

鉄鋼系副生ガスからのFCV（燃料電池車）用 液体水素供給システム

若村 修 ・ 武田 卓

新日本製鐵株式会社 エネルギーエンジニアリング事業部
東京都千代田区大手町二丁目6-3

Hydrogen Supply System for FCV (Fuel Cell Vehicles) from Steel Making Off-gas

Osamu WAKAMURA and Suguru TAKEDA
Energy Facilities Engineering Division, Nippon Steel Corporation
6-3 Otemachi 2-Chome Chiyoda-ku, Tokyo

To supply fuel hydrogen for FCV (fuel cell vehicles) efficiently, cost effectively, and with low carbon dioxide discharge, liquefied hydrogen supply system from steel making off-gas especially COG (Coke Oven Gas) was studied. From the point of view of available supply amount, supply cost, energy efficiency, hydrogen from the steel making process was found to have superiority in comparison with other hydrogen sources and supply systems. As for the storage and transportation of hydrogen from production plant to supply station, compressed hydrogen and liquefied hydrogen was studied. In consequence of that, liquefied hydrogen was found to have superiority.

1. はじめに

地球環境対策を踏まえた炭酸ガスの排出削減、大気保全、エネルギーの需給緩和等への強い要請から、水素をはじめ新たなクリーンエネルギーシステムの確立導入に向け様々な技術開発が進められている。

この中でも燃料電池は、環境負荷（CO₂、SO_x、NO_x等）が少なく、今後のKey Technologyとしての利用が期待されている。又、精力的に自動車用や定置型熱電供給システム用を中心に開発が進められ、この為の水素供給方法についてはガソリン、天然ガス、メタノール等炭化水素の改質をはじめ様々な水素供給システムが検討されており今後の燃料電池の普及を考えると、有効で実現性の高い水素供給システムの早期実用化が急がれる。

ここでは水素供給方式として特に鉄鋼系副生ガスをベースとした水素製造、液体水素を媒体とした輸送、貯蔵、供給システムを取上げ評価、検討を行った。検討にあたっては、国内での供給ポテンシャル、供給コスト、ソースの分布、エネルギー効率の観点からその優位性について評価検討を行った。水素の貯蔵、輸送、供給については代表的なもの

なる圧縮水素方式、液体水素方式を取上げコスト、占有面積、実現性などの観点から評価検討を行った。

2. 副生水素に関する評価、検討

2.1 副生水素ソースの位置付け

水素供給システムの水素ソースに関しては、再生可能エネルギーベースのものも含めてこれまで様々な水素ソースが検討されてきた。WE-NET等では短中期で導入の可能性の高いものとして以下のものが検討されている。

- ① 天然ガス改質
- ② 夜間電力利用水電解水素
- ③ メタノール改質
- ④ 副生水素
- ⑤ 国内バイオマスベース水電解水素

この中で副生水素を取り上げるにあたり他の水素ソースに対しての長所、短所について簡潔に整理する（表-1参照）

表_1 短中期水素源 (副生水素の位置付け)

水 素 源	評価Point				
	規	立	コスト	環境	技
天然ガス改質	○	○	○		○
夜間電力活用水電解水	○	○			△
メタノール改質	○				○
副生水素	○	○	○	○	○
国内バイオマス水電解		○		○	

副生水素の他の水素ソースに対する長所として

- ① 水素製造、精製の為の処理プロセスが相対的に簡素な事(設備建設コストが安価)より水素製造コスト面で有利
- ② 一般的に、水の電気分解等比べて水素の電力原単位が低い事、原料コストが相対的に安価な為、変動コストが低い。
- ③ 天然ガス改質、メタノール改質の様な水素製造段階でのCO₂排出が基本的に無い。

一方、他の水素ソースに対する短所として

- ① 水素供給量が水素を副生するプロセスの規模で制約される為、一般的に供給量に制限がある。
- ② 水素供給拠点が水素副生プロセスの立地に制約される為、水素の輸送、貯蔵の重要性が増す。

以上の事を踏まえると、副生水素ベースでの水素供給システムを検討する場合には、少なくとも水素の供給量や供給拠点(水素副生設備の立地)を踏まえた副生水素ソースの評価選定、水素輸送、貯蔵方法の適切な検討が重要となる。

2.2 鉄鋼系副生水素の概要

水素エネルギーシステムの為の国内の可能性ある副生水素ソースとして国内で可能性のあるものを以下にまとめる。

- ① ソーダ電解(苛性ソーダ、塩素製造)副生水素
- ② 石油化学、石油精製水素プラント(ナフサ分解等)のコンビナート内での余剰水素
- ③ 石炭化学(コークス製造)オフガス(COG)
- ④ 鉄鋼系副生ガス

ここでは鉄鋼系副生ガスに着目し、他の副生水素ソースとの比較も含めて検討した。

鉄鋼系副生ガスの概要については後程、排出量、排出条件、排出位置を簡単に説明するとして、ここでは鉄鋼プロセス(高炉法)から副生し且つ、量的ポテンシャル、組成の面で水素ソースとなりうるものとして、COG(コークス炉ガス)、LDG(転炉ガス)、BFG(高炉ガス)を取上げ、次項以降、その(1)国内供給量ポテンシャル、(2)水素製造コスト(3)副生ガス取り出しからFCV走行までの結合エネルギー効率の観点から、

他の水素ソース、供給システムとの比較も含め検討を進める。

2.3 供給ポテンシャルの評価

2.3.1 回収プロセス(鉄鋼系副生ガス)

図-1に、鉄鋼プロセスの概略フロー図と上記に挙げた、COG、LDG、BFGの排出位置を示す。表-2に、COG、LDG、BFGの代表的な組成、と排出温度、圧力条件(製鐵所内の流通配管からの取り出し、一次精製、顕熱回収済)を示す。ここで取上げる鉄鋼系副生ガス{COG、LDG、BFG}のガス条件にあわせて、水素回収プロセスを以下のようにした。回収プロセスの設定については、燃料電池用水素供給システムとしての商業化を踏まえた場合、スケールアップ、更なる水素回収、製造の高効率化など開発課題はあるものの、現在実績のある技術を基にプロセスの設定を行った。

又副生水素である事を踏まえ、水素回収後の輸送、貯蔵がコスト面、実現性の面で適切に行える様、ここでは回収精製した水素を液体水素まで処理する前提とした。

(1) COG

昇圧/前処理(S分、BTX等除去)/PSA法(吸着材による圧カスイング操作)精製/昇圧/液化精製

(2) BFG

昇圧/前処理(S分等除去)/高温、低温変成/昇圧/低温蒸留(脱窒素)/液化精製

(3) LDG

昇圧/前処理(S分等除去)/高温、低温変成/昇圧/低温蒸留(脱窒素)/液化精製

2.3.2 副生水素ガス排出量

表-3に、国内の鉄鋼系副生ガスの排出実績と前項で設定したプロセスでのバランス計算結果より算定される水素回収ポテンシャル量を整理する。

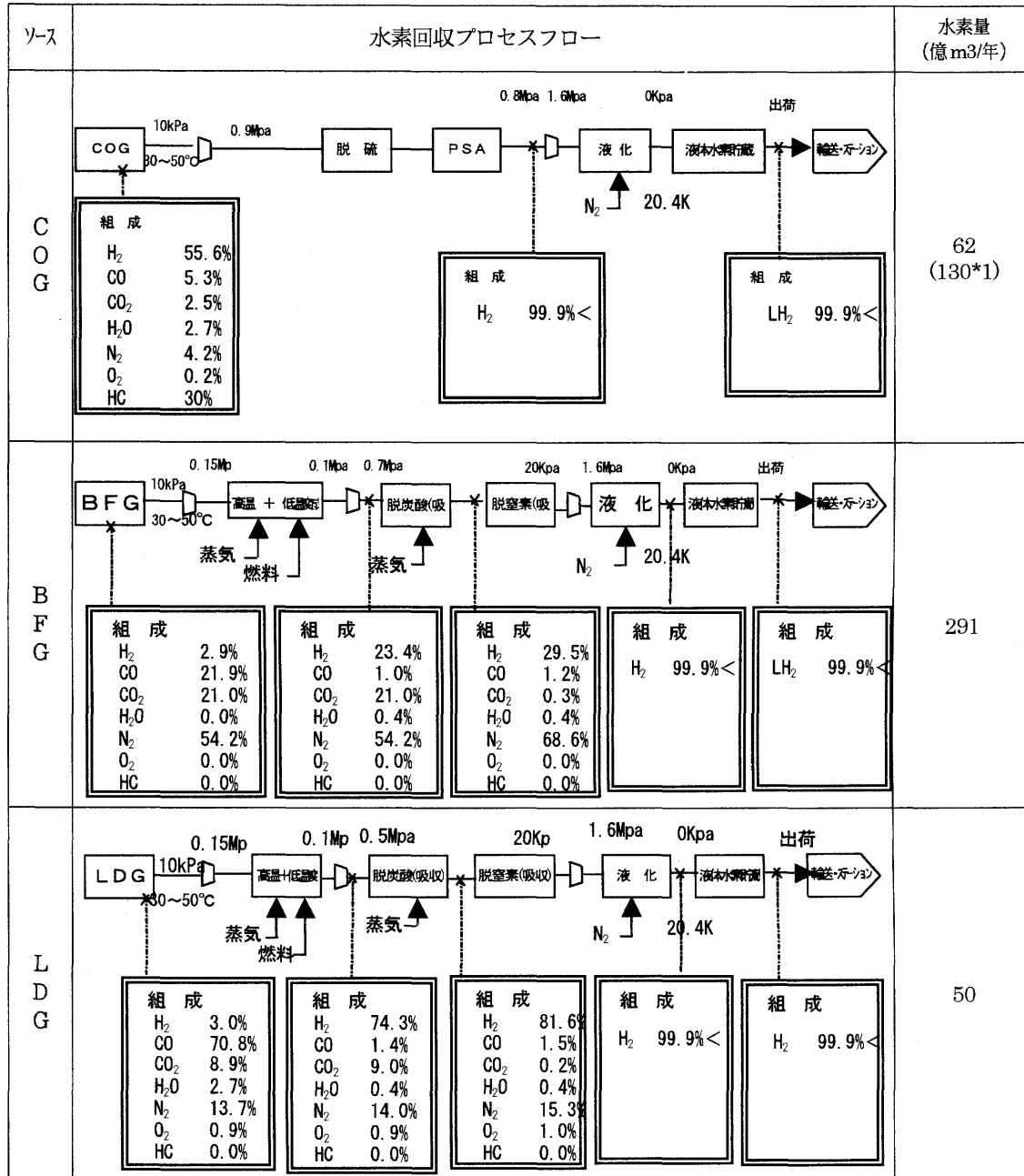
表_3 副生水素供給ポテンシャル

水 素 源	水素量 (億Nm ³ /年)	FCV 換算台数*2 (万台)
1. 鉄鋼系ソース		
(1) コークス炉ガス(COG)	62(130*1)	417(874*1)
(鉄鋼系以外のCOG)	(6)	(40)
(2) 高炉ガス(BFG)	291	1,957
(3) 転炉ガス(LDG)	50	336
2. その他副生水素		
(1) 石油	27	182
(2) ソーダ(電解水素)	12	81

*1 : COG中のCH₄改質を行った場合の供給ポテンシャル

*2 : FCV水素消費量1,487Nm³/台/率前提

表 2 COG,BFG,LDG 原料 水素回収プロセス (組成、圧力条件)



*1: COG 中の CH₄ 改質を行った場合の供給ポテンシャル

現在想定されている FCV 導入スケジュールでの水素需要が 2020 年時点で約 60 億 Nm³/年 (FCV 普及台数: 約 400 万台相当) である事を踏まえると、技術課題は残るが、当面 COG ベースだけでも量的には賅える計算結果となる。副生水素ソースについては、水素の輸送を踏まえ、ソースの広範な分布が重要な要素となるが、排出する製鐵所の国内立地分布についても表 4 に整理する。

表 4 鉄鋼系副生水素ソース供給拠点

地区	事業所名
北海道地区	新日鐵/室蘭
関東地区	新日鐵/君津, (NKK/京浜) 住友金属/鹿島, (川崎製鉄/千葉)
中京地区	新日鐵/名古屋
関西地区	新日鐵/広畑, (住友金属/和歌山) 神戸製鋼/加古川, (神戸製鋼/尼崎)
西日本地区	NKK/福山, (川崎製鉄/千葉)
九州地区	新日鐵/八幡, (新日鐵/大分) 住友金属/小倉
(四国地区)	(三菱化学/坂出)

以上の結果より、鉄鋼系副生水素に対する結論として

- ・ 他の副生水素に比べて供給ポテンシャルが大きい
- ・ FCV 導入スケジュールを踏まえても当面

(10~20年)供給バランス上対応可能 日本国内の製鐵所が全国に広範に分布している事から、後程整理する水素の輸送についても実現性があると考えられる。

2.4 水素供給コストの評価

2.4.1 鉄鋼計副生水素コストの算定

前項の整理結果を踏まえ、着目した鉄鋼系副生水素(COG, BFG, LDG)について(液体)水素製造コストの検討を実施した。検討の前提は以下の通り。

(1) 回収プロセス

水素供給量のところでの検討と同様に、実績のある各プロセス要素技術を基に設定したシステムを前提に検討を実施した。

(2) 水素製造規模

実用化を踏まえた(FCV導入台数とのバランスを踏まえた)、各製鐵所での液体水素供給からの供給を想定、水素精製液化設備のスケールアップ規模等も踏まえて以下の3ケースを設定した。

- ① 10 Ton/日 (4670Nm³-H₂/H
FCバス約1300台への供給を想定)
- ② 5 Ton/日 (11670Nm³-H₂/H
FCバス約1300台への供給を想定)
- ③ 50 Ton/日 (23330Nm³-H₂/H
FCバス約1300台への供給を想定)

2.4.2 水素コスト算定結果

以上の前提を基に、鉄鋼系副生水素(COG, BFG, LDG)ベースでの液体水素コスト算定結果を表-5に整理した。合わせて他の製造方法による水素との製造コストの比較検討結果より、鉄鋼系副生ガス特にCOGベースの水素ガスコストはソーダ電解やナフサ分解と共に、水素コスト面で高い競争力を有すると思われる。又表-5の結果より特にCOGベースにおいては、液体水素コストにおいても、税率の調整等により既存のガソリンの代替としてのコストの妥当性を有するものと考えられる。

表_5 鉄鋼系副生水素の水素コスト(目標値)

設備規模	概略液体水素コスト(円/Nm ³)		
	10 ton/日	25 ton/日	50 ton/日
COG	46~56	36~44	31~39
BFG	83~91	71~78	65~72
LDG	72~79	63~70	58~64

<水素価格試算条件>

- 1) 設備年間稼働時間：8000h (稼働率：91.3%)
- 2) 備焼却期間：10年均等償却
- 3) 固定資産税：1.4%
- 4) 水素販売事業利益：含まない
- 5) 水素価格は水素精製・液化基地出荷時点前提
- 6) 土地貸借費：12千円/m²
- 7) 生産保険：含まない
- 8) 用役単価：新日鐵製鐵所ベース

2.5 総合エネルギー効率での評価

燃料電池を用いた新しいエネルギーシステムの重要な導入目的が、炭酸ガス排出削減、エネルギーの需給緩和である事を考えると、これらのシステムのエネルギー効率を適正に評価検討する事は重要である。

これらを実評価する手法としては、エネルギーシステムでのWell to Wheel(採掘から自動車走行まで)をLCAの概念で評価するものがある。詳細な検討は他の論文に記載されている為、割愛するとして、ここでは本論文で取上げる鉄鋼系副生ガス(COG)からの水素供給システム、現行のガソリン、ディーゼル自動車、改質車載型FCVなど、可能性のある検討実施例を取上げそれらと比較を行った。

2.5.1 エネルギー効率比較検討結果

以下に示す5つの代表的なシステムを検討例として取上げた。

- ①石油 → ガソリン → 現行ガソリン自動車
- ②石油 → 軽油 → 現行ディーゼル自動車
- ③天然ガス → メタノール → 改質車載型FCV
- ④ガス → LNG → 天然ガスオンサイト改質水素ステーション → 水素FCV
- ⑤COG → 水素回収液化 → 水素ステーション → 水素FCV

これらの比較検討結果を表-6にまとめる。

合わせて炭酸ガス削減評価についても表-7に整理する。

2.5.2 検討結果評価について

- ・日本が島国である事を考えると、海外の化石燃料、特に天然ガス(LNG)、メタノールについては日本への1次加工輸送の段階でエネルギーロス、その後段でのシステム効率化を図れたとしても相対的に不利になる事は否めない。
- ・副生水素ベースのものは、後述する水素の輸送貯蔵システムを如何に効率化するかがポイントになるが、水素を精製するまでのエネルギーロスが比較的少ない事より総合的な効率面での競争力を有するものとする。
- ・メタノール、ガソリン等の車上改質は改質でのエネルギー効率が全体の効率に大きな影響を与える。現状はエネルギー効率面で課題を残すが、今後の精力的な技術開発による効率改善の可能性も残されている。

2.6 副生水素評価の総括

ここまで ① 供給ポテンシャル/② 供給コスト/③ エネルギー効率面 での評価を行ってきた。

表_6 エネルギー効率比較

自動車燃料供給システム	採掘～輸送～工場製造	輸送～ステーション (製造～充填)	自動車	総合効率
①石油→ガソリン→現行ガソリン車	採掘→輸送→ガソリン精製	輸送～給油	現行ガソリン車	
エネルギー効率/CO2 排出	90	95	16	13.0
②石油→軽油→現行ディーゼル車	採掘→輸送→軽油精製	輸送～軽油	現行ディーゼル車	
エネルギー効率/CO2 排出	95	95	20	18.1
③天然ガス→メタン→改質FCV	採掘→メタン製造→製造	給油	改質FCV	
エネルギー効率/CO2 排出	63	96	28	16.9
④天然ガス→LNG 水素ステーション→水素FCV	採掘→消費→輸送	液化製造→圧縮充填	水素FCV	
エネルギー効率/CO2 排出	75	59	40	17.7
⑤COG→液水→水素ステーション→水素FCV	副生ガス→水素製造→水素液化	輸送～充填	水素FCV	
エネルギー効率/CO2 排出	67	90	40	24.1

表_7 水素導入によるCO2 排出削減効果

項目	水素基地規模		
	1ton/日	25ton/日	50ton/日
FCバス走行台数(約90Nm3/台/日)	124台	3095台	6192台
水素供給量 億Nm3/年	0.04	1.03	2.05
CO2削減量(A) 万C-ton/年	▲0.19	▲4.85	▲9.70
CO2削減量(B) 万C-ton/年			
COG代替燃料排出CO2量	0.07	1.80	3.59
水素精製・液化動力排出CO2量	0.05	1.15	2.31
小計	0.12	2.95	5.90
CO2削減効果(A)+(B) 万C-ton/年	▲0.07	▲1.90	▲3.80

検討結果から鉄鋼系副生水素が副生水素としてのメリットを提供出来、且つ大きな課題も少ない点で、相対的に優れていると評価出来る。但し、本当に商業的システムとして確立させる為には、副生であるがゆえに輸送、貯蔵を含めた効率的なシステムの確立が重要になる。次節では液体水素を取上げ、その輸送、貯蔵について検討を進める。

3. 水素の貯蔵、輸送方法に関する検討

3.1 検討の考え方

副生水素ベースでの水素エネルギーシステムを検討する場合において、その輸送貯蔵、更にはFCVへの供給方法を適切に評価する事は非常に重要である。貯蔵輸送供給システムとしてどの様なものがふさわしいかを評価する視点としては、以下が考えられる。

- ①商業化される規模において、現実的な対応が出来る事(大規模化への追従性)
- ②輸送貯蔵コストの妥当性
- ③実際の自動車への供給パターンを想定した、水素需要変動への追従性
- ④安全性、法規対応等が重要となる。

又考えられる水素の輸送、貯蔵方法としては

- ①圧縮水素 ③水素パイプライン
- ②液体水素 ④水素吸蔵合金、シクロヘキサン等水素移送媒体 等がある。

③については今後の水素ステーションが都市部を中心に設置されていかねばならない事を考えると、今からその敷設を計画する場合の敷設コストを考えると日本ではコスト的に大きな課題を持つものと考えられる。

④については、現状我々の検討が不十分ではあるが、水素の取り込み、取り出しに関するシステム技術も踏まえてまだこれからの特にコスト面での検討評価を要する事からここでは割愛する。

以上より比較対象を ①圧縮水素、②液体水素 に絞って検討を進める。

3.2 比較検討前提

(1) 検討ケース

- ①圧縮水素 ②液体水素

(2) 供給量前提

- ①10T/D (4660Nm3/H)
- ②25T/D (11650Nm3/H)
- ③50T/D (23300Nm3/H)

(3) 水素ステーション規模

- ①100Nm3/H ②300Nm3/H
- ③1000Nm3/H

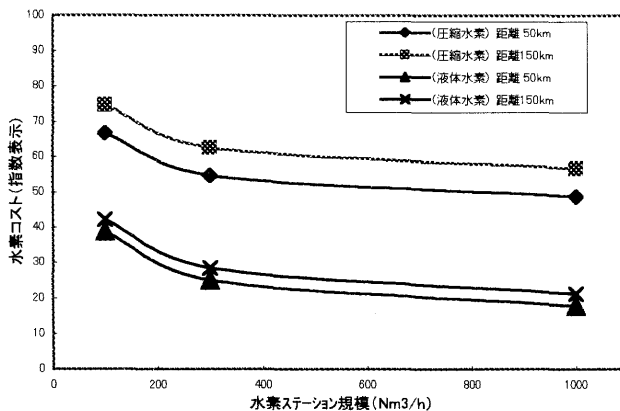
3.3 比較検討結果

前節でおいた前提条件においての水素輸送、貯蔵仕様(必要輸送車両台数、貯蔵必要面積等)を整理し、その比較検討結果を表-8にまとめた。

表_8 液体水素 (LH₂) と圧縮水素 (GH₂) の輸送・貯蔵比較

項目		条件/仕様			
比較前提	1.水素製造量	25ton/day (11,650 Nm ³ /h)		50ton/day (23,180 Nm ³ /h)	
	2.水素貯蔵条件 (1) 水素貯蔵量 (2) 稼働時間	5日分 8,520h/year			
	3.輸送方法 (1) 圧縮水素 (GH ₂) (2) 液体水素 (LH ₂) (3) 往復回数/日	高压水素ローラー {約3,000Nm ³ (0.27ton) /台/回} 液体水素ローラー/コンテナ {約15,000~30,000Nm ³ (1.34~2.68ton/台/回)} 2往復/回前提 (約50km 圏内)			
輸送・貯蔵比較	1.水素輸送	25ton/day		50ton/day	
		GH ₂	LH ₂	GH ₂	LH ₂
	・必要車両台数	47台	5~10台	94台	10~20台
	2.水素ステーション貯蔵	GH ₂	LH ₂	オンサイトNG改質 (参考)	
		ローラー:4~40台 約18~180m ²	LH ₂ タク:1~2基 約4~25m ²	約25~120m ²	
	3.水素ステーション貯蔵	25ton/day		50ton/day	
GH ₂		LH ₂	GH ₂	LH ₂	
ローラー:約460台		LH ₂ タク:約40基	ローラー:約920台	LH ₂ タク:約80基	

図-2 水素輸送・貯蔵コスト比較



水素製造規模	25	ton/day
製造~消費地距離	50,150	Km
水素ステーション規模	100,300,1000	Nm ³ /h (40基地)

ステーション規模 300~1000Nm³/Hでの上記のシステムに加えて天然ガス改質ベースの水素ステーションについても必要面積を比較した。合わせて輸送コスト+貯蔵コスト VS ステーション規模について図-2に整理する。水素ステーションでの負荷追従性、効率性、ハンドリング性の比較も検討したが、現状でのガソリンスタンドの様に液体水素による貯蔵供給が需要変動追従の面、効率面 (FCV への水素始動力) 等の面で優れているとの検討結果を得た。

3.4 検討結果についてのコメント

比較検討結果より、コスト面、占有面積、水素ステーションでの効率面で液化水素方式に優位性があるとの検討結果となった。FCVへの水素供給システムに求められる大事な要件として、FCV導入台数増加への対応があるが、今回の検討結果より、まとまった量の水素を都心の水素ステーションに現実的

(輸送車両台数、ステーション面積等が現実的) に供給するには液化水素による対応がベースになるべきではと考えられる。

さらにFCVへの供給で課題になる負荷追従性 (FCV への水素供給が昼間の限られた時間に集中する可能性があり、夜間などは逆に水素重要が少なくなる) 等の点から占有面積、水素貯蔵に関しての容積効率も重要となる。オンサイト方式においても製造した水素の貯蔵、水素需要のピーク対応がステーション実用化のひとつのポイントとなる。

4. まとめ

ここまで、鉄鋼系副生水素から液体水素を媒体としたFCVへの水素供給システムについての検討結果をまとめた。鉄鋼系副生水素については、FCVへの水素供給におけるポイントとなる、供給量、ポテンシャル、水素コスト、エネルギー効率面で他のソースに対して優位性を持つ事を確認出来た。

一方液体水素による水素輸送貯蔵については、液体水素をいかに効率良く低コストで製造するかの課題を残すものの、逆にFCVの導入台数拡大への量的な対応面、水素ステーションでの優位性から液体水素の選択が適切だと考えられる。このような新しいエネルギーシステムの導入については、システム技術の確立、そのFCVも含めた実証試験により世の中に受け入れられる取組みが必要と考えられる。

自動車業界主導で進められているFCVの開発速度から考えて本システムも含めた燃料供給サイドのシステム実用化についても、今後適切なシステム選定と迅速な実用化が迫られると考える。