

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

カーボンフリー水素の経済性とCO₂排出量(Vol.1)

平成29年3月

“Economy and CO₂ Emission of Carbon Free Hydrogen (Vol.1)”

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2016-PP-07

概要

再生可能エネルギーの利活用形態の選択肢の一つとして、カーボンフリー水素を取り上げ、製造、貯蔵、輸送を経て最終ユーザーまでの、コスト、CO₂ 排出量、エネルギー効率等について明らかにした。まず、水素製造は、木質バイオマスのガス化による水素製造プロセスを対象とし、2 ケースの用役供給条件（ケース A：従来電力、燃料を購入、ケース B：エネルギー自立）では、コストはほぼ同一の 1.8 円/MJ であったが、CO₂ 排出量は、ケース A の 10.3g/MJ に対し、ケース B では、0.9g/MJ であった。

次に、最終ユーザーは、FCV 車 (70MPa 充填) での燃料利用を想定し、輸送距離を 100km として圧縮ガス、パイプライン、液化等の流通形態について検討し、現状の電力や燃料を用いた場合（ケース A）の物流時のコストと CO₂ 排出量を示した。

さらに、低炭素排出を目指して製品水素（ケース B）を発電燃料に利用することを想定し、有機ハイドライド輸送と圧縮ガス輸送のケースについて、正味の発電に利用される燃料（正味発電燃料）基準のコスト、CO₂ 排出量、エネルギー効率を比較検討した。この輸送条件では、圧縮ガス輸送の方が、有機ハイドライド輸送に比べ、コスト、CO₂ 排出量、およびエネルギー効率の各項目で優位であることが分かった。

Summary

Recently, hydrogen is regarded as a possible candidate for renewable energy fuel. The cost, CO₂ emission, and energy efficiency of hydrogen use have been analyzed from manufacture to end user considering the relevant supply chain containing the stages of compression, storage and dispensation.

At first, we examined the hydrogen manufacturing process by gasification of woody biomass under two different energy supply conditions (case A: electricity and fuel are supplied from OSBL, case B: no electricity and fuel supplied from OSBL). Whereas the cost was almost 1.8 yen / MJ in both cases, the CO₂ emission rate was 0.9 g / MJ for case B as compared to 10.3 g / MJ for case A.

Next, selecting the fuel cell vehicle (with 70 MPa filling condition) as the end user, we investigated the cost, emission and efficiency of different schemes for transportation over a distance of 100 km such as using compressed gas with truck delivery, gas pipeline and liquefaction with truck delivery and compared that with the cost of logistics and CO₂ emissions when using conventional electric power and fuel.

Finally, by considering the hydrogen fueled power plant as the end user in a future low carbon society, we investigated the cost, emission and energy efficiency for using hydrogen for power generation in processes using hydrogenation with organic hydride where dehydrogenation is coupled with tank lorry delivery or compressed gas is delivered by truck. It was found that compressed gas transport is superior in cost, emission and efficiency in comparison with the organic hydride transport system under this condition.

目次

概要

1.はじめに	1
2.バイオマスガス化による水素製造プロセス	2
2.1 プロセス設計基準	2
2.2 物質収支・熱収支による原単位算出	3
2.3 機器費、重量の算出	4
2.4 水素製造コストと CO ₂ 排出量の算出	4
2.5 プラントスケールの影響	6
2.6 まとめ	6
3.FCV 向け低炭素排出水素の物流コストと CO ₂ 排出量	7
3.1 水素物流システム検討範囲	7
3.2 検討前提条件	7
3.3 結果と分析	9
3.4 まとめ	11
4.低炭素排出水素の製造から発電所までのコストと CO ₂ 排出量	12
4.1 検討範囲	12
4.2 検討前提条件	12
4.3 プロセス設計条件	13
4.4 結果と分析	14
4.5 まとめ	16
5.政策立案のための提案	16
参考文献	16

1. はじめに

再生可能エネルギーの利活用形態の選択肢の一つとして、カーボンフリー水素¹⁾を取り上げ、製造、貯蔵、輸送を経て最終ユーザーまでの、コスト、CO₂ 排出量、エネルギー効率等について明らかにすることを目的として、製造、輸送さらに最終ユーザーの組み合わせを下表（表 1-1）に定義した。水素製造は、木質バイオマスのガス化による水素製造プロセスを対象とし、2 ケースの用役供給条件（ケース A：従来電力、燃料を購入、ケース B：エネルギー自立、詳細は表 2-2～2-4 参照）とした。本稿では、第 2 節で、ケース A 及びケース B の、水素製造コスト、CO₂ 排出量、及びエネルギー効率について検討した。第 3 節で、FCV²⁾向け従来電源、燃料利用の場合（ケース A）の結果を示した。第 4 節では、発電所向けのエネルギー自立型（ケース B）の輸送を検討し、発電所での燃料コスト、排出量等の結果を示した。

表中の黄色マーク部分が今回検討したケースである³⁾。

表 1-1 水素製造、輸送ならびに最終ユーザーの組合せ表

工程	最終ユーザー	輸送方法	従来電源、燃料利用*1	エネルギー自立型*2
水素製造			A	B
輸送	FCV向け	a	CSD*3 1	a-1
			PL*4 2	a-2
			LH*5 3	a-3
			MCH*6 4	a-4
	発電所向け	b	CSD 1	b-1
			PL 2	b-2
			LH 3	b-3
			MCH 4	b-4
FCV用燃料コスト、排出量	FCV向け	a	CSD 1	A-a-1
			PL 2	A-a-2
			LH 3	A-a-3
			MCH 4	A-a-4
発電所用燃料コスト、排出量	発電所向け	b	CSD 1	A-b-1
			PL 2	A-b-2
			LH 3	A-b-3
			MCH 4	A-b-4

- *1 化石燃料と発電利用
- *2 製品水素を発電燃料利用
- *3 圧縮ガストラック輸送
- *4 ガスパイプライン輸送
- *5 液化水素輸送
- *6 有機ハイドライド輸送

*水素製造 A 及び B は、それぞれ「表 2-2 エネルギー供給条件」で定義する A 及び B に対応。

1) 低炭素排出水素の意味も含めて表記した。

2) FCV, 燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle)。

3) 黄色マーク以外の部分は、今後検討予定。

2. バイオマスガス化による水素製造プロセス

木質バイオマスガス化水素製造について、流動床熱媒体循環法プロセス[1]の反応成績等を参考にして、プロセス設計を行った。

2.1 プロセス設計基準

(1) 原料組成（乾燥基準の元素組成）

表2-1に原料バイオマスの元素組成を示す。

表2-1 原料元素組成⁴⁾

成分	C	H	N	S	O	灰分
重量% (乾燥ベース)	50.9	6.0	0.2	0.1	41.9	0.9

発熱量 (MJ/kg): 20.2 HHV 18.8 LHV

(2) 原料供給条件（基準）

木質バイオマス供給量（乾燥基準）: 2,000 トン/日

(3) 年間操業率 90%

(4) ガス化方式 流動床熱媒体循環法

(5) プロセスの構成

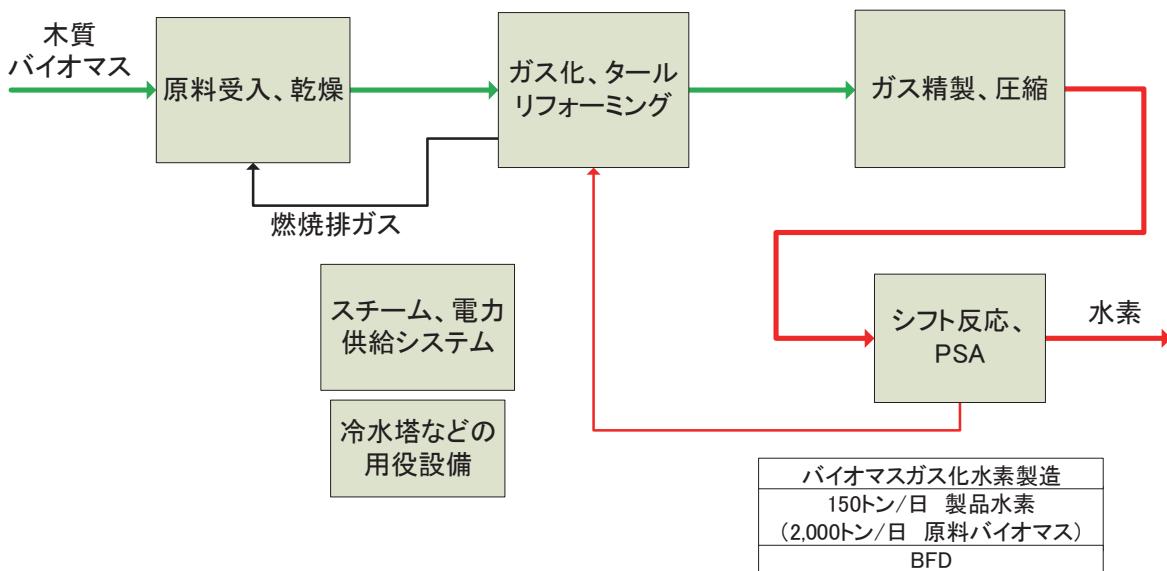


図2-1 バイオマスガス化水素製造プロセス BFD⁵⁾

(6) プロセスの記述

① 原料受入、乾燥

50%水分含有の木質チップを受け入れ、タールリフォーマー排ガスを利用して水分12%まで乾燥させる。

⁴⁾ HHV, 高位発熱量基準 (Higher Heating Value)。 LHV, 低位発熱量基準 (Lower Heating Value)。

⁵⁾ BFD, ブロックフロー図 (Block Flow Diagram)。

② ガス化、タールリフティング

木質チップは、操作温度、圧力がそれぞれ 870°C、0.16MPa の熱媒体流動床にスチームとともに導入されガス化される。チャーや熱媒体を分離した後、タールリフターに送られ、さらに水素リッチな合成ガスになる。

③ ガス精製、圧縮

ガス中の S 分を除去し、合成ガスを圧縮する。

④ シフト反応、PSA⁶⁾

シフト反応器で水素を生成、PSA 装置を通して、純度 99.9%、扱出し圧力 2.5MPa の製品水素を送り出す。

(7) その他の条件

① エネルギー供給条件について、表 2-2 に示す 2 ケースについて検討した。

表 2-2 エネルギー供給条件

	電力	燃料
A	購入	購入
B	自立	自立

② 水素燃料での発電効率を LHV ベースで 53%とした。

2.2 物質収支・熱収支による原単位算出

2.1 で示された条件に従い、物質・熱収支を計算し、原料、用役、触媒・ケミカル等の原単位を表 2-3 にまとめた。

表 2-3 原料・用役原単位

		ケースA	ケースB
製品水素	kg-H ₂ /h	6,950	5,940
原料原単位	kg/バイオマス/kg-H ₂	12.0	14.0
電力	kWh/kg-H ₂	0.9	0.0
工水	m ³ /kg-H ₂	0.015	0.018
燃料(NG)	MJ/kg-H ₂	11.8	0.0
触媒・ケミカル	kg/kg-H ₂	0.030	0.034

6) PSA, 圧力変動吸着法 (Pressure Swing Adsorption)。

2.3 機器費、重量の算出

操作条件と物質・熱収支をもとに機器の仕様を決定し、機器リストを作成した。機器リストの内容は、機器名、基数、操作温度、圧力、材質、寸法であり、製造機器・重量データベースを用いて、各機器のコストと重量を算出した。工程別の機器費と機器重量を表2-4に示す。なお、ケースBでは、自己水素を燃料とする発電機器が追加されている。

表2-4 工程別機器費と機器重量

工程	ケースA		ケースB	
	機器費 百万円	機器重量 トン	機器費 百万円	機器重量 トン
原料受入、乾燥	1,480	1,330	1,480	1,330
ガス化、タールリフォーミング	3,170	8,410	3,170	8,410
ガス精製、圧縮	1,650	1,070	1,650	1,070
シフト反応、PSA	1,070	480	1,070	480
スチーム、電力供給システム	1,030	770	1,560	850
冷水塔などの用役設備	450	200	450	200
機器費合計	8,850	12,260	9,380	12,340
総建設費	17,700		18,760	

2.4 水素製造コストとCO₂排出量の算出

ケースA,Bにつき、製造コスト、CO₂排出量を求め、表2-5に示した。なお、原料バイオマス価格を、現状（10円/kg）と将来（3円/kg）の両ケースについて算出した。

（1）経済性分析

製造コストの計算は以下の方法でまとめた。（詳細は参考文献[2]参照）

変動費：原材料・用役原単位から年経費を算出した。

固定費：設備費に関しては、機器の積上げコストから、総建設費を求め、年経費率0.15として年経費を算出した。また、労務費に関しては、運転員数と年間労務費単価から年経費を算出した。

（2）環境負荷分析

CO₂排出量の計算を以下の方法でまとめた。

原料・用役起源：原材料、用役の消費原単位と対応するCO₂排出量原単位から、それぞれの年間排出量を求める。

設備起源：機器の材質別積上げ重量を基礎値として、配管、電気、計装、鉄骨、コンクリートの重量を算出し、各材料のCO₂排出原単位から求めた総排出量と年経費率に応じた耐用年数（年経費率0.15の場合は10年）から、年間排出量を求める。

建屋起源：機器重量を基礎値として、鉄骨、コンクリートの重量を算出し、各材料のCO₂排出原単位から求めた総排出量と年経費率に応じた耐用年数（30年）から、年間排出量を求める。

表 2-5 製造コストと CO₂ 排出量

バイオマスガス化					
	現状 (原料バイオマス:10円/kg)		将来 (原料バイオマス:3円/kg)		
	ケースA	ケースB	ケースA	ケースB	
水素生産量	トン/日	167	143	167	143
	トン/年	54,860	46,980	54,860	46,980
	TJ/年	6,630	5,671	6,630	5,671
年間操業率	-	0.90	0.90	0.90	0.90
総建設費	百万円	17,700	18,770	17,700	18,770
年経費率	-	0.15	0.15	0.15	0.15
総運転人員数	人	48	48	48	48
年間労務費単価	百万円	7	7	7	7
エネルギー効率	-	0.50	0.46	0.50	0.46
原料単価	円/kg	10	10	3	3
電力単価	円/kWh	12	12	12	12
工業用水単価	円/m ³	50	50	50	50
燃料単価	円/MJ	1.5	1.5	1.5	1.5
触媒単価	円/kg	500	500	500	500
製造コスト					
変動費計	円/MJ	1.35	1.31	0.66	0.50
固定費設備	円/MJ	0.40	0.50	0.40	0.50
固定費労務	円/MJ	0.05	0.06	0.05	0.06
固定費計	円/MJ	0.45	0.56	0.45	0.56
合計	円/MJ	1.8	1.9	1.1	1.1
CO₂排出量					
原料・用役起源	g/MJ	9.6	0.0	9.6	0.0
設備起源	g/MJ	0.7	0.9	0.7	0.9
合計	g/MJ	10.3	0.9	10.3	0.9

2.5 プラントスケールの影響

プラントを構成する工程別の系列数をもとに、原料供給量を変えた場合の水素製造コストと CO₂ 排出量をケース B について求め、下記の表 2-6 に示した。

表 2-6 プラントスケールの影響

バイオマスガス化					
バイオマス 原料供給量	トン/日	2,000	1,000	500	100
水素生産量	トン/日	143	71	36	7
	トン/年	46,870	23,430	11,720	2,340
	TJ/年	5,670	2,840	1,420	280
年間操業率	-	0.90	0.90	0.90	0.90
総建設費	百万円	18,760	11,600	7,520	2,640
年経費率	-	0.15	0.15	0.15	0.15
製造コスト					
変動費計	円/MJ	1.3	1.3	1.3	1.3
固定費設備	円/MJ	0.5	0.6	0.8	1.4
固定費労務	円/MJ	0.1	0.1	0.2	0.6
固定費計	円/MJ	0.6	0.7	1.0	2.0
合計	円/MJ	1.9	2.0	2.3	3.3
CO ₂ 排出量					
原料・用役起源	g-CO ₂ /MJ	0.0	0.0	0.0	0.0
設備起源	g-CO ₂ /MJ	0.9	1.0	1.4	2.4
合計	g-CO ₂ /MJ	0.9	1.0	1.4	2.4

2.6 まとめ

- (1) 製造コストは、原料価格 10 円/kg の場合、1.8~1.9 円/MJ、3 円/kg の場合、1.1 円/MJ であり、原料価格の影響が大きいことが分かる。また、ケース A,B について、大きな差異は見られなかった。
- (2) CO₂ 排出量は、原料・用役起源では、ケース A,B で、それぞれ、9.6、0.0 g/MJ、設備起源では、それぞれ 0.7、0.9 g/MJ、合計 10.3、0.9 g/MJ となった。
- (3) プラントスケールの影響は、原料供給量 100 トン/日の場合、製造コストは、3.3 円/MJ となり、2,000 トン/日の場合に比べ、約 1.7 倍になった。
- (4) エネルギー効率は、ケース A,B でそれぞれ 0.50、0.46 となった。

3. FCV 向け低炭素排出水素の物流コストと CO₂ 排出量

バイオマスガス化による水素の最終利用形態を FCV とした場合の、物流過程でのコストと CO₂ 排出量およびエネルギーロスを、いくつかの輸送形態について検討した。バイオマス水素製造プラントは、ケース A とした。

3.1 水素物流システム検討範囲

バイオマスガス化水素製造プラントからの製品水素を、貯蔵、輸送、最終利用（充填）するまでの過程を、以下の 3 ケースについて検討した。

- ケース a-1 : 水素ガス圧縮輸送
- ケース a-2 : 水素ガスピープライン輸送
- ケース a-3 : 液体水素輸送

3.2 検討前提条件

物流システムの共通条件を表 3-1 に、最終利用の水素ステーションの条件を表 3-2、図 3-1 に示す。FCV 車の要求仕様である 70MPa 充填に対応するために、輸送された水素は 82MPa まで加圧され、貯蔵される。FCV 車への充填時は、プレクーラーでマイナス 40°C まで冷却した後、ディスペンサーで充填される。液体水素の場合は、気化器を経て加圧・貯蔵される。

表 3-1 物流システムの共通条件

物流システム年間稼働日数	日	365
物流量	kg/日	155,000
平均輸送距離	km	100
ステーション販売量	kg/日	1,800

表 3-2 最終利用の水素ステーションの条件

FCV車燃料充填圧力	MPa	70
FCV車燃料充填台数	台/日	360
燃料充填量	kg/回	5
充填時間	分/回	3
滞留時間	分/回	5
営業時間	時間	24

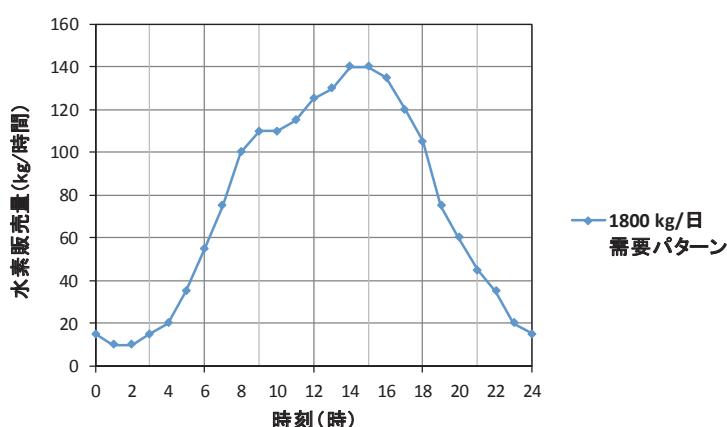


図 3-1 24 時間需要パターン

(1) ケース a-1 : 水素ガス圧縮輸送

表 3-3 に計算前提条件を示す。2MPa, 25°Cで導入された水素製造プラントからの水素は、圧縮され、鋼製のタンクに 17.3MPa の操作圧で貯蔵される。貯蔵基地から水素ステーションまでの輸送は、チューブトレイラーを用いる。

表 3-3 計算前提条件（水素ガス圧縮輸送）

圧縮工程	吸入圧	MPa	2
	吐出圧	MPa	24
貯蔵工程	貯蔵圧	MPa	17.3
	貯蔵量	日	0.5
輸送工程	貯蔵タンク容量	kg-H2/基	92
	輸送圧力	MPa	17.3
	輸送容器容量	kg-H2/基	340

(2) ケース a-2 : 水素ガスピープライン輸送

表 3-4 に計算前提条件を示す。

水素製造プラントからの水素は、球形ホルダーにて 1MPa の操作圧で貯蔵される。パイプライン送入圧縮機で幹線に送入(7MPa)された水素は、支線、引込み線を経て、水素ステーションに輸送される。

表 3-4 計算前提条件（水素ガスピープライン輸送）

貯蔵工程	貯蔵圧	MPa	1
	貯蔵量	日	0.5
圧縮工程	送入圧	MPa	7
	出口圧	MPa	5
パイプライン工程	送入圧	MPa	幹線 支線 引込線 7 4 3
	出口圧	MPa	幹線 支線 引込線 5 3 2
	配管距離	km/ ルート	幹線 支線 引込線 100 110 2.4
	ルート数	-	幹線 支線 引込線 1 2 87

(3) ケース a-3 : 液体水素輸送

表 3-5 に計算前提条件を示す。

表 3-5 計算前提条件（液体水素トラック輸送）

液化工程	プラント基數	-	1
	年間稼働率	-	0.9
貯蔵工程	貯蔵量	日	3
輸送工程	トラック積載能力	kg-H2/台	2,530

3.3 結果と分析

表 3-6～3-8 に結果を示す。

(1) ケース a-1 : 水素ガス圧縮輸送

表 3-6 結果 (水素ガス圧縮輸送)

	圧縮	貯蔵	輸送	ステーション	合計
物流コスト	円/MJ				
変動費	0.1	0.0	0.3	0.2	0.6
固定費設備	0.1	0.4	0.5	1.0	2.0
固定費労務	0.0	0.0	0.5	0.9	1.4
合計	0.2	0.4	1.3	2.0	4.0
CO ₂ 排出量	g/MJ				
原料・用役起源	5.9	0.0	7.0	9.6	22.5
設備起源	0.0	0.8	0.1	1.1	1.9
合計	5.9	0.8	7.1	10.6	24.4
エネルギー一ロス	%				
用役・燃料起源	4	0	9	6	19
設備製作時起源	0	1	0	1	2
合計	4	1	10	7	20

(2) ケース a-2 : 水素ガスパイプライン輸送

表 3-7 結果 (水素ガスパイプライン輸送)

	貯蔵	パイプライン 送入圧縮	パイプライン	ステーション	合計
物流コスト	円/MJ				
変動費	0.0	0.1	0.0	0.3	0.4
固定費設備	0.3	0.0	1.9	1.1	3.3
固定費労務	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9
合計	0.3	0.1	1.9	2.4	4.7
CO ₂ 排出量	g/MJ				
原料・用役起源	0.0	4.8	0.0	15.3	20.1
設備起源	0.8	0.0	0.6	1.7	3.1
合計	0.8	4.9	0.6	17.0	23.2
エネルギー一ロス	%				
用役・燃料起源	0	3	0	9	12
設備製作時起源	1	0	1	1	3
合計	1	3	1	11	15

(3) ケース a-3 : 液体水素トラック輸送

表 3-8 結果（液体水素トラック輸送）

	液化	貯蔵	輸送	ステーション	合計
物流コスト	円/MJ				
変動費	0.7	0.0	0.1	0.3	1.1
固定費設備	0.7	0.1	0.1	2.3	3.1
固定費労務	0.0	0.0	0.1	0.9	1.0
合計	1.4	0.1	0.3	3.5	5.3

CO ₂ 排出量	g/MJ				
原料・用役起源	34.7	0.0	2.3	15.1	52.1
設備起源	0.3	0.1	0.0	1.3	1.7
合計	35.1	0.1	2.3	16.4	53.8

エネルギーロス	%				
用役・燃料起源	21	0	3	9	33
設備製作時起源	0	0	0	1	2
合計	21	0	3	10	34

(4) 分析

① 経済性分析

図3-2に、各ケースのコスト比較を示す。

輸送距離100kmの場合、ガス圧縮輸送で4.0円/MJ、パイプライン輸送で4.7円/MJ、液体水素輸送で5.3円/MJとなった。

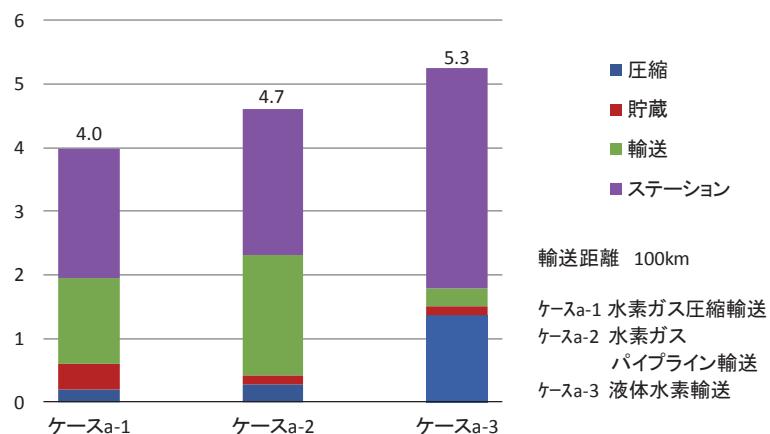


図3-2 水素物流コスト比較 (円/MJ)

② 環境負荷分析

図3-3に、各ケースでのCO₂排出量の比較を示す。

ガス圧縮輸送で24g/MJ、パイプライン輸送で23g/MJ、液体水素輸送で54g/MJとなった。

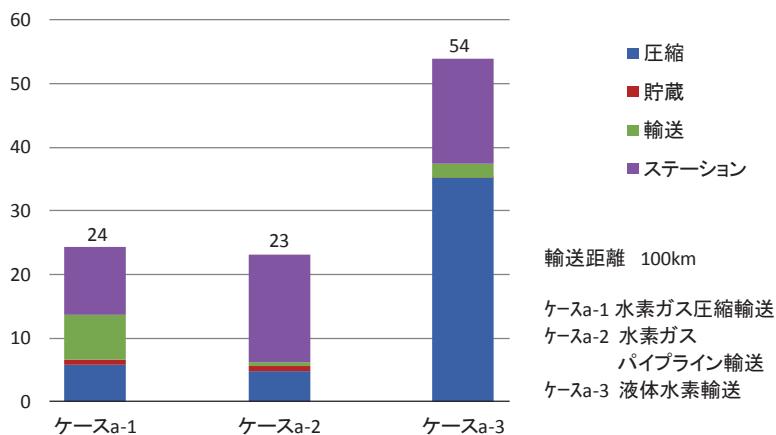


図3-3 水素物流CO₂排出量比較 (g/MJ)

③ エネルギーロス分析

図3-4に、各ケースのエネルギーロスの比較を示す。ガス圧縮輸送で20%、パイプライン輸送で15%、液体水素輸送で34%となった。

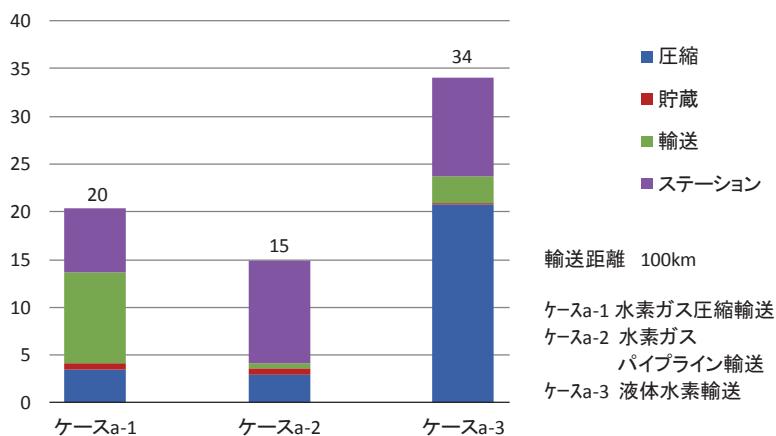


図3-4 水素物流エネルギーロス比較(%)

3.4まとめ

水素物流過程での経済性、環境負荷性、エネルギー効率の視点から、複数の輸送形態ケースにつき検討した。

- (1) 経済性については、物流コストのみで4.0～5.3円/MJとなり、現在のガソリン価格の1.5～2円/MJと比較すると2倍以上であることが分かった。また、コスト構成のうち、変動費、固定費（設備）の占める割合は、ケースa-1では16%、49%、ケースa-2では、9%、72%、ケースa-3では、21%、60%であった。
- (2) 環境負荷性(CO₂排出量)については、23～54g/MJであった。ガソリンの排出量70g/MJと比較して無視できない数値である。また、用役起源と設備起源を別々に求めたが、設備起

源の寄与は、ケース a-1、ケース a-2 およびケース a-3 で、それぞれ 8%、13%、および 3% であった。

- (3) エネルギーロスについては、液化工程の影響が大きいことが分かる。また、用役起源と設備起源を別々に求めたが、設備起源の寄与は、ケース a-1、ケース a-2 およびケース a-3 で、それぞれ 8%、18%、および 5% であった。
- (4) いずれのケースでも、経済性、環境負荷性、エネルギー効率について、水素ステーション (70MPa 充填) の影響が大きいことが分かった。

4. 低炭素排出水素の製造から発電所までのコストと CO₂ 排出量

2050 年での電源構成を考える上で、周波数制御のための回転機器による発電が一定の割合で必須とされており、その発電用燃料として水素を取り上げた。

ここでは、最終ユーザーを発電所向けとし、低炭素排出水素の製造と低炭素排出物流を組み合わせた系を対象に、発電用燃料のコストと CO₂ 排出量を求めた。

4.1 検討範囲

バイオマスガス化水素製造プラントからの製品水素を、貯蔵、輸送、最終利用（発電）するまでの過程を、以下の 2 ケースについて検討した。

ケース b-1：水素ガス圧縮輸送

ケース b-4：有機ハイドライド法によるタンクローリー輸送

4.2 検討前提条件

- (1) 電力、燃料は製品水素を用い、また輸送も EV⁷⁾ を用いるものとする。
発電効率 : 53 % (LHV ベース)、電力単価 : 6 円/kWh (設備相当分)
電力 CO₂ 排出量 : 1.3gCO₂/kWh (設備相当分)
EV/軽油車燃費変換係数 : 0.15 ℓ/kWh
- (2) バイオマス水素製造プラント
2.5 で示したケース B を用いる。
- (3) 水素ガス圧縮輸送
3.1 で示したケース a-1 を用いる。但し、ステーションは除外。
輸送での燃費は 0.32 km/kWh となる。
- (4) 有機ハイドライド法によるタンクローリー輸送
バイオマスガス化により製造した水素とトルエンとの反応により合成した MCH (メチルシクロヘキサン) をタンクローリーで発電所近傍に輸送し、脱水素プラントで水素とトルエンを分離する。水素は圧縮・貯蔵された後、発電所に送られ、一部は燃料として脱水素プラントで利用される。また、トルエンはタンクローリーにて水素添加プラントに輸送される。

図 4-1 にブロックフロー図を示す。

⁷⁾ EV, 電気自動車 (Electric Vehicle)。

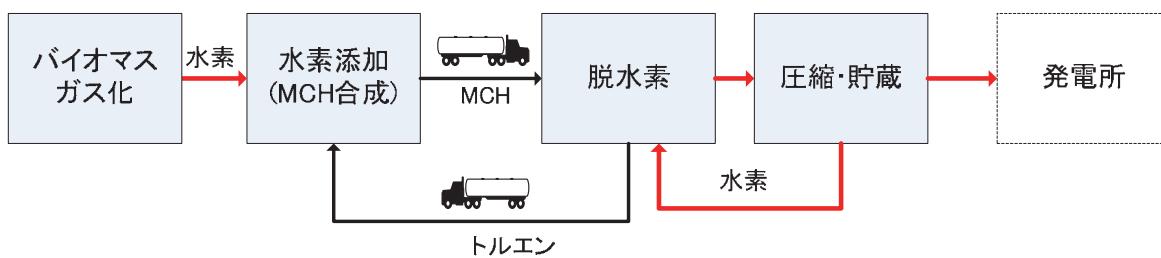


図 4-1 有機ハイドライド法水素輸送システム BFD

4.3 プロセス設計条件

(1) 原料水素供給条件

流量 155 トン/日
圧力 2 MPa

(2) 水素添加・脱水素工程

- ① 水素添加・脱水素反応条件[3]
表 4-1 に水素添加反応と脱水素反応の操作条件を示す。
- ② 脱水素プロセスの加熱炉の熱効率 : 80%

表 4-1 反応操作条件

	温度	圧力	転化率	備考
	°C	MPa	%	
水素添加 (MCH合成)	250	1	99	発熱反応
脱水素	350	1	95	吸熱反応

(3) 輸送条件

MCH とトルエンをタンクローリー (EV) にて輸送する。
ローリーの容量は 25kℓ、輸送距離は 100km、燃費は 0.45km/kWh となる。

(4) 圧縮、貯蔵条件

貯蔵圧力を 1MPa、貯蔵量をケース a-1 に合わせて、12 時間分とした。

4.4 結果と分析

(1) 物質・熱収支から各工程での正味発電用水素相当分の流量を求め、表 4-2 に示した。

表 4-2 正味発電用水素流量

ケースb-1 圧縮水素輸送ケース

水素プラント 出口	圧縮工程 出口	輸送工程 出口	正味 発電用
水素流量(kg/h)			
正味発電用 水素相当分	6,458	5,984	5,216

ケースb-4 MCH輸送ケース

水素プラント 出口	水素添加 出口	輸送	脱水素 出口	圧縮・貯蔵 出口	正味 発電用
水素流量(kg/h)					
正味発電用 水素相当分	6,458	6,391	6,251	3,785	3,391

(2) 固定費（設備費・労務費）

ケース b-4 (MCH 輸送) の固定費を表 4-3 の条件にて算出した。

表 4-3 MCH 輸送ケースの工程別建設費と運転要員数

水素添加		輸送		脱水素		圧縮・貯蔵	
MCH生産量 (千トン/年/系列)	120	年間輸送量 (千トン)	120	水素生産量 (千トン/年/系列)	7	貯蔵量 (トン/系列)	10
系列数	7	トラック台数	35	系列数	7	系列数	7
総建設費 (百万円)	7,060	総設備費 (百万円)	1,040	総建設費 (百万円)	8,870	総建設費 (百万円)	14,230
年経費率	0.15	年経費率	0.20	年経費率	0.15	年経費率	0.15
運転要員数	56	運転要員数	140	運転要員数	84	運転要員数	-

(3) 結果

① 発電燃料用水素のコストと CO₂ 排出量

水素燃料の正味発電コストをケース B-b-1、B-b-4 として表 4-4 に示した。

表 4-4 発電燃料用水素のコストと CO₂ 排出量比較

ケース B-b-1 水素ガス圧縮輸送

コスト	円/MJ				
	ガス化	圧縮	貯蔵	輸送	合計
変動費	1.6	0.1	0.0	0.1	1.8
固定費設備	0.6	0.1	0.6	0.7	2.0
固定費労務	0.1	0.0	0.0	0.6	0.7
合計	2.3	0.2	0.6	1.5	4.5

CO ₂ 排出量	g/MJ				
	原料・用役起源	0.0	0.0	0.0	0.0
設備起源	1.1	0.0	1.0	0.1	2.2
合計	1.1	0.0	1.0	0.1	2.2

ケース B-b-4 MCH輸送

コスト	円/MJ				
	ガス化	MCH	輸送	脱水素	圧縮・貯蔵
変動費	2.5	0.0	0.0	0.0	0.1
固定費設備	0.9	0.3	0.1	0.4	0.7
固定費労務	0.1	0.1	0.3	0.2	0.0
合計	3.5	0.4	0.4	0.6	0.8

CO ₂ 排出量	g/MJ				
	原料・用役起源	0.0	0.0	0.0	0.0
設備起源	1.7	0.6	0.0	1.1	0.9
合計	1.7	0.6	0.0	1.1	0.9

② 物流工程でのエネルギー効率

ケース b-1、b-4 の物流工程のエネルギー効率とバイオマス原単位を表 4-5 に示す。

表 4-5 物流工程でのエネルギー効率比較

b-1 圧縮水素輸送ケース

	水素プラント 出口	圧縮工程 出口	輸送工程 出口	エネルギー 効率
kg-バイオマス /kg-H ₂	14.0	15.1	17.4	

b-4 MCH輸送ケース

	水素プラント 出口	水素添加 出口	輸送	脱水素 出口	圧縮・貯蔵 出口	エネルギー 効率
kg-バイオマス /kg-H ₂	14.0	14.2	14.5	23.9	26.7	

4.5まとめ

- (1) 発電燃料用水素のコストは、ケース b-1、b-4 それぞれ、4.5 円/MJ、5.7 円/MJ となり、ケース b-1 が優位であることが分かった。
- (2) CO₂排出量については、ケース b-1、b-4 それぞれ 2.2g/MJ、4.3g/MJ となり、ケース b-1 は、ケース b-4 に比べ、CO₂排出量が小さいことが分かった。
- (3) 物流過程のエネルギー効率を比べると、ケース b-1 では 0.81 に対し、ケース b-4 では 0.53 まで低下した。バイオマス原単位で比べると、ケース b-1 では、17.4kg/kg 水素に対し、ケース b-4 では 26.7 kg/kg 水素となった。これは、主として、吸熱反応である脱水素工程での反応熱（202.5 kJ/mol-MCH）供給のためと考えられる。

5. 政策立案のための提案

再生可能エネルギーの利活用形態の選択肢の一つとして、カーボンフリー水素を取り上げ、製造、貯蔵、輸送を経て最終ユーザーまでの、コスト、CO₂排出量、エネルギー効率等について明らかにした。まず、水素製造は、木質バイオマスのガス化による水素製造プロセスを対象とし、2 ケースの用役供給条件（ケース A：従来電力、燃料を購入、ケース B：エネルギー自立）では、コストはほぼ同一の 1.8 円/MJ であったが、CO₂排出量は、ケース A の 10.3g/MJ に対し、ケース B では、0.9g/MJ であった。

次に、最終ユーザーは、FCV 車（70MPa 充填）での燃料利用を想定し、輸送距離を 100km として圧縮ガス、パイプライン、液化等の流通形態について検討し、現状の電力や燃料を用いた場合（ケース A）の物流時のコストと CO₂排出量を示した。

さらに、低炭素排出を目指して製品水素（ケース B）を発電燃料に利用することを想定し、有機ハイドライド輸送と圧縮ガス輸送のケースについて、正味の発電に利用される燃料（正味発電燃料）基準のコスト、CO₂排出量、エネルギー効率を比較検討した。この輸送条件では、圧縮ガス輸送の方が、有機ハイドライド輸送に比べ、コスト、CO₂排出量、およびエネルギー効率の各項目で優位であることが分かった。

今後は、以下のような研究も重要である。

- (1) バイオマスガス化反応の基礎的な研究の重要性

本稿では水素生産に焦点を当てて検討したが、低炭素社会全体を見ると、合成ガスに着目し、貴重な炭素源として将来の化学品生産原料の可能性についても考慮する必要がある。したがって、効率向上を目指したガス化反応の基礎的な研究が重要である。

- (2) 有機ハイドライド法を含めたエネルギー輸送媒体の基礎的な研究の重要性

エネルギー輸送媒体の研究については、水素製造から最終ユーザーまでの全体システムの視点からの評価に基づいて進めることが重要である。

参考文献

- [1] T. Ramsden, D. Steward, J. Zuboy, “Analyzing the Levelized Cost of Centralized and Distributed Hydrogen Production Using the H2A Production Model, Version2”, Technical Report NREL/TP-560-46267, September 2009.
- [2] 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書、技術開発編，“プロセス機器選定と製造コスト、環境負荷算出のための基礎データベース作成—製造機器・材料・コスト情報の構造化ー”，科学技術振興機構低炭素社会戦略センター、2015 年 3 月。
- [3] 岡田佳巳, 安井誠, “水素の大規模貯蔵輸送技術と将来の展望”, 化学工学, 80(7), p398-401, 2016.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

カーボンフリー水素の経済性と CO₂ 排出量 (Vol.1)

平成 29 年 3 月

“Economy and CO₂ Emission of Carbon Free Hydrogen (Vol.1)”

Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,

2017.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 上席研究員 三森 輝夫 (Teruo MITSUMORI)
上席研究員 岩崎 博 (Hiroshi IWASAKI)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL :03-6272-9270 FAX :03-6272-9273 E-mail :lcs@jst.go.jp
<http://www.jst.go.jp/lcs/>
© 2017 JST/LCS
許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
