

# 燃料電池水素エネルギーシステムの構成

小野 渉, 伊原征治郎

日本工業大学

〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

## A Study on the Structure of Fuel Cell Hydrogen Energy System

Wataru ONO and Seijiro IHARA

Nippon Institute of Technology

Miyashiro, Minami-Saitama, Saitama 345-8501

All kinds of energy resources, including intermittent energies such as solar radiation and the wind power, can be converted and unified into the one type of energy, namely hydrogen. Hence hydrogen fuel cells facilitate us to build an energy system that supplies robust, clean, and economical electricity. This paper reports investigations on the structure of fuel cell hydrogen energy system in the light of the best energy mix, and with the aid of Genetic Algorithm.

### 1. はじめに

地球環境問題と資源枯渇問題の動向は、太陽放射、風力、バイオマスなどの自然エネルギーの速やかな導入が必要であることを示唆している。これらの、豊富に存在する反面、希薄であり間欠的な自然エネルギーは、燃料電池水素エネルギーシステムによって導入促進をはかることが考えられる。

間欠性のある自然エネルギーは、水素に変換して貯蔵することで、時間的変動の制約を克服できる。このような水素を燃料とする発電のコストは、現在の電力系統においては、かなり高くなるが、以下の理由から、将来はむしろ経済的になる可能性がある。

最近、固体高分子電解質開発が著しく進歩しており、これによって、水電解および燃料電池の効率向上とコスト低下が、さらに進むことが見込まれる。また、潜在する環境コストを考慮すれば、水素経由の自然エネルギー発電が、化石燃料発電よりも相対的に有利になる傾向が見られる。そして、水素を燃料とする発電装置を用いて、太陽放射、風力、バイオマスばかりでなく、従来の化石燃料エネルギーも水素という種類の燃料を通して統合的に利用すれば、電源のロバスト性が高まるとともに発電コストが平均化されて、さらに経済性が向上することが期待される。

筆者らは、環境に調和するエネルギーシステムの主要な形態として、燃料電池水素エネルギーシステムに注目し、その経済的なシステム構成を研究している。本報告では、遺伝的アルゴリズムを援用して、さまざまなエネルギー資源の組み合わせの中から、経済性のある組み合わせを見いだす方法、およびその予備的結果を述べる。

### 2. システム概念とデータ

将来の主要な発電用燃料は天然ガス、石炭、および原子力とされている。近年はこのほかに、環境問題対策の観点から、太陽放射、水力、風力などの自然エネルギーの導入が提唱されている。Fig. 1に示すように、これらのエネルギー源はすべて水素エネルギーに統合して、燃料電池を介して電力に変換することができる。天然ガスと石炭は水蒸気添加改質法によって、また、原子力、太陽放射、水力、および風力は発電電力で水を電気分解して、それぞれ水素に変換できる。

このような燃料電池水素エネルギーシステムを、できる限り環境問題が少なく、かつできる限り経済的に構築するために、さまざまな技術を組み合わせて詳細に構成したシステム案を比較する必要がある。ここでは、一次エネルギー構成の部分を、Table 1に示すデータを用いて予備的に検討する。

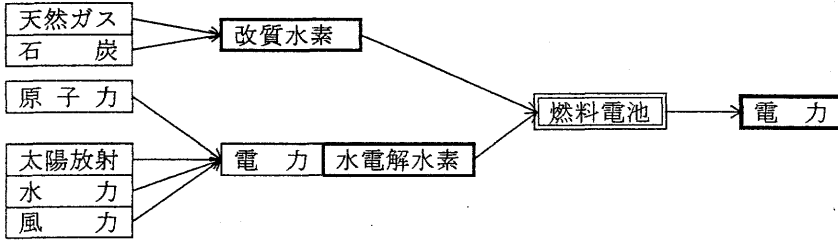


Fig. 1. The Concept of Fuel Cell Hydrogen Energy System.

経済性の評価基準には、発電コストと環境コストを用いた。環境コストは文献資料によって様々な値が示されているが、ここでは文献 2、および文献 4 の小さい方の値を使用する。

3. 組み合わせ研究の方法

組み合わせ最適化問題の簡便な解法として、生物の遺伝と進化の過程を模倣した遺伝的アルゴリズム<sup>6)</sup> (Genetic Algorithm—GA) がある。一次エネルギーの組み合わせ検討に、この GA を使用する。GA は、複数の親システムをそれぞれ遺伝子記号的に表現し、遺伝子交叉と突然変異を模擬したランダムな組み合わせを導入する操作により、子孫システムを生成させる。環境に対して適応性が高い子孫システムを残して次世代の親とし、適応性が低い子孫は淘汰して消滅させるというプロセスで、システムを再生操作する。適応性の指標として適合値を定義し、この値が再生操作を繰り返しても変化しなくなった時点で、生成されているシステムを比較して、適切なシステムを選び出す、と

いう方法である。

システムの組み合わせ最適化問題を解くために、まず、進化させる個体の情報 (システムの表現) を遺伝子型に記号化 (コーディング) する。Fig. 2 は表現型から遺伝子型へのコーディングと、遺伝子型から表現型へ戻すデコーディングの概念を示す。遺伝子型はエネルギー資源の数  $n$  より、 $n$  次のバイナリ数で表す。遺伝子の状態は 0 または 1 の変数により決定する。コーディングされた文字列の 1 と 0 が表す意味は、エネルギー資源を選択するとき 1、選択しないときに 0 であり、各ビットは左側から順番にエネルギー資源に対応している。このように表現した遺伝子型を持つ個体集団を、上に述べた操作により再生進化させる。

個体を選択する際に、適合値が最大の個体はそのまま次世代に残すようにする (GA ではエリート戦略という)。適合値が高い個体とは、ここではエネルギー変換コストが低いシステムに相当する。すなわち、燃料電池の発電出力 1 kWh 当たりの平均発電コストの逆数を適合値として、この値がなるべく大きくなるように組み合わせを作る。

Table 1. Cost data used for the system study.

化石燃料改質水素コスト [¥ / kWh·Hz]		
	製造コスト <sup>1)</sup>	環境コスト <sup>2)</sup>
天然ガス改質水素	2.17	2.62
石炭改質水素	4.01	4.60
発電コスト [¥ / kWh <sub>e</sub> ]		
	発電コスト <sup>3)</sup>	環境コスト <sup>4)</sup>
原子力発電	9	10.06
太陽光発電	25	0.77
水力発電	13	1.00
風力発電	42	0.17
固体高分子電解質型水電解プラント <sup>5)</sup>		
設備費 80,000 ¥ / kW, 年経費率 0.0872, 稼働率 90 %, 効率 93 %		
固体高分子電解質型燃料電池 <sup>5)</sup>		
設備費 140,000 ¥ / kW, 年経費率 0.0872, 稼働率 90 %, 効率 60 %		

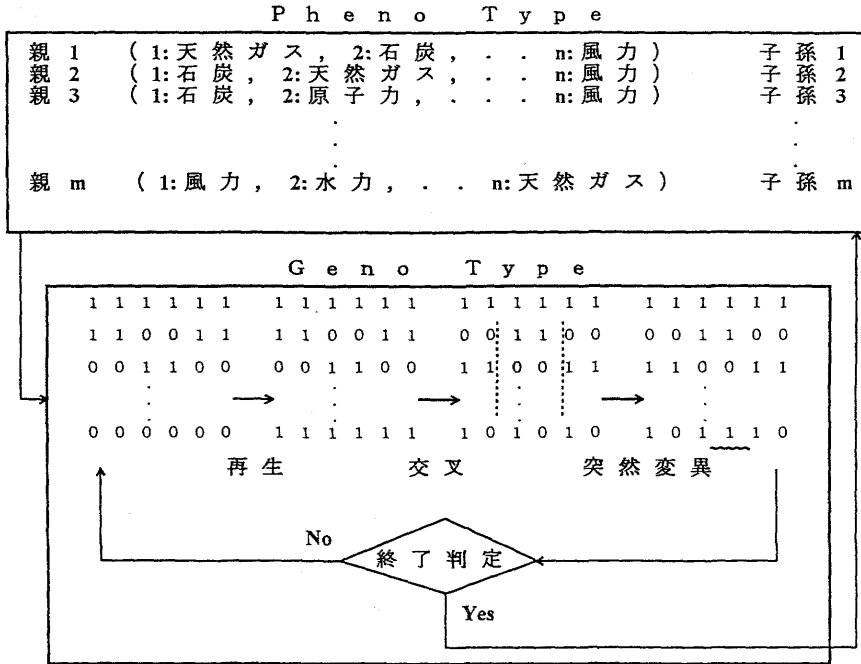


Fig. 2. Coding and Decoding in the Genetic Algorithm.

平均発電コストには環境コストも含め、次のように算出する。まず、一次エネルギー*i*種 (*i*=1, 2, …, *n*) の最終発電コストを、それぞれ次の式で求める。天然ガスおよび石炭では、

$$C_i = (b_i + e_i) / \eta_1 + FC \quad (1)$$

$$a_i = e_i / \eta_1 \quad (2)$$

原子力、太陽放射、水力、および風力では、

$$C_i = \{(b_i + e_i) / \eta_2 + WE\} / \eta_1 + FC \quad (3)$$

$$a_i = e_i / \eta_1 \eta_2 \quad (4)$$

ただし、 $C_i$ =エネルギー変換コスト、 $a_i$ =環境コスト、 $b_i$ =改質水素製造コストまたは発電電力コスト、 $e_i$ =環境コスト、 $\eta_1$ =燃料電池発電効率、 $\eta_2$ =エネルギー変換効率、 $WE$ =水電解設備コスト、 $FC$ =燃料電池設備コストである。

すなわち、一次エネルギーが天然ガスおよび石炭の場合は、それぞれ、改質水素コスト  $b_i$  に環境コスト  $e_i$  を加えて燃料電池効率  $\eta_1$  で割った値を、水素燃料コストとして、これに燃料電池設備コスト  $FC$  を加算して最終発電コストを求める。また、原子力、太陽放射、水力、および風力が一次エネルギーの場合は、それぞれ、発電電力コスト  $b_i$  に環境コスト  $e_i$  を加えて水電解プラント効率  $\eta_2$  で割った値を水素製造電力コストとし、これに水電解設備コスト  $WE$  を加えた値を水

素燃料コストとする。その値を燃料電池効率  $\eta_1$  で割り、 $FC$  を加えて最終発電コストを求める。

平均発電コスト  $F$  は、各一次エネルギーの最終発電コスト  $b_i$  と環境コスト  $e_i$  に、それぞれのエネルギー需要比率  $d_i$  を乗算して加え合わせた値  $f_i$  の総和とする。すなわち、

$$f_i = C_i \cdot d_i + a_i \cdot d_i \quad (5)$$

$$F = (f_1 + f_2 + \dots + f_n) \quad (6)$$

ただし、 $d_1 + d_2 + \dots + d_n = 1$  である。 $f_i$  は、システムの単位出力当たりの発電コスト中、*i* 種のエネルギーによる発電コストの部分の意味する。

システムの平均発電コストは低い方が、社会への適応性が高いと見なせるから、

$F$  の値の逆数を取り、

$$G = 1/F \quad (7)$$

として、 $G$  をエネルギーシステムの適合値と定義する。

システムの組み合わせ生成 (遺伝子交叉) は、Fig. 2 の点線で示したような位置 2 箇所を選び、その間の記号情報を入れ替える操作 (2 点交叉法) によって行う。親システムのうち、 $G$  の値が高い順に 20 % を残り、それらをそのまま次世代の親システムとする。残り 80 % のシステムは、2 点交叉法によって部分的に

Table 2. Cost data used for the GA

	エネルギー資源	比率	発電コスト [¥/kWh]	環境コスト [¥/kWh]
親 1	石炭	0.50	7.910	3.835
	天然ガス	0.35	3.308	1.530
	水力	0.05	1.401	0.090
	原子力	0.10	3.727	1.803
	合計	1.00	16.346	7.258
	適合値		0.061	
親 2	石炭	0.70	11.074	5.370
	太陽放射	0.25	12.280	0.350
	水力	0.05	1.401	0.090
	合計	1.00	24.755	5.810
	適合値		0.040	
親 3	太陽放射	1.00	49.120	1.380
	合計	1.00	49.120	1.380
	適合値		0.020	
親 4	太陽放射	0.70	34.384	0.966
	水力	0.15	4.203	0.269
	風力	0.15	11.775	0.045
	合計	1.00	50.362	1.280
	適合値		0.020	

組み替え、新しい親システムとする。個体(システム)数の50%を乱数で選び、残りの50%と2点交叉させ、生成された子システムのGの値が低い方から20%のものの遺伝子型を部分変異(突然変異)させる。突然変異は、システムの記号情報(遺伝子型)の1箇所をランダムに選んで新しい情報に置き換えることで、新しい親システムを生成することである。

ここで、システムが環境へ及ぼす影響の制約条件として、環境コストの最大許容値を設け、その値以下になるシステムを残すようにする。最大許容値を袋の容量に見立て、エネルギー種ごとの環境コストを荷物に対応させ、袋に荷物を詰めるという類比から、このような問題をナップザック問題と呼び、この場合、環境コストの最大許容値をナップザック容量と定義する。現在、環境コストの許容値に関する一般的な合意は得られていないので、この検討では、化石燃料の中で最もクリーンとされる天然ガスについて報告されている環境コスト4.37 ¥/kWhをナップザック容量とした。

以上の操作を、世代が変わっても、適合値G(最終発電コストの逆数)の最大値が変化しなくなるまで繰り返す。要約すると、システムの組み合わせの最適

化は、次のような形式になっている：

$$\text{minimize } [f_1 x_1 + f_2 x_2 + \dots + f_n x_n] \quad (8)$$

$$\text{subject to } (a_1 d_1 x_1 + a_2 d_2 x_2 + \dots + a_n d_n x_n) \leq 4.37 \quad (9)$$

ただし、 $x_i$ は0または1の値を取り、 $i$ 種のエネルギーが選択される時1、選択されないときに0である。つまり、システムの環境コストの許容範囲を与える(9)式の制約下で、(8)式が表すように、システムの単位出力当たりの電力コスト(最終発電コスト)を最小にする一次エネルギー構成を選ぶ。

#### 4. 結果および検討

GA操作の初期値を与える親システムとして、4種類のシステムを仮定した。Table. 2は、それら親システムにおける一次エネルギー需要の構成比率と、(1)~(7)式を用いて求めたそれぞれのシステム適合値(発電コスト)、およびナップザック値(環境コスト)を示す。エネルギーシステムのコストを試算する場合、一般的には、輸送と貯蔵のコストも考慮すべきであるが、ここではエネルギーキャリアがすべて水素である

Table 3. Output data from the Genetic Algorithm.

子孫	一次エネルギー比率					最終発電コスト F ¥/kWh	環境コスト a r*d i ¥/kWh
1	LNG 0.35	原子力 0.1	風力 0.15	水力 0.15	PV 0.25	35.3	4.0
2	石炭 0.5	水力 0.15	水力 0.05	風力 0.15	風力 0.15	37.1	4.3
3	PV 0.7	水力 0.15	水力 0.05	原子力 0.1	—	43.7	3.1
4	石炭 0.5	風力 0.15	風力 0.15	風力 0.05	水力 0.05	44.6	4.1
5	PV 0.7	PV 0.25	水力 0.05	—	—	48.1	1.4

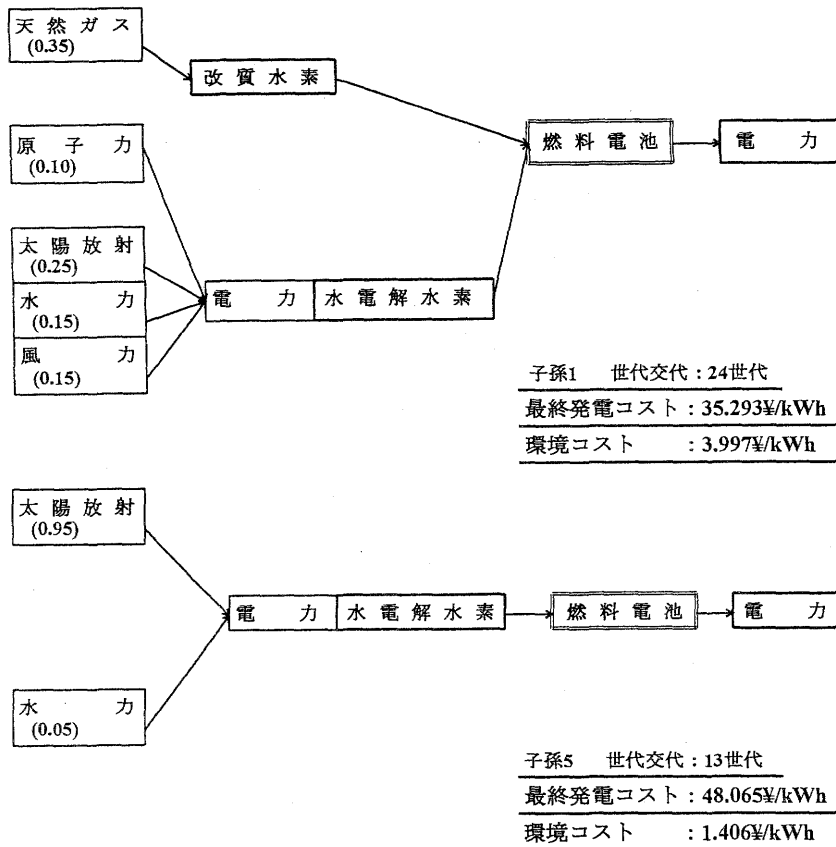


Fig. 3. Optimized Primary Energy Structure of Fuel Cell Hydrogen Energy System.

ことから、これらを省略した近似で考える。

GA 操作によって生成されたシステムを観察すると、13 世代目にナップザック値（環境コスト）最小のシステムが現れ、24 世代目に適合値（最終発電コスト）最大のシステムが現れた。Table. 3 は、24 世代目のシステム 5 種類を示す。この中から適合値最大のシステム（子孫 1）と、ナップザック値最小のシステム（子孫 5）を Fig. 3 に示す。

最終発電コストが最も低い子孫 1 は、天然ガスと自然エネルギーと原子力の組み合わせを一次エネルギーとする。このシステムは、Table. 2 の親 1 と親 4 を交叉させた子システムの系列である。このように、遺伝的過程で自然エネルギーの比率が増えて石炭が消え、環境への影響が許容範囲に収まる最も経済的な構成に進化している。

環境コストが最も低い子孫 5 は、太陽と水力を一

次エネルギーとする、日本では実現の可能性が低いと思われるシステムである。これは、親 2 と親 3 を交叉させたシステムの系列で、最終発電コストは 24 世代目の子孫の中では最も高いが、第 1 世代の親 3 および親 4 (Table. 2) よりも経済的な方向に進化したことを示している。

以上の結果は、化石燃料の中で最もクリーンとされる天然ガスに対して試算された環境コストを許容範囲としたものである。エネルギー利用の環境影響をさらに少なくする場合には、子孫 3 から子孫 5 のようなシステムの方向に進化する。逆に、環境影響がもっと多くても良い場合には、石炭や天然ガスの比率が加わって一次エネルギーが多様化する方に進化する。

## 5. おわりに

燃料電池水素エネルギーシステムの一次エネルギー構成を、環境コストも考慮に加えて、発電コストの観点から研究した。エネルギー利用の環境影響を最小にする理想的なシステムの一次エネルギーは、太陽と水力であるが、比較的实现の可能性が高い経済的な一次エネルギー構成は、天然ガスと自然エネルギーと原子力を特定の比率で組み合わせたものとなる結果を示した。

この結果は、さらに詳細に検討する必要がある。たとえば、エネルギー資源量や、自然エネルギーおよび電力負荷の時間的変動を制約条件に取り入れると、経済的なシステム構成がどのように変わるかというこ

とが、実際のシステムを評価する際に重要である。これについては、時間的変動に適応するシステムをモデル化して評価するために、遺伝的アルゴリズムだけでは方法が不足するので、ニューラルネットワーク<sup>7)</sup> (Neural Network) の方法を加え、ニューロジェネティックアルゴリズム (Neuro-genetic Algorithm) とも言うべき方法で検討を進めている。

## 参考文献

1. 天然ガス改質は J.H. Kelly and E.A. Laumann, Hydrogen Tomorrow, Report of the NASA Hydrogen Energy Systems Technology Study, Jet Propulsion Laboratory (1975), p.99.より,石炭改質は文献2より,それぞれ換算.
2. F.Barbir, T.N.Veziroglu and H.J.Plass, Jr., Int. J. Hydrogen Energy, 15, 739-749, 1990.
3. 原子力,水力は総合エネルギー統計,平成3年度版 p.457. 風力は柏木他,エネルギーシステムの法則,産調出版, p.183 (1996). 太陽光発電は水上,太陽光発電導入普及マニュアル,エイムズ, p.34 (1995).
4. O. Hohmeyer, Energy Policy, 365-375, April 1992.
5. 伊原,菅原,水素エネルギーシステム, 22, No.1, 33-38, 1997.
6. 例えば,坂和,田中,遺伝的アルゴリズム,朝倉書店, 1995.
7. 例えば,電気学会編,遺伝アルゴリズムとニューラルネットワーク,コロナ社,1998.