

# 水素エネルギーシステム

## Hydrogen Energy System



(技) 研究開発部  
多 井 勉  
Tsutomu Oi  
平 井 清 司  
Kiyoshi Hirai  
三 宅 明 子  
Akiko Miyake  
UC事業室  
廣 瀬 潤  
Jun Hirose

世界で消費されるエネルギーの約90%は石炭、石油、天然ガス等の化石燃料でまかなわれている。これらの化石燃料は運輸、熱発生、発電等に使用されている。化石燃料を使い続けると空気中の二酸化炭素濃度が上昇し、地球温暖化、気候変動を起こす。水素と組み合わせた風力、太陽エネルギー等の再生エネルギーがこの問題を解決できる。社会がエネルギーシステムに払うコスト、すなわち外部コストを考慮すると太陽・水素エネルギーシステムが最もコスト競争力のあるエネルギーシステムである。本報では公開されている資料を用いて、水素エネルギーシステムの経済性を紹介した。

About 90% of the world energy demand is met by fossil fuels-coal, oil and natural gas at the present time. Fossil fuels are used for transportation, heat generation and electric power generation. The consumption of fossil fuels will cause the carbon dioxide accumulation and threatening consequences such as global warming and climate changes. Renewable energy such as wind and solar power can solve these problems by coupling with hydrogen. The solar hydrogen energy system is the most cost effective system if external costs (the costs which society pays for the energy services) are taken into account. In this report feasibility of hydrogen energy system are shown using the published materials.

### Key Words :

水素エネルギー	Hydrogen energy
地球温暖化	Global warming
再生エネルギー	Renewable energy
水電解	Water electrolysis
経済性評価	Economical feasibility study

## まえがき

現在、世界での水素消費量は年間 5 000 億 m<sup>3</sup> と推定されている。<sup>1)</sup> その 90 % 以上が天然ガスの改質、工業副製ガスから得られている。残りは水電解により生産されている。この水素の 99 % 以上がアンモニアの合成、メタノールの合成、石油の脱硫、鉍石の還元等に使用されている。5 000 億 m<sup>3</sup> の水素エネルギー量はおよそ  $6 \times 10^{18}$  J となり、世界のエネルギー消費量の約 1.8 % になる。エネルギー利用としては人工衛星打ち上げ用ロケットの燃料に液体水素が使用されている。

現状では化石燃料は水素エネルギーよりも経済的に競争力がある。これが全世界で使用されるエネルギー源の 90 % 以上が化石燃料である理由である。しかし化石燃料の燃焼に伴って排出される気体が地表圏に蓄積し、地球規模で環境に重大な影響を与えている。排出される気体は水蒸気、二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物である。エネルギー消費量が巨大化すると、環境に深刻な影響を与える。以前には公害と呼ばれて、その影響はローカルな現象にとどまっていた。しかし現在対策が急がれている温暖化、酸性雨などは特定地域に限定されずに、地球規模での環境問題になっている。二酸化炭素排出による地球温暖化問題に関しては、二酸化炭素の分離、回収、有効利用、海洋・地中への貯留等の技術開発が現在進められている。<sup>2)</sup>

一方化石燃料は有限の資源であり、発展途上国でのエネルギー消費量の増加を考慮すると来世紀の前半において枯渇すると予想されている。水素をエネルギーとして利用する技術開発が石油危機を契機に 1974 年以降通産省工業技術院大阪工業技術研究所において開始された。<sup>3)</sup> 現在では新エネルギー・産業技術総合開発機構による水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) プロジェクトが進められている。<sup>4)</sup> 本報告では水素エネルギーシステムの必要性、およびその経済性評価についてのべる。

## 1. 地球温暖化問題と水素エネルギー

### 1.1 問題解決の手段

地球温暖化の根本的原因は人類が現在用いているエネルギーシステム、すなわち化石燃料をベースとしたエネルギーシステムそのものにある。温室効果ガスの中で化石燃料の燃焼時に発生する二酸化炭素の寄与が大きく、温室効果ガス全体の温暖化能力の 50 % 以上をしめる。つづいてメタンとフロンが問題になる。

地球温暖化問題を解決する手段として次のものが考えられる。

- (1) 二酸化炭素の海洋、地中への貯留技術の開発  
火力発電所等から発生する二酸化炭素を油井、天然ガス・岩塩採掘の空洞、地下帯水層、深海底に貯留する等の技術を開発する。<sup>5)</sup> この技術は地球工学と呼ばれており、スケールが大きく、開発費用がかさむ。しかし最も必要なものと考えられる。
- (2) 代替エネルギーの開発  
太陽エネルギー等の再生エネルギーを利用する技術を開発する。<sup>6)</sup> 一般的に再生エネルギーは化石燃料のように使いやすすくない。断続的にしか使用できず、貯蔵性と輸送性が悪い。輸送用燃料として使用できない。これらの欠点を補うのが水素エネルギーである。水素は水から大量に製造できる燃料である。また全世界のどこでも得られるエネルギーであり、燃焼時水のみを発生するため環境に対して温和である。
- (3) 排出される二酸化炭素を利用した有用物質合成技術の開発

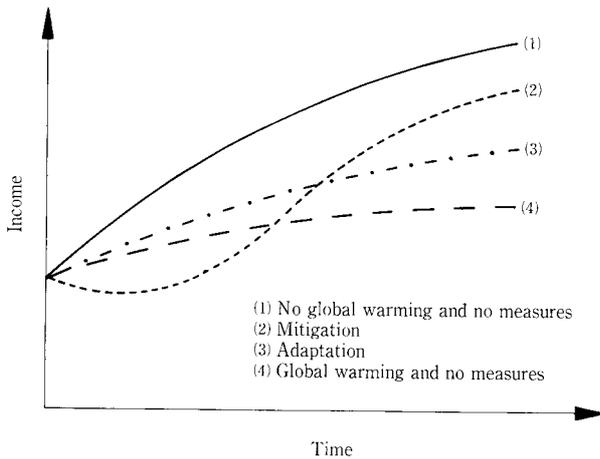
例えば接触水素化法で二酸化炭素と水素を反応させてメタノールを合成する。<sup>7)</sup>

### 1.2 mitigation と adaptation

二酸化炭素対策技術と代替エネルギーの開発を促進し、地球温暖化問題に事前的な対応を取ることを mitigation と呼ぶ。気象変化がおり、人類の生活環境や生態系に影響が表れた段階で莫大な費用をかけて、事後的な対策を取ることを adaptation と呼ぶ。mitigation と adaptation のどちらが有利であるかを考える必要がある。

アメリカ科学アカデミーの報告書<sup>8)</sup>によると第 1 図に示すように mitigation の方が adaptation よりも人類全体の収入は多くなる。気候変化がおこらないケース 1 では経済成長に従って収入は増加する。気候変化を放置しておき、対策を取らないケース 4 は最も収入が少ない。ケース 2 は現在 mitigation を行った場合である。ケース 3 は現在 mitigation を行わないで、adaptation をその時々を実施した場合である。以上から地球温暖化防止対策を速やかに実施しなければならないことが理解できる。

Nordhaus<sup>9)</sup> は DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy) モデルを用いて、温室効果ガス (主に二酸化炭素) の放出を抑制する政策上のコストと放出の経済的インパクトの関係を検討している。気温上昇の経年変化を第 2 図に示す。温室効果



第1図 収入と地球温暖化対策の関係  
Fig. 1 Relation between the income and the measures for global warming

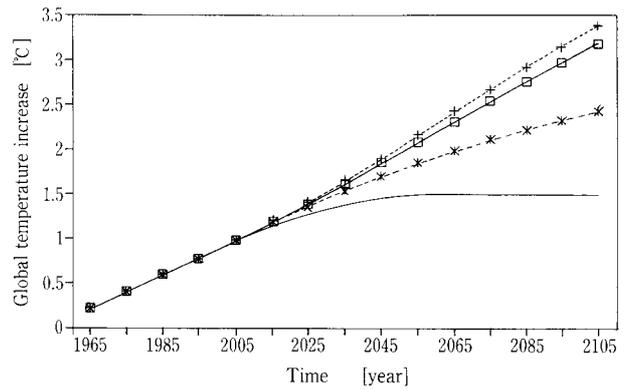
ガス放出の抑制策を行ったときの世界の総生産量と温室効果ガス放出をまったく抑制しなかった場合の世界の総生産量の差額を第3図に示す。なお1990年の世界の総生産量を20兆ドルとしている。また最適政策とは化石燃料そのものと二酸化炭素の放出のそれぞれに炭素税を課すことである。

ただし単に炭素税を課すだけ (Optimal policy) では気温は上昇し、経済的な成長はない。1990年のレベルに二酸化炭素排出量を安定化する (Emissions stabilization) と来世紀末には3兆ドル、世界の総生産量が減少する。生態系に影響を与えないように気候を安定化する (Climate stabilization) と来世紀末には8兆ドル、世界の総生産量が減少する。海底への二酸化炭素貯留技術等の地球工学を開発する (Geoengineering) と経済は成長するとともに mitigation にもなると予測されている。

## 2. エネルギー資源問題と水素エネルギー

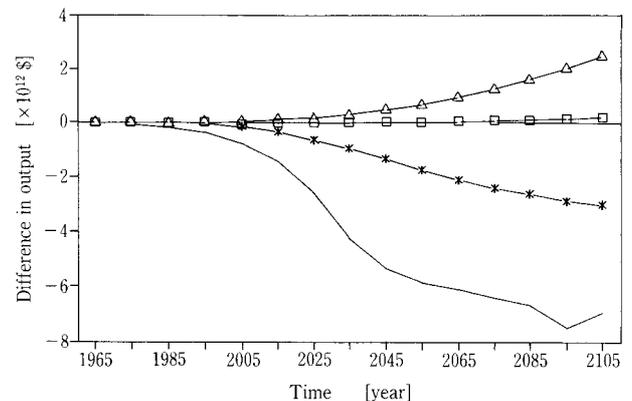
現在最も多く消費されているエネルギー資源は化石燃料で、石炭、褐炭などの固体燃料、石油の液体燃料、天然ガスの気体燃料を合計すると世界の一次エネルギー消費量の90%になる。<sup>10)</sup> 水力、原子力、地熱などの電力は10%以下である。風力、太陽、海洋などの自然エネルギーの利用は微々たるものである。

化石燃料の世界における消費量の歴史的推移を第4図に示す。<sup>11)</sup> 1937年から1988年の間に化石燃料の消費量は5倍に増加した。この期間に原子力発電が導入され、水力発電量が増加しているにもかかわらず、それ以上に化石燃料の消費量が増加している。



+ : No controls  
□ : Optimal policy  
\* : Emissions stabilization  
- : Climate stabilization

第2図 大気温度の経時変化  
Fig. 2 Projected global mean temperature



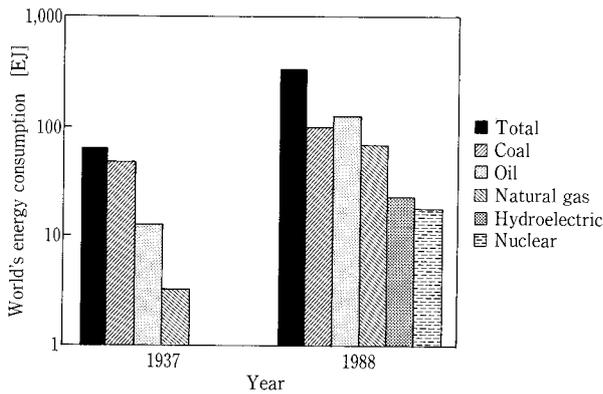
□ : Optimal policy  
△ : Geoengineering  
\* : Emissions stabilization  
- : Climate stabilization

第3図 世界総生産に与える地球温暖化対策の影響  
Fig. 3 Impact of policies on global output

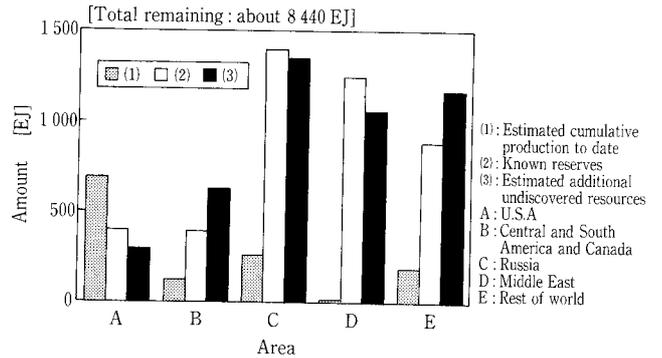
特に石油と天然ガスの増加が著しい。

石油、天然ガス、石炭の埋蔵量をそれぞれ、第5、6、7図に示す。<sup>11)</sup> 化石燃料から他のエネルギー源へ転換しないと有限の化石燃料は枯渇する。特に第5、6図に示すように石油と天然ガスの埋蔵量は有限であり、現状の消費量で推移すると40年先には枯渇する。指数関数的な人口増加と経済成長を考慮した場合には石油と天然ガスは25年先には枯渇する。未発見のエネルギー資源を加えても20年間のびるだけである。

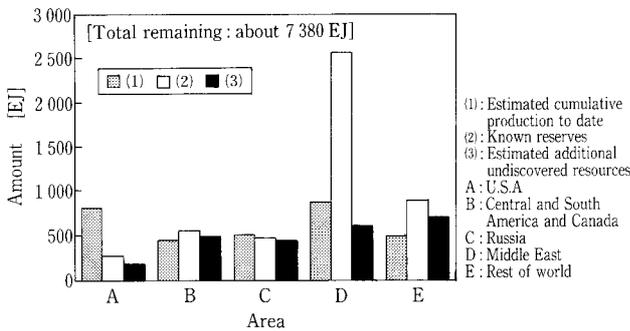
石炭の埋蔵量は第7図に示すように最も多い。こ



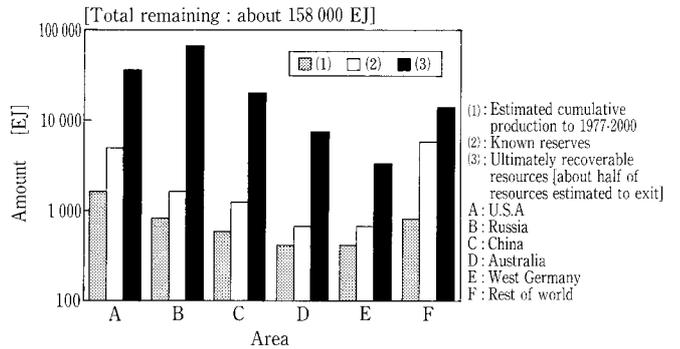
第4図 世界のエネルギー消費量  
Fig. 4 World's energy consumption



第6図 天然ガスの量  
Fig. 6 Amount of natural gas



第5図 石油の量  
Fig. 5 Amount of oil



第7図 石炭の量  
Fig. 7 Amount of coal

の石炭を用いて合成液体燃料を製作し、現状のエネルギーシステムを続けることが可能である。しかし環境に与える影響は深刻で、環境破壊が行きつく所まで行く。

地球表面には太陽から世界で消費されるエネルギーの15000倍 ( $1.78 \times 10^{17} \text{W}$ ) に達するエネルギーが降り注いでいる。<sup>12)</sup> そのうちの30%が即座に宇宙空間に反射される。50%が地球に吸収され、熱に変換される。残りの20%が水力、太陽光、風力、地熱、バイオマス等の再生エネルギー源になる。この再生エネルギーは枯渇することがなく、地球環境に対して保全性の良いエネルギーである。しかし既にものべたように化石燃料に比較して連続使用性、貯蔵性、輸送性が悪い。再生エネルギーを使って水電解により水素を発生させると、再生エネルギーが持つ欠点を補うことが可能になる。

### 3. 水素エネルギーの経済性

#### 3.1 エネルギーの外部コスト

企業がコストをかけて得る経済的利益を内部経済と呼び、企業の行動が自分自身に与える経済的不利益を内部不経済と呼ぶ。これに対して例えば産業全

体の拡大によってインフラストラクチャーが整備されて一企業がコストをかけなくても得られる経済的利益を外部経済と呼び、公害のように企業の行動が社会に与える経済的不利益を外部不経済と呼ぶ。そして外部経済と外部不経済が社会に負担を強いるコストを外部コストと呼ぶ。<sup>13)</sup>

生産設備費、燃料費、人件費などはエネルギーの市場価格に含まれているので内部コストである。外部コストの代表例は化石燃料の燃焼時に発生する硫黄酸化物、窒素酸化物による大気汚染、および二酸化炭素による地球温暖化である。先進工業国における排ガス規制を満たすための大気汚染防止費のように内部コスト化されているものを除いて、これまでの化石燃料の価格体系では外部コストはほとんど考慮されていなかった。これが再生可能エネルギーとそれらの搬送媒体として最適な水素エネルギーが軽視されてきた理由である。

Hohmeyer はエネルギーの市場価格に含めるべき外部コストを次のように列挙している。<sup>14)</sup>

- (1) 人間の健康に対する影響
- ・けがのような短期的影響

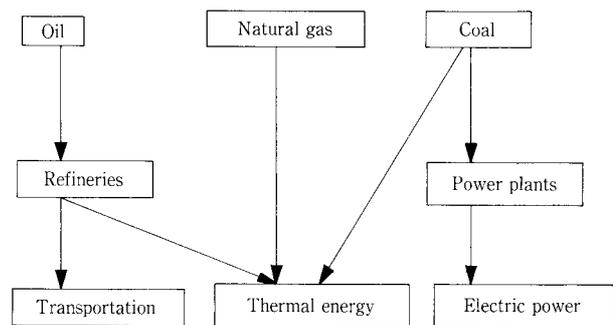
- ・癌のような長期的影響
- ・遺伝子傷害による生命維持への影響
- (2) 環境への影響
  - ・植物相への影響
  - ・動物相への影響
  - ・地球的規模の気候への影響
- (3) 資源の枯渇
- (4) マクロ経済への影響
  - ・雇用問題
- (5) 補助金
  - ・研究開発補助
  - ・投資補助
  - ・操業補助
  - ・インフラストラクチャーの整備補助
  - ・災害時の避難サービス
- (6) 戦争発生の可能性増加に対するコスト
  - ・エネルギーの安全保障
- (7) 原子力の外部コスト
  - ・発電用原子力技術の浸透に伴う核兵器ノウハウの拡散
  - ・放射能汚染
- (8) 社会心理的成本
  - ・重大な病気, 死亡
  - ・建設, 事故による人口移動

前述の外部コストの多くについては定量的データの不足, 定量化の困難性等のために実際のエネルギー価格に反映させるのは困難である。しかし新しいエネルギーと従来のエネルギーを価格面で比較する場合には前述の外部コストをできる限り定量化するこ

とが望ましい。

### 3.2 化石燃料システムと水素エネルギーシステムのコスト比較

現在のエネルギーシステムは化石燃料によって構成されており, 単純化して第8図に示す。化石燃料は輸送, 商業, 工業, 一般住宅, 発電等, あらゆる分野で使用されている。輸送においては主にガソリン, 軽油, ケロシン等の石油精製品が使用されている。工業分野では石炭, 天然ガス, 石油が使用されている。発電分野では化石燃料が使い分けられている。ベースロード用として石炭が, ピークロード用として天然ガスと重油が使用されている。Barbir達は第8図のエネルギー源から動力, 熱, 電力までの化石燃料の外部コストを第1表のように推定している。<sup>15)</sup> 石油の場合には中近東等内にある生産地の安全保障のために軍事費として米国は1年間に600億ドル支出している。この支出を米国が1年間



第8図 化石燃料システム  
Fig. 8 Fossil fuel energy system

第1表 化石燃料の外部コスト (1990年, \$/GJ)  
Table 1 External costs of fossil fuels (in 1990, \$/GJ)

Type of cost	Coal	Oil	Natural gas
Environmental damage			
Effect on humans	3.48	2.83	2.09
Effect on animals	0.51	0.42	0.3
Effect on plants and forest	1.35	1.09	0.81
Effect on aquatic ecosystems	0.18	1.05	0.11
Effect on man-made structures	1.12	0.9	0.67
Other air pollution costs	0.98	0.79	0.59
Effect of strip mining	0.49	—	—
Effect of climate changes	1.39	1.13	0.84
Effect of sea level rise	0.32	0.26	0.19
Total environmental damage	9.82	8.47	5.6
Military costs	—	1.7	—
Total estimated external costs	9.82	10.17	5.6

に消費する石油 1 GJ あたりに換算して軍事費の外部コストが1.7ドルとしている。

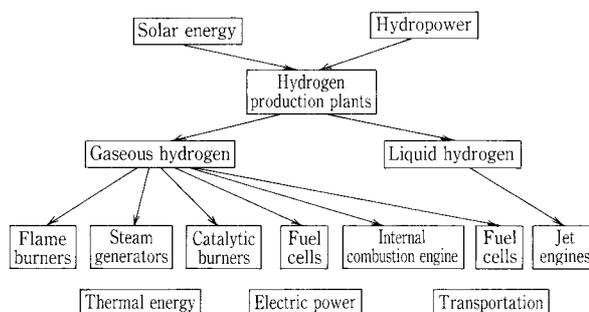
Barbir 達は第 8 図の化石燃料システムと第 9 図の太陽・水素エネルギーシステムの有効コスト（内部コストと外部コストの合計）をそれぞれ第 2, 3 表のように比較している。<sup>15)</sup> 第 9 図の太陽・水素エネルギーシステムにおいてはすべての第 1 次エネルギーを太陽発電と水力で供給し、水電解により水素を発生させる。太陽発電は全電力の2/3, 水力発電は全電力の1/3と仮定している。エネルギー消費比率は米国における熱, 電力, 輸送の利用比がおおよそ 4:3:3 であることに基づく値である。このエネルギー消費比率は燃料の種類ごとの有効コストに対する重み係数の意味を持つ。エネルギー消費比率と有効コストを掛け合わせた値をすべての燃料について合計するとエネルギーシステム全体の平均的な有効コストが求まる。第 8 図の化石燃料システムが 14.97ドル/GJ, 第 9 図の太陽・水素エネルギーシステムが13.02ドル/GJになる。内部コストの比較

では最も高価な水素エネルギーシステムが外部コストを加えると化石燃料システムよりも経済的であるという結果が得られている。

#### 4. 米国エネルギー省 (DOE) の Hydrogen Program<sup>16)</sup>

##### 4.1 これからの20年間のビジョン

これからの20年間に地球温暖化, 代替エネルギー



第 9 図 太陽・水素エネルギーシステム

Fig. 9 Solar hydrogen energy system

第 2 表 化石燃料システムの有効コスト (1990年, \$/GJ)

Table 2 Effective cost of the fossil fuel system (in 1990, \$/GJ)

Application	Energy consumption fraction	Fuel	Effective cost	Fraction×cost
Thermal energy				
	0.2	Natural gas	11.82*	2.36
	0.1	Oil	18.66*	1.87
	0.1	Coal	12.02	1.2
Electric power	0.3	Coal	11.68	3.5
Surface transportation	0.2	Gasoline	21.4	4.28
Air transportation	0.1	Jet fuel	17.59	1.76
Totals	1			
		Over effective cost		14.97

\* : Average for residential and industrial sector.

第 3 表 太陽・水素エネルギーシステムの有効コスト (1990年, \$/GJ)

Table 3 Effective cost of the solar hydrogen energy system (in 1990, \$/GJ)

Application	Energy consumption fraction	Fuel	Effective cost	Fraction×cost
Thermal energy				
Flame combustion	0.2	Gaseous hydrogen	17.63	3.53
Steam generation	0.1	Gaseous hydrogen	14.1	1.41
Catalytic combustion	0.1	Gaseous hydrogen	14.1	1.41
Electric power				
Fuel cells	0.3	Gaseous hydrogen	9.52	2.86
Surface transportation				
Internal combustion engine	0.1	Gaseous hydrogen	14.46	1.45
Fuel cells	0.1	Gaseous hydrogen	7.05	0.71
Air transportation				
Subsonic	0.05	Liquid hydrogen	17.78	0.89
Supersonic	0.05	Liquid hydrogen	15.24	0.76
Totals	1			
		Over effective cost		13.02

It has been assumed that one third of hydrogen will be produced from hydropower and two thirds from solar.

確保の点からニッチ市場に水素が浸透する。これからの20年間、化石燃料は過渡期の資源と位置づけられる。究極的には水素と電力は再生エネルギーから製造される。燃料電池技術が進歩すると輸送分野と電力分野に水素が使用される基盤ができる。

#### 4.2 米国の電力状況と水素利用

米国の電力業界は現在リストラが進められており、競争が厳しくなるとともに電力消費者に選択の道が開かれる。このような背景のもとに分散型電源と再生エネルギーの導入が進む。このようになると地球温暖化が緩和され、水素が有効なエネルギーとして使用される。

電力需要ピーク対処用として使用される可能性が増している低コストな再生エネルギー、例えば地熱、水力を使用するにあたり、水素がエネルギー貯蔵媒体として用いられる。風力も水素貯蔵と組み合わせて使用できる再生エネルギーである。オフピーク時の余剰風力により水素を発生させると風力を有効利用できる。風力タービン技術が進歩すると2000年までに良好な風力サイトでは1kWhあたり2.5セントから3.5セントで発電できる。水電解により水素を発生させて、この比較的安価なオフピーク

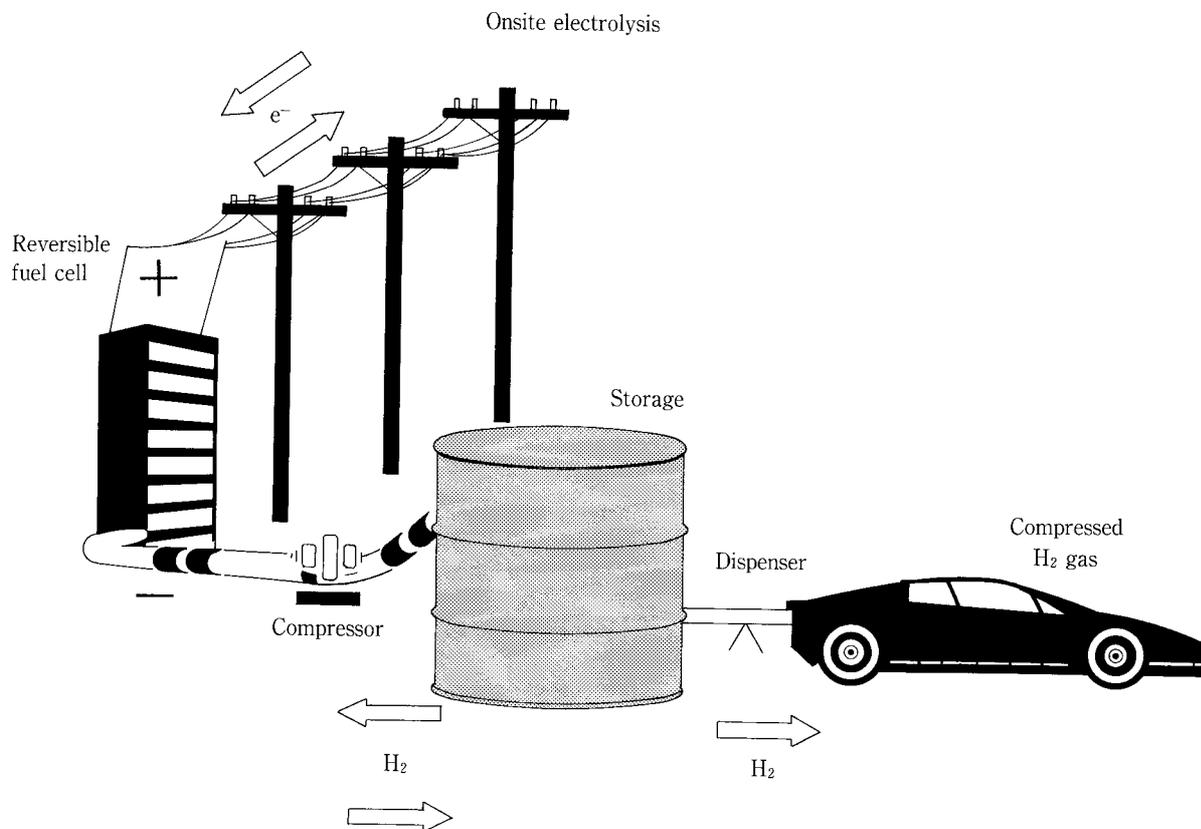
時の再生エネルギーを貯蔵する。そしてピーク時に燃料電池等で安価な電力に変換する。水力による電力も1kWhあたり1.5セントと安価であり、風力と同じように水素と組み合わせた使い方ができる。

オンサイト水素供給ステーションでは固体高分子電解質膜を使った可逆型燃料電池を用いて水電解と発電を行う。この可逆型燃料電池は水電解の機能と発電の機能を合わせ持つ。このシステムではコジェネレーションも行われる。また過剰の水素を発生させて、自動車等への使用、水素としての販売も行う。

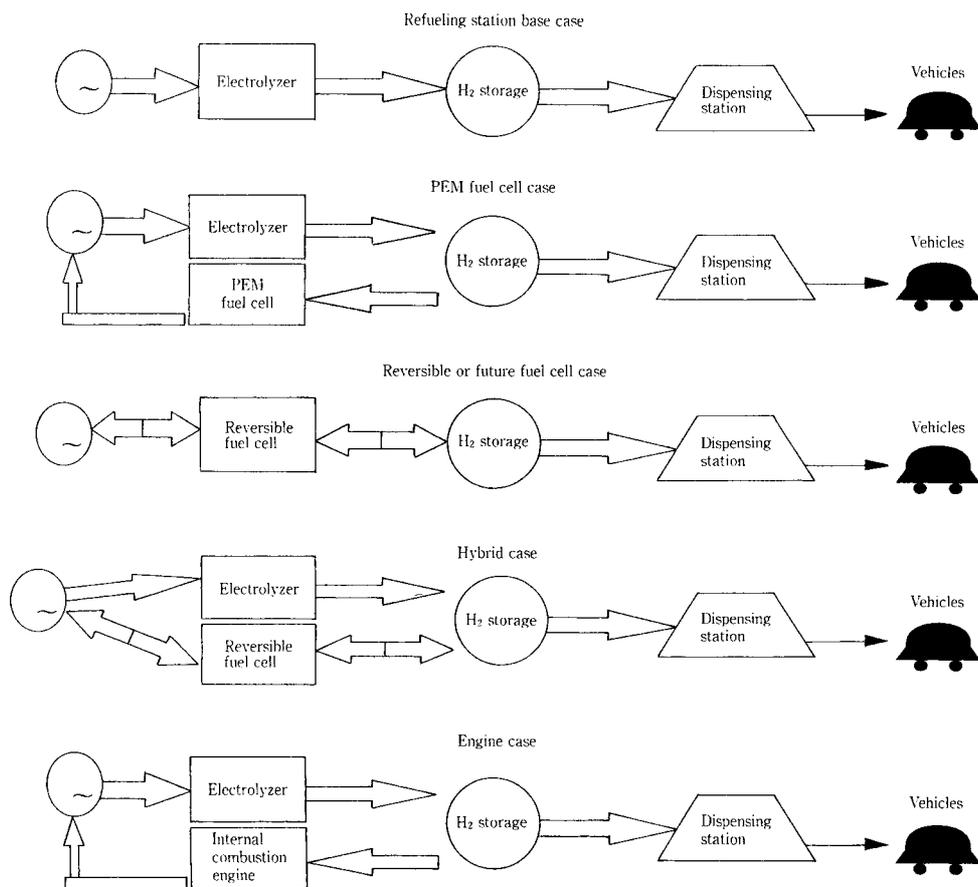
#### 4.3 自動車用燃料としての水素利用

都市部の自動車による排気ガス問題を解決するためにカリフォルニア州では2003年までに1年間の新車販売台数の10%をゼロ・エミッション車（ZEV）にしなければならない。バッテリー自動車がZEV用として開発されているが、航続距離にまだ課題がある。

燃料電池自動車は従来のガソリン自動車よりも2.5倍効率が良い。また水素内部燃焼エンジンを含むハイブリッドよりも25%効率がよい。90℃以下で動作するため固体高分子電解質型燃料電池が自動車用として最適である。燃料電池自動車の燃料水素



第10図 水素供給ステーション  
Fig.10 Hydrogen refueling station



第11図 水素供給ステーションの機器レイアウト  
Fig.11 Component layouts for hydrogen refueling station

第4表 水素供給ステーション構成機器の仕様  
Table 4 Specifications and technology data of the components for hydrogen refueling station

Componet	Capital cost	Operation and maintenance cost	Efficiency or energy required	Lifetime
Advanced electrolyzer	\$ 300/kW hydrogen out	4 % of capital cost/year	0.8	20 years
Storage cylinders	\$ 1.1/scf	\$ 100/year/cylinder	—	20 years
Storage compressor	\$ 2 000/kW	\$ 3 000/year/unit (2 units)	(0.6225kW/car × number of cars/day × 18h/day) + DU	10 years
PEM fuel cell	\$ 500/kW	4 % of capital cost/year	0.6	20 years
Reversible fuel cell	\$ 1 000/kW	4 % of capital cost/year	0.6 in generating mode	20 years
Future reversible fuel cell	\$ 500/kW	4 % of capital cost/year	0.6 in generating mode	20 years
Internal combustion engine	\$ 350/kW	4 % of capital cost/year	0.4	20 years
Fixed components (4dispensers+boost compressor)	\$ 277 100	4 % of capital cost/year	1.875kWh/car × number of cars/day	10 years

は当初天然ガスを改質して製造される。その後は再生エネルギーを用いて水電解した水素に切りかわっていく。

#### 4.4 Hydrogen Program のゴール

天然ガス、もしくはバイオマスから製造した水素の価格は \$ 6 /MMBtu から \$ 8 /MMBtu の範囲になる。この価格はガソリンよりも安価である。再生エネルギーにより製造した水素の価格は \$ 10 /MMBtu から \$ 15 /MMBtu の範囲である。2002年までには固体高分子電解質膜を使った可逆型燃料電池の価格は \$ 600/kW から \$ 1000/kW の範囲になると業界では推定している。

#### 5. 水素供給ステーション

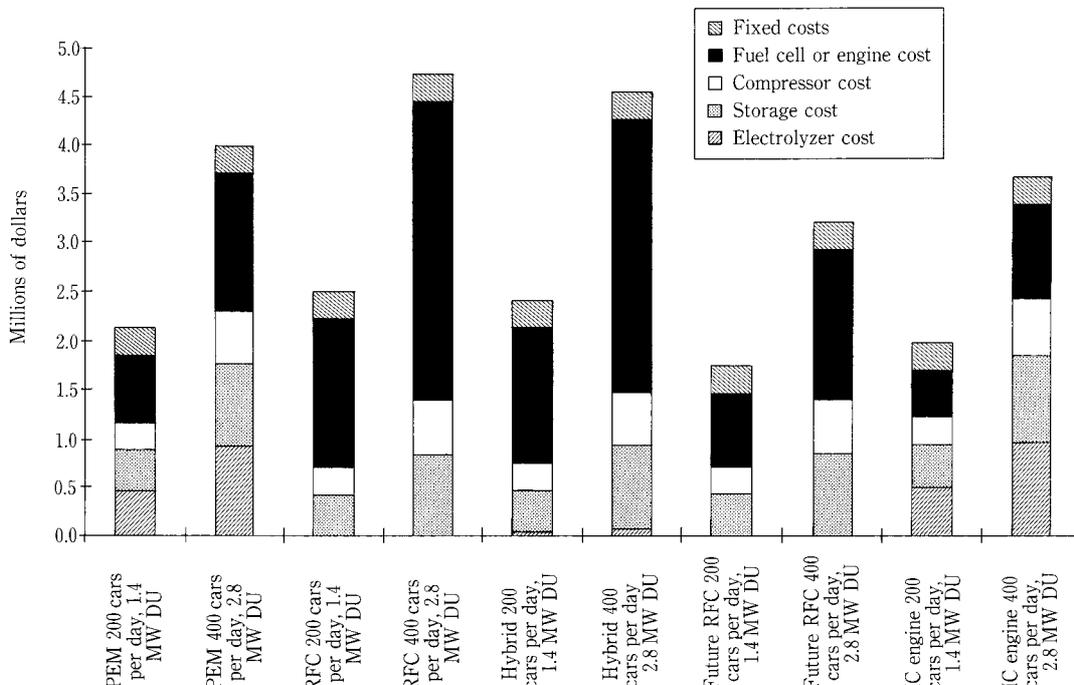
水素供給ステーションは水素燃料自動車のためのインフラストラクチャーである。またこの水素供給ステーションにおいて電力需要ピーク時にオフピーク時の電力を使って水電解により発生させた水素により発電を行うと、分散配置型電力使用の利点を持たせることができる。

米国 DOE の Hydrogen Program の一環として Iannucci 達<sup>17)</sup> は水素供給ステーションの経済的可能性を検討している。この水素供給ステーションでは第10図に示すように商用のオフピーク電力を使って水電解により水素を発生させる。そして水素燃料自動車に高圧水素を供給する。また昼間の電力需要

ピーク時にはオフピーク時に発生させた水素を用いて発電し、商用電力に供給する。第11図に示す6ケースの機器の組み合わせについて水素発生単価が計算されている。構成機器の設備コスト、ランニングコスト、効率、寿命を第4表に示す。

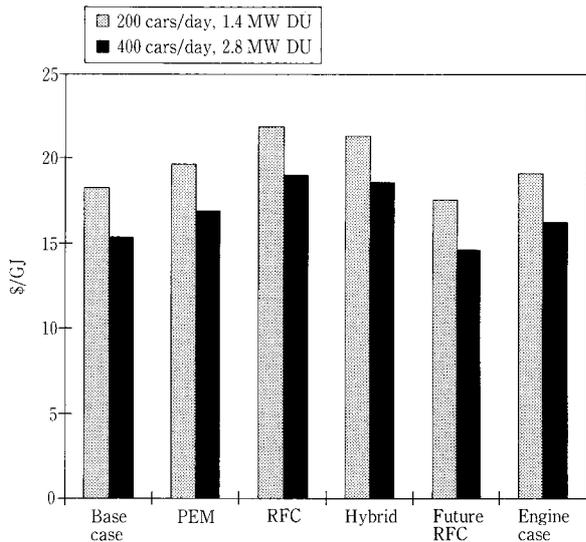
水素は5000 psi の高圧状態で高圧シリンダー内に貯蔵される。この高圧シリンダーの圧力は一日に最高5000 psi、最低2000 psi の間で変化する。100%、オフピークの電力を使って水電解を行い、一日に18時間水素を発生させる。二種類の固体高分子電解質型燃料電池について検討されている。燃料電池のみの機能を持つ場合と燃料電池と水電解装置の両機能を合わせ持つ可逆型燃料電池の二種類である。ディーゼル・エンジンを少し改良すると合理的な設備コストで水素用エンジンとして使用できるため、内燃機関も検討の中に加えられている。一年間の人件費は \$ 131 400 である。電力需要ピーク時の電力費は7セント/kWh、オフピーク時は2セント/kWhである。一年間の設備償却率は15%である。

一日に200台、もしくは400台の自動車に水素を供給し、電力需要ピーク時に1時間だけ発電する場合の構成機器コストを第12図に示す。燃料電池、可逆型燃料電池、内燃機関等、発電装置のコストが全体の中で大きな割合を占めている。次に大きな割合を



第12図 水素供給ステーション構成機器の設備コスト (電力需要ピーク時1時間発電)

Fig.12 Capital cost of Component for hydrogen refueling station (Distributed utility operates 1 hour per day)



第13図 発生水素のコスト  
(電力需要ピーク時1時間発電)  
Fig.13 Cost of hydrogen  
(Distributed utility operates 1 hour per day)

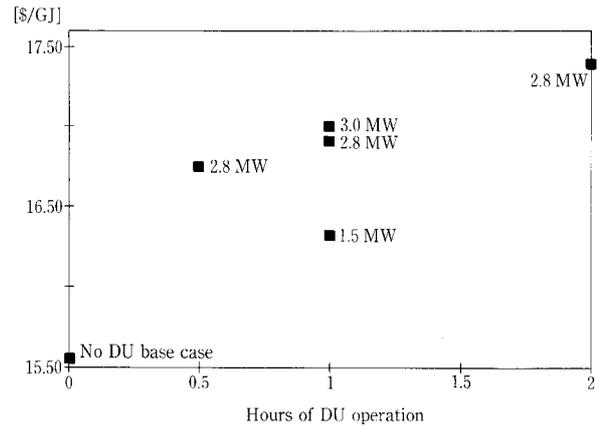
占めているのは水電解装置、圧縮機、高圧シリンダーである。

一日に200台、もしくは400台の自動車に水素を供給し、電力需要ピーク時に1時間だけ発電する場合の水素発生コストを第13図に示す。一日に400台の自動車に水素を供給し、電力需要ピーク時の発電時間を変えて発電した時の水素発生単価を第14図に示す。ただし発電装置は固体高分子電解質型燃料電池である。発電時間を長くすると必要な水素量が増えるため、これに関連して水電解装置、高圧シリンダーが高価になる。その結果発生水素も若干高価になる。

## 6. 燃料電池自動車用水素発生装置

米国 DOE の Hydrogen Program の一環として燃料電池自動車用水素発生装置の経済的実行可能性が検討されている。<sup>18)</sup> 100℃以下の低温で動作する固体高分子電解質型燃料電池が普通乗用車に適用されようとしている。カナダのバラード社では0.7 kW/kgの発電能力がある固体高分子電解質型燃料電池スタックが開発されている。また米国のロス・アラモス国立研究所では固体高分子電解質膜への白金担持量が0.2 mg/cm<sup>2</sup>の触媒接合技術が開発されている。この白金担持量では乗車人数一人あたり約175ドルの触媒コストとなる。大量生産すると燃料電池スタックのコストは35ドル/kWになると予測されている。<sup>19)</sup>

この燃料電池搭載自動車では次の二ケースの燃料が検討されている。

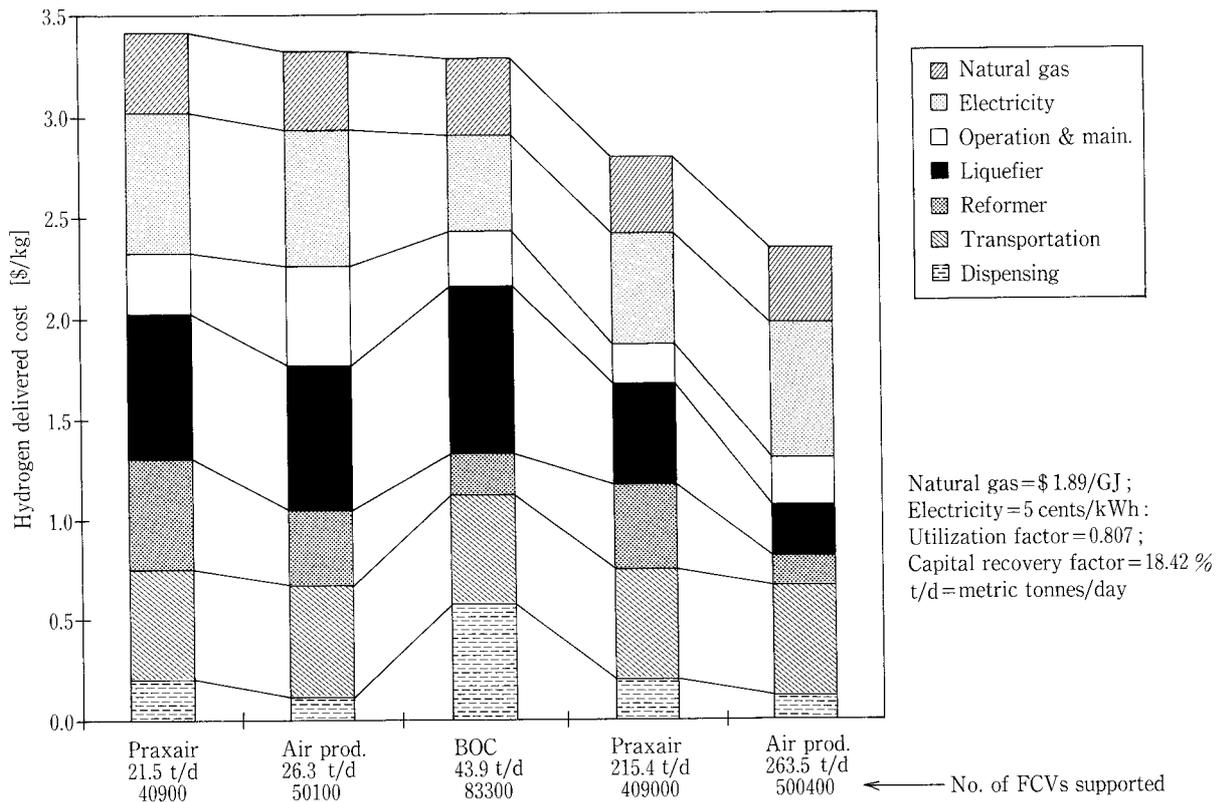


第14図 水素発生コストと発電時間の関係  
Fig.14 Relation between the cost of hydrogen and the generation hours per day

- ・水素を直接搭載する。
  - ・メタノール、ガソリンを搭載し、改質する。
- 水素を直接搭載する場合には、次の点で優れている。
- ・自動車の構造が単純になる。
  - ・高信頼性の自動車搭載用改質器の開発が必要でない。
- 一方では次の点を解決しなければならない。
- ・軽量、コンパクトな自動車搭載用水素容器の開発が必要である。
  - ・水素供給用インフラストラクチャーの構築が必要である。

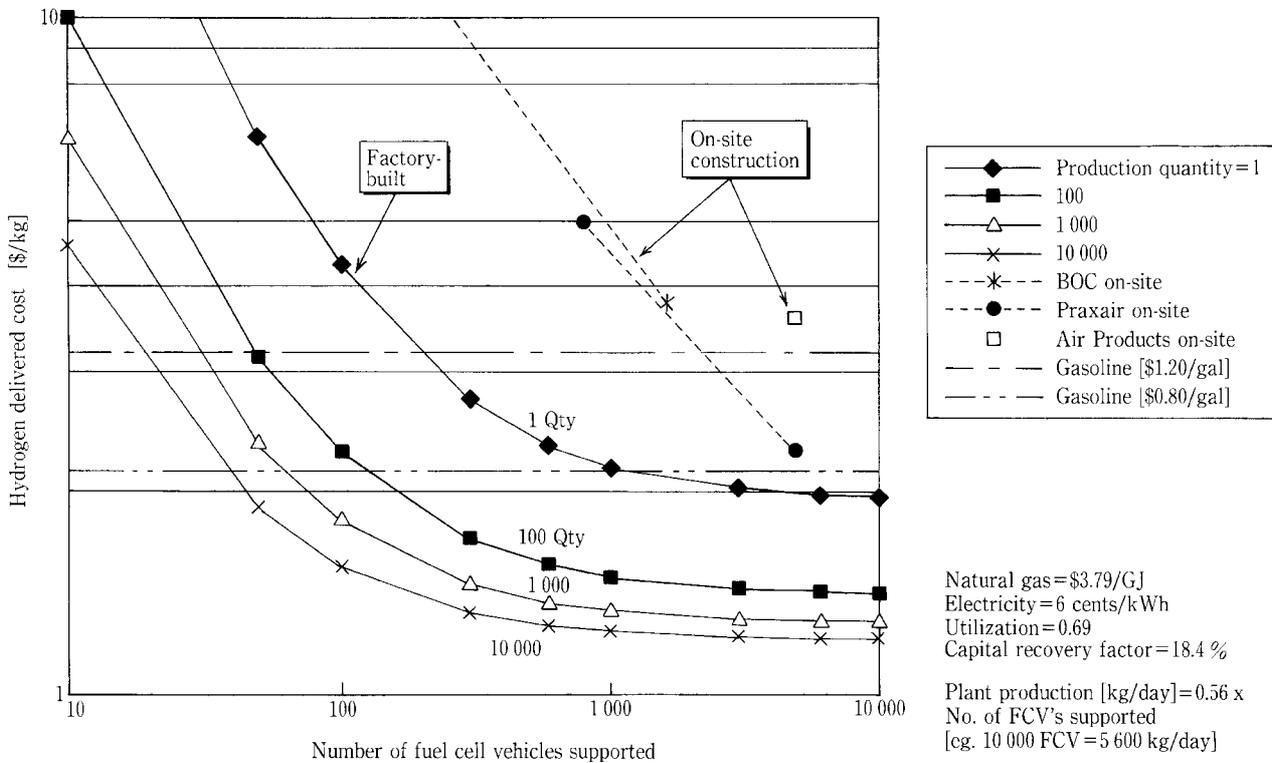
第15図に現在工業的に大量に水素を製造している天然ガス(主成分はメタン)の水蒸気改質法により製造した場合の水素の価格を示す。この場合には天然ガスの生産地で水蒸気改質し、その場で液化水素にする。そして極低温容器に充填し、トラックでユーザサイトまで輸送する。ユーザサイトでは液体水素の状態で貯蔵し、蒸発ガスを34.5 MPaまで昇圧して、燃料電池自動車に充填する。なお一日に水素を充填する燃料電池自動車の台数は第15図の台数の1/8である。第15図によるとガソリンの販売価格(1.2ドル/ガロン)相当の3ドル/kgの水素が供給できる。

第15図に示した水素の場合、水素コストの約半分が水素の液化費用と輸送費用である。小型の水蒸気による天然ガス改質装置を水素供給ステーションに設置すると水素の液化費用と輸送費用が削減できる。また小型の水蒸気による天然ガス改質装置を工場大量生産し、水素供給ステーションに設置すると天



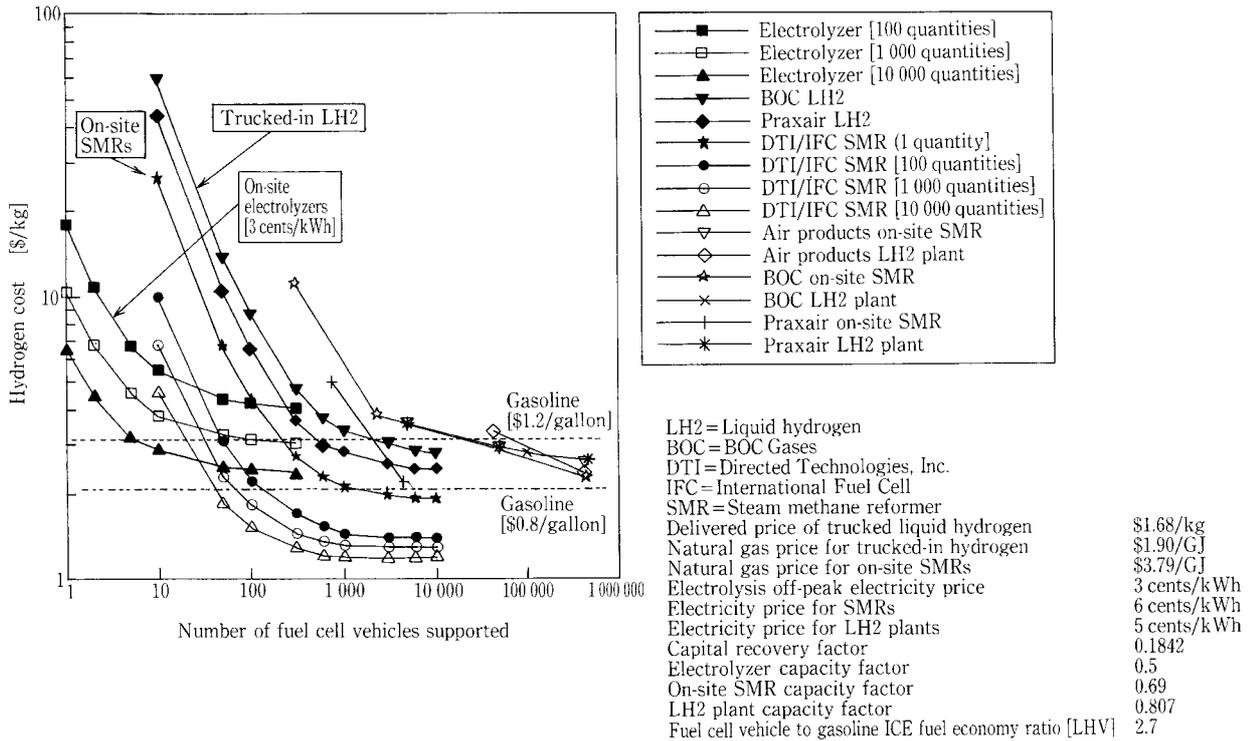
第15図 水蒸気による大型天然ガス改質装置で製作した水素のコスト

Fig.15 Delivered cost of gaseous hydrogen from large scale steam methane reformer plants



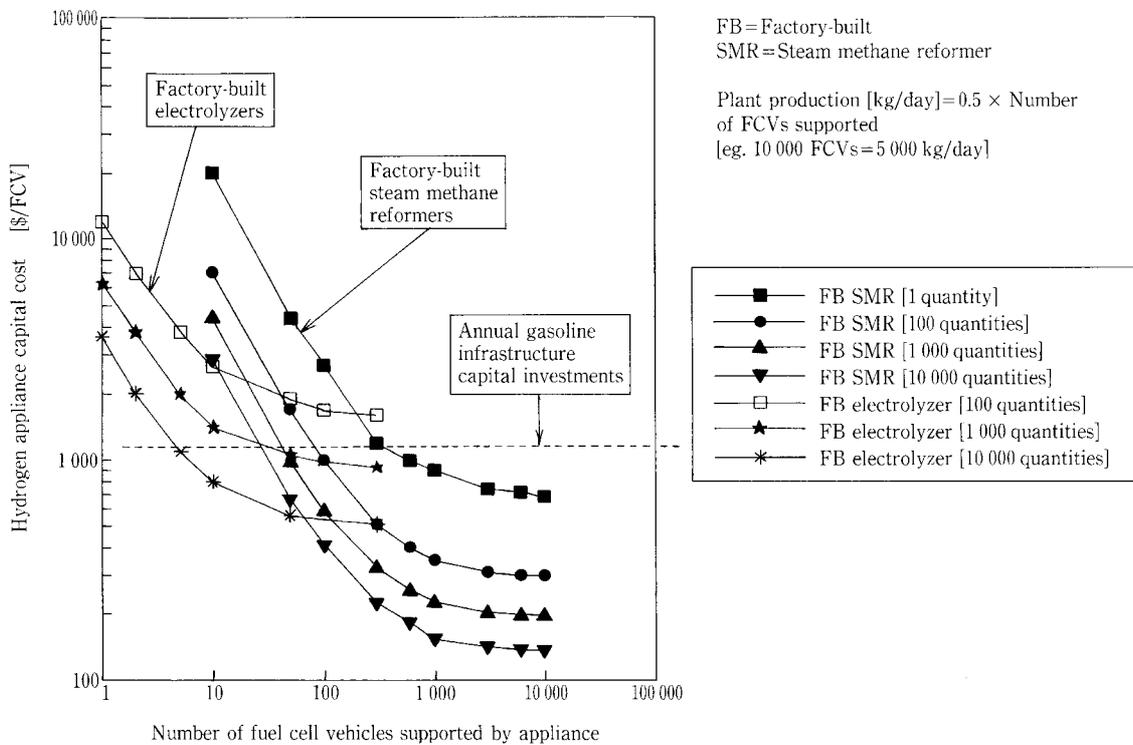
第16図 水蒸気による小型天然ガス改質装置で製作した水素のコスト

Fig.16 Hydrogen cost for mass produced, factory-built steam methane reformers



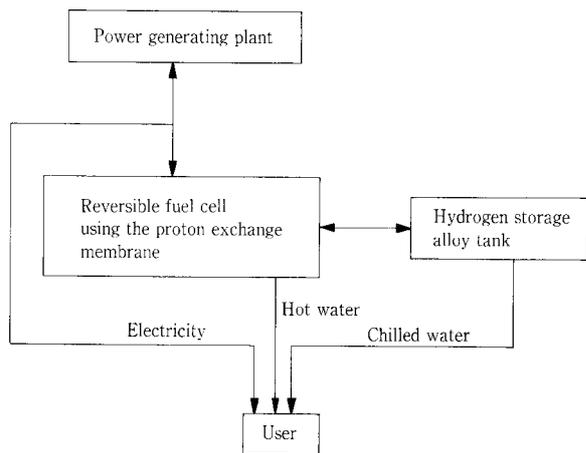
第17図 天然ガス改質装置，および水電解装置で製作した水素のコスト

Fig.17 Hydrogen costs for various hydrogen production methods, including electrolysis with off-peak electricity at 3 cents/kWh

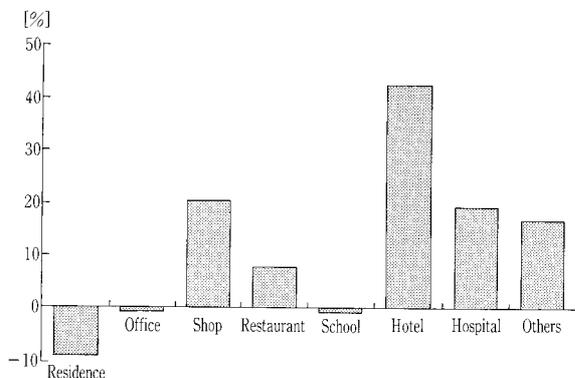


第18図 燃料電池自動車1台あたりの水素供給スタンドの設備コスト

Fig.18 Hydrogen fueling capital costs per fuel cell vehicle supported for factory-built hydrogen appliances



第19図 水素を用いた分散型エネルギーシステム  
Fig.19 Distributed energy system using the hydrogen



第20図 水素を使った分散型エネルギーシステムの経済性評価の一例  
Fig.20 An example of feasibility study for the distributed energy system using the hydrogen

然ガス改質装置が安価になる。この結果水素の価格も安価になる。第16図に工場で大量生産された小型の天然ガス改質装置により製造された水素の価格を示す。この場合天然ガス用パイプラインのネットワークを構築しなければならない。

もう一つの水素を供給する方法として既存の送電ネットワークにのった水電解法がある。乗用車1台、ないし2台用に一般家庭での使用も含めた小型の水電解装置を大量に工場で作製し、設備コストを低減する。第15、16図のデータとあわせて水電解により発生させた水素の価格を第17図に示す。安価なオフピーク電力（3セント/kWh）により水電解し、一日に10台以上の燃料電池自動車に水素を供給すると

ガソリン同等の水素価格になる。ただし水電解装置は10 000台まとめて製作する。

水素供給スタンドの設備コストを第18図に示す。水電解装置を用いると燃料電池自動車1台あたり500ドルになる。天然ガスの水蒸気改質装置を用いると燃料電池自動車1台あたり150ドルになる。ただしどちらの水素発生装置も10 000台まとめて製造する。米国においてはガソリン用インフラストラクチャーを新設、またはメンテナンスするために、新車1台あたり1 220ドル投資されている。第18図の設備コストはガソリンの場合の値よりも安価である。

## 7. 分散型水素エネルギーシステム

竹中達は第19図に示す水素を媒体とした分散型エネルギーシステムをインテリジェントビル等に適用した場合の経済性を評価している。<sup>20)</sup> このエネルギーシステムにおいては安価のオフピーク電力を用いて水電解し、水素と酸素を発生させる。発生させた水素は水素吸蔵合金に、酸素は高圧ガスタンクに貯蔵する。電力需要のピーク時には貯蔵した水素と酸素を用いて燃料電池により発電する。設備稼働率の向上、および設備費の低減を考慮して、水電解と燃料電池の両機能を合わせ持つ固体高分子電解質膜を使った可逆型燃料電池を採用する。発電時可逆型燃料電池から出る排熱を回収して、温熱（給湯）として利用する。水素吸蔵合金より水素を放出する時に発生する冷熱も利用する。

本エネルギーシステムを導入しなかった場合の電力使用料金の合計を100%とする。そしてシステム導入後の電力使用料金と本エネルギーシステム使用料金等の合計が導入前の電力使用料金の合計に対してどれだけの割合になるか試算している。その一例を第20図に示す。オフピークの電力使用量が少ない家庭、事務所、学校では導入効果が著しい。一方オフピークの電力使用量が比較的多いホテルなどでは導入の効果が相対的に小さいが、それでも導入効果がある。マイナスは利益を生み出していることを意味する。これはオフピーク時の安価な電力により水素を発生させて、その水素によりピーク時に発電し、高価に電力を売ることによる。

## むすび

現状の化石燃料システムには地球環境問題、エネルギー資源の枯渇問題等がある。これらの問題を解決するためには無尽蔵に存在し、地球環境の保全性に優れた再生エネルギーの利用技術を開発する必要がある。再生エネルギーには化石燃料に比較して種々の欠点があり、この欠点を補うのが水素エネルギー

である。現状の経済性評価では水素エネルギーは化石燃料に比較して競争力がない。しかし外部コスト(環境コスト)を加えた経済性評価では十分に水素エネルギーは競争力がある。

再生エネルギーを使った水素発生技術では水電解装置が重要な役割を担う。当社では固体高分子電解質膜を使った水電解によるオンサイト型水素発生装置(HHOG)を半導体工業, 化学工業, 発電所向けに製品化してきた。<sup>21) 22) 23)</sup> この技術をベースに大型化, 高圧化等の技術開発を行うことによって, 水素エネルギーシステムに適したHHOGとするように努めていく所存である。

[ 参考文献 ]

- 1) C. J. Winter and J. Nitsch ed., *Hydrogen as an Energy Carrier*, Springer, Berlin (1986)
- 2) 指宿堯嗣, 日本機械学会誌, Vol.98 (1995), p.247.
- 3) H. Takenaka, E. Torikai, Y. Kawami and N. Wakabayashi, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 7 (1982), p.397.
- 4) 第18回新エネルギー・産業技術総合開発機構事業報告会, 水素・アルコール・バイオマス技術分科会資料, 1998年9月
- 5) Y. Sindo, P.C.Lund, Y.Fujioka and H.Komiyama *Energy Covers. Mgmt*, Vol. 34 (1993), p.1073.
- 6) 水上俊一, 神鋼パンテック技報, Vol.42, No.1 (1998), p.2.
- 7) 齊藤昌弘, 触媒, Vol. 35 (1993), p.485.
- 8) Nat. Acad. Scie., Nat. Acad. Eng., Inst. of Med.: Policy of Greenhouse Warming (1991, Nat. Acad. Press)
- 9) W. D. Nordhaus, *Science*, Vol. 258 (1992), p.1315.
- 10) 西山孝, エネルギー・資源, Vol. 19 (1998), p.23.
- 11) W. Fulkerson, R. R. Judkins and M. K. Sanghvi, *Scient. Am.*, Vol. 263 (1990), p.129.
- 12) G. R. Davis, *Scient. Am.*, Vol. 263 (1990), p.55.
- 13) 都留重人編, 岩波小辞典「経済学」, 第三版, 岩波書店 (1970), p.177.
- 14) O. Hohmeyer, *Energy Policy*, Vol. 20 (1992), p.365.
- 15) F. Barbir and T. N. Veziroglu, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 17 (1992), p.299.
- 16) Strategic Plan for DOE HYDROGEN PROGRAM, DOE/GO-10098-52, January (1998)
- 17) J. J. Iannucci, J. M. Eyer, S. A. Horgan and S. M. Shoening, *Proceedings of the 1998 U. S. Hydrogen Program Review*, Vergia, April (1998), p.281.
- 18) C. E. Thomas, I. F. Kuhn, Jr., B. D. James, F. D. Lomax, Jr. and G. N. Baum, *Int. J. Hydrogen*, Vol.23 (1998), p.507.
- 19) F. D. Lomax, Jr., B. D. James and R. P. Moordian, *Proceedings of the 8th Annual U. S. Hydrogen Meeting*, Verginia, March (1997)
- 20) 竹中啓恭, 赤井誠, 小黒啓介, 榎屋治紀, 守富寛, 世一英俊, エネルギー複合化技術開発の可能性 3 平成 6 年度調査報告書, (1995), p.49.
- 21) 廣瀬潤, 去来川辰彦, 神鋼パンテック技報, Vol. 40, No. 2 (1996), p.48.
- 22) 三宅明子, 小松宏子, 森岡輝行, 神鋼パンテック技報, Vol. 41, No. 1 (1997), p.55.
- 23) 平井清司, 三宅明子, 森岡輝行, 神鋼パンテック技報, Vol. 42, No. 1 (1998), p.61.

連絡先

<p>多井 勉 技術開発本部 研究開発部 主任研究員 TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail o.tsutomu@pantec.co.jp</p>	<p>平井清司 技術開発本部 研究開発部 主任研究員 TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail k.hirai@pantec.co.jp</p>	<p>三宅明子 (学術博士) 技術開発本部 研究開発部 TEL 078-992-6525 FAX 078-992-6504 E-mail a.miyake@pantec.co.jp</p>
<p>廣瀬 潤 UC事業室 担当課長 TEL 078-232-8100 FAX 078-232-8110 E-mail j.hirose@pantec.co.jp</p>		