

節電誘導型新料金体系における燃料電池— 水電解ハイブリッド型電力平準化システムの経済性ケーススタディ

松崎 晴美*・田村 剛志**・木村 達彦**・太田 雄**

Case Studies on the Approximate Cost Efficiency of a Hybrid Fuel Cell – Water Electrolyzer System Used to Level Daytime and Nighttime Power Consumption under the New Pay-per-use Price Called Peak Shift Plan

Harumi MATSUZAKI*, Tsuyoshi TAMURA**, Tatsuhiko KIMURA** and Yu OTA**

Abstract

The present paper evaluated the approximate cost efficiency of the hybrid fuel cell (FC) – water electrolyzer (WE) system by reviewing several case studies with different values of FC efficiency η_{FC} , WE efficiency η_{WE} , the pay-per-use price in the nighttime hours and the same price in the daytime hours. The results showed that the approximate cost efficiency of a hybrid FC-WE system with the pay-per-use price called Peak Shift Plan having the peak price hours from 1 till 4 pm were more efficient than the same system with the conventional pay-per-use price but could not be cleared when the present track records of η_{FC} and η_{WE} were 0.5 and 0.72, respectively.

Keywords : *power-leveling, approximate cost efficiency, FC efficiency, WE efficiency, pay-per-use price, peak shift plan*

キーワード : 電力平準化, 近似経済性, 燃料電池効率, 水電解効率, 昼夜電力量
料金単価, ピークシフトプラン

1. 緒言

近年、昼間の電力需要は大幅に伸びているのに対し、深夜電力使用の伸びは少なく、昼夜の電力需要の格差は拡大する一方である。これに

より地球温暖化問題、エネルギー問題が進んでいる。

電力は、夜間はあまり消費されず、昼は多く消費される。一般的に発電量はピークの電力消費に対応出来るよう発電する必要がある。発電はされるが使用されていない電力が生じ、余剰電力と呼ばれる。そこで昼間に使用している電力を少なくし、夜間電力を使用することで均一化を計る。これを平準化と言う。平準化するこ

平成 25 年 1 月 14 日受理

* 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻・教授

** 工学部機械情報技術学科・4 年

とで、発電量は減り、余剰電力が少なくなり、地球温暖化の主要因となっている炭酸ガス発生量を大幅に減らすことが可能になる。例えば、ポンプ水車は、夜間ポンプとして使用し、所定の高さまで、水をくみ上げる。昼間は、水車として使用し、くみ上げた水を落下させ、発電する。

燃料電池-水電解ハイブリッド型システムは、夜間電力を利用し水電解により水素を製造、昼間は夜間電力により製造した水素を使用し燃料電池により発電するという特徴を有しているため、電力の平準化に絶大な効果があり、炭酸ガス発生量を大幅に減らすことが可能で、このシステムを家庭に普及させることにより、その効果を増大できると考えられる。また、世界中の注目を浴びているスマートグリッド²⁶⁾の最大の課題である太陽光発電に代表される再生可能エネルギーの出力変動を制御・調整できるキーシステムとなることが期待できる。

現在、多くの企業で可逆セルの研究開発が進められている¹⁾。また、電力会社からは燃料電池-水電解ハイブリッド型電力平準化システムの特許の出願もされている²⁴⁾。また、別の電力会社からは、家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの実証試験が、システムの総合効率を検証するため、実施されている。しかしながら現時点で、電力会社等から実用化、製品化の報告はない。

そこで既報^{5,29-31)}では、燃料電池-水電解ハイブリッド型電力平準化システムの開発プロジェクトの立上げに先立ち、電力平準化システムの一次近似的経済性に関するケーススタディ結果について報告した。また、燃料電池効率 η_{FC} 、水電解効率 η_{WE} 及び昼夜電力量料金単価を用いたケーススタディにより、電力平準化システムの近似的経済性を評価するとともに、同経済性が成立する限界電力量料金単価比(夜間料金単価/昼間料金単価)を定義し、その値を試算した。

さらに、水電解効率と燃料電池効率が経済性

成立に及ぼす影響が大きいことが分かり、同効率の将来動向について調査研究した。本報では2011.3.11以降、節電誘導の一環として、東京電力、関西電力等から新電力量料金体系が実施されており^{18,32,33)}、これらの新料金体系における電力平準化システムの近似的経済性に関するケーススタディ結果について報告する。

2. 燃料電池-水電解ハイブリッド型電力平準化システムと電力会社電力量料金体系

2.1 燃料電池-水電解ハイブリッド型電力平準化システム

可逆セル燃料電池は燃料電池と水電解双方の機能を有するものであるが、開発途上にある。ここでは、燃料電池と水電解装置を組み合わせたハイブリッド型システム²⁷⁾を対象とする。

例えば、夜間電力を使い水電解により水素を製造し、水素タンクに貯留する。この際、電力は整流器で直流(DC)に変換され、水電解に使用される。昼は、夜間製造した水素を燃料電池に供給して発電する。この際発生する電力はDCであるから、インバータにて、交流(AC)に変換し、家庭内の電化製品等に使用する。電力の他に、熱も発生するが、本報では対象外とする。また、電力会社への売電が可能であるが、これも対象外とする。

2.2 電力会社電力量料金体系

「表1^{16~25)}は2012年度現在の各電力会社の電力量料金体系を示す。これらは、2010年度以降ほとんど変わっていないが、東京電力及び関西電力がそれぞれ、2012-6/1、2012-7/1から節電誘導の一環として、新電力量料金体系を実施している。これらに関しては後述する。

電力量料金単価は、一般に、通期あるいは2つの季節と2つあるいは3つの時間帯に分けて設定されている。表は通期及び夏季の場合を示す。夏季は7/1~9/30の期間である。通期は2つの時間帯で、パターンT①では、昼間時間

は7am～11pm、夜間時間は11pm～7amで、後者のほうが安く設定されている。パターンT②での、昼間時間は8am～10pm、夜間時間は10pm～8amである。パターンT③での、昼間時間は8am～11pm、夜間時間11pm～8amである。同様に、後者のほうが安く設定されている。夜間時間電力量料金単価は一定であるが、昼間時間電力量料金単価は電力使用量により、3段階で設定されている。これまでのケーススタディでは、昼間時間電力量料金単価は最も安価な第1段階の料金単価としたが²⁹⁾、ここでは、第2段階及び第3段階の料金単価の場合も検討する。

Table 1 Pay-per-use prices (yen/kWh) in electric utilities

Patterns		Electric utilities											
		TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI		
Throughout seasons	T①	Day time (7am~11pm)	B	19.9	21.9	20.7	19.6	21.8	20.8	20.3	21.3	-	25.3
		Night time (11pm~7am)	A	8.41	9.17	9.33	7.73	8.37	7.31	8.69	8.19	-	11.5
	T②	Day time (8am~10pm)	B	22	23.9	-	21.1	-	-	-	-	-	-
		Night time (10pm~8am)	A	8.58	9.48	-	8.05	-	-	-	-	-	-
	T③	Day time (8am~11pm)	B	-	-	-	-	-	-	-	-	21.1	-
		Night time (11pm~8am)	A	-	-	-	-	-	-	-	-	9.62	-
Summer season	④	Day time (8pm~10am)	B	15	-	-	13.2	19.2	23.2	-	-	17.3	-
		Night time (10pm~8am)	A	8.41	-	-	8.05	8.37	7.43	-	-	9.74	-
	③-1	Day time (7am~11am)	B	-	-	-	-	-	-	-	28.5	-	-
		Night time (11pm~7am)	A	-	-	-	-	-	-	-	8.69	-	-
	④-1	Day time (10am~5pm)	B	-	33.4	-	-	-	-	-	-	-	38.4
		Night time (11pm~7am)	A	-	9.17	-	-	-	-	-	-	-	11.5
	④	Morning (7am~10am)	C	-	23.1	-	-	-	-	-	-	-	26.2
		Evening (5pm~11pm)	C	-	23.1	-	-	-	-	-	-	-	26.2
	④-1	Day time (10am~5pm)	B	-	-	-	32.7	-	32.3	-	-	-	-
			A	-	-	-	8.05	-	7.43	-	-	-	-
		Morning (8am~10am)	C	-	-	-	20.6	-	20.2	-	-	-	-
			C	-	-	-	20.6	-	20.2	-	-	-	-
Day time (9am~5pm)		B	-	-	31.4	-	-	-	-	-	-	-	
		A	-	-	9.33	-	-	-	-	-	-	-	
④-2	Night time (11pm~7am)	C	-	-	21.2	-	-	-	-	-	-	-	
		C	-	-	21.2	-	-	-	-	-	-	-	
④-3	Day time (1pm~8pm)	B	-	-	-	-	31.1	-	-	-	-	-	
		A	-	-	-	-	8.65	-	-	-	-	-	
	Night time (10pm~8am)	A	-	-	-	-	8.65	-	-	-	-	-	
		C	-	-	-	-	24.2	-	-	-	-	-	
	Morning (8am~1pm)	C	-	-	-	-	24.2	-	-	-	-	-	
		C	-	-	-	-	24.2	-	-	-	-	-	

夏季に設定されているパターン③の時間帯はパターンT②と同じである。同様に、パターン④の昼間時間は10am～5pm、夜間時間は11pm～7am、及び朝晩時間は7am～10am、5pm～11pmである。パターン④-1での昼間時間は10am～5pm、夜間時間は10pm～8am、及び朝晩時間は8am～10am、5pm～10pmである。パターン④-2での昼間時間は9am～5pm、夜間時間は11pm～7am、及び朝晩時間は7am～9am、5pm～11pmである。パターン④-3での昼間時間は1pm～6pm、夜間時間は10pm～8am、及び朝晩時間は8am～1pm、6pm～10pmである。

表2はパターンT①での各電力会社の電力料金に、昼間時間電力量料金単価が第2段階、第3段階の場合を追加したものである。電力使用量は90kWh以下の場合、90～230kWhの場合及び230kWhの場合の3段階である。HOKのみ、230kWhが210kWhとなっている。各電力会社とも、電力使用量が増加すると、段階的に、昼間時間電力量料金単価は高くなる。

Table2 Pay-per-use prices (yen/kWh) in the daytime hours

Patterns		Electric utilities												
		TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	OKI				
Throughout seasons	T①	Daytime (7am~11pm)	B	stage 1	19.9	21.9	20.7	19.6	21.8	20.8	20.3	21.3	25.3	
				stage 2	26.8	28.1	25.6	24.7	28.4	25.7	26.7	27.3	31.5	
				stage 3	28.7	29.6	27.3	26.4	30.4	27.8	28.9	28.8	33.7	
		Night time (11pm~7am)	A	stage 1	-	8.41	9.17	9.33	7.73	8.73	7.31	8.69	8.19	11.5
				stage 2	-	8.41	9.17	9.33	7.73	8.73	7.31	8.69	8.19	11.5
				stage 3	-	8.41	9.17	9.33	7.73	8.73	7.31	8.69	8.19	11.5

3. 一次近似的経済性評価方法

一般に、製品開発を進める場合、それに先立ち、フィジビリティスタディFSが実施され、経済性成立の可能性を確認するが、全ての条件を確定できない場合があり、コンテンツシーを含んだままのスタートとなるのが一般的である。コスト試算は電気代等のランニングコストに、設備費を減価償却費として導入した試算である。製品開発においては、製品の価格

はなかなか決まらない場合が一般的である。そこで、イニシャルコスト、ランニングコストに基づくコスト試算による最終的な経済性評価に先立ち、第一次近似であるが簡便に経済性を評価できる手法が確立できれば、技術開発の銚先案内としても有用である。

図2は一次近似的経済性の概念を示す。本開発手法による一次近似的経済性評価結果で、電力量料金体系を変更し、一次近似的経済性を成立させることを検討できる、あるいは、開発断念を決定することが可能である。

現在、夜間電力量料金単価 (A 円 /kWh) と、昼間電力量料金単価 (B 円 /kWh) に価格差がある。その価格差を活かして、電力平準化システムの経済性を、最も単純化した第一次近似として、燃料電池効率 η_{FC} 、水電解効率 η_{WE} の観点から評価した。

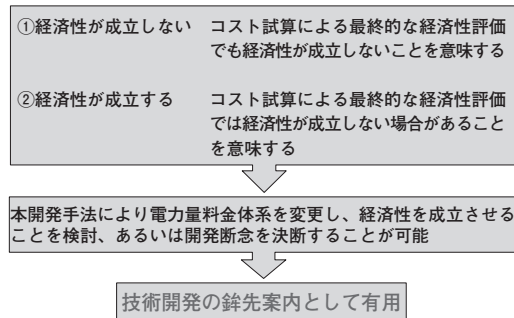


図2 一次近似的経済性の概念

η_{FC} 、 η_{WE} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\eta_{FC} = \frac{xh_{FC}}{\text{供給水素のエンタルピー}} \quad (1)$$

$$\eta_{WE} = \frac{\text{生成水素のエンタルピー}}{yh_{WE}} \quad (2)$$

ここで、 x は昼間の発電電力、 y は夜間の消費電力、 h_{FC} 、 h_{WE} はそれぞれ発電時間、電力消費時間である。これにより、 x 、 y は、それぞれ、次式で与えられる。

$$xh_{FC} = \eta_{FC} \times \text{供給水素のエンタルピー} \quad (3)$$

$$yh_{WE} = \frac{\text{生成水素のエンタルピー}}{\eta_{WE}} \quad (4)$$

夜間は電力会社から買電し、昼間は電力会社から買電する代わりに発電し、自家消費することが経済的に成立するためには、以下の不等式を満足する必要がある。等号は両者が等しい場合である。

「昼間買電したとした場合の買電コスト \geq 夜間の買電コスト」

Fig.3は、これまでの料金体系でのパターンT①における昼間買電コストと夜間買電コストの関係を示す。システムが成立するためには、供給水素のエンタルピーと生成水素のエンタルピーが等しいことが必要であるから、以下のケーススタディでは、発電時間帯を8am～8pm、消費時間帯を8pm～8amの、それぞれ、12時間と同じとした。すなわち、 $h_{FC} = h_{WE} = 12\text{hr}$ である。

パターンT①の一次近似的経済性（以下、単に経済性と略称する。）成立条件は昼間買電コスト = $12Bx$ 、夜間買電コスト = $(8A+4B)y$ となるから、次式で与えられる。

$$\frac{x}{y} \geq \frac{1}{3} + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(\frac{A}{B}\right) \quad (5)$$

これにより、次式が得られる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{1}{3} + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(\frac{A}{B}\right) \quad (6)$$

Fig3 Cost for selling electrical power and that for buying

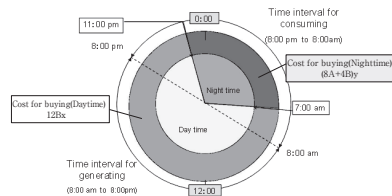


図4は東京電力における各種電力量料金体系を示す³²⁾。①～③の3つのパターンがある。①が定量電灯Bの場合で、この料金体系では昼夜を通して料金が一定で、例えば、18円/kWhである。この場合では、本平準化システムにおいて、昼夜料金に差がないため、経済性は成立しない。本平準化システムが成立する可能性があるのは、昼夜で異なる料金体系の場合である。次の②のおトクなナイト8でのパターンは昼間と夜間の二つの料金に差があるため、経済性が成立する可能性がある。これらに関する経済性のケーススタディは、すでに実施し、報告済みである^{5,29,30,31)}。

③のピークシフトプランは、2011.3.11以降の節電誘導の一環として導入されたもので、昼

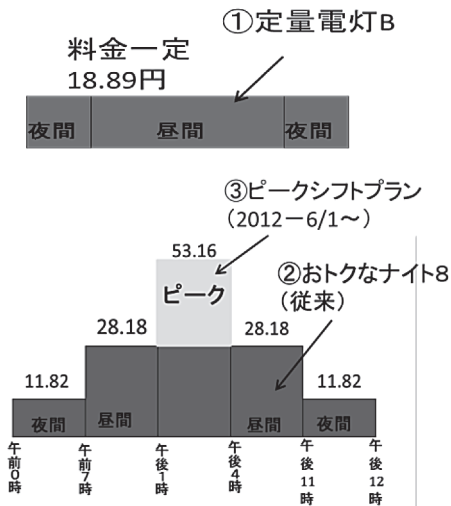


図4 東京電力の各種電力量料金体系

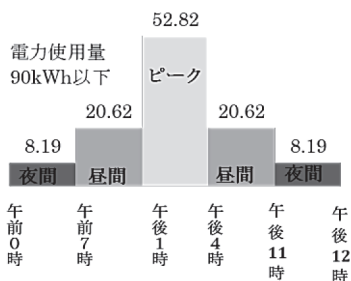


図5 関西電力のピークシフト新電力量料金体系

間の最も電気を使用する時間帯である1pm～4pmの間の料金が2倍ほどに引き上げられている。これにより消費電力量を低減し、節電をはかる狙いである。

図5は関西電力のピークシフトプラン新電力量料金体系の場合を示す³³⁾。この場合は電力量使用量により、昼間時間電力量料金単価が三段階に変化する(90kWh以下で20.62円、90～230kWhで26.41円及び230kWh以上で27.94円)が、90kWh以下の場合を示した。

図4及び図5における経済性成立条件は、ピーク時の電力量料金単価をP円/kWhとすると、
 昼間買電コスト = (9B+3P)x、
 夜間買電コスト = (8A+4B)y
 となるから、次式で与えられる。

$$\frac{x}{y} \geq \frac{8A+4B}{9B+3P} \quad (7)$$

これにより、次式が得られる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{8A+4B}{9B+3P} \quad (8)$$

また、ピーク時間帯を仮にa時間増加させた場合での経済性成立条件は、

昼間買電コスト = (9-a)B+(3+a)P x、
 夜間買電コスト = (8A+4B)y
 となるから、次式となる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{8A+4B}{(9-a)B+(3+a)P} \quad (9)$$

a = -3の場合は、Pの係数が0となり、Pが存在しなくなるため、従来の経済性成立条件である(6)式と同じになる。

4. 評価結果と考察

図6は東京電力ピークシフトプラン新電力量料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ 特性を実線で示す。図中、×は現状の $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ の実績値、□は将来の実績推定値である。(6)式の不等式で示す

ように、これらの特性線の上の領域で、経済性が成立する。したがって、実績値より下にある特性線あるいは、実績値に一致する場合、経済性が成立することになる。また、点線は従来のおトクなナイト8料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ 特性である。ピークシフトプランでの特性線は従来の特性線より、下方に位置し、経済性成立領域は拡大する。しかしながら現状の実績値 \times より上に位置するため、経済性は成立しない。仮にピーク時間帯を計画の3時間から8時間に増加すれば、ほぼ、実績値に一致するところまでくる。将来の実測推定値ベースでは、ピークシフトプランにおいても、経済性は成立するものと思われる。

図7～9は関西電力ピークシフトプラン新電力量料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ の特性を、それぞれ、電力使用量が90kWh以下、90～230kWh以下、230kWh以上の場合を示す。図中の記号 \times 、 \square 、特性線の種類は図6と同一である。図7(90kWh以下)で示した関西電力ピークシフトプランにおける $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ 特性線は従来の特性線(図中、点線)より下方に位置し、経済性成立領域は拡大する。また、東京電力の場合と比較しても、かなり、下方に位置し、経済性成立領域は拡大する。ピーク時間 a を3時間から5時間に増加した場合の特性(図中、破線)は現状の実績値上にあり、経済性が成立す

るといえる。図8、図9と電力使用量が増加し、昼間時間電力量料金単価が増加しても、ピークシフトプラン新電力量料金体系での特性線はほとんど変化しないが、従来の同特性線は下方に

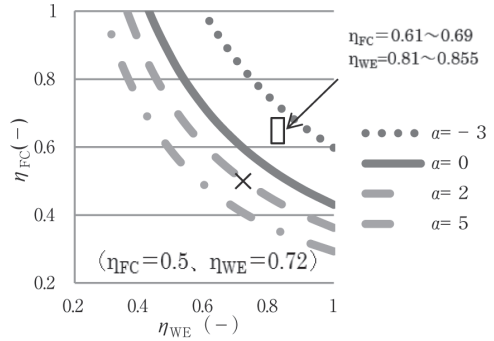


図7 関西電力ピークシフトプラン新電力量料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ の特性 (90kWh以下)

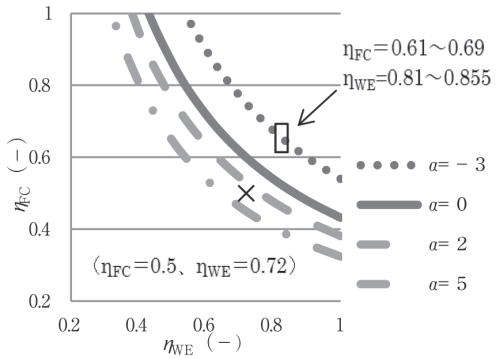


図8 関西電力ピークシフトプラン新電力量料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ の特性 (90～230kWh)

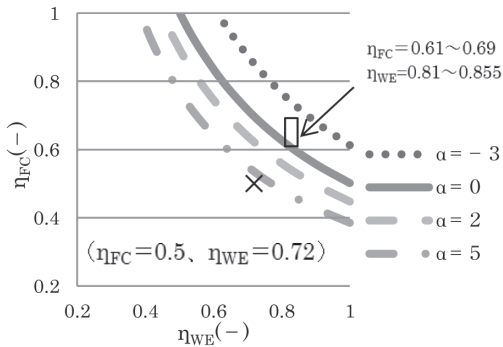


図6 東京電力ピークシフトプラン新電力量料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ の特性

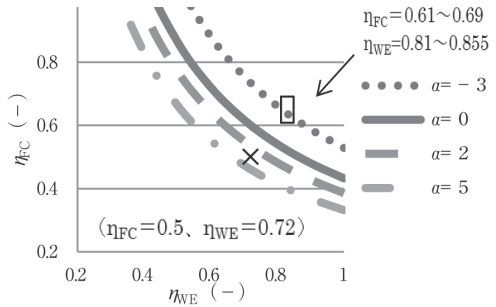


図9 関西電力ピークシフトプラン新電力量料金体系における $\eta_{FC} - \eta_{WE}$ の特性 (230kWh以上)

移動し、経済性成立領域が拡大する。

5. 結言

(1) 節電誘導型ピークシフト新電力量料金体系での経済性成立領域は、従来と比較すると拡大するが、現状の η_{FC} 、 η_{WE} の実績値ベースでは経済性は不成立である。一方、将来の実績推定値ベースでは経済性は成立する。

(2) 東京電力において、仮に、ピーク時間帯を現状の3時間から8時間に増加させれば現状の実績値でも経済性が成立する可能性が高まる。関西電力では、電力量使用量が90kWh以下の場合、現状の3時間から5時間に増加させれば経済性が成立する。

(3) 電力使用量が増加しても(昼間時間電力量料金単価が高くなっても)ピークシフトプランの特性線は変化しないが、従来の特性線は下方に移動し、経済性が成立する領域が拡大する。

参考文献

- 1) A.Kato,D.kittaka,A.Takahashi,T. Oku,H.Takano,N.Kumagai,M.Akai,H. Ito, T.Maeda,T.Ioroi,Trans.of the JSRAE,Vol.23,No.4,pp.365-375 (2006)
- 2) Published patent application number:2002-56880
- 3) Published patent application number:H8-64220
- 4) Published patent application number:H11-214022
- 5) H.Matsuzaki, ECS Trans., vol.26, No.1, pp.457-463 (2009)
- 8) 燃料電池 実用化への挑戦,工業調査会 ,p.42 (2007)
- 8) 燃料電池の技術,電気学会・燃料電池発電次世代システム技術調査専門委員会、p.42 (2002)
- 10) 燃料電池のすべて,工業調査会 (2003)
- 11) 武 哲夫,燃料電池,1 (2) pp.8-11 (2001)
- 12) <http://www.panasonic.co.jp>
- 13) 日本におけるFCの開発,燃料電池開発情報センター (1999)
- 14) <http://www3.toshiba.co.jp>
- 16) <http://www.kyuden.co.jp>
- 17) <http://www.tohoku-epco.co.jp>
- 18) <http://www.kepoco.co.jp>
- 19) <http://www.tepco-switch.com>
- 20) <http://www.yonden.co.jp>
- 21) <http://www.chuden.co.jp>
- 22) <http://www.hepco.jp>
- 23) <http://www.rikuden.co.jp>
- 24) <http://www.energia.co.jp/>
- 25) <http://www.okiden.co.jp/index.html>
- 26) スマートグリッドの構造技術と標準化,日本規格協会 (2010)
- 27) <http://www.energia.co.jp/press/03/p040210.html>
- 28) 日本における燃料電池の開発,燃料電池開発情報センター (2011)
- 29) 松崎、中村、八戸工業大学紀要、Vol.30 (2011)
- 30) 松崎、中村、日本機械学会東北支部第47期秋季講演会講演論文集 No.2011-2、pp.354、355 (2011)
- 31) H.Matsuzaki: World Hydrogen Energy Conference 2012,Abstract Book,pp.B3 (2012)
- 32) 朝日新聞 2012.9.14
- 33) 朝日新聞 2012.6.8

要 旨

ピークシフトプラン新電力量料金体系における燃料電池—水電解ハイブリッド型電力平準化システムの近似的経済性について、燃料電池効率 η_{FC} 、水電解効率 η_{WE} 、昼間電力量料金単価及び夜間電力量料金単価を用いてケーススタディした。その結果、ピークシフトプランでは、従来の料金体系に比較して、近似的経済性成立領域が拡大するが、現状の η_{FC} 、 η_{WE} の実績値基準では、近似的経済性は成立しないことを示した。また、東京電力のピークシフトプランではピークシフト時間を現状の3時間から8時間に、関西電力では5時間に増加する料金体系にすれば、近似的経済性が成立する可能性があることを示した。

キーワード：電力平準化，近似経済性，燃料電池効率，水電解効率，昼夜電力量料金単価，ピークシフトプラン