

水素パイプラインによるエネルギー輸送の環境負荷評価

内田晴久、吉田加奈、菅 幹雄

東海大学 教養学部

〒259-12 神奈川県平塚市北金目 1117

An Assessment on Environmental Impact of Energy Transportation by Hydrogen gas pipeline

Haru-Hisa UCHIDA, Kana YOSHIDA, Mikio SUGA

Department of Human Development, Tokai University

Kitakaname 1117, Hiratsuka, Kanagawa, 259-12 Japan

As an example of estimating the environmental impact of hydrogen energy system, we calculated the emission of CO₂ at hydrogen production and at transportation through gas pipe lines. The emission was estimated using environmental I/O table. The CO₂ emission depends strongly on the kind of primary energy. For the energy transportation, less emission was obtained in case of long distance transportation using tubes in adequate diameters than electric power transportation for the same amount of energy.

Keywords: hydrogen, pipeline, energy transportation, environmental impact, CO₂

1. はじめに

自然エネルギーは、エネルギー密度が小さく、不安定という欠点がある一方、全体のエネルギー量は非常に膨大である。それ故、不安定ながらも様々なプロセスにおいて得られるエネルギーをいったん共通のエネルギー媒体に変換し、集約、貯蔵、輸送することができれば、自然エネルギーの利用もより現実のものとなってこよう。火力発電所や原子力発電所から各地へ配電するシステムを一局集中的なエネルギー生産方式とすれば、自然エネルギーの利用は、様々なところで様々な方法で共通のエネルギー媒体を生産、共通のネットワークで融通を図り、様々な形態のエネルギーへ変換・使用していく分散的なエネルギーシステムとして考えることができる。ここでのエネルギー媒体として最も期待できるのが水素である。単体水素は天然に存在せず、何らかの方法で作り出さねばならず、そこに自然エネルギーを用いることで両者の欠点を克服することができる。

水素を用いたエネルギーシステムには様々な要素技術が考えられ、かつ、一般に環境負荷が小さいと言

われている。しかし、どの程度環境負荷が軽減されるのか、どのような技術の組み合わせで環境負荷が軽減できるのか定量的に評価することは重要である。環境負荷という側面から適正な技術の組み合わせが具体化してくるとともに、システムの軽減効果が大きいことを定量的に示すことができれば水素エネルギーシステムへの期待は大きくなる。

エネルギー輸送のひとつの形態として、水素のパイプライン輸送がある。ドイツでは1938年以来、パイプラインによる水素供給を実際に行っている例が報告されているが[1]、エネルギー輸送システムとして、システム全体の環境負荷をより定量的に扱った例はほとんど報告されてこなかった。

本研究では、要素技術の環境負荷をより定量的に求めることで、効率的な組み合わせとは何か、従来よりも環境負荷がどの程度軽減できるのかを定めることを目的として、環境I/O(産業連関分析法)(2)を用いて、水素製造の環境負荷と、2点間のエネルギー輸送において、送電線による電力輸送を比較対照に、パイプラインによる水素輸送の環境負荷を推計する事を目的とした。

2. 環境負荷評価方法

環境負荷を計算する方法のひとつに、産業連関分析を用いる方法がある[2,3]。これは、経済活動における産業部門/製品間の関連を、行列形式として表したものであり、5年ごとに作成され公表されている。この連関表の逆行列を用いることで生産1単位により誘発される生産額を算出することができる。さらに各部門/製品の個々の生産におけるCO₂の排出量を関連させておくことで、個別の生産1単位により誘発されるCO₂の排出量を推計することが可能となる[3]。また積み上げ法では組み入れることのできないサービス等の寄与も含めることができる。一方、製品の分類には限りがあり、その場合は、積み上げ法と産業連関法を組み合わせたハイブリッド法で波及を追跡することが一般に行われる。

2.1 水素製造・燃焼使用時の環境負荷

現在のエネルギー生産の状況を基に、水素、及びその他の1GJのエネルギーの製造と燃焼利用におけるCO₂誘発排出量を試算した。化石系エネルギーの生産では、産業連関表の分類項目から直接誘発量を算出できるが、項目としての水素は無いので、水素製造の方法に加え、一般的なエネルギー変換効率に基づき必要な項目を組み合わせることでCO₂誘発量の推計をおこなった。水素を水の電気分解で製造する場合は、火力、水力、原子力の現状の発電構成の割合を用いた場合に加え、それぞれ単独で発電した場合についても試算をおこなった。使用時のCO₂誘発量としてはそれぞれのエネルギーを単純に燃焼した場合を仮定した。よって水素の場合には直接燃焼によるCO₂の発生は無い。

2.2 水素輸送の環境負荷

送電線によるエネルギー輸送[4-9]では、送電電圧や送電方法、鉄塔が設置される場所の地形などにより、必要とされる物量は大きく異なるが、長距離で電力輸送に現在主に利用されている500kV送電について、現在の送電施設の平均的な部材量値を用いて推計を行った。パイプライン輸送では、電力と同じだけのエネルギーを燃焼により得ることを仮定し、同じエネルギー

一量の水素で輸送するためのパイプラインの配管径、送り出し圧力をパラメータとし、輸送におけるエネルギー損失と使用部材の製造における環境負荷の推定をおこなった。

送電におけるエネルギー損失には、オームの法則に従う抵抗損の他、送電電圧が上昇するに従い突起物などがある場合に発生するコロナ損があるが、抵抗損に比較すると無視する事ができる。三相3線式の送電での抵抗損 P_L は次式で計算される。

$$P_L = 3I^2RL \quad (1)$$

ここで、 P_L は抵抗損(W)、Rは電線一条の単位長さあたりの抵抗、Lは電線路の長さ、Iは負荷電流である。ちなみに、1950年頃、25%程度であった抵抗損も、最近では4~5%程度まで減少してきている。

水素のパイプライン輸送[10-17]では、輸送能力の算定に次式を用いた。

$$Q = K\sqrt{(P_1^2 - P_2^2)D^5/SL_H} \quad (2)$$

ここで、Qは流量、Kは流量係数(高圧の場合、経験式に基づきCoxの値、52.31を使用)、 P_1 、 P_2 は、それぞれ始点、終点における絶対圧力、Dは管内径、Sは水素の比重、 L_H はパイプ長さである。配管長さが長くなるにつれ圧力は低下し、エネルギー損失が生じる。この量は、次式で与えられる。

$$E_L = \lambda \frac{L_H}{D} \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

ここで、 E_L はエネルギー損失、 λ は管摩擦係数、 L_H は管長さ、Dは管内径、vは流量、である。一定量の水素の輸送を考えた場合、管内径が小さくなるにつれ、流量は増加し、それに伴うエネルギー損失は v^2 に比例して大きくなるのがわかる。輸送のための送り出しエネルギーは始点での圧力で決まるため、一定量の水素を輸送する場合、管内径、始点圧力により輸送可能距離は限定されることになる。さらに圧力に対して、鋼管の管厚は以下の式に従って求められる。

$$t = \frac{Pd}{200f\eta - P} + C \quad (4)$$

ここで、 t は管厚(mm)、 C は腐れ代(mm)、 P は設計圧力、 d は管径から腐れ代を除いた値、 f は管材の降伏点の最小値、もしくは 0.6kg/mm^2 、 S は安全係数 (1.7~2.5)、 η は継手効率 (0.6~1.0) である。圧力が増加するに従い、管肉厚は増加し、単位長さあたりの必要部材量は増加することになる。試算に当たっては圧力配管用炭素鋼管(STPG)規格を用いた。

本研究では、輸送時の環境負荷とエネルギー損失についてより定量的な比較をおこなうことを目的とし、送電における変電設備、また、水素パイプライン輸送におけるコンプレッサー電源やパイプラインの埋設等、損失分に輸送以外に必要な設備・組立における CO_2 誘発量については本試算では組み入れなかった。

3. 結果と考察

3.1 水素製造・燃焼使用時の環境負荷

試算した結果を表1に示す。表より、同じ 1GJ のエネルギーを燃焼で得るのに、どの一次エネルギーを使うかによって、直接間接に排出される CO_2 の量はかなり異なることがわかる。例えば、1GJ のエネルギーを化石エネルギーから得ようとする、その生産と消費(燃焼)の過程を通じて 51~133kg の CO_2 が発生する。同じエネルギーを水素で得る場合、2~786kg と幅が広い。これまで非常にクリーンな印象を持たれてきた水素であるが、直接燃焼で利用する場合の環境負荷は一次エネルギーに非常に大きく依存し、原子力発電と化石系一次エネルギーを用いた場合には当然のことながら CO_2 の発生量には 15~100 倍の差があることが理解される。ソーダ工業から発生する水素は、特に環境負荷が大きい。この場合、注意しなければならないのは、ソーダ工業において発生する水素

表1 エネルギーシステム別製造・消費により誘発される CO_2 量(kg- CO_2 /GJ)

	製造時	燃焼使用時	合計
製鉄用コークス(粘結炭)	4.218	86.717	90.935
一般炭	3.806	90.606	94.412
原油	1.148	68.418	69.566
天然ガス	1.865	49.393	51.258
ガソリン	8.185	67.078	75.263
ケロシン	2.315	67.867	70.182
軽油	4.257	68.664	72.920
A重油	2.115	69.294	71.409
B重油	2.001	70.486	72.487
C重油	1.779	71.651	73.430
ナフサ	2.048	66.614	68.662
液化石油ガス	1.927	59.852	61.779
コークス	24.914	107.739	132.653
都市ガス	4.243	51.111	55.353
水素(メタン部分酸化)	47.434	0	47.434
水素(水電気分解:現電源構成)	165.162	0	165.162
水素(水電気分解:原子力)	3.490	0	3.490
水素(水電気分解:石油火力)	270.694	0	270.694
水素(水電気分解:水力)	2.299	0	2.299
水素(ソーダ工業:現電源構成)	593.471	0	593.471
水素(ソーダ工業:原子力)	298.371	0	298.371
水素(ソーダ工業:石油火力)	786.100	0	786.100
水素(ソーダ工業:水力)	296.197	0	296.197

表2 500kV 送電と 50kg/cm²、30cm 管における 1km 当たりの部材量と CO₂ は排出量例

生産物	材料	量	単位	金額 (円)	部門番号	CO ₂ 排出量(t)
電線 610mm ² x2(ACSR)	アルミ線	40.75	t	26,089,512	2711-04	147.379
	鋼線	14.93	t	904,885	2621-01	18.367
地線 150mm ² (IACSR)	アルミ線	0.42	t	268,884	2711-04	1.518
	鋼線	0.69	t	43,475	2621-01	0.848
鉄塔 (2.258基/km)	鉄	248.38	t	15,649,927	2621-01	305.502
碍子 (540個/1基)	電気用陶磁器	10.24	t	81,938	2531-01	0.331
基礎	コンクリート	308.33	m ³	3,545,795	2522-01	76.841
送電におけるCO ₂ 排出合計量						550.788
配管(50kg/cm ²)内径30cm	継目無鋼管	67.748	t	6,575,382	2622-01	77.688
バルブ、フランジ類	配管工事付属品 ^{*1}	0.677	t	85,480	2899-03	0.303
パイプラインにおけるCO ₂ 排出合計量						77.991

*1 バルブ、フランジ類については、重量をパイプライン全体の1%として推計した。

は副産物であり、主生産物と負荷を分けて計算した場合には、副産物のみからの値はこれより小さくなることである。

3.2 水素輸送の環境負荷

表2に、500kV 送電、及びパイプラインにおける 1km 当たりの部材量と誘発される CO₂ 量の例を示した。表中、部門番号は、生産物の産業連関表の分類番号である。500kV 送電では、最大 4620MW の輸送が可能である。水素については HHV (最高カロリー) で、390m³NTP/s として換算した。

図1、2に、送り出し圧力が 30、50kg/cm² におけるエネルギー損失を輸送距離の関数として示した。輸送水素量が一定であるため、管内径に応じて送り出し圧力に相当するエネルギー損失が生じるまで輸送可能となる。送り出し圧力が 30kg/cm² のとき、今回の試算では、管内径がおよそ 60cm 強のところまで 500kV 送電のエネ

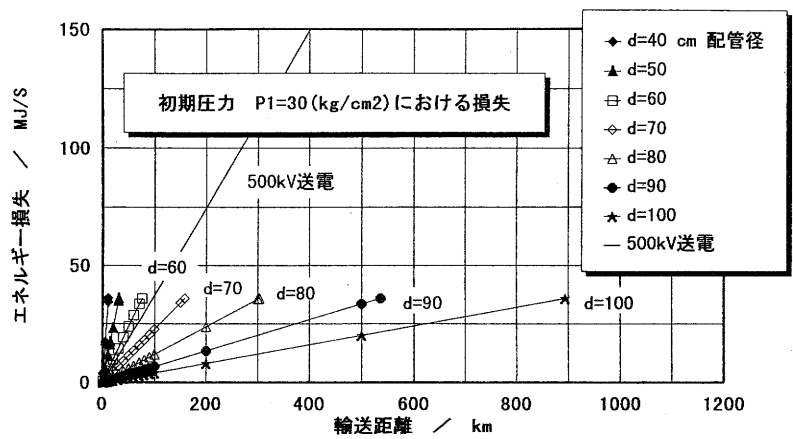


図1 送電損失とパイプラインによるエネルギー損失

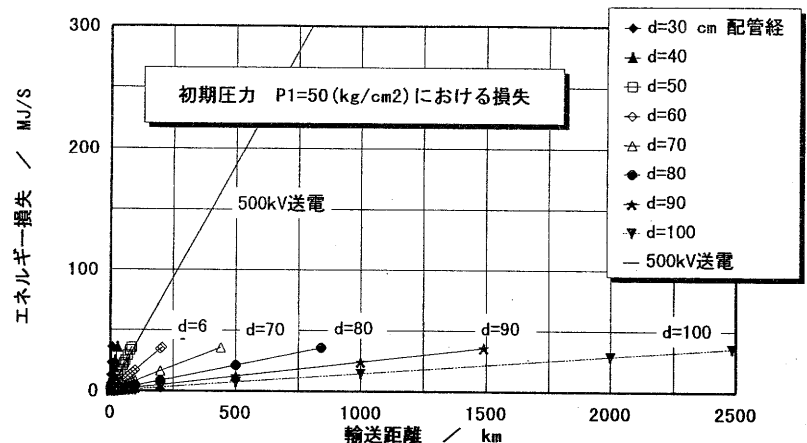


図2 送電損失とパイプラインによるエネルギー損失

ルギー損失とほぼ等しく、配管径がこれより小さいところではパイプライン輸送における損失は送電よりも大きい(図1)。送り出し圧力が 50 kg/cm^2 では、管内径がおよそ 50 cm のところで送電と同じ程度のエネルギー損失となり、より大きい口径管では水素による輸送が有利となる(図2)。

図3に、輸送距離 100 km あたりの 500 kV 送電と水素パイプライン輸送の CO_2 誘発量の試算結果を示した。図中、パイプラインのエネルギー損失が送電と等しいところ(境界A)、及びパイプラインによる輸送限界距離(例として、 500 、 1000 、 1500 km)を示した。管内径が同じ場合、水素の輸送距離が長距離になるほど、送り側圧力は高い圧力を必要とする。例えば、管内径が 90 cm の場合、 500 km の輸送には送り出し圧力はおよそ 30 kg/cm^2 、 1500 km の輸送には、 50 kg/cm^2 が必要となることがわかる。この図において、境界Aよりも下側の部分は、管内径が小さく、パイプライン輸送の CO_2 誘発量は少ないものの、エネルギー損失は送電より大きいことを示している。

さらに送電における CO_2 誘発量を基準にとれば、輸送距離がおおよそ 1000 km を超える部分については、パイプラインによる輸送の方がエネルギー損失は小さいものの、 CO_2 誘発量は送電の場合よりも大きくなる。しかし、 1500 km の輸送では送電におけるエネルギー損失はおおよそ 561 MW であり、全体の 12.1% 、水素では 90 cm 管におけるエネルギー損失はおおよそ 35.8 MW 、輸送エネルギー量の 0.8% に相当する。この差は大きく、表1の結果から、水素製造の CO_2 誘発量が水力や原子力を用いた場合非常に少ないこと、さらに送電損失分を余分に発電することを考慮すれば、パイプライン施設から誘発される CO_2 は多いものの、 1000 km を越える長距離エネルギー輸送においてもパイプライン輸送の方がやはり有利であると予想される。

実際のパイプラインシステムでは、途中で昇圧ステーションを設け圧送することが予想される。数百 km 程度までの輸送距離においては、およそ $50 \sim 60 \text{ cm}$

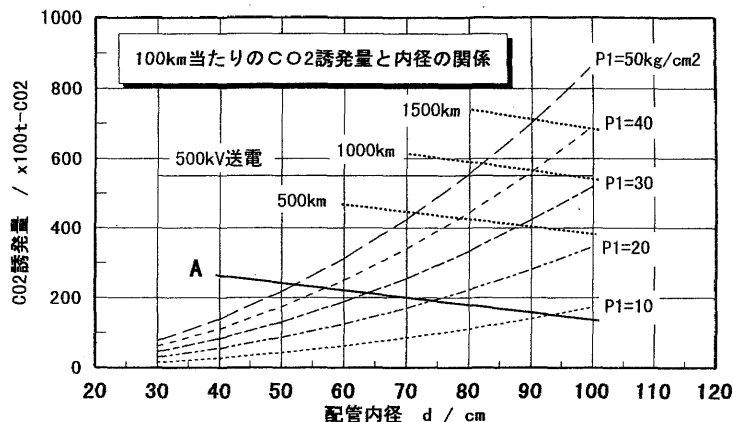


図3 500kV送電と水素パイプラインにおける CO_2 誘発量

程度の配管を利用することで、エネルギー損失も、 CO_2 誘発量もともに送電より小さく抑ええることができる条件が存在することがわかる。

4. まとめ

これまで、水素パイプラインによるエネルギー輸送は、長距離になればなるほど経済的に有利であるといわれてきた。本研究では、設備の環境負荷という観点からもエネルギー輸送の方法について比較・評価が可能であることを示した。今後、変電設備や水素の加圧システム等の付帯設備の環境負荷を加えるとともに、実際の実験データとの比較をおこなっていくことが必要であろう。

参考文献

- (1) 津留義通, エネルギー・資源, 13, 561-566 (1992)
- (2) 宮澤健一編, 「産業連関分析入門」, 日本経済新聞社, 1992.
- (3) 吉岡完治他, 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ「環境分析用産業連関表」, 慶應義塾大学産業研究所, 1997
- (4) (社) 資源協会, 「家庭生活のライフサイクルエネルギー」, あんほるめ, 1994, p.298-313.
- (5) (株) 東京電力資料「基幹送電線」1997, 「電力設備: 平成9年度版」
- (6) 電気学会通信教育会編「送電・配電」オーム社, 1988
- (7) 電気技術基準調査委員会編「架空送電線規定」(社) 日

本電気協会、1993

- (8) 小林 勲、「電気工事データブック」オーム社、1997
- (9) 飯塚喜八郎「新版電力ケーブル技術ハンドブック」電気書院、1989
- (10) 久保沢稔、小川誠一郎、「配管技術ハンドブック」、誠文堂新光社、1970.
- (11) エネルギー変換懇話会編「総合エネルギー工学⑦エネルギー開発工学」オーム社、1980.
- (12) J.O'M.Bockris「新エネルギーシステム -太陽エネルギーと水素への道」技報堂出版、1979
- (13) (社) 土木学会編「新体系土木工学 96 パイプライン」技報堂出版、1991.
- (14) 神谷貞吉「土木工学大成2 特殊構造物 I」、森北出版、1969.
- (15) 配管技術編集委員会編「配管技術ハンドブック」誠文堂新光社、1970.
- (16) 高橋治爾、築地徹治「流体の力学」日刊工業新聞社、1995.
- (17) 日本プラントメンテナンス協会装置工業PM委員会編「実践配管工事の進め方：観測から評価まで」日本プラントメンテナンス協会、1993.