

# 燃料電池は生き残れるか

わが国では諸外国よりも燃料電池が高評価を受けているようで、今までに巨額の開発資金が投入されてきました。しかし、開発期間が40年以上にもなっているが、予期していたような成果が得られていないように思えます。

経済産業省のPRや補助金でかろうじて実用化されている状態の燃料電池にバラ色の将来があるのでしょうか。

## 目次

### 【A】 燃料電池に関して注目したいこと

- 【A-1】 リン酸型燃料電池も熔融炭酸塩型燃料電池も忘れ去られた
- 【A-2】 過去に他国が見捨てた経緯がある
- 【A-3】 セラミックス製の固体酸化物型燃料電池(SOFC)は大規模用途には不向き
- 【A-4】 固体酸化物型燃料電池(SOFC)を組み込んだトリプルコンバインド方式
- 【A-5】 固体酸化物型燃料電池(SOFC)はエネファームにも使用されているけれど
- 【A-6】 固体酸化物型燃料電池(SOFC)の開発は予定通りには進んでいない
- 【A-7】 燃料電池の発電効率を高めるためには電池を大幅に増やす必要がある
- 【A-8】 燃料電池設備は不調になっても修理しにくい
- 【A-9】 都市ガスを燃料にした家庭用分散電源の防災機能向上効果は大きくない
- 【A-10】 大規模に活用するためには燃料電池の確保が難しい

### 【B】 水素ガスに関して注目したいこと

- 【B-1】 水素は無尽蔵にあるという説明は無責任だ
- 【B-2】 水素は長期貯蔵が容易な利点はあるが
- 【B-3】 水を太陽光で分解する技術を実用化するのは難しい
- 【B-4】 水素ガスの製造には多種の原料が使用可能であり、有利だという意見について
- 【B-5】 燃料電池車用の水素を下水汚泥から製造するという提案について
- 【B-6】 わが国のバイオマスに過剰な期待をしてはいけない
- 【B-7】 太陽光発電で発電した電力を利用して水を電気分解するコストは高額
- 【B-8】 わが国では「CO<sub>2</sub>フリー水素」は存在しにくい理由
- 【B-9】 副生水素を燃料電池の燃料に利用してもCO<sub>2</sub>排出抑制にはなっていない
- 【B-10】 外国で化石燃料を利用して水素を製造して輸入するという提案について
- 【B-11】 エネルギー用途の水素をアンモニアにしてはいけない
- 【B-12】 水素の運搬・貯蔵のためにトルエンを使用する方法はスマートではない

## 【C】不安定電源対策への活用の見通し

- 【C-1】他力に依存して需給調整することの大切さ
- 【C-2】太陽光発電などで発電した余剰電力を水素に変換して天然ガスに混入する
- 【C-3】需給ギャップが大きくないうちは燃料電池よりも蓄電池の方が使いやすい
- 【C-4】夕方に太陽光発電量が減り需要も増加するので対策が必要だが

## 【D】自動車用途の将来性

- 【D-1】安価な液化水素 (CO<sub>2</sub>フリー) が多量に入手できるのなら自動車よりも火力発電の燃料に優先使用すべきだ
- 【D-2】燃料電池車 (FCV) よりもハイブリッド車 (HV) の方が温暖化抑制効果大きい
- 【D-3】わが国では電気自動車 (EV) の方が燃料電池車よりも温暖化抑制効果大きい
- 【D-4】バイオエタノールを自動車の燃料に使用しても完全なCO<sub>2</sub>排出抑制にはならない
- 【D-5】燃料電池車を公共施設のエネルギー貯蔵装置と見做すのは正しいのか

## 【E】機械式熱機関方式との競合について

- 【E-1】水素が大量に確保できたら燃料電池よりも火力発電所で発電したほうが経済的
- 【E-2】分散電源には燃料電池が利用しやすいけれど
- 【E-3】「エネファーム」には「エコキュート」という手ごわい競争相手がいる
- 【E-4】家庭への水素ガス配管網の構築よりもオール電化

## まとめ

## 自己紹介

## **【A】燃料電池に関して注目したいこと**

### 【A-1】リン酸型燃料電池も熔融炭酸塩型燃料電池も忘れ去られた

わが国では主として、リン酸型燃料電池 (PAFC)、熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC)、固体高分子型燃料電池 (PEFC)、固体酸化物型燃料電池 (SOFC) が研究開発されてきました。

しかし、巨額の開発費を投入したリン酸型燃料電池 (PAFC) も熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC) も忘れられてしまいました。PAFCでは燃料電池の主要材料である炭素系の材料が酸化されて消耗してしまうこと、MCFCでは主要材料のアルミン酸リチウム微粒子の粒径がどんどん成長してしまうこと、などの本質的な課題を有しています。

**説明** 電解質である熔融炭酸塩に溶けない物質は金(ゴールド)だけであり、アルミン酸リチウムも熔融炭酸塩に微量に溶解することから、粒径が成長します。粒径が大きい方が単位質量あたりの表面積が小さくなり安定になるからです。

PAFCは東京電力で数百億円を投じて規模の大きい試験設備を稼働させたものの、想定外の電気化学メカニズムで主要材料の炭素繊維などの炭素系材料が酸化されて消耗し短期間で運転不能になったようです。

## 【A-2】過去に他国が見捨てた経緯がある

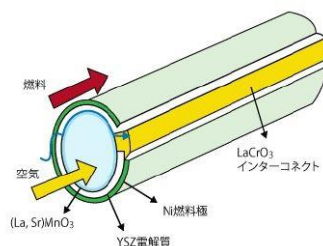
家庭用のコジェネ設備(エネファーム)や燃料電池車などに採用されているタイプの固体高分子型燃料電池(PEFC)は、1950年代の後半に米国のGE社で発明され、1965年に人工衛星Gemini5号に搭載されました。1985年以降にカナダのバラード社が商業化を目指して開発を進めましたが、電池製造コストの引き下げが難しいという経済性の観点から撤退したと報じられています。

**説明** バラード社の本務は燃料電池技術の開発です。自動車やコジェネレーションの製造に焦点をあてていましたが、2007年末、自動車向けの事業を売却しました。価格を下げる有効な解決策が見出せず、実現不可能であると判断したためと推測されています。

日本市場においては、荏原製作所と合併で荏原バラードを設立して家庭用燃料電池市場に参入し、東京ガスに発電システムを供給していましたが、競争の激化が予想されることから同市場からの撤退をきめ、荏原バラードは2009年6月をもって解散しました。

セラミックスで構成されている固体酸化物型燃料電池(SOFC)も開発に主導的な役割を果たしてきた米国のウエスチングハウス社は去り、その後に関係プロジェクトに参加していた米国のGE社やドイツのシーメンス社も撤退したと報じられています。なお、海外での開発は技術開発会社などの規模の小さい企業が担当しているようです。

**説明** SOFC技術開発のブレークスルーは、1980年代にウエスチングハウス社によってなされました。ウエスチングハウスは、基本的な材料を選定しただけでなく、製膜方法(電気化学的蒸着法:多孔体に緻密な薄膜を形成)を開発して、円筒縦縞型シールレス構造を考案して、SOFCスタックを製造することに成功し、その性能が良好であることを実証しました。とはいえ、真空容器中で製膜するため製造コストが高く、1セルの長さが円筒の半周部分に当たるため出力密度を高くできない(0.2W/cm<sup>2</sup>)ことが実用化の技術課題でした。



なお、わが国では経済的な魅力に引っ張られて開発がすすめられたのではなく、役所主導で押し進められた経緯があります。

### 【A-3】 セラミックス製の固体酸化物型燃料電池 (SOFC) は大規模用途には不向き

水素ガスと空気を高温で反応させることができるので排熱も高温になり、この高温の排熱を利用してスチームタービンなどを駆動して発電すれば全体の発電効率は高くなるはずですが。

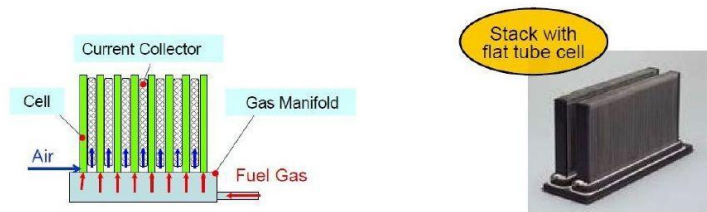
もし、安価で信頼性があるのなら期待できるのですが、残念なことにその両方に不安があるようです。

また、旧来型の熱機関であるガスタービンの耐熱性が改良され効率が向上したために、ガスタービンとスチームタービンを組み合わせたコンバインドサイクルという方式では発電効率が60%近くまで向上したことから、SOFCへの期待は冷めてきています。

セラミックスでできたSOFCには、大きな問題点があります。セラミックスは本質的に脆いことです。また、熱膨張係数の異なるセラミックスを重ね合わせるために、面積が大きな電池にすると熱膨張差で巨大な応力が発生して破損しやすくなります。熱膨張係数差だけではなく、大きな電池にすると温度分布ができやすくなって場所による熱膨張差が発生して破損しやすくなります。

規模の大きな発電設備は信頼性が非常に大切なので、不安が完全に払拭されないと採用しにくくなります。現状では信頼性を確保するための決定的な手法が見当たりません。

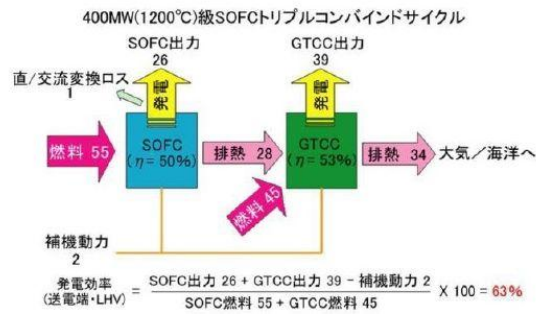
なお、京セラが製造し大阪ガスが販売している家庭用の「エネファームs」のような小規模のものでも、電池の昇温に2時間、冷却には5時間かけて徐々に温度変化をさせる必要があるようで、セラミックス製の電池の難しさを物語っています。「エネファームs」では熱膨張による応力をできるだけ避けるために片持ち構造を採用しています。



### 【A-4】 固体酸化物型燃料電池 (SOFC) を組み込んだトリプルコンバインド方式

多くの火力発電所でガスタービンとスチームタービンを組合せたコンバインドサイクルという方法で発電されています。燃料を燃焼させた燃焼ガスの温度を高くしておいた方が原理的には発電効率が高くなるはずですが、ガスタービンの耐熱性の問題で温度の上限が制限されています。そこで、ガスタービンの前にSOFCを配置するトリプルコンバインド方式を提案されている人たちがおられます。

SOFCはセラミック製なので温度の変化で熱膨張差から応力が発生し破損する可能性があるのもより堅牢度が高い円筒型のSOFCを使うのだそうです。ただ、大幅な設備費の上昇に見合う発電効率の向上にはなっていないようだし、信頼性にも不安があるので採用する電力会社は無いのでは。



### 【A-5】 固体酸化物型燃料電池 (SOFC) はエネファームにも使用されているけれど

PEFCではなくSOFCを利用した家庭用分散電源「エネファームS」の発電効率は大阪ガスの報告によると46.5%とされています。この値は都市ガスを燃料にした場合であり、水素を燃料に使用した場合にはこんなに高効率にはならないはずです。都市ガスを燃料に使用した場合には、都市ガスを水素ガスに変換するための水蒸気改質反応(吸熱反応)に排熱を有効利用できることから高効率になります。

水素ガスを燃料にする場合には、高温の排熱を有効利用するためにも、大規模な用途でないとメリットを生かしにくいはずです。水素ガスではなく都市ガスを燃料に使用する場合には、エネルギー効率の面ではそれなりの魅力はあるのですが、電池コストの大幅な引き下げや耐久性の確保、信頼性の確保が前提になります。最低限、補助金なしでも大衆に魅力を感じさせる商品にする必要があります。なお、セラミックスなので経時劣化はしないのではないかと考えがちですが、性能劣化も完全には克服されていないようです。

また、写真で見る限りでは、単電池は3cm×20cm程度の小さな構造のようです。このままでは大規模な用途に使えるような電池コストにはならないのではないのでしょうか。



### 【A-6】 固体酸化物型燃料電池 (SOFC) の開発は予定通りには進んでいない

燃料電池の中では最も期待されているようですが、開発が予定通りには進まないようです。わが国の研究者の集まりである「SOFC研究会」も30周年になったのでそうですが、未だに基礎研究が行われていることから、簡単なものではなさそうです。SOFCの開発のように計画がどんどん遅れてくる場合には、本質的な難しさが潜んでいる場合が多いので、注意が必要です。

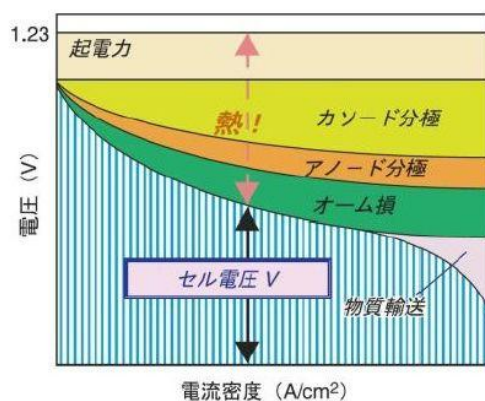
失礼な物言いで恐縮ですが、研究発表会の内容も注目を浴びるようなものもなく、なんとなく暗さが漂っているような印象を受けています。過去の例からも、成功するためにはキラッと光る発表が連続する場合があります。

SOFC自体にどうしても必要な極めて優れた特長があるのなら、開発を継続する意味もあるのかもしれません。機械式熱機関を使った従来からの発電技術が進歩してきていることから、しだいに存在感が薄まりそうです。

#### 【A-7】 燃料電池の発電効率を高めるためには電池を大幅に増やす必要がある

反応温度が低い燃料電池の場合には、理論的には水素と空気の組み合わせが持っている化学エネルギーの9割以上の発電効率が得られるはずですが、燃料電池には「分極」という本質的な問題があって大幅に発電効率を下げざるを得ません。

なお、分極とは外部の回路に電流が流れることによって電極の電位がずれる現象で、電気抵抗や物質が移動する際の抵抗などが原因になっています。同一の燃料電池では、負荷を大きくすれば、各種の抵抗が大きくなって、発電効率が低下してしまいます。発電効率の向上と設備費の低減がトレードオフの関係になっているのです。



#### 【A-8】 燃料電池設備は不調になっても修理しにくい

ある程度以上の規模の燃料電池では、電池を多層に積み重ねるか並べてあるはずですが、不調と思われる単電池を一つだけ取り出して修理をするのは難しいのではないのでしょうか。多層に積み重ねるか並べてある全体を取り換えることになるはずですが。

#### 【A-9】 都市ガスを燃料にした家庭用分散電源の防災機能向上効果は大きくない

燃料電池を利用した家庭用分散電源(エネファーム)や燃料電池車には防災機能が高いとの意見があります。以下をよく検討しておく必要があります。

(1) 住宅はダメージを受けていないのに、送電線や配電線だけが長期間回復できないようなダメ

ージをうける確率は高くなさそうです。100年に一度程度の確率であれば、高価な自動車に乗る必要はほとんど感じません。

(2) 住宅が大きなダメージを受けていたら、エネファームや燃料電池車で発電可能でもその電力を利用できません。

(3) 都市ガスや水素ガスを使っているのであれば、ガス導管が地震などでダメージを受けると回復に時間がかかり、防災には役に立たなくなります。その点では、配電線の方が早期に回復できる傾向があります。下図は熊本地震の際のインフラの復旧率の様子です。

(4) 一般大衆が、被害を受けた住宅内で電線が短絡していないことを個人でチェックできるのでしょうか。短絡していたら火災の原因になるのでは。また、他家の火災の原因にならないように外部との遮断が問題なくできるのでしょうか。

(5) 災害時には電気よりも熱が欲しいのでは。最近はカセットボンベを備蓄している家庭も多いようだし。

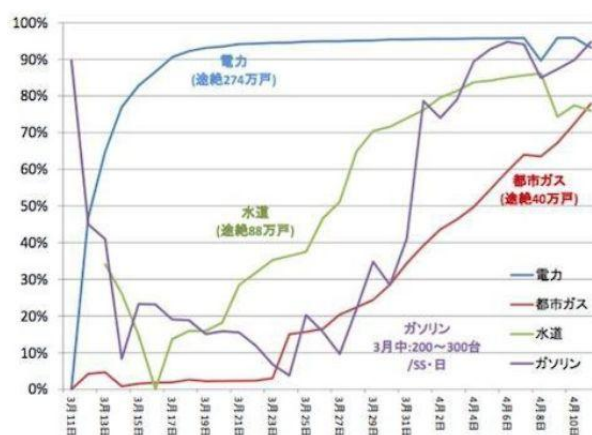


図 1 公知情報に基づく被災三県におけるライフライン復旧率の推移

\*復旧率 = (B - A) / B  
A: ある時点での途絶戸数  
B: 延べ供給途絶戸数

### 【A-10】大規模に活用するためには燃料電池の確保が難しい

水素が確保できたらすぐに燃料電池を考える人が少なくないのですが、最も実用になりやすい固体高分子型燃料電池 (PEFC) では、言い古されているように、貴金属触媒の確保が難しいと考えられています。

そのために、水素が多量に確保できるようになっても、ほぼ間違いなく、水素ガス燃料を利用した旧来方式の火力発電所になるはずです。

自動車に関しては、遠い将来には世界中の自動車は電気自動車か燃料電池車しか無くなるのでしょうか、燃料電池車は貴金属触媒の確保に難点がありそうです。

## **【B】水素ガスに関して注目したいこと**

### 【B-1】水素は無尽蔵にあるという説明は無責任だ

水の惑星である地球には水素は無尽蔵にある、と記された資料がありました。水と太陽光があれば水素は無尽蔵に製造できるのだ、と言いたいのですが、水は地球上では化学エネルギーを持ち得ないので、エネルギーが無尽蔵にあるのは太陽光だけであって水とは無関係のはずです。

言い換えれば、無尽蔵にあるのは「水素原子」であって、エネルギーを取り出すことができる「水素分子」ではありません。

### 【B-2】水素は長期貯蔵が容易な利点はあるが

貯蔵ができるエネルギーは、「化学エネルギー」、「位置エネルギー」、「運動エネルギー」、「熱エネルギー」などです。温度の高い熱エネルギーは常温の熱エネルギーと混ざりやすいし、運動エネルギーは各種の摩擦で徐々に熱に変換されてしまいます。

揚水発電所が安価に建設できれば蓄エネルギー効率が高いので好ましいのですが、適当な場所が見つかりにくそうなので、その場合には化学エネルギーとして蓄エネルギーせざるを得ないでしょう。

化学エネルギーとしては、水素ガスの活用と蓄電池(二次電池)の経済性の競争になるはずですが、水素ガスの活用は小規模の用途では見込みが全くありません。また、「水素」イコール「燃料電池」ではなく、水素ガスを燃料にした機械式熱機関の方が魅力的なケースが多くなりそうです。

ただ、水素ガスを利用して蓄エネルギーをする場合には、エネルギーロスが非常に大きいことが致命的になりそうです。具体的には3割以下にまで減ってしまう可能性があります。

**説明** 水素ガスを利用して蓄エネルギーするとスタート時の電力が30%以下にまで減ることになります。その内訳は(電気分解 85%) × (液化・貯蔵・輸送その他 65%) × (水素発電 50%)です。言い換えれば、長期の貯蔵が可能でも、二次電池を利用して蓄電する場合の3割以下の電力量になってしまいます。

### 【B-3】水を太陽光で分解する技術を実用化するのは難しい

酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)などを触媒にすれば水を太陽光エネルギーで直接的に水素ガスと酸素ガスに分解することができます。化学的な興味を引きやすいのですが、実用的にこの方法で水素を製造するようになる可能性はありません。

太陽電池で発電して、その電力で水を電気分解する方式に経済的に対抗できませんし、水の太陽光分解では、水素と酸素の混合ガスが得られますが、この混合ガスは極めて危険で、ごく少量でしか取り扱うことはできません。雷雲が近づいてきただけで、装置内に火花がとぶことがあります。火花がとんだ瞬間に爆発します。



圧縮機で圧縮するのも危険なので、膜分離も避けるべきです。さらに膜分離をするために必要な酸素ガスに耐性のある膜の入手も困難です。

#### 【B-4】水素ガスの製造には多種の原料が使用可能であり、有利だという意見について

不要または安価な有機物があれば、それらを使って水素ガスを製造することは可能です。生命を失った植物(生物)は、放置しておいても腐敗などでCO<sub>2</sub>に変換されてしまうので、経済的に成り立つのであれば利用可能なエネルギーを取り出した方が利口であることは間違いありません。

たとえば、1000℃以上のような高温の炉の中に有機物と水蒸気を投入すれば水素と一酸化炭素に分解できます。生成した一酸化炭素は水蒸気と反応させれば容易に水素とCO<sub>2</sub>に変換可能です。なお、炉の温度を高温に保つために、適量の酸素を投入する方法が一般的です。熱分解するのではなく、発酵を利用することができる有機物もありますが、固形物は効率よく発酵させるのは難しそうです。

バイオマスを利用した水素ガスの製造は製造コストが少額ではないことと安価に確保できる有機物が思っているほど多くないことが問題です。

#### 【B-5】燃料電池車用の水素を下水汚泥から製造するという提案について

経済性を無視しても構わないのであれば、下水汚泥を嫌気性発酵させて得られた消化ガスを利用して水素を製造することは技術的にはさして難しくはありません。ただ、消化ガスにはメタンの他にCO<sub>2</sub>が33~35%、H<sub>2</sub>Sが0.02~0.08%含まれているので、水素を確保する原料に使用しても、精製してメタンガスにするにしても、同じようにCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Sを除去することになるので、水素にしなくてはならない必然性や水素にするメリットはありません。

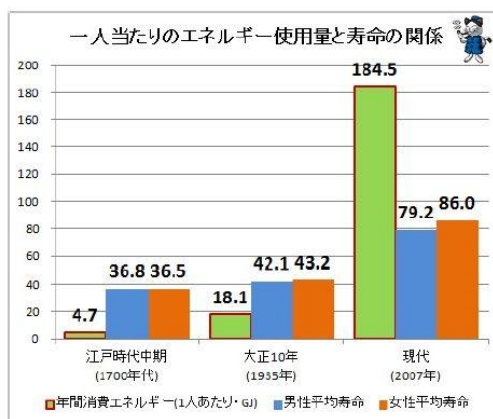
なお、燃料電池車用の水素ガスは高純度であることが要求されることから、精製コストが膨らむことを考えると、消化ガスはH<sub>2</sub>Sだけを除去して燃焼用の燃料に利用するのが最も経済的なはずです。

#### 【B-6】わが国のバイオマスに過剰な期待をしてはいけない

江戸時代のことを考えてみると、当時は必要なエネルギーの大半をバイオマスに頼っていたはずですが、当時の人口(3000万人前後)で当時の文化水準だったらなんとか賄えることができたでしょう。

江戸時代中期のエネルギー消費量は、わが国全体で比較すると、現在の170分の1程度だったようです。わが国に降り注ぐ太陽光が当時と現在とで大きく変化はしていないので、現在でも入手できるバイオマスの量がけた違いに多くなるとは考えられません。

また、成長力の大きい植物を育て続けていると、長年にわたって蓄積されてきた土壌中の養分(有機物)を短期間に吸収してしまって土地が砂漠化しやすいので注意が必要です。



### 【B-7】太陽光発電で発電した電力を利用して水を電気分解するコストは高額

水を電気分解したら水素ガスと酸素ガスに分解されることは誰でも知っていますが、この方法で水素ガスを製造している例がほとんどなく、その経済性に関する信頼性の高い情報は入手しにくい状態にあります。

ノルウェーのノルスク・ハイドロ社という電気化学が得意な会社が公開している情報（水素エネルギーシステム Vol. 33 No. 1 19ページ（2008））によれば、水の電気分解設備（規模：6万m<sup>3</sup>/時）の製品水素ガス 1 m<sup>3</sup>当たりの固定費は48セント（2006年）だそうです。2006年における円ドル換算は、平均して1ドル＝115円くらいなので、水素 1 m<sup>3</sup>あたりの固定費は55円程度とみなせます。

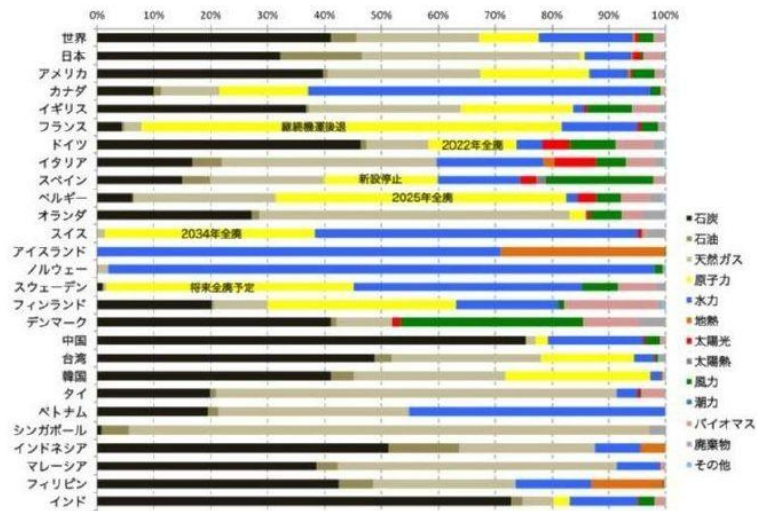
水素ガスおよび都市ガスの 1 m<sup>3</sup>あたりの低発熱量はそれぞれ2567kcalと9870kcalであり、都市ガス 1 m<sup>3</sup>の発熱量に対応する水素ガスは3.84m<sup>3</sup>なので、水素3.84m<sup>3</sup>あたりの固定費は211円になります。

この固定費は水の電気分解設備がフル稼働しているときの値なので、利用率が低い場合には補正する必要があります。太陽光発電設備の平均的な利用率は7分の1程度なので、この値を使用すると固定費だけで1480円になり、都市ガス価格の10倍以上の金額になりそうです。

### 【B-8】わが国では「CO<sub>2</sub>フリー水素」は存在しにくい理由

「CO<sub>2</sub>フリー水素」という用語はCO<sub>2</sub>を直接的または間接的に空気中に排出することなく製造された水素という意味で使用しています。わが国とは異なり、北欧のアイスランドやノルウェーなどでは「CO<sub>2</sub>フリー水素」が存在し得ます。これらの国では、化石燃料を使用する火力発電がほとんどないからです。下図は 国際エネルギー機関(IEA)発表の2013年のデータです。

「CO<sub>2</sub>フリー水素」が存在し得ないのなら、水素を燃料にする燃料電池には温暖化抑制効果を期待することはできません。



**説明** わが国では、自然エネルギーを使って水素ガスを製造しても炭酸ガスの放出を止めることができないのはなぜでしょうか。例えば、風力発電で得られた電気があるとします。

この電気を使って水を電気分解したら炭酸ガスを放出しないで水素ガスを得ることができます。一方、この電気を電気分解に使用せずに送電線網（電力系統）に流したら火力発電の負荷が下がり、炭酸ガスの放出量が減少します。

同じ電気で、水素ガスを得ることもできるし、炭酸ガス放出量を削減することもできます。言い換えれば、水の電気分解で水素ガスを製造する場合には、炭酸ガス放出量削減というメリットを放棄することと引き換えに水素ガスを入手しているのです。

よって、水素ガスを得るために炭酸ガスを放出していることと同じことになります。

電気というエネルギーはどんな用途にも利用しやすいので、送電線や配電線網が確立しています。電気の多くを火力発電で得ているので、自然エネルギーで発電した電気を電力系統に流せば火力発電の負荷が下がり、結果として炭酸ガスの放出量が減少します。

すなわち、太陽光や風力が持っているエネルギーを電気というエネルギーに変換する行為が炭酸ガスの放出量を減らしているのであって、電気を使って水素ガスを製造したり、その水素ガスを燃料にして自動車を駆動することが炭酸ガスの放出量を減らしている訳ではありません。

**説明** 理解をより確実なものにするために、別の説明をしてみます。

我々が入手できる利用価値の高いエネルギーは、一次的には、水力や地熱も含めた自然エネルギー、原子力、化石燃料だけです。これらを利用しやすい電気や熱などに変換して利用しています。必要があれば水素に変換することもできます。

どこの国でも、利用価値の高いエネルギーを一定量必要としています。

自然エネルギーと原子力とで足りない部分は化石燃料を使用せざるを得ませんが、化石燃料を使用すれば、炭酸ガスを放出することになります。

自然エネルギーと原子力と化石燃料の必要量の合計のうち、自動車の駆動に自然エネルギーを使用したら、その分だけ他の用途で化石燃料を使用せざるを得なくなります。結果として、自動車の駆動に自然エネルギーを使用しても炭酸ガスの放出量を抑制することには直結しないのです

### 【B-9】副生水素を燃料電池の燃料に利用してもCO<sub>2</sub>排出抑制にはなっていない

製鉄会社などのコークス炉や苛性ソーダ製造会社での食塩の電気分解設備などでは副生水素が発生しています。これらの副生した水素の一部は自家消費や外販もされていますが、残りは燃料にしているはずで、多量の水素を継続して空中にパージすることは常識的にはあり得ません。

副生水素をすでに燃料に使用しているのであれば、その水素を取り上げたら代替燃料が必要になり、化石燃料を使用せざるを得なくなってCO<sub>2</sub>排出量削減の目的を適えることができなくなります。

なお、タール分などが含まれているコークス炉ガスなどは精製コストが嵩むので、不純物を気にしないボイラーなどの燃料にした方が環境問題を考慮しても合理的なはずで、

### 【B-10】外国で化石燃料を利用して水素を製造して輸入するという提案について

副生するCO<sub>2</sub>を貯留できるのであれば、高温の反応炉中に酸素や水蒸気などと吹き込んで水素に変換することは比較的簡単にできるので、単なる経済性比較だけの問題になりますが、現状ではCO<sub>2</sub>貯留は簡単ではなさそうです。

もしCO<sub>2</sub>を安価に貯留できるのであれば、排煙からCO<sub>2</sub>を回収することが容易なので、現状の化石燃料の利用が継続される可能性が非常に高く、水素を利用する必要もないはずで、

たとえば、オーストラリアの褐炭を有効利用するという話は数十年前から出たり引っ込んだりしています。以前には、乾燥させた褐炭の微粉末を空気に接触させないように窒素雰囲気下で保存・輸送することが検討されたことがあったはずで、

### 【B-11】エネルギー用途の水素をアンモニアにしてはいけない

アンモニアの合成反応は発熱反応なので、理論的には外部からエネルギーを加える必要はありませんが、水素と窒素に分解するときには、分解して得られた水素が持っている燃焼熱の16%程度の熱を加える必要があり、エネルギーロスが発生します。

**説明** 世界で最も安価に製造されているアンモニアを購入して、そのアンモニアを分解して得た場合でも水素の価格は350円/kg・H<sub>2</sub>程度になります。同じ発熱量のLNGは110円程度なので3倍の価格になっています。化石燃料を利用した安価な水素源を利用してこんなに高価になるということはアンモニアへの加工費が非常に高価だということです。さらにアンモニアの分解のコストかまたは空気の深冷分離(窒素と酸素の分離)などのコストも上積みされます。

### 【B-12】水素の運搬・貯蔵のためにトルエンを使用する方法はスマートではない

トルエンと水素を反応させて、メチルシクロヘキサンにして水素を運搬・貯蔵する方法です。反応式は  $C_7H_8 + 2.5H_2 \rightleftharpoons C_7H_{13}$  であり、目的とする水素の20倍の重量の物質を輸送や貯蔵する方法なので無理がありすぎます。また、メチルシクロヘキサンを水素とトルエンに分解する時に、理論的には回収できる水素の燃焼熱の28%程度の熱を必要とし、エネルギーロスが発生します。

さらに、メチルシクロヘキサンやトルエンの輸送・貯蔵費、トルエンを水素化したりメチルシクロヘキサンを分解したりする化学設備の固定費と運転費、ロスになったトルエンの補充費用、などのコストが上乗せされ、相当に高価な水素ガスになります。

## 【C】不安定電源対策への活用の見通し

### 【C-1】他力に依存して需給調整することの大切さ

燃料電池の存在価値は水素の貯蔵性の良さと組み合わせて、需給調整に有用なのだという意見が多いようです。発電量が不安定な太陽光発電や風力発電を増やすためにはどうしても必要なのだと。

しかし、できるだけ「出力抑制」や「需給調整契約」を最大限活用したほうが経済的には優れているはずですが。出力抑制とは、せっかく発電したのだからできるだけ利用はするけれど対応が難しい時には発電量を抑える制度です。現状での実際の抑制量は全体の数%以下とされています。ただし、安易であってはならないし、抑制量を引き下げる工夫は大切です。

もし、出力抑制に対する不満が強いのであれば、抑制量分をカバーできるだけ買取り価格を上げたらずむ話ではないでしょうか。たとえ買取り価格を上げてでも燃料電池を利用した発電設備を新設するよりもはるかに経済性が高いはずですが。

需給調整契約には、電力会社が通告したらただちに受電制限を行う瞬時契約と、通告後1時間後または3時間後に受電制限を行う緊急契約などがあります。受電制限の規模、時間、1年に何回まで受電制限させることができるかは契約によって異なり、受電制限が容易な契約ほど料金が安くなっているようです。

2016年夏季の契約量は全国で906万kWと報道されています。ただ、需給調整契約の本来の目的は短時間のピーク抑制のほうですが、ピーク抑制よりも使用電力量を減らす効果の方が大きいとの指摘もあります。ピークが発生する正確な時刻を予想することは難しいので、ある程度の広い時間範囲で対応せざるをえず、やむを得ないのでしょう。

### 【C-2】太陽光発電などで発電した余剰電力を水素に変換して天然ガスに混入する

欧州で検討または実施されているとの話が流布されていますが、あまり常識的ではありません。水の電気分解は実績が乏しいので10年前の情報を使って計算してみた場合、電気分解設備の稼働率が低いことを考慮すると、天然ガス1m<sup>3</sup>と等価の発熱量の水素を製造する専用の電気分解設備の固定費だけで、1,000円を超えてしまい、天然ガスの価格の10倍以上になってしまいます。

余剰電力の価格をゼロ評価して、既存の水の電気分解設備に余剰能力があるので追加の固定費もほとんど増えないのだ、という経理処理(増分計算)をするのなら考えられないことではありませんが、専用設備を作って大規模に実施するようなものではないはずですが。CO<sub>2</sub>排出抑制方法としては高コストすぎます。【B-7】をご参照ください。

**説明** コスト計算について……コストを計算する時には、変動費と固定費に大別します。変動費には原料代やユーティリティの費用が含まれます。固定費には、設備の償却費、設備の補修費(修繕費)、人件費(労務費)、保険代や金利、その他が含まれます。この他に、本社などの人件費(役員の経費なども含む)や事務所賃貸料を含む経費の割掛け分(本社費)や工場などの間接部門の人件費や経費などの割掛け分(間接部門費)が必要になります。要は必要な費用を漏れなく拾い出すことが大切です。なお稼働率が低いと固定費が跳ね上がるので、低稼働率は好ましくありません。

### 【G-3】需給ギャップが大きくないうちは燃料電池よりも蓄電池の方が使いやすい

固体高分子型燃料電池(PEFC)の運転温度は低く、発電の負荷を変動させるときの応答が早いので問題はありますが、水素の製造、水素の貯蔵、燃料電池での発電、は小規模での対応策としては複雑すぎます。また、安全管理の面から無人運転は難しいのではないのでしょうか。

特に発電設備の近くに設置する場合には、複雑な設備にはしたくないはずですが。太陽光発電などで生じる需給ギャップへの対応責任を発電者に持たせるのか、電力会社に持たせるのかで対応は変わってくるかもしれませんが。

### 【G-4】夕方に太陽光発電量が減り需要も増加するので対策が必要だが

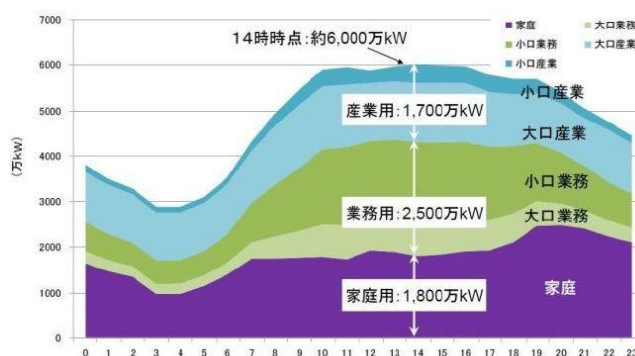
短時間だけの電力供給のためには、発電設備の稼働率が低くて固定費が高額になりやすいので、発電効率は悪くてもできるだけ設備費の安価な方法で電力を調達することが大切です。

ごく短時間だけのために発電設備や蓄電設備を備えておくことは経済的に不利になるために、緊急性に乏しい電力の利用を止めてもらうことが合理的になります。そこで【G-1】のような需給調整が大切になります。

水素ガスの貯蔵が容易だからと言って、水素ガスを使った燃料電池発電設備は高価すぎて、短時間の対応を理由にして導入するのは無理があります。

水素ガスと燃料電池の組み合わせを導入することを考えるより、ガスタービンや経済性の面からは償却が終わっているような旧式の火力発電設備を有効利用することになるのではないのでしょうか。CO<sub>2</sub>排出抑制も経済的な負担が小さいものから実施すべきです。

夏期最大ピーク日の需要カーブ推計(全体)



## 【D】自動車用途の将来性

### 【D-1】安価な液化水素 (CO<sub>2</sub>フリー) が多量に入手できるのなら自動車よりも火力発電の燃料に優先使用すべきだ

燃料電池車用の燃料用水素は水力発電などの余剰電力を使って製造したものを輸入すればいいのだ、という意見もありました。

しかし、安価に液化水素が輸入できるのであれば、火力発電用の燃料に使用した方が、安全管理面からも有利になるし、水素ステーションも不要だし、液化水素の国内各地への配送も不要になり、国全体の経済的視点から考えればメリットが大きくなるはずです。

### 【D-2】燃料電池車 (FCV) よりもハイブリッド車 (HV) の方が温暖化抑制効果が大きい

やむを得ない場合を除き火力発電所が存在している間は、ガソリンをエネルギー源にしているハイブリッド車の方が温暖化抑制効果は大きいようです。

ハイブリッド車の排気ガスが人体に有害ではないのなら、高価な燃料電池車は必ずしも必要ではないはずです。

**説明** 下記のような計算になります。

#### 計算の前提条件

FCV の水素消費量 0.76 kg/100km

HV のガソリン消費量 4.3 リットル/100km → 3.18 kg/100km

ガソリンの比重 0.74

水素の低位発熱量 121 MJ/kg

ガソリンの低位発熱量 44.4 MJ/kg

ガソリンの CO<sub>2</sub> 排出量 2.322 kg/リットル

ボイラ燃料 (不明なので軽油および天然ガスと仮定)

軽油……………低位発熱量 43.4 MJ/kg CO<sub>2</sub> 排出量 3.19 kg・CO<sub>2</sub>/kg

天然ガス……………低位発熱量 50.0MJ/kg CO<sub>2</sub> 排出量 2.75kg・CO<sub>2</sub>/kg

水素の圧縮動力 (70MPa) 15MJ/kg・H<sub>2</sub>

#### 計算結果

ハイブリッド車で 100km 走行するためには 3.18kg×44.4MJ=141.2MJ のエネルギーを消費します。また、CO<sub>2</sub> 排出量は (4.3 リットル)×(2.322 kg/リットル) = 9.98kg・CO<sub>2</sub> となります。

燃料電池車は 100km 走行する時には 0.76kg の水素を消費するので、121 MJ/kg×0.76kg=92.0 MJ のエネルギーを消費します。さらに、水素の圧縮に要するエネルギーを加算する必要もあります。水素圧縮動力は 16MJ/kg・H<sub>2</sub> 程度なので 0.76kg の水素の場合には 12MJ になります。

自然エネルギーを利用して発電した電力で水を電気分解して水素を製造した場合……………電力系統に 92.0MJ の電力を供給できなくなります。そうすると、電力系統に接続されている電力会社の火力発電所の発電効率を 50%と仮定したら、184.0MJ の電力を発電するための化石燃料の使用を削減できるメリットが消滅します。化石燃料を軽油と仮定したら、 $184.0\text{MJ} \div 43.4\text{MJ/kg} = 4.24\text{kg}$  の軽油に相当し、 $(3.19\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kg}) \times (4.24\text{kg}) = 13.53\text{kg}$  の  $\text{CO}_2$  が間接的に排出されることになり、9.98kg の  $\text{CO}_2$  を排出するハイブリッド車よりも 1.36 倍も多くなります。電力会社の火力発電所で使用する化石燃料が軽油ではなく天然ガスの場合には、メタンの低位発熱量は 50.0MJ/kg であり、 $\text{CO}_2$  発生量は  $2.75\text{kg/kg} \cdot \text{CH}_4$  なので、 $184.0\text{MJ} \div 50.0\text{MJ/kg} = 3.68\text{kg}$  のメタンに相当し、 $\text{CO}_2$  の排出量は  $3.68\text{kg} \times (2.75\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kg}) = 10.12\text{kg} \cdot \text{CO}_2$  となり、ハイブリッド車の 1.01 倍となり、ほぼ同量となります。ただし、上記は水を電気分解する際の変換効率低下および水素を液化して貯蔵することが考慮されていません。電気分解の際の効率を 85%とし、液化水素として貯蔵・輸送する場合には水素の持っている化学エネルギーが 65%に減少することを考慮すると次のようになり、燃料電池車はハイブリッド車 ( $9.98\text{kg} \cdot \text{CO}_2$ ) に全く対抗できないこととなります。

火力発電所が軽油を使用している場合  $13.53\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \div 0.85 \div 0.65 = 24.5\text{kg} \cdot \text{CO}_2$

火力発電所が天然ガスを使用している場合  $10.12\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \div 0.85 \div 0.65 = 18.3\text{kg} \cdot \text{CO}_2$

化石燃料を水蒸気改質して水素に変換して燃料電池車の燃料の水素を製造する場合……………理想状態で変換できれば元の化石燃料と得られた水素の持っている化学エネルギー量は同じですが、変換操作の過程で高温の加熱炉を使用したり、 $\text{CO}_2$  の分離をしたり、装置を動かしたりするために、30% 程度のエネルギーロスが発生するようです。また、燃料電池の発電効率が 40% 程度と仮定すれば、化石燃料の持っていた化学エネルギーの 28% が自動車の駆動に供されることとなります。さらに、水素の圧縮のために上記から 13%のロスが発生しますし、水素を液化して貯蔵するのであれば 35% のロスが発生します。

以上を総合すると  $0.7 \times 0.6 \times 0.87 \times 0.65 = 0.158$  となり、化石燃料が持っていた化学エネルギーの 15.8% 程度しか自動車の駆動に利用できないことから、ハイブリッド車の 22%程度よりもかなり効率が悪くなり、 $\text{CO}_2$  の排出量も多くなるはずです。

食塩の電気分解の際に副生する水素を利用した場合……………燃料電池車を走行させるために必要なエネルギーは、92.0MJ です。水素を圧縮するためのロスが 13%、水素を液化して貯蔵したり搬送したりする際のロスが 35%なので  $92.0\text{MJ} \div 0.87 \div 0.65 = 159.2\text{MJ}$  の水素が必要になります。食塩電解で副生している水素を利用すると食塩電解している自家発電の燃料が不足するので化石燃料を供給する必要があります。159.2MJ の化石燃料になりますが平均的な軽油相当だと仮定すると  $(159.2\text{MJ}) \div (43.4\text{MJ/kg}) = 3.67\text{kg}$  となり、この軽油から排出される  $\text{CO}_2$  は、 $(3.67\text{kg}) \times (3.19\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kg}) = 11.7\text{kg} \cdot \text{CO}_2$  となります。化石燃料が天然ガスと仮定した場合、天然ガスの発熱量は必要な天然ガスは  $50.0\text{MJ/kg}$  なので  $159.2\text{MJ} \div 50.0\text{MJ/kg} = 3.18\text{kg}$  となります。また、天然ガスの  $\text{CO}_2$  排出量は  $2.75\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kg}$  なので、 $3.18\text{kg} \times (2.75\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kg}) = 8.75\text{kg} \cdot \text{CO}_2$  となります。

**説明** 自動車を駆動するためのエネルギーは車体重量や空気抵抗で決まってきます。自動車を駆動するためのエネルギーは「仕事」という種類のエネルギーです。電気というエネルギーをモーターで「仕事」に変換したり、ガソリンという燃料が持ち得る「化学エネルギー」をエンジンで「仕事」に変換しています。そこで、この「仕事」をどのようにして効率よく確保することができるのかということが  $\text{CO}_2$  排出量を削減するためには大切になります。



### 【D-3】 わが国では電気自動車(EV)の方が燃料電池車よりも温暖化抑制効果は大きい

電力を火力発電に頼っていないアイスランドのような国では、CO<sub>2</sub>を直接的に排出しない電気自動車でも燃料電池車でも温暖化抑制効果は同じで、エネルギーの無駄遣いかどうかという話だけになるはずです。

火力発電が電力供給の大半を占めているわが国では燃料電池車だけではなく、電気自動車でも駆動させるためにはエネルギーを使うのでCO<sub>2</sub>を間接的に放出せざるを得ません。ただし、両者の車体重量が同等なら電気自動車のCO<sub>2</sub>間接的排出量は燃料電池車の3分の1以下のはずです。

燃料電池車では、(電力) ⇒ 水の電気分解 ⇒ 90% ⇒ (水素) ⇒ 液化・貯蔵・輸送圧縮 ⇒ 65% ⇒ 燃料電池発電 ⇒ 50%以下 ⇒ (電力) ⇒ 自動車駆動 となります。

一方、電気自動車では、(電力) ⇒ 蓄電 ⇒ 放電 ⇒ (電力) ⇒ 自動車駆動 となります。

電気自動車の方がエネルギー変換効率が格段に良好であり、炭酸ガスの直接・間接の排出量も3分の1以下と少なくなります。

### 【D-4】 バイオエタノールを自動車の燃料に使用しても完全なCO<sub>2</sub>排出抑制にはならない

バイオエタノールを燃料にする燃料電池車という提案もありました。しかしわが国では、バイオエタノールを燃料にして自動車を駆動させてもあまりCO<sub>2</sub>排出抑制にはなっていないはずで

例えば、このバイオエタノールを使って発電をして、得られた電力を電力系統に流し込んだら火力発電所での化石燃料の使用量が減り、火力発電所から放出されるCO<sub>2</sub>は減るはずで

火力発電所での化石燃料使用量削減を犠牲にして自動車を駆動したら、間接的にCO<sub>2</sub>を排出していることになるはずで

ただ、この提案では燃料電池としてSOFCを採用することなので、エタノールを水素と一酸化炭素に変性する際に必要になる熱を不可避免的に副生する熱で賄えることから、エネルギー変換効率が高くなる利点があります。

自動車をどんな方法で動かしてもエネルギーを消費してしまうので、わが国ではCO<sub>2</sub>の排出量を増やしてしまうこととなります。方式によってCO<sub>2</sub>排出量の多い少ないはありますが。

### 【D-5】 燃料電池車を公共施設のエネルギー貯蔵装置と見做すのは正しいのか

燃料電池車のPRなのか、燃料電池車は社会的なエネルギー貯蔵装置だと主張されている方がおられます。しかし、独裁国家のように、個人の意思を無視できて、個人の情報が完全に掌握されている政治体制下でないと機能しにくいように思えます。

卑近な譬えですが、大地震などの非常事態の際に自動車に蓄えてあるエネルギー(ガソリンなども含む)を病院などへ提供して欲しいといわれて応じる人はどのくらいおられるのでしょうか。

非常事態の時にはCO<sub>2</sub>排出抑制は一時的に後退しても許されると思いますし。

## 【E】機械式熱機関方式との競合について

### 【E-1】水素が大量に確保できたら燃料電池よりも火力発電所で発電したほうが経済的

燃料電池での大規模な発電は火力発電と比較して設備コストがかさみすぎます。燃料電池設備の価格は現状では100万円/kW以上ようです。火力発電所だと高価なものでも20万円/kW以下なので、燃料電池設備がいかに高額なのかわかります。

燃料が水素になったら設備費も変わるのではないかと、という意見もあるかもしれませんが、それほど大幅な設備費増加にはならないはずで

また、燃料電池設備は耐久性が短いので償却期間を短くする必要があり、償却費が高くなる可能性があります。

発電効率も燃料電池の方が優れているのだとはいえません。

### 【E-2】分散電源には燃料電池が利用しやすいけれど

燃料電池の欠点は、発電効率がさして高くないことと、設備費が格段に高価であることです。都市ガスを燃料にするエネファーム(PEFC)の発電効率は35%程度と高くはありません。

コジェネでは電力への変換効率が高いことが非常に大切です。その理由は、ヒートポンプの効率が高まったことから、電気というエネルギーはエネファームで副生する程度の温度の熱エネルギーの5倍程度の価値があるからです。よって火力発電所の発電効率が高くなればエネファームの存在価値はなくなるはずで

分散電源は設備が小規模なので設備費に関して規模の効果が得られません。材料費が高価な燃料電池だと、さらに高額になります。装置型の業界(発電や石油化学など)の一般的な設備では、設備費は設備能力のおよそ0.6乗に比例するので、大規模化すると設備費が下がります。例えば設備能力が10倍になれば、単位能力あたりの設備費は4割にまで低下することになります。

一方、二次電池や燃料電池、水の電気分解設備などの電気化学系の設備は電極表面で反応が進むために、設備能力は電極面積に比例するので、設備費に関する規模の効果が出にくいのです。なお、東芝がエネファームから撤退すると報道されていました。

**説明** 分散電源が目される理由……「熱」というエネルギーを「仕事」や「電気」というエネルギーに変換する場合、熱というエネルギーすべてを電気や仕事というエネルギーに変換することは理論的にできません。そのために火力発電所では電気に変換できなかった熱を海などに捨てています。捨てるのであれば利用すればいいではないかと、考える方もおられますが、一般的に発電所の近くには熱を多量に利用する用途がありません。そこで、小規模な発電設備を熱の需要地に設置して、副生する熱を利用しやすくするというのが分散電源の考え方です。省エネ技術に重要な考え方の一つであることは間違いありません。

### 【E-3】 「エネファーム」には「エコキュート」という手ごわい競争相手がいる

「エネファーム」も含め、家庭用のコジェネの問題点は、小規模であるために設備費が割高になること、熱エネルギーも電力も需要量変動するために両者の需要量をマッチさせる必要があること、などではないでしょうか。

一方、「エコキュート」が注目されるのは、技術開発が進み火力発電所の発電効率が非常に高くなったためです。天然ガスを燃料に使用したコンバインドサイクルという発電方式では、60%まで発電効率が向上しています。また、ヒートポンプも高性能化が進んでおり、使用した電力の5倍程度の熱エネルギーを得ることができます。

雑な計算ですが、発電効率60%のうちの10%分でヒートポンプを駆動してその5倍の熱を得れば、燃料が持ち得る化学エネルギーから電力として50%と熱として50%を得ることが出来ることになります。

燃料電池を利用した家庭用コジェネよりも、経済性の面や使い勝手に優れた「エコキュート」のほうに魅力がありそうです。2018年における普及台数も「エコキュート」が600万台に対して「エネファーム」は25万台と桁違いになっています。

### 【E-4】 家庭への水素ガス配管網の構築よりもオール電化

化石燃料の利用ができなくなった時には、人口密度の小さい国から液化水素を輸入する可能性も否定はできないのかもしれませんが。しかしLNGを輸入して配管網で天然ガスを送っている現状と同じように、水素ガス用の配管網を新設するのは巨額な投資が必要になり現実的ではありません。そんなことをするよりもオール電化にする方がはるかに優れていると考えられます。

現実的には都市ガスの配管を順次水素用に切り替えていくのでしょうか。都市ガスが今のように天然ガスになる前は水素と一酸化炭素の混合ガスだったので、水素配管への変換も不可能ではないはずです。この場合でも、個人的にはオール電化を選びます。

## まとめ

水素ガスと空気中の酸素の反応は、何もなくても燃焼という現象で進行しますが、燃料電池では水素ガスと酸素を電極表面で反応させる必要があることから、発電量が多い設備では膨大な面積の電極が必要になります。燃焼の場合には反応の場所は3次元ですが、燃料電池の場合には2次元なので、どうしても経済性の面で不利になりやすい宿命を背負っています。

その電極が高価なものだったら、設備費が規模の効果を出しやすい機械式熱機関を使った発電方式(従来型の火力発電方式)に経済性の面で対抗するのは難しそうです。

低コストの電極材料や電極製作技術が開発されて電池のコストが大幅に改善される見込みがないと燃料電池が生き残るのは難しいかもしれません。半世紀以上も基礎研究を続けてきたことを考慮すると楽観はできません。

## 自己紹介

氏名……………村井正治(ムライマサハル) 1941年生まれ  
住所……………東京都千代田区神田練塀町 メールアドレス……………m-murai@s7.wh.qit.ne.jp  
好きなこと……………美しいものを見ること、美しい音楽を聴くこと(除:演歌)

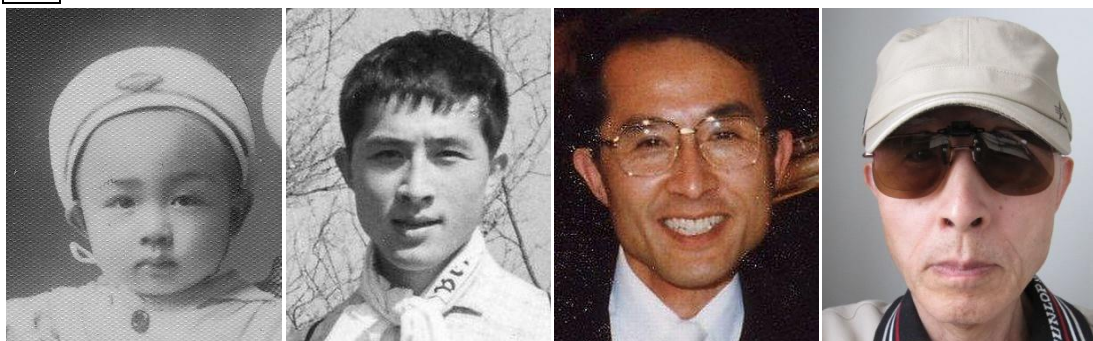
## 学歴

岩国市立岩国小学校入学 倉敷市立中洲小学校卒業  
前橋市立第一中学校入学 御殿場市立御殿場中学校卒業  
静岡県立沼津東高等学校入学 北海道立札幌南高等学校卒業  
東京工業大学入学 東京工業大学大学院修士課程修了

## 職歴

- \* 化学会社技術管理(新技術開発計画・他社新技術評価・新規事業調査・経済性評価)
- \* 化学品の新製法の研究(石油化学系)
- \* 酢ビ-エチレンエマルジョンの開発&プラント設計
- \* 石炭液化技術の開発(国家プロ)
- \* プロピレンオキサイドプラント、エチレンプラントなどの省エネルギー
- \* 熔融炭酸塩型燃料電池、固体酸化物型燃料電池の研究
- \* 化学法ウラン分離・NaS電池・その他の支援・評価
- \* 自然エネルギー関連情報を収集(運転試験も含む)
- \* 青色発光ダイオード用半導体積層技術(エピタキシャル成長)の検討支援
- \* 半導体製造装置排ガスの処理装置の検討

## 写真



- 2歳……………戦時中。まだ空襲が激しくないころ。神奈川県上溝。  
20歳……………恋人なし。大学の授業にはほとんど出席せず。  
52歳……………会社の後輩の結婚式で。  
77歳……………終活の真っ最中。