

PEM 燃料電池の学習曲線によるコスト分析

植屋治紀

株式会社システム技術研究所

〒103 東京都中央区東日本橋 2-1-6

A Study of PEM Fuel Cell Cost by Learning Curve

Haruki TSUCHIYA

Research Institute for Systems Technology

2-1-6, Higashi Nihonbashi, Chuouku, Tokyo

The PEM fuel cell cost for vehicle application in massive production is analyzed by learning curve. In order to apply learning curve, the progress ratios and the bottom line cost of each element, such as proton exchange membranes, platinum, electrodes, bipolar plates and peripherals are estimated. Learning curve calculation was performed for the case of cumulative production of 50 thousands vehicles in 2010 and 5 millions in 2020. The results showed that the fuel cell stack cost could be reduced to the same level as that of internal combustion engine today and that power density improvement and cost reduction of bipolar plates and electrode are effective for reducing total cost of fuel cell stack.

Key Words: PEM Fuel Cell, Learning Curve, Progress ratio, Massive Production

1. はじめに

最近急速に発展している PEM (固体高分子形) 燃料電池は、自動車、家庭用コージェネレーション、モバイル機器などに利用できる技術として多方面から期待されている。[1] すでに 2002 年以内に燃料電池自動車が発売される予告が行われている。燃料電池の構造は同一形状のセルを多数積層することから大量生産に適し、一度大量生産が始まるとそのコストが大幅に低下する可能性がある。燃料電池のコスト構成とその量産可能性を検討し、大量生産によるコスト低下の様子を学習曲線により分析したので報告する。

2. 学習曲線

学習曲線とは、経験曲線とも呼ばれ、累積した知識や経験についての人間の活動をマクロに記述するもので、工

業製品のコスト低下の分析に利用されている。過去の多くの工業製品に関する実測結果から、以下のような学習曲線の原理が導き出されている。「累積生産量が2倍になるとき、生産コストや生産に要する時間が一定割合だけ低下する」[2] 学習曲線の例を図1に示す。学習曲線を定式化すると以下ようになる。

$$Y_n = A X_n^{-r} \quad (1)$$

ここで

Y_n : n 番ユニットの単位あたりのコスト

X_n : 1 から n 番ユニットまでの累積生産量

A : 1 番ユニットの生産コスト

r : 累積生産に伴うコストの減少割合を示す変数

X_a と X_b という二つの時期の累積生産量 (Y_a, Y_b) がちょうど 2 倍になる場合に、進歩指数 (Progress Ratio)

F を以下のように定義する。

$$F = Y_b / Y_a = (X_b / X_a)^{-r} = 2^{-r} \quad (2)$$

$$X_b = 2X_a \quad (3)$$

r は直感的にわかりにくく、Fのほうを理解しやすい。

r と F は以下のような関係がある。

$$r = -\log F / \log 2 \quad (4)$$

進歩指数 F は累積生産量が 2 倍になるときのコスト低下の割合を示している。この値が小さければそれだけコスト低下の度合いが大きい。F と r の関係を表 1 に示した。

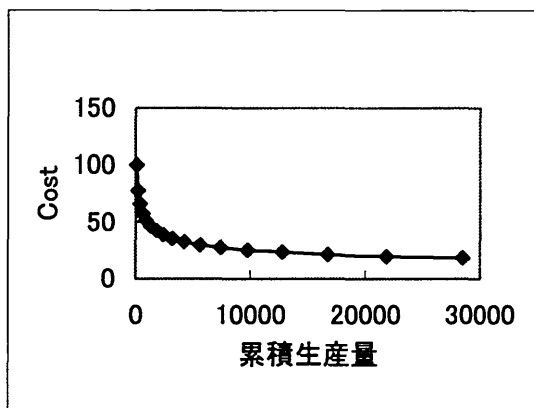


図 1 学習曲線

表 1 F と r の関係

F	r
1.00	0.00000
0.95	0.07400
0.90	0.15200
0.85	0.23447
0.80	0.32193
0.75	0.41504
0.70	0.51457

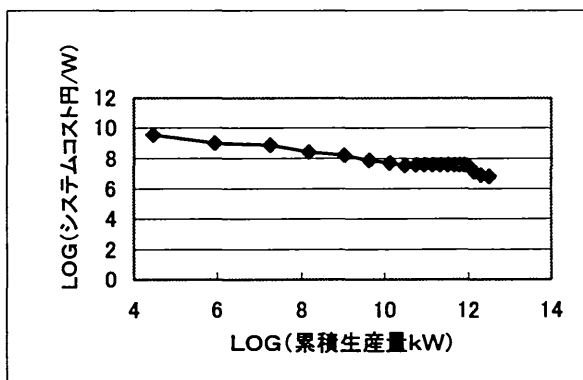


図 2 太陽電池の学習曲線

進歩指数 F を % で示す場合が多い。F の計測値の例として、フォード社の T 型フォードは 1909 年から 1918 年まで 85% であり、ソニーのレーザーダイオードは初期段階では 75%、その後 85% の進歩指数を示している。[3] 日本の太陽電池については図 2 に対数関係で示すように、学習曲線がよく適合し 1979 年から 20 年間に、進歩指数は 82% であった。[4] 進歩指数 F は、一般に資本集約的産業では小さく、労働集約的産業では大きい。過去の計測によれば、半導体産業では 70—85%、機械組立て産業では 80—95% 程度とされている。各種データをみると、一般的に進歩指数は 70% 以下にはならないようである。

学習曲線は過去の製造コストの分析に用いるツールとして利用されていたが、最近では、量産が行われた場合の将来のコスト分析にも利用されている。表 2 に示すように学習曲線を燃料電池の将来のコストへ適用した例がある[3] いずれも燃料電池コストを全体としてマクロに捕らえたものであった。[5] 本研究では燃料電池の各要素のコストについて学習曲線を適用して量産時のコストを分析する試みを行った。

表 2 学習曲線による燃料電池コストの評価[3]

累積生産レベル (MW)	F=75% (ドル/正味出力 kW)	F=80% (ドル/正味出力 kW)	F=85% (ドル/正味出力 kW)
5	1,8000	2,0000	2,200
10	1,350	1,600	1,870
100	519	726	1,090
1,000	199	363	635
10,000	77	173	370
100,000	37	82	215
1,000,000	37	39	125
10,000,000	37	37	73

3. 燃料電池スタック

PEM (固体高分子型) 燃料電池スタックのセルは、イオン交換膜、電極、セパレータ (バイポーラ・プレート) からなり、さらに周辺部品がある。プラチナなどの触媒は電極に含まれるが、ここではそのコストを区別して取り扱った。セルの電力密度を利用して、スタックのコストを以下のように記述することができる。

$$C = (C_m + C_e + C_b + C_{pt} + C_o) / P + C_a \quad (5)$$

$$C_{pt} = C_{wpt} * Y_{pt} \quad (6)$$

- $P=10 * V_c * A_c$ (7)
- ここで、
 C : 燃料電池スタック・コスト (ドル/kW)
 C_m : イオン交換膜コスト (ドル/m²)
 C_e : 電極コスト (ドル/m²)
 C_b : セパレータコスト (ドル/m²)
 C_{pt} : プラチナ触媒コスト (ドル/m²)
 C_{wpt} : プラチナ使用量 (g/m²)
 Y_{pt} : プラチナ単価 (ドル/g)
 C_o : 周辺部品コスト (ドル/m²)
 P : セル面積あたり電力密度 (kW/m²)
 C_a : 組立てコスト (ドル/kW)
 V_c : セル電圧 (V)
 A_c : セル電流密度 (A/cm²)

この記述では、セルの数は明示的に表れていない。電極、セパレータ、周辺部品のコストは電力密度の大きさに依存しないものとしている。イオン交換膜の性能とプラチナの使用量とは、電力密度と強い関係があり、このためもしイオン交換膜の性能向上とコスト低下が同時に生じるとする場合には、全体としての進歩指数が経験的な範囲にあるかをチェックする必要がある。

現状における代表的な燃料電池の単セルでの平均的な性能は、セル電圧0.6-0.7V、電流密度0.3-0.4A/cm²であり、電力密度はほぼ2kW/m²に相当する

4. コスト構成

燃料電池スタックのコストを学習曲線によって分析するには、①現状のコスト構成、②最終的なボトムラインコスト、③初期の累積生産量とコストの3点の情報が必要である。以下にはこれらについて述べる。

① 現状のコスト構成

イオン交換膜は最も重要な研究開発の対象になっている。デュポン社のNafion膜は現状では100μ厚で500ドル/m²であるが、デュポン社の専門家は年間15万台の自動車生産時には50ドル/m²になるとしている。ADL報告によると30m²のセル面積で50kW出力のイオン交換膜コストが59ドル/m²になるとしている。[6]膜はより薄くて強度のあるものが求められており、将来は20-50μ厚になる可能性が高い。膜の重量は小さく、大規模な量産時には原材料コストが重要になるので、膜のコストが占める割合は小さいと予想される。MEA(膜と電極のアセ

ンブリー)におけるプラチナ必要量は2-4g/m²であり、32-64ドル/m²である。最良の実験結果はロスアラモス研究所で得られており、およそこの10分の1の量になっている。

電極は、水素や空気が通過できるポーラスなカーボン・ペーパーまたはカーボン・クロスである。MEAの厚みは0.8mm程度であり、重量は340g/m²とした。ADL報告によると電極コストは177ドル/m²に低下すると予測している。現状におけるMEA製造工程は非常に複雑であるが、本研究では工場で大量に量産できるものとした。

表3 燃料電池スタックの重量構成

	重量構成 (%)
イオン交換膜	1.76
電極	7.87
プラチナ	0.005
セパレータ	78.7
周辺部品	11.7
合計(3.77kg/m ²)	100.00

セパレータ(バイポーラ・プレート)は電気伝導性を持ち同時にガスを通過させず腐食しない材料が求められている。現状の設計では、グラファイト・シートにガスが通過する蛇のような流路をNC工作機械で加工している。この製造工程は極めて時間がかかりコスト増加の原因とされている。セパレータのコストを下げるために、カーボン・コンポジット、ポリマー充填グラファイトの射出成型、あるいはステンレスやチタンなど金属の利用が研究されている。表3に示すようにセパレータは全体重量の80%を占めている。大量生産が進展してゆくと、スタックコストは原材料コストへと近づいてゆくので、現状の設計のままでは、セパレータのコストがスタックコストを支配する可能性が高い。周辺部品としてはエンド・プレート、プラスチック・フレーム、スラスト・ボルトがあり、その重量は0.5kg/m²である。これらには普通の材料が利用されている。組立て作業は、自動車用の50kWのスタックを年間1万8千台組み立てられる工場を想定して検討した。生産ラインはロール状のシート処理機械と組立てロボットからなっている。この組立て作業は数多くのセルを積層する作業なので時間がかかる工程である。

② 最終的なボトムライン・コスト

学習曲線による計算は幾何級数的な特性のため、ときにはコストが小さくなりすぎて現実的でなくなる可能性がある。そこで、一般には、あらかじめ最低限のコストを検討しておき、それより低下しないようにする。

表4 各要素の現状、将来およびボトムライン・コスト

要素	現状	将来	ボトムライン
イオン交換膜	Nafion 100 ミクロン \$500/m ²	厚さ 20-50 ミクロン 量産で\$50/m ²	厚さ 50 ミクロンで60 cents/m ²
プラチナ	2-4g/m ² \$32-\$64/m ²	0.2-0.4g/m ² (現状で最良の実験結果) \$3.2-\$6.4/m ²	0.2g/m ² , \$3/m ² 以下になると期待される
電極	単セルあたり厚み 0.8mm以下 0.8 mm. \$1423/m ²	ロールシート 生産 \$96/m ²	\$2.58/m ²
セパレータ	単セルあたり厚さ 4mm. \$1650/m ²	モールディング \$35/m ²	厚さ 4mmのとき \$13.6/m ²
周辺部品	エンドプレート、スラストボルト、プラスチックフレーム 0.5kg/m ² , \$15.4/m ²	通常の材料 0.5 kg/m ²	\$3.46/m ²
組立て	ハンドアセンブリ \$385/50kW	自動組立て。膜と電極をロール供給、ロボットによるスタック積層	生産ラインを仮定して計算 \$94/50kW \$1.88/kW

まず考えられるコストの下限は原材料コストであり、一般に知られている原材料コストは、例えば、1kgあたりスチールでは50セント、プラスチックでは1-2ドル、銅やアルミでは3ドル程度である。自動車産業で広く知られている部品コストは、原材料コストよりはや高く、スチール、非鉄金属、プラスチック、ガラスなどで量産した場合に、1kgあたり8ドル程度である。(1ドル=130円とした) ここでは、この部品コストの数字をボトムライン・コストとした。これらの数値を整理すると、表4のようになる。

③ 初期の累積生産量とスタックコスト

学習曲線の計算を行うにあたっては、初期の累積生産量とそのコストが必要である。日本における2000年の累積生産量として50kW規模の自動車用スタックが40台あり、部品の積み上げ計算により1833ドル/kWであるとした。

コスト低下のための設計法としては、電力密度の向上が重要であるが、他にも検討できることは多い。ボルトを

使わずにセルを積層する方法が可能になれば有効である。セパレータはもろく、ボルト締め積層構造は振動に弱く、電気的接触を均一にするのに困難がある。軽量化のためには、セパレータを薄い平板にして電極側へガス流路をつける、あるいは、電気抵抗の大きなカーボン材料に代わる材料を利用などが考えられる。重量構成の多くの部分を占めているセパレータそのものを不要にすることも検討できよう。組立てコストの減少のためには、セルの数を減らしたい。そうすると組立てコストと組立て時間は減少するが、出力電圧が低くなる。そこで電流密度の設計点を上げなければならなくなり、最適な設計点はどこにあるかを模索する必要がある。このような新しい設計法の進展によって予想以上にコスト低下が生じる可能性がある。

5. 学習曲線による計算結果

学習曲線によって燃料電池スタックのコスト低下の可能性を検討する。燃料電池スタックの目標コストは、環境への影響を評価しなければ、既存の内燃機関と同等のコストすなわち、40ドル/kWである。普及可能規模として、日本の燃料電池推進協議会は、公式に燃料電池自動車が2010年に5万台、2020年には500万台普及するとしている。以下には、これらの数字を累積生産量と考えて、シナリオを構成した。

燃料電池自動車の生産量は2000年から2010年までは年率104%で増加し、2010年から2020年までは年率58%で増加するものとした。基本的には学習曲線の計算は時間とは無関係であり累積生産量がわかればよい。しかしここでは、2010年と2020年の累積生産量を与えたので、その途中で累積生産量が増加してゆく時間的な過程との対応を示すことにした。

3種類の電力密度の向上(H, M, L)と3種類のコスト低下速度(A, B, C)の組み合わせから、9種類のシナリオHA, HB, HC, MA, MB, MC, LA, LB, LCを検討した。表5にシナリオ構成を示す。

電力密度の向上は、1m²あたり2kWから始まって累積生産量が500万台になるとき、5kWへ(Hシナリオ)、4kWへ(Mシナリオ)、3kWへ(Lシナリオ)の3種類を想定した。電力密度の向上は、電極やセパレータの他の資源必要量を増加させずに実現可能であるので重要な要素である。

表5 シナリオ構成

シナリオ	高出力密度(H)	中出力密度(M)	低出力密度(L)
急速(A)	HA	MA	LA
穏やか(B)	HB	MB	LB
低速(C)	HC	MC	LC

電力密度向上の過程は学習曲線として計算でき、そのときの進歩指数 F は、各シナリオについて F=94.5% (H)、F=96% (M)、97.5% (L) になる。コスト低下速度は、イオン交換膜、電極、セパレータについて、進歩指数 F を、F=78% (A: 急速シナリオ)、F=82% (B: 緩やかシナリオ)、F=88% (C: 低速シナリオ) とした。

プラチナ担持量は、現状の 0.4mg/c㎡からはじまり、2020年にはシナリオAでは0.05mg/c㎡に(F=89%に相当)、シナリオBでは0.1mg/c㎡に(F=92%に相当)、シナリオCでは0.2mg/c㎡になる(F=96%に相当)ものと想定した。学習効果がもっとも高いのはシナリオHAであり、このとき組み合わせによる進歩指数は94.5% (H) x 78% (A) = 73.7%となり、経験的に知られている範囲になっている。

いずれのシナリオでも周辺部品の進歩指数 F=95%、組立てコストの進歩指数 F=92%と仮定した。ボトムラインコストをコスト低下の下限とし、計算の途中でこの数値を下回るときにはボトムラインコストに置きかえるようにした。

表6は、9種のシナリオの計算結果をまとめたものであり、累積生産量が5万台になるときと、500万台になるときの1kWあたりのスタックコストを示した。スタックコストは、シナリオによって異なるが、2020年には、1kWあたり15ドルから145ドルになった。計算の途中でコスト低下がボトムラインに達したのは、セパレータのみであり、シナリオHA,MA,LAの場合で2020年次のみであった。

コスト構成の変化をみると、いずれのシナリオでもセパレータと電極のコストが初期には圧倒的であるが、次第にプラチナ、周辺部品、組立てコストがシェアを増してゆくことがわかる。

表7には、9種のシナリオのなかで中間的な結果となる

シナリオMBの場合のコスト構成を示した。

表6 燃料電池スタックコスト (\$/kW) (上段は累積生産量5万台,下段は累積生産量500万台のとき)

シナリオ		高出力密度(H) 2 to 5kW/m ² F=94.5%	中出力密度(M) 2 to 4kW/m ² F=96%	低出力密度(L) 2 to 3kW/m ² F=97.5%
	進歩指数/Pt loading	スタックコスト(\$/kW)	スタックコスト(\$/kW)	スタックコスト(\$/kW)
急速(A)	F=78% Pt:0.4 to 0.05mg/c㎡	88 15	103 19	121 25
穏やか(B)	F=82% Pt:0.4 to 0.1mg/c㎡	143 30	167 38	196 49
低速(C)	F=88% Pt:0.4 to 0.2mg/c㎡	285 88	334 114	392 145

表7 シナリオMBのコスト構成の変化

	初期		累積5万台のとき		累積500万台のとき	
	\$/kW	%	\$/kW	%	\$/kW	%
イオン交換膜	250	13.6	21.33	12.8	4.35	11.3
電極	712	38.8	60.69	36.3	12.38	32.3
セパレータ	825	45.0	70.37	42.1	14.36	37.5
周辺部品	8	0.4	2.98	1.8	1.62	4.2
プラチナ	31	1.7	8.57	5.1	3.76	9.8
組立て費	8	0.4	3.26	1.9	1.87	4.9
合計	1834	100.0	167.2	100.0	38.34	100.0

シナリオMBを見ると、2010年の累積生産量5万台の場合で、燃料電池スタックコストは167ドル/kWであるが、2020年の累積生産量500万台の場合には38ドル/kWとなり、現状の内燃機関と同程度になる可能性を示している。

燃料電池自動車に必要な他の部品として、モータ、電力制御装置などの他の部品のコストを考慮しなければならないが、これらは内燃機関におけるトランスミッションやエンジン周辺機器などに対応するので、内燃機関エンジンとスタックコストを単純に比較して考察する。

5万台普及時の2010年段階でも、利用者がある程度の負担をすれば、燃料電池自動車の普及が開始される可能性がある。この場合には、既存の内燃機関よりも1kWあたりで167-40=127ドルだけ余分に必要である。こ

これは1台50kWの場合に6,350ドルだけ余分に負担すればよいことを示している。政府が適切な政策を実施することにより、初期段階でもかなりの利用者を獲得する可能性を示している。

プラチナ・コストの割合は、初期には1.7%であるが、スタックのコスト低下に応じて相対的にコスト構成に占める割合が増加することを示している。プラチナ・コストの割合は、各種シナリオにおいて最終的には7-11%になっている。シナリオMBの場合では、9.8%であり、自動車1台の50kWの場合には186ドルに相当する。大量生産によって、全体のスタックコストは低下して行くが、そのとき、周辺部品など、相対的に進歩指数の大きな(学習効果の少ない)要素の比重が、次第に増加してゆくことは当然の結果であり、大量生産の進展とともに学習効果が低減してゆくことが理解できる。

6. 結論

PEM(固体高分子形)燃料電池スタックの要素部品として、イオン交換膜、電極、セパレータ、プラチナ、周辺部品を対象にそのコスト構成と大量生産によるコスト低下の可能性を分析した。それぞれの要素部品の特性に応じた学習曲線の進歩指数を想定した。電力密度の向上と進歩指数の想定値の組み合わせにより9種類のシナリオを検討してスタックコストの評価を行った。中間的なコスト低下を示すシナリオの場合に、燃料電池自動車の累積生産量が500万台となる時、スタックコストが内燃機関と同程度の1kWあたり40ドル程度になっている。5万台普及時の段階でも、1kWあたり167ドルとなり、利用者が適当な負担をするか、あるいは政策的な支援により、燃料電池自動車の普及が開始される可能性があることを示している。シナリオによってはさらにコストが低下する可能性も示している。

コスト構成の変化を分析することにより、大量生産の効果が理解される。セパレータと電極のコストが初期には圧倒的に大きい。大量生産が進行すると、次第にその割合は減少してゆく。電力密度の向上は、電極やセパレータなどの他の資源使用量を増加させず、全体のコスト低下にとって非常に有効である。プラチナ・コストの割合は初期段階では小さいが次第に増加してゆく。しかし、累積生産500万台になるときでも10%程度を占めるのみであり、普及の障害にはならないと考えられる。

本研究は財団法人エネルギー総合工学研究所において、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のWE-NETプロジェクトの一部としておこなわれたものであり、本稿はこれに私見を加えてまとめたものである。

参考文献

- 1) J.Larminie and A.Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons, 2000
- 2) 槌屋治紀、学習曲線による新エネルギーのコスト分析、日本太陽エネルギー学会誌, Vol.25, No.6, 1999年11月
- 3) T.Lipman and D.Sperling, Forecasting the Cost of Automotive PEM Fuel Cell Systems—Using Bounded Manufacturing Progress Functions, Experience Curve for Policy Making—Proceeding of the IEA Workshop at Stuttgart, Germany, 10-11 May 1999
- 4) H.Tsuchiya, Learning Curve Cost Analysis for Model Building of Renewable Energy in Japan, Experience Curve for Policy Making—Proceeding of the IEA Workshop at Stuttgart, Germany, 10-11 May, 1999
- 5) H.Roger, Hydrogen Technologies and the Technology Learning Curve, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.23, No.29, 1998
- 6) Arthur D. Little Report, Cost Analysis of Fuel Cell System for Transportation, Base Line System Cost Estimate, March 2000.