

「読者の広場」

水素エネルギーシステム

— 21世紀において期待されるその役割 —

服部 達雄

東京ガス(株)技術企画部

〒105-0087 東京都港区海岸 1-5-25

1. 緒言

メガコンペティションの象徴である世界的な自動車産業の再編に関する最近の新聞記事に共通するのは、燃料電池自動車が21世紀に生き残るキイテクノロジーであるとされている点である。固体高分子電解質型燃料電池を搭載することによって自動車の燃費が格段に向上するものと期待され、その開発競争が世界の有力自動車メーカーによって繰り広げられている。

このよう動きは水素エネルギーシステムの実用化と普及のための強力な牽引力となるものであり、我々水素エネルギー研究者にとっては喜びを隠し得ないことである。しかし一方、これを機会に水素エネルギーに対する我々の理解を整理し、今後の研究開発戦略を再確認することを迫っていると言えよう。

2. 21世紀のエネルギー資源

昨年9月に米国ヒューストンで開催された世界エネルギー会議(World Energy Council)第17回大会に

おいて、化石燃料資源の埋蔵量に関し画期的な報告がなされた。すなわち、在来型の埋蔵量については従来から言われていた量に比べて著しい飛躍はないが、今後の技術革新などで将来埋蔵量に加えられるであろう資源量まで含めるならば、天然ガスの資源量は500年分(1999年の世界消費量に対し)、石油が250年分、石炭は1,500年分以上に達するという(表1 [1])。

これは、21世紀のエネルギー需要を賄うに十分な化石燃料資源が存在することを物語っており、これまで水素エネルギーをはじめとする代替エネルギー、新エネルギーの開発・導入の論拠とされた資源枯渇論に説得力を失わせるものである。

資源の制約に代わって、21世紀における世界のエネルギー消費を規制するものは地球温暖化問題である。地球温暖化の進行を抑止するために化石エネルギーの消費をどこまで制限しなければならないかには議論があるであろうが、今後の世界的なエネルギー需要の増加を踏まえるなら、①化石エネルギー使用の合理化(省エネルギーの推進)と、②化石エネルギーからの脱却(代替エネルギーの導入)を全世界で推進しなければならず、

表1 化石燃料の資源量 [1]

(単位:石油換算ギガトン)

	消費量 (1990年)	埋蔵量 (a)	資源量 (b)	資源ベース (a+b)	可能性領域
天然ガス					
在来型	1.7	141 (83年)	279 (164年)	420 (247年)	400 (235年) 18,700 (11,000年)
非在来型		192 (113年)	258 (152年)	450 (265年)	
ハイドレート					
石油					
在来型	3.2	150 (47年)	145 (45年)	295 (92年)	1,900 (594年)
非在来型		193 (60年)	332 (104年)	525 (164年)	
石炭	2.2	606 (275年)	2,794 (1,270年)	3,400 (1,545年)	3,000 (1,363年)

(注) 1. ()内は消費量(1990年)の何年分かを示す。

2. 埋蔵量:現在の技術と市場条件で採掘できる資源。

資源量:未発見の資源だが、市場条件・技術革新・地質学の進歩次第で将来の埋蔵量に追加できるもの。

可能性領域:埋蔵量、資源量以外のもので、地殻に存在が予想される数量。

表2 世界の1次エネルギー供給に占めるバイオマスの割合

(million tonnes oil equivalent)

	1995年				2020年			
	Total	在来型 Energy	Biomass (Share)		Total	在来型 Energy	Biomass (Share)	
China	1,070	864	206	19%	2,325	2,101	224	10%
East Asia	581	464	117	20%	1,411	1,275	136	10%
South Asia	528	284	244	46%	1,119	811	308	28%
Latin America	535	452	83	16%	1,081	986	95	9%
Africa	451	226	225	50%	886	432	453	51%
Total Developing Countries	3,166	2,291	876	28%	6,821	5,606	1,216	16%
Other non-OECD	1,477	1,449	28	1%	2,258	2,228	30	0%
Total non-OECD	4,643	3,739	904	19%	9,080	7,833	1,246	14%
OECD countries	4,473	4,330	142	3%	5,707	5,535	172	3%
World*	9,245	8,199	1,046	11%	14,995	13,577	1,418	9%

*Includes marine bunkers

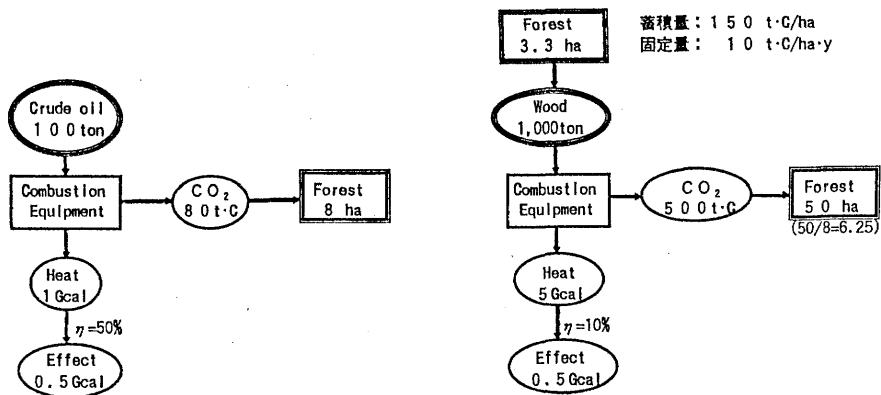
これに対して有意な貢献ができることで代替エネルギーあるいは新エネルギーの存在意義が認められることになる。

21世紀の世界が抱えるであろう重大な問題に発展途上国における人口の爆発的増加とそれに伴う自然破壊がある。

現在すでに、地球の自然がもたらす森林、水産、土壌、水などの再生可能資源が急速に失われつつあり、その対策が世界の緊急の課題となっている。特に、発展途上国においては、燃料資源を木材などのバイオマス燃料に依存している割合が高い(表2 [2]) ので、人口増加が森林の過剰伐採を引き起こし、自らの燃料木材の確保が困

難になってしまった地域すら発生している。

木材(森林)は本来再生可能資源であり、適正な範囲内で利用されているかぎり持続性があり、地球温暖化に対して中立である。しかし、熱効率の低い、在来型燃焼装置への燃料供給源として森林を利用するのは、化石燃料からの二酸化炭素の吸収源として森林を利用するのに比し、数倍の森林面積を必要とする(図1)。したがって、発展途上国の森林保全のためには、木質燃料利用における熱効率の向上を図るとともに、木質燃料への依存の低下を世界のエネルギー供給構造のなかで考えることが必要である。



[注] 石油 発熱量 10,000 kcal/kg 炭素含有量 0.8 kg-C/kg
木材 発熱量 5,000 kcal/kg 炭素含有量 0.5 kg-C/kg

図1 二酸化炭素固定に必要な森林面積比較

3. 水素エネルギーの意義

水素は、エネルギー媒体であって、エネルギー資源ではないとは言っても、21世紀の世界のエネルギー問題に対し相応の貢献をすることこそ水素エネルギーの意義がある。すなわち、エネルギーシステムの中に水素を介在させるとによってエネルギー利用効率が向上し、

- ① 化石燃料の節減になること。
- ② 代替エネルギーの利用が拡大すること。
- ③ 再生可能資源の保全に通じること。

で水素の存在価値が出てくる。

21世紀においても化石資源の枯渇を心配しなくてよく、化石燃料の高効率利用が最も重要なエネルギー課題であるので、水素をエネルギー媒体とすることによって1次エネルギー源である化石燃料の節減になることこそが水素エネルギーの第一の意義である。

太陽エネルギーを固定・利用する媒体として水素を利用する例に見るように、水素をエネルギー媒体とすることによって、その代替エネルギーの利用価値が高まり、量的にも拡大できる可能性がある。これが水素エネルギーの第二の意義であるが、直接電力へ変換する方法との比較が問題となるので、電力を陵駕する、水素に適した利用分野を見定めることが必要である。

再生可能資源、例えば木質バイオマスを水素へ変換してから利用することによって、より高効率な利用となる可能性がある。また、有機性廃水・廃棄物のような未利用バイオマス資源から水素としてエネルギーを回収することも考えられる。これが水素エネルギーの第三の意義である。しかし、このような技術が発展途上国におい

て早急に普及できるとは考え難い。再生可能資源の保全に水素エネルギーが貢献できるためには、グローバルな視点での取り組みが必要であろう。

4. 水素エネルギー社会への移行シナリオ

21世紀になっても世界のエネルギー供給の中心は化石資源である(表3 [2]) ので、水素を媒体とするエネルギー利用の大部分は化石エネルギーを一次エネルギー源とし、代替エネルギーの占める割合は僅かである。したがって、水素エネルギーシステムの普及は、化石燃料の節減要請に応える形で、次のように進行するものと考えられる。

- ① 水素が最もアドバンテージを発揮できる利用分野から水素利用が始まる。
- ② ゼロから個別積み上げとなるので、初期段階においては消費サイトが散在している。
- ③ 中期段階以降になって初めて需要先(量)がまとまってくる。

一つの場所で大量の水素が消費される需要(大規模発電所における水素燃焼ガスタービンなど)以外の一般の需要は、その所在が分散していて、それらが一度に水素エネルギーシステムへ転換することはありえない。水素消費サイトが順次増加してゆきながら、水素エネルギーの利用が進むので、完全な水素エネルギー社会への転換には期間的にも相当の年数を要する。

この間の水素の調達と供給をどのように行うかが水素エネルギーシステムへの移行シナリオを検討する上でポイントである。各普及段階の特性に合致した水素の供

表3 世界の1次エネルギー供給の構成

(million tonnes oil equivalent)

	1995年		2010年		2020年		Average annual growth rates	
	(Shares)		(Shares)		(Shares)		2010/1995	2020/1995
Solid Fuels*	3,251	35%	4,377	35%	5,193	35%	2.0%	1.9%
Oil	3,324	36%	4,468	35%	5,264	35%	2.0%	1.9%
Gas	1,810	20%	2,721	22%	3,468	23%	2.8%	2.6%
Nuclear	608	7%	670	5%	604	4%	0.6%	0.0%
Hydro	215	2%	296	2%	352	2%	2.2%	2.0%
Other Renewables**	36	0%	83	1%	113	1%	5.7%	4.7%
Total Primary Energy Supply	9245	100%	12,616	100%	14,995	100%	2.1%	2.0%

*Includes combustible renewables & wastes

**Includes geothermal, solar, wind, tide & wave

給方法・システムが求められる。特に、小規模な需要が離散して立地する初期段階においては、集中水素供給地からの水素供給は経済的に成立し難いので、オンサイト（消費場所）での水素製造で対処することとなる。

5. 研究開発の方向

5. 1 水素利用技術

エネルギー媒体としての水素の特長は、高いエネルギー利用効率にある。しかも小規模から大規模まで等しく高いエネルギー効率が実現されること、これこそが水素の本質的利点であって、水素利用のアドバンテージである。

水素エネルギー社会を成立させるためには、水素のアドバンテージが最大限に発揮される水素利用、水素を媒体とすることによってエネルギー効率が高まる用途や水素を燃料とすることによって初めて実現する新たな利用を開発することである。(表4)

水素を利用することによる効率向上については、

- ① 機器単体としての効率向上

- ② システム全体としての効率向上
 - ③ LCA的な効率向上
- の3段階がある。

①の代表例が「固体高分子電解質型燃料電池」である。常温での化学反応によって水素の持つ自由エネルギーを電力へ変換することが可能なことから、高い変換効率が到達でき、水素のアドバンテージが最もよく発揮される例である。このような要素技術を用意することが水素エネルギーシステム普及の鍵である。水素の燃焼速度が速いこと、燃焼生成物が水だけであることの特徴を生かした「水素燃焼加熱設備」、さらには「水素ガスエンジン」、「水素ガスタービン」の開発が待たれるところである。

②の代表例が「燃料電池自動車」である。部分負荷においても高い効率を発揮する燃料電池を駆動源として搭載することによって、走行時の実効効率(燃費)が現行の内燃機関駆動車よりも格段に優れるものと期待されている。小型・高効率の水素ガスエンジン、水素ガスタービンが開発されるならば、水素を燃料とする「コ・ジェネレーションシステム」が実現できる。

表4 注目すべき水素利用技術（化学原料としての利用は除く）

分類	種類	技術的要点具体例
要素技術	水素燃焼加熱装置	次のような水素燃料の特長を生かすことによって、革新的な加熱装置が開発できるものと期待される。 ・排ガスがクリーンである。 ・高温の火災が得られる。 ・燃焼速度が速い。 ・燃焼生成物が水だけである。 具体例：水素・酸素炎による加工、排ガスの出ない加熱装置
	水素ディーゼルエンジン	WE-NET において研究開発中。水素を燃料とすることで熱効率がどこまで高まるかがポイントである。
	水素ガスタービン	WE-NET において、大規模発電への適用を目指した研究開発を推進している。 超小型のもの（マイクロガスタービン）が開発されれば、民生用コ・ジェネレーション分野で利用できる。
	燃料電池	水素を燃料とすることによって、小型・軽量・短時間起動など、実用性に優れた燃料電池が実現するものと期待される。特に、自動車への搭載を目指して固体高分子電解質型燃料電池の開発が活発に進められている。
システム化しての水素利用	コ・ジェネレーション	高効率の水素ディーゼルエンジン、水素ガスタービンが開発されれば、それらを駆動源とするコ・ジェネレーションが水素利用の最も有力な分野となる。 固体高分子電解質型燃料電池は、家庭レベルでのコ・ジェネレーションを可能にするものとして、早期の実用化が待たれる。
	燃料電池自動車	部分負荷においても高い効率が保たれる燃料電池を駆動源とすることによって、走行時の実効効率が内燃機関駆動車よりも格段に優れる。 軽量で高出力密度が得られる固体高分子電解質型燃料電池で開発競争が進められている。燃料水素の車載方法が問題。
LCAとしてアドバンテージが発揮される例	熱処理加熱炉	クリーンな水素燃焼の高温排ガスを直接被加熱物に噴射することによって、加熱と熱処理を同時に実施することが可能。
	新概念加熱装置	触媒燃焼と熱交換器とを一体化した超小型加熱装置を開発することで、設備全体のコストが低下し、LCA 的に見た総合効率が向上する。

③の事例として「触媒燃焼」を応用しての燃焼と伝熱とを一体化した新概念加熱装置が考えられる。触媒燃焼だけでは水素を燃料とするメリットが発揮され難いが、熱交換部と一体化することによって超小型加熱装置が開発できるならば、装置全体として水素のアドバンテージが発現されることになる。設備コストだけでなく、製品品質まで含めて検討することによって、LCA 的に見た効率向上となる水素利用は多々あるであろう。

5.2 水素製造

水素は 2 次エネルギーであって、その製造には何らかの 1 次エネルギーが必要である。水素製造方法には、研究開発段階のものも含め、次のようなものがある。

- (1) 化石資源からの水素製造
 - ① 炭化水素（石油、天然ガス）の水蒸気改質
 - ② メタノール（天然ガスから製造する。）の分解
- (2) 水の電気分解
 - ① 水の電気分解
 - ② 太陽電池発電との組み合わせ
- (3) 水の直接分解
 - ① 光触媒を用いる方法
 - ② 微生物による水の分解
- (4) 未利用有機資源（バイオマス）、有機性廃棄物からの水素製造

① 熱分解、水蒸気分解

② 微生物による分解

21 世紀においても世界のエネルギー供給の中心が化石エネルギー資源である以上、石油や天然ガス（およびそれらからの 2 次製品であるメタノール）からの水素が水素エネルギーシステムにとって主力な水素源である。炭化水素の水蒸気改質法は、大規模な水素製造プロセスとして実用されているが、二酸化炭素の排出抑制の観点からエネルギー効率の向上に努力するとともに、水素エネルギーシステムに適合したプロセスへの展開が必要である。特に、水素エネルギーシステムの普及が進んでゆく移行段階においては、離散した水素需要に対応する必要があり、比較的小規模な水素製造が不可欠である。水素エネルギーシステムとしての最適設計、徹底した熱効率向上の追求が基本的な課題である。反応温度・圧力の条件を緩和できる水蒸気改質触媒の開発やメンブレンリアクタのような新概念リフォーマの実用化が化石燃料からの水素製造に新たな展開を拓くものと期待される。

水の電気分解は、水素製造のための実用方法の一つであるが、その電力源が問題である。太陽電池からの電力を利用するとしても、製造された水素で再び発電し、電力に戻すのはナンセンスである。水の電気分解が採用できるのは、水素そのものを利用目的とする場合のみである。

表5 水素製造コストの試算例 水素製造能力：50 千 Nm³/h（水素純度：99%以上）

方 式	天然ガスからの水素製造	太陽光による水素製造	バイオマスからの水素製造**
プロセス構成	水蒸気改質/PSA	太陽電池*/水電気分解	急速熱分解/水蒸気改質/PSA
年間水素製造量	400 百万 Nm ³ (年間 8 千時間稼動)	200 百万 Nm ³ (年間 330 日稼動)	400 百万 Nm ³ (年間 8 千時間稼動)
建設費	99 億円	538 億円	110 億円
製 造 原 価	原材料費 (天然ガス 23.8¥/kg) 7.55 円/Nm ³	0.49 円/Nm ³	(木材屑 10¥/kg・dry) 13.49 円/Nm ³
	用役費 0.28 円/Nm ³	8.53 円/Nm ³	0.81 円/Nm ³
	副生物控除	(純酸素：▲20¥/Nm ³) ▲10.00 円/Nm ³	(分解ガス：▲14¥/kg) ▲3.19 円/Nm ³
	変動費計 7.83 円/Nm ³	▲0.98 円/Nm ³	11.11 円/Nm ³
	固定費計 5.38 円/Nm ³	52.93 円/Nm ³	5.75 円/Nm ³
	総計（製造原価） 13.21 円/Nm ³	51.95 円/Nm ³	16.86 円/Nm ³

*PV Cell の発電効率 15% とした。受光面積 3,650m²、架台・据付費・周辺機器・配線を含めた設備価格 13 千円/m²。

天然ガスの水蒸気改質に比べ、建設費が 5 倍以上で、これが製造原価の差となる。

**バイオマス原料（木材屑、鋸屑）を流動床反応器において Bio-Oil と Char に分解し、得られた Bio-Oil を水蒸気改質し、水素を製造する。建設費が天然ガスの水蒸気改質の 1 割高に留まり、原料バイオマスの入手条件（量と価格）が整えば十分に実用できる。

光触媒や微生物を用いて光エネルギーによって水を直接分解する方法が研究されているが、いずれも光エネルギーの変換効率が低く、実用には程遠い。

未利用有機資源、有機性廃棄物などの再生可能資源からの水素製造は、二酸化炭素を排出せず(二酸化炭素に中立で)、本質的に地球環境に優しい水素製造方式として興味深い方法である。農産廃棄物、森林系バイオマスは、エネルギー資源としての賦存量が相当大量にあり、ある程度まとまった量を集積できるならば、製造コスト的にも実用性が十分にある(表5)。

一方、バイオマスは発展途上国の自前のエネルギー資源であり、それを有効利用することは重要な課題である。しかし、発展途上国においては、バイオマスを水素へ変換するよりも、もっと単純な技術でのバイオマス利用、例えば直接燃焼(化石燃料との混焼も含めて)による発電の方がなじみやすい。したがって、再生可能資源の持続性を保持し、二酸化炭素の固定源としての森林保全を図ってゆくためには、先進国と発展途上国との間の資源と技術の適正なシェアリングが必要となってくる。

6. あとがき

世界的な燃料電池自動車の開発競争によって、水素エネルギーシステムの実用化・普及へ大きな弾みもたらされた。しかし、我々水素エネルギー研究者にとっては、これを単に喜んで自動車に期待するだけでなく、これを機会に真にアドバンテージを持った水素エネルギーの利用を追求することが重要である。

水素は、炭化水素系燃料に比較し、輸送・貯蔵特性が悪く、実際上の容積負荷、重量負荷が大きという欠点は避けようがない。この不利益(コスト増)を水素が発揮するであろうアドバンテージによってカバーすることが水素普及の必須条件であり、ドライビングフォースである。我々の研究開発によって、水素の欠点を克服し、コスト増を抑制し、アドバンテージをより大きくすることが、水素エネルギーシステムの普及、水素エネルギー社会の実現への基本シナリオである。

引用文献

- [1] ガスエネルギー新聞 (99.1.20)
- [2] IEA : World Energy Outlook (1998 Edition)