

# 人工光合成技術を搭載したカーボンニュートラルを実現する住宅

天尾 豊

大阪公立大学人工光合成研究センター センター所長

太陽光エネルギー利用や二酸化炭素削減の重要性を背景に、多くの人工光合成に関する研究が進められており、水分解に基づく水素生成、二酸化炭素還元に基づくメタノールなどその生成物は多様である。人工光合成は水素生産や二酸化炭素還元的手段であり、社会実装を見据えた場合、それら生成物の利用法が大きなポイントとなる。本稿では、エネルギー利用の必要性が高く、エネルギー供給システムとしての搭載が最小単位となる住宅へ人工光合成技術の適用と利用法について紹介する。

## はじめに

地球温暖化問題や脱炭素社会（正しくは脱化石資源社会）に良くも悪くも大きく関わっているのが二酸化炭素である。二酸化炭素は炭水化物の燃焼最終生成物であり、地球上でもっとも再安定な炭素の酸化物となる。二酸化炭素は常温常圧では気体であるため、通常は生成すると大気中に放出される。放出された二酸化炭素は地球の上空を取り囲む気体の層を分厚くさせ、いわゆる温室効果ガスの層を形成する。この層が地球からの熱を宇宙に放出せず再度反射させ地球へ戻すため、地球温暖化が進行していると言われている<sup>1)</sup>。つまり地球が一年中厚い布団をかぶっているような状態である。この40年の間に大気中の二酸化炭素の濃度は0.03から0.04%程度に上昇しており<sup>2)</sup>、例えて言うと、45Lのごみ袋で大気を回収した場合、二酸化炭素は約1g程度増えていることになる。このわずかな増加が地球全体の環境を悪化させているとされている。もちろん地球の長い歴史の中で人類が活動している期間は非常に短期間としてみなされるため、自然的な気候変動に由来する可能性があることも事実である<sup>3)</sup>。ただし、大気中の二酸化炭素濃度が増加していることは事実であり、自然現象あるいは人為的現象のいずれにしても大気中の二酸化炭素濃度を適度に抑制する必要がある。

そこで、二酸化炭素の排出削減や二酸化炭素を原料として捉え有用物質に変換するなど様々な試みがされている。特に二酸化炭素の有用物質への変換は多くの研究がなされている。しかしながら二酸化炭素を原料として炭水化物等に戻そうとするとエネルギーが必要になることは容易に想

像できるであろう。加えて有用物質へ変換するための触媒開発も重要な要因となる。

とかく悪者にされがちな二酸化炭素であるが、主に陸上で生育している緑色植物は、太陽光エネルギーを駆動力とし、二酸化炭素を原料としてブドウ糖やデンプンなどのエネルギーを作り生命活動を営んでいる。こういった天然光合成の反応を手本にして、太陽光エネルギーを駆動力とし、二酸化炭素を原料として資源化し、付加価値のある物質を生成する技術が「人工光合成」である<sup>4)</sup>。これまで多くの人工光合成に関する研究が進められており、基礎研究レベルでは高い太陽光エネルギー変換効率を達成している例もある。しかしながら人工光合成で作った生成物を何に活用していくかが明確でない場合が多い。そのため、技術としては優れているが、なかなか実証につながっていないのが現状である。加えて、現状では人工光合成技術が発電所等の代替になるほどの電源供給を達成できるレベルではない。

そこでエネルギー利用の必要性が高く、エネルギー供給システムとしての搭載が最小単位となる住宅への人工光合成技術の適用が考案されている。

本稿では、まず天然光合成と人工光合成との違いを概説する。次に人工光合成を搭載した住宅のコンセプトについて構成要素を説明する。続いて、主に住宅に搭載する人工光合成部分について、作動原理等を概説する。最後に、人工光合成技術の社会実装に向けた未来展望を述べる。

### 1. 天然光合成と人工光合成

陸上で生育する緑色植物やある種の藻類が生命活動の基盤としている光合成は酸素発生型と呼ばれている。酸素発生型光合成は図1に示すように、太陽光エネルギーが関わる明反応と暗反応で生成した還元力NADPHとアデノシン三リン酸（ATP）を利用して二酸化炭素を有機化合物に固定しブドウ糖・デンプンを生産する暗反応とに分けられる。明反応ではP700と呼ばれる反応中心を持つNADP<sup>+</sup>の光還元系（光化学系I PS I）と、P680と呼ばれる反応中心を持つ水を光酸化して酸素を発生させる系（光化学系II PS II）が連結したものであり、Zスキームと呼ばれる反応である。これに加えてATPを再生する光リン酸化過程も備えている。酸素発生型光合成反応は約30のエネルギー移動・電子移動過程が組み込まれており、各段階のエネルギー移動・電子移動過程が副反応なく効率的に進行する。明反応で生成したNADPHとATPを利用し、カルビン回路と呼ばれる暗反応で10段階以上の酵素反応過程を経て二酸化炭素が有機化合物に固定されようやくブドウ糖・デンプンに変換される。つまり酸素発生型光合成では、光が関わる過程は水を分解して酸素を生成する、還元力NADPHや高エネルギー物質ATPを生成する部分までであり、実際に二酸化炭素が有機化合物に固定されブドウ糖・デンプンに変換する過程では直接光エネルギーは関与せず暗反応で進行していることになる。

この複雑な過程を人工的に全て模倣することは非常に困難であることは言うまでもない上、現実的に不可能に近

い。加えて、燃料や化成品合成という点では、二酸化炭素からブドウ糖・デンプンを作る必要はない。太陽光エネルギーを利用し、水を分解し水素を生成するあるいは二酸化炭素を有機分子に変換する反応を実用的な技術に展開する場合は、天然の光合成の必要不可欠な過程を単純化することが人工光合成達成への重要課題であると言える。そのために必要不可欠な要素として、太陽光捕集・増感分子、電子メディーエータ分子および燃料や化成品生成のための触媒があげられ、これらを有機的に連携した反応システムを構築すればよいことになる。図2に示すように光化学系Iに相当する還元系（P1：光増感分子、C1：電子メディーエータ分子、触媒1：燃料・化成品生成のための触媒）と光化学系IIに相当する酸化系（P2：光増感分子、C2：電子メディーエータ分子、触媒2：水の酸化触媒）についてそれぞれ構築し、適当な電子メディーエータ（M）で連結することによってZスキーム型の人工光合成系が可能となる。現在進められている人工光合成は水の光分解に基づく水素生成と、光エネルギーを用いた二酸化炭素の還元・資源化の2つに大別される。前者は半導体光触媒を用いた水素生産系が精力的に進められており、上述のZスキーム型人工光合成系が数多く構築されている<sup>5-8)</sup>。後者の二酸化炭素の還元・資源化に関する研究では、半導体光触媒、分子系触媒、生体触媒等を用いた系が精力的に進められており、二酸化炭素から生成される化合物は一酸化炭素、ギ酸、メタノール、メタンなどであり多種多様である<sup>9-17)</sup>。

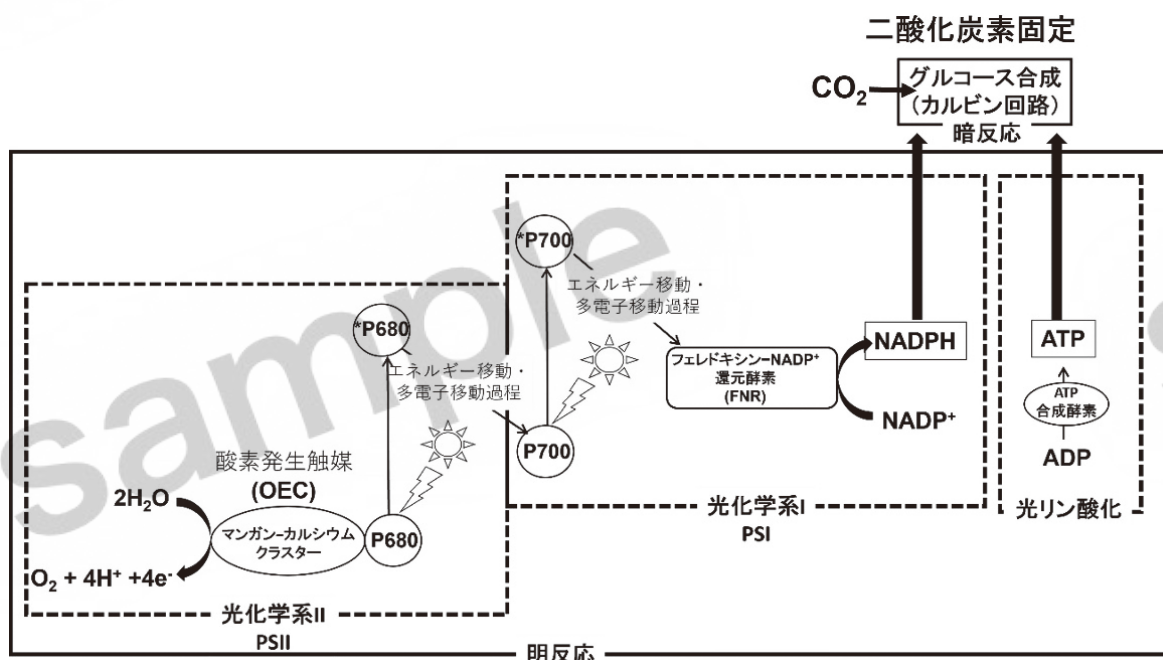


図1 酸素発生型光合成を構成する明反応および暗反応の概要

## 2. 人工光合成を搭載した住宅

上述のように多くの人工光合成に関する研究が進められており、水分解に基づく水素生成、二酸化炭素還元に基づく一酸化炭素、ギ酸、メタノールなどその生成物は多様である。この生成物の多様性が人工光合成の最終的なゴールをわかりにくくしているのかもしれない。言い換えれば人工光合成は水素生産や二酸化炭素還元の手段であり、社会実装を見据えた場合、それら生成物を一体どのように何に使うのが大きなポイントとなる。つまり、このハードルを乗り越えない限り、永遠に夢の技術で終わってしまう。

加えて、人工光合成の現状を鑑みると、例えば原子力発電何機分というようなレベルにはなく、大規模なエネルギー供給システムとしては稼働することはまだ困難であろう。そこでエネルギー需要の必要性が高く、エネルギー供給システムとしての搭載が最小単位となる住宅であれば人工光合成技術が適用できるのではないかと考案されている。ただし、人工光合成技術はあくまでもエネルギーとなる物質生産の手段であるので、別途給電、給湯などの仕組みを組み入れなければ社会実装にはつながらない。

筆者らが考案している人工光合成を搭載した住宅の概要を図3に示す。この住宅は、太陽光エネルギーを利用して

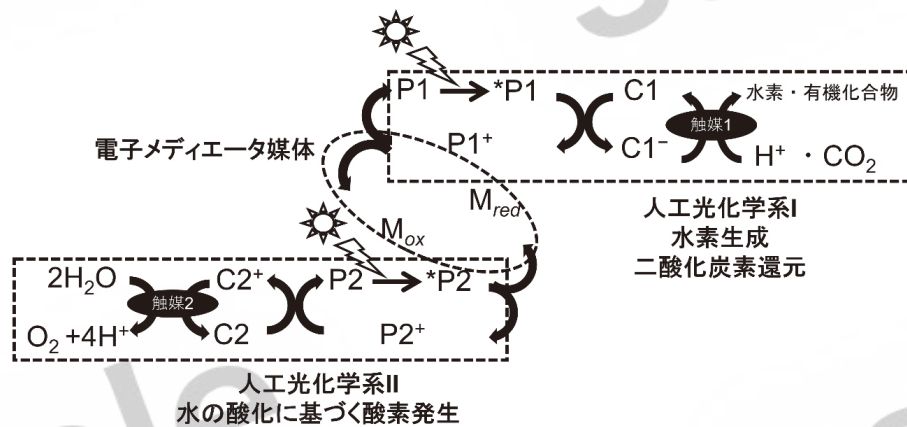
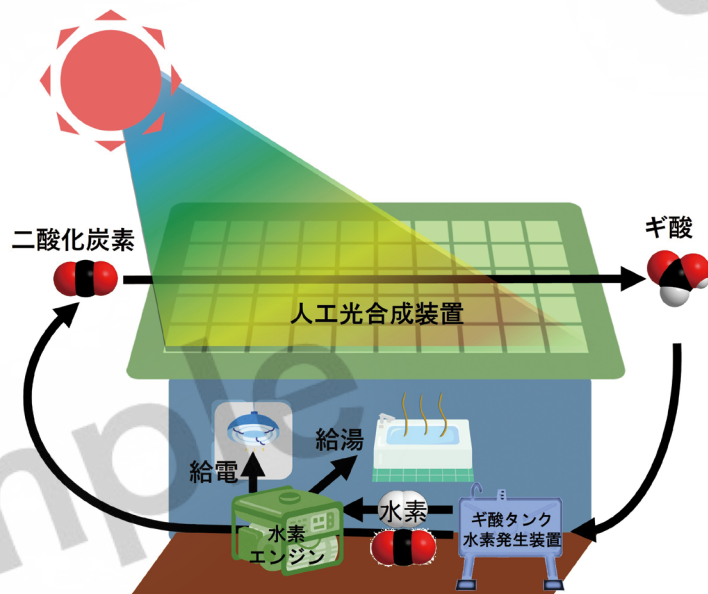
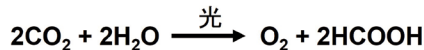


図2 酸素発生型光合成を模倣したZスキーム型人工光合成系



人工光合成による二酸化炭素と水を原料としたギ酸生成



ギ酸の選択的分解に基づく水素生成



図3 人工光合成技術を装着した住宅におけるエネルギー供給および二酸化炭素回収の概要

二酸化炭素と水からギ酸を生成する、人工光合成装置を搭載している。人工光合成で生成したギ酸貯蔵とギ酸分解に基づく水素を製造するための装置、水素を燃料として給電・給湯が可能な水素エンジンや燃料電池をそれぞれ連結する。それぞれの装置の連結により、人工光合成で生成したギ酸を元手にして、最終的には動力源であるエンジンや燃料電池により、住宅で必要な電気や熱を獲得することができる。さらにギ酸分解においては水素のほかに二酸化炭素が生成するが、これを回収し人工光合成部位に再度供給することによって、再度ギ酸生成の原料となる。つまり二酸化炭素の利用と回収が実現し、住宅全体でのカーボンニュートラルが達成できる仕組みである。

ここで、ギ酸を介さずとも、太陽光エネルギーを使って水を分解して水素を生産し、直接利用すればいいのではないかと疑問を持たれる方もいるだろう。水素は地球上で最も軽い気体であるため、エネルギーとして利用する場合、膨大な量が必要となる。例えば、6人家族が居住する一軒家を燃料電池で電力などを供給使用した場合、1時間に約1,000Lの水素が必要となる。バックアップのための水素貯蔵を考えると、住宅よりもはるかに大きな水素貯蔵タンクが必要となり、安全性も含めて現実的ではない。一方、ギ酸を水素エネルギーキャリアとして捉えると、ギ酸1Lあたり約53gの水素を貯蔵できる。つまり、水素1,000Lがわずか2.0kg程度に貯蔵されることになる。これは水素ガスを約600倍に圧縮できる計算になる<sup>18)</sup>。加えてギ酸は人工光合成を使って二酸化炭素から生成できるので、二酸化炭素利用としても大いに力を発揮することになる。ギ酸は白金微粒子などの触媒を用いることによって水素と二酸化炭素に分解でき、得られた混合ガスをエンジンや燃料電池に供給することによって、住宅内の給電・給湯が可能になる。エンジンなどから排出されるガスを再度人工光合成に戻すことで、再度ギ酸生成の原料として活用できることになる。人工光合成装置を搭載した住宅では、最初に給

電・給湯に必要なギ酸を初期の起動に利用し、その後はギ酸分解に伴って発生する二酸化炭素を人工光合成装置でギ酸に戻すことによって、初期に使った量のギ酸に戻ることになる。起動した後は二酸化炭素とギ酸との間をリサイクルし続けることになる。

### 3. 住宅に搭載するための人工光合成

上述のように住宅での人工光合成の役割は、太陽光エネルギーを利用して水と二酸化炭素からギ酸を作ることである。ここでは、住宅搭載用の水と二酸化炭素からギ酸を作る人工光合成装置についてその原理を中心に説明する。

筆者らは当初図4に示すような光触媒、ギ酸生成のための触媒を固定化した一枚のデバイスの人工光合成システムを考案し、太陽光を利用したギ酸生成を試みている。このシステムは、構成が単純である一方、用いる光触媒の太陽光エネルギー吸収効率等その機能にシステムの性能が依存するため、デバイス全体に膨大な面積が必要となる。図4の写真で示した30cm四方デバイスを用いてもギ酸生成に対する太陽光エネルギー変換効率は0.015%にも満たないため相当枚数が必要であり、住宅に搭載するという観点から、デバイス面積の大きさや長く使い続けることを見据えたメンテナンスについても困難な点が多かった。そこで筆者らは、これらの点を克服すべく人工光合成システムの構成を見直し、図5のようなものを構築している。具体的には化合物太陽電池(CIS)材料等による太陽光受光部位と

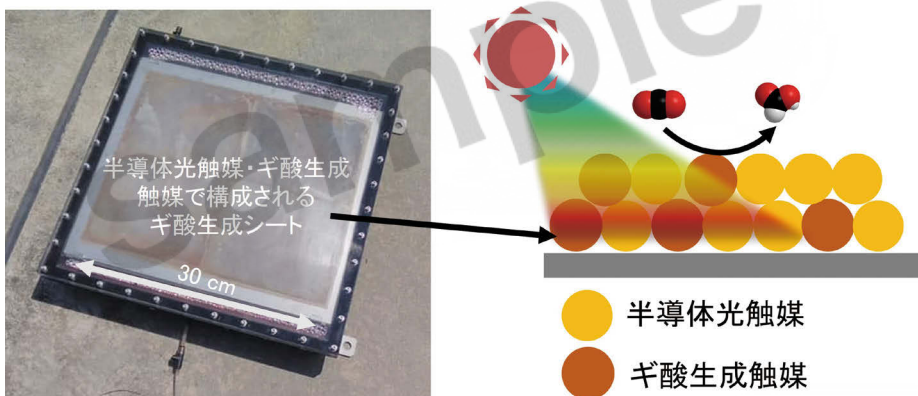


図4 半導体光触媒・ギ酸生成触媒一体型人工光合成デバイスの概要

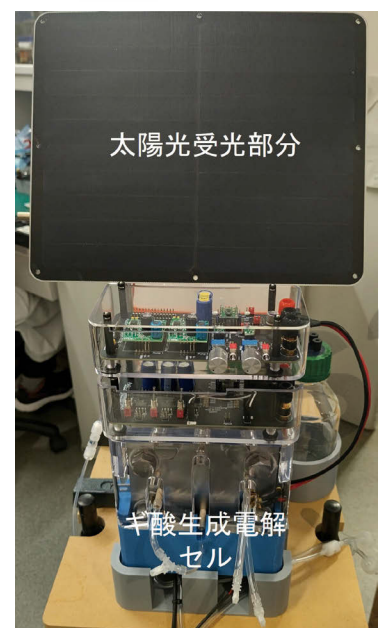


図5 太陽光受光部位とギ酸生成電解セルで構成される人工光合成システムの概要

アノード、カソードおよびイオン交換膜でからなる二酸化炭素の還元に基づくギ酸生成のための電解セルとで構成されている。この構成にすることによって、例えば、既存システムとして太陽光発電パネルが備わっている住宅でも人工光合成システムを組み込むことができ、既存インフラを新たな機能として利用することができる。

図6をもとにしてこの人工光合成システムの作動原理を説明する。最初に太陽光受光部位に太陽光が照射されると、電解セルに電子が供給される。酸化イリジウムを基盤としたアノード側では水の酸化反応が進行し、酸素が発生する。一方金属酸化物等を基盤としたカソード側では、二酸化炭素が還元されギ酸が生成する仕組みとなっている。本システムの特徴は特に電解溶液に塩を加える必要がなく、二酸化炭素を飽和させた純水を電解セルに用いることができる点である。現在、太陽光受光部位の面積が2m<sup>2</sup>で、ギ酸生成に対する太陽エネルギー変換効率は3%まで達成できている。また、日の出から日の入りまでの実証試験では日産で約0.2kgのギ酸生成が達成できている。0.2kgのギ酸を分解して得られる水素は電力にして0.2kWh分にまで到達している<sup>19)</sup>。またこのシステムは日の出とともにギ酸生成が開始され、日の入り時から夜間にかけて緩やかにギ酸生成が停止するといった天然の光合成と同様の現象が観測されている。

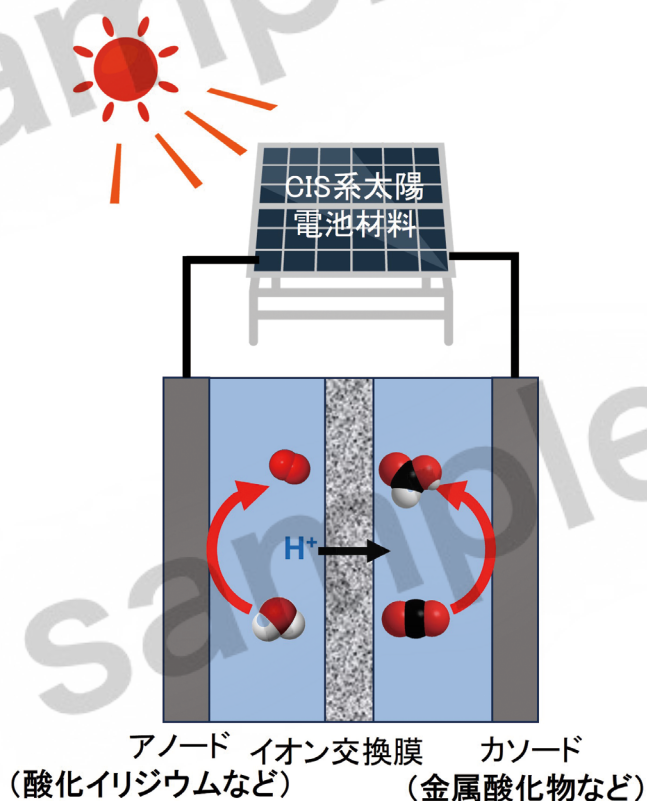


図6 太陽光受光部位とギ酸生成電解セルによる人工光合成システムの構成要素とギ酸生成スキーム

## さいごに

本稿では、人工光合成を搭載した住宅への給電・給湯に関する実証に関する概略を紹介した。特に住宅へ搭載するための人工光合成システムの構成およびその性能について説明した。従来の住宅用太陽光発電では、晴天の昼間に発電した電気を雨天時や夜間に使うには蓄電池が必要な上に、電力の状態で保存するため、充放電ロスもある。一方、人工光合成技術では、太陽光エネルギーでギ酸を作り、これをタンクに貯蔵し、電気・熱が必要ときにギ酸を分解して水素を生成し給電・給湯するため、上記のような問題も軽減される。また、二酸化炭素循環システムを導入することにより、二酸化炭素を排出せず、再度二酸化炭素をギ酸として再生することが可能となる。この実証試験により、「二酸化炭素を排出しない」住宅の省エネ化にとどまらず、この技術を活用した「二酸化炭素をギ酸に再生しエネルギーキャリアとして利用する」住宅の供給実現に向けた展開が大いに期待できる。衣食住をしながらカーボンニュートラルを身近に感じられる住宅誕生に大きく夢が膨らむところである。

## 謝辞

本稿で紹介したシステムは飯田グループホールディングスとの共同研究で進めている技術の一部である。また本稿で紹介した新たな人工光合成システム開発に関して、大阪公立大学人工光合成研究センター松原康郎准教授の多大なる貢献によるものである。この場を借りて厚く御礼を申し上げる。

## 【参考文献】

- 1) 公益社団法人地球環境産業技術研究機構 参考資料 (地球温暖化、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>))  
URL : [https://www.rite.or.jp/ccs\\_qa/globalwarming/](https://www.rite.or.jp/ccs_qa/globalwarming/)
- 2) 気象庁：大気中二酸化炭素濃度の経年変化  
URL : [https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info\\_co2.html](https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info_co2.html)
- 3) 江守正多, 地球環境研究センターニュース, 29, 33006 (2018).
- 4) 天尾 豊, 「第7章 自然の光合成を用いた人工光合成による有機物の合成・利用技術 第1説ソーラー燃料・物質生産のためのハイブリッド型人工光合成技術」情報機構 261 (2013).
- 5) Y. Iwase, O. Tomita, H. Naito, M. Higashi, and R. Abe, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 356, 347 (2018).
- 6) T. Shirakawa, M. Higashi, O. Tomita, and R. Abe, *Sustainable Energy & Fuels* 1, 1065 (2017).
- 7) K. Ogawa, A. Nakada, H. Suzuki, O. Tomita, M. Higashi, A. Saeki, H. Kageyama, and R. Abe, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 5642 (2019).
- 8) Q. Wang, M. Nakabayashi, T. Hisatomi, S. Sun, S. Akiyama, Z. Wang, Z. Pan, X. Xiao, T. Watanabe, T. Yamada, N. Shibata, T. Takata and K. Domen, *Nature Materials* 18, 827 (2019)

- 9) J. Hawecker, J.-M. Lehn and R. Ziessel, *Helv. Chim. Acta*, 69, 905 (1986).
- 10) H. Ishida, T. Terada, K. Tanaka and T. Tanaka, *Inorg. Chem.*, 29, 905 (1990).
- 11) H. Takeda, K. Koike, H. Inoue and O. Ishitani, *J. Am. Chem. Soc.*, 130, 2023 (2008).
- 12) K. Kiyosawa, N. Shiraishi, T. Shimada, D. Masui, H. Tachibana, S. Takagi, O. Ishitani, D.A. Tryk and H. Inoue, *J. Phys. Chem. C*, 113, 11667 (2009).
- 13) H. Takeda, H. Kamiyama, K. Okamoto, M. Irimajiri, T. Mizutani, K. Koike, A. Sekine and O. Ishitani *J. Am. Chem. Soc.*, 140, 17241 (2018)
- 14) K. Muraoka, T. Uchiyama, D. Lu, Y. Uchimoto, O. Ishitani and K. Maeda, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 92, 124 (2019)
- 15) Y. Amao, R. Abe and S. Shiotani, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 313, 149 (2015).
- 16) Y. Amao and T. Watanabe, *Appl. Catal. B. Environment.*, 86, 109 (2009) .
- 17) R. Kataoka, Y. Amao, *Catal. Today* 307, 243 (2018).
- 18) 姫田雄一郎, *水素エネルギーシステム*, 45, 192 (2000).
- 19) Y. Matsubara, H. Kawakami, Y. Kajita, Y. Satoh and Y. Amao, 35th International Photovoltaic Science and Engineering Conference 2024.11