

再生可能エネルギー活用のためのグリーン水素

Green Hydrogen for Renewable Energies

太田健一郎*

1. はじめに

大気中の二酸化炭素濃度が上昇し、近いうちに地球レベルでの温暖化が進み、南極の氷が溶け、海面が上昇し、小さな島は水没することが心配されている。大気中の二酸化炭素濃度を最も長期に観測しているハワイのマウナロアにある観測所から2013年5月9日に大気中の二酸化炭素濃度が400 ppmを越えたと報じられた。この濃度は氷河時代を含めて、人類がこれまでに経験していない高濃度であり、近年の地球温暖化、さらには地球規模での異常気象との関係で、人類の未来に大きな警鐘を鳴らしていると言える。

図1をみると過去ほぼ程度で一定であったものが産業革命以降1800年を境に急速に増大している¹⁾。これは化石燃料の使用量増大と密接な関係があるのは明らかである。産業革命は蒸気機関をもたらし、人類が豊かな文明を築くことになる。蒸気機関は石炭火力を使うことになる。従来、せいぜい薪や炭といった木材資源に頼っていたものが、よりエネルギー密度の高い石炭という高度なエネルギーを得た

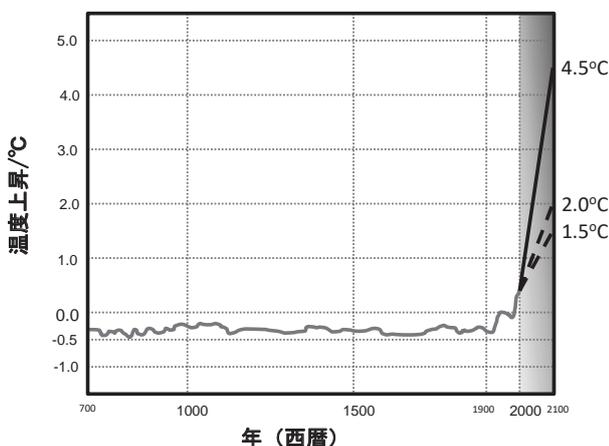


図1 急速に進む地球温暖化(年変化)

ことになる。その後は石油、天然ガスといった、より高度なエネルギーをふんだんに使い近代文明が成立している。IPCCの勧告にあるように、地球の温暖化を今より1.5°C、あるいは2°C以下に抑える必要があり、このためには二酸化炭素濃度を450 ppm以下にする必要がある。

2015年に開催されたCOP21ではパリ協定が締結され、今世紀末までの温暖化を2°C以下、できれば1.5°C以下を目標にすることが決められた。しかし、世界のエネルギー消費は増大しつつあり、その主たるものは化石燃料である。温暖化対策も考えて今後は再生可能エネルギー利用を拡大することが叫ばれ欧州を中心に強力な政策が進められている。再生可能エネルギーとしては水力、太陽光、風力、地熱、バイオマス等多種が考えられるが、多くのものは地域的に偏在しており、時間的な変動も大きい。この対応として貯蔵、輸送できる二次エネルギーとしての水素が注目されている。ここでは再生可能エネルギーを用いて水から作られた水素を「グリーン水素」と定義し、これについて考えてみることにする。

2. 再生可能エネルギーと電気

再生可能エネルギーとは自然エネルギーとも呼ばれるが、基本的に無尽蔵であり、地球全体で考えたとき莫大な量が存在する。化石エネルギーの有限性と人類の、これから1000年以上の持続型成長を考えたとき、近い将来この再生可能エネルギーに頼らざるを得ない。

水力発電は古くから活用されている。ないしは大型発電所で人類が初めて大量の電気を得たのは水力発電を利用している。安価でダムという貯蔵機能を有しているため、再生可能エネルギーとしては使い

*燃料電池開発情報センター 代表

易いが、包蔵水力の制約があり、大型のものは既に開発済で、環境保全を考えると、今後大幅に増大するのは難しい。

太陽光発電は我が国政府が真っ先に取り上げ、固定買い取り制度を充実させて普及促進を図った。ポテンシャルを考えると、日本ではどこでも可能であるが、土地の面積に依存することになるので、小さな島国のわが国では大きくは望めないはずである。さらに少なくとも夜間は発電出来ないので、貯蔵とともに平準化は重要な課題である。

風力エネルギーは水力発電とともに安価に電力を生み出すことができるが、地域に依存することが多い。すなわち風況の良いところで多くの電力が得られる。イギリス、ドイツを含む北欧は偏西風もあり、風力発電の盛んなところである。わが国では北海道、並びに北東北がそれにあたるが、地域差は非常に大きい。海外での好風況地に目を向けると、かなり安価な電力を得ることが可能である。

バイオマスとしてはエネルギープランテーションとしての植物育成も考えられるが、現状、我が国では間伐材等の廃棄物が多く考えられている。これも集積コスト等を考えると、それほど多くは望めない。火山国である我が国は地熱発電への期待も大きい。時間的変動も少なく、使い易い。しかしこれも地域が限られており、全国でまとめてもそれほど多くは望めない。

安価で大量の再生可能エネルギーとなると太陽光と風力がまずは考えられる一次エネルギーである。これらはいずれも電気エネルギーに変換されて利用される。19世紀の末、発電機が発明され、大規模に電気エネルギーを利用できる可能性が広がった。現代では、電気エネルギーは二次エネルギーとして使う場ではクリーンであり、制御も容易であるので、あらゆるところで利用されている。他方、電気エネルギーは作るとともに直ちに消費する必要がある。目下のところ、我が国では電力需要を予め予想して発電量を制御するという、芸術的な技術を使うことにより、大きな問題は発生していない。しかし、これからの電気エネルギーの需要増大、さらには時間変動の大きい再生可能エネルギーの導入増大による需要／供給のミスマッチが考えられ、電気エネルギーの有効な貯蔵方法の開発は必須である。

揚水発電は変換効率も高く、系統がしっかりしているところではかなり有効な手段である。特にわが国では原子力発電の平準化運転と需要変動を吸収する手段として積極的に進められてきた。今後の原子

力発電については、福島原発の災害を経験した我が国としては積極的な活用は避けるべきであろう。この余った揚水発電設備を活用することは電力貯蔵には有効な手段となるはずである。

このほかに物理量として電気を蓄えるために、気体圧力、フライホイール、超電導コイル (SMES)、キャパシタを用いる方法があるが、気体圧力を除き大量の長時間貯蔵には向いていない。

水素を、変動が大きく、地域に遍在する再生可能エネルギーの大量貯蔵、大量輸送を目指して活用する計画が進められている。太陽光発電、風力発電で得られた電気を水電解により水素に変換する。この水素は貯蔵、輸送でき、燃料電池を用いて電気に小規模でも高効率で変換することは容易である。この際、二段のエネルギー変換過程を経るので総合効率の低下を主張する向きもあるが、ここでは無尽蔵でCO₂フリーな再生可能エネルギーを用いるので、最終的にはコストが最も重要な因子となる。

3. 再生可能エネルギーと水素

3.1 グリーン水素エネルギーシステム

地球環境を考えると、物質循環は重要なポイントである。我々は地球から多くの資源を掘り出し廃棄している。石油、天然ガスと言った化石エネルギーは掘り出した後、二酸化炭素と水になり、廃熱と共に地球環境に放出されている。現在、この二酸化炭素濃度が400 ppmを越えるようになり、地球温暖化の主たる要因と考えられる。これは地球の大気中での二酸化炭素循環が化石燃料の消費に比べて量的に不十分であることを示している。一方、水は海洋に莫大に存在しており、その地球レベルでの循環に対する効果は大きいはずである。表1には地球上に存在するCO₂とH₂Oの存在量とその動きを示す²⁾。

具体的に人類のエネルギー消費に基づく物質循環の増加が二酸化炭素及び水循環に与える影響を定量的に考えてみる。ここでエネルギー環境負荷係数 (Environmental Impact Factor of Energy) を次式で定義する。

表1 地球上の二酸化炭素と水の存在量と循環量

	二酸化炭素	水
全量	80 Tt	1,400,000 Tt
大気中存在量	2900 Gt	12,900 Gt
大気からの年間移動量	600 Gt	520,000 Gt
平均滞留時間	5 年	10 日

(エネルギー環境負荷係数)

$$= (\text{人類活動による排出量}) / (\text{媒体物質の自然放出量}) \quad (1)$$

この定義から、エネルギー環境負荷係数が大きな物質ほど、自然の循環に与える影響が大きいことを意味する。大気から地表への年間移動量を自然放出量とすると、化石エネルギーにより放出される二酸化炭素のエネルギー環境負荷係数は全地球で見ると0.036となる。いま地球では二酸化炭素による地球温暖化問題が深刻になりつつある。すなわち、この環境負荷係数は、少なくとも、この0.036以下にすることが、当面の課題と言える。一方、水の自然放出量を大気から地表への年間移動量とすると、再生可能エネルギーを用いたグリーン水素のエネルギー環境負荷係数は0.0001と極めて微小な値となる。これは二酸化炭素の1/360であり、グリーン水素をエネルギーキャリアとした方が自然の循環に与える影響は格段に小さいと言える²⁾。

エネルギー消費密度が高ければ、環境への影響は大きいはずである。

図2には我が国を都道府県単位に考え、化石燃料を用いたことによる環境負荷係数、並びに仮に、全てのエネルギーがグリーン水素エネルギーを用いたと仮定したときの環境負荷係数を、エネルギー消費密度を軸にして示してある²⁾。グリーン水素、化石燃料の環境負荷係数はエネルギー消費密度が大きくなるにつれ大きくなる。さらに水素のエネルギー環境負荷係数は何れのエネルギー消費密度でも化石燃料のそれに比べて二桁以上小さい。ここから考えると、再生可能エネルギーを一次エネルギーとするグリーン水素エネルギーシステムを導入することにより、どのようなエネルギー消費密度であっても、環境に対する影響は二桁以上小さくできるといえる。

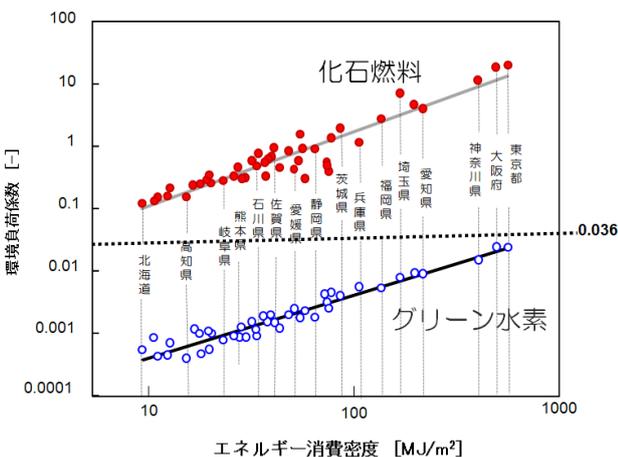


図2 エネルギー消費密度 vs 環境負荷係数

すなわち、グリーン水素エネルギーシステム社会が実現できれば、これからの地球規模での人口増大、文明高度化によりエネルギー消費が今より一桁増えても、その環境への影響は一桁少なくて済むはずである。グリーン水素エネルギーシステムが、人類が豊かな文明をわずかな環境への影響で享受出来る究極のクリーンエネルギーシステムになることの定量的な意味である。

水素は二次エネルギーであり、一次エネルギーを利用して作る必要がある。図3にはグリーン水素エネルギーシステムを模式的に示す。

一次エネルギーとしては化石燃料、原子力、再生可能エネルギー何れを用いても水素を作ることは可能である。しかし、前述のとおり、究極は再生可能エネルギーを用いることを考えるべきである。

再生可能エネルギーからの水素を究極の二次エネルギーと考えたとき、そのコストを考えることは必須である。豊かな文明は安価で豊富なエネルギーに支えられる。地球温暖化対策として有効になるには、現在に比べて格段に大量で、低価格の水素が得られなくてはならない。そこでは、その製造法と共に、一次エネルギーである再生可能エネルギーが安価で大量に得られる必要がある。我が国で安価な再生可能エネルギーは水力発電か風況の良いところで得ら

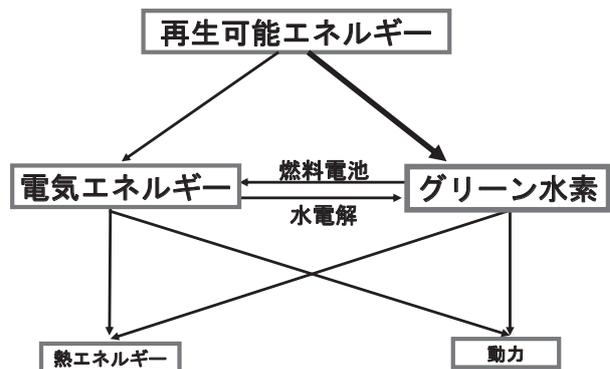


図3 グリーン水素エネルギーシステム

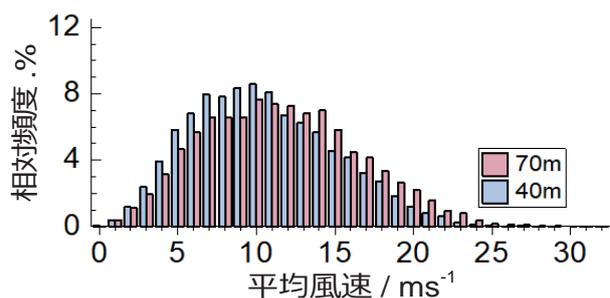


図4 パタゴニアにおける風況測定例

れる風力エネルギーとなるであろう。しかし、我が国では新規な大規模水力発電の場所はない。風力発電の適地は北海道、並びに東北北部に限られる。まずは電力システムのそれほど強くないこれらの地域での風力エネルギーを水素に変えて利用することを考えるべきであろう。

水素のコスト目標を 30 円 /Nm³ とすると再生可能エネルギーからの電力を 5 円 /kWh 以下とする必要がある。この価格は国内で実現することは困難である。しかし、眼を海外に向けるとこれを実現できる再生可能エネルギーが存在する。条件の良い水力発電と風力エネルギーがこれに該当できる。ノルウェーないしはカナダの水力発電はかなり安価なコストであり、米国砂漠地帯の風力発電は、風車の耐久性が確保できたものは安価な発電コストとなっている。

3.2 パタゴニアの風と水素

南米、アルゼンチンの南部、パタゴニア地方は風の強いことで有名である。パタゴニア地方とは、チリ領も含まれるが、我々が注目しているのはアルゼンチン領南部のチュブット州、サンタクルス州である。この地方の面積は 47 万 km² であり、日本よりわずかに大きい。人口はわずか 60 万人程度と日本の 1/200 である。アンデス山脈の東に広がる広大な平原地帯である。南半球で偏西風が吹く、唯一の大きな陸地であり、アンデス山脈にぶつかって、冷やされ、密度の高くなったアンデスおろしの強い風がパタゴニアに常に吹いている。

我々は NEDO 並びに水素エネルギー協会のご援助を得て、パタゴニア地方の何か所かでこの風況観測を続けている。図 4 にはその計測結果の一例を示す。ここでは 70 m と 40 m の二高度に超音波風速計を据え付け、三次元で 10 Hz の高時間分解で計測を進めている。この測定で 70 m の高度では平均風速は 11 m/s 以上であり、その年間効率（稼働率）は 50 % 程度が予想される。一方、最高風速はそれほど高くなく、渡り鳥の問題もなく、雷も 3 年に 1 度くらいと少ない。ここで得られたデータをもとに風力発電コストを試算すると、風車が現状のコストで作ることができ、寿命 20 年が確保できたとすると 2 円 /kWh 程度となる。世界で最も安価な風力エネルギー、ないしは再生可能エネルギーと言える。この電気で水素を作ると 15 円 /Nm³ 程度にはなるはずである。

我々の調査によると、パタゴニア地方全域での風力発電のポテンシャルは 20 億 kW 以上、年間総発

電量は 10 兆 kWh 程度とまことに巨大である。この発電量は日本の総発電量の 10 倍である。これを水素に変換して燃料電池自動車を動かしたとすると、およそ 15 億台の自動車に供給できる。このパタゴニア発の水素で究極のエコカーである燃料電池自動車が世界中で動かせるのである。

4. 燃料電池と水電解

グリーン水素エネルギーシステムでは図 3 に示す通り二次エネルギーとして電気と水素を考えている。このシステムでは電気と水素の二種の二次エネルギー変換が容易に進む必要がある。この仲立ちをするのが電気化学システムであり、基本的にはアノードとカソードの二種の電極と電解質から成り立っている。アノードでは酸化反応が起こり、カソードでは還元反応が起こる。この間にイオン伝導体である電解質が存在し、通常の化学反応と異なり酸化反応と還元反応が起こる場所が異なる。

4.1 水電解による水素製造

太陽光、風力と言った再生可能エネルギーから電気が得られれば、水電解で水素を容易に作るができる。この水電解は歴史的にも古くから水素を得る方法として工業的に利用されている。20 世紀初頭に水力を利用した発電機が考案された。このときから、できた電気は水電解や銅の電解精製に利用されている。水電解から得られた水素は空気中の窒素と反応させ、アンモニアを作り、さらには硫酸、硝酸等の肥料となり農業を支えてきている。ここではアルカリ水電解法が用いられている。

アルカリ形水電解は 30 wt% 程度の KOH 水溶液を電解質に用いるもので、カソードの水素発生用には軟鋼等鉄系の材料、アノードの酸素発生用にはニッケル系の材料が用いられている。アノードとカソードの混合を防ぐために隔膜が用いられるが、これには従来アスベストが用いられてきた。しかし、アスベストの環境問題から、無機系、高分子系等を用いた新材料の開発が進められている。ただし、欧州では既存の電解工場ではアスベスト使用が最近まで認められていた。

安価な水素を製造するために電解槽コストは重要なポイントである。500 Nm³/h 以下の小型装置では製造会社によりばらつきが大きい。現状では 1000 Nm³/h 以上だとおおよそ 1000 €/kW 程度のものである³⁾。

4.2 エネルギー変換効率の高い燃料電池

燃料電池では電気化学システムを用いて物質の持

つ化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換できるので、高いエネルギー変換効率が期待できる。その原理は、水電解と同じ時期、19世紀初頭に実証されている。ところが水電解と異なり、民生用の実用化は、やっと21世紀になってからである。

水素を利用する燃料電池には室温付近での固体高分子形、アルカリ形、200℃でのリン酸形、650℃での溶融炭酸塩形、700℃以上での固体酸化物形と多くある。このうち固体高分子形燃料電池(PEFC)は、我が国では2009年にエネファームとして家庭用燃料電池が販売が開始され、今では40万台を越える台数が日本全国で家庭で運転中である。究極のエコカーである燃料電池自動車は2015年末にわが国でも一般販売が始まり、水素ステーションの拡充が問題となっているが、着実に台数が増加しつつある。

固体高分子形燃料電池は水素の持つ特性を十分に引き出し、エネファームでは分散型発電の特徴である熱利用も合わせて、総合エネルギー効率が90%を越えるものとなって理想に近いものになっている。燃料電池自動車は燃料電池の出力密度が3 kW/Lを越え、エンジン車と同程度の出力密度を得ている。燃料電池自動車は技術進歩によりディーゼル車よりも燃費が良くなり、環境対応車の切り札である。ここで、再生可能エネルギーを用いて得られるグリーン水素を用いれば、well to wheelで二酸化炭素を排出しない、究極のエコカーとなる。

しかし、この固体高分子形燃料電池は大きな課題を抱えている。現在のものは電極触媒としてアノードもカソードも白金が用いられている。白金は高価であり、資源量も問題である。コスト面からは究極

はこの白金の高価格が問題となるはずである。また、白金の性能が十分で無く、酸性電解質中での不安定性が大きな問題である。特に酸素過電圧が大きいのが、究極の高効率化では問題となる。

我々は新エネルギー・産業技術総合開発機構のご援助を得て固体高分子形燃料電池のカソードとしての白金代替触媒開発に取り組んできた。

ここでは酸性溶媒、空气中で安定である周期表の第4族、第5族金属のうち、Ti, Zr, Nb, Ta の4元素の酸化物に的を絞る。これらの酸化物に酸素還元触媒能を付与する工夫をしている。基本的にはこれらの金属酸化物に炭素、窒素を含ませ微細化によりかなりの性能向上を見た。図5には酸化ジルコニウム系カソードを用いた燃料電池の発電特性を示す⁴⁾。現状では白金に比べると性能的には数分の一程度あるが、酸素還元開始電位が白金を超えるものもあり、将来的には活性が白金を超える触媒も夢でない判断している。

5. おわりに

本稿では地球温暖化が急速に進展する中で進められている再生可能エネルギーの利用拡大に欠かせない電力貯蔵・輸送技術としての水素エネルギーを取り上げた。再生可能エネルギーから得られる電気エネルギーは時間的変動、地域的偏差が大きい。周期の短いものならともかく、月単位、季節単位の平準化を考えるなら二次電池でなく化学物質、特に地球上に大量に存在する水を利用出来る水素を活用するのが最も適切である。さらに長距離の輸送、特に安価な海外の再生可能エネルギー活用には水素は欠かすことは出来ない。この水素を長期間貯蔵し、長距離輸送できるメチルシクロヘキサン等の有機水素化物利用は実用化を迎えようとしている。

再生可能エネルギーを利用するグリーン水素は環境負荷の低減に大きく貢献できるはずである。さらにこのグリーン水素の活用には燃料電池技術の一段とした発展が欠かすことが出来ない。エネファームや燃料電池自動車が開発された技術をベースにして、あらゆるエネルギーシステムの中での燃料電池の活用積極的に考えるべきである。理論的に、これからの人類の持続型発展を支えるものはグリーン水素であり、このグリーン水素社会を実現するには燃料電池技術の一段とした進展が期待される。

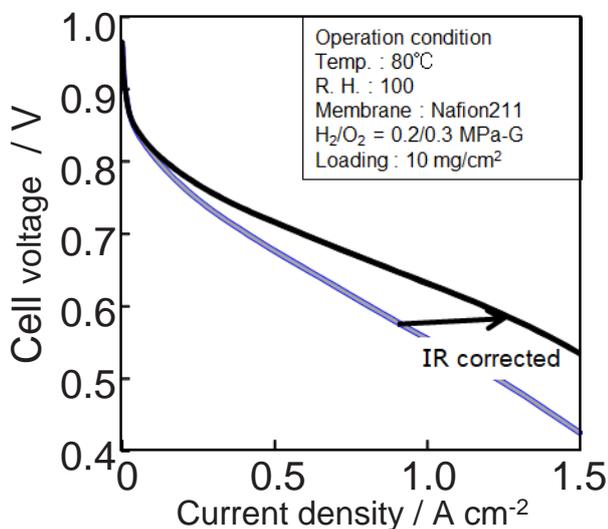


図5 ZrO₂系カソードを用いた燃料電池特性

参考文献

- 1) IPCC 第4次報告書(2007年) データをもとに改編
- 2) K.Ota, S. Mitsushima, K. Matsuzawa, A.Ishihara, "Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution," p.32, Woodhead publishing, UK (2014)
- 3) J.O. Jensen et al., "PRE-INVESTIGATION OF WATER ELECTROLYSIS" PSO-F&U 2006-1-6287 (2008)
- 4) K. Ota et al., Polymer Electrolyte Fuel Cells 16 (ECS Trans. 75 (14), 875-883 (2016 September)

著者略歴



太田健一郎
(一社) 燃料電池開発情報センター
代表 / 横浜国立大学 名誉教授
東京大学大学院博士課程修了, 東京大学工学部助手, 横浜国立大学助教授, 教授を経て, 現職. 1978年より水素エネルギー, 燃料電池の研究開発に取り組む.