

研究論文

学習曲線による燃料電池コストの分析

A Study of Fuel Cell Cost by Learning Curve

植屋 治紀*・小林 紀**

Haruki Tsuchiya Osamu Kobayashi

(原稿受付日2002年8月6日, 受理日2003年2月6日)

Abstract

This paper presents a study of the PEM fuel cell cost for vehicle application in massive production by learning curve. The typical fuel cell stack consists of membranes, platinum, electrodes, bipolar plates and peripherals. In order to examine the progress ratios for each element, the automatic production in massive volume and the bottom line cost of each element are analyzed. After checking the present cost of fuel cell, the learning curve was applied to cumulative vehicle production of 50 thousands and 5 millions. 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.

1. はじめに

PEM (固体高分子型) 燃料電池は, 自動車, 家庭用コジェネ, PC, モバイル機器などに電力を供給するものとして期待されている¹⁾. 多くの人々が, 2000年代から2010年代に燃料電池の実用化が実現すると考えるようになってきた. 燃料電池の構造はモジュラーであり大量生産に適し, 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. 本研究は, 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を学習曲線により分析することを目的にしている.

2. 学習曲線

学習曲線とは, 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あり, 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⁾ 学習曲線を定式化すると以下ようになる.

$$Y_n = AX^{-r} \dots\dots\dots (1)$$

ここで Y_n : n 番ユニットの単位あたりのコスト

X : 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

さらに 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.

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

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

r は直感的にわかりにくく, F のほうが理解しやすい. r と F は以下のような関係がある.

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

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.

学習曲線のグラフは, 横軸に累積生産量を取り, 縦軸にコストをとると, 初期には急激にコストが低下するが, 次第にそのコスト低下の割合は緩やかなものになっていき, 最終的には定常状態に近づいてゆく.

進歩指数 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%であった, また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ことが知られている. 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%とされている. 各種データをみると, 一般的に進歩指

* (株)システム技術研究所 所長

〒103-0004 東京都中央区東日本橋2-1-6 藤和ビル6F

** (財)エネルギー総合工学研究所 WE-NETセンター主管研究員

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋SYビル

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道具であったが、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。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が、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^{3), 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。

3. 燃料電池スタックのコスト

PEM (固体高分子型) 燃料電池スタックは、図1に示すように多数のセルから構成されている。セルはイオン交換膜 (Proton Exchange Membrane), 電極 (Electrode), セパレータ (Bipolar Plate) からなり、さらに周辺部品 (Peripherals) 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。

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

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

$$P = 10 * V_c * A_c \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

C : kWあたりの燃料電池スタック・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)

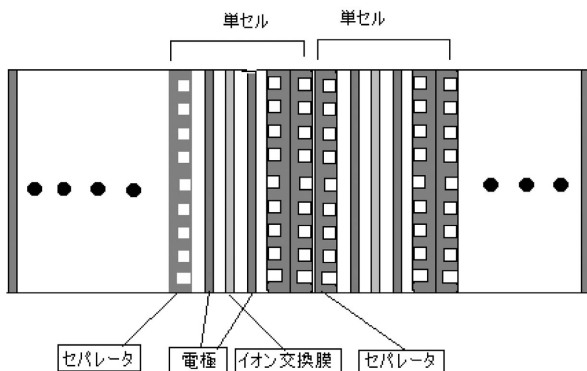


図1 固体高分子型燃料電池の構成

この記述では、すべてのセル面積を合計しており、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性能は、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。例えば、自動車用の50kW出力のスタックの場合、セル面積は25m²、これは面積30cm×30cmのセルでは278枚になる。電力密度の向上が研究されており、将来的には5kW/m²以上になると予想する例もある。

4. コスト低下の見通し

学習曲線を燃料電池スタックのコストに適用するにあたっては、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。

4.1 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になるだろうとしている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。

電極は、水素や空気が通過できるようにした空隙率80%の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であり、重量は340g/m²である。ADL報告によると、白金を含まない電極コストは96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、本研究では工場に大量に量産できるものとした。

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さ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べく、多くの努力がなされ

Weight Structure of Fuel Cell Stack
(Total 3.77kg/m²)

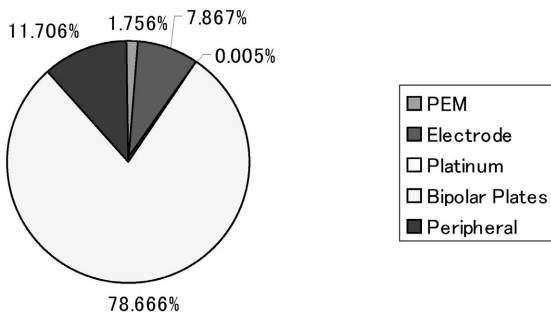


図2 燃料電池スタックの重量構成

ており、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。セパレータは燃料電池スタックの全体重量の80%を占めていて重要なコスト要因である(図2)。

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、ボルボ社の例ではその重量は0.5kg/m²である。これらは普通の材料が利用され、改善の可能性は少ない。

必要なプラチナ(Platinum)のコストに高い関心が寄せられている。プラチナそのもののコストは変動する市場に依存しており、現在では15.4ドル/gである。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、およそその10分の1の量になっている。プラチナの必要量を自動車1台あたり5-10gとした場合に、500万台では25-50トンになる。現在世界の年間消費量は150トンであり、将来価格が変動する可能性があるがここでは考慮していない。

組立ては現状では手作業で行っているが、ここでは自動車の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。

4.2 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。

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や高く、ス

表1 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 (Du Pont)	厚さ 20-50 ミクロン 量産で \$50/m ² (Du Pont)	厚さ 50 ミクロン で 60 cents /m ²
プラチナ	0.2-0.4mg/c m ² \$32-\$64/m ²	0.02-0.04mg/c m ² (現状で最良の実験結果) \$3.2-\$6.4/m ²	0.02mg/c 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 0.8 mm 以下 0.8 mm. \$1423/m ²	ロールシート生産 \$96/m ² (ADL)	\$2.58 /m ²
セパレータ	単セルあたり厚さ 4mm. \$1650/m ²	モールドング \$35/m ² .(ADL)	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	通常材料 0.5 kg/m ²	\$3.46 /m ²
組立て	ハンドアセンブリー \$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
合計	\$ 1833/kW (電力密度 2kW/m ²)	内燃機関と同程度の \$ 40/kW	

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、各要素の重量からこれを計算した。これらの数値をまとめると、表1のようになる。

4.3 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。いくつかの例では2000年におけるスタックコストはおおよそ2,000ドル/kWである³⁾。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台あるとし、ADL報告などのコスト構成を参考にして現状の各要素のコスト構成比から部品の積み上げ計算を行い1,833ドル/kWであるとした。

5. 学習効果

自動車産業は燃料電池スタックが、既存の内燃機関と同等のコストすなわち、40ドル/kWになることを目標としている。この可能性を学習曲線によって検討する。日本の燃料電池実用化戦略研究会は、公式の数字として、燃料電池自動車は2010年に5万台、2020年には500万台普及するとしている。図3にこれを示した。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。

燃料電池自動車の累積生産量は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は時間とは関係なく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)の組合せから、9種類のシナリ

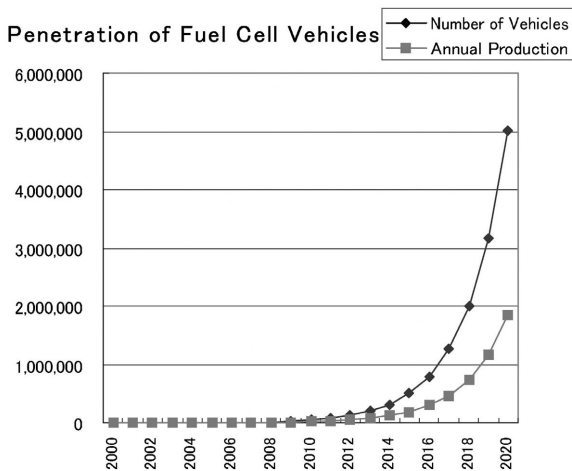


図3 燃料電池自動車の普及シナリオ

オHA, HB, HC, MA, MB, MC, LA, LB, LCを検討した。表2にシナリオ構成を示す。

電力密度の向上は、図4に示すように、1m²あたり2kWから始めて累積生産量が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。なお汎用的な部品では燃料電池以外にも利用され量産される可能性があるが、このことは考慮しなかった。

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。イオン交換

表2 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

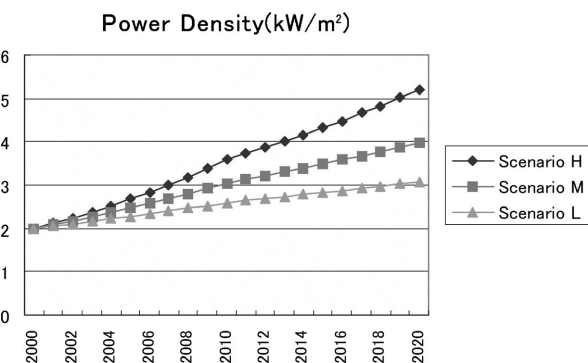


図4 電力密度の変化(シナリオH, M, L)

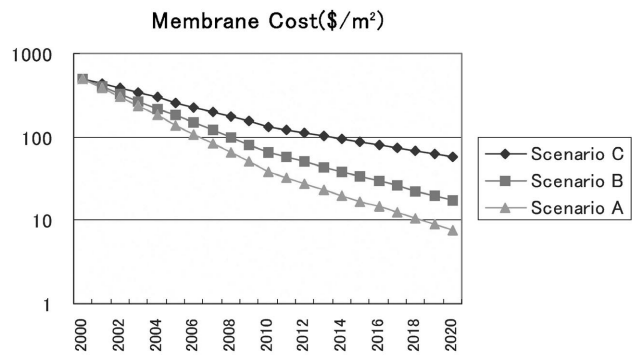


図5 イオン交換膜のコスト変化(シナリオA, B, C)

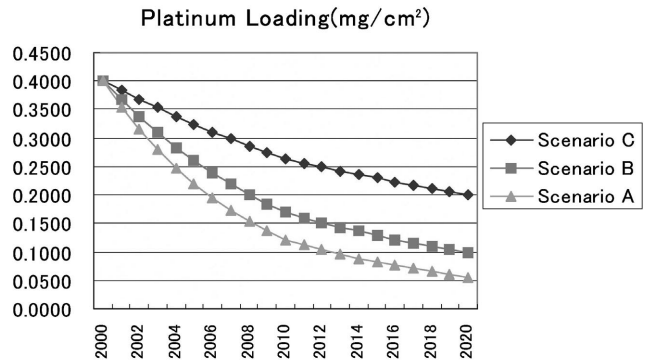


図6 プラチナ量の変化(シナリオA, B, C)

膜のコスト低下の様子を図5に示す。

プラチナ担持量の変化を図6に示した。現状の0.4mg/cm²から始まり、2020年にはシナリオAでは0.05mg/cm²に(F=89%に相当)、シナリオBでは0.1mg/cm²に(F=92%相当)、シナリオCでは0.2mg/cm²になる(F=96%相当)ものと想定した。学習効果が高最も高いのはシナリオHAであり、このとき組合せによる進歩指数は94.5%(H)×78%(A)=73.7%となり、経験的に知られている範囲にある。

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

表3 燃料電池スタックコスト(\$/kW)とプラチナコストの割合(%) (上段は2010年, 累積生産量5万台, 下段は2020年, 累積生産量500万台のとき)

シナリオ	進歩指数/Pt loading	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%	
		スタックコスト(\$/kW)	Ptコスト割合(%)	スタックコスト(\$/kW)	Ptコスト割合(%)	スタックコスト(\$/kW)	Ptコスト割合(%)
急速(A)	F=78% Pt:0.4 to 0.05mg/c m ²	88 15	5.9 10.8	103 19	5.9 11.1	121 25	5.9 11.4
穏やか(B)	F=82% Pt:0.4 to 0.1mg/c m ²	143 30	5.1 9.7	167 38	4.9 9.8	196 49	5.1 9.9
低速(C)	F=88% Pt:0.4 to 0.2mg/c m ²	285 88	3.9 6.7	334 114	4.0 6.8	392 145	4.0 6.8

Learning Effect of Nine Scenarios

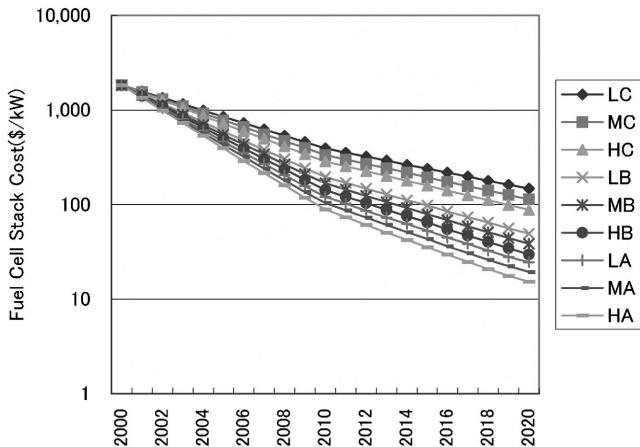


図7 9種類のシナリオの学習効果

た。このようにして、9種類のシナリオを構成し、式(1)-(7)を利用して各要素のコスト低下の過程を計算した。表3には、2010年と2020年について、各シナリオの計算結果をまとめて示した。

図7には計算結果として9種のシナリオの学習効果を示している。表4には2000年から2020年に至るシナリオMBの各要素のコスト変化の計算結果を示している。

スタックコストは、2020年には、シナリオによって異なるが1kWあたり15ドルから145ドルになる。

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。

シナリオMBの場合には、2010年の累積生産量5万台の場合で167ドル/kWであり、2020年の累積生産量500万台の場合で38ドル/kWとなっている。2020年には、燃料電池スタックのコストが、内燃機関と同程度になる可能性を示している。

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。2010年の場合には、既存の内燃機関よりも1kWあたりで127ドルだけ余分に必要であるが、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。

ハイブリッドカーの例に見られたように、この段階で初期採用者がこの金額を負担して購入したり、部分的な政府の政策支援によって普及が始まる可能性がある。

プラチナ・コストの割合は、初期には1.7%であるが、各種シナリオにおいて最終的には7-11%になっている。シ

表4 シナリオMBにおける各要素の年次別学習効果

Case: Moderate with Medium Power Density (MB)										
Year	Number of FC Vehicles	Cost (\$/m ²)				Platinum		Power density (kW/m ²)	Assembly Cost (\$/50kW)	Total (\$/kW)
		Proton Exchange Membran	Electrode	Bipolar Plates	Peripherals	Pt Weight (g/m ²)	Pt cost (\$/m ²)			
	F	82	82	82	95	92	96	92		
	-r	-0.286	-0.286	-0.286	-0.074	-0.120		-0.059	-0.120	
2000	40	500	1,423	1,650	15	4.00	62	2.00	385	1,833
2001	82	408	1,160	1,345	15	3.67	56	2.09	353	1,438
2002	167	332	946	1,097	14	3.37	52	2.18	324	1,129
2003	340	271	771	894	13	3.09	48	2.27	297	886
2004	693	221	629	729	12	2.84	44	2.37	273	697
2005	1,414	180	513	595	12	2.60	40	2.47	250	548
2006	2,885	147	418	485	11	2.39	37	2.57	230	431
2007	5,887	120	341	395	11	2.19	34	2.68	211	340
2008	12,011	98	278	322	10	2.01	31	2.80	194	268
2009	24,506	80	227	263	10	1.85	28	2.92	178	212
2010	50,000	65	185	214	9	1.70	26	3.04	163	167
2011	79,245	57	162	188	9	1.60	25	3.13	154	144
2012	125,594	50	142	165	8	1.52	23	3.21	146	124
2013	199,054	44	124	144	8	1.44	22	3.30	138	107
2014	315,479	38	109	126	8	1.36	21	3.39	131	92
2015	500,000	34	96	111	8	1.29	20	3.49	124	79
2016	792,447	29	84	97	7	1.22	19	3.58	117	68
2017	1,255,943	26	73	85	7	1.15	18	3.68	111	59
2018	1,990,536	23	64	75	7	1.09	17	3.78	105	51
2019	3,154,787	20	56	65	7	1.03	16	3.89	99	44
2020	5,000,000	17	49	57	6	0.97	15	3.99	94	38

表5 シナリオMBのコスト構成の変化

コスト構成	初期		累積生産5万台のとき		累積生産500万台のとき	
	金額(\$/kW)	割合(%)	金額(\$/kW)	割合(%)	金額(\$/kW)	割合(%)
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

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。

表5には初期と累積生産量が5万台および500万台になったときの、シナリオMBのコスト構成を示した。セパレータと電極のコストは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。大量生産により全体のスタック・コストは低下して行くが、同時に相対的に進歩指数の大きな（学習効果の少ない）要素の比重が増してゆくことがわかる。

電力密度の向上は、電極やセパレータの使用量を増加させずに、全体のコストを低下させる効果があるのできわめて重要である。

6. 結論

固体高分子型燃料電池スタックのコスト構成を分析し、学習曲線を用いて量産時のスタックコストを検討した。大量生産により燃料電池自動車の累積生産量が500万台となると、スタックコストが内燃機関と同程度の1kWあたり40ドルになる可能性が示された。5万台普及時の段階でも、利用者が1台あたり6,350ドル程度の負担をするか、一部分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が示された。コスト構成を分析すると、セパレータと電極のコストが初期には圧倒的に大きい、次第にその割合は減少してゆく。電力密度の向上は、

電極やセパレータの使用量を増加させず、全体のコスト低下にとって非常に重要である。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する。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る。

参考文献

- 1) J. Larminie and A. Dicks ; Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons, (2000).
- 2) 植屋治紀 ; 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, 25-6 (1999.11).
- 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, 23-29 (1998).
- 6) Arthur D. Little Report ; Cost Analysis of Fuel Cell System for Transportation, Base Line System Cost Estimate, (March 2000).

協賛行事ごあんない

「講習と実習による廃棄物溶融塩処理セミナー」について

〔主催〕 廃棄物溶融塩処理フォーラム

〔協賛〕 医療廃棄物研究会, 化学工学会他

〔開催日〕 2003年11月6日(木)～7日(金)

〔場所〕 横浜国立大学

〔参加費〕 一般50,000円, 学生10,000円
(技術交流会費, テキスト代込)

〔定員〕 40名

〔申込方法〕 廃棄物溶融塩処理フォーラムホームページ

URL <http://www.bsk.ynu.ac.jp/~mswad/>
へ申込み下さい。

〔問合せ先〕 横浜国立大学大学院工学研究院

朝倉研究室気付

廃棄物溶融塩処理フォーラム事務局

TEL/FAX : 045-339-4226