

最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

研究課題名	電荷分離状態の長寿命化と二酸化炭素の光資源化
研究機関・部局・職名	新潟大学自然科学系材料生産システム専攻 准教授
氏名	由井 樹人

**【研究目的】**

太陽光を用いて、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の資源化を行う光エネルギー変換システムの構築を行う。特に光反応を制御するうえで重要な、電荷分離状態の制御と安定化さらに化学反応との共役に関して検討を行う。また目的達成に必要な要素技術である、光捕集系、電子伝達系さらには、高性能な CO<sub>2</sub> 還元光触媒の構築も同時に行い CO<sub>2</sub> の光資源化を目指す。

1) 本研究の背景

二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) は、地球温暖化の主要原因と考えられており、世界規模で CO<sub>2</sub> 排出量低減が求められている。しかし CO<sub>2</sub> は、石油や木材

に代わり、枯渇することの無い炭素資源としても有望である。ほぼ無限な太陽エネルギーにより、CO<sub>2</sub> の変換と資源化が行えれば、環境問題、資源枯渇、さらにはエネルギー問題の解決につながる。このような背景のもと、太陽光の利用や CO<sub>2</sub> の資源化に関する研究が近年活発化しており、米国では MIT を始めとする著名な工科大学による研究共同体ができつつあり、今後 10 年間で 2.5 億ドルもの研究投資を行う予定である。日本においても太陽光の利用については関心が持たれているが、CO<sub>2</sub> の資源化に関する研究体制は必ずしも十分ではない。

植物の光合成系では、約 1 秒と言う驚異的な長寿命電荷分離状態から、CO<sub>2</sub> との反応を始めとする光合成反応が進行する。

一方、人工的な電荷分離状態はナノ～マイクロ秒程度であり、これが反応効率や生成物選択性の低下につながっている。申請者らは、無機細孔体・半導体光触媒・有機色素からなる複合材料を用いることで、室温・大気下で 2 時間以上もの長寿命電荷分離寿命を達成している。これまでに報告のある電荷分離寿命は、凍結溶液下でも十数分程度であり、本系は驚異的な安定化を達成している。さらに申請者らは、CO<sub>2</sub> と選択的に反応する金属錯体光触媒、超分子金属錯体の高効率光エネルギー移動、金属錯体複合体による多電子の蓄積、さらに無機細孔体と金属錯体間での光捕集系の構築等に成功している。これらの要素技術を複合・集積化することで、CO<sub>2</sub> の光資源化を行う、光エネルギー変換システムの構築が可能である。

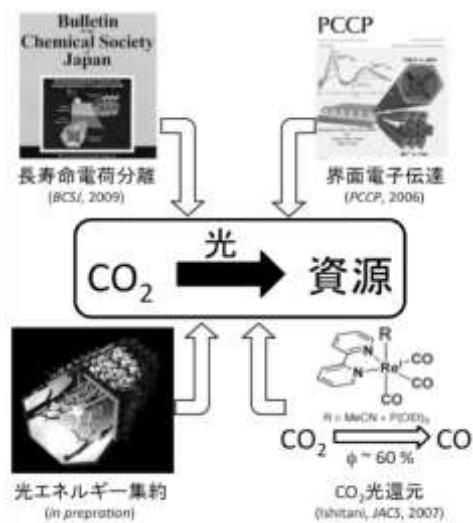


図 CO<sub>2</sub> 光資源化システムの概要と要素技術

## 2) 研究期間内の目標

申請者らは、天然系を遥かに超える長寿命電荷分離状態の保持に成功しているが、そのメカニズムについては不明な点が多く、比較対象実験を網羅的に行いそのメカニズムを明らかにする。さらに、電荷分離状態から化学反応が進行する系を見だし、複合系における電子伝達機構を明らかにする。現在検討している光捕集系も、高効率で光エネルギー移動が生ずることを明らかにしているが、捕集した光エネルギーを酸化還元反応に転用することが行えていない。そこで、捕集した光エ

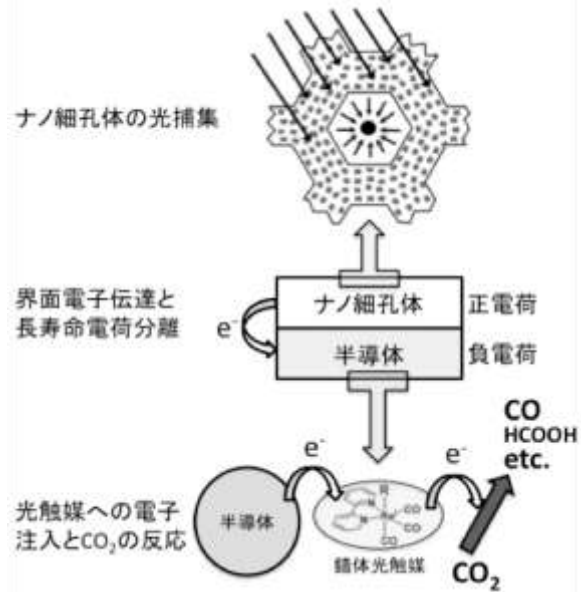


図 CO<sub>2</sub>光資源化材料の構成図、多数の要素技術を集積・複合化することで、機能化を図る

ネルギーで駆動する化学反応を探索する。現在、申請者らの研究グループで、量子収率~60%でCO<sub>2</sub>を一酸化炭素(CO)に変換する光触媒が見いだされているが、更なる性能向上を目指し、量子収率~80%の光触媒を見いだす。CO<sub>2</sub>との反応は多電子変換反応であるため、電子を多数蓄積する技術が必要である。申請者らは、金属錯体と金属酸化物を複合化させると、複合体中に多電子を蓄積できることを見いだしている。しかし、CO<sub>2</sub>と反応可能な光触媒を複合化した例はほとんど無いため、複合体の合成とCO<sub>2</sub>との反応特性について明らかにする。最終的には、光合成に類似した、光捕集→エネルギー伝達→電荷分離→電子伝達→CO<sub>2</sub>との反応を逐次的に行える複合システムの構築を行い、CO<sub>2</sub>との反応効率を観測と本系のポテンシャルを明らかにする。

## 3) 本研究の特色

太陽エネルギーの利用として、太陽電池等の研究が盛んに行われているが、電気は蓄積が困難である。一方化学エネルギーは、蓄積が可能なエネルギー変換方法であり、CO<sub>2</sub>を直接光資源化する本研究は、新たな太陽光の利用として大変興味深い。さらに、光エネルギーの蓄積のみならず、CO<sub>2</sub>を新しい炭素資源として着目しており、本提案の技術が達成できれば、エネルギー問題だけでなく、資源問題と環境問題などを同時に解決する鍵材料となりうる点で大変興味深い。

さらに、光合成を意識した光エネルギーと化学変換に関する研究は数多く行われているが、大部分の研究は、光合成が行っている個々の要素技術のみを重点的に研究している。それに対して、本研究課題は、長寿命電荷分離状態を中核としながらも、光捕集、CO<sub>2</sub>還元、電子伝達なども同時に検討し、さらに個々の要素技術を集積する点で他に類を見ない研究である。特に申請者らは、個々の要素技術において一定の成果を上げており、一連の要素技術を同時多角的に研究遂行できる研究グループは世界中でも稀である。一連の研究が完遂されれば、エネルギー・環境・資源問題に対し多大なインパクトを与え、グリーン・イノベーションの進展がなされると確信している。

【総合評価】	
	特に優れた成果が得られている
	優れた成果が得られている
○	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】	
① 総合所見	
<p>本研究課題は安定な長寿命の電荷分離状態が見出されたことをもとにして、CO<sub>2</sub>還元に繋げようとしている。テーマが新規性の高い基礎的要素の組み合わせとその集約化であり、とくに電化分離寿命の機構解明などはその進捗状況を評価するのはやや困難であるものの、電荷分離の長寿命化、光エネルギーの集約に関しては、世界をリードできる成果が見られており、この部分では優れた成果が得られたといえる。ただし、電荷分離の長寿命化メカニズムや光エネルギーの反応への転化など、本研究の到達目標となる部分に関しては未解決の部分が残されているため、今後ともに積極的な挑戦を期待したい。</p>	

② 目的の達成状況	
<p>・所期の目的が (<input type="checkbox"/>全て達成された ・ <input checked="" type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p>	
<p>研究代表者は、光励起で生成した正負電荷分離状態から化学反応を進行させ、CO<sub>2</sub>の資源化につなげることを最終目標にしている。その基盤技術として、電荷分離の長寿命化、光エネルギーの集約に関しては、世界をリードできる成果が見られている。しかしながら、本研究で目的とした電荷分離状態が長寿命を示すメカニズムに関しては、まだ未解明の部分が残されていると思われる。</p> <p>また、CO<sub>2</sub>還元の光触媒の開発もこれからである。さらに、これら要素技術を集積した反応系の構築も、担当者が述べているように現状では達成が容易でないと思われる。電荷分離の長寿命化メカニズムや光エネルギーの反応への転化など、今後の展開が期待される。</p>	

③ 研究の成果	
<p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が (<input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p>	
<p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が (<input checked="" type="checkbox"/>創出された ・ <input type="checkbox"/>創出されなかった)</p>	
<p>・当初の目的の他に得られた成果が (<input type="checkbox"/>ある ・ <input checked="" type="checkbox"/>ない)</p>	
<p>無機-有機複合膜による長寿命電荷分離状態のメカニズムを明らかにするため、一定の成果が得られており、その先進性は認められる。また、界面活性剤を使用せずに光捕集能を有する細孔体と金属錯体を複合化し、光捕集能と二酸化炭素の光還元能を</p>	

両立させた成果は先進性が高い。CO<sub>2</sub>の光資源化には光集積系と反応場を繋ぐエネルギー輸送系の構築が必要であり、その技術が確立されればブレークスルーになるであろう。システム構築へ注力して頂きたい。

#### ④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が

( 見込まれる ・ 見込まれない )

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が

( 見込まれる ・ 見込まれない )

CO<sub>2</sub>を光エネルギーで効率良く還元できるシステムができれば、人工光合成の技術分野での寄与は大きい。また、CO<sub>2</sub>を効率良く還元できる固体触媒を開発することでも寄与は充分あり、関連分野に高いインパクトを与えるものと期待される。

さらに、CO<sub>2</sub>の光資源化そのものが極めて独創性の高い技術である。申請者も認めているように、本研究期間内に具体的な資源化まで到達することは困難であったと考えるが、社会的な貢献、経済的な問題解決へのインパクトは大きいと思われる。また、このようなアプローチが横展開されれば、自然規範化学のような新分野創出にも繋がると期待される。

#### ⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが ( 行われた ・ 行われなかった )

東日本大震災、これに関連する職場の異動など、いくつかの問題が発生し、一時期は研究実施マネジメントに問題が発生した感もある。ただ、遅れたものの研究補助員ならびに特任助教の雇用を行っており、研究実施体制は適切といえよう。研究を実施しているメンバーとのディスカッションも頻繁に行われているため、適切なマネジメントが行われていると判断される。助成金で購入した大型の物品は研究を遂行する上で必須の装置であり、使用頻度も高い。助成金は適切に活用されていると思われる。

研究の遅れを十分に取り戻したとは言い難いが、研究のスピードアップに努めていることがわかるため、全体的な研究実施に係るマネジメントは適切に行われているものと判断する。