

燃料電池：その効用と限界

神 明 久・星 川 熙

I. はじめに

第4次中東戦争を契機として起きた石油ショック以前には、人々は石油をはじめとする化石燃料は、望めばいつでも手に入ると思っていたから中東諸国の禁輸政策に政府や国民の受けた衝撃は非常に大きかった。このときは、しかしながら、化石燃料の枯渇が現実問題として目前に迫っているという認識よりは、経済問題としての側面がもっぱらであった。すなわち、世界の政治情勢の急変などにより、わが国におけるエネルギーの安定供給がおぼつかなくなるという心配である。石油ショックの翌年、1974年に当時の通商産業省工業技術院は新エネルギー開発のために「新エネルギー技術開発計画」、通称サンシャイン計画をスタートさせた。その基本方針は「エネルギーの長期的な安定供給の確保が国民生活と経済活動にとって重要であることに鑑み、国民経済上その実用化が緊要な新エネルギー技術について、1974年から2000年までの長期間にわたり総合的、組織的かつ効率的に研究開発を推進することにより、数十年後のエネルギーを供給することを目標とする」と規定されていたが、化石燃料やあるいはウラン燃料の枯渇とまでの認識はなかったと思われる。むしろ石油一辺倒であったわが国のエネルギーをさまざまなエネルギー源に分散し、エネルギーの安全保障を高めようとするものであったといえよう。サンシャイン計画で取り上げられた重点技術は

1. 太陽エネルギー
2. 地熱エネルギー
3. 石炭エネルギー
4. 水素エネルギー

である¹⁾。

その後、1978年には第2次石油ショックが起き、通商産業省は省エネルギー技術を開発するため「省エネルギー技術開発計画」、通称ムーンライト計画を、また、このころから重要性が認識されるようになった地球環境保全を目的とする「地球環

境技術開発計画」を1989年より発足させた。

工業技術院は1993年には上記3つの計画を統合し、ニューサンシャイン計画を発足させた。ここでは次の6つのプロジェクトが取り上げられた²⁾。

1. 太陽エネルギー技術
2. 地熱エネルギー技術
3. 風力エネルギー技術
4. 石炭エネルギー技術
5. 燃料電池発電技術
6. セラミックガスタービン

このうち1の太陽エネルギー技術については、太陽熱の有効利用や太陽電池製造のコストを大幅に低下させ、また変換効率をアップさせることで太陽光発電の実用化の目途が立ったといえよう。しかし、太陽光のエネルギー密度が低いことから現在使われているエネルギーの大部分を太陽エネルギーで置き換えることはやはり困難であるといわざるを得ない。また、2の地熱エネルギーについてもその絶対的な量はエネルギーの主要部分を受け持つことは不可能である。3の風力エネルギーは欧米各国で開発が進められているが、天候に左右されるという弱点を克服するところまではいっていない。4の石炭エネルギーについては、固体ゆえの使いにくさを解消するため液化の技術を開発し、石油に代わる液体状燃料を得ようとするものであるが、石油と同じ化石燃料であることから、遠い将来にわたってエネルギーの主な供給源となりうるかは疑問である。6のセラミックガスタービンは燃焼温度を高温にして熱効率を上げる試みであり、エネルギー源という観点からは新エネルギーの開発というわけではない。

そのような中、5の燃料電池技術の開発が最近脚光を浴びている。言うまでもなく、燃料電池は水素と酸素の電気化学的な反応によって電力を得る装置で、反応後の生成物は原理的には水のみであり、地球環境の保全という観点からは理想的なエネルギー発生装置であると考えられている。しかしながら、燃料電池はエネルギー源として水素と酸素を必要とし、その意味では発電機と何ら変わるところはない。発電機を回すには火力であれ、原子力であれ、エネルギー源が必要であるのと同様である。地球上には酸素は豊富に存在するが、水素は単独では存在しない。従って、水素をどのように調達するかを考慮しない議論は無意味であって、それを含めシステム全体として環境に対してどのような負荷がかかるか、またエネルギー問題の解決にどのような貢献が期待できるかを考えなければならない。

水素のように単独では存在せず、何らかのエネルギー源より作り出さなければならぬエネルギーを二次エネルギーという。これに対し、化石燃料や太陽光エネルギーなどは一次エネルギーと呼ばれる。もちろん、国の政策でもそのことは重視されていて、水素エネルギー社会の実現に対して次のように述べている³⁾。

水素は、その利用段階ではゼロエミッションのエネルギー媒体であり、原理的には非化石燃料からも製造が可能で、その意味では環境的に望ましい二次エネルギーである。また、水素を利用した定置用の燃料電池の開発が進めば、電気と熱のバランスの取れた併給により高効率の分散型エネルギーシステムの構築が可能となる。一方、燃料電池自動車の開発が進めば、運輸燃料の代替化・エネルギー消費効率の向上が可能となり、NOxやPM等の有害物質を発生せず、二酸化炭素の排出も抑えられることとなる。さらに、パソコン、携帯端末といった電子機器への利用等、幅広い分野で燃料電池の利用が進むことが期待される。

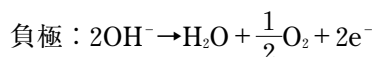
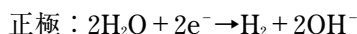
今後、水素を有望なエネルギー供給手段として位置付けていくため、大幅なコストダウンや長寿命化を目指した燃料電池本体の開発に全力をあげて取り組むとともに、水素を供給するためのハード面でのインフラ整備や、水素の生産、貯蔵や輸送、利用に係る規制の見直しを含めたソフト面でのインフラ整備の在り方を探求する。

燃料電池は原理こそ19世紀前半に発見されていたが、その実用化の目途が立ったのはごく最近である。しかし、多くの技術がそうであるように、燃料電池も改良が加えられ、急速に高性能になりつつある。従って、燃料電池と他のエネルギー装置とを比較して議論するとき、将来解決されるかもしれない欠点をとりあげて否定的な結論を出すのは公平ではない。そこで本論文においてはできるだけ原理的な立場から、燃料電池の可能性と限界について論じたい。例えば、熱機関の効率はどんなに改良が進んでもカルノーによって示された効率の上限を超えることはできない。そのような意味で燃料電池にも技術開発によっては超えることができない限界がある。言い換えれば、最良の燃料電池を考察の対象とすることによって、その可能性と限界が明らかになる。

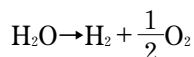
続く各章で燃料電池の原理および構造、燃料電池の種類、エネルギー効率などを考察し、さらに他の発電装置との比較などを通して新エネルギー源における燃料電池の位置づけを論ずる。

II. 燃料電池の原理と基本構造

燃料電池の原理の説明の際に必ず引き合いに出されるのが水の電気分解である。水分子 H_2O は化学的な結合力が強いので水素 H と酸素 O に分けて取り出すことは意外にむずかしい。しかし、電気の力を借りると比較的容易に分離させて取り出すことができる。水の電気分解ではビーカーなどに入れた希硫酸溶液に正負の電極を浸し、試験管などで電極に生じた気体をためる工夫をしておく。電極に電池をつなぐと正極の試験管には酸素が、負極の試験管には水素ガスがたまってくる。これは水の中に電流が流れると水分子が H^+ と OH^- に分かれ、それぞれ負極と正極に引かれるからである。ここで液体として希硫酸溶液を用いる理由は、純粋な水はほとんど電気を通さないので、希硫酸などの電解質の溶液を用いるのである。それぞれの電極で起きる反応は

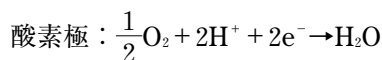
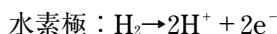


であり、これらの反応はトータルでは

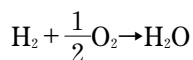


ということになり、電気の力で水分子を水素と酸素に分解できたことになる。

さて、この装置で電極を覆う試験管内には、正極には酸素が、負極には水素がそれぞれ貯められている。ここで電池のかわりに電球をつないでみると点灯するのが観測される。すなわちこの装置は起電力を発生させることができる。装置の中で起きた化学反応は



であり、これらの反応はトータルでは



となる。これは正に水の電気分解の逆である。ただし、この装置では試験管内の水素や酸素がなくなると発電しなくなる。従って、実際の燃料電池では両極に連続的

に水素と酸素を供給し、また、反応で生じた水を取り除かなければならない。「電池」という言葉のイメージとは異なって、実は燃料電池はむしろ発電機というべきものである。

このような現象は19世紀中ごろにイギリスのグローブ卿によって発見されたものであり、その歴史は古い。しかし、燃料電池が実用化されるまでには長い年月が必要であった。このような装置では取り出せる電流が微少で、まったく実用的ではなかったからである。大きな電流を取り出せなかった理由は、①反応が生じる電極と水素、酸素の接触面積が小さいこと、②電極と電極の間に大きな電気抵抗を持つ電解質が存在すること、および③反応が十分早く進行するために必要な温度が高くなかったためである。①および②については燃料電池の構造を工夫することで改良が加えられ、③については低温でも反応が進むように触媒を用いるという工夫がされ、また一方で高温で動作する燃料電池が考案されたことによって、実用的な燃料電池が得られるようになった。①および②の弱点を克服するためにとられた燃料電池の構造は、大面積の平らな電極の間に薄い電解質を挟むという構造である。③については、ひとつは低温で反応が進むような触媒としてPtが有効であることが発見され、低温で動作する燃料電池が開発され、また他方、高温で動作する燃料電池は、その高温を利用して、純粋な水素でなくとも、例えば化石燃料などから水素を取り出しつつ動作する燃料電池を作ることが可能であることが実証され、燃料電池の活躍の場が大きく広がったといえる。

Ⅲ．燃料電池の種類と発電効率

Ⅱ章でも述べた通り燃料電池は、基本的に電極、電解質、燃料ガスにより成り立っている。実際には2枚の電極が電解質を挟み、そこに燃料ガスを供給することによって発電可能となる。1対の電極と電解質の組み合わせはセルとよばれ、1つのセルから取り出すことのできる電圧は1V弱である。複数のセルを積層したスタックとよばれるユニットにより工学的に利用可能な電圧が得られる⁴⁾。

各燃料電池を動作させるにはそれぞれのスタックを適温に調整する必要がある、発電時のスタック温度により低温形、中高温形の2つに大別される。それぞれの特徴として以下のようなことが上げられる⁵⁾。

低温形

電力量は少ないが小型化，軽量化が可能であり，携帯型燃料電池として実用化が進んでいる。ただし，触媒として使用されるPtは改質によって生じるCOにより被毒し，出力に影響がでるため，燃料として純粋な水素を必要とする。

中高温形

運転温度が高温のため出力は低温形に比べ大きい。スタックの熱を改質に使えるため水素以外にメタンやガソリン等の化石燃料を使用できる。改質とは主に水蒸気を利用し化石燃料を燃料電池用燃料に変換するプロセスのことであるが，詳細は「燃料改質プロセス」の章で述べる。中高温形の中にも低温形同様にPtを使用するタイプがある。それらについてはPt被毒を避けるためCOを除去するシステムが別途必要になる。また，熱を利用するにはスタックにできるだけ近いところで改質を行うことが望ましい。このため，低温形のように小型化は難しく，またシステムは複雑になる。

燃料電池は，動作温度の他に使用される電解質によっても分類される。低温形燃料電池にはアルカリ形燃料電池 (AFC)，固体高分子形燃料電池 (PEMFC) などがあり，中高温形燃料電池では，リン酸形燃料電池 (PAFC)，熔融炭酸形燃料電池 (MCFC)，固体酸化物形燃料電池 (SOFC) がある。それぞれの主な特徴を以下の表に示す⁶⁾⁷⁾。

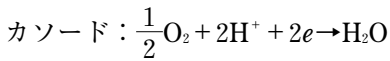
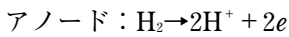
PAFC (リン酸形燃料電池) は1980年代より開発が進み，現在最も実用化されている燃料電池である。電解質は高濃度リン酸を使用し，改質し得られた高濃度の水

表1 燃料電池の電解質による分類

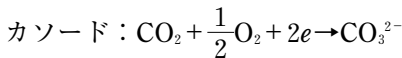
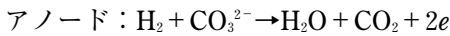
名 称	電 解 質	作 動 温 度	利 用
アルカリ形 (AFC)	水酸化ナトリウム	60～80℃	アポロ宇宙船，スペースシャトル
固体高分子形 (PEMFC)	フッ素樹脂系イオン交換膜	室温～100℃	自動車，モバイル機器
リン酸形 (PAFC)	リン酸水溶液	200℃	銀行，病院，コンピュータ施設
熔融炭酸塩形 (MCFC)	混合炭酸塩	650～700℃	実用化を実証中
固体酸化物形 (SOFC)	固体酸化物 (安定化ジルコニア)	900～1,000℃	実用化を実証中

素で発電を行う⁸⁾。一方、MCFC（熔融炭酸塩形燃料電池）は旧通商産業省のムーンライト計画により1981年より開発が開始された。しかし、現在一部実用化されている物を除けば研究段階の燃料電池である。電解質には炭酸リチウムや炭酸ナトリウムを使用し、燃料は水素以外にも天然ガスの改質ガスや石炭化ガスが使用できる⁹⁾。発電に重要な役割を果たす電極反応はこれら使用する電解質によって異なる。以下にPAFCとMCFCのアノードおよびカソードの反応を示す。

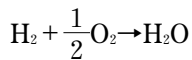
PAFCにおける電極反応



MCFCにおける電極反応



しかし、どちらのタイプも全体の反応は



であり、水素と酸素から水が生じることに違いはない。標準状態の水素と酸素から水が生成する場合に生じるエネルギーは水の標準生成エンタルピー（ Δh_{H_2O} ）で表される。標準生成エンタルピーは反応物質と最終生成物質が同じであれば反応経路によらず同じ値となる。従って、どの燃料電池においても標準生成エンタルピーは同じであり、水素1分子から理論上得られるエネルギーの値は変わらない。反応によって生成する H_2O の状態が液体の場合の Δh_{H_2O} は高位発熱量（HHV）と呼ばれ、気体の場合は低位発熱量（LHV）と呼ばれる¹⁰⁾。燃料電池の効率を計算する場合は主にHHVが使用される。一方、燃料電池が燃料1モルから取り出すことのできる電気エネルギーの最大値は以下の式によって表される。

$$\Delta g = nF\varepsilon \tag{1}$$

ここで n 、 F 、 ε はそれぞれ

n ：電池反応で生じる電子数

F : 1 モル分の電荷

ε : 理論電圧

である。 Δg はGibbsの自由エネルギーと呼ばれ、熱力学の法則により Δg と Δh_{H_2O} は以下のような式によって関係付けられる。

$$\Delta g = \Delta h_{H_2O} - T\Delta s \quad (2)$$

ここでT, Δs はそれぞれ

T : 絶対温度

Δs : モルエントロピー

である。燃料電池の最大効率、モル生成エンタルピー Δh_{H_2O} がすべて電気エネルギーに変換されたと仮定し

$$\text{最大効率} = \frac{\Delta g}{\Delta h_{H_2O}} \quad (3)$$

で表す¹⁰⁾。式から明らかなように $-T\Delta s$ 項(エントロピーロス)のため効率は1にならない。 Δg は燃料電池の条件により様々な値をとり、その都度計算によって求まる。

スタック内が室温状態(298.15 K, 1 atm)とした場合、 Δg は標準的に使われる以下の文献値¹¹⁾を使用することができる。この条件下での最大効率を求めると次のようになる。

$$\Delta h_{H_2O}(\text{HHV}) = -285.83 \text{ kJmol}^{-1}$$

$$\Delta g = -237.13 \text{ kJmol}^{-1}$$

$$\frac{\Delta g}{\Delta h_{H_2O}} = 0.82 \quad (4)$$

実際の燃料電池では送りこまれた燃料ガスの一部が反応に用いられずそのまま廃棄される。そのことを考慮に入れて燃料利用率 U_f を以下の式で定義する。

$$U_f = \frac{\text{セルで反応した燃料の質量}}{\text{セルに供給した燃料の質量}} \quad (5)$$

また、セルの実際の動作電圧と理論的に計算によって求められる電圧の間には差がある。実際のセルの電圧を V_c とし、理論的に求められるセルの電圧を V_i とすればセルの効率 η_v は以下の式で表される。

$$\eta_v = \frac{V_c}{V_i} \quad (6)$$

HHVに対して効率が1となる電圧は式(1)より1.48 Vと求められるので、式(6)は

$$\eta_v = \frac{V_c}{1.48} \quad (7)$$

と書き換えられる。実際の燃料電池について発電効率を求める場合、 U_i 、 η_v の値を式に取り入れる必要があり、計算式は以下のようなになる¹²⁾。

$$\frac{\Delta g}{\Delta h_{H_2O}} \times 100 \times U_i \times \eta_v \quad (8)$$

運転温度650度のMCFCについて実際の条件より¹²⁾燃料電池の発電効率を求めると以下のようなになる。

$$\frac{\Delta g}{\Delta h_{H_2O}} = 0.79$$

$$U_i = 0.85$$

$$\eta_v = 0.78$$

$$\frac{\Delta g}{\Delta h_{H_2O}} \times U_i \times \eta_v = 0.52 \quad (9)$$

ただし、ここでは燃料の改質率や改質に使われるエネルギーは考慮していない。また、SOFCについてもほぼ同様の発電効率を得られることが分かっている。

IV. 燃料改質プロセス

燃料電池には燃料として水素をどのように得るかという問題が存在する。これを解決する方法としては改質と呼ばれるプロセスが一般的である。改質は化石燃料を水素に変換するもので、水蒸気を使用する水蒸気改質が最もポピュラーである。以下にメタンガスの水蒸気改質における反応を示す。



この反応はすべての炭化水素について同様に起こり、水素と一酸化炭素を生成する。天然ガス等の身近な化石燃料には種々の炭化水素が混在しているが、このプロセスにより各成分を分離することなく水素を得ることができる。しかし、触媒としてPtを使う燃料電池の場合は、燃料中にCOが存在するとPtが被毒し出力低下を引き起こす。シフト反応と呼ばれる別な反応をさらに行うことである程度COを減少させることは可能であるが、完全に取り除くことは困難である。しかし現在では、触媒やCO除去装置等の進歩により、それらの問題の多くは解決され、AFCを除くすべての燃料電池でこの方法を使用することが可能である。

多くの燃料では、改質を行う場合、500℃以上の高温が必要となる。中高温形燃料電池であるMAFC、SOFCは動作温度が高温のため、廃熱を利用することによって改質を行うことができる。さらにCOも燃料として使用するため、低温形の場合のようにCO除去システムを必要としない。PAFCはMAFCやSOFCとは異なり、動作温度が約200℃と改質に利用するには温度が低い。このため、改質を行うには別途熱を供給する必要がある。熱源としては未使用のまま排気される排ガスをバーナーで燃焼させる方法をとるのが一般的である。また、Ptの被毒を避けるためにCO除去装置が必要となる。

V. 火力発電及び複合発電の発電方式

昭和30年代に急増した電力需要を満たすため、我が国でも大型の最新鋭火力発電設備が導入され、昭和37年以降、水力に変わり電源供給の主力としてその地位を確立した。1973年のオイルショック以降電源多様化が進められ、火力発電についても石油以外の燃料、すなわち石炭、LNGの使用比率が高まった。さらに近年、CO₂削減の観点から発電効率の更なる向上を目指し、様々な発電方式が研究されている¹³⁾。現在では、我が国の発電量の64%が火力発電によってまかなわれている¹⁴⁾。

以下に現在運用されている火力発電の主な発電方式を述べる。

① 汽力発電

汽力発電は石油、石炭、天然ガス、廃棄物等をボイラーで燃焼させ、その熱で高温高压の蒸気を発生させ、蒸気タービン、発電機を回転させて電力を発生させる。火力発電のみならず、原子力発電等多くの発電で採用されている発電方式である。

② 石炭ガス化複合発電 (IGCC)

IGCCは石炭をガス化し、クリーンにして得られた石炭ガスを用いた複合サイクル発電である。複合発電とは、複数の発電機関を組み合わせたシステムのことであり、複合サイクル発電、コンバインドサイクル発電などとも呼ばれる。IGCCでは、粉碎した石炭をガス化材と共にガス化炉に投入し、生成したガスによりタービンを動作させる。また、同時に廃熱回収ボイラーで蒸気を発生させ蒸気タービンも動作させる。複合発電では、低温エネルギーについても利用可能なため、熱効率の向上が可能である¹⁵⁾。

③ LNG複合サイクル発電 (LNGCC)

LNGCCは液化天然ガス (LNG) を燃焼させガスタービンと蒸気タービンにより発電を行う複合発電である。ガスタービンで仕事をした500度以上の高温排ガスで蒸気を発生させ、蒸気タービンを動作させる¹⁵⁾。

複合発電は従来の発電方式と比べ熱効率が高いため、現在火力発電方式の主流となりつつある。一方、化石燃料を使用する動作温度の高いMCFC及びSOFCでは高温排気ガス中に未利用燃料が含まれるため、これをガスタービンの燃料として利用できる。このような燃料電池とタービンを組み合わせた発電方式を燃料電池複合発電と呼ぶ¹³⁾。以下に主な燃料電池複合発電を示す。

① IG-MCFC (石炭ガス化MCFC複合発電)

石炭ガスを燃料としたMCFCに加え、高温排気ガスを利用し蒸気タービンを動作させる発電方式である。MCFCの動作温度が650～700度であることが複合発電システムを可能にしている¹⁶⁾。

② IG-SOFC (石炭ガス化SOFC複合発電)

IG-MCFCと同様石炭ガスを燃料としSOFCを動作、さらにガスタービンと蒸気タービンを動作させ発電を行うシステム¹⁶⁾。

③ LNG-MCFC (LNG-MCFC複合発電)

燃料にLNGを使用し、MCFCとガスタービンを組み合わせた発電方式。実現すれば高効率の発電が可能。

④ LNG-SCFC (LNG-SCFC複合発電)

燃料にLNGを使用し、SCFCとガスタービンさらに蒸気タービンを組み合わせた発電方式。高効率の発電が期待されている。

VI. 火力発電の発電効率

熱機関の熱効率は、カルノーサイクルによって限界値が決まる。したがって、熱機関を使った火力発電の場合も、発電効率の上限はこのカルノーサイクルによって定められる。カルノーサイクルで示される効率は

$$\frac{T_2 - T_1}{T_2} \tag{11}$$

である。ここで T_2 は熱機関に流入する気体の絶対温度、 T_1 は排出される気体の絶対温度である。近年、火力発電における蒸気温度（流入気体の温度）は、タービン等の材質が改善された結果高温化が進み、発電効率は向上している。現在実施が検討されている次世代LNG複合サイクル発電では、タービン入口のガス温度が1,700度（1,973K）である。ここで、熱交換によって出口のガス温度が600度（873K）になるとすれば、熱効率は

$$\frac{1973 - 873}{1973} = 0.55 \tag{12}$$

となる。実際のデータとして横浜火力発電所の場合¹⁷⁾で計算してみると、ボイラー入口のガス温度は1,288度（1,561K）であり、排気ガスの温度が593度（866K）であるため、熱効率は

$$\frac{1561 - 866}{1561} = 0.44 \tag{13}$$

となる。上に述べた(4)式と(12)式を比較すると、燃料電池の理論上の効率は火力発電の熱効率より4割程度高い。火力発電における発電効率は熱効率には届かないことを考慮すればその差はさらに大きいと考えられる。従って、燃料電池の潜在的な能力

表2 各発電方式における発電効率 (%) ¹⁸⁾

発電方式	発電端効率
石炭超臨界汽力発電	37.0
MCFC	50.0
SOFC	55.0
IGCC-43% (1,300度)	43.0
IGCC-50% (1,700度)	50.0
LNG超臨界汽力発電	37.0
LNGCC-60% (1,700度)	60.0
LNG-MCFC複合	60.0
LNG-SOFC複合	65.0
地熱発電	38.5*
原子力発電	38.2*
風力発電	25.0*
都市ゴミ燃焼汽力発電 (500度級)	25.0*

注) *印は送電端効率

は非常に高いものと考えられる。また、(9)式と(13)式を比べてみても燃料電池の方が効率が高いことがわかる。以下に現在運転されている各発電方式の発電効率を示す。

この表より、単独の発電機関としてはSOFC（固体酸化型燃料電池）が汽力、風力、原子力に比べ2割程度効率がよいことがわかる。これは先に述べた計算値での比較とほぼ一致する。また、従来型の火力発電による熱効率限界約44%（HHV基準）をはるかに凌ぐ。一方、複合発電においても燃料電池とタービンを組み合わせたLNG-SOFC複合がIGCCやLGCC等の燃料電池を組み込まない複合発電より高効率であることがわかる。試験段階のものも多いが、いくつかの問題を克服することができれば燃料電池に期待するところは大きい。

Ⅶ. むすび

これまで見てきたように、燃料電池はきわめてすぐれた特性を持っている。ひとつはすぐれたエネルギー効率、他の一つは環境に負荷をかけない、すなわち廃棄物質としては基本的に水だけ、ということである。現在の文明が抱えるエネルギー問題および環境問題の解決に大きな力になると考えられる。

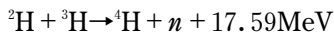
エネルギー効率については主に火力発電所と比較して論じたが、最新鋭の複合型の火力発電所と比較しても遜色ない。

排気物質が水だけという特徴は燃料としてもちいるものが水素と酸素のみであるから当然であろう。ところで地球上には酸素は単体の物質として豊富に存在するが、水素はそうではない。水素を含む物質として水が豊富に存在するが、燃料電池の燃料となるのはあくまで単体の水素であって水ではない。そこで水素をどうやって得るかが問題となる。最初に考えられるのが水の電気分解である。しかし水を電気分解するには電気エネルギーが必要である。その結果得られた水素と酸素の分離した状態がもつエネルギーは、正に燃料電池内で水素と酸素を結合させたときに取り出すことのできるエネルギーに等しい。

高温型の燃料電池では燃料として化石燃料を用いることができる。高温の燃料電池内で化石燃料に含まれる水素を分離させることができるのである。しかし、これが可能なのはもともと化石燃料にそれだけのエネルギーが含まれているからであって、その一部を水素の分離に使っているにすぎない。化石燃料を燃焼させてエネルギーを取り出す場合にはカルノーの示した効率を超えることはできないが、高温型の燃料電池であればその制約はない。その意味で燃料電池の効率が単体の火力発電

より高くできることに不思議は無い。化石燃料を燃料電池の燃料とすることに異議を唱えるわけではないが、化石燃料の埋蔵量には限りがあり、それが現在のエネルギー危機のひとつの問題点であることを認識すれば、化石燃料で燃料電池を永続的に稼働させることができないことは明らかである。

水素を燃料とするエネルギー発生装置として核融合がある。核融合の場合には燃料としての水素を得るためのエネルギーが問題にされることはない。これはなぜであろうか。核融合では水素原子の持つ化学的なエネルギーを利用するのではなく、水素の原子核の持つエネルギーを利用するからである。核融合が比較的实现しやすいといわれる重水素・三重水素の核融合反応においては



という反応でエネルギーが得られる。従って重水素、三重水素を等量含んだ1モルの水素が完全に核融合したとすれば

$$8.482 \times 10^9 \text{kJ}$$

のエネルギーが得られることになり、これは(4)式で示される燃料電池についての値のおよそ 3.5×10^7 倍という正に桁違いの大きさである。このように原子核のもつエネルギーは桁違いに大きく、水素を分離するのに必要なエネルギーなどもの数ではないと言える。ただし、原子核の変化を伴う反応を利用することから、さまざまな放射線や放射性の破棄物質について注意が必要となろう。また、核融合炉は必然的に大規模なものになり、事故の際の対処についても燃料電池発電装置よりも大きな注意を払う必要がある。

燃料電池はエネルギー効率および廃棄物質の無害性から火力発電や原子力発電にくらべて大きなメリットを有していることは明らかであるが、燃料電池は今後のエネルギー源として万全のものでない。燃料電池の燃料として化石燃料を用いる場合は、化石燃料自体の埋蔵量が燃料電池から得られるエネルギーの上限を決めることになり、現在の文明社会の抱えるエネルギー問題の本質的な解決にはならないことは明らかである。燃料、すなわち水素を得る方法が確立されてこそ燃料電池の優位性を主張できるのである。その方法としては、太陽光発電などにより水を電気分解することなどが考えられるが、その場合、太陽光発電による電力をそのまま利用することとどう異なるのか様々な観点から検証が必要であろう。また、人類による大量のエネルギー消費が地球環境に与える影響については、エネルギー生産に伴う有害排気物質の問題以外にも、地球上におけるエネルギーの流れを大きく乱さないということを条件に課さなければ、いずれ地球環境のエネルギー汚染が制御不可能な

までに増大するであろう。

注

- 1) 資源エネルギー庁（編）新エネルギー便覧，平成10年度版，通商産業調査会，1999年3月，226頁
- 2) 資源エネルギー庁（監修）1999/2000資源エネルギー年鑑，通産資料調査会，1999年1月，643頁
- 3) 資源エネルギー年鑑編集委員会（編）2005-2006資源エネルギー年鑑，通産資料出版会，2005年4月，122頁
- 4) 日本エネルギー学会（編）エネルギー便覧 プロセス編，732頁
- 5) 燃料電池発電システムと熱計算
- 6) 日本エネルギー学会（編）エネルギー便覧 プロセス編，733頁
- 7) James Larminie, Andrew Dicks 梶屋治紀（訳）解説燃料電池システム，オーム社，2004年10月，18頁
- 8) 電機工業会（編）電機，2005年7月号，8-14頁
- 9) 電機工業会（編）電機，2002年6月号，45-49頁
- 10) James Larminie, Andrew Dicks 梶屋治紀（訳）解説燃料電池システム，オーム社，2004年10月，41頁
- 11) 日本化学会（編）化学便覧基礎編Ⅱ，改定4版，1993年，288頁
- 12) 燃料電池発電システムと熱計算
- 13) 日本エネルギー学会（編）エネルギー便覧 プロセス編，597頁
- 14) 資源エネルギー庁（編）エネルギー白書2005，第1節エネルギー需給の概要 第2部エネルギー動向3. エネルギー供給の動向
- 15) 産業技術総合研究所RIO-DB (<http://www.aist.go.jp/RIODB/riohomej.html>)
- 16) 電力中央研究所（編）電中研レビュー，No44，2001，101-102頁
- 17) 東京電力横浜火力発電所HP (<http://www.tepco.co.jp/yokohama-tp/se05-j.html>)
- 18) (財)地球環境産業技術研究機構「発電部門における発電技術の特性・コストデータ想定」から一部抜粋