

HHOG — 水電解による高圧水素製造

原田 宙幸

三菱商事株式会社 企画開発部

〒100-8086 東京都千代田区丸の内二丁目6番3号

HHOG - High Pressure type Hydrogen Oxygen Generator

Hiroyuki HARADA

Planning & Development Dept., MITSUBISHI CORPORATION

6-3, Marunouchi 2-Choume, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8086

Phone: 03-3210-7537, Facsimile: 03-3210-7557

E-mail: hiroyuki.harada@jp.mitsubishicorp.com

The destruction of earth environment such as green-house effect and acid rain is a serious problem for the human-beings in 21st century. This problem is caused by over discharge of the carbon-dioxide, nitrous oxide, sulfurous oxide by the petroleum combustion to get sufficient energy for satisfying today's human activity. The settlement of this problem is necessary to stop the use of petroleum and develop the new clean energy to be able to replace it.

Hydrogen has a feasibility of a clean energy to be able to replace the petroleum. HHOG, high-pressure hydrogen oxygen generator, can generate high-pressure hydrogen and oxygen without any gas compressor. So, HHOG is a suitable hydrogen generator for the replacement of the petroleum.

1. はじめに

エネルギーとは、「仕事をなし得る能力」を示す物理用語である。最初は、位置エネルギーや運動エネルギー等の物体が力学的仕事をなし得る能力の意味であったが、科学技術の進歩に伴って、熱、光、電磁気加わり、さらに、質量もエネルギーの一形態であることが分かって、今日人類は、地球をも破壊できるほど強力な原子力エネルギーをも掌中にしている。

人と猿との違いが、「火の利用」にあることから分かるように、文明の発達に伴い、人が消費するエネルギーは増え続けてきた。エネルギーが物理学的な意味以外に、活力とか、精力とかの意味で用いられることが多いのは、人の活動とエネルギー消費が切り放せないからである。20世紀を振り返ると、これまでのどの世紀よりも人類が繁栄した世紀であったことが分かるが、どの世紀よりも多くのエネルギ

ーを消費してきた世紀でもあったことが分かる。

四半世紀程前に出現した IC は、機械が無人で自動的に仕事をするを可能にした。この結果、「機械にできることは機械にさせ、人間は、人間にしかできないことをする」ことが普遍化し、それまで全て人間がするものとされ、天職とされてきた仕事を、機械と人間が分担することを当然とする社会が実現した。今日人類は、Y2K 問題で明らかになったように、昔の王様が奴隷に取り囲まれて生活していたように、ICに取り囲まれて生活しており、庶民でも、物的生活水準や医療水準、空間移動能力、情報収集能力等において、嘗ての王侯貴族をはるかに凌いでいる。これらは、全て、ICによる自動化により実現されたことである [1]。

ICの出現により、全て人間がするものとされ、天職とされてきた仕事を、人と機械が分担できるようになったので、人類の活力が飛躍的に増大し、誰もが、豊かで便利な生活ができるようになったが、消

費するエネルギーも膨大な量となり、それを石油等の化石エネルギーでまかなってきたため、無限に大きく人の活動が影響するとは考えてもいなかった地球環境にまで影響が及ぶことが問題となってきた。その上、その化石燃料が枯渇することまでが問題となってきた。

現在の人類が消費するエネルギーは、単純に、人間が消費するエネルギー（1人の人間が消費するエネルギー*人口）ではなく、これに機械が消費するエネルギー（機械の消費するエネルギー*機械の台数）を加算したエネルギーである。従って、人がエネルギー消費を節約しただけでは、現在のエネルギー問題を解決することはできない。人が消費するエネルギーを節約する以上に、ICによる自動化を活用して、機械が消費するエネルギーを削減する省エネが重要であり、効果的である。

日本では、第一次石油危機が発生した1973年より、マイコン制御による省エネが広く普及し、GDP当たりで換算して、30%以上の省エネが進められてきた実績がある。最近話題にされているハイブリッド自動車も、ICによる自動化により、エンジンと電動モーターの効率の良いところだけを利用できるようにした省エネである。

このような機械の省エネにより、当面の人口増加や生活レベルの向上があっても、化石燃料消費量を増やさないようにし、できるだけ早期に人類が存分にエネルギーを消費しても、地球環境に影響しないクリーンなエネルギーシステムを開発することが、現在のエネルギー問題を解決する最も有効な対策である[2]。

本報告では、先ず、人類が利用可能なエネルギー源について考察し、次に、最近開発された水電解により高圧の水素と酸素をコンプレッサーを用いること無く直接発生できるHHOG（高圧型水素酸素発生装置）が、これからのエネルギー問題解決に重要な役割を担う水素エネルギーの普及に有効であることを明かにする。

2. 利用可能エネルギーについて

2-1. エネルギーの種類

今日の人類が利用可能なエネルギーは、化石エネ

ルギー、原子力エネルギー、自然エネルギー、地熱エネルギーの4エネルギーに分類されてきたが、今日では、これに省エネを加えて5エネルギーとするのが正しい分類である。省エネは、太陽光発電等と同じように、これまで無駄に捨てられていたエネルギーを回収して有効に利用するものであり、エネルギーを生産していると考えることができる。しかも、一度構築した省エネ・システムは、太陽光発電等と同じように、以後、エネルギーを回収し続けることができる。以下、各エネルギーについて簡単に説明する。

2-2. 化石エネルギー

化石エネルギーには、石油、石炭、天然ガス等があるが、何れも、燃焼に伴う二酸化炭素等の地球環境破壊物質排出が問題である上に、産出地が政治的に不安定な中東に偏っていることや何れは汲み尽くされ枯渇することが問題となっている。従って、他のエネルギーに置き換えることが必然であり、これに代わるエネルギー利用技術の開発が活発化してきている。しかし、これらの技術の立ち上げ期間を考慮すると、21世紀半ば頃までは化石エネルギーが主役であり続けることに変わりがない。このため、国際的に二酸化炭素排出量を規制し地球温暖化を防止しようと、1997年12月に開催された地球温暖化防止京都会議（COP3）では、1990年を基準に、2008年～12年の平均で5%以上の温室効果ガス削減目標が採択され、日本には6%の削減が求められている。

2-3. 原子力エネルギー

原子力エネルギーは、化石エネルギーに次いで日本で実績のあるエネルギーである。今日広く利用されているウランは、埋蔵量が80年程度と短い上に、核分裂に伴って生成される放射性廃棄物処理にも問題があり、暴走する不安も払拭できていない。しかし、日本の発電量の3割以上が原子力発電である実績は無視できない事実であり、化石エネルギーの削減が求められていることもあり、当面は、原子力エネルギーに頼らざるを得ない。

核融合が開発されれば、核分裂のような放射能汚染物質を出したり、暴走を起こす心配の無いクリーンで安全なエネルギーが無尽蔵に安定して供給され

るようになるとされているが、実用化までに時間を要し、現在のエネルギー問題解決の役には立たない。また、無尽蔵とも言える核融合エネルギーを将来の人類が地球上で無制限に使用すると、エネルギー使用に伴う排熱により、地球が加熱され温暖化することも心配されている。

2-4. 自然エネルギー

自然エネルギーは、地球が太陽から受けているエネルギーであり、風力、水力、波浪、太陽光、太陽熱、バイオマス等がこれに含まれる。地球が太陽から受けるエネルギーの1時間分は、人類が消費しているエネルギーの1~2年間分に相当するとされており、量的には充分である。しかし、エネルギー密度が低いことや間欠的であることが実用化を困難にしている。日本の家屋の屋根を全て太陽電池にしたとしても、日本が必要とするエネルギーの数%程度とされている。

自然エネルギーで、唯一、実績があるのは、水力である。地形を利用してダムに集積し、貯蔵することにより、自然エネルギーの問題点であるエネルギー密度の低さや間欠性が解決できるからである。しかし、日本の水力は、開発し尽くされており、日本のエネルギー消費量に占める水力の割合は、今後も3%程度と予想されている。太陽光や風力、バイオマス等の2010年での日本の全エネルギー消費量に占める割合も、3%程度と予想されているので、これに水力を加えても、自然エネルギーの占める割合は、6~7%程度と見積もられている[3]。このように、日本は国土が狭いので、太陽から受ける自然エネルギーだけで必要とするエネルギーを賄うことは不可能である。

このように、日本の国土では、エネルギー密度の希薄な自然エネルギー利用には限界がある。従って、自然エネルギーが、将来のエネルギーの主流となったとしても、日本は、海外の自然エネルギーが豊富な国からそれを水素等の二次エネルギーに加工して輸入することになる。誰にでも平等に与えられているように思われてきた太陽の恵みを利用する自然エネルギーの時代になっても、日本が、外国に依存するエネルギー輸入国であることには変わりがない。

2-5. 地熱エネルギー

地熱エネルギーは、地球が本来有しているエネルギーであり、太陽エネルギーに由来する自然エネルギーとは区別されている。地熱エネルギー利用では、一般に、二酸化炭素や亜硫酸ガス等の排出を伴うので、決してクリーンなエネルギーではない。しかし、火山地帯では、利用しなくても自然に放出されているので、その範囲での利用に限れば、地球環境に影響を及ぼさない新エネルギーとして注目されているが、量的には期待できない。

2-6. 省エネ

省エネは、本来、エネルギーを効率よく使うことにより、これまで無駄に捨てられていたエネルギーを回収することであり、不要な電灯をこまめに消したり、効率よく仕事をすることであり、コスト削減対策の一環と考えられてきた。ICによる自動化は、このような手順の定まった仕事を効率よく進めさせ、エネルギーの無駄使いを無くすことが得意であり、省エネには極めて有効である。人と機械が仕事を分担する今日では、機械の消費するエネルギーを節約する省エネが重要である。

IC自身は、エネルギー保存則に反し、高速化と低消費電力化を同時に達成できる特徴があり、省エネが最も進んでいる。このことは、現在のパソコンは、10年以上前の電力工事をしないと設置できなかった大型計算機よりも能力的に上回っているが、家庭のコンセントに接続できる程度に省エネが進んでいることから分かる。ICは、今後も、3年で4倍のペースで高機能化が進むので、省エネも同じペースで進むことが期待できる。

近年、ハイブリッド車が開発され、一気に、自動車の燃費改善が進んだが、この技術も、ICによる自動化による省エネと見なすことができる。また、冷暖房の制御にもIC制御が取り入れられ、冷やし過ぎや暖め過ぎを無くしてエネルギーのムダ遣いを防いだり、深夜や日中の人の行動に対応した温度制御により、利用者の快適性を損なうことの無い省エネが進められるようになってきた。今後、ICがより高機能になり、広い分野での省エネが進歩するので、当面、必要とされている二酸化炭素排出量削減を省エネで達成することも期待できる。

図 1 に、IC 生産額の逆数と GDP 1 億円当たりの石油換算エネルギー消費量の年次変化を示す。図 1 から、石油危機が発生した 1973 年の GDP 当たりのエネルギー消費量は、石油換算で 182kl/億円であったが、1991 年には 118kl/億円にまで減少しており、GDP 当たり約 35%のエネルギーが省エネにより生み出されたことが分かる [2]。

表 1 に、1994 年の OECD 各国のエネルギー消費状況の比較を示す [4]。1994 年の日本の GDP 当たりのエネルギー消費量は、OECD 中では最も少なく、省エネが世界一進んだ国であることが分かる。しかし、一人当たりのエネルギー消費量で見れば最下位ではなく、イギリスに次ぎ 2 位である。従って、日本人は、最も少ないエネルギーで沢山の仕事を効率よく行っている活力の高い国民であることが分かる。

表 1 から、仮に、アメリカが GDP 当たりのエネルギー消費量を日本と同じ水準にまで省エネを進めたとすると、日本のエネルギー消費量の実に 2 年分以上のエネルギーが毎年節約できる計算になる。

最近、アメリカを中心に、省エネビジネスが始まっている。これは、ビル等の省エネを請負い、省エネで生じたエネルギー経費節約分で省エネに必要な設備を購入してもらって儲けると共に、設備償却後は、省エネで浮いた経費の分配に預かる商売である。日本のように省エネ対策が進んだ国においても、ホテルやオフィスビル等では、ビジネスとして成立している。このような省エネビジネスの台頭により、予想以上に化石燃料消費削減が進み、国際的に定めた二酸化炭素排出量値以下に削減されることを期待することができる。

2-7. 今後のエネルギー源について

今日利用可能なエネルギー 5 種類の内、化石エネルギーは、消費を削減しなければならない。従って、残りの 4 エネルギーでその代替を図る必要があるが、省エネが進み、その分、化石エネルギーの消費が削減できれば、化石エネルギーの延命を図ることが可能となるが、長期的には、削減されることになる。

化石エネルギー以外のエネルギーは、持ち運びができないので、持ち運びのできる二次エネルギーへの変換が必要である。このような二次エネルギーとして、水素以外は考えられないが、それでも、圧縮

水素、液体水素、水素吸蔵合金、メタノール等の幾つかの形態が考えられる。これらの何れが最適であるかは、現時点では言えないが、圧縮水素にしてから、液体水素にするか、水素吸蔵合金に吸蔵させるか、メタノールにするかのプロセスを経ることになるので、電力を圧縮水素に変換することが基本となる。

3. HHOG—水電解による高圧水素酸素製造について

HHOG は、水電解により、電力を効率よく圧縮水素に変換する装置である。水電解では、自己昇圧作用によりコンプレッサーを用いないで高圧の水素及び酸素を発生できること、圧力を高くした方が発生する水素及び酸素の泡が小さくなり電気抵抗が低くでき、また、沸騰温度が高くなるので、電極抵抗を低くすることができること等により、水電解の電力効率を向上できると共に、ガス圧縮経費の軽減、槽容積の縮小等が図れることが知られていた。このため、水電解による高圧水素酸素発生装置の研究の歴史は古く、昭和 8 年から 17 年にかけて、潜水艦用に研究されていたことが知られている。この研究は、200 気圧、10m³/時の水電解槽を試作したところで日米開戦となり研究が中断された [5]。戦後になってからも、開発計画が検討されてきたが、結局は、どれも日の目を見ることはなかった。

最近になって、三菱商事(株)と神鋼パテツク(株)との共同研究により、HHOG (High-pressure Hydrogen Oxygen Generator、高圧水素酸素発生装置)が商品化された [6]。1 m³の水素を約 5.1kWh の電力で発生できる。水素の総発熱量は、1m³当たり、3,050kcal、即ち、3.55kWh であるので、電気エネルギーを 70%の効率で水素エネルギーに変換できることが分かる。既に、半導体製造や化学工業、セラミック、金属冶金等の製造工場や、通信、電子部品、自動車等の研究所等への多くの納入実績があり、火力発電機のタービン冷却用として、海外にまで輸出されている。また、原子炉の冷却水に HHOG で発生した高圧水素を添加し、配管の応力腐食を少なくして、原子炉寿命を延命することも検討されている。

HHOG の水電解セル構造は、図 2 (A) に示すように、固体高分子電解質 (SPE) 膜の両端に Pt 電極を設けて、多孔性チタン電極で挟み込んだ構造である。陽極に供給された水は、プロトンと酸素に分解され、陽極から酸素が発生し、プロトンは SPE 膜中を通過して陰極に行き電荷を失って水素になる。SPE 膜の電解質作用により膜中をプロトンが移動できるので、従来の水電解のように純水に KOH 等の電解質を溶解することなく、純水を、直接、水素と酸素に電気分解することができる。

図 2 (A) のセル構造の耐圧は、SPE 膜のシール部の耐圧と SPE 膜の耐圧で定まるが、両方とも、0.4MPa 程度であるので、0.4MPa までの圧力の水素及び酸素が発生できるが、高圧ガス保安法の適用が 1 MPa 以下であるので、0.9 MPa 程度を必要とする需要家が多い。このような需要家の要望に応えるため、図 3 (B) に示すようにセルを高圧容器内に純水で水封する構造の HHOG を考案した。純水の電気抵抗が高いので、このように水電解セルを高圧容器内に純水で水封しても、電極がショートすることはない。発生した酸素は、高圧容器内上部に溜め、水素は高圧容器外のタンクに溜めて、これら水素と酸素の圧力が等しくなるように制御することにより、0.4MPa 以上の高圧の水素と酸素を発生させても、水電解セル内の SPE 膜の両端に作用する差圧 (ΔP) 及び水電解セルのシール部に作用する差圧 (ΔP) は、常に、0.4MPa 以下にできるので、シール部や SPE 膜の耐圧には関係なく、高圧の水素/酸素を発生することができる。原理的には、100MPa 以上の高圧水素/酸素を発生することも可能である。実験的には、3 MPa までの動作を確認している。現在の工業用水素/酸素に対する需要は、高圧ガス保安法の規制対象から除外される 1 MPa 以下に集中しており、図 3 に示す構成の 1 MPa 以下の HHOG を市販している。

水をエネルギーとして使用する場合には、エネルギー密度的に 30 MPa 以上の圧縮水素が必要と考えられる。例えば、シカゴ市内等で運行されている水素燃料バスは、30 MPa の圧縮水素をボンベに充填している。現在市販している HHOG により、このような高圧の圧縮水素を発生させるためには、溶存酸素に対する配慮が必要である。

図 4 に示す E-HHOG は、このような溶存酸素の影響を無くすため、水電解セルを収納する高圧容器内に酸素を放出しない構成にしたものであり、水電解セルを電気絶縁性液体で高圧容器に封入することができる。水電解セルは、高圧容器内に封入した電氣的絶縁性液体で絶縁されているので、電気分解に使用する純水は、SPE 膜やその Pt 電極を変質させない程度の水質の純水で問題ない。

高圧容器内の電気絶縁性液体には、水素取り出し配管に設けたベローを通じて、水素の圧力が伝えられ、この圧力は、酸素の圧力と等しくなるように制御されているので、セルの内外、及び SPE 膜に作用する差圧 (ΔP) は、共に、SPE 膜やシール部の耐圧より充分小さくすることができる。

以下では、水電解の自己昇圧作用による昇圧に必要な動力を、機械式コンプレッサーと比較する。一般に、水電解による自己昇圧に要するエネルギーは、以下の理論分解電圧の式から求めることができる [7]。

$$E_0 = E_d + (RT/2F) \ln((P_H)(P_O)^{1/2}) \cdots (1)$$

ここで、 E_d は温度 T での標準理論分解電圧、 P_H 、 P_O は、水素及び酸素の分圧である。

また、機械式コンプレッサーでの昇圧に必要な動力は、

$$L_s = (1/0.612) P_s Q_s (mK/(K-1)) \times ((P_d/P_s)^{(K-1)/mK} - 1) (1/n) \cdots (2)$$

ここで、 L_s は所要電力 (kW)、 P_s は吸入圧力 (kgf/cm^2)、 Q_s はガス量 ($\text{m}^3/\text{分}$)、 P_d は吐出圧力 (kgf/cm^2)、 m は圧縮段数、 K は断熱指数、 n は断熱効率である。図 5 に (1) 式及び (2) 式から求めた昇圧に必要な動力を示す。高圧になるほど、水電解の昇圧動力が少なくて済むことが分かる。従って、E-HHOG が高圧の水素/酸素を製造するのに効率的な装置であることが分かる。

4. さいごに

水電解での自己昇圧作用を利用して 1 MPa 以下の水素/酸素を発生する HHOG は、工業用及び研究用の水素オンサイトプラントとして工場や研究所に実績が増えてきている。この HHOG を発展させ

た E-HHOG は、エネルギー用の 30 MPa 以上の水素を発生するのに最適である。今後、具体的な検討を始めたいと考えている。

エネルギーは、人類の活力源である。人類が地球上に出現して以来、エネルギー消費量を増大させて生活水準を高めてきた。当面、化石エネルギーの削減が進められることになるが、代替エネルギーによりエネルギー消費量の削減回避が最大の課題である。IC による自動化を活用した省エネが効果を発揮するものと期待できる。

謝 辞

昇圧に必要な動力の理論式計算をお願いした、神鋼パテック株式会社技術研究所三宅研究主任に深謝致します。

参考文献

- (1) 原田宙幸「学にあらざる学（非学）のすすめ」
エアロゾル研究、Vol.12, No.2, p.139 (1997)
- (2) 原田宙幸「21 世紀のエネルギー問題と水素」、
空気清浄 37 (1)、
p.51、(1999、日本空気清浄協会)
- (3) 柏木孝夫「地球環境からみたこれからのエネルギーシステム」、応用物理 63 (8)、p.770 (1994)
- (4) 省エネルギー総覧 (1997)、p.19、(平成 8 年、
通産資料調査会)
- (5) 徳岡藤夫「水素」p.87 (昭和 55 年、株式会社鈴木
商館発行)
- (6) H.HARADA, et al., "HYDROGEN & OXYGEN
GAS GENERATING SYSTEM", USA Patent
No.5,690,797
- (6) 宝月章彦「コンプレッサーレス高圧水素ガス発生
装置の原理」、神鋼パテック技法、Vol.40、No.2、
p.104