



CanApple ニュース (156)

カーボン・エネルギーコントロール社会協議会 (CanApple)

事務局：民秋均

発行責任者：井上晴夫

編集責任者：八木政行

光触媒によるソーラー水素の経済性

三菱ケミカル株式会社

瀬戸山 亨

● 太陽光応答光触媒による水の全分解によるソーラー水素の製造コスト目標

2012年に経済産業省の直轄事業として開始され、現在NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization: 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の事業として継続実施中の“人工光合成”プロジェクト(二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発¹⁾)は、太陽光に応答する光触媒による水の分解によって発生する水素(以下、ソーラー水素)と産業部門で排出されるCO₂を原料として化学原料であるエチレン、プロピレン等を生産する為の各種の革新的触媒プロセス技術の開発を進めてきた²⁾。

人工光合成由来の化学原料が化石資源由来のそれを代替するには少なくともその製造コストが化学品と同等以下であることがまず要求されると考えるべきだろう。プロジェクトではまずソーラー水素の目標製造コストを定めることとした。国際エネルギー機関(IEA)はCO₂削減に向けた化石資源使用量削減に向けた価格シナリオをいくつも提案してきたが、その中で最も低価格の予測がLow Oil Policy Scenarioであり³⁾、そこでは2030年の原油の国際取引価格を70ドル/バレルとしていることがIPCCによって報告されている。これとエネルギー等価となる天然ガスの改質法による水素の製造コストを社内データ及びいくつかの技術レポートをベースに見積もったところ、350円/kg-水素(≒30円/Nm³-水素)となった。メタン改質技術は工業化済の技術であり多少の振れ幅はあるにせよ概ね妥当な数字であると考えている⁴⁾。これを償却期間中のソーラー水素の目標製造コストとした。

プロジェクトで目指す人工光合成において光触媒によるソーラー水素製造量は触媒活性と日照時間と緯度に依存する。赤道直下で降雨の殆どない地域と緯度が高く雨の多い日本では同じ光触媒性能あっても大きく年間水素製造量が異なる。

表1に太陽光の水素への変換効率(Sun light Conversion to hydrogen: STH)を10%とした場合の赤道直下と日本における光触媒モジュールの限界コストを示す⁵⁾。単位面積(1m²)あたり1年間に発生する水素、酸素の量にそれぞれの想定価格を乗じた金額に対し、光触媒モジュールの寿命を考慮した年平均償却費はそれ以下でなければ経済性が成立しない。表中の青字の条件は経済性のあるもの、赤字の条件は経済性がないものを示す。

表1 変換効率STHを10%とした場合の赤道直下と日本における光触媒モジュールの限界コスト

立地 年間日射時間		赤道直下 4000時間	日本 1900時間				
実質年間日射量(理論量×0.75)		1950KWh/m ²	1050KWh/m ²				
太陽光の水素への変換効率 (STH)		10%					
単位面積当たりの年間 ガス生成量	水素	5.93kg/m ²	3.22kg/m ²				
	酸素	45.4kg/m ²	25.8kg/m ²				
ガスの経済価値(生産 額/m ² ・年	水素 (350円/kg)	2076円	1127円				
	酸素(10円/kg)	474円	258円				
	年生産合計額	2550円	1385円				
償却前提 率	複利 4%/年	利 モジュール コスト	償却期間	年平均償却 費/m ²	年生産合計額- 年平均償却費	年平均償却 費/m ²	年生産合計額- 年平均償却費
経済性 評価	平均返済額 /年	20000 円/m ²	10年	2720円	170円	2720円	1335円
			20年	1440円	1110円	1440円	55円
		10000 円/m ²	10年	1360円	1190円	1360円	25円
			20年	720円	1830円	720円	665円

* : 青字の条件は経済性のあるもの、赤字の条件は経済性がないものを示す。

日照時間が長い赤道直下の方が高いモジュールコストが許容できる。立地条件や水素・酸素の想定価格。償却条件等により変動するにせよ、モジュールコストとしては2万円/m²以下程度、償却期間としては10年以上が必要と考えるべきだろう。国内におけるシリコン太陽電池の価格は4~6万円/m²程度であり⁶⁾、それと比較すると1/3以下程度の製造コストを実現する必要があり相当ハードルが高いように思えるが、筆者が丸紅社の好意で見学する機会を得たアラブ首長国連邦(UAE)において2019年に稼働を開始したSweiham太陽光発電所においては、単結晶シリコン太陽電池を使用しているにも関わらず1.5万円/m²程度が実現しているとされている(太陽光敷地面積:7.8km²、総建設費:約1,200億円)⁷⁾。この値は人工光合成で目指す光触媒モジュールの目標コストとほぼ同等であるが、日照時間を考えれば、日本国内での3.0万円/m²相当であり、立地条件の経済性に与える影響の大きさを如実に示している。

● 光触媒法によるソーラー水素の経済性についての考察

光触媒法による水素製造は、光エネルギーを電気に変換することなく直接水分解に利用する形態であり触媒活性が直接製造コストに反映されることになる。結果的に償却完了後は「水の原料費+維持費+プロセス運転費」がコストの大部分になるので減価償却期間中の平均コストと比較すると大きな低下を期待することができる。水分解は、分離膜によって水素と酸素を分離する必要があり、分離膜の駆動力として、なにごしかの差圧を必要とし、大気圧か多少の微加圧状態で実施されると考えられるため、そのプロセス運転費は小さい。必要とされる水の量もそれほど莫大なものでない(10万トン-水素/年の場合、年間90万トン、一日換算で2500トンの淡水化設備程度)。概略の見積もりでは償却完了後は、償却期間中の平均値の3割以下まで水素製造コストは低下することが期待できる。

表2及び表3に光触媒プラントの規模感をイメージとして示す。

- 光触媒モジュールの変換効率STHは10% モジュール単価1万円/m²
- 水素生産量は11.9万トン/年(13.3億Nm³/年)
- 副生酸素は7割回収、酸素単価は7円/kg、酸素生成量は66.4万トン/年
- 光触媒モジュールの減価償却期間は10年、複利返済利率は4%/年

ここでは償却期間を10年とした。これは石油化学産業における化学プロセス新設時の償却期間が一般的に7～10年であるため、このような仮定をおいたが、大規模太陽光発電設備の場合は、償却期間は20年以上とされる場合が多い。我々の見積もりは、相当負荷の高い条件であるといってもよいが、現時点では触媒寿命が不明（今後の課題）の為、短めに設定した。また実際には単位面積当たりの触媒使用量は、数g/m²程度であり、原材料費+製造工程費を考慮しても、二年程度の触媒寿命があれば、触媒費は数100円/年以下となり、これは毎年の消耗品としても良いかもしれない。すなわち筐体、光透過窓材、分離膜、配管等のモジュール構成要素は20年程度の償却期間、光触媒シートは消耗品という風に考えることもできる。

表2 設備投資額の見積り

項目	単位	日本 (AM1.5)	赤道直下 (AM1.0)
パネル設置面積	km ²	27.7	15.1
光触媒モジュール単価（目標値）	円/m ²	10,000	10,000
設備投資額①	億円	2,770	1,510

*：モジュール単価は目標値の1万円/m²としている。

表3 設備投資額の見積り

項目	単位		金額
運転コスト②（維持費+プロセス運転費）	円/kg	水素単価に換算	30
原料水コスト③	円/kg	水素単価に換算	0.9
副生酸素④	円/kg	水素単価に換算	40

②の運転コストはクラッカー設備との比較では1.5倍程度の値を採用、また原料水コストが極めて小さいこと、深冷分離の設備投資なしに60万トン/年の酸素が副生できることになる。

いまだ実現していない様々な仮定をおいているので、予想される水素製造コストを具体的な数字として例示するのは差し控えるが、赤道直下立地であれば、償却期間中で150円/kg-水素程度、償却完了後は20円/kg-水素以下となる。日本立地の場合でも償却期間中平均で300円/kg-水素以下となり、目標製造コストとした350円/kg-水素（=30円/Nm³-水素）はクリア出来ることになる。実際には様々な諸費用が加算されるので、これより高い製造コストになる考えられるが、一般的な化学プロセスと比較すると圧倒的に危機数の少ない光触媒によるソーラー水素プラントが高い経済性を持つ可能性があることが理解できると思う。さらに、減価償却完了後のソーラー水素とCO₂から合成したオレフィンが安価になることは容易に想像できる。立地条件として不利な日本国内においては、オレフィン製造を考えるよりも水素社会を目指すというビジョンに歩調を合わせて、ソーラー水素を直接利用するという事も考えられる。国内でSTH=10%が実現できれば3ヘクタールの設置面積で100トン/年の水素製造が可能である。これは設置面積としては都市部であっても可能な広さであり大型店舗の屋上・屋根、高層ビルの側面等を利用すればよく整備の進む水素ステーションに純粋なゼロエミッション水素として供給することも可能だろう。

このように人工光合成が経済合理性のあるレベルで社会実装できれば地球規模での大幅なCO₂排出削減に寄与できると考えている。“人工光合成”プロジェクトを開始した2012年の時点から「社会実装の時期は2030年頃！」と明言し、そのRoad Mapは基本的に変更していない。

光触媒の高活性化と光触媒シートを対象とした安価なモジュール製造技術開発 (1-4-2 参照), 水素/酸素の安全分離技術の工業プロセスとしての実証 (1-4-3 参照), Field テスト等による耐久性テスト等のソーラー水素製造に関わる技術と, CO₂の資源化 (CCU 技術) として開発を進めてきた CO₂と水素からの反応分離型のメタノール合成技術 (1-4-4 参照), 人工光合成プロジェクト外で検討してきた反応分離型のアンモニア製造技術など, ソーラー水素の社会実装に先行して実用化すべきものをどのように実践していくかが必要不可欠であると考えている。

人工光合成は太陽光照射のある時間帯に限定されるため特に大規模プロセスにおいてはプロセスの安定運転が不可欠であり、よほどの高効率の人工光合成が実現できるまでは化石資源を利用したプロセスとの複合化は不可避である。化石資源を利用した公知技術に比較して大きく CO₂排出削減に寄与できる革新的 C1 化学 (メタン原料) と、それと技術互換性のある人工光合成をシームレスに連結していく必要があると思う。

既存の化石資源を利用したエネルギー産業のインフラは巨大である。大幅な CO₂削減を目指してこれを転換するには技術自身は非連続の革新技術であることが必要だが、実際の転換においては“非連続転換＝一挙に転換する”ことは既存事業との整合性 (供給責任、完成までの所要時間)、巨額の設備投資負担と期待利益が小さいといった観点で現実味が乏しい。これはトランプの 7 並べと似ていると思う。いくつかの起点とポイントから、最終目標に向けて連続的にカードを並べていくことが必要であり、離れた位置にカードを置くことはできない、また日本においては水素社会の実現ということで、日本国内での技術開発、事業化を念頭に置きがちだが、気候変動問題への有力な対応策として立地や時間軸を考慮した世界全体に波及・展開すべき課題であるということ認識すべきである。STH=10%でソーラー水素で全世界の消費エネルギーをまかなおうとするとサハラ砂漠の 3%程度の面積で足りる。日本の総面積の 8 割程度に相当する。これを広いと思うか? この程度と思うか? 真にカーボンニュートラルな未来社会を実現するにはこうした点を考慮した長期戦略が必要である。

<参考文献>

- 1) <https://www.nedo.go.jp/content/100899249.pdf>
- 2) T.Setoyama, et al., Faraday Discuss., 2017, 198, 509-
- 3) World Energy Outlook 2017, Chapter 4
- 4) https://mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/072/
- 5) Pinaud, B. A. et al., Energy Environ. Sci. 6, 2013 1983-2002
- 6) Si-PV ; 20~30 万円/kW、変換効率 15~20%から
- 7) <https://www.power-technology.com/projects/swiham>

➤ 著者

瀬戸山亨

三菱ケミカル株式会社

Science & Innovation Center, Setoyama Laboratory 所長、エクゼクティブフェロー

NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」プロジェクト・リーダー