

ソーラー水素製造の研究開発

— 独創的な光触媒-電解ハイブリッドシステムの実現を目指して —

佐山 和弘*、三石 雄悟

新しい太陽エネルギー変換技術の実用化および再生可能エネルギー社会の実現のためには、今から方向性を見定めて段階的かつ戦略的に研究することが重要である。この論文では、「ソーラー水素製造」の意義を明確化した。さまざまなソーラー水素製造技術を比較し、その実現可能性を議論した。特に著者らが開発した産総研の独自技術である「光触媒-電解ハイブリッドシステム」について、他の技術と比較しながらその有効性を検討した。コスト試算を行うことで、このシステムが低コストのソーラー水素製造のための有力な候補技術になることを示すとともに、その実用化に向けたシナリオについて議論した。

キーワード: ソーラー水素製造、光触媒-電解ハイブリッドシステム、人工光合成、レドックス媒体

Research and development of solar hydrogen production

– Toward the realization of ingenious photocatalysis-electrolysis hybrid system –

Kazuhiro SAYAMA* and Yugo MISEKI

It is important to carry out research strategically and in a step-by-step manner in order to put new solar energy conversion technologies into practical use and to realize a society based on renewable energy. In this paper, we clarified the meaning of “solar hydrogen,” compared various solar hydrogen production technologies, and discussed their feasibilities. Specifically, we showed the effectiveness of the “photocatalysis-electrolysis hybrid system,” which was invented by AIST, as a promising candidate technology for low cost solar hydrogen production, based on preliminary cost estimations. The scenario toward the realization of the hybrid system is also discussed.

Keywords: Solar hydrogen production, photocatalysis-electrolysis hybrid system, artificial photosynthesis, redox mediator

1 緒言: 太陽エネルギー利用技術の意義と課題

化石資源の枯渇問題やその消費で排出される炭酸ガスによる地球温暖化問題が近年顕在化し、それらに対応するためには化石資源依存度をできるだけ早く低下させる必要がある。人類が持続可能な社会を構築し発展を続けるためには、再生可能エネルギーの革新的な有効利用技術の早期開発が不可欠である。再生可能エネルギーの中でも太陽エネルギーは最も膨大であり、風力、波力、潮力、バイオマスの源でもある。地球に降り注ぐ太陽エネルギーの1時間分で世界中の全エネルギー消費量の1年分を賄うことができ、その総量は風力や地熱、水力のそれぞれ約500倍、5千倍、5万倍も大きい。しかし、太陽エネルギーにはエネルギー密度が低いことおよび天候の影響が大きいという二つの重大な欠点があるため、有効利用できる技術が限定されている。太陽光発電や太陽熱利用、バイオマス利用による燃料製造はすでに実用化されているが、これらの

技術の延長上の研究によって化石資源を代替し、地球規模でのエネルギー問題の解決に至るかどうかはまだ見通せない。

エネルギー密度が低い太陽エネルギーをさらに有効利用するためには、太陽光発電以上に安価でかつ非常にシンプルな革新的技術開発が必要不可欠である。太陽エネルギー利用の選択肢の一つに、植物の光合成と同じように光子を直接化学エネルギーに変換する人工光合成技術(Artificial photosynthesis)がある。人工光合成という言葉は非常に魅力的であるが、定義が曖昧であるために誤解を招きかねない。広義には植物の光合成機構の全体または一部を模倣することであり、必ずしもエネルギー問題の解決を目的としない研究も多い。エネルギー問題が顕在化した状況において、新しい太陽エネルギー変換技術の実用化を早期に実現するためには、人工光合成に関しての言葉の意味や研究開発シナリオを再考する必要がある。

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5

Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 5, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8565, Japan * E-mail:k.sayama@aist.go.jp

Original manuscript received July 2, 2013, Revisions received September 19, 2013, Accepted September 30, 2013

2 ソーラー水素製造とは何か

人工光合成技術の中で、光触媒や光電極を用いた「ソーラー水素製造 (Solar hydrogen production)」という言葉が使われはじめています。2012 年度には経産省の未来開拓技術実現プロジェクトにおいてソーラー水素という言葉を用いて光触媒や光電極による水分解水素製造の研究がスタートしている。ソーラー水素製造は太陽エネルギーによる水分解水素製造に特化し、かつクリーンで持続可能な水素社会実現のために用いる(図1)。人工光合成およびソーラー水素製造技術の研究の期待される最終ゴールはどちらも地球規模でのエネルギー問題の解決であるが、後者は目的指向の意味をより強く含んで用いられている点が重要である。光合成機構は明反応と暗反応に大別されるが、光子によりエネルギー蓄積型の化学反応を直接進行させているのは水から酸素を引き抜きながら高いエネルギー状態の還元体を生成する前段の明反応であり、水の分解反応が光合成の基本反応である。もし水を原料として太陽エネルギー由来の水素さえ膨大に製造できれば、後段の暗反応に相当する炭酸ガス固定化反応には多くの既存技術を応用できる。人工光合成の研究の中では暗反応の有機物合成のみに注目した研究例も多いが、明反応のエネルギー蓄積型の化学反応と結びつかなければ、エネルギー問題の解決にはつながらない。人工光合成という言葉から連想される目的や方向性は不明確であり、多くは第1種基礎研究の範疇である。この段階から第2種基礎研究に早急に移行するには目的指向の言葉を意識して用いる必要がある。以上の考えに基づき、この論文では人工光合成技術の中で、太陽エネルギーによる持続可能社会の構築という目的指向で、かつ水を分解して水素と酸素を製造する技術を「ソーラー水

素製造」として第2種基礎研究に位置づけて議論する。(なお、太陽光発電と電気分解の二つの技術を組み合わせるシステムは広い意味ではソーラー水素製造になるが、直接光子を化学反応に利用していないので人工光合成の範疇には入らない。また、太陽光を集光した高熱を用いる発電利用や熱化学サイクルによる水分解はこの論文では扱わない。)

図2にさまざまな太陽エネルギー変換利用技術に関して縦軸を太陽エネルギー変換効率、横軸をコストやシステムの複雑さとしてイメージした技術マップを示す。太陽光発電や太陽熱利用、バイオマス利用による燃料製造は右肩下がりの実用ラインに乗っている。現状の光触媒や光電極を用いたソーラー水素製造技術はまだ実用化には遠いが、第7章で議論するように、将来的には少なくとも太陽光発電+電気分解の組み合わせシステムと比較して、圧倒的にシンプル・低コストでありながら実用的な効率を示す必要が当然ある。ソーラー水素製造技術の実用化と普及、および将来の化石資源に頼らない再生可能エネルギー社会の実現は、決して容易ではなく長い時間がかかるので、今から方向性を見定めて段階的かつ戦略的に研究することが望ましく、将来的にどのような技術が一番早く実用化ラインを超えて最終的なゴールにたどり着くかを見定める必要がある。

この論文では、さまざまなソーラー水素製造技術を比較し、その将来性を議論する。特に著者らが開発した「光触媒-電解ハイブリッドシステム」^{[1][2]}について、他の技術と比較しながら、その有効性や経済性、実用化に向けたシナリオを示すこと、第2種基礎研究のスタートラインに立てるかどうか議論することを主な目的としている。

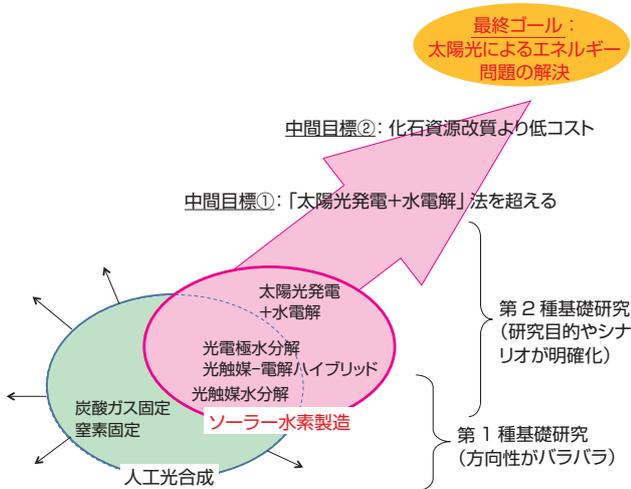


図1 ソーラー水素製造の位置付けおよび中間目標と最終ゴール

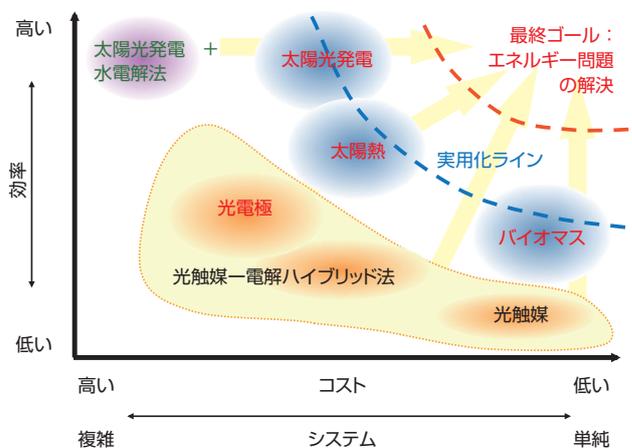


図2 さまざまな太陽エネルギー変換利用の技術マップ

3 ソーラー水素製造の実用化に向けた研究シナリオの重要性とコスト目標

3.1 長期的なシナリオと適切な中間目標の設定

人工光合成やソーラー水素製造の研究は化石資源価格に大きく影響を受けてきた。石油ショックの頃に第一次ブームがあったが、1986年以降石油価格が低下すると研究は急速に停滞した。1990年代になると、地球温暖化問題がクローズアップされ、さらに石油価格が上昇したことから、これらの研究が再度注目を集める状況になっている。米国では2010年からエネルギー省(DOE)のソーラー水素製造の大型プロジェクト(Solar Innovation Hub)がスタートしたが、シェールガス革命で天然ガス価格が大幅に下落してからは、太陽エネルギーへの関心が少し薄れてきている。このように、研究に盛衰の波があるのは仕方がないことであるが、実用化まで長期間かかる太陽エネルギー変換の研究開発にとっては望ましいことではない。長期的な研究を継続するためには、最終ゴールの研究意義の明確化だけでなく、実用化に向けた研究シナリオやロードマップ、中間目標、長期展望イメージの設定が非常に重要になる。まさにこの論文で主張すべきことを多くの人に理解してもらうことが、目標に到達するために最も効率的であり、安定して継続的な研究開発の推進につながる。東日本大震災以降、日本では再生可能エネルギー全般について関心が高まっている。期待が大きい反面、単なる理想論ではなく、実用化までの実現可能性やスピードも注目されている。

これまでに、政府のクールアース推進構想や日本学術会議、応用物理学会、日本化学会等がエネルギー関連のロードマップを作成している。例えば、東日本大震災以降にまとめられた日本学術会議の夢ロードマップ^[3]の中に人工光合成やソーラー水素製造のキーワードが多数出てくるが、その実用化は2030～2040年に置かれている。しかし、遠すぎる未来に単にキーワードが置かれている場合は、研究意義としては認められているが、短中期的な研究推進には役に立たないどころか、ネガティブに働く場合もある。今後は短中期的な戦略シナリオとともに実現可能性の高い中間目標の設定も重要になる。我々は後述のような議論を行い、図1に示すような二つの明確な中間目標、①太陽光発電と水電解を単に組み合わせた方法の水素よりも低コスト化、②化石資源改質の水素より低コスト化、を設定した。

3.2 水素製造コストとしての具体的な中間目標

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の燃料電池・水素技術開発における水素製造のロードマップ(2010年)^[4]ではコストに関する中間目標が記載されている。オフサイトの水素製造コストは、2020年には再生可能エネルギーを用いて低炭素化しながら、天然ガスの水蒸気改質と

同一コスト(30円/Nm³)、2030年にはそれ以下を目指している。一方、大規模太陽光発電コストに関して、政府の設置したエネルギー・環境会議のコスト等検証委員会(2011年末)の報告書^[5]での2030年見通しは9.9～26.4円/kWhである。また、NEDOの太陽光発電のロードマップ(PV2030+、2009年)^[6]では、2020年と2030年での発電コスト目標は14円および7円/kWhである。これらの値を用いて太陽光発電と大型固体高分子水電解装置を組み合わせた場合のコストを電力中央研究所の報告^[7]を基に試算すると、水素製造コストはたとえ7円/kWhの発電目標を達成しても35円/Nm³以上になる。

我々の示した二つの中間目標は太陽光発電や化石資源コストに大きく影響を受けるが、水素製造コストとしてはおおむね中間目標①で35～65円/Nm³を下回る、中間目標②で30円/Nm³以下、に相当する。将来このコスト目標を達成し、再生可能エネルギーを用いたクリーンな水素社会の実現を目指すのであれば、これまでの延長線にない革新的な技術の早期開発が不可欠である。理想的な技術であっても、克服が非常に難しい課題が多数ある場合は実用化に時間がかかることも考慮する必要がある。

4 半導体を用いたさまざまなソーラー水素製造技術の比較

4.1 半導体による水分解の原理

太陽光を利用する第一過程は光吸収材料による光子の吸収である。人工光合成の中のソーラー水素製造の研究において、光吸収材料としては半導体と色素に大別されるが、現状では前者の方が進んでいる。世界中で研究されてきた半導体を用いたさまざまなソーラー水素製造技術の研究は、歴史的には大きく光触媒系と光電極系の流れに分けられる。それぞれの原理を図3に示す。TiO₂光電極による水分解が日本で発明^[8]されて、その後に光触媒水分解の概念が確立された。半導体に光が吸収されると伝導帯に電子および価電子帯に正孔が生成し、それぞれ水の還元と酸化反応に利用される。光吸収と電荷分離の原理は太陽電池と同じであるが、太陽エネルギーを直接水素という化学エネルギーに変換して長期貯蔵できる点でその全体概念はバイオマスを利用した燃料製造に近い。

図4にさまざまな光触媒および電解による水分解技術とその電位図を示す。光触媒の水分解では、伝導帯電位は水素の酸化還元電位($E^{\circ}(H^+/H_2) = 0\text{ V}$)より負に、価電子帯電位は水から酸素を発生する電位($E^{\circ}(O_2/H_2O) = +1.23\text{ V}$)より正に位置する制約がある。また、通常的光電極は図3のように外部バイアス(外部からの電力)を用いる。外部バイアスの使用により、光電極で用いる半導

体の準位の制約が無くなり、電荷分離が促進され、水素と酸素が分離発生できる長所がある。必要な外部バイアスの大きさは、図3のn型半導体の例では、理論上は伝導帯下端電位と H^+/H_2 電位の差になるので、通常の水の電気分解よりも低い電圧にできる。一方、光触媒は半導体粒子それぞれで反応が完結するので、電荷移動距離が短く、単純化できる長所をもつ。

4.1.1 光触媒系の多様化と発展

現在では光触媒系と光電極系は表1のようにさまざまな形態に分化・発展している。光触媒系は従来型光触媒（一段光励起型）、レドックス媒体を用いる二段光励起型光触媒（Z-スキーム型）、光触媒-電解ハイブリッドシステムに大きく分類される。レドックス媒体とは酸化と還元をサイクルしながら電子を受け渡す物質である。二段光励起の反応は植物の光合成と同様であり、電子の2回の光励起とレドックス媒体間の移動のジグザグな過程を形容してZ-スキーム型反応と呼ばれる。光触媒-電解ハイブリッドシステムでは、図4のように外部バイアスを用いるが、理論上はレドックス媒体の酸化還元電位と水素の酸化還元電位の

差になるので、通常の水の電気分解よりも低い電圧にできる。光触媒系はどれも日本の研究が先行している。従来型とZ-スキーム型光触媒はある条件下（太陽エネルギー変換効率で10%等）では30円/Nm³以下の水素製造コストは可能という試算があるが^[9]、表1や5章に示すように実用化のために克服すべき課題は多い。

4.1.2 光電極系の多様化と発展

光電極系はn型半導体、p型半導体、p型+n型半導体、pn接合膜に分類される。n型とp型の半導体を組み合わせたものは外部バイアス無しでも水分解できるようになる。しかし、p型半導体で水素を発生させると、Pt等の過電圧の低い水素発生助触媒の担持が膨大な面積で必要となるため、非貴金属の水素発生助触媒の開発が非常に重要になる。また、大面積での水素捕集のフードが必要である。p型半導体光電極はn型と比較して現状効率が高いが、太陽電池と同様の材料および調製方法で成膜する条件設定ではコストが非常に高くなる欠点があり、その延長上の技術では40円/Nm³以下の水素製造コストの達成は難しい^[9]（DOE試算ではセレン化合物半導体の多接合

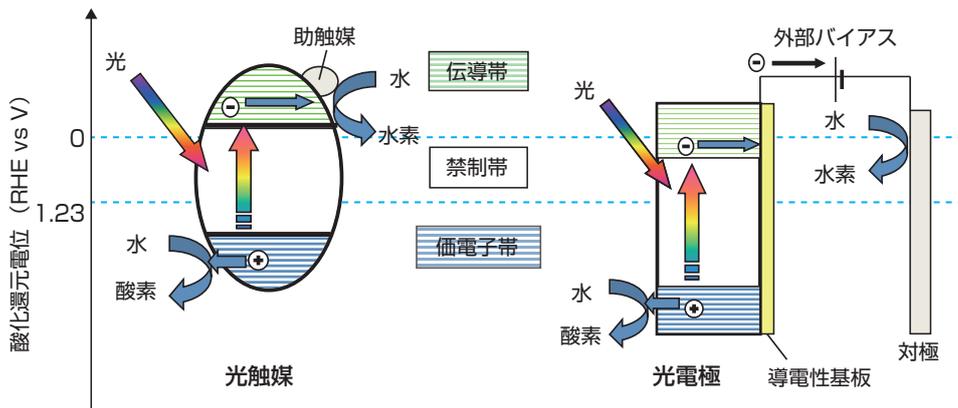


図3 半導体を用いた光触媒と光電極による水分解の原理
半導体に光が吸収されると伝導帯に電子および価電子帯に正孔が生成し、それぞれ水の還元と酸化反応に利用される。光電極の図はn型半導体の例。伝導帯の電子は対極へ移動して水素発生に使われる。

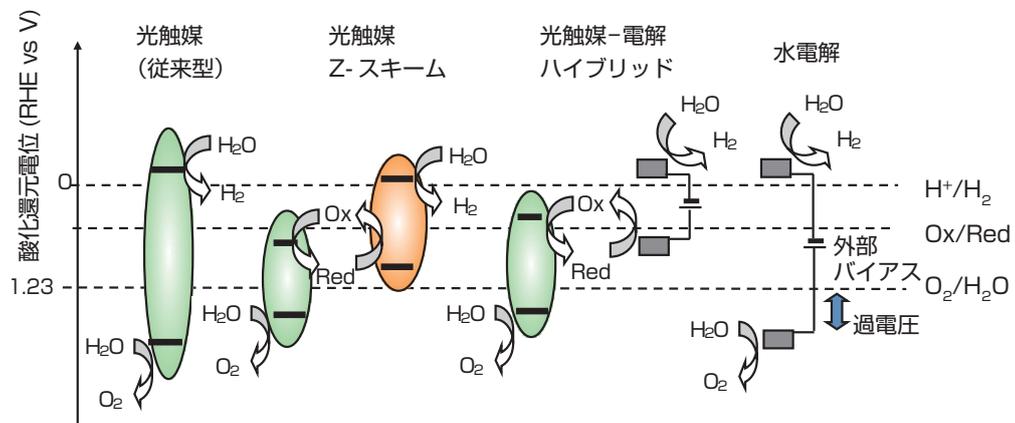


図4 さまざまな水分解水素製造技術とその電位図
OxやRedはレドックス媒体の酸化体および還元体。

表 1 半導体を用いたさまざまなソーラー水素製造技術の比較

	長所	短所
光触媒系	従来型光触媒 (一段光励起)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現状効率が低い ・ 水素と酸素の混合発生 ・ 水素発生用助触媒が大面積が必要 ・ 半導体の電位制約が厳しい ・ 大面積での水素捕集
	二段光励起型光触媒 (Z-スキーム型)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現状効率が低い ・ ガスが分離発生すると活性低下 ・ 水素発生用助触媒が大面積が必要 ・ 大面積での水素捕集
	光触媒-電解 ハイブリッドシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外部バイアス必要
光電極系	光 n 型半導体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対極での水素捕集が容易 ・ 酸化物多く、調製簡易
	p 型半導体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 効率が現状で非常に高い
	p 型+n 型半導体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外部バイアスが不要
	pn接合膜 (バイアス無し)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外部バイアスやケーブル不要 ・ 電荷の拡散長が短い

膜を使用)。n型半導体光電極に関しては明確なコスト試算は公開されていないが、調製方法や水素捕集が簡便、貴金属が対極で集約された利用なので、p型半導体光電極よりも低コスト化できると想定でき、欧州を中心に世界中で研究されている。著者らはn型の酸化物半導体光電極において最も高い太陽エネルギー変換効率の1.35% (外部バイアス考慮済み。Applied bias photon-to-current efficiency: ABPE) を報告している^[10]。

4.2 重点化すべき方式は？

もし研究開発に無限の時間があれば、最も単純な従来型光触媒での水素製造が最も低コストになるかもしれない。しかし近未来、例えば2030年までに実用化を考えるとすれば、将来的な水素製造コストだけでなく実現までの障壁の大小やスピードも考慮すべきである。図2に示すように、多くの技術に関して現状の太陽エネルギー変換効率とシステムコストや複雑さはトレードオフの関係にある。表1のソーラー水素製造技術の中でも同様の傾向がある。これらの長所短所が大きく異なる技術を比較するのは非常に難しいが、実用化を加速するには研究の重点化がある程度必要になる。著者らは、水素製造コストと実現までの障壁の両方を考慮して、独自開発した光触媒-電解ハイブリッドシステムが重点化すべき方式の一つになると考えて研究を行ってきた。次章以降では光触媒-電解ハイブリッドシステムに関して、その原理と開発に至った経緯、現状の進展状況、長所・短所を踏まえた重点化の理由、コスト試算、実用化に向けた研究シナリオについて説明する。

5 光触媒-電解ハイブリッドシステムの原理と長所

5.1 可視光を用いた光触媒水分解の限界

著者らは一段光励起による光触媒水分解の研究を25年以上継続している。紫外線での水の完全分解(H₂とO₂が化学量論比で定常的に生成すること)は多くの光触媒で実現していたが、可視光では困難であった。レドックス媒体を用いる色素増感太陽電池を同時期に研究していた関係で、少し視点を変えて、植物の光合成の二段光励起のZ-スキーム型反応を模倣し、2種類の光触媒とレドックス媒体を用いた水の完全分解に挑戦した。その結果、1997年に紫外線も一部必要であるが、Fe³⁺/Fe²⁺レドックスと光触媒、イオン光反応を組み合わせたZ-スキーム型の完全分解反応に成功した^[11]。さらに、2001年には可視光のみでの光触媒水分解に世界で初めて成功することができた^[12]。

これは、水素発生側にPt-SrTiO₃ (Crドーブ)光触媒、酸素発生側にPt-WO₃光触媒、レドックス媒体としてIO₃⁻/I⁻を用いた系である。この系は人工光合成モデルとして学術的には興味深く、その後いくつかのグループから改良した光触媒の報告があったが、可視光での見かけの量子収率(QE)^{用語1}は6%程度、太陽エネルギー変換効率(η_{sun})^{用語2}は0.1%前後にとどまっていた。特に図4で示したように、伝導帯のポテンシャル制約の問題で最適な半導体材料が非常に限定され、水素発生側の光触媒の効率を高くすることが困難であった。

5.2 光触媒-電解ハイブリッドシステムの発明

光触媒による水分解反応には効率の低さだけでなく、実用化への大きなハードルがいくつかある。水素と酸素が爆鳴気として発生すること、大面積で漏れのない透明な水素捕集カバーが必要なこと、水素発生効率の性能向上のために大量の貴金属助触媒に頼らざるを得ないこと、等である。これらの問題を解決しなければ、例え高性能な光触

媒が見つかっていても実用化は困難になる。そこで著者らはより実用化に近いシステムの未来像を考えていた。

その時に会ったのが Fe^{2+} イオンによる低電圧電解水素製造のパイロットプラントの論文である^[13]。この論文では、石油化学工場から排出される H_2S ガスを焼却処分するのではなく、 H_2S から水素としてエネルギー回収することを目的としていた。 H_2S を Fe^{3+} イオンが存在するプールにバブリングすると硫黄と Fe^{2+} が生成するので、硫黄はろ過除去する。 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ の酸化還元準位 (E^0) は + 0.77 V であるため、 Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化しながら水素を製造すると、電解電圧を 1 V 以下にすることができる (図 4)。通常の水の電解では、理論電解電圧の 1.23 V に加えて、酸素発生過電圧が大きいためにトータル 1.6 ~ 2 V 程度必要である。一般的な水電解による水素製造コストの大部分は電力コストであり、もし大量の Fe^{2+} さえ存在すれば、電解電圧を下げることで水素製造コストを大幅に削減できる可能性がある。

著者らはこれらをヒントにして、図 5 のように光触媒で水を酸化して酸素発生しながら Fe^{3+} から Fe^{2+} を生成し、水素発生低電圧電解と組み合わせる「光触媒-電解ハイブリッドシステム」を考案した^[14]。電解では Fe^{2+} を Fe^{3+} に戻しながら水素発生を行う。全体の反応式を図 5 下に示す。従来型の光触媒では上述の通り伝導帯電位と価電子帯電位の制約があるが、このハイブリッドシステムでは、半導体の電位制約が緩くなり、多くの可視光応答性材料が使える。さらに、光触媒表面上で水素を発生しないので、貴金属の助触媒に頼る必要が無く、水素捕集も非常に容易である。レドックス媒体にはさまざまなイオン対が利用できる。もし酸化還元準位が 0 V (RHE) に近いレドックス媒体を利用できれば電解電圧はゼロに近くなるので、このレドックス反応の光触媒の理論限界効率としては従来型の一

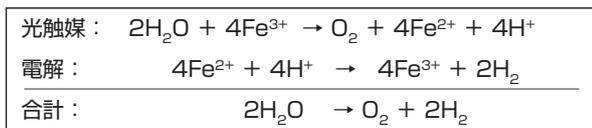
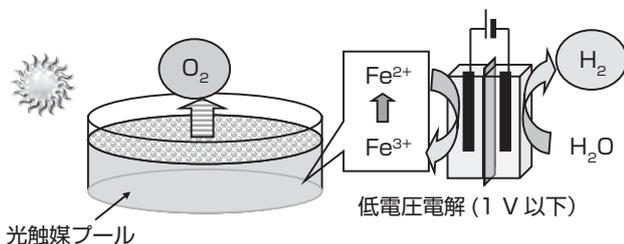


図 5 レドックス媒体を用いる光触媒-電解ハイブリッドシステム
光触媒プールは樹脂製で、光触媒粉末を成膜したフィルムおよびレドックス媒体を含む電解質水溶液から構成される。

段光励起光触媒と同等になる。レドックス媒体の反応自体が蓄電池と同様の機能を持っている。このように、「光触媒-電解ハイブリッドシステム」は、光触媒の Z-スキーム反応の水素発生側光触媒反応を電解と置き換えることで、これまでの光触媒反応の抱えるおおよそすべての問題を解決できる画期的なシステムと言える。

光触媒-電解ハイブリッドシステムで用いる外部バイアスの概念はわかりにくいですが、単なるエネルギーロスでは無いことは強調したい。外部バイアスにより供給されるエネルギーの大部分は水素として変換されている。通常の水の電気分解を 1.23 V で進行することができれば、電力から水素へのエネルギーの変換は 100 % 効率であり、過電圧分だけがエネルギーロスになる。 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ の過電圧は $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ よりも小さいので、エネルギーロスとしては小さくなる。外部バイアスを 1.23 V 以下にできることは、光エネルギーを用いて見かけの電解効率を 100 % 以上にできることを意味する点で重要である。

6 光触媒-電解ハイブリッドシステムの技術的な課題

6.1 レドックス反応の改善

光触媒-電解ハイブリッドシステムの実用化への要素技術を図 6 に示す。技術開発要素は光触媒やレドックス媒体以外に、電解装置およびシステム全体設計まで幅広い。光触媒-電解ハイブリッドシステムの実現のためには、特にレドックス反応に高性能な光触媒の開発が最も重要かつ困難な技術開発要素である。このレドックス反応の光触媒開発の現状を説明する。

鉄レドックス反応において、 Fe^{3+} 還元反応が高効率に進行するためには、 Fe^{3+} イオンが光触媒表面に優先的に吸着し、スムーズに電子を受け取らなければならないため、反応活性は Fe^{3+} イオンの状態に大きく影響されると考えられる。そこで著者らは、代表的な酸素生成用光触媒である TiO_2 粉末を用い、さまざまな鉄塩水溶液からの酸素生成反応を調べた^[14]。その結果、過塩素酸塩での酸素生成活性は、従来使用されている硫酸塩と比べ 10 倍以上高いことがわかった。最適条件での TiO_2 光触媒の見かけの QE は 55 % (365 nm) であった。これは可逆なレドックス反応において、太陽光に含まれる紫外線波長での QE としては最も高い値である。単純な光触媒でこのような高い QE を実現できたことは反応の将来性を推察する上で意義は大きい。

次に、可視光応答性の WO_3 光触媒についても同様に、鉄塩の対アニオン効果を検討した結果、過塩素酸塩での酸素生成活性が最も高かった。過塩素酸鉄水溶液では鉄イオンには水が優先的に配位して過塩素酸イオンは配位しに

くいが、硫酸イオンは鉄イオンに強く配位する。この鉄イオンに対する水やアニオンの配位の違いが活性に影響を与えていると推察される。また、さまざまな金属塩を含む水溶液中で WO_3 粉末に対する表面処理を行ったところ、セシウム塩水溶液中で表面処理を行った WO_3 光触媒が非常に高い酸素生成活性を示すことがわかった^[2]。420 nm での QE は 27 % まで向上し、可視光領域では最も高い値となった。セシウム処理により、 WO_3 表面にイオン交換サイトが新たに形成され、鉄イオンや H_3O^+ が吸着と反応をし易くなるメカニズムが推察される。太陽光のエネルギーが、 Fe^{2+} イオンという化学エネルギーに変換される太陽エネルギー変換効率 (η_{sun}) を計算すると、0.35 % に達した。この値は、バイオ燃料の有望原料作物として知られる雑草のスイッチグラス (0.2 %) を超える値である。また、 WO_3 よりも長波長が吸収できる他の半導体としては BiVO_4 が有望であり、520 nm までの光が利用できる。

鉄イオン以外のレドックス媒体の研究も非常に重要であり、近年いくつかのレドックス媒体が開発されている。 IO_3^-/I^- ($E^\circ = +1.086 \text{ V}$) や $\text{VO}_2^+/\text{VO}^{2+}$ ($E^\circ = +1.00 \text{ V}$)^[15]、 I_3^-/I^- ($E^\circ = +0.545 \text{ V}$)^[16] 等である。 E° がゼロに近づくほど電解に必要な電圧が小さくなる利点がある。現時点では光触媒活性やコスト、安定性、非毒性等の観点で鉄レドックス媒体が最適であると考えている。

6.2 太陽エネルギー変換効率の理論限界の評価

光触媒-電解ハイブリッドシステムの実用化の可能性を議論するために、まず理論限界太陽エネルギー変換効率 (η_{sun}) の見積もりを行った。図 7 は JIS-C-8911 で定められる AM-1.5 全天照射太陽スペクトルデータを基にして、QE を 100 % と仮定した場合の η_{sun} と半導体の光吸収波長端 (L_{max} , nm) との関係を示している。光吸収効率として L_{max} より短波長の光は 100 % 吸収 (光反射や透過のロス無し) と仮定している。ある反応の電位差 (V)

に必要な光子 1 個のエネルギー (eV) は $\lceil 1240/L_{\text{max}} \rceil$ で求められる。V と eV は等価と考えて良い。例として鉄レドックスを用いた場合および酸化還元準位が 0 V の理想のレドックス媒体を用いた場合、光触媒反応における理論限界 $\eta_{\text{sun}}^{\text{m}}$ (レドックスに蓄積されるエネルギー分) を示す。それぞれ 2700 nm および 1000 nm までのより長波長の光も理論上は利用できるが、反応過電圧に関するロス (U_{loss}) をゼロとすることは現実的ではない。 U_{loss} の見積もりに関して、これまでの水電解法では 1.6 V 以下の電解電圧 (U_{loss} として 0.37 V 以下に相当) を達成している。また、光合成においては非常に多くの電子移動過程でそのレドックス媒体の個々の電位差が 0.2 V 程度であることも参考になる。仮に U_{loss} 値を 2 種類の電子移動分の 0.4 V とすれば、鉄レドックス媒体および理想のレドックス媒体を用いた場合、それぞれ 1440 nm および 760 nm まで利用することができ、この時の $\eta_{\text{sun}}^{\text{m}}$ はそれぞれ最大 24 % と 30 % となる。このように $\eta_{\text{sun}}^{\text{m}}$ は現状で得られている η_{sun} と比較して理論上はかなり大きいので、実験値は今後十分に伸びる余地があると言える。

既存の半導体材料に関して、 WO_3 光触媒と同じ 480 nm までの光をすべて吸収し、QE = 100 % で鉄レドックス媒体の還元を行うと $\eta_{\text{sun}}^{\text{m}}$ は約 2.4 % となる。また、 BiVO_4 や Fe_2O_3 のように 520 nm および 600 nm までの光をすべてこの反応に利用できれば 3.6 % および 6.2 % まで達することがわかる。鉄レドックス媒体を用いて、QE を変数とした時の L_{max} と $\eta_{\text{sun}}^{\text{m}}$ の関係を図 8 に示す。520 nm までの光を利用して QE が 80 % 程度とすれば 3 % の $\eta_{\text{sun}}^{\text{m}}$ を達成できることがわかる。光触媒反応の大きな特徴は、粒子 1 個で反応が完結するため、複数の光触媒の混合や積層が容易な点である。光電極で異なる半導体を積層する場合は、伝導帯や価電子帯のマッチングが必要であるが、光触媒ではそれを考慮する必要が無い。つまり、複

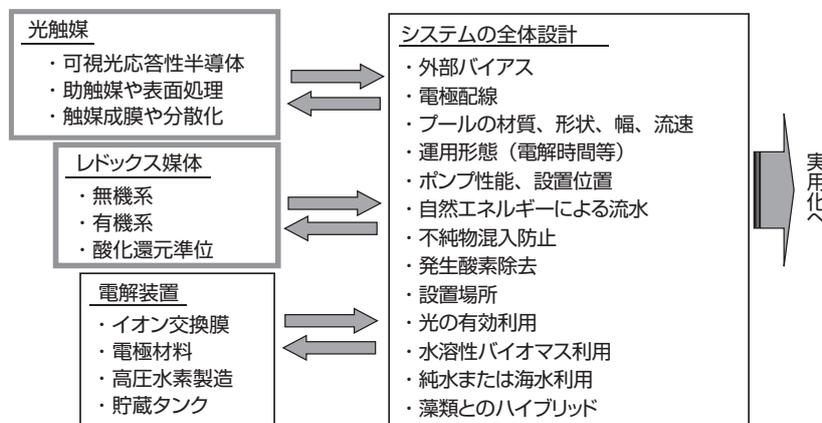


図 6 光触媒-電解ハイブリッドシステムの実用化への要素技術開発とシナリオ
太枠の光触媒とレドックス媒体は大きなブレークスルーのために重点的に研究すべき課題である。

数の半導体光触媒について同時並行で QE を向上させる研究を行い、最後に組み合わせることで全体性能を向上することができる。

6.3 太陽エネルギー変換効率の実用的な評価

次に、実際に得られている太陽エネルギー変換効率 (η_{sun}) について議論する。これまでの成果としては上述の通り、粉末光触媒水分解の η_{sun} は 0.35 % 程度に達していることがわかった。この数字は太陽光発電と比較すればあまりにも小さい数字に見えるが、スイッチグラス等の植物の効率を超えるレベルになっている。例えば、バイオマスエネルギーを利用したバイオマスエタノール生産の場合、トウモロコシの η_{sun} は 0.8 % 程度、最も性能の高い藻類で 3 % 程度である。これは太陽光発電より 1 桁小さい数字であるが、一部の国や地域で実用化しているという事実は重要である。バイオマスエタノール生産はエネルギーを貯蔵できるという、太陽光発電にはない大きな利点もある。このように、 η_{sun} が小さくても条件やコスト次第で経済性が成り立つ場合が十分にある。光触媒水分解の概念は、太陽エネルギーを直接化学エネルギーとして貯蔵できる意味で、太陽光発電よりもバイオマスエネルギーに近いので、バイオマス利用の η_{sun} を超えることが大きなマイルストーンになる。

現状の光触媒による太陽エネルギー変換率は藻類のそれよりもまだ低いが、バイオマスの明反応自体の効率向上は遺伝子組み換えに頼る必要があり、人為的操作には限界がある。一方で、光触媒では材料探索とその調製法を工夫することで効率を飛躍的に高められる可能性がある。さらに、光触媒エネルギー変換貯蔵はバイオマスエタ

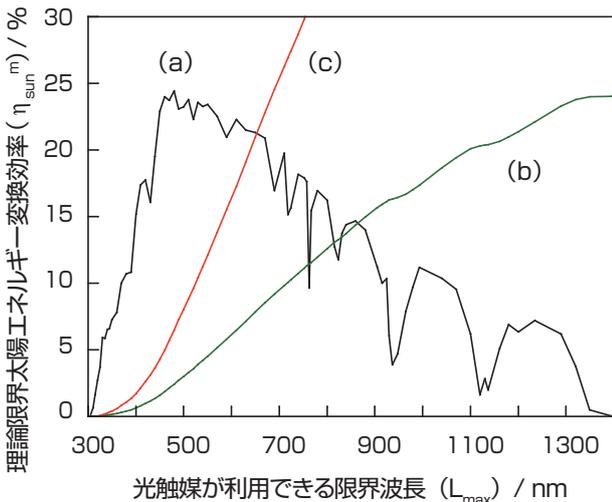


図7 光触媒のレドックス反応の理論限界太陽エネルギー変換効率 (η_{sun}^m) 光触媒が利用できる限界波長までの光吸収効率と量子収率が 100 % の場合 (a) 太陽光スペクトル、(b) 鉄イオンレドックス反応、(c) $E^\circ=0$ のレドックス反応

ノールとは異なり、収穫・粉碎・糖化・発酵等のプロセスが不要であり、枯れない、栽培の世話が少ない、砂漠や海上などどこでも使える、などの大きな利点がある。レドックスを用いた光触媒反応はおよそ開放形に近い単純なプールの進行する、まさに究極の人工光合成系である。バイオマス利用との比較により、 η_{sun} 目標としては 3 % 程度またそれ以上であれば太陽光発電とも十分に競争できると考えられる。

7 光触媒-電解ハイブリッドシステムのコスト試算と実用化の可能性

実用化の議論のために最終的には、システム全体のコスト試算を行って、水素製造コストを比較する必要がある。光触媒-電解ハイブリッドシステムにおいて、中間目標①の太陽光発電と水電解を組み合わせたシステムより低コストで水素製造が可能かどうか、中間目標②や NEDO 目標の 30 円 / Nm³ 以下になるかどうかを試算した。コスト試算の固体高分子膜型水電解については電力中研の報告書を参照した^[7]。また、光触媒プール部分および土地地については DOE の報告書を参考にした^[9]。

比較対象とする水電解装置としては、大型の固体高分子型電解装置 (32,000 Nm³/h) を仮定した。電力コストはその時間帯の最も安い電力を選択して用いるが、8 円 / kWh (夜間電力相当)、40 % 稼働率とした。光触媒-電解ハイブリッドシステムは、鉄イオンレドックスを用いて光触媒の太陽エネルギー変換効率 (η_{sun}) は 3 % とした。光触媒コストは WO₃ の 2 倍、光触媒プールはポリエチレン製、寿命 10 年で減価償却、昼間に Fe²⁺ を生成して夜間 (10 h) のみ電解を行う、とした。結果と計算の仮定の一例を図 9 に示す。上記水素発生に必要な光触媒プール面積は 3 km² となる。光触媒プールコストは 268 円 / m²

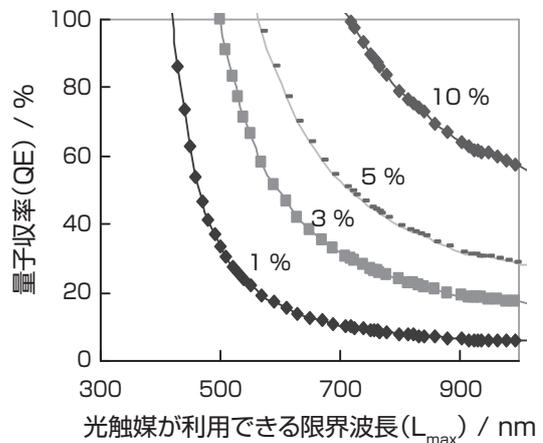


図8 光触媒の鉄イオンレドックス反応 ($E^\circ=+0.77$ V) の量子収率 (QE) と理論限界太陽エネルギー変換効率 (η_{sun}^m) 光触媒が利用できる限界波長までの光吸収効率 100 % の場合

であり、DOE の報告書 (約 300 円 /m²) と同じレベルである。光触媒プール関係 (設備、ポンプ、人件費、土地代、管理費、金利等) のコストの上乗せ金額は 3 円 /Nm³ 前後になる。Fe²⁺ を含む電解液の電解電圧を 0.8 V とすれば、電力部分のコストを約半分にするので、通常の電解と比べてこの部分のコストメリットは非常に大きい。以上の仮定から、光触媒-電解ハイブリッドシステムの水素製造コストは、25 円 /Nm³ 程度になると試算された。同じ条件で、8 円 /kWh の電力を用いた通常の大規模水電解による水素製造コストは、41 円 /Nm³ 程度になる。また 3 章で述べたように、太陽光発電による電力コストは現状で 40 円 /kWh 前後であり、仮に 2030 年の開発目標である 7 円 /kWh が達成されても、水素製造コストは 35 円 /Nm³ 以上となる。以上の試算結果の結論として、中間目標①について、光触媒-電解ハイブリッドシステムによって、太陽光発電と水電解を組み合わせたシステムより低コストで水素製造が可能であることが示された。さらに、太陽光発電を含めどのような電力を用いても、光触媒-電解ハイブリッドシステムによって水素製造を低コスト化できる可能性を示すことができた。また、中間目標②相当の 30 円 /Nm³ 以下も条件次第では達成可能であると言える。以上がコスト試算の基礎データとなる。

実際にはこれを基にコストアップ要因とコストダウン要因を追加考慮する必要がある。コストアップ要因としては、例えば、電力料金や土地関係および台風等の自然災害対策費用である。上記の前提で電力料金を 1.5 倍の 12 円 /kWh とすれば、光触媒とハイブリッドを行った電解システムと行わない通常電解ではそれぞれ 33 円 /Nm³ と 58 円 /Nm³ になる。コストダウン要因としては光触媒の太陽エネルギー変換効率の向上および鉄イオンよりも酸化還元電位がゼロに近い優れたレドックス媒体の開発等がある。理論

限界 (η_{sun}) は上述のように鉄イオンおよび理想のレドックス媒体で 24 % と 30 % 程度なので、伸び代を考慮すれば今後の光触媒の性能向上は十分可能であり、光触媒プールの面積減少につながる。また、理想的なレドックス媒体を用いて電解電力がゼロに近くすることができれば水素製造コストは 14 円 /Nm³ に近くなる。コスト試算結果と実用化までの障壁の低さ (実現可能性と時間) の両方を考慮すると、本システムを重点的に研究する意義は大きいと結論できる。

8 実用化へのシナリオ

8.1 社会的なロードマップ

経産省の未来開拓技術実現プロジェクトの光触媒の研究においては、太陽エネルギーが水素生成に寄与する効率の目標として、2014、2016、2019、2021 年度にそれぞれ 1 %、3 %、7 %、10 % の値が設定されている。最近、総合科学技術会議が地球温暖化対策に向けた 2050 年までの技術開発の工程表を盛り込んだ環境エネルギー技術革新計画の中で、人工光合成やソーラー水素の項目追加を検討しているが、上記の目標を踏襲している。数値目標の定義には曖昧な部分はあるが、太陽エネルギー変換効率として今後の実用化へのシナリオの時間的な目安となるであろう。水素製造コストについて、NEDO の水素製造のロードマップに準じるのであれば、2020 年より前に中間目標①、2030 年までに中間目標②の 30 円 /Nm³ 以下を目指すことになる。

8.2 ソーラー水素製造の今後の研究展開

光触媒 (および光電極) を用いた太陽光による水素製造はこれまで化学分野を中心に発展し、人工光合成の一部として研究されてきた。しかし、今後について著者らは、実用化を加速するために異分野融合 (ハイブリッド) しやす

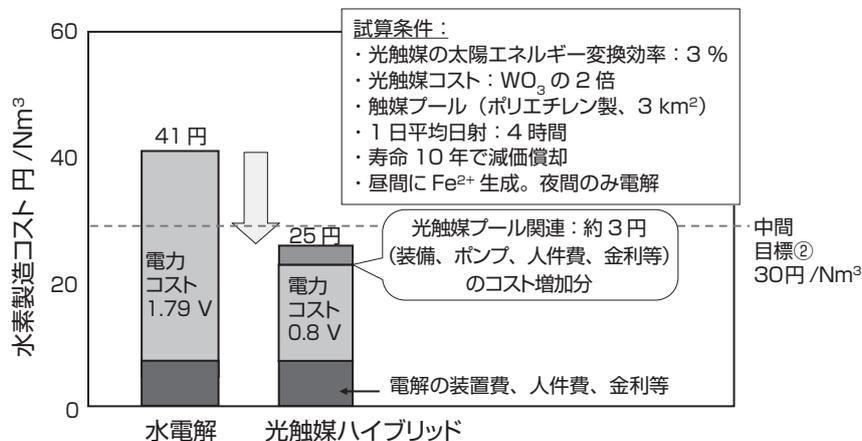


図 9 光触媒-電解ハイブリッドシステムの詳細コスト試算
共通条件: 固体高分子型電解 (32,000 Nm³/h)、電力コスト: 8 円 /kWh、40 % 稼働率

いキーワードとして「ソーラー水素製造」を優先して使用した方が良い、と考えている。第2章で述べたように、ソーラー水素製造は目的指向の第2種基礎研究を明示する言葉である。また、外部バイアス利用の是非について、人工光合成では使わないことを良しとする考えがあるが、ソーラー水素製造では積極的に使いこなす考え方の違いがある。光触媒-電解ハイブリッドシステムが実用化できるかどうかは、光触媒反応の性能向上とともに図6の外部バイアスも含めたシステム全体設計も重要である。この分野の研究者はいまだに非常に少なく、異分野融合（異分野からの新規参入および異分野内部での発展）が進めば実用化への応用展開は加速度的に進むことが期待される。中間目標①の「太陽光発電+水電解」はライバルではなく、さらに異分野融合を進めるべき相手の一つである。

光触媒-電解ハイブリッドシステムはハイブリッド自動車の概念と似ている。ガソリンエンジンとモーターと蓄電池を単純に搭載すると車体価格が上がるのは当然であるが、一方で実際に燃費が良くなるとは限らない。すべての要素技術を最適化してかつ相互にうまく連携することによって初めて燃費が下がる。この燃費に相当するのが光触媒-電解ハイブリッドシステムの水素製造コストである。システム全体の初期投資が大きくなっても水素製造コストが低下できたり、付加価値を高めることができれば実用化への展望を拓くことができる。この研究の初期段階においては、新規の半導体や助触媒等の光触媒材料の新規開発が非常に重要である。著者らは材料開発の高速自動スクリーニング技術に注力している^[17]。半導体の金属の組成や助触媒、レドックス媒体の組み合わせは無数にあり、人力での探索には限界がある。高速自動スクリーニング技術を用いれば予想外の新規材料候補を早期に見いだすことができる可能性がある。さらにこの研究の波及効果として、レドックス媒体の光触媒反応の研究はZ-スキーム型反応の酸素発生光触媒の研究に直接応用できる。また、 Fe^{2+} イオンを用いた燃料電池やレドックスフロー電池の研究も行われているので、高い還元力を持つレドックス媒体を太陽エネルギーによって大量に生成できれば、蓄積されたエネルギーを水素ではなく電力に変換することも可能になる。

8.3 実用的な導入のシナリオ

この研究の初期段階の材料探索と並行して、全体システムの小さな実証試験を早期に行い、問題点を抽出しながら解決する必要がある。光触媒関連は当分大学や研究所を中心に材料開発が進行するが、電解や装置設計に関しては企業がそのポテンシャルを活かしながら早期に参入できるので、産学官連携が重要になってくる。著者らは全体を連結したシステムの小型実証試験を今後行う予定である。

光触媒プールは大きな蓄電池の働きをするので、太陽光発電だけでなく風力発電等のさまざまな変動の激しい再生可能エネルギーとの親和性が高いことも重要な特徴である。再生可能エネルギーの導入拡大に伴って、その出力変動の貯蔵が必要となるが、通常の電池よりも低コストに大量の電力を貯蔵する技術として近年、風力発電や太陽光発電の再生可能エネルギー余剰電力による水電解水素製造が研究されている。立地次第では、この電解装置に光触媒とレドックス反応を組み合わせ、昼間と夜間の電解を組み合わせれば設備稼働率が上がり、水素製造コストをさらに低下させることも可能になる。短い周期および長い周期での大規模な電力負荷平準化に貢献できる。余剰電力利用は、初期の導入実証としてはハードルが低いので、このような余剰電力電解と光触媒とのハイブリッドシステムによる本格的な実証研究が実用化の第一歩になると想定される。

用語解説

用語1：見かけの量子収率 (QE)：ある特定の波長の入射する光子の数に対して、反応に利用された光子数の割合を示す。

用語2：太陽エネルギー変換効率 (η_{sun})：入射する太陽エネルギーに対して、取り出したエネルギーの割合を示す。鉄イオンの反応の場合、水を酸素に分解して Fe^{3+} を Fe^{2+} に還元する反応として蓄積されたエネルギーの割合を示す。農作物の場合は、年間の太陽エネルギー総量に対して、年間で収穫された作物の乾燥物から計算した蓄積エネルギーの割合を示す。 η_{sun} は光吸収波長領域や光吸収効率、QE、光子のエネルギーが物質に蓄積される割合という多くの因子で決まるのでQEの値よりも小さくなる。

参考文献

- [1] K. Sayama, H. Arakawa, K. Okabe and H. Kusama: Jpn. Patent 3198298 (2001); U.S. Patent 09/028495 (1998).
- [2] Y. Miseki, H. Kusama, H. Sugihara and K. Sayama: Cs-modified WO_3 photocatalyst showing efficient solar energy conversion for O_2 production and Fe (III) ion reduction under visible light, *J. Phys. Chem. Lett.*, 1 (8), 1196-1200 (2010).
- [3] 日本学術会議, 理学・工学分野における科学・夢ロードマップ, (2011), <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>
- [4] NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010, (2010), http://www.nedo.go.jp/news/other/FF_00059.html
- [5] エネルギー・環境会議のコスト等検証委員会報告書, (2011). <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryosakutei10/siryosakutei2-2-3.pdf>
- [6] NEDO太陽光発電ロードマップ(PV2030+), (2009). http://www.nedo.go.jp/library/pv2030_index.html
- [7] Y. Asaoka and M. Uotani: Feasibility study on hydrogen production with off-peak electricity -evaluation of the effects of availability and electric power transmission, CRIEPI Research Report, T02039, 1-16 (2003).
- [8] A. Fujishima and K. Honda: Electrochemical photolysis of

- water at a semiconductor electrode, *Nature*, 238, 37-38 (1972).
- [9] B. D. James, G. N. Baum, J. Perez and K. N. Baum: Technoeconomic analysis of photoelectrochemical (PEC) hydrogen production, *DOE Report (2009)*, Contract No. GS-10F-009J (2009).
- [10] R. Saito, Y. Miseki and K. Sayama: Highly efficient photoelectrochemical water splitting using a thin film photoanode of BiVO₄/SnO₂/WO₃ multi-composite in a carbonate electrolyte, *Chem. Commun.*, 48, 3833-3835 (2012).
- [11] K. Sayama, R. Yoshida, H. Kusama, K. Okabe, Y. Abe and H. Arakawa: Photocatalytic decomposition of water into H₂ and O₂ by a two-step photoexcitation reaction using a WO₃ suspension catalyst and an Fe³⁺/Fe²⁺ redox system, *Chem. Phys. Lett.*, 277 (4), 387-391 (1997).
- [12] K. Sayama, K. Mukasa, R. Abe, Y. Abe and H. Arakawa: Stoichiometric water splitting into H₂ and O₂ using a mixture of two different photocatalysts and an IO₃⁻/I⁻ shuttle redox mediator under visible light irradiation, *Chem. Commun.*, 2416-17 (2001).
- [13] S. Mizuta, W. Kondo, K. Fujii, H. Iida, S. Isshiki, H. Noguchi, T. Kikuchi, H. Sue and K. Sakai: Hydrogen production from hydrogen sulfide by the Fe-Cl hybrid process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, 1601-1608 (1991).
- [14] Y. Miseki, H. Kusama, H. Sugihara and K. Sayama: Significant effects of anion in aqueous reactant solution on photocatalytic O₂ evolution and Fe(III) reduction, *Chem. Lett.*, 39 (8), 846-847 (2010).
- [15] Y. Miseki, H. Kusama and K. Sayama: Photocatalytic energy storage over surface-modified WO₃ using V⁵⁺/V⁴⁺ redox mediator, *Chem. Lett.*, 41 (11), 1489-1491 (2012).
- [16] Y. Miseki, S. Fujiyoshi, T. Gunji and K. Sayama: Photocatalytic water splitting under visible light utilizing I₃⁻/I⁻ and IO₃⁻/I⁻ redox mediators by Z-scheme system using surface treated PtO_x/WO₃ as O₂ evolution photocatalyst, *Catal. Sci. Technol.*, 3, 1750-1756 (2013).
- [17] H. Kusama, N. Wang, Y. Miseki and K. Sayama: Combinatorial search for iron/titanium-based ternary oxides with a visible-light response, *J. Comb. Chem.*, 12 (3), 356-362 (2010).

執筆者略歴

佐山 和弘(さやま かずひろ)

1990年3月東京工業大学総合理工学研究科電子化学専攻修了。1997年博士(理学)取得(東京工業大学)。1990年4月物質工学工業技術研究所(当時、化学技術研究所)入所。組織再編で産業技術総合研究所に。現在、エネルギー技術研究部門太陽光エネルギー変換グループ研究グループ長。半導体光触媒を用いた水分解水素製造の研究開発を一貫して行ってきた。太陽光発電工学研究センター革新材料チーム長を兼務し、色素増感太陽電池の研究開発にも従事。この論文では、光触媒-電解ハイブリッドシステムの開発背景や特徴、他の技術との比較や実用化へのシナリオについて主に担当した。



三石 雄悟(みせき ゆうご)

2009年3月東京理科大学大学院理学研究科化学専攻博士課程修了。同年4月産業技術総合研究所に入所。現在、エネルギー技術研究部門太陽光エネルギー変換グループの主任研究員。学位論文より光触媒を用いた水分解のための新材料開発に従事してきた。この論文では、光触媒-電解ハイブリッドシステムのコスト試算について主に担当した。



査読者との議論

議論1 全般

質問・コメント(長谷川 裕夫:産業技術総合研究所、柳下 宏:産業技術総合研究所環境化学技術研究部門、立石 裕:産業技術総合研究所)

この論文は、太陽光水素製造の実用化に向けて、長期にわたる研究開発の推進において重要である、研究開発目標、シナリオの設定を主題とし、基礎研究の成果をプロジェクト化し発展させていく過程が述べられており、シンセシオロジーにふさわしい論文と思われます。一般には、第2種基礎研究として考えている内容が達成されて、初めて、実用化のシナリオができるという研究開発の流れとなると思われます。この研究では特に、実用化シナリオを基礎研究の段階で描いていますが、その必要性、重要性を強調してください。

回答(佐山 和弘)

まさしくご指摘の点がこの論文で最も伝えなかったことです。太陽光水素製造技術開発の歴史は長く、実用化まで長期間を有するエネルギー技術の開発に一般的に当てはまることですが、エネルギー価格の変動やエネルギー政策の転換等の影響により、基礎研究の進め方や方向性が大きく影響を受け、それが研究開発推進の障害となってきたように思われます。このような長い期間を有する研究開発の実用化を効率的に推進するために、明確な開発目標とマイルストーンを定めた長期の研究開発計画と、実用化シナリオの策定が特に重要と思われます。この点を第1章、2章に詳しく述べました。

議論2 シナリオと時間軸

質問・コメント(立石 裕)

一般的に、新しいエネルギー技術の導入を促進し実用化につなげていくためには、付加価値の大きい対象や他の研究開発と組み合わせることによって、高コストでも導入できるところから、実証研究を開始し、それと併せて基礎研究によってコストダウンを図っていく道筋が考えられます。第7章のシナリオの部分では、このような展開を明確に、できれば時間軸について触れながら記述してください。

回答(佐山 和弘)

ご指摘に従って、実用化を目指していく太陽光水素製造の研究全体の流れを時間軸に沿って、第7章の最初の段落に追加記載しました。なお、経産省の未来開拓技術実現プロジェクトの光触媒の研究においては、太陽エネルギーが水素生成に寄与する効率として、2021年度までに10%という目標値が設定されています。総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画の中でもこの目標を踏襲しています。水素製造コストについて、NEDOの水素製造のロードマップに準じるのであれば、2020年より前に目標①、2030年までに目標②の30円/Nm³以下を目指すことになります。

議論3 目標設定、シナリオ、要素技術の構成・統合

質問・コメント(立石 裕)

シンセシオロジーの発刊趣旨の一つでもある、「目標設定と社会的価値を含めて、具体的なシナリオや研究手順、要素技術の構成・統合のプロセス」に関して、より明確に記述し、研究者自らが行った第1種基礎研究をどのように第2種基礎研究、製品化研究につなげていくか、研究分野の異なる研究者から見ても、容易に伝わるように心がけてください。

回答(佐山 和弘)

この研究分野の研究者だけでなく異分野の研究者から見ても良く分かるように、第1種基礎研究を第2種基礎研究および最終目

的であるエネルギー問題の解決につなげていくプロセスを記述しました。

議論4 「人工光合成」について

質問・コメント（柳下 宏）

この論文では、太陽光から水素を効率的製造する技術開発について主に述べられています。一方、この論文のような太陽光水素製造技術を含めて、一般には「人工光合成」という言葉も使われ、その名前を冠した国の研究開発プロジェクトも実施されています。「人工光合成」は植物の光合成と同様に太陽光から最終的に有機物を生産するプロセスと考えてよいのでしょうか。

回答（佐山 和弘）

一般の人が思い浮かべる「人工光合成」は炭酸ガスから有機物を合成するプロセスであり、この論文の対象である、太陽光を用いて水を分解して水素を製造する技術を「人工光合成」に含めることは違和感があると思います。一方、最近の総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画のロードマップ中では、「二酸化炭素回収・貯蔵・利用」の区分の中で人工光合成と太陽光水素製造（ソーラー水素）が掲載されており、二酸化炭素利用と常にセットで議論されてきました。

光合成機構は水を分解する明反応と炭酸ガスを固定化する暗反応に大別されます。エネルギー問題を解決するためには前者を模倣すべきですが、一般には後者に強く注目が集まっています。前者の明反応を模倣した反応の重要性を明快に表す言葉はこれまでは無く、新しい言葉が必要でした。そこでこの論文では、最近少しずつ使われるようになった「ソーラー水素製造」という言葉を用いて詳しく説明することにしました。

分野の歴史的な発展の背景や原理を考えると、「ソーラー水素製造」は「人工光合成」の中でまずは位置づけるのが適切だと思います（図1）。幅広い人工光合成の分野の中で、太陽光水素製造の研究は近年急速に進んでおり、実用化への段階に進めると著者は考えております。この論文では、太陽エネルギーと水から水素を作る持続可能な社会の実現のための目的指向の第2種基礎研究を表す言葉として「ソーラー水素製造」を意味付けました。

一方で、今後に関しては、「ソーラー水素製造」を「人工光合成」の中で継続して位置づけることは弊害を生むかもしれないと考えています。例えば、「人工光合成」の言葉は、化学分野や第1種基礎研究と強く結びついており、「ソーラー水素製造」技術を実用化していくために不可欠である異分野（特に物理や工学、企業）での発展を難しくさせるのではないかと考えています。第1種基礎研究から第2種基礎研究への重心移動を表すキーワードとして「ソーラー水素製造」を今後広く使っていくのがよいと思っています。

議論5 実用化時期

質問・コメント（柳下 宏）

太陽光水素製造技術の実用化には、まだ多くのクリアすべき課題が残されており、遠い将来の技術と考えられている場合も多いと思われます。実用化時期についてはどのような見通しを持っておられるのでしょうか。

回答（佐山 和弘）

太陽光発電が、現在のように一般家庭に急激に普及することを20年前では想像できなかったように、「ソーラー水素発電」についても原理や前提が的確でシナリオが明快であれば、技術のブレークスルーにより実用化の展望は急に開けると考えています。第7章で記述したように、まずは余剰電力での実証研究が第一歩と思われるます。

議論6 研究開発の今後の戦略展開とシステム

質問・コメント（立石 裕）

この論文は燃料電池を中心とした水素社会を前提としていると思われる。燃料電池は定置用と自動車用が想定されますが、前者は化石燃料改質、後者は純水素利用が現在の流れとなっています。他方、太陽光発電は電気出力が直接得られるのが、現代社会における強力なセールスポイントとなっています。太陽エネルギーを水素のようなエネルギー媒体に変換して貯蔵することは、出力の時間的・空間的安定化の点では効果がありますが、同時に新たな課題も発生します。どうやって水素を貯蔵するのか－高圧、水素吸蔵物質、液化水素等が考えられます。そしてどのように輸送するのか。

また、この論文で提案されているシステムを実際に建設する場合、それが市街地なのか、砂漠や草原のような地域なのか、立地による技術的課題の差が考えられます。

このようなエネルギーシステムの設計を同時に進めることが必要であり、研究開発の今後の戦略展開において、ぜひシステムの人との議論をしていただければと思います。

回答（佐山 和弘）

我々のこれまでの研究の一番の動機は、太陽エネルギーの変換貯蔵の実現であり、もし、太陽と水から大量に水素が製造できればそれだけで非常にうれしいことですし、その利用法を考える研究者は大勢いるので、研究はどんどん進むのではないかと考えています。

一方で実用化にはエネルギーシステムとの設計と表裏一体と認識していますので、今後はシステムの関連の研究者を巻き込んで議論し、ソーラー水素製造の実用化を目指していきたいと考えています。