

自動車用燃料としての水素エネルギーの現状と課題

Hydrogen Energy as Automotive Fuel

○ 松尾雄司 ・ 平井晴己 ・ 宇野宏 ・ 永富悠 *

Yuhji Matsuo Harumi Hirai Hiroshi Uno Yu Nagatomi

The utilization of hydrogen energy as automotive fuel is expected not only to contribute to a stable energy supply by lowering dependence on oil, but also to reduce CO₂ emission from the transport sector. In this paper we estimated the LCA costs and CO₂ emissions of hydrogen utilization, considering various types of hydrogen production and supply. Even though fuel cell vehicles are more fuel-efficient than usual gasoline engine vehicles, fuel cost per kilometer will remain high. If by-product hydrogen from industry or hydrogen produced through electrolysis using renewable or nuclear power is utilized, CO₂ emission will be low, but if hydrogen is reformed from fossil fuel, CO₂ reduction will not be expected. High fossil fuel price or high CO₂ price will be necessary for hydrogen energy to be really introduced. Furthermore, strong leadership of the government to develop technologies and construct infrastructures will be needed.

Keywords: Hydrogen, Life Cycle Assessment, Cost, CO₂

1. はじめに

近年途上国等の経済成長に伴い急速に増大する化石エネルギー需要や、地球温暖化問題に対処するためには、化石燃料に代るエネルギー源が必要である。このような観点から、世界のエネルギー需要の大きな一部を占める自動車用燃料について、水素が有望なオプションの一つとして考えられている。本稿では、自動車用燃料としての水素エネルギーの可能性を探るため、その導入のためのコスト及び環境特性について評価・考察する。

2. 移行期における水素の供給ネットワークの想定

既存の内燃機関を駆動源とする自動車と、その燃料となるガソリンや軽油を供給する石油産業（石油の生産・物流システム）とは効率的かつ自己完結的なサプライチェーンとして存在しており、今後水素を経済合理的に導入するためには、ある程度の範囲と規模で一気にシステムを代替することが必要となる。本稿では以下、この導入移行期を想定した上で、コストやCO₂排出量を試算する。

基本的な水素ステーション（SS）及び燃料電池車（FCV）の仕様は表1の通りとする。現行の小型乗用車クラスのガソリン・軽油自動車と同等の性能を想定し、1回の給油で約5kg（満タン）の充填が可能、約500kmの走行が可能とする。

表1 水素SSとFCVの諸元（水素充填能力500Nm³/時）

稼働率		%	85%	50%
1SS	来店台数	台/(SS・日)	229	135
	給油量 ^{*1}	H ₂ -kg/台	4	4
	販売量	H ₂ -kg/月	27,528	16,200
		Nm ³ /h	425	250
	(ガソリン車給油ベース) ^{*2}	kl/月	172	101
	給油回数 ^{*3}	回/(台・月)	2.1	2.1
100SS	保有台数 ^{*4}	台/SS	3,256	1,916
	年間販売量	H ₂ -kg/月	2,752,800	1,620,000
	年間販売量	トン/年	33,034	19,440
FCV	FCV燃費(水素)	km/H ₂ -kg	100	
	FCV燃費(ガソリン車換算) ^{*5}	km/l	26.0	
	既存ガソリン車 ^{*6}	km/l	15.5	
	走行距離 ^{*7}	km/(年・台)	10,144	
	燃料消費量 ^{*8}	H ₂ -kg/(台・月)	8.5	

(注1)FCVのタンク貯蔵量(35MPa、有効貯蔵量100%)、満タン5kg(1回充填量4kg)

(注2)充填水素量を発熱量等価でガソリンに変換後、走行燃費差(26.0÷15.5)

)で補正

(注3)年間走行距離÷12カ月÷走行燃費÷燃料タンク充填量(4kg)

(注4)1日来店台数*30日÷給油回数(2.1)

(注5)発熱量等価、

(注6)平成19年度の乗用車の走行燃費(国交省)

(注7)平成17年度の乗用車(軽自除く)年間走行距離、

(注8)年間走行距離÷12カ月÷走行燃費

1台の走行距離をガソリン車と同等の年間1万km程度とすると、台あたりの月間水素充填量は8.5kgとなる。1回の充填を4kgとすると、月間の充填回数は約2.1回となる。

水素SSサイドで見ると、1時間あたり定格で500Nm³の水素充填能力とし、24時間営業・平均稼働率85%とすると、1水素SSあたりのFCV来店数は約230台/日、月間水素販売量は約2,750kgとなる。1SSへの固定客数(FCVオーナー)は約3,300台という結果となる。1世帯=1FCV保有、1世帯=3.3人という想定をおけば、1SSあたりの人口は約1万人となる。

* 財団法人日本エネルギー経済研究所

計量分析ユニット

〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1

e-mail matsuo@edmc.ieej.or.jp

オフサイト型水素 SS では、片道平均で 50km 程度、往復 100km、1 日 2 トリップの輸送を配送圏とする。これは概ね京浜湾内地域東または西半分での供給というイメージとなる。1SS の商圏を 5km とすると、エリア内の水素 SS は概ね 100 程度、水素供給量は月間で約 2.8 トン、年間で約 3.3 万トン (約 3.7 億 Nm³) となる。

100SS を 1 ユニットとすると、FCV 約 33 万台、人口 100 万人が対象となる。これは地方の 1 政令都市分の規模に相当する。この規模では、都市ガス改質の場合年間約 1.5 億 Nm³ (東京ガスの年間販売量の約 1%) の天然ガスが、あるいは、電気分解に要する電力で年間約 15.7 億 kWh (東京電力の年間販売量の約 0.5%) が投入される想定となる。この規模の 1 ユニット (100SS) から 100 ユニット (1 万 SS) 程度へと拡大した場合に、ほぼ日本が水素社会へと移行したこととなる。

3. 水素供給のプロセス別コスト

(1) 前提条件

コスト試算の対象としては、現時点において実行可能と思われる技術や調達可能と想定できるもののみ以下の通り想定し、微生物や原子力の熱利用による水素製造など、可能であっても現状ではコスト評価が難しいケースは対象外とした。

① 製造方法：天然ガスなどによる水蒸気改質、アルカリ水電気分解、高炉やソーダ工業・石油精製などからの副生水素の回収

② 輸送方法：高圧圧縮水素 (400 気圧) を充填したボンベ輸送、または液化水素によるローリー輸送

③ 水素ステーション：オンサイト型 (電気分解や改質を現場で行う)、オフサイト型

また、プロセスとしては、水素製造 (原料製造・輸送含む)、輸送、充填の 3 つに区分した。なお、ユーティリティ (動力・照明・加熱・輸送) については、平均的な電源構成、都市ガス、軽油 (輸送用ローリー・トラック) を使用したとして効率・CO₂ 排出量・コスト等を計算している。

(2) 投資コスト

・輸送設備

液体輸送については、1 ユニット当りローリー 35 台 (水素 1,465kg/台、7,000 万円/台)、1 日 2 回配送、走行距離 50km (片道) とし、約 370 億円 (水素液化設備：約 346 億円、輸送ローリー：約 24 億円) と想定した。また圧縮輸送については、1 ユニット当りトラクター 206 台 (水素 250kg)、トレーラー 406 台、1 日 2 回配送、走行距離 50km、トラクタ

一及びトレーラーの単価は 1,600 万円及び 2,700 万円 (ボンベ込み) とし、約 168 億円 (水素圧縮設備：約 25 億円、輸送トラクター・トレーラー：約 143 億円) と想定した。液化水素は効率が良い反面液化設備にコストがかかるので、長距離輸送に向いている。圧縮輸送は輸送効率は低い反面圧縮コストが少ないことから、近距離の少量輸送に適している。

・水素ステーション

水素ステーション (500Nm³/h 規模) が約 1 万件程度まで普及する場合には、建設コストは概ねガソリン SS と同じ 1~2 億円程度まで下がることが期待できるが、現状では約 3 億 3 千万円~約 4 億 5 千万円と、かなり割高であると想定される。

・プロセス別投資額

これらの想定から、1 ユニット (100SS、合計 5 万 Nm³/h の水素供給能力) 相当の設備額を表 2 に示した。投資金額は 643 億円~1,087 億円である。水素社会へ移行した場合は、前述したように 100 ユニット (1 万 SS) となるので、約 6.4 兆円~10.9 兆円となる。普及拡大にともなうコスト低減を約 40% としても、約 4 兆円~7 兆円規模の巨大な投資額となると想定される。

表 2 インフラ設備投資額一覧 (1 ユニット=100SS)

エネルギー源	天然ガス		回収						電気分解										
	オンサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト							
	オンサイト	オフサイト	コークス炉ガス (COG)		習性ソーダ		石油精製		石炭火力	風力	原子力	石炭火力	風力	原子力					
製造方式	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	液体水素	圧縮水素	
輸送方法	製造	300	195	195	68	68					300	300	300	390	390	390	390	390	390
投資額 (100SS当り 億円)	輸送		370	167	370	167	370	167	370	167				370	167	370	167	370	167
	充填	461	327	476	327	476	327	476	327	476	461	461	461	327	476	327	476	327	476
合計		761	692	838	765	711	697	643	697	643	761	761	761	1,087	1,033	1,087	1,033	1,087	1,033

(NEDO研究報告書「W E-NET」他を参考に試算
オンサイト型の水素製造ユニットは充填設備の項に計上せず製造設備の項に記載)

(3) プロセス別コスト

供給コストを計算するための主要な条件は以下のとおりとした。

・為替レート 100 円/US\$、金利 5%

・エネルギー価格

原油 (輸入 CIF) : 54 \$/bbl、石炭 : 78 \$/t、天然ガス : 15.4 \$/Mbtu、電力価格 12.3 円/kWh

・償却、金利他

ローリー・トラクターなど輸送機器 : 4 年償却、その他設備 : 10 年~15 年償却

固定資産税等・火災保険等 (設備金額の 2%)、維持修理費 (設備金額の 3%)

各工程別に年間経費 (償却・金利費、維持修理費、税保料、電力・燃料・水道費、人件費) を試算し、供給プロ

セス別に、全工程(原料から水素がFCVに充填されるまでの工程)の費用の集計を行った。水素1kgあたりの水素供給コストを図1に示す。

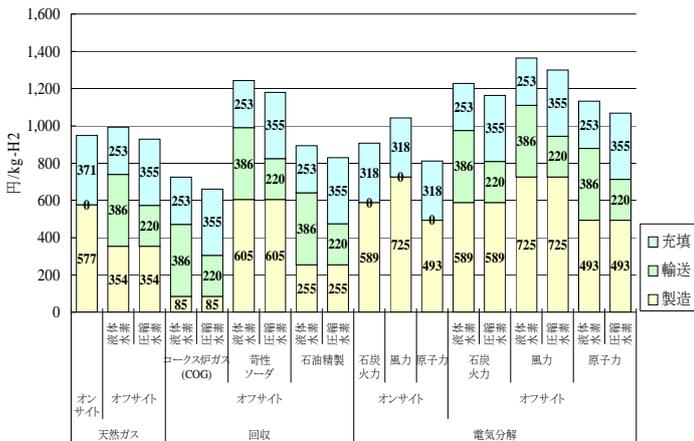


図1 水素供給に係るコスト(Well-to-Tank)

天然ガスを原料とした場合には水素1kgあたり928~948円とやや割高になるが、副生水素を利用した場合には660~893円と安い。また、電気分解を利用した場合には、オンサイトの場合、原子力で811円、風力で1,043円となる。オフサイトの場合、輸送コストが液体水素で1kgあたり386円、圧縮水素で1kgあたり220円と高いため、電気分解では1kgあたり1,068~1,364円とコストが高くなる。

表3 水素供給に係るコスト

一水素の発熱量等価でガソリンに換算した場合一

エネルギー源 製造方式 輸送方法	天然ガス		回収						電気分解									
	オンサイト		オフサイト						オンサイト			オフサイト						
	液体水素	圧縮水素	コークス炉ガス(COG)		苛性ソーダ		石油精製		石炭火力	風力	原子力	石炭火力	風力	原子力				
製造	155	95	95	23	23	182	182	68	68	158	195	133	158	158	195	195	133	133
輸送	-	104	59	104	59	104	59	104	59	-	-	-	104	59	104	59	104	59
充填	100	68	95	68	95	68	95	68	95	85	85	85	68	95	68	95	68	95
揮発油税	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
合計	308	320	303	248	231	388	371	294	277	297	334	272	383	306	420	403	358	341

表3に、ガソリン1Lとの熱量等価のコストを示した。輸入CIF原油54\$/bbl(為替レート100円/\$)の場合、ガソリンの末端価格1Lあたり約126円(揮発税込み)に対し、水素の供給コストは1Lあたり231~420円となり、約1.8~3.3倍のコストとなる。ガソリン車とFCVの燃費(1L当り走行距離)の違いが1.67倍程度であることを想定し、126円×1.67=210円程度がガソリン車と同一走行距離を走る際の水素供給コストの上限となるが、表3にはこの条件を満たすものは存在しない。今後環境税が導入された場合には原子力、風力等のゼロエミッション電源からなる水素製造は相対的なメリットを受けることとなるが、それでもガソリン車を下回るコストとなることは難しいと考えられる。

4. 水素供給のプロセス別CO2排出量(LCA評価)

水素製造(原料製造を含む)・輸送・充填の3つの区分に整理して、供給プロセス別に、水素1kgあたりのCO2排出量を示したのが図2である。

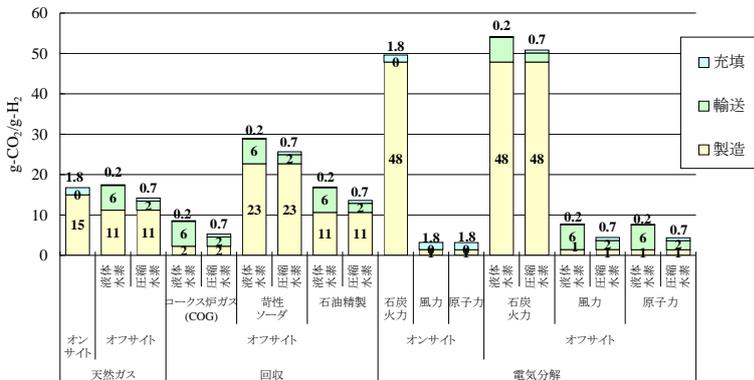


図2 水素供給に係るCO2排出量(Well-to-Tank)

天然ガスの改質による水素製造では水素1kgあたり14.2~17.5kg(142~175g/km)と、CO2排出量が多い。回収水素の場合(主製品と副製品即ち水素のエネルギー量でCO2量を按分して計算)には、コークス炉ガスからの回収では小さく、石油精製・苛性ソーダからの回収では比較的大きくなり、水素1kgあたり5.2~29kg(52~290g/km)となった。また、石炭火力発電による電気分解では水素1kgあたり49.6~54.1kg(496~541g/km)と大きいのに対し、原子力や風力等の場合には、水素1kgあたり3.2~7.7kg(32~77g/km)と小さい。

通常ガソリンのLCA評価では、CO2排出量は精製時に11.3g/MJ、燃焼時に73.5g/MJ、合計84.8g/MJとなる。これは水素1kg当りに換算すると、10kg程度に相当する。即ち、コークス炉ガスの水素を回収する場合と、原子力・風力による電気分解の場合のみがガソリンを下回り、その他はこれを上回る事となる。

走行燃費を勘案して1km当りのCO2排出量とすると、ハイブリッド自動車約101g、ガソリン車約170gに対し、風力による電気分解では32g、副生水素の回収で52gと、FCVの方が有利となる場合がある。天然ガスの場合にはガソリン車と同等程度の168gとなり、CO2削減効果はないことが分かる。

5. 水素社会への移行可能性と今後の課題

(1) 中長期的なコスト低減の見通し

水素製造・供給インフラの規模が拡大するにつれて(1ユニットから100ユニットへと拡大)、設備コストも低減していくと予想される。ここでは仮に設備コストの低減を、欧米等の試算を参考として40%程度と見込むとする(石油・天

然ガス・石炭などのエネルギー価格は一定)。

最もコストの安い副生水素回収(コークス炉ガス)・圧縮水素輸送の場合には、水素の供給コストは 660 円/kg から 489 円/kg まで低減し(ガソリン換算 185 円/L)、概ね目標の 445 円/kg (40 円/Nm³) に近づく。しかし供給上のアベラビリティに制約があるなど、大規模な水素社会での一般的な供給源として副生水素のみに頼ることは難しいと考えられる。

一方で、天然ガスによる水蒸気改質では 948 円/kg から 766 円/kg (ガソリン換算 260 円/L)、風力による電気分解では 1,043 円/kg から 861 円/kg (ガソリン換算 285 円/L) と低減するが、目標値の 445 円/kg とは 2 倍近い差が依然としてあることになる。

これらの上記のガソリン換算価格と現行のガソリンの小売価格との差額分を、水素社会への移行に向けた「追加コスト」として何らかの形で社会全体で負担することが必要となる。これが実現可能となるのは、①資源制約等により原油価格が長期的に上昇した場合、または②地球環境問題により社会的に高額な炭素価格が実質的に課される場合、等が考えられる。逆にこれらの条件がない限り、水素社会の実現は困難なものとなる可能性が高い。

(2) 水素エネルギーの優位性

自動車用燃料として化石燃料(ガソリン・軽油)に代替できるのは、電気または水素である。

電気自動車はインフラの負担が軽く早期の実現性が期待されることから、FCV に先行して導入が進むものと予想される。電気自動車の最大の課題は安価で高性能なバッテリーの開発にある。現状では、1 回の充電で 100km 程度の走行距離にすぎないことから、今後革新的な技術の開発による大幅なバッテリー性能の向上なくしては、市内を中心とした短距離走行用のコンピューターとしての地位にとどまる可能性が高い。

一方で水素の場合は、高圧縮水素を燃焼させる場合には 1,165Wh/kg、高圧縮水素を効率 50% の燃料電池で電力を取り出した場合には 582Wh/kg と、電池の約 10 倍のエネルギー密度を有している。これはガソリン・軽油等の化石燃料のエネルギー密度には遠く及ばないものの、化石燃料の価格高騰や地球環境問題からのコスト優位性が働く場合には、次善の策として水素の価値が重要になる可能性がある。

今後短・中期的には、バッテリーの短所である走行距離の拡大を図るために、ハイブリッド自動車やプラグイン・ハイブリッド自動車の普及拡大が予想される。しかし長期的な視点から低炭素社会を目指す場合には、二酸化炭素の排出量が少なく、かつ長距離走行を可能とするの FCV は重要となる。

(3) 今後の課題

水素社会への移行を実現するには、第一に、長期的な観点から「低炭素社会」の実現を目指し、追加費用を社会全体として負担する必要がある。このために、国民的なコンセンサスを形成した上で、燃料電池・水素貯蔵技術や再生可能エネルギー利用等の技術開発を進展させ、かつインフラの大規模な代替を促すための政府の強力なリーダーシップが必要である。また水素に対する安全性の確保及び法的規制の整備など、ルールと運用の確立も政府が果たすべき重要な役割である。逆に、短期的に過度の実現性を強調することは、技術的ブレークスルーやインフラ整備の面で、かえって水素社会への移行・実現への懐疑を生み出し、遅延させる危険性がある。

また、自動車用の燃料電池に先行して、電気と熱(暖房・給湯)との複合利用による高効率な家庭用燃料電池(都市ガス供給)の普及が拡大すると予想される。そうした場合、個別の家庭にとどまらず、1つの町や大規模なニュータウンにおいて、水素 SS を組み込んだ包括的な水素(エネルギー)供給システムとして制度設計をすることは燃料電池自動車の普及のための重要な機会と考えられる。いずれにしても、自動車燃料としての水素の普及のためには、政府・地方自治体における明確なビジョンづくりと強いリーダーシップとが求められている、と言えるだろう。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構; 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素供給価格シナリオ等に関する研究, (2007)
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構; 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する共通基盤技術開発 水素供給経済社会移行シナリオ等研究, (2007)
- 3) JHFC 総合効率検討特別委員会、日本自動車研究所; JHFC 総合効率検討結果, (2006)
- 4) 総合資源エネルギー調査会; 長期エネルギー需給見通し, (2009)
- 5) International Energy Agency; Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, (2005)
- 6) European Hydrogen Association; Hydrogen and Fuel Cells as Strong Partners of Renewable Energy Systems, (2008)
- 7) National Economic Council (USA); Advanced Energy Initiative, (2006)