

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.2)

平成 30 年 2 月

“Economy and CO₂ Emission of Carbon Free Hydrogen(vol.2)”

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-FY2017-PP-10

概要

本提案書は、水素製造や輸送方法について、水素関連技術マップ（本文の図 1-1 参照）を示すような検討範囲において、カーボンフリー水素の製造、輸送を経て最終利用時点での、コストや CO₂ 排出量について明らかにするものであり、既刊 LCS 提案書(FY2016-PP-07(2017 年 3 月))の内容を追加、補完する意味を有する。まず、水素製造は、①木質バイオマスのガス化による水素製造プロセスでは、木質バイオマス原料の実勢価格の見直しと、LCI データ改訂に伴う設備起源 CO₂ 排出量原単位の見直しを行い、3 円/MJ、CO₂ 排出量は 2g/MJ の結果を得た。また、新規に②PV 電源による加圧アルカリ水電解プロセスによる水素製造プロセスについて検討したが、コストは 14 円/MJ、CO₂ 排出量は 20g/MJ となった。

次に、製造されたカーボンフリー水素を、1.ガス圧縮シリンダー(CSD)、2.ガスパイプライン(PL)、3.液体水素(LH)、4.有機ヒドライド(MCH)の 4 種の輸送方式を用いて、(a) FCV 向、(b) 発電所向の 2 種のユーザーに輸送した場合の、それぞれの利用時点でのコストと CO₂ 排出量を、2 種のエネルギー供給条件（ケース A：外部からの供給とケース B：エネルギー自立）のもとで比較検討した。その結果、製造と輸送を含めた利用時のカーボンフリー水素を実現するには、ケース B のエネルギー自立条件が必須であり、コストと CO₂ 排出量は、FCV 向では、圧縮ガスシリンダーとパイプライン輸送方式が優位で、それぞれ 9.5 円/MJ、9gCO₂/MJ、発電所向では、パイプライン輸送方式が優位で、それぞれ 4 円/MJ、4gCO₂/MJ であることが示された。

Summary

This proposal paper aims to clarify the cost and CO₂ emissions of carbon-free hydrogen at the end of supply chain such as plural systems of manufacturing, storing and delivery on hydrogen as shown in ‘Hydrogen Related Technology Map’ as well as to add and supplement the contents of the previous LCS Proposal Paper (FY2016-PP-07(March 2017)).

First of all, due to the corresponding the market price of woody biomass feedstock as well as the revision of LCI data in public on the construction materials, the cost and CO₂ emission are revised as 3 yen/MJ, 2g/MJ respectively. In addition, by investigating the hydrogen production process of pressurized alkaline water electrolysis with PV power supply, the cost and CO₂ emission are newly obtained as 14yen/MJ, 20g/MJ as respectively.

Next, with considering four types of carbon-free hydrogen delivery systems such as 1) Compressed gas cylinder (CSD), 2) Gas Pipeline (PL), 3) Liquid Hydrogen (LH), and 4) Organic Hydride (MCH) and two different users of (a) at FCV dispenser and (b) at Power Plant, costs and CO₂ emissions at the end of supply chain are investigated under the two types of energy supply conditions (Case A: external energy supply and Case B: self-energy supply). We concluded that the self-energy supply condition of Case B should be essential in order to obtain the carbon-free hydrogen at the end point of utilization. In case of FCV user, delivery system of PL and CSD are dominated with results of cost and CO₂ emissions in 9.5yen/MJ, 9g CO₂/MJ respectively and in case of Power plant, PL is dominated in 4yen/MJ and 4gCO₂/MJ respectively.

目次

概要

1. 水素関連技術マップと検討範囲.....	1
2. Carbonフリー水素の製造.....	2
2.1 木質バイオマスのガス化による水素製造.....	2
2.2 電解プロセスによる水素製造.....	4
3. Carbonフリー水素利用時でのコストと CO ₂ 排出量.....	7
3.1 FCV 向(a).....	8
3.2 発電所向(b).....	8
3.3 まとめ.....	8
4. まとめ.....	8
5. 政策立案のための提案.....	8
参考文献.....	9
付録.....	9

1. 水素関連技術マップと検討範囲

再生可能エネルギーの利活用形態の一つとして、カーボンフリー水素を取り上げ、その関連技術マップを図 1-1 に示した。これは、資源やエネルギーをもとに、種々のプロセスにて製造されたカーボンフリー水素が、貯蔵、輸送等を経て最終利用に至るまでの経路を示したものである。今回の検討範囲と内容は、

- (1) ① 木質バイオマスのガス化
- ② PV 電源によるアルカリ水電解

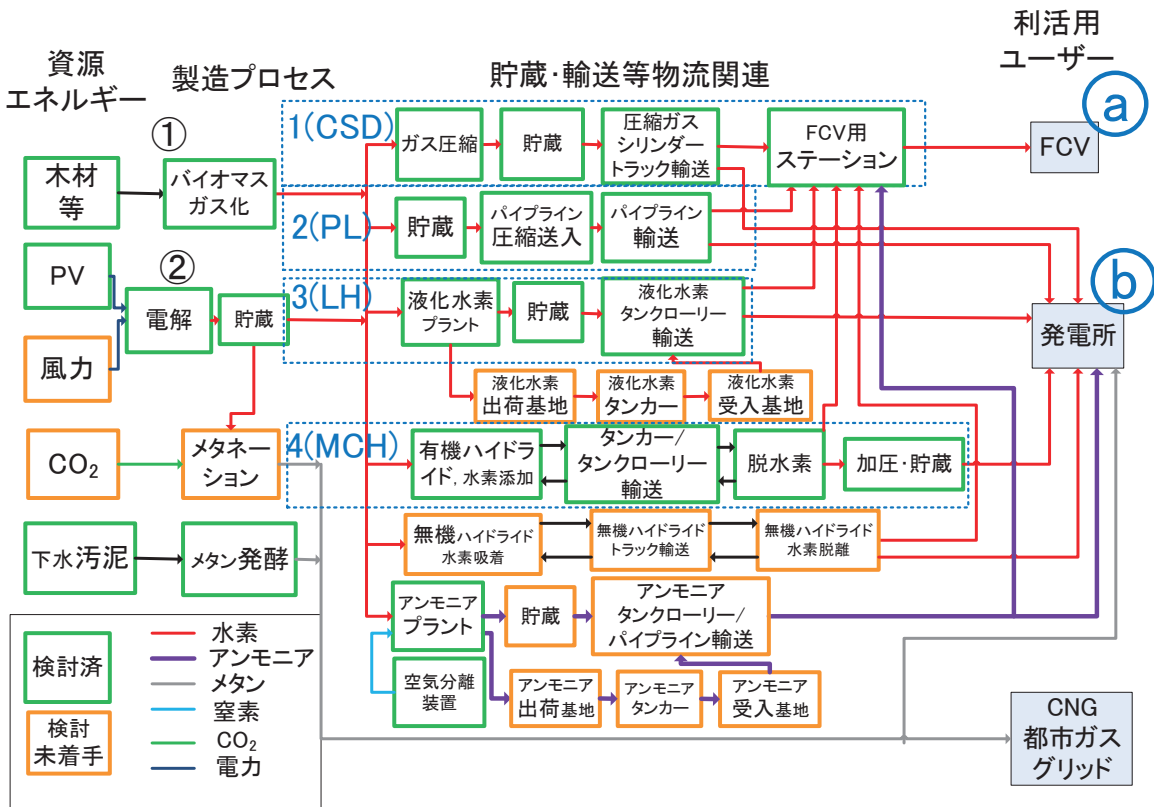
の 2 種の水素製造プロセスにより製造されたカーボンフリー水素を、

- (2) 1. ガス圧縮シリンダー(CSD)
- 2. ガスパイプライン(PL)
- 3. 液体水素(LH)
- 4. 有機ハイドライド(MCH)

の 4 種の輸送方式を用いて、

- (3) (a) FCV 向
- (b) 発電所向

の 2 種のユーザー向に輸送した場合の、それぞれの利用時点でのコストと CO₂ 排出量を比較検討するものである。



なお、陸上輸送、輸送距離 100km を基本輸送条件とした。さらに、①木質バイオマスのガス化の追加検討条件として、エネルギー供給条件を以下のように定めた。

- ケース A：電力、燃料等を外部から供給する
- ケース B：エネルギー自立（製品水素による電力、燃料の供給）

なお、ケース A、B で用いた、電力、燃料のコストおよび CO₂ 排出量原単位等の計算前提条件は既刊 LCS 提案書¹⁾[1]の通りである。

2. カーボンフリー水素の製造

2.1 木質バイオマスのガス化による水素製造

本プロセスの詳細検討は既刊 LCS 提案書[1]にて、製造コストおよび CO₂ 排出量の観点から、木質バイオマスが今後の有力なカーボンフリー水素源になり得る可能性を示した。

今回、木質バイオマス原料の実勢価格の見直しと、LCI データ改訂²⁾に伴う設備起源 CO₂ 排出量原単位[2]の見直しを行った。

2.1.1 製造コストと CO₂ 排出量

木質バイオマスガス化による水素製造のコストと CO₂ 排出量を表 2-1 に示した。原料バイオマスの価格を、いずれも乾燥基準で、現状の 19 円/kg と将来の 3 円/kg の場合について求めた。

表 2-1 木質バイオマスガス化による水素製造コストと CO₂ 排出量

		現状 (原料バイオマス:19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	19	19	3	3
電力単価	円/kWh	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	-
触媒単価	円/kg	500	500	500	500
製造コスト					
変動費計	円/MJ	2.2	2.4	0.7	0.5
固定費設備	円/MJ	0.4	0.5	0.4	0.5
固定費労務	円/MJ	0.1	0.1	0.1	0.1
固定費計	円/MJ	0.5	0.6	0.5	0.6
合計	円/MJ	2.7	3.0	1.2	1.1
CO ₂ 排出量					
原料・用役起源	g/MJ	10	0	10	0
設備起源	g/MJ	2	2	2	2
合計	g/MJ	12	2	12	2

¹⁾ 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、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター（以下、LCS 提案書）。

²⁾ LCI データベース IDEA version 2.1.3

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ
 一般社団法人 産業環境管理協会。

2.1.2 プラントスケールの影響

プラントを構成する機器の最大容量（特にガス化炉）と工程別の系列数を考慮して、スケールを変えた場合の水素製造コストと CO₂ 排出量を下記の表 2-2 および図 2-1 に示した。

表 2-2 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	4,000	3,000	2,000	1,000	500	100
水素生産量	トン/日	286	215	143	71	36	7
	トン/年	93,960	70,470	46,870	23,430	11,720	2,340
	TJ/年	11,342	8,507	5,670	2,840	1,420	280
年間操業率	-	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
総建設費	百万円	30,640	24,970	18,760	11,600	7,520	2,640
年経費率	-	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

製造コスト

変動費計	円/MJ	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
固定費設備	円/MJ	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1.4
固定費労務	円/MJ	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.9
固定費計	円/MJ	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	2.3
合計	円/MJ	2.8	2.9	3.0	3.1	3.3	4.6

CO₂ 排出量

原料・用役起源	g-CO ₂ /MJ	0	0	0	0	0	0
設備起源	g-CO ₂ /MJ	1	2	2	2	3	5
合計	g-CO ₂ /MJ	1	2	2	2	3	5

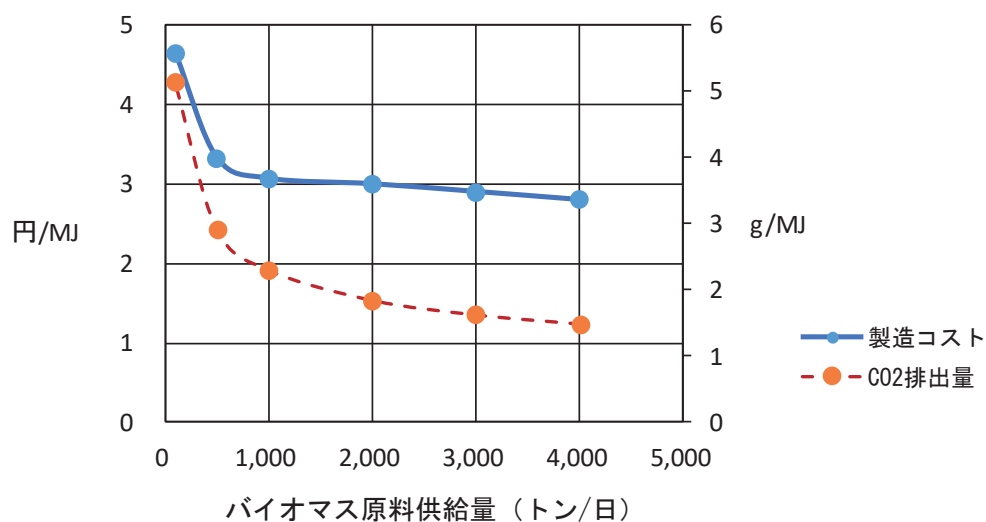


図 2-1 バイオマスガス化プラント プラントスケールの影響

2.1.3 まとめ

- (1) 木質バイオマスガス化による水素の製造コストは、原料価格 19 円/kg の場合、2.7~3.0 円/MJ、3 円/kg の場合、1.1~1.2 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、10, 0.0 g/MJ、設備起源では、それぞれ 2, 2g/MJ、合計 12, 2g/MJ となった。
- (3) プラントスケールの影響を見ると、スケールアップについては現状の原料供給量 2,000 トン/日より大きくしても、製造コストの著しい低減は見られない。スケールダウンについては、100 トン/日の場合、製造コストは 4.6 円/MJ となり、2,000 トン/日の場合に比べ、約 1.5 倍になった。CO₂ 排出量についても同様の傾向であることが分かった。

2.2 電解プロセスによる水素製造

加圧下でのアルカリ水電解による水素を、従来電源（ケース 1）と PV 電源（ケース 2）を用いて製造するプロセスを検討した。

2.2.1 プロセスの構成と基本設計条件

以下に示すプロセスフロー図（図 2-2）と基本設計条件に基づいてプロセス設計を行なった。

- 1) 水素生産能力；760 Nm³/時（電解槽 1 槽あたり）
- 2) 電解槽操作圧；3.2 MPa
- 3) 年間稼働率；ケース 1：90%、ケース 2：10%
- 4) 電力原単位；48.5 kWh/kg-H₂
- 5) 電源の CO₂ 排出原単位；ケース 1：600g/kWh、ケース 2：25g/kWh

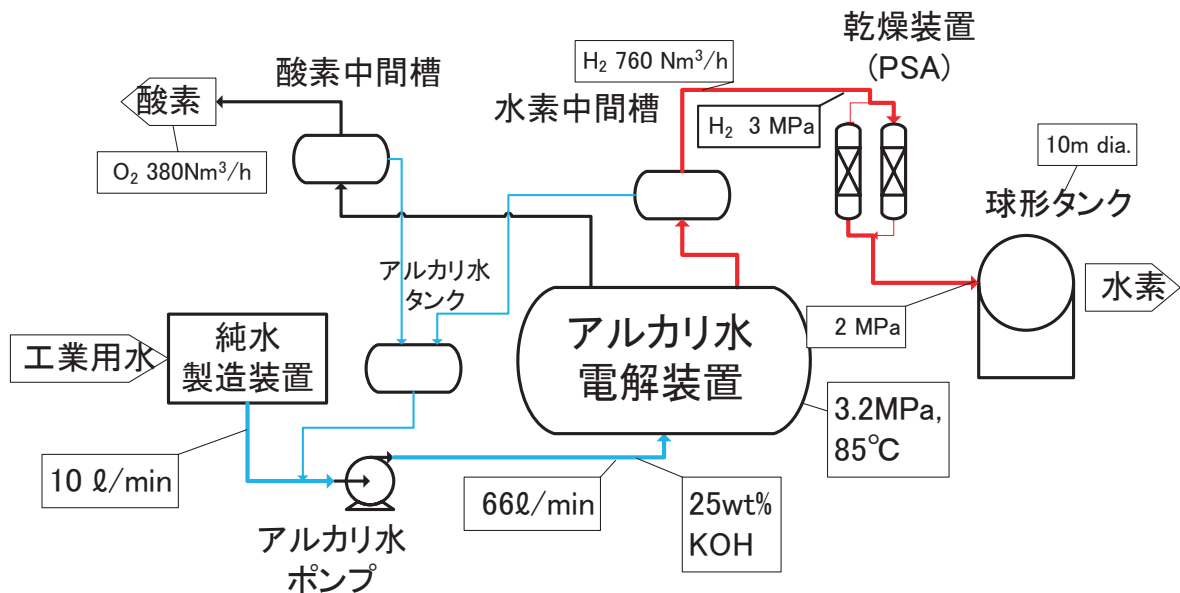


図 2-2 加圧アルカリ水電解プロセスのプロセスフロー図

2.2.2 アルカリ水電解からの水素製造コストおよびCO₂排出量

1) 主要機器コストと重量を下表(表2-3)にまとめ、さらに総建設費を求めた(表2-4)。

表 2-3 機器費と機器重量

	数量	概略仕様	材質 (主要部)	価格 (百万円)	重量 (トン)
電解装置	1	1.6mφ x 12m 3.2 MPa	SUS	41	48
水素中間槽	1	12m ³ , 3.2MPa	CS	5	7
酸素中間槽	1	6m ³ , 3.2 MPa	CS	3	3
受変電設備	1	4.2MVA	CS	99	50
その他	-			2	2.0
電解槽計				150	112
水素ホルダー	1	500m ³ , 3MPa	CS	94.5	72

表 2-4 建設費

	百万円
電解槽(1系列)	375
水素ホルダー	189
総建設費	564

2) 製造コストとCO₂排出量

表 2-5 電解プロセスによる水素製造コストとCO₂排出量

		アルカリ水電解プロセス	
		ケース1 従来電源	ケース2 PV電源
水素生産量	トン/日	1.63	1.63
	トン/年	535	595
	TJ/年	65	72
年間操業率	-	0.90	0.10
電解槽系列数	-	1	10
電解槽建設費/系列	百万円	375	375
水素ホルダー建設費	百万円	189	189
総建設費	百万円	564	3,939
年経費率	-	0.15	0.15
運転人員数/系列	人	5	5
年間労務費単価	百万円	5	5
電力原単位	kWh/kg-H ₂	48.6	48.6
工業用水原単位	m ³ /kg-H ₂	0.009	0.009
電力単価	円/kWh	12	5.7
工業用水単価	円/m ³	30	30
製造コスト			
変動費計	円/MJ	4.8	2.3
固定費設備	円/MJ	1.3	8.2
固定費労務	円/MJ	0.4	3.5
固定費計	円/MJ	1.7	11.7
合計	円/MJ	6.5	14.0
年間排出量(電源起源)	トン-CO ₂ /年	15,614	723
年間排出量(設備起源)	トン-CO ₂ /年	178	731
CO ₂ 排出量			
原料・用役起源	g/MJ	241	10
設備起源	g/MJ	3	10
合計	g/MJ	244	20

2.2.3 まとめ

- 1) 電解プロセスによる、ケース1,2の水素製造コストは、それぞれ6.5円/MJ, 14.0円/MJ、またCO₂排出量は、それぞれ244g/MJ, 20g/MJとなった。
- 2) ケース1の電力単価は、現状の12円/kWh、ケース2は2030年を想定した5.7円/kWh[3]を用いたが、コストおよびCO₂排出量の両面で、バイオマスガス化に比べ、優位性に乏しいことが分かる。

3. カーボンフリー水素利用時でのコストと CO₂ 排出量

バイオマスガス化による水素を、最終利用時点（a：FCV ディスペンサー、b：発電所入口）まで 4 種類の輸送方式（図 1-1 の水素関連技術マップを参照）で 100km 輸送した場合のコストと CO₂ 排出量を、2 節で定義したエネルギー供給条件 A、B のもとで計算し、その結果を図 3-1、3-2 に示した。ケース A、ケース B（エネルギー供給条件）の詳細は既刊 LCS 提案書[1]に記したが、その要点は次の通りである。

ケース A： 電力、燃料等を外部から供給

輸送過程でのエネルギー効率を以下の条件で計算し、利用時点でのコストと CO₂ 排出量を求める。

電力；単価：12 円/kWh、CO₂ 排出量：600gCO₂/kWh

加熱用燃料（天然ガス）；単価：1.5 円/MJ、CO₂ 排出量：2,698gCO₂/kg

輸送用燃料（軽油）；単価：120 円/ℓ、CO₂ 排出量：2,619gCO₂/ℓ

ケース B： エネルギー自立（製品水素による電力、燃料の供給）

カーボンフリー水素の実現を目指して、輸送過程での電力および燃料は製品水素を用い、また、輸送用車両は EV を用いた時の輸送過程での正味の水素利用効率を以下の条件で計算し、利用時点でのコストと CO₂ 排出量を求める。

電力；発電効率：53%（LHV ベース）、単価：6 円/kWh（設備相当分）

CO₂ 排出量：1.3gCO₂/kWh（設備相当分）

EV/軽油車燃費変換係数：0.15ℓ/kWh

なお、本検討での水素流通量は、FCV の場合、5kg/台充填として約 3 万台/日相当、発電所については 115MW 相当である。

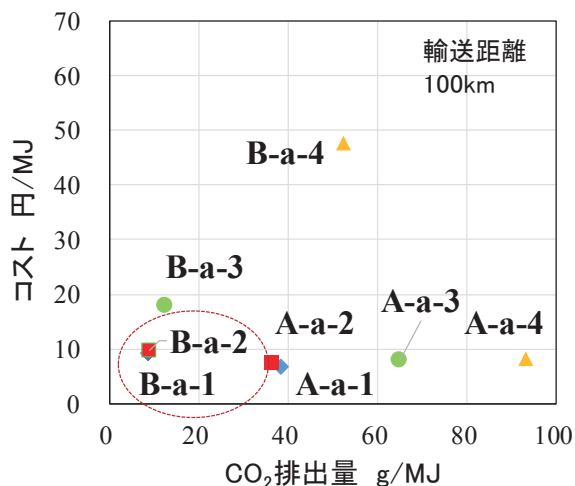


図 3-1 CO₂ 排出量 vs コスト (FCV 向)

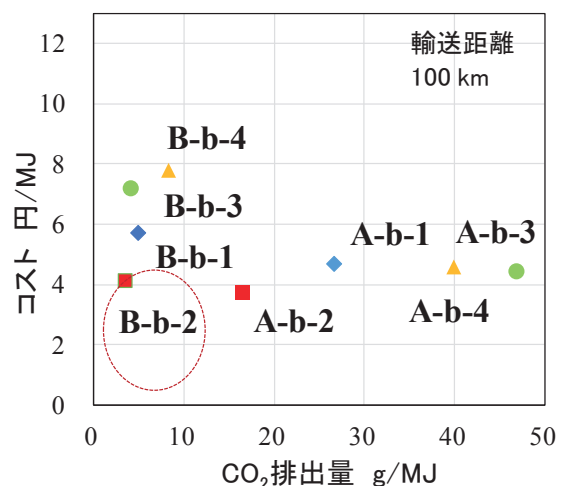


図 3-2 CO₂ 排出量 vs コスト (発電所向)

3.1 FCV 向(a)³⁾

ケース A では、4種の輸送方式でのコストは7~8円/MJとなり大きな差異はないが、CO₂排出量は大きな差があり、A-a-1(CSD)では36g/MJ、A-a-2(PL)では38g/MJ、A-a-3(LH)では65g/MJ、A-a-4(MCH)では93g/MJとなった。

ケース B のコストはB-a-1(CSD)、B-a-2(PL)では9.5円/MJ、B-a-3(LH)では18円/MJ、B-a-4(MCH)では48円/MJとなり、CO₂排出量は、B-a-1、B-a-2では9g/MJ、B-a-3では12g/MJ、B-a-4では52g/MJとなった。

3.2 発電所向(b)³⁾

ケース A のコストは、いずれの輸送方法でも4~5円/MJとなったが、CO₂排出量は、A-b-2では17g/MJ、A-b-1では26g/MJ、A-b-3では47g/MJ、A-b-4では40g/MJとなった。

ケース B のコストは、B-b-2では4円/MJと最も低く、B-b-1では5円/MJ、B-b-3では7円/MJ、B-b-4では8円/MJとなり、CO₂排出量は、B-b-2では4g/MJと最も低く、B-b-1では6g/MJ、B-b-3では7g/MJ、B-b-4では8g/MJとなった。

3.3 まとめ

- (1) 製造と輸送を含めた利用時のカーボンフリー水素を実現するには、ケース B のエネルギー自立条件が必須である。
- (2) コストとCO₂排出量の観点から、FCV 向では、圧縮ガスシリンダー(B-a-1)とパイプライン輸送方式(B-a-2)が優位である。
- (3) 発電所向では、パイプライン輸送方式(B-b-2)が優位であることが示された。

4. まとめ

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、以下の知見を得た。

- 1) 現状の原料価格を反映したバイオマスガス化からの水素製造コストが約3円/MJ、CO₂排出量は2g/MJであり、木質バイオマスは、カーボンフリー水素原料の有力な選択肢である。
- 2) PV 電源による加圧アルカリ水電解プロセスからの水素製造コストは、14円/MJ、CO₂排出量は20g/MJとなり、コスト面およびCO₂排出量の面から、現状では優位性に乏しい。
- 3) 水素エネルギー輸送は、ガスパイプライン輸送がコストおよびCO₂排出量の両面で優位である。
- 4) カーボンフリー水素の利活用については、製造、貯蔵並びに輸送等の全体システムでのエネルギー利用効率が重要である。

5. 政策立案のための提案

- (1) カーボンフリー水素の製造における、木質バイオマスのガス化による水素製造の優位性を生かすために、木質バイオマス原料コストの低減のための林業の合理化に向けての統合的な研究が重要である。
- (2) バイオマスガス化プロセスについて、ガス化反応の基礎的な解明を行い、合理的なガス化炉の開発に結びつける研究が重要である。
- (3) 電解プロセスによる水素製造については、コスト面およびCO₂排出量の面から、優位性に乏しいため、PV、風力さらに蓄電池等を組み合わせた混合電源の利用により、設備稼働率

³⁾ 参考として、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た、既刊LCS提案書[1]「表1-1 水素製造、輸送ならびに最終ユーザーの組合せ表」を、巻末に付録として再掲した。

を高めるための電源構成の明確化とコスト低減を目指す研究が重要である。

- (4) カーボンフリー水素利用の拡大には、エネルギー効率の高い、製造から輸送までの全体システムが重要であり、パイプライン網や貯蔵等の社会基盤の整備に向けて、立地、設備規模等の技術オプションを考慮し、コスト低減を実現できる設計手法の確立に向けての研究が重要である。

参考文献

- [1] 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, “カーボンフリー水素の経済性と CO₂ 排出量 (Vol.1)”, LCS-FY2016-PP-07, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2017 年 3 月.
- [2] “CO₂ 排出量原単位一覧”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 内部資料.
- [3] 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, “太陽光発電システム (Vol.3)”, LCS-FY2015-PP-01, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2016 年 3 月.

付録

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た、2 ケースの用役供給条件。

表 1-1 水素製造、輸送ならびに最終ユーザーの組合せ表 (既刊 LCS 提案書[1])

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

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.2)

平成 30 年 2 月

“Economy and CO₂ Emission of Carbon Free Hydrogen(vol.2)”
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,
2018.2

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/>

© 2018 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。
