

燃料電池自動車用水素の供給価格と技術課題

中村恒明・岩渕宏之・村田謙二・坂田 興

(財) エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

Supply Cost and Technology Issues of Hydrogen for Fuel Cell Vehicles

Tsuneaki NAKAMURA, Hiroyuki IWABUCHI, Kenji MURATA, and Ko SAKATA

Institute of Applied Energy

1-14-2 Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo, 105-0003

Extensive analytical investigation has been conducted to predict supply cost of hydrogen for fuel cell vehicles, thereby identifying technology issues needed to reduce the cost. Sources of hydrogen studied are natural-gas on-site reforming, off-site byproduct hydrogen from oil refineries and on-site electrolysis. A number of transportation methods for off-site hydrogen production are also considered, such as high pressure storage, liquefaction and organic hydride. Cost structures are analyzed by taking into account of both fixed and variable cost along the process of hydrogen supply. Key processes with significant impact on the cost of hydrogen are identified. Technologies needed to reduce the cost are then summarized.

Keywords: Hydrogen, Fuel Cell Vehicle, Supply, Technology

1. 緒言

エネルギーセキュリティーや地球温暖化対策として水素エネルギーに注目が集まっている。水素エネルギー社会の中核は、従来の内燃機関自動車に代わる燃料電池自動車（FCV）と水素供給インフラであり、これを構築するために産官学に渡る長期的・戦略的な取り組みが進められている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は水素エネルギー社会構築に必要な広範囲の技術開発を極めて戦略的に主導してきた。水素安全利用等基盤技術開発事業はその一つである。本稿では（財）エネルギー総合工学研究所が本事業の調査研究として取り組んできた水素供給価格シナリオ分析等に関する研究 [1] の中から、水素の供給価格・技術課題について報告する。

2. 水素供給インフラとその導入目標

図1は水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC）で進められている水素ステーション（水素ST）の一つである。

多様な水素の製造・供給パスの技術実証を行うため、2007年8月末現在、首都圏・中部・関西圏で合計12の水素STが運営中である。



図1. 水素ステーションとFCV

図2に水素の製造・供給パスの代表例を示す。水素STは、オンサイト型、オフサイト型に分類される。オンサイト型は水素STにて水素を化石燃料から改質製造するか、水電解等により製造する。オフサイト型は、集中して大規模に水素を製造しトレーラー等で水素STに水素を輸送し供給する。オフサイト水素源としてはいわゆる副生水素が主流になると言われている。FCVへの水素供給は高圧圧

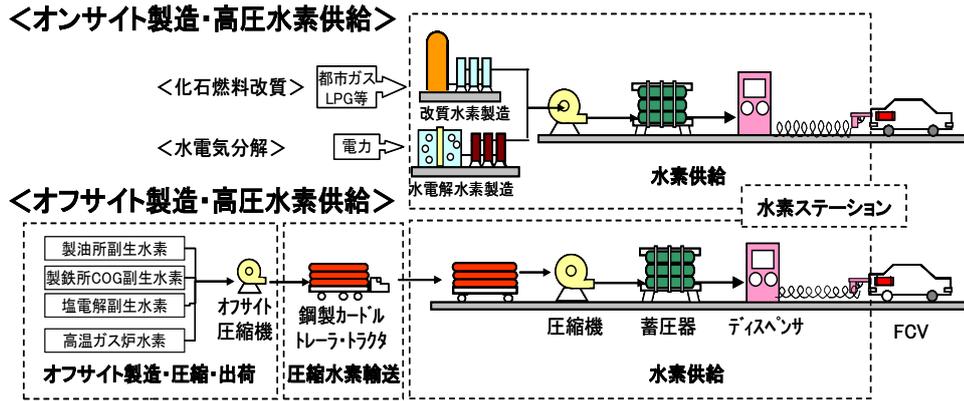


図2. 水素の製造・供給パスの代表例

縮水素によるものが主流である。

図3にFCV、水素STの普及台数・基数、水素供給コストの推移イメージを示す。資源エネルギー庁による、FCV／水素STの導入目標は、2007年8月現在：

- 2010年： 5万台／500箇所
- 2020年： 500万台／3,500箇所
- 2030年：1,500万台／8,500箇所 である。

2007年時点で走行中のFCVが100台弱と言われている実状を勘案すれば、上記の導入目標は極めてチャレンジングである。水素供給コストは、本来は、内燃機関自動車を代替するものとしてライフサイクルコスト評価のもと、水素の競合可能販売価格から決定されるものである。FCVの価格が不明確な現状では、本格普及期においてガソリン

自動車と同等の燃費となるべく、40円/m³台（揮発油税等の道路特定財源分除く）を目標としており、また、当面のターゲットは100円/m³台であると考えられる。

3. 本格普及期の水素供給コストと低減策

3.1. オンサイト型水素ST

図4に水素供給コスト算出例を示す。定格水素製造・供給能力500Nm³/hのガソリンスタンド併設型水素STを仮定した。普通乗用車クラスFCVに10～20台／時程度供給できる。普及期として上記2020年目標値である水素ST：1,500箇所を仮定した。その時点での建設費は、現在の初号機の建設費を基に量産効果によるコストダウンを予測

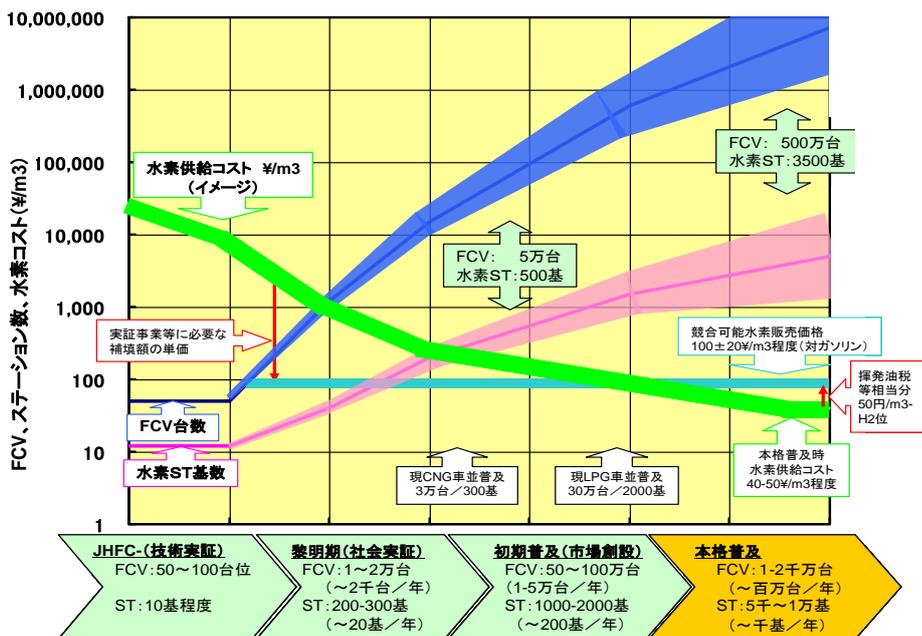


図3. 水素インフラ普及イメージ

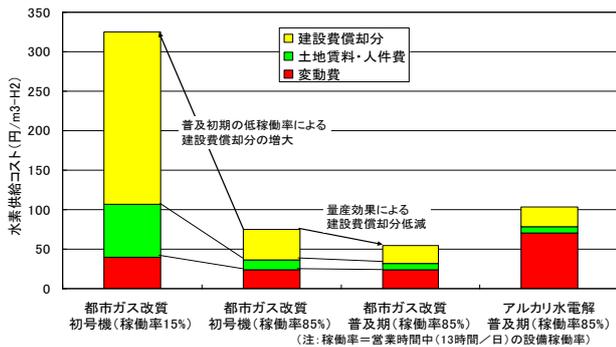


図4. 水素供給コスト (オンサイト水素ST)

して求めた。量産効果によって建設費は約60%に低減し、その分水素コストに占める建設費割合(償却負担)が減る。人件費・土地賃料は規制見直しによる保安要員の減少を考慮したことによる。水素STの稼働率は普及期では85% (13時間/日営業時間中の設備稼働率) としている。

普及期のオンサイト都市ガス改質の水素供給コストは55円/Nm³-H2程度と予測される。アルカリ水電解では変動費のうち水電解用の電力コストが大きく(想定電力単価: 13円/kWh)、水素供給コストを大幅に押し上げる。電力コストを1/3以下にまで低減する必要がある。なお、水素STはFCVの普及に先行して建設されるので、その稼働率は普及初期には低いと予想される。量産化によるコストダウン効果が無く、稼働率が低い場合は、水素供給コストは300円/Nm³-H2 (稼働率: 15%) を超える。

3.2. オフサイト型水素ST

表1にオフサイト型の水素ステーションの水素供給コスト算出例を示す。水素供給コストは、オフサイトの水素製造コストと輸送コストの合計コストで水素を仕入れ、水素STでのコスト(固定費負担+変動費)を上乗せしたコストである。副生水素の製造コストについては公開されている様々な数字を範囲で示す。水素STでの水素供給コストは、3つの副生水素でほぼ同じ、60±5円/m³-H2程度である。水素供給コストに占める固定費(建設費+土地賃料・

人件費)の割合が大きくコストの60%程度を占める。このことは、水素供給コストが設備の稼働率に大きく影響を受けることを示している。政府の水素供給コスト目標である40円/m³-H2台を安定的に目指すには、固定費償却費負担の低減が極めて重要であることが推察される。

3.3. 稼働率の向上による水素供給コストの低減

ここまでのコスト評価では、ガソリンスタンド(SS)の平均的営業時間である13時間/日を前提としてきた。一方、最近ではガソリンスタンドの集約化・大型化・24時間営業化が進行中である。大型SS並の水素STを仮定して水素供給コストを算出したのが表2である。例えば、供給能力500Nm³/hの水素STを、大型化24時間営業化し供給能力1,000Nm³/hの水素STにすると、水素供給コストは、55円/Nm³-H2程度から10円以上減り40円/Nm³-H2台半ばになる。

表2. 水素供給コスト (オフサイト水素ST)

オンサイト都市ガス改質	300m³/h H2ST	500m³/h H2ST	300m³/h H2ST	500m³/h H2ST	
営業時間(h/日)	13	24	13	24	
供給能力(m³/h)	300	600	500	1000	
供給量(m³/日)	3,315	9,435	5,525	15,725	
固定費	建設費	26.3	17.6	23.7	15.9
	土地・人件費	6.9	4.8	7.0	4.9
変動費	24.7	22.9	24.4	22.6	
合計	57.8	45.4	55.1	43.4	

また、水素STの稼働率を上げる方策として、図5に示す様に、水素STから水素駆動型定置式燃料電池に水素を併給するモデルも検討した。この場合も、水素供給コストは、40円/Nm³-H2台半ばになる。水素STの大型24時間営業化、定置用燃料電池への併給モデルいずれも水素STの稼働率を飛躍的に向上させる点では同じ効果がある。水素エネルギー社会の普及期においては、大規模な水素STを中核に、FCVへの水素供給と周囲の住戸に水素を併給する「水素コミュニティ」を構築することも一考に値しよう。

表1. 水素供給コスト (オフサイト水素ST)

円/m³-H2	塩電解副生	製鉄所COG副生	製油所副生水素
工場出荷価格(製造・精製・圧縮コスト)	17	22.2~24.6	14.2~26.2
輸送コスト(20MPa、輸送距離50km)	13.2 (固定費:11.7、変動費:1.5)		
水素STコスト(500Nm³/h、SS併設)	25.4 (固定費:21.2、変動費:4.2)		
水素供給コスト	55.6	60.8~63.2	52.8~64.8

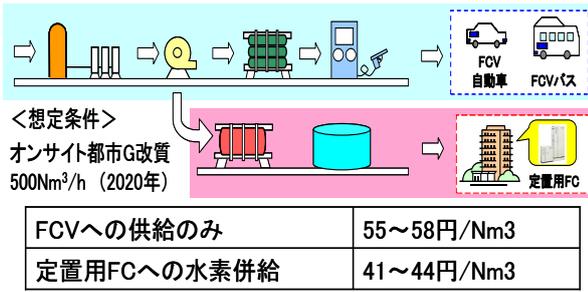


図5. 水素STから定置用燃料電池への水素供給モデル

4. 黎明期の水素STモデル

現在進められているJHFCプロジェクトは技術実証のフェーズであり、次いで社会実証と呼ばれるフェーズが必要であると言われている(図1参照)。社会実証フェーズは本格的な普及の前段として、水素STやFCVが社会に受け入れられるための実証であり、例えば、全国で水素ST: 100~300箇所、FCV: 1~3万台程度の普及が必要と言われている。また、普及初期の水素STは既存のガソリンスタンド(SS)や圧縮天然ガスステーション(CNGST)に併設することが立地面や経済面で好ましいとされている。

そこで、既存のSS、CNGSTについてサンプル調査を行い、水素STを併設することが出来るかどうか調査を行った。水素ST併設には様々な要件があるが、ここでは、最

も制限が厳しいと思われる、敷地面積と建築基準法の用途地域規制を縛りとしSSとCNGSTを類型化した。

図6に結果を示す。建築基準法の用途地域制限とは危険物の貯蔵に関する規制である。現状、準工業地域や工業地域においては標準的な規模(供給能力: 300~500 Nm³/h)の水素STが建設可能であるが、いわゆる商業地や住居地域においては、小型(供給能力: 50~100 Nm³/h)の水素STしか建設ができない。また、いわゆる住居専用地域においては貯蔵が出来ないので水素STの建設は出来ない。既存のSS、CNGSTの敷地面積としては、500m²あれば水素STに転用可能、また、1000m²程度あれば水素STの併設が可能であると言われている。サンプル調査による考察では、首都圏で100箇所(全国で300箇所)程度の水素STは、小型のSTを含めれば、今でも既存のSS・CNGSTに併設建設可能と推測される。一方、本格普及期に必要な数(例えば3500箇所)の標準的水素STを、既存のSS・CNGSTに併設するのは、現状困難と結論できる。

図7, 8にそれぞれSS、CNGSTに水素ST(300Nm³/h)を併設した概念設計図を示す。SS併設の場合はオフサイト型水素STを、CNGST併設の場合は天然ガス改質オンサイト型水素STを併設している。敷地面積は1,100m²程度ある比較的大型のSS、CNGSTである。水素STを併設するには、既存設備の廃止・移設等や追加の敷地が必要となる場合も

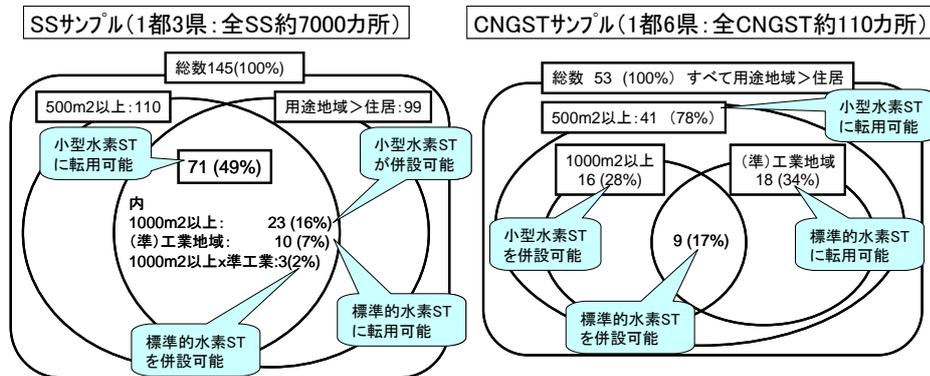


図6. ガソリンスタンド(SS)と天然ガスステーション(CNGST)の類型化



図7. SSに併設した水素ST(オフサイト)の設計例



図8. SSに併設した水素ST(オンサイト)の設計例

あろう。しかし図6に示すように、全国で300程度の水素STであれば、多少無理をすれば既設SS、CNGSTに併設が可能である。一方、本格普及のためには、水素STのさらなるコンパクト化が必要であると判断できる。

社会実証フェーズを5年行くとすると、全国で毎年60箇所程度の水素STを建設することになる。水素ST1箇所ので平均3億円程度の建設費が必要で、年間200億円弱の投資となる。水素供給コストとしては図4に示したように、稼働率が低く割高になると予測され、価格競争力を担保するには建設費相当分について何らかの補助が必要であると予測される。

5. 水素製造・供給に関わる技術課題

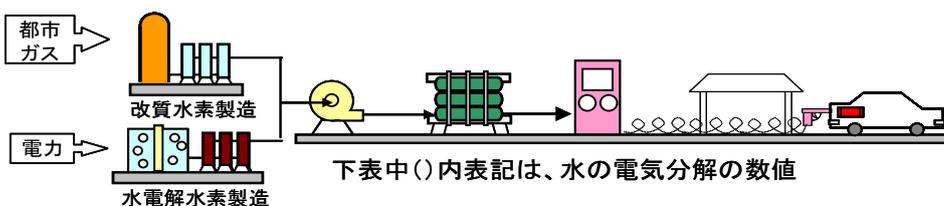
水素供給価格を低減し経済性を高めるために必要とな

る技術開発課題を整理した。代表的な水素製造・供給パスについて、プロセス毎のコスト構造やエネルギー効率を算出した。コスト削減、効率向上に大きなインパクトがあると思われるプロセス、設備・装置項目を抽出し、技術開発の方向性を明確にした。前提とする水素STは：

- 想定年度：2020年（全国に約3,500箇所普及段階）
 - 水素供給能力：500m³N/h
 - 設置形態：単独設置タイプ
 - FCVへの水素供給：高圧圧縮水素（35MPa）
 - 営業時間・日数：13時間/日、365日/年
 - 営業時間中の設備稼働率：85%。
- である。

5. 1. オンサイト水素供給

都市ガス改質と水電解水素製造を取り上げた。図9にコスト構造、効率を示す。水素製造の固定費、変動費（人件



<水素供給コスト>

コスト影響度：1位 2位 3位

円/Nm ³ -H ₂	製造	圧縮機	蓄圧器	デイスペンサ	土木工事	合計
固定費	12.2(10.9)	2.1	0.8	2.1	9.9	27.1(25.7)
変動費	15.8(64.2)	4.6	0.0	0.1	2.1	25.7(71.0)
労務費	1.7	1.7	1.7	1.7	0.0	6.7
合計	76.7	8.3	2.5	3.8	12.0	59.5(103.3)

<エネルギー効率>

都市ガス改質製造	採掘・輸送・供給	オンサイト		
		改質・精製	昇圧・充填	
エネルギー効率	86.4%	74.0%	90.0%	
WtT	100%	86.4%	63.9%	57.5%

図9. オンサイト 高圧水素供給のコスト構造、効率

表3. オンサイト製造供給の技術課題

タイプ		化石燃料改質 高圧水素供給	水電解 高圧水素供給
コスト	抽出因子	製造-変動費 製造-固定費	製造-変動費 製造-固定費
	取り組むべき技術課題	・改質効率の向上 ・改質装置の低コスト化	・電解効率の向上 ・電解装置の低コスト化
効率	抽出因子	製造	発電
	取り組むべき課題	・改質効率の向上	・再生可能エネルギー由来電力の適用

費除く)のウェイトが高い。また、エネルギー効率としては改質操作において大きなロスを生じている。従って技術開発課題としては表3に示すように、改質・電解効率の向上や改質・電解装置の低コスト化が重要課題である。これには、例えば、高効率メンブレン型リフォーマーや高温動作PEM電解システム、高圧水素発生システムの開発が必要となろう。水電解製造については、再生可能エネルギー由来電力を用いるなど、製造する水素に別の観点から付加価値を付けることも必要である。図10にバイオマスや太陽光由来の水素製造技術をまとめて示す。長期的には水素を高効率に直接発生する技術が期待される。

5.2. オフサイト水素供給

オフサイト水素供給の場合には、集中的に製造した水素を水素ステーションにまで輸送する方法がいくつか提案されている。ここでは、高圧水素、液体水素、有機ハイドライドで輸送する方式を取り上げる。水素製造・出荷基地から12tdの水素がFCV向けに出荷され、一律50km離れた20~22カ所の水素STに水素が輸送されるものとした。FCVへの供給は、高圧水素(35MPa)供給とした。

[高圧水素輸送/高圧水素供給]

高圧水素輸送では、トレーラー・トラクターを使用する。汎用鋼鉄製カードルを用い、輸送圧力は20MPaである。

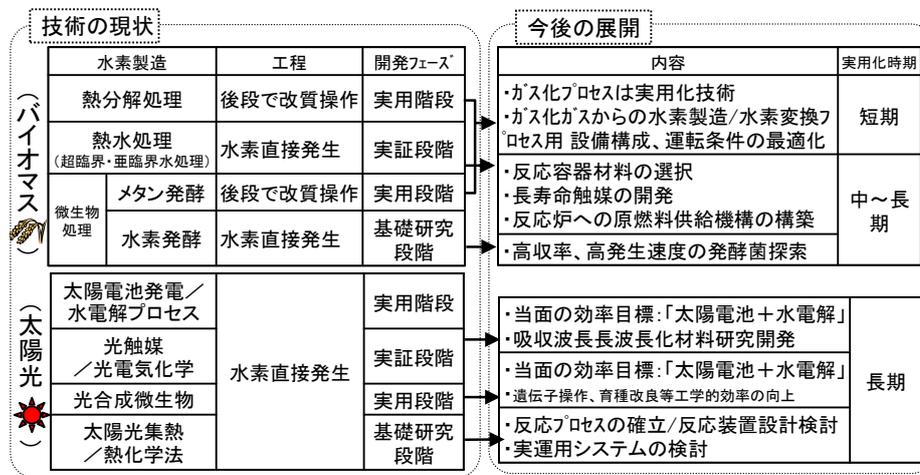
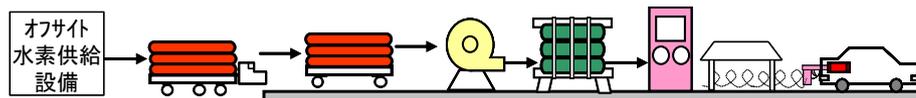


図10. バイオマス・太陽光由来水素製造の技術開発



<水素供給コスト>

コスト影響度: 1位 2位 3位

操作工程	オフサイト			オンサイト						合計
	製造	精製	圧縮出荷	トラクター・トレーラー	トレーラー受入	コンプレッサ	蓄圧器	ディスプレイ	土木工事費その他	
固定費	(5)	0.9	2.0	14.0	0.26	3.5	0.8	2.1	10.3	39.2
変動費	(8)	1.4	3.7	1.5	0	3.4	0	0.1	0	18.1
労務費	(0.2)	0.1	0.3	4.9	1.4	1.4	1.4	1.4	0	11.1
合計	13.2	2.4	6.0	20.8	1.7	8.3	2.2	3.6	10.3	68.4

<エネルギー効率>

操作工程	採掘輸送精製	オフサイト			輸送	オンサイト
		製造	精製	圧縮出荷	運搬	昇圧・充填
エネルギー効率	93.9	72.7%	98.6%	94.1%	97.8%	92.6%
WtT	100%	93.9%	68.3%	67.3%	63.3%	61.9%
輸送	-	-	100%	98.6%	92.7%	90.7%

図11. オフサイト 高圧輸送・高圧水素供給のコスト構成、効率

トレーラーを水素STに留め置きして水素供給する。図11にコスト構造、効率を示す。コスト負担の大きいのは輸送の部分である。圧縮水素のトレーラーによる輸送は極めて輸送効率が悪く、20トントレーラーで一度に250kg程度(20MPa圧縮)しか水素を輸送できない。従って水素単価への固定費負担が大きくなる。

[液体水素輸送/高圧水素供給]

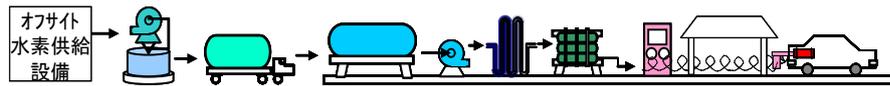
液体水素の輸送には、液体水素ローリーを使用する。水

素STの液体水素タンクに貯蔵し、液体水素ポンプで圧縮した後、気化して高圧水素供給を行うと仮定した。

図12にコスト構造、効率を示す。コスト負担の大きいのは液化の部分である。コスト的には、液化に関わる固定費、変動費の割合が大きい。液化効率は通常75%程度と言われており、効率的にも液化がボトルネックになっている。

[ケミカルハイドライド輸送/高圧水素供給]

トルエン-メチルシクロヘキサン系のケミカルハイドラ



<水素供給コスト>

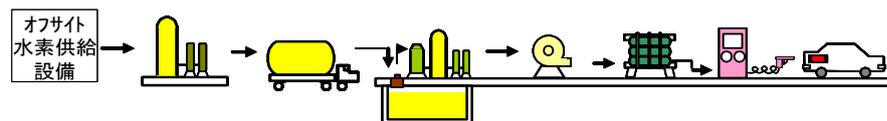
コスト影響度: 1位 2位 3位

操作工程	オフサイト			運搬	オンサイト					合計
	製造	精製	液化出荷	液水ローリー	タンク	液水ポンプ	蓄圧器	デバイス	土木工事費その他	
固定費	(6)	1.0	28.9	3.9	2.1	1.1	0.8	2.1	10.3	55.8
変動費	(9)	1.5	14.0	0.3	0	0.6	0	0.1	0	25.4
労務費	(0.2)	0.1	1.1	2.1	1.4	1.4	1.4	1.4	0	9.1
合計	14.6	2.7	44.0	6.3	3.5	3.1	2.2	3.6	10.3	90.4

<エネルギー効率>

操作工程	採掘輸送精製	オフサイト			輸送	オンサイト	
		製造	精製	圧縮出荷	運搬	昇圧・充填	
エネルギー効率	93.9	72.7%	98.6%	75.0%	89.9%	98.9%	
WtT	100%	93.9%	68.3%	67.3%	50.5%	45.5%	45.0%
輸送	-	-	100%	98.6%	73.9%	66.5%	-

図12. オフサイト 液水輸送・高圧水素供給のコスト構造、効率



<水素供給コスト>

コスト影響度: 1位 2位 3位

操作工程	オフサイト		運輸	オンサイト					合計	
	製造	水素添加反応装置	ケミカルローリー	タンク	脱水素反応精製装置	コンプレッサ	蓄圧器	デバイス		土木工事費その他
固定費	(6)	5.3	0.3	0.3	4.5	3.5	0.8	2.1	10.3	33.0
変動費	(9)	4.1	0.4	0	7.7	3.4	0	0.1	0	25.1
労務費	(0.2)	0.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0	8.0
合計	15.5	9.8	2.1	1.5	13.4	8.1	2	3.4	10.3	66.1

<エネルギー効率>

操作・工程	採掘・輸送精製	オフサイト		輸送	オンサイト		
		製造	水素添加	運搬	脱水素化	昇圧・充填	
エネルギー効率	93.9%	72.7%	97.9%	99.9%	79.1%	92.6%	
WtT	100%	93.9%	68.3%	66.8%	66.8%	52.3%	48.9%
輸送	-	-	100%	97.9%	97.9%	77.4%	-

図13. オフサイト ケミカルハイドライド輸送・高圧水素供給のコスト構造、効率

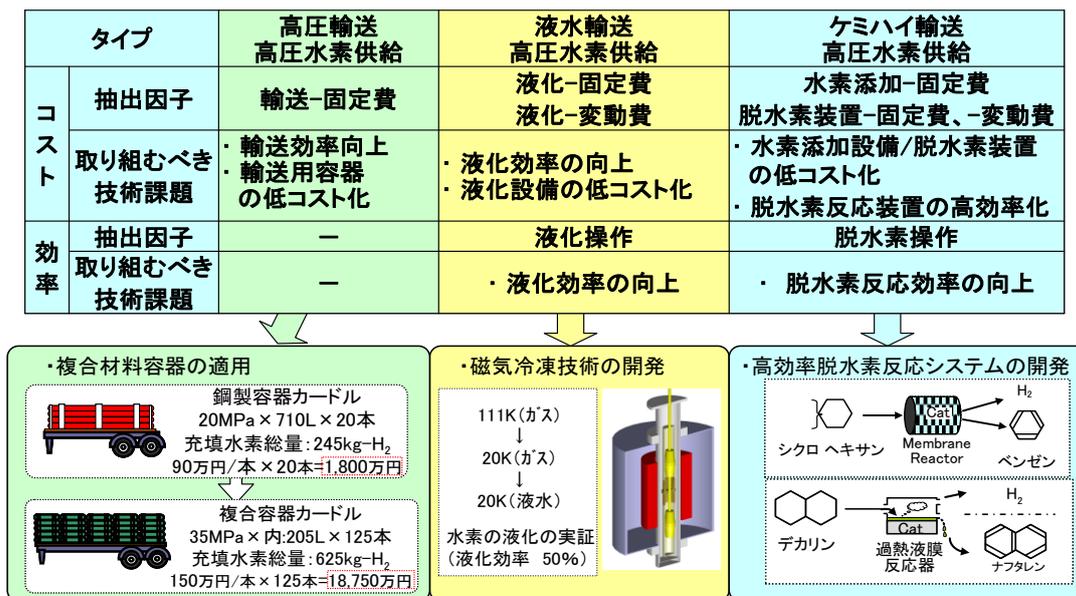


図14. オフサイト製造供給の技術課題

イト輸送を仮定した。トルエンに水素添加したメチルシクロヘキサンを製造し、ケミカルローリーで水素STに輸送する。水素STで、脱水素し発生したトルエンを同じローリーで製造基地に逆輸送する。

図13にコスト構造、効率を示す。水素化、脱水素化それぞれに装置が必要であり、コスト負担の大きいのは水素化の固定費負担部分と脱水素化の変動費負担部分である。特に脱水素化は吸熱反応なので、ここでのエネルギー効率低下、変動費負担がボトルネックである。

図14にオフサイト製造供給の技術課題をまとめて示す。高圧輸送では、複合材料を用いた軽量容器の開発が待たれる。液体水素輸送では、高効率な液化が期待できる磁気冷凍技術の開発が待たれる。また、ケミカルハイドライド輸送では、ケミカルハイドライド媒体の探索、脱水素反応の高効率化技術が必要である。

なお、オンサイト、オフサイト共に土木工事費が水素供給コストに占める割合はかなり大きい。保安等の規制見直し等による敷地面積の縮小等が必要である。

6. まとめ

水素インフラの構築には長期的な取り組みが必要である。JHFCプロジェクトを初めとする先進的な取り組みによって技術的には水素を供給することが実証されてきた。一方、実用レベルで水素を供給するにはコストダウン、効率向上に向けたさらなる取り組みが必要である。これには、

地に足のついた地道な取り組みをしっかりと行いつつも、革新的な技術開発にもチャレンジする必要がある。また水素の安全を始めとする社会的受容性を向上させる取り組みも重要であり、益々多面的かつ戦略的な取り組みが必要とされるよう。なお、水素供給価格の算出には前提条件等の設定が重要であり、その詳細については参考文献[1]を参考にされたい。

7. 謝辞

本検討は、NEDO技術開発機構、燃料電池・水素技術開発部殿の御指導のもとに行ったものである。その高い専門性・先見性・先進性・戦略性に裏打ちされた強靱かつ柔軟な御指導力に深く感謝の意を表したい。また、NEDO技術開発機構の御指導のもと、水素供給価格シナリオを共同で検討した(株)三菱総合研究所にも謝意を表す。最後に、本調査の技術課題検討は、現在、三菱重工業(株)に所属する岩淵宏之氏によるものである。氏の献身的なかつ多大なる努力と貢献には感謝の意を表しても表しきれない。

参考文献

1. NEDO技術開発機構：平成17年度～平成18年度成果報告、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分析等に関する研究