

プロジェクト事前評価報告書

評価委員会開催日：平成20年8月5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
 近藤道雄 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター センター長
 昆野昭則 静岡大学創造科学技術大学院 准教授
 内藤裕義 大阪府立大学大学院工学研究科 教授 (書面評価)

確定年月日：平成20年9月9日

プロジェクト名	高性能色素増感太陽電池の研究開発(「低コスト次世代太陽電池の高効率化基礎研究」に改題)
研究責任者の所属・役職・氏名	材料ラボ 次世代太陽電池グループ グループリーダー 韓 礼元
実施予定期間	平成21年度～平成25年度(但し、平成22年度(第二期中期計画終了年)にプロジェクトの後半のあり方を見直す)
研究の目的と意義	<p>高温・真空プロセスが不要な色素増感太陽電池は次世代太陽電池候補として大きな期待がかかっている。提案者らはこれまで、色素増感太陽電池の内部抵抗の低減及び光閉じ込め効果の向上により、世界最高のエネルギー変換効率を実現している。しかし、色素増感太陽電池はシリコン系太陽電池に比べ、エネルギー変換効率がまだ低い。本プロジェクトでは、太陽電池コストを火力発電コストに近づけ、クリーンエネルギーである太陽電池の本格的な普及の要望に答える。色素増感太陽電池内部のエネルギーロスを大幅に低減するための基礎理論を構築することにより、変換効率を倍増する可能性を見極める。</p> <p>界面における電子注入素過程の研究は界面電子移動反応や、電気化学分野に属する研究分野であるが、界面における光反応や分子反応が非常に複雑で、未解明なことが多い。本プロジェクトにより電子注入素過程の研究で色素増感太陽電池の電子移動メカニズムの解明が、これらの分野の活性化と進展に大きく貢献できる。また、シリコン太陽電池は我が国がリードした技術を保有し、これまで、トップの市場占有率を誇ってきた。しかし、近年、ドイツや中国のメーカーがシェアを急激に伸ばし、その優位性が失われようとしている。基礎理論の確立に裏付けられた色素増感太陽電池を世界に先駆けて実用化できれば、太陽電池における我が国の優位性を再び取り戻すことができる点でも大きな意義がある。</p>
研究の概要	<p>本プロジェクトは「新規セル構造の開発」、「高性能色素材料の開発」、「電子注入素過程の研究」という3つのサブテーマから構成される。「新規セル構造の開発」(サブテーマ1)においては、今のグレッツェル構造を超えるエネルギー変換効率が可能な革新的な構造の創出を目的とする。「高性能色素材料の開発」(サブテーマ2)においては、太陽光の利用効率を高め、光吸収領域を赤外領域に伸ばすためにシミュレーション手法を用い、TiO₂のフェルミ準位と電解質レドクス準位にフィットした色素の開発により、変換効率の向上につなげていく。「電子注入素過程の研究」(サブテーマ3)では、色素から酸化物半導体への電子注入過程、または電子を失った酸化型色素を還元する過程におけるエネルギーロスの原因を解析して、そのエネルギーロスを半減することができるアプローチと材料の設計・開発を行う。</p>

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。

<p>ミッションステートメント (具体的達成目標)</p>	<p>変換効率を倍増するには、まず、色素増感太陽電池の動作原理、電子発生と移動のメカニズムを解析して、セル内部のエネルギーロスの原因を解明する。それに基づき、高効率化が可能な新規セル構造を提案するとともに、分子シミュレーションによる高性能増感色素の設計・合成を行い、従来の色素を超える色素開発指針を見出す。さらに、電子注入素過程の研究により、セル内部のエネルギーロスを低減する方法を見出し、色素増感太陽電池の変換効率の向上の可能性を見極める。</p>	
<p>【評価項目】</p>	<p>コメントおよび評価点</p>	
<p>①目的・ミッションステートメント (具体的達成目標)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・研究責任者のこれまでの実績 (世界最高効率色素増感太陽電池の開発、等価回路解析による高効率化の実証、光閉じ込めによる高効率化の実証、透明電極を必要としないback contact electrode 色素増感太陽電池の開発) は高く評価できる。特に、研究責任者が、企業において基礎的な観点 (等価回路の決定とその回路要素を制御) から高効率化を達成した学術的実績は、特筆に値する。 ・従来にない20%という高い効率を目標としている。挑戦的という点では良い。 ・最近、色素増感太陽電池の高効率化を図るために、タンデム化などの複雑な構造を手掛けるグループが多い中で、シンプルなシングル接合で20%の変換効率を達成しようとしている点はよい。ただし、20%が達成できる理論的検討がまだ不十分で、20%を得るための納得のいく説明が必要である。特に色素のバンドギャップを小さい方向に変化させたときの開放電圧については、理論的根拠が欲しい。 ・サブテーマ項目は、高効率化には極めて重要な課題であり、妥当な目標設定である。特に、色素増感太陽電池の効率の上限を、素過程を明らかにすることにより見極めようとする目標設定は重要である。本プロジェクトで得られた知見は色素増感太陽電池のみならず、薄膜有機太陽電池、薄膜有機・無機ハイブリッド太陽電池の高効率化にも寄与する。 ・目的については、変換効率向上という明確なものであるが、既存のプロジェクトとの明確な差別化が足りない。 ・既存プロジェクトとして、NEDOの太陽光発電技術研究開発がある。従来のように効率や寿命などの実用化を見据えた研究開発も重要であるが、本プロジェクトでは、色素増感太陽電池の学理を追及する姿勢も堅持してほしい。 ・内容的には科学としての新規性が少しあいまいである。 ・プロジェクト名が平凡である。独自性が伺えるようなキーワードを創出し、プロジェクト名等に取り入れるのが差別化には必要である。 ・デバイスに軸足があるのか、材料に軸足があるのかをはっきりさせるべきである ・色素増感太陽電池では、電解質の固体化も重要な課題なので、プロジェクトが順調に推移した場合には、取り組んでほしい。 	
<p>評価基準</p>	<p>評価点 (1~10の10点満点) :</p> <p>9 : 大変魅力的で高いレベルを目指しており、説得力がある。</p> <p>7 : 目的・達成目標がよく考えられている。</p> <p>5 : 妥当である。</p> <p>3 : もう少し考慮の余地がある。</p> <p>1 : 重要性が感じられず、魅力を感じない。説得力が無い。</p>	
<p>各委員の評価点</p>	<p>9、 8、 7、 7 (順不同)</p>	
<p>平均評価点</p>	<p>7. 8 (小数第二位以下四捨五入)</p>	

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。

<p>②学術的側面での意義・独創性</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・研究責任者には世界トップレベルの変換効率（効率 11.1 %）や back contact electrode 色素増感太陽電池の開発実績があり、高効率化を目指す際に必要となる学術的・技術水準は十分高いレベルにある。また、高効率太陽電池を作製できる技術水準の高さは、素過程を解明して色素増感太陽電池の学理を追求する上では必須である。 ・既存の研究およびプロジェクトは、電池作製における技術面では高く評価できるものが多いが、電池の諸特性を決定づける素過程に関する学術的な研究は未成熟である。研究者の専門分野についても化学が多く、物理が少ないという状況にある。本プロジェクトは、このアンバランスを是正する上でも意義あるものと考えられる。 ・色素増感太陽電池の高効率化のためには、電池内で生起する素過程の解明が重要となる。素過程には、電極／電解質、電解質／色素、多孔質酸化チタン／色素界面で生起する電子移動反応、多孔質酸化チタン内での電子移動が挙げられる。界面での電子移動速度、特に、色素での光励起後の緩和現象を把握することにより、どの程度の速度で酸化チタンや電解質に電荷移動が生じるのか、色素のエネルギーギャップを変化させると電荷移動速度がどのような影響を受けるのか、評価していくことは極めて興味深く、重要である。さらに多孔質酸化チタン内の電荷輸送特性を測定する手段を確立した後、多孔質構造を制御して移動度と構造の相関も明らかにしていくことができるであろう。加えて、back contact electrode 色素増感太陽電池では、多孔質酸化チタン内の電荷移動の方向が通常の色素増感太陽電池とは逆方向であるため、その輸送過程を明らかにすることは応用、学術両面から興味深い。本プロジェクトは電氣的、光学的分光法によりこれらの素過程を明らかにして行こうとするものであり、その成果は、直接的に色素増感太陽電池の高効率化に用いることができる。 ・新しい研究開発分野としては、back contact electrode 色素増感太陽電池のデバイス物理の確立と高効率化が挙げられる。この太陽電池は、In を主体とした酸化物透明電極を必要としない特長を有し、省資源、高効率太陽電池として極めてユニークな太陽電池として位置づけることができる。高効率化への期待に加えて、多孔質酸化チタン内の電荷移動や back contact electrode の材質や細孔構造など、学術的な課題も多く存在する。 ・問題点がクリアにされている点は良い。 ・セル構造については、もう少し提案者のオリジナリティを主張してよい。 ・現状の提案では、まだセルの構造を改良して性能アップを図るものとなっている。特に暗電流が流れる機構解明、ならびに暗電流を抑制する提案が欲しい。 ・TiO₂/電解液界面での輸送現象解明のようなテーマを加えるとよい。有機・無機界面電子現象の解明は、学術的価値も高い。 ・技術的には世界最高レベルであろうが、“何か新しいもの”が少し足りない。 ・物理としての新規性、化学（物づくり）としての具体性が何か、が明らかでない。 ・研究分野として新規性（独創性）は現時点では薄い。 ・少なくとも研究の基本コンセプトで他研究機関と差別化して欲しい。 ・材料合成のアプローチもどちらかというところでありきたりである。 ・色素の置換基を系統的に変化させ、最低被占有分子軌道 (LUMO)、最高占有分子軌道 (HOMO) の変化を分子軌道計算により算出し、実際に合成された色素のそれと比較することにより、計算科学の有用性も示すことができる。今後の材料開発には極めて重要な学術的課題である。 ・色素の開発については、多くの研究者が手掛けており、この提案だから実現するという印象はない。
-----------------------	--

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。

評価基準	<p>評価点（1～10の10点満点）：</p> <p>9：高い独創性で大変意義があり、この点において国費を投入する価値がある。</p> <p>7：科学的・技術的に大変意義がある。</p> <p>5：平均的である。</p> <p>3：学術的意義が低い。</p> <p>1：全く感じられず、この点において国費は投入すべきではない。</p>
各委員の評価点	5、7、9、8（順不同）
平均評価点	7.3（小数第二位以下四捨五入）
③社会的・経済的側面での意義	<ul style="list-style-type: none"> ・将来の太陽電池に要求される性能・供給量を考えれば、低コストで大量生産可能な色素増感型太陽電池の高性能化の意義は非常に大きい。しかしながら現在の技術および変換効率等の性能を考えると、実用化への課題も多くあり、より長期的視点での研究開発が必要と考える。従って、5年程度のうちに、この分野で産業界に直接大きな寄与をすることを目指すより、より根本的なメカニズムを理解した上で、重要特許へつながらる知見を蓄積するのが良い。 ・色素増感セルを電力用途に用いていくには、“単純な安価なプロセスで、超高効率”が必要不可欠であり、この研究を通してブレークスルーとなる技術が見出されれば、社会的・経済的な意義は大きい。 ・本テーマは実用材料という観点をはずすところに意義がある。研究レベルでの最高性能を得ることで産業に貢献するだろう。 ・色素増感太陽電池の高効率化のためには、酸化チタン、電解質のエネルギー準位にLUMO、HOMOが一致した色素を開発することが重要である。Ru色素の置換基を系統的に変化させ、LUMO、HOMOの変化を分子軌道計算により把握し、エネルギー準位が一致した色素群を同定することは、開発効率を上げる上で重要である。得られた色素群を実際に合成し、太陽電池効率の高効率化を実証することができる。エネルギー準位を最適化させたRu色素は実用材料として直ちに実用化することが可能である。分子軌道計算による最適構造の探索と、最適構造を有する色素の合成を通じた高効率太陽電池の実証は、色素増感太陽電池の開発効率を飛躍的に高めると同時に、分子軌道計算を用いた効率的な材料開発は他の化成品についてもその手法は有用で、産業界にとって材料のみならず、開発手法自体も重要である。 ・基本特許となるような技術がない点、コア技術が何か、が今ひとつ不明確な点は要検討であろう。 ・back contact electrode色素増感太陽電池は、Inを主体とした酸化物透明電極を必要としない省資源、高効率太陽電池である。この太陽電池のデバイス物理を明らかにし、最適化された材料を用いることにより、一層の高効率化、低コスト化が図れるため、太陽電池の発電コストを大幅に引き下げることが可能になるであろう。さらに、他国には例を見ないユニークな素子構造であるため、素子構造自体、色素材料、back contact electrodeの材質、細孔構造の作製法など重要な特許となる可能性が高く、我が国の太陽電池の特許戦略においても重要な位置を占めると期待できる。

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。

	<p>評価点（1～10の10点満点）：</p> <p>9：大変意義があり、この点において国費を投入する価値がある。</p> <p>7：意義は大きい。</p> <p>5：平均的である。</p> <p>3：社会的・経済的意義は小さい。</p> <p>1：意義が全く感じられず、この点において国費は投入すべきではない。</p>
各委員の評価点	9、8、7、7（順不同）
平均評価点	7.8（小数第二位以下四捨五入）
<p>④研究内容・計画・予算計画 マネージメント・研究推進体制</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・色素増感太陽電池の低コスト、高効率化に向けては、透明電極を用いない新規な太陽電池構造（back contact electrode 色素増感太陽電池）は極めて有効な太陽電池構造である。この太陽電池構造の最適化を行い、低コスト、高効率太陽電池としての特性を見極めることは重要である。さらに、エネルギーマッチングの取れた新規な色素を開発し、1.1 eVのエネルギーギャップを有する色素を用いた場合の理論上の最大変換効率25%を目指した研究は魅力的である。この変換効率が実現できるか否かはさておき、新規な構造の色素増感太陽電池の高効率化の道筋を明確に示しており、計画は妥当であると判断できる。 ・電子注入過程を明らかにすることは、有機材料では極めて重要である。有機材料では、電極や有機・無機のヘテロ界面での注入現象は無機半導体のアナロジーで解釈されることが多く、正確には、ほとんど理解されていない状況にある。しかし、この電子注入過程を調べていく手段に関する記述には具体性がない。どのような測定を行えば、各ヘテロ界面での注入現象が明らかになるのか、記述すべきである。 ・これまで無機系と有機系の研究者が同じグループに入って議論する機会が少なく、それ故に研究の進展を遅らせてきたように思われる。本プロジェクトチームに無機系太陽電池の専門家を加え、デバイス物理学を議論させるなどの思い切った体制が欲しい。 ・研究テーマの規模を勘案すると、人員がやや不足と思われる。 ・研究推進体制に関しては、それぞれ、力のある研究者が参画しているので、研究グループの成果を期待できる。電子注入過程に関する研究を推進する研究者は常勤研究者の中には見出せないのが、有能なポスドクを採用してほしい。 ・TiO₂/電解液ナノ界面の評価（特に暗電流の機構説明という点で）を担当する者が必要である。 ・20%～25%の効率達成は相当ハードルが高いが、これ位のチャレンジはあっても良い。 ・色素の設計と合成がポイントと思われるが、その点に関する戦略性がよくわからない。外注するようなニュアンスに聞こえたが、それなら差別化が難しいのではないか。 ・研究期間については、今後発展させるべきプロジェクトの第一段階としては妥当である。 ・当初2年間（実質1.5年）で材料探索を終えるのは厳しいと思われる。 ・本研究の目的は、色素増感太陽電池のデバイス物理を明らかにし、その知見および新規色素材料の開発などとあわせて高効率色素増感太陽電池を低コストで実現する可能性を探ることと理解しているが、研究内容から判断して合理的な目的であると判断できる。なお、目的には発電コスト(7円/kWh)との記述があるが、この発電コストを実現するためには、どの程度の大きさの色素増感太陽電池で、

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。

	<p>どの程度の電力変換効率があれば達成できるのか、記述があれば良い。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・予算の規模と主な用途、研究期間は研究内容に照らして合理的な内容と思う。また、人員は適切な規模である。
評価基準	<p>評価点（1～10の10点満点）：</p> <p>9：よく練られた内容で、目的達成が期待できる。奥行きもある。</p> <p>7：よくまとまっている。</p> <p>5：平均的である。</p> <p>3：内容の修正が必要である。</p> <p>1：問題が多く、プロジェクトを実施すべきではない。</p>
各委員の評価点	5、6、7、8（順不同）
平均評価点	6.5
⑤総合評価	<p>コメント欄</p> <ul style="list-style-type: none"> ・総合的に判断して、優れたプロジェクトであると評価できる。 ・高効率、低コスト色素増感太陽電池を実現するためには、材料開発が重要であることは当然であるが、デバイス物理を明らかにし、デバイス動作原理から高効率化を実現していく学術的背景を有するアプローチも重要である。本研究は材料開発とデバイス物理の双方のアプローチを有しており、理想的なプロジェクト内容である。 ・研究責任者はすでに通常型の色素増感太陽電池で、インピーダンス分光からデバイス物理を明らかにし、その成果を用いて色素増感太陽電池の高効率化を実現した実績があり、研究責任者として極めて妥当な人選である。 ・色素増感太陽電池の分野でユニークな成果を上げている研究責任者の下、太陽電池としての有機・無機ハイブリッド太陽電池である色素増感太陽電池の可能性を見極める重要な研究課題である。 ・これまでの経験が豊富な研究者の提案であり、目標設定やテーマ的を射たものとなっている。これにもう少し界面物理学に迫る項目を加えれば、一層力強い提案となる。 ・独自性（学問的、技術的、特許的）という点でやや物足りない。しかし、総合的にはまとまっており、問題点もよく整理されている。 ・11%を超える成果は十分期待できるが、大幅な進展については、それを期待させる部分がやや少ない。リスクイでも良いから、何か可能性を示して欲しい。
評価基準	<p>総合評価点（1～10の10点満点）：</p> <p>9：すべての点において模範的に優れている。</p> <p>7：総合的に優れている。</p> <p>5：平均的なプロジェクトである。</p> <p>3：期待されたほどではない。計画の見直しが必要である。</p> <p>1：上記評価項目①～④の評価結果に大きな問題があり、研究を実施すべきではない。</p>
各委員の評価点	7、9、7、7（順不同）
平均評価点	7.5

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。

その他

- ・手堅くまとめたという印象で、中身は悪くないと思うが、これで国内外のトップクラスの競合相手と戦えるかという点では、“何か新しいもの”が必要であろう。

追記事項

本プロジェクトは、次世代太陽電池として色素増感型太陽電池に絞り、その「新規セル構造の開発」、「高性能色素材料の開発」、「電子注入素過程の研究」を通して、次世代太陽電池の高性能化を目標として提案したものであったが、今回の事前評価での意見や、益々重要性を増す太陽電池材料の科学的な理解の必要性に鑑みて、量子ドット型太陽電池、有機薄膜型太陽電池などの次世代太陽電池材料の研究開発を総合的に実施することが重要である。このような状況から、次世代太陽電池センターを2009年3月から発足した。研究センターの中で、本プロジェクトで実施する色素増感型太陽電池は、他の次世代太陽電池の研究開発から得られる科学的な知見を相互に補完しあいながら、物質の科学的な理解による高性能化に重点をシフトさせ実施している。

この事前評価は課題提案の最初の段階で行ったものです。特に事前評価では厳しく評価をしてもらっています。この結果を基に研究内容・計画等をブラッシュアップして、研究は実施されます。