

燃料電池

【新連載】

Anatomical table
of Fuel Cells

小
解
體
新
書

～(前編)なぜ燃料電池が今開発されるか?～

恩田 和夫 Kazuo Onda

最近、新聞やテレビで燃料電池のニュースが良く流れる。効率が高いとか、環境に優しいとか、その内に燃料電池自動車が普及するとか。そこで燃料電池の最近の開発状況や動作原理、利用形態などを分かり易く解説してみたい。車のエンジンや発電所のタービンには幾つかの種類があるように、燃料電池にもいくつか種類があり、色々な利用が検討されている。前編では燃料電池を取り巻く状況とその動作原理や電池構成について概説したい。

今なぜ燃料電池か？

私達は今石油文明の真っ只中に生きている。今石油がなかったら、電気は来ないし、車は走らないし、化学繊維もできないので着るものにも困る。石油が無かったらと考えられないほど、我々の生活は安い石油に頼っている。この文明生活のお陰で現在の地球には人口が増え、その沢山の人が沢山の石油を使うので、石油が後50年も経つと枯れてしまうとか、燃した石油が炭酸ガスとなって大気中に貯まり、地球が暖かくなっていると良く言われる。最近では景気が悪いのと省エネルギー努力で、産業用の石油消費は減り気味であるが、個人生活の豊かさを反映して、車や家庭で使う石油やガスは増えている。また、狭い道路に排気量の大きい車が沢山走り、道路沿いの環境が悪化しているのも、車の排ガス規制も年々厳しくなっている。このような状況の元に、人間生活の豊かさをそのままに、環境汚染物質の排出を抑えつつ、使う石油やガスを減らそうとする努力が世界的に模索されている。つまり、現在の車のエンジンや発電所のタービンより効率がよく、環境性に優れた動力発生装置が移動用に、また家庭などの分散型電源用に望まれている。

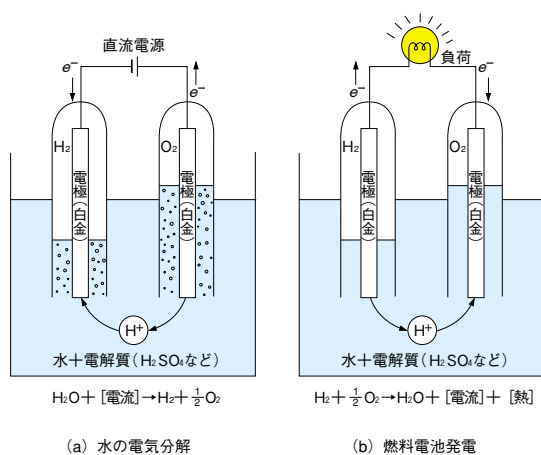
そのような技術の一つとして、燃料電池が高効率で環境性に優れた電源として開発されているので、良くニュースになる。現在のガソリンエンジンが燃料の持つエネルギーの15%程度しか動力に変換できないのに比べ、燃料電池自動車はそれより高い25%程度の変換効率で、NOxやSOxも殆ど出さずに発電できると期待されている。一方で、既存のエンジンやタービンの性能を更に伸ばそうとする開発も、発想を変えて鋭意進められている。エンジンなどの既存技術の生産・開発体制は良く整備されているので、新参者の燃料電池が果敢に攻めても、既存技術の対応は早く、エンジンなどの効率と環境性を向上させる研究開発も着実に進んでいる。

水の電気分解を逆にして燃料電池で発電する

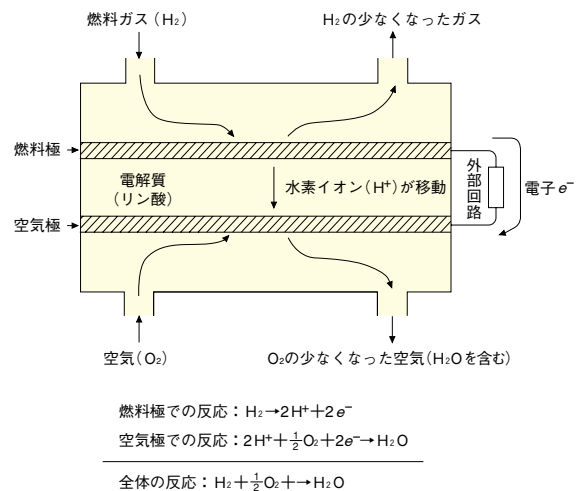
皆さんも中学生の頃に、<図1>のような水の電気分解の実験⁽¹⁾で、電気で水を水素と酸素に分解した経験をお持ちと思う。電極を挿入した試験管を逆にして、酸やアルカリの電解水溶液中に沈め、乾電池をつなぐと、簡単に電気で水から水素と酸素を作ることができる。世の中大体のことは逆も可能で、逆に水素と酸素を<図1

>のように電極部へ供給すると、直流の電気と水と熱が作れる。これが燃料電池の発電原理である。現在世の中で実際に使われている発電方式の多くは、燃料を燃してボイラーでお湯を沸かしタービンで動力を発生し、次にその動力で発電機を廻して電気を作っている。この二段階方式より、燃料電池は一段で電気を作ってしまうので、直接発電とも呼ばれる。燃料電池は決して最近できたものではなく、もう150年も昔にできたもので、アポロやスペースシャトルの宇宙開発時代に宇宙船の電源として活躍し、その勢いをかって引き続き地上用電源としても開発されるようになり、現在に至っている。

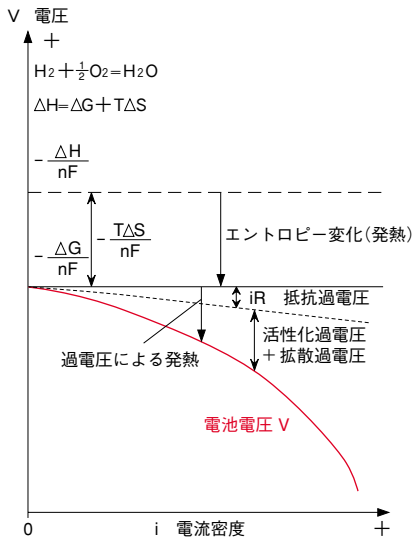
<図2>にもう少し詳しく燃料電池の作動原理をリン酸形の場合⁽²⁾を例に示す。水溶液中のリン酸 H_3PO_4 は H^+ の正イオンや PO_4^{-3} の負イオンに分かれ、電解液となっている。燃料である水素 H_2 は燃料極で H^+ と電子 e^- に分かれ、 H^+ は電解液中を空気極まで泳いで行って、電子 e^- を貰いながら空気中の酸素 O_2 と反応して水を作る。この間水素極で放出された電子 e^- は水素を透過させる多孔質な電極中を流れ、外部回路を通して、酸素を透過させる多孔質な空気極に戻り、水を作る反応に参加する。つまり、 H^+ が電解液中を流れると、分



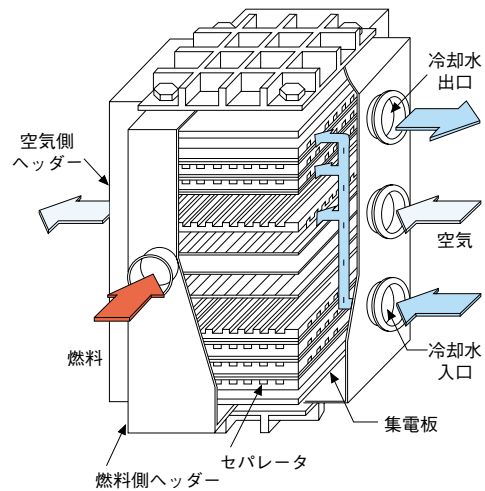
<図1>水の電気分解と燃料電池発電の原理



<図2>燃料電池の作動原理(リン酸型燃料電池の場合)



<図3>燃料電池の電圧・電流特性



<図4>燃料電池のスタックの構造

かれた電子eが外部回路に流れ、そこで発電と言う仕事をする。

燃料電池の発電効率は？

それでは燃料電池でどの位の発電効率が得られるのだろうか？ 先ほどガソリンエンジンはガソリンの持っているエネルギーの15%位しか車の駆動力にならないと言った。新鋭のガスタービン複合発電は、天然ガスの持つエネルギーの50%位を電力に変換している。少し難しくなって恐縮だが、電気化学の教科書に従って、燃料電池の効率を説明すると<図3>のようになる⁽²⁾。一般に温度Tの元で $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$ のような化学反応が進むとすると、左辺から見た右辺のエネルギー変化をみると、エンタルピー変化 ΔH 、自由エネルギー変化 ΔG とエンタルピー変化 ΔS の間に、 $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$ と言う関係が成り立つ。先の水素と酸素の反応は左辺の方がエネルギー状態が高いので、 ΔH 、 ΔG 、 ΔS は全て負となるので、以後-を付け正にして話を進める。<図3>でFは ΔG などのエネルギーを電圧Vに変換するファラデー定数を示し、nは電気化学反応中の電子の個数を表し、ここでは2である。水素と酸素が燃えて出す $-\Delta H$ のエネルギーの内、 $-\Delta G$

は電気に変換できるが、 $-T\Delta S$ は熱にしかない。つまり、水素と酸素の反応で最大限電力に変換できる割合は $\Delta G / \Delta H$ 、つまり82%(ただし高位発熱量基準)となり、燃料電池で得られる最大発電効率となる。エンジンやガスタービン複合発電は熱機関であるので、カルノー効率の制約を受けるが、燃料電池にはこの制限が無い。電流を流さない時、 $-\Delta G$ は実際の運転状態で電圧に換算すると

$$-\frac{\Delta G}{2F} = -\frac{\Delta G_0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \dots\dots\dots$$

と書ける。水素と酸素が完全に反応して水になれば、最大1.23Vの電圧を発生する。ここで ΔG_0 は標準自由エネルギーを、Rは気体定数を、 P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} は水素、酸素、水蒸気の分圧を示す。

以上は理想論で、実際の熱機関はカルノー効率*1を達成できないように、燃料電池も理論効率を達成できない。1500℃の最新鋭のガスタービン複合発電のカルノー

(*1) 熱を仕事に変える効率で、(高温熱源温度 - 低温熱源温度) / 高温熱源温度 で示される。熱力学の法則では特別の例外を除いて100%には達しない。

効率は83%となるが、実際は色々損失があり50%位の発電効率しか達成されていない。燃料電池も同じで、 $\Delta G / \Delta H = 82\%$ の効率を実際達成することはなく、現在開発されている燃料電池は30-50%程度の発電効率である。これは<図3>に示したように、電流を流さなければ $\Delta G / \Delta H$ に近い効率が得られても、電力を取ろうと電流を流すと、電気化学反応を起こすための活性化過電圧や、電解質や電極を電気が流れるための抵抗過電圧、多孔質な電極中を水素や酸素や生成した水蒸気が流れるための拡散過電圧など諸々の損失が発生し、セル電圧は0.7V程度に下がり、発電効率は30-50%になってしまう。しかし、数十kWと発電規模を大きくしないと高効率が達成できないガスタービン複合発電などの熱機関と違い、燃料電池は数十から数百kWと車に積むような小形のエンジンでも30%程度の高い発電効率が期待できる点に、車載用燃料電池や分散型電源を開発しようとする大きな魅力がある。

排ガスの清浄性は？

揮発性の高いガソリンを燃す車のエンジンは窒素酸化物や未燃燃料を排出するので、その対策が打たれている。効率の高い

ディーゼルエンジンも軽油を燃して、悪名高い粒状物質や窒素酸化物を出すので、その対策に多大な努力が払われている。それに対し燃料電池は動作温度が低いので、窒素酸化物の排出濃度は検出限界に近く、電気化学反応に特有な有害物質の排出も今のところ報告されていない。騒音についても、内燃機関は間欠燃焼による特有の騒音をマフラーなどの消音装置で抑えるが、燃料電池本体は静止機器であるため特に騒音対策を必要としない。燃料電池自動車は静粛過ぎて、車が近づいても静かで気が付かず、危険を感じるほどである。

燃料電池スタックはどんな構成をしている？

一枚の燃料電池単セルでは0.7V程度の電圧しか出ないので、リン酸形を例に示すと、<図4>のように数十から数百枚の単セルを直列にスタックし⁽¹⁾、数百Vの出力電圧にする。ただしそのためには各単セルに燃料や空気を図4のようにそれぞれ分けて、燃料電池発電をする面に均一に配る必要がある。この均一に供給する技術は、過電圧を抑えて触媒電極と電解質膜を接合する技術と合わせて、各社各様のノウハウがあり、性能や寿命を決める重要な項目の一つとなっている。一般に燃料電池は単セルの面積を大きくすることに比

べ、単セルを沢山スタックし性能を揃える技術の方が難しいので、電流が大きい割りに出力電圧が低い発電装置である。このように電氣的に各単セルは直列に接続されるが、燃料と空気はそれぞれ各単セルに並列に互いに混合しないように供給・排気される。また、燃料電池に供給された燃料の持つエネルギーの内、電力にならなかった50-70%は未反応分を除いて熱として電池内で発熱する。この発熱を<図4>のリン酸形燃料電池の例では、セパレータ(燃料や空気を電解質面に供給する溝流路を持ち、かつ単セルを電氣的に直列に接続する導電性板)中に水を流し、冷却している。後に述べる動作温度の高い燃料電池では水を流すとその圧力や温度が高くなり過ぎるので、空気を余分に流し冷却している。

どんな燃料電池が今開発されているか？

現在地上用に開発されている四種類の燃料電池を<表1>に示す。この他に宇宙用としてアルカリ形(電解液にアルカリ水溶液を使う)が活躍しているが、地上で使うと電解液が空気中のCO₂と反応し固形物

(*2) 熱供給発電。同一燃料から電力と熱を同時に使って両方を使う動力発電装置。

を形成するので、特殊用途に限られる。アルカリ形はここでは省略する。燃料電池はそれが使う電解質で良く分類される。電解質中では原理のところの説明したように、正イオンと負イオンが電荷中性を保って、最低どちらかが動き易い状態にある。固体高分子形やリン酸形は燃料である水素が電解質中をH⁺イオンとなって、空気側に泳いで行って酸素と結ばれる。熔融炭酸塩形は空気中のO₂が別途供給されるCO₂と一緒にCO₃²⁻となり、固体酸化物形ではO₂がO²⁻となって、電解質中を燃料極側に泳いで行って燃料と結ばれる。世の中には沢山の電解質があるが、燃料電池に使うとなると、電解質のイオン導電性が高いこと、燃料極や空気極などと相性が良く、電池性能が高く寿命が長いこと、環境性や経済性に優れることなどの条件を満たす必要がある。<表1>の燃料電池の動作温度は実に100℃程度から約1000℃までと広く、それぞれの電解質が高いイオン導電性を持つためには、それに適した温度がある。現在、動力発生装置としてガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、ガスタービン、蒸気タービンなど様々な熱機関が活躍しているが、燃料電池もそれぞれ特徴があり、その特徴を活かした用途に向けて研究開発が進められている。

後編ではそれぞれの電池の特徴と用途などを、燃料を電池用に改質することを含めた燃料電池発電システムの構成法と共に概説してみたい。

参考文献

- (1) 広瀬研吉、「燃料電池のおはなし」、p12,36,40日本規格協会(1992)
- (2) 恩田和夫、基調講演2、機械学会熱工学講演会講演論文集p61(1999)

著者略歴

恩田 和夫(おんだかずお)

1964年 東京工業大学卒業
 1966年 東京工業大学大学院修士課程修了、電気試験所入所
 (現在・産業技術総合研究所)
 1976年 スタンフォード大学客員研究員
 1984年 同所エネルギー変換研究室長
 1995年 豊橋技術科学大学教授
 研究分野/ 燃料電池、水電解、二次電池、放電化学など

<表1>代表的燃料電池の特徴

種類	固体高分子形 Polymer Electrolyte FC	熔融炭酸塩形 Molten Carbonate FC	固体酸化物形 Solid Oxide FC	リン酸形 Phosphoric Acid FC
電解質	カチオン 交換高分子膜	Li ₂ CO ₃ +K ₂ CO ₃	ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ (8mol%)	リン酸
イオン導電種	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
動作温度	100℃以下	約650℃	約1000℃	約180℃
燃料	H ₂ (CO ₂ 含可、CO嫌)	H ₂ , CO	H ₂ , CO	H ₂ (CO ₂ 含可、CO嫌)
燃料源	メタノール、 天然ガス	天然ガス、 石炭ガス、石油	天然ガス、 石炭ガス、石油	メタノール、 天然ガス
システム発電効率	25~40%	45~60%	50~60%	30~40%
単セル形状	角型平板	角型平板	円筒型、角型平板	角型平板
用途	輸送用、コジェネ用*2、 可搬用、宇宙用	電気事業用、 分散用	電気事業用、 分散用	分散用、電気事業用、 可搬用

Anatomical table
of Fuel Cell

燃料電池

小解體新書

～(後編)どのように燃料電池を使うか?～

恩田 和夫 Kazuo Onda

燃料電池が電気自動車や家庭用電源、分散形電源などに広く開発されている。燃料電池の原理、その高効率性や排ガス清浄性、電池の構成法などを前編で解説した。今開発されている燃料電池は主に水素を燃料とするので、天然ガスや石油を水素に改質する必要がある。後編では、この改質装置や排熱回収装置を組み込んだ発電システムや、各種燃料電池の特徴や開発状況について解説し、どんな使い方が期待されているか解説したい。

各種燃料電池の特徴と開発状況

今開発されている燃料電池の種類を説明したところで前編は終わった。引き続き後編では各種燃料電池の特徴と開発状況から解説を始めたい。各種燃料電池の発電特性(電流・電圧特性)の概要を<図1>に比較して示しておく⁽¹⁾。

(1) 固体高分子形燃料電池(PEFC)

固体高分子形は100 μ m程度の薄いカチオン交換膜(炭素や弗素による高分子膜でスルホン基SO₃⁻を持ち、H⁺がイオン導電種となる)を電解質とする。少し分かり難いと思われるが、この電解質膜は吸湿すると、H⁺イオンが膜中のスルホン基SO₃⁻を伝って動き易くなり、燃料電池に適した

イオン導電性を発現する。この膜は、水俣病で悪名高い水銀を用いた食塩電解法に代わる新しい電解法を模索していた中で、開発された新しい膜と聞いている。100℃以下でも高いイオン導電性を持つ薄い高分子膜がDu Pont社で開発されて以来、これまでの燃料電池より低い温度で、<図1>のように同等の性能を持つ電池を構成することができるようになった。以来、電気自動車用や家庭用電源として大きな注目を集めている。世界の車メーカーが莫大な資金と人を投じて、<図2>のような燃料電池自動車⁽²⁾の開発を進めているのは皆さんご存知の通りである。PEFCは固体酸化物膜を使うSOFCと同様に、高分子膜とは言え固体を使うので、熔融炭酸塩やリン酸の電解液を使うMCFCやPAFCより、液膜

の破断や蒸発などのトラブルは軽減される。

しかし、動作温度が低いので、電気化学反応を活発に進め電流密度を上げるためには、PAFCと同様に白金などの貴金属触媒を必要とする。この触媒が燃料を改質する時に出るCOに、僅か10ppm程度(10ppmは千分の1%)の薄い濃度でも被毒し、発電性能が劣化してしまう大きな欠点がある。PAFCのように動作温度を上がると、COの許容濃度も1%程度まで上がるが、COを10ppmまで現状技術で下げるのは容易ではない。COをH₂にする変成器や、COの選択酸化器などが現在、鋭意に開発されている。先ほど述べたように膜は適切に湿らせないと、良い発電特性が得られないので、運転中に生成する水を利用して、PEFC中の水は適切に管理され

る。空気側に生成する水を電極の撥水性(水のはじきやすさ)を利用して適切に排出しないと、空気極が水浸しになり発電性能が阻害される。

乗用車には100馬力(74kW)程度のエンジンが必要である。世界の自動車メーカはこの程度の出力のPEFCを開発し、車に載せて路上試験も含めて試験している。メタノールは天然ガスやガソリンより低温で改質できるが、メタノールを燃料とする電気自動車は燃料電池以外に改質器や変成器も車載しなければならない。しかも、これらの機器が運転温度まで温まらないと、水素がPEFCに供給されず、車は動かない。メタノールを改質せず直接電池に流し発電してしまおうとする燃料電池(DMFC)も開発されているが、<図1>に示したように今のところ十分な性能が得られていない。当座、水素を燃料とする電気自動車を普及させようと、圧縮天然ガスを積む内燃自動車と同様に、水素供給スタンドが都市近辺に試験的に建設されるようになり、新聞紙上を賑わせている。ガス会社も家庭に小型PEFCを置き、電気と一緒に温水も併給する小型発電機を強力に開発している。現在のガソリンエンジンの価格はkW当り数千円で寿命は5000時間程度であり、大型火力発電設備の価格はkW当り30万円程度で寿命は15年程度とされている。現在PEFCの発電装置は教材用などを除いて

市販されていないが、現在の動力発生装置と同程度の価格になれば、皆さんの近くでPEFCが活躍することになる。一方、ノートパソコン用などに小型携帯燃料電池も盛んに開発されている。

(2) 熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)

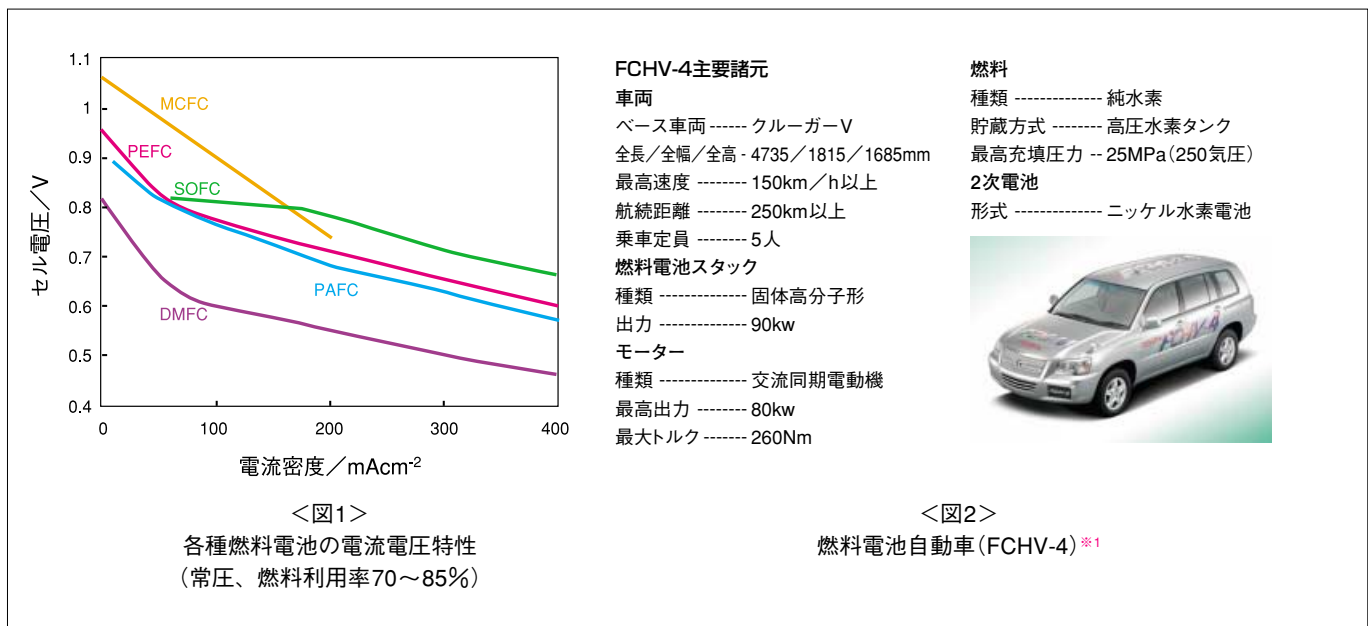
Li₂CO₃やNa₂CO₃などの塩を650℃近くまで加熱すると熔融し、Li⁺やNa⁺、CO₃²⁻のイオンに分かれた電解液となる。MCFCでは空気側に供給されるCO₂がO₂と一緒にCO₃²⁻イオンとなり、燃料側に泳いで行って燃料と反応する。熔融炭酸塩は腐食性が強いので、使える材料の選択範囲は狭い。動作温度が650℃と高いのでSOFCと同様に、PEFCやPAFCのように貴金属触媒がなくとも電流密度を上げることができる。貴金属触媒を使わないので、石炭ガスのようにCOを沢山含んでも電池動作に支障をきたさない。また、供給された燃料の持つエネルギーの内40-50%がMCFCで電気に変換され、残りは前にも説明したように未反応分を除いて650℃と言う高温の熱になる。そこで、高温型燃料電池では後述するように電池運転圧力を上げておき、ガスタービンでその高温熱の一部を動力として回収する。このように高温型燃料電池は石炭ガスのようなダーティな燃料が使い、ガスタービンと複合サイクルを構成し高効率発電ができるので、電

気事業者が開発に強い関心を寄せている。

これまで日本では経済産業省のプロジェクトとして、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が開発を推進してきた。1000kW級のMCFCを中部電力の川越発電所の敷地を借りて、4200時間運転し、発電効率45%以上を達成し、別に燃料電池の排熱で燃料を改質するスタックも併せてこれまで開発してきた。引き続きNEDOプロジェクトとして、高圧運転状態で酸化ニッケル空気極の溶出を抑制した長時間運転や、大型スタックの製作技術の確立、ガスタービン複合サイクルのデモ運転準備が進められている。米国でもエネルギー省が高温型燃料電池の開発を支援し、世界市場を目指して開発を進めている。

(3) 固体酸化物形燃料電池(SOFC)

ジルコニアZrO₂に8mol%程度のイットリアY₂O₃を固溶させ、1000℃程度に温度を上げると、燃料電池に使えるO²⁻イオン導電性を持つイットリア安定化ジルコニア(YSZ)が得られる。空気中のO₂が2O²⁻となって、YSZ中を燃料極側に泳いで行って燃料と反応する。既にYSZはガソリンエンジンの排ガス浄化用を含め、酸素センサーとして広く使われている。SOFCはMCFCより動作温度が高いため、各種セルミック스가電極やインターコネクター(気体を漏らすことなく燃料極と空気極を電氣的に接続



する電導体)に使われる。複数のセラミックを接合してスタックを作り上げるため、熱膨張係数を合わせ、熱応力に強い構成をとらないと、室温から1000℃近くまで上げ下げする間に、セルは壊れてしまう。円管は平板より熱変形に強い構成であるため、現状では円筒型SOFCが平板型SOFCより開発が進んでいる。平板型SOFCは他の燃料電池と同様コンパクトにスタックを構成することができるので、出力密度が高く取れる。最近、ナトリウム・硫黄二次電池による電力貯蔵が6000kW×8時間規模で実証試験されている。そこで使われるNa⁺イオンを通す約350℃のセラミック電解質も円筒状であることは興味深い。

気体が漏れることがなければ、一般に燃料電池の電解質膜の厚さは抵抗損失を減らすために薄い方がよい。円筒型SOFCのYSZの厚さは50 μm程度である。MCFCと同様SOFCも運転圧力を上げると、前編でも説明したようにセル電圧は上がり、活性化過電圧による損失が酸素分圧と共に下がるので、高温燃料電池の発電効率は増える。更に、ガスタービンと複合サイクルを構成すると、空気圧縮機動力を引いたガスタービン出力も電池運転圧力と共にある値まで増えるので、SOFC/GT(ガスタービン)複合発電装置が開発されている。<図3>に米国で試験されている出力220kWのSOFC/GT複合発電装置を

示す⁽³⁾。ガスタービンによる複合発電をオプションとして、このような高効率・高温燃料電池が分散型電源として多方面で関心を集めている。SOFCは米国、日本、ECを中心に世界市場を目指して開発されている。材料的問題を軽減するため、SOFCの動作温度を800℃程度まで下げる研究も最近では盛んである。高温燃料電池は急速起動・停止運転には適さないが、起動・停止に耐える試験も行われている。

(4)リン酸形燃料電池(PAFC)

リン酸形燃料電池は前編の原理のところでも取り上げたように早くから開発され、フィールド試験を含めて発電実績が最も多い。動作温度も180℃と低いため、使える材料の選択範囲も広く、40万円/kW程度の建設単価で市販されている唯一の燃料電池である。これまで数十kWから1万1kWまで数多くのPAFCが試験され、寿命劣化特性を含め最も運転実績や設計資料が豊富な燃料電池である。PAFCは180℃と動作温度がそれ程高くないため、燃料電池で発生する熱はPEFCと同様GT発電には不向きで、セパレータ中などに冷却水を流して取り出され、吸収冷凍機を含め空調用熱源とすることが多い。PAFCが沢山売れ、量産効果などが出て、低価格になることがPAFCの普及に不可欠である。その販路を広げるために、これまでの100kW

程度の分散型コジェネレーション用以外に、最近ではバイオガスや消化ガス、工業廃棄物から出る低濃度メタンやメタノール、排水素などを燃料とするPAFCや、或いは、高信頼性電源として地道にPAFCを普及させる努力も続けられている⁽⁴⁾。

天然ガスや石油を改質して水素を燃料にする

以上の説明で、COが含まれる場合もあったが、水素が燃料電池の燃料であった。地球のどこを掘っても水素は出てこない。水素は電気のように化石燃料などを何らかの方法で加工しないと得られない二次エネルギーである。それではどのように水素を作ったら良いのだろうか？ 現在、経済産業省では自然エネルギーの豊富なところで太陽電池や水力発電などで電気を作り、水を電気分解して水素に変換し、タンカーなどに積んで消費地に運ぶ水素エネルギー社会を構築する技術開発「WE-NET(World Energy NETwork)計画」を進めている。このように水素が手に入るようになれば、燃料電池にとってこれ程うまい話はない。現在、産業では石油中の硫黄分を除く時や、半導体を作る時に大量の水素を使っている。この水素は石油を改質して作られている。簡単のためCH₄に水蒸気H₂Oと熱を加えて、H₂にする改質反



SOFC/GT 複合発電の主要諸元

Cell current -----	267 amps
Cell voltage -----	0.610 volts
Pressure ratio -----	2.9
Compressor air intake rate -----	1.3 lb/s
Turbine inlet temperature -----	1440 F
SOFC DC power -----	187 kWe
SOFC gross AC power -----	176 kWe
Gas turbine AC power -----	47 kWe
System net AC power -----	220 kWe
Efficiency (net AC/LHV) -----	57%

<図3>

米国におけるSOFC/GT複合発電^{*2}

応 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{熱} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ について説明する。800°C近くで盛んになるこの反応には過熱源が必要である。一般に、燃料電池で燃料を全て反応させてしまうとセル電圧は大きく下がってしまうので、85%程度まで燃料を使って徐々にセル電圧を高く維持する。残った燃料は先の改質器の熱源として燃せば、無駄なく燃料を使ったことになる。高温型燃料電池では650°Cや1000°Cの高温熱が得られるので、この熱をスタックの近くで改質に使えば(内部改質)、スタックの冷却も兼ねられ、改質のための燃料も残す必要はない。高温燃料電池では、改質反応に必要な H_2O は燃料排ガス中の生成水蒸気を再循環させて利用する場合が多い。

改質反応で残ったCOは更に H_2O と反応させ、変成反応 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{熱}$ で H_2 にする。この反応は熱を発生し、改質反応より温度が低い方が進み易いので、低温燃料電池では改質器と分けて設計する。このように改質器や変成器は化学反応装置であるため、メタノール燃料を改質する電池自動車はガソリン車のようにスタータを廻せば直ぐ発進できる訳ではない。米国で地上用燃料電池を開発し始めた頃、化石燃料が直接使えない燃料電池は実用にならないと考えられていたようである⁽⁵⁾。現在でも、化石燃料が電気化学反応に直接使える性能の良い燃料電池は開発されていない。

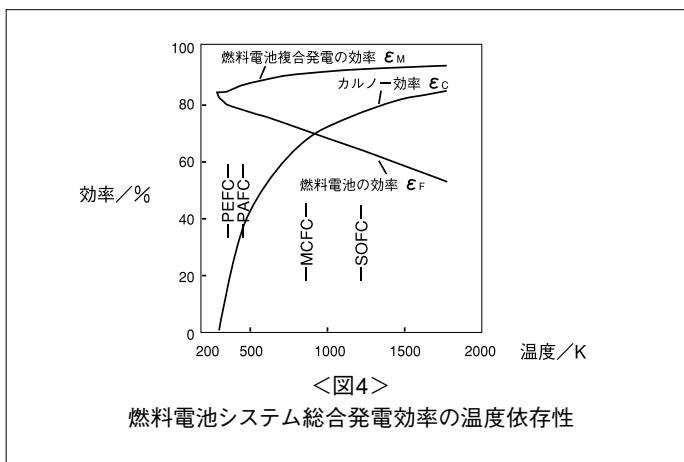
燃料電池発電システムとはどんなもの？

燃料電池の理想的な発電効率は自由エネルギー変化 ΔG とエンタルピー変化 ΔH の比 $\epsilon_F = \Delta G / \Delta H$ で与えられると前編で述べた。各種燃料電池は動作温度が異なるので、水素と酸素の電池反応 $\text{H}_2 + \text{O}_2 / 2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ で ϵ_F の温度変化を示すと<図4>のようになる⁽⁶⁾。高温燃料電池の方が ϵ_F は低い。それでは高温に耐える材料に苦労してまで、何故、高温燃料電池を開発するのだろうか？ まず、高温になる程化学反応は活発に進むので、高価な触媒を使わずとも活性化過電圧は下がり、<図1>に示した通り高温型も低温型と同等の

性能を発揮している。更に、高温型はその動作温度で出る高温熱をガスタービンなどの熱機関で動力回収すれば、総合発電効率を更に高くできる。前編で述べたカルノー機関(その効率 ϵ_C)で、燃料電池で電気にならなかった熱

$1 - \epsilon_F$ を理想的に動力回収したとすると、総合発電効率 ϵ_M は $\epsilon_F + \epsilon_C(1 - \epsilon_F)$ となり、<図4>のように高温型の方が高くなる⁽⁶⁾。以上は理想論でこれ程高い効率は実際得られないが、低温型が40%程度の効率に留まるのに対し、高温型はガスタービンと複合させて60%近い総合発電効率が期待されている。先に述べた電気出力220kWのSOFC/GT複合発電でも、内部改質や燃料・空気の再生加熱(電池からの高温排ガスで入ってくる燃料や空気を加熱すること)を行い、高位発熱量基準で50%を超える設計値となっている。

低温形と高温型で多少異なるが、燃料電池発電システムは、燃料電池本体、燃料改質装置、排熱回収装置、直交変換装置の四つから構成される。低温形では、燃料改質装置は未反応燃料を燃焼させ、水蒸気を添加したメタンなどの電池用燃料を加熱して H_2 に改質し、更に残ったCOも H_2 に変成し、電池に許される濃度までCOを下げる。高温型では、未反応燃料や高温熱を熱源とし、燃料排ガス中の水蒸気を再循環させながら燃料を外部・内部改質する。低温型の排熱回収装置はスタックで発生する熱を温水や水蒸気として回収し、空調用熱源や改質用水蒸気を作る。高温型の排熱回収装置では高圧空気を電池反応に必要な量以上に流し、電池を冷却しながら高温空気として取り出し、未反応燃料を燃やししながら更に温度を上げ、改質器を加熱したり、ガスタービンで動力回収する。直交変換装置は電池からの直流電力を交流に変換し、ガスタービン発電機の



<図4>
燃料電池システム総合発電効率の温度依存性

電力と合わせて送電する。PAFCの発電システムは市販されているが、今開発されている高温燃料電池システムも早く高効率発電装置として市販されるようになること期待しつつ本解説を終わりたい。

- *1 auto-ASCII24のホームページより引用 (http://auto.ascii24.com/auto24/issue/2001/1122/04rnp_tf1122_01.html)
- *2 UNITED STATES ADVANCED CERAMICS ASSOCIATIONのホームページより引用 (<http://www.advancedceramics.org/proceedings/Morrison%20presentation.pdf>)

参考文献

- (1) 太田健一郎、「エネルギー・資源」、21-5、p396(2000)
- (2) 河津成之、平成14年度電気学会全国大会、p7-279(2002)
- (3) S.E.Veyo、3rd Int. Fuel Cell Conf. (NEDO) p327(1999)
- (4) 木村正、「エネルギー・資源」、21-5、p402(2000)
- (5) 小澤丈夫、「燃料電池(FCDIC)」、1-1、p54(2001)
- (6) 太田健一郎、平成14年度電気学会全国大会、p7-275(2002)

著者略歴

恩田 和夫(おんだかずお)
 1964年 東京工業大学卒業
 1966年 東京工業大学大学院修士課程修了、電気試験所入所
 (現在・産業技術総合研究所)
 1976年 スタンフォード大学客員研究員
 1984年 同所エネルギー変換研究室長
 1995年 豊橋技術科学大学教授
 研究分野/ 燃料電池、水電解、二次電池、放電化学など