

水素の環境価値（カーボンプライスを上乗せした既存エネルギーと等価となる水素価格の検討）

<検討の背景： 水素社会を実現していくためには、環境価値を含め、水素の調達・供給コストを既存エネルギーと遜色のない水準まで低減させることが不可欠である。^{1)～}>

為替レート ³⁾	=	105.24 円/US\$（2014年平均）
カーボンプライス ³⁾	=	37 US\$/t-CO ₂ at 2030
（2030年と2040年は出典3）（右図）に基づく。）	=	50 " at 2040
（2050年は2040年と2030年の差分を2040年に上乗せした。）	=	63 " at 2050
（2100年は2050年と同様の方法で直線外挿した。）	=	128 " at 2100

【単位換算】

1 MMBtu	=	292.93 kWh
1 MJ	=	0.2778 kWh
1 MMBtu	=	1,054 MJ

【発熱量】²⁾

<メタン>	<水素>	
55.50	141.80	HHV：MJ/kg
15.4	39.4	HHV：kWh/kg
11.0	3.55	HHV：kWh/Nm ³
0.0377	0.0121	HHV：MMBtu/Nm ³

1 輸入LNGのCIF価格と熱量等価な水素価格（カーボンプライス不含）

1) 輸入LNG CIF 価格	=	10 US\$/MMBtu
"	=	0.377 US\$/Nm ³ -LNG
"	=	39.7 円/Nm ³ -LNG
2) 熱量等価な水素価格(カーボンプライス不含)	=	10 US\$/MMBtu
"	=	0.121 US\$/Nm ³ -H ₂
"	=	12.7 円/Nm ³ -H ₂

2 CO₂排出量⁴⁾

1) 火力発電		
(1) コンバインドサイクルLNG火力	=	376 g-CO ₂ /kWh
(2) シングルサイクルLNG火力	=	476 "
(3) 石炭火力	=	864 "
(4) 石油火力	=	695 "
2) 石油精製		
(1) 水蒸気改質(目的生産水素)		
① 水素発生量	=	45 億Nm ³
② CO ₂ 発生量	=	4.5 百万トン
③ 単位水素生産量当たりのCO ₂ 排出量	=	1,000 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂
(2) 接触改質(副生水素)		
① 水素発生量	=	69 億Nm ³
② CO ₂ 発生量	=	4.2 百万トン
③ 単位水素生産量当たりのCO ₂ 排出量	=	609 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂
3) 高炉製鉄		
(1) コークス炉		
① 水素発生量	=	88 億Nm ³
② CO ₂ 発生量	=	4.9 百万トン
③ 単位水素生産量当たりのCO ₂ 排出量	=	557 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂
(2) 高炉製鉄		
① 水素発生量	=	53 億Nm ³
② CO ₂ 発生量	=	90 百万トン
③ 単位水素生産量当たりのCO ₂ 排出量	=	16,981 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂
(3) 転炉		
① 水素発生量	=	0.9 億Nm ³
② CO ₂ 発生量	=	5 百万トン
③ 単位水素生産量当たりのCO ₂ 排出量	=	55,556 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂

3 主要用途における水素の環境価値

<3.1 コンバインド水素発電>	カーボンプライスはWEO2014の新政策シナリオの2040年の値を採用
① 発電効率(発電端、HHV) ³⁾	= 57 %
	(LNGコンバインドの2030年モデルと同じと設定)
② 所内率 ³⁾	= 2 % (同上)
③ 発電効率(送電端、HHV) ³⁾	= 55 %
④ 燃料単価(10 US\$/MMBtu)	= 12.7 円/Nm ³ -H ₂
	(出典4) (右中図)では 13.3 円/Nm ³ -H ₂)
⑤ 燃料消費 (HHVベース)	= 0.513 Nm ³ -H ₂ /kWh
⑥ 燃料費用	= 6.53 円/kWh
⑦ LNGコンバインドに対するCO ₂ 排出削減量	= 376 g-CO ₂ /kWh
⑧ 水素コンバインドにおける水素の環境価値	= 50 US\$/t-CO ₂
" (カーボンプライス)	= 0.0188 US\$/kWh
"	= 1.98 円/kWh
"	= 3.9 円/Nm ³ -H ₂
	(出典4) (右中図)では 3.5 円/Nm ³ -H ₂)
⑨ カーボンプライスを上乗せした既存LNGコンバインドと等価発電となる水素コンバインドにおける水素価格	= 16.6 円/Nm ³ -H ₂
	(出典4) (右中図)では 16.8 円/Nm ³ -H ₂)

<出典>

- 資源エネルギー庁 白井俊行「水素社会の実現に向けて」(燃料電池Vol.19 No.3 2020)
- ウィキペディア, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%99%BA%E7%86%B1%E9%87%8F>
- 「発電コスト等の検証に関する報告（平成27年5月）」
- 「エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会」報告書
- 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（第5回）配布資料2
- 「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン-ゼロカーボン・スチールへの挑戦-」（令和2年6月修正追記）

火力③ CO₂価格³⁾

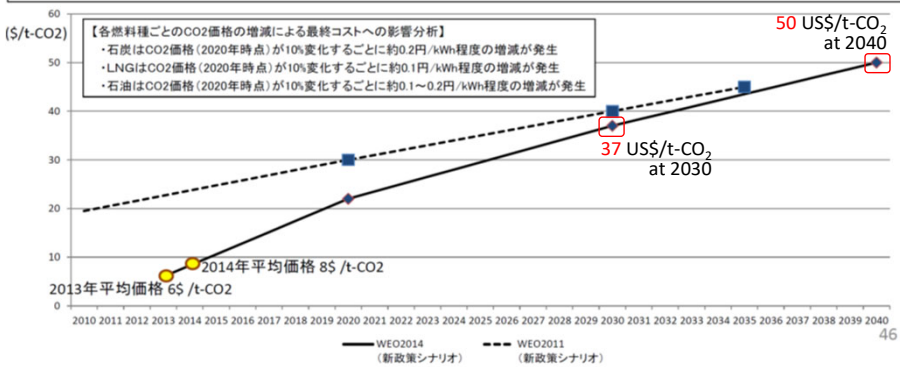
○燃料価格の上昇トレンドの標準ケースをWorld Energy Outlook 2014 (WEO2014)新政策シナリオとしていることから、WEO2014のEU 新政策シナリオの価格及びそのトレンドの延長(対数回帰)を利用。

○また、初年価格は欧州の代表的な排出量取引市場の平均値を取るが、2013年及び2014 年の数字もWEOのシナリオと齟齬がないため、WEO2014のシナリオをそのまま利用することとする。

(参考)

2013年価格: 6 \$ /t-CO₂、2014年価格: 8 \$ /t-CO₂

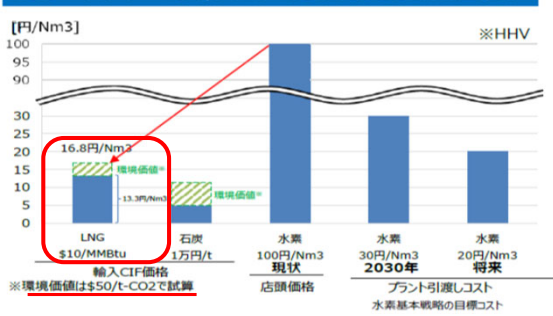
○CCSのコスト計上に関しては、日本における貯留等のコストが明確でないため、技術開発や適地調査等の結果等を踏まえて、更なる検討が必要であり、今後の課題として、今回の試算ではコスト認識の対象外とする。



LNGコンバインドの発電コスト		
発電コスト (CO ₂ 対策費含む)	9.6 円/kWh (2030年モデル)	
内: 資本費 ³⁾	1.0 "	
内: 燃料費(枠下注記)	6.2 "	(10 US\$/MMBtu)
内: 運転維持費 ³⁾	0.6 "	
内: 政策経費 ³⁾	0.02 "	
内: CO ₂ 対策費用 ³⁾	1.8 "	
発電コスト (CO ₂ 対策費含まない)	7.8 円/kWh	

注記: 出典3)で示されている燃料費は10 円/kWh at 842.43 US\$/t (= at 16.1 US\$/MMBtu)

既存エネルギーと水素コストの比較 (発電用燃料・熱量等価)



出典4)「エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会」報告書

<製油所>		
目的生産水素をCO ₂ フリー水素で代替。	(カーボンプライスはWEO2014の新政策シナリオの2030年の値を採用)	
① 生産水素1Nm ³ 当たりのCO ₂ 排出量	= 1,000 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂	
② 代替CO ₂ フリー水素による環境価値	= 3.7 US\$/Nm ³ -H ₂	
" (カーボンプライス)	= 3.9 円/Nm ³ -H ₂	
③ 既存の水素製造コスト ⁵⁾ (下表)	= 23 ~ 37 円/Nm ³ -H ₂	
④ カーボンプライスを上乗せした既存目的生産水素製造と等価となる水素価格	= 27 ~ 41 円/Nm ³ -H ₂	

2-12. 水素の製造方法(まとめ③: 経済性)

各製造方法の経済性			
		製造コスト (円/Nm ³)	備考
副生水素	苛性ソーダ	20	・各種資料からの引用であり、詳細は不明。
	鉄鋼	24~32	・各種資料から12~20円/Nm ³ ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」石油産業活性化センター、平成15年)では16.3円/Nm ³ であるが、最新のエネルギー価格に基づくと28.1円/Nm ³ となり、上記の価格に比べ12円の上昇
	石油化学	20	・各種資料からの引用であり、詳細は不明。
目的生産 (既存設備)	石油精製	23~37	・各種資料から10~24円/Nm ³ ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」石油産業活性化センター、平成15年)では11.1円/Nm ³ であるが、最新のエネルギー価格に基づくと23.7円/Nm ³ となり、上記の価格に比べ13円の上昇
	アンモニア	N.A.	
	化石燃料等改質	31~58 (※)ランニングのみ	・改質器の設備費等は含まない。 ・改質効率を70%と想定。 ・都市ガス(工業・商業用) 1.7円/MJ、A重油1.4円/MJ、LPガス0.9円/MJ、ナフサ1.8円/MJ ・PSA用電力は0.33kWh/Nm ³ -H ₂ 、2012年の電力平均単価16.5円/kWh
目的生産 (新規設備)	水電解	84 (系統電力) 76~136 (風力・太陽光) (※)ランニングのみ	・電解装置の設備費等は含まない。 ・電解効率を70%と想定。 ・系統電力は2012年の電力平均単価16.5円/kWh ・風力発電は30万円/kWh、太陽光は10kW以上を29万円/kWh、10kW未満を38.5万円/kWhとし、コスト等検証委員会の手法により発電単価を推計すると、各々14.9円/kWh、23.6円/kWh、26.8円/kWh ・水素製造は発電サイトでの電解を想定していることから、送電コストは含まない。

(※)過去の各種調査より抜粋しており、必ずしも同じ前提に従って計算されたものではない。

また、電力料金、化石燃料価格等の上昇に伴い、現在、コストが高くなっているものもあると想定される

出典: 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ（第5回）配布資料2

<3.3 水素還元製鉄 ⁶⁾ > ゼロカーボン・スチール(実現): 2100年(世界)	カーボンプライスは2100年の想定値 (WEO2014の直線外挿値)
① 鉄鉄1t製造に必要な水素量 (日本の実現目標は2050年)	= 1,000 Nm ³ /t-p (下中図)
② 現在の炭素還元製鉄と等価となる水素還元製鉄の水素価格	= 7.7 US\$/Nm ³ -H ₂ (下中図)
"	= 8.1 円/Nm ³ -H ₂
③ 水素還元製鉄によるCO ₂ 排出削減量 (2015年~2100年)	= 1.97 t-CO ₂ /t-crude steel (最下図)
④ 水素還元製鉄によるCO ₂ 排出削減量 (水素 1Nm ³ 当たり)	= 1,970 g-CO ₂ /Nm ³ -H ₂
⑤ 水素還元製鉄で上乗せ可能な環境価値 (US\$/Nm ³ -H ₂) (カーボンプライス)	= 25.2 US\$/Nm ³ -H ₂
⑥ 水素還元製鉄で上乗せ可能な環境価値 (円/Nm ³ -H ₂)	= 26.5 円/Nm ³ -H ₂
⑦ カーボンプライスを上乗せした既存の炭素還元製鉄と等価となる水素還元製鉄における水素価格	= 34.6 円/Nm ³ -H ₂

水素還元製鉄試算⁶⁾

・鉄鉄1t製造に必要な水素量

還元: 601Nm³ + 吸熱反応補完: 67Nm³ + 1600℃までの溶鉄昇熱: 85Nm³
= 753Nm³/ton of (理論値) ⇒ 効率75%とすると実質1000Nm³/ton 程度

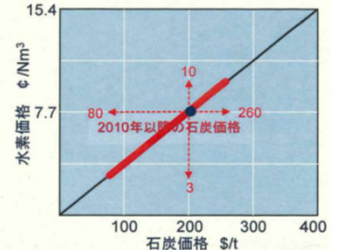
量的課題

- 2100年の世界鉄鉄生産量12億tの生産に必要な水素量は約1.2兆Nm³
- 水素製造電力原単位*を4.5kWh/Nm³-H₂とすると、5.4兆kWhの電力(日本の消費電力量は約1兆kWh/年)が必要(製造に必要な電力以外に輸送・液化・貯蔵などのために追加の電力が必要)

*阿部勲夫、「水電解法による水素製造とそのコスト」、水素エネルギーシステム Vol.33, No.1 (2008)

コスト課題

- 炭素還元製鉄と等価にする場合の水素価格の試算
原料炭価格を200\$/t、原料炭原単位700kg/t-pとすると、原料炭コストは140\$/t-p
原料炭のうち、「還元機能」に消費される割合は55%(45%は副生ガス化)であることから、還元剤コストは14000×0.55= 77\$/t-p
これと等価の水素価格は 77\$/t-p ÷ 1000Nm³-H₂/t-p = 7.7 円/Nm³-H₂

CO₂排出量⁶⁾