に突然出現したペロブスカイト太陽電池は、まだまだ安定性に問題があると言われているが、NIMSとして、この材料系にどのように取り組むかの決断が必要である。 ・信頼性の高い有機薄膜太陽電池系で、変換効率の向上は認められているが、変換効率の絶対値は非常に低く、戦略を見直す時期である。 ・量子ドット太陽電池は、当面、たいへん難しい課題であり、現象の把握に徹した方がよいであろう。
<p>各委員の総合評価点 (10点満点)</p>	<p style="text-align: center;">8、10、9 (順不同)</p>
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p style="text-align: center;">9.0</p>
<p>評価点</p>	<p style="text-align: center;">評価基準</p>
<p>10 9</p>	<p>S 全ての点において模範的に優れている。 計画を変更することなく継続すべきである。</p>
<p>8 7 6</p>	<p>A 総合的に優れている。 一部計画を見直し継続すればS評価になる可能性がある 平均的なプロジェクトである。</p>
<p>5 4 3</p>	<p>B 継続は認めるが、継続する時に、一部計画を見直した方が良い点がある。 期待されたほどではない。 計画を見直して継続すべきである。</p>
<p>2 1</p>	<p>C プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要である。 大きな問題があり、継続を中止すべきである。</p>