

燃料電池 - 水電解ハイブリッド型電力平準化システムの 経済性簡便評価手法の検討

松崎 晴美[†]・中村 祐太^{††}

Study on the Simple Technique for Evaluating the Approximate Cost Efficiency of a Hybrid Fuel Cell—Water Electrolyzer System Used to Level Daytime and Nighttime Power Consumption

Harumi MATSUZAKI[†], Yuta NAKAMURA^{††}

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 present track record of η_{FC} of 0.5 and η_{WE} of 0.81 was held in some companies with the pay-per-use prices of electrical power of summer period but was not held in any companies with that of the throughout seasons. And also the expressions representing the critical values about the approximate cost efficiency of the pay-per-use prices of electrical power and so on were derived by using the present track record of η_{FC} and η_{WE} .

Key Words: Approximate cost efficiency, FC efficiency, WE efficiency, Pay-per-use price,

Simple technique for evaluating

キーワード: 近似経済性, 燃料電池効率, 水電解効率, 電力量料金単価, 簡便評価手法

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。

図1は、電力消費パターン例を示す。縦軸は電力消費量、横軸は時刻を示し、図中、太い実線

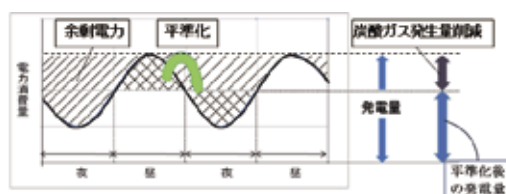


図 1 電力消費パターン例

平成 23 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

が電力消費パターンを示す。電力は、夜間はあまり消費されず、昼は多く消費されるためこのようなパターンとなる。このような電力消費に対して、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。網掛 〰 部分は余剰電力と言い、発電はされるが使用されていないため無駄になっている。そこで昼間に使用している電力（網掛 〰 ）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。

平準化することで、発電量は減り、余剰電力がなくなり、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等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⁾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1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。本報では、1次近似的経済性を簡便に評価するとともに、電力量料金体系を調整し、1次近似的に経済性が成立する限界昼夜時間帯等を求めることができる経済性簡便評価手法を検討する。

2. 燃料電池-水電解ハイブリッド型システムの概要と電力会社電力料金体系

2.1 燃料電池 - 水電解ハイブリッド型システムの概要

図2は可逆セル燃料電池の構造を示す。燃料電池可逆セルは、左から陰極主電極、水素流路、陰極給電体、イオン交換膜と電極が一体となった電極接合体膜、陽極給電体、水・酸素の流路及び陽極主電極から構成される。これらが最小単位でセルと呼ばれており、実機ではこのセルをたくさん積層することになる。水電解として使用する場合は、水・酸素の流路下部より給水し、夜間電力を主電極に印加することにより陽極では、 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$ の水の電気分解が起き、生成した酸素はセル上部よりセル外に取り出される。水素イオンは水分子とともにイオン交換膜中を陰極側に移動し、陰極で $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$ の反応により電子と結合して水

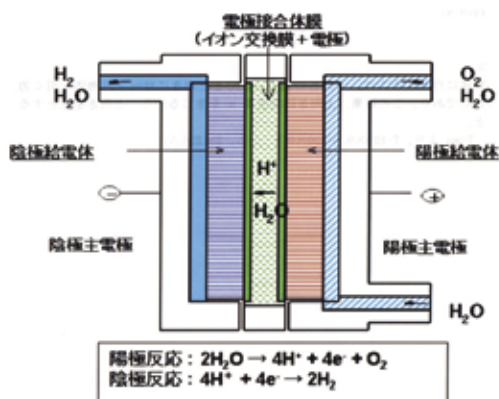


図2 可逆セル燃料電池の構造

素となり、セル上部より取り出され貯蔵される。燃料電池として使用する場合は、セル内を乾燥させ気相状態にした後、水電解により貯蔵されていた水素を水素流路下部に供給、また酸素あるいは空気を水・酸素の流路下部に供給することにより、電極から発電することができる。陽極では $4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 、陰極では $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ の反応が起こり、水電解とは逆の反応になる。

夜間は水電解として使用し、昼間は燃料電池として使用することにより、電力の平準化を図ることができる。本報では、図3に示すように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を対象とする。

表1⁶⁾は、アルカリ水電解、固体高分子形水電解、高温水蒸気電解、原子力高温水蒸気電解等、各種水電解法の利点、課題についてまとめたものを示す。アルカリ水電解は、大量生産に適した構造でシステムもコンパクトになるという利点があるが、電解液を介した漏洩電流の考慮が必要という課題がある。固体高分子形水電解は、腐食性電解液や多孔質隔膜が不要なため設備の簡素化が可能であることや、電解質中にガスが発生しないこと、得られるガス純度が高いこと、漏洩電流による電流効率の低下がない等の利点があるが、電解質膜が強酸性なので電極材料等が限定されることや、膜の伝導性が低く、薄膜化すると膜中の水素拡散のため電流効率が低下すること、電解質、電極界面で抵抗が大きくなりやすいこと、純水の供給が必要であること等

の改善が課題となっている。高温水蒸気電解は、低温動作の各種水電解システムと比較して高効率期待できることや、電極に白金等の貴金属が不要であること、原料水の管理が容易であること、複雑な分離操作なしに高純度の水素が得られること、可動部がなく構造が単純で取り扱いが容易である等の利点があるが、電解電流の高電流密度化や、長時間運転に対する耐久性向上、単セル大型化技術、セルシール技術、インターコネクタ材料を中心とするセル接合技術、経済性の確保、副生酸素の利用技術等の課題がある。原子力利用高温水蒸気電解は、原子力発電所等の大規模な施設では経済的に水素を製造することが可能という利点があるが、家庭用等の小規模な施設での水素製造には不向きなことや、長時間運転による性能低下の改善等の課題がある。

2.2 燃料電池及び水電解の効率

表2⁶⁾は、各種水電解法における、運転圧力、運転温度、電解電圧、電解電流密度、電解効率等、特性についてまとめ、得られた特徴を基に評価したものを示す。生成される水素は、圧縮化が必要なため運転圧力は大きい程良い、家庭に普及させることを目的としている、運転温度領域は常温に近い、電解効率が高いとの観点から固体高分子形水電解が最適であると考えた。固体高分子形水電解の電解効率は90%である⁷⁾。

表3⁷⁾は、固体高分子形、リン酸形、熔融炭酸塩形、固体電解質形等、各種燃料電池の特徴を動

表 1 各種水電解法の特徴-1

	アルカリ水電解	固体高分子形水電解	高温水蒸気電解	原子力利用高温水蒸気電解
運転圧力	常圧	3.6~0.1MPa	常圧	5MPa
運転温度	80℃	80℃	700~1000℃	600~1000℃
電解電圧	1.3~2.1V	1.8V	1.5V	1.3V
電解電流密度	0.2A/cm ²	1A/cm ²	0.6A/cm ²	0.35A/cm ²
電解効率	70~82%	90~91%	92%	45~55%
特徴	①	②	③	④

表 2 各種水電解法の特徴-2

	アルカリ水電解	固体高分子形水電解	高温水蒸気電解	原子力利用高温水蒸気電解
利点	大量生産に適した構造。システムのコンパクト化が可能。	設備の簡素化。多孔質隔膜不要。電解質中にガスが発生しない。得られるガス純度が高い。漏洩電流による電流効率の低下がない。	高効率期待できる。電極に貴金属が不要。原料水の管理が容易。複雑な分離操作なしに高純度の水素が得られる。構造が単純で取扱い容易。	原子力発電等の大規模な水素製造には有利。
課題	電解液を介した漏洩電流を考慮する必要がある。	電解質膜が強酸性なので電極材料等が限定される。膜の伝導性が低い。電解質、電極界面で抵抗が大きくなりやすい。純水の供給が必要。	電解電圧の高電圧化。耐久性向上。単セル大型化。セルシール技術。経済性の確保。副生酸素の利用技術。	家庭用等の小規模な水素製造には不向き。長時間運転による性能低下。

表 3 各種燃料電池の特徴

	固体高分子形 FCFC	リン酸形 PAFC	溶融炭酸塩形 MCFC	固体電解質形 SOFC
動作温度	常温～100℃	150～220℃	600～700℃	900～1000℃
作動圧力	常圧～1気圧	3～8気圧	常圧～1気圧	1～15気圧
出力密度	0.1～2.0W/cm ²	0.1～0.3W/cm ²	0.1～0.2W/cm ²	0.1～0.2W/cm ²
システム 発電効率	50%	35～45%	45～55%	60%以上
符号	○	○	△	△

作温度、作動圧力、出力密度、システム発電効率についてまとめたものを示す。一般に、固体高分子形燃料電池の効率は30～40%であるが^{8,9)}、詳細は後述する。

上述の観点から、且つ、水電解と燃料電池の装置構成が同じであることが有利である点から固体高分子形が最適であるという結果を得た。固体高分子形燃料電池と固体高分子形水電解が構造的に一体化したものが可逆セル燃料電池である。

図3は固体高分子形燃料電池と固体高分子形水電解装置を組合せた燃料電池－水電解ハイブリッド形発電システムの一例を示す。

図4²⁷⁾は家庭用燃料電池－水電解ハイブリッド形電力準化システムを示す。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、余剰電力が生じる場合には、電力会社への売電が可能であるが、これも対象外とする。タイトルページは2つの部分で構成されます。

表4は固体高分子形燃料電池（PEFC）と固体電解質形燃料電池（SOFC）の効率調査結果を示す。PEFC、SOFCとも家庭用としての利用が考えられている。効率は①AC端かDC端か、②LHVかHHVか、③発電端か送電端か、また、④燃料によっ

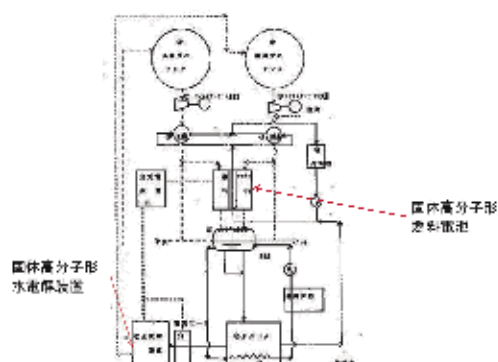


図 3 燃料電池－水電解ハイブリッド型
発電システムの実施例

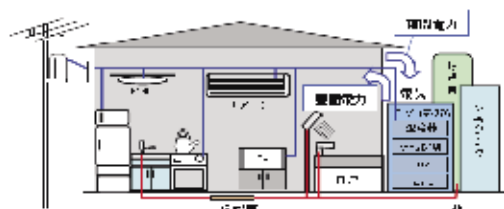


図 4 家庭用燃料電池コージェネレーション
システムの概要²⁷⁾

表 4 PEFC,SOFC の効率調査結果

		PEFC	SOFC	参考文献
発電端	LHV	35～38（目標） 35（目標） 40～50（H ₂ ） 35～45 31.4（目標） 38 39	—	8) 10) 10) 9) 8) 11) 12)
		59（H ₂ ）	56, 60 56.1	13) 8) 8)
	HHV	—	—	—
		35（目標）	—	9)
送電端	HHV	31.5（目標）	—	8)

(H₂)：燃料は水素、（目標）：目標値
LHV：低位発熱量基準、HHV：高位発熱量基準

て異なるため、これらが分かるように整理した。①では、インバータ（DC→AC）効率やコンバータ（AC→DC）効率に関与する。③では、所内動

表 5 固体高分子形水電解効率の調査結果

No.	会社名他	エネルギー効率		電流密度 (A/cm ²)	電極面積 (cm ²)	水素発生量 (Nm ³ /h)	温度 (℃)	規模	文献等
		消費電力 (kWh/Nm ³)	電解効率 (%)						
1	日本エネルギー	-	90~91	1	-	-	80	研究	6)
2	高砂化学工業	-	93.1 90	0.5 1	250	-	60.78	研究 (可逆せ)	1)
3	NEDO	-	94.1	0.5	-	-	-	研究	NEDO-WE-NET-0108, P-17(2001)
4	イーエナジー	4.4	80.6 (換算値)	-	-	10	-	製品	最新の水素技術 IV, PP-100~102(2006)
5	神鋼環境ソリューション	6.5	54.5 (換算値)	-	-	1	-	"	KOBELCO CATALOG No.UC001-1205
6	GSユアサ	10.21 10.82	34.7 ~32.8(換算値)	-	-	0.2 0.1	-	-	問合せ結果

力として消費しない場合の効率が発電端効率である。上述したPEFCを用いる電力平準化システムは、燃料は水素、出力はACの発電端効率である。最も高い効率は表中アンダーラインを引いた50%である。水素燃料でDC端効率59%があるが、インバータ効率99%¹⁴⁾とすると58%となる。

表5は固体高分子形水電解効率の調査結果を示す。研究段階の装置においては90%以上の電解効率がMAXである。一方製品として流通している装置の電解効率は80%程度に留まっている。これは電流密度に関連するスケールアップの検討が十分でないためと考えられ、したがって、水電解効率は90%とし、ACをDCに変換すると効率は90%¹⁵⁾であるため、現時点でのコンバータ効率を含む水電解効率の最も高い効率は81%と考える。

2.3 電力会社電力料金体系

Table 6^{16)~25)}は2010年度現在の各電力会社の電力料金を示す。

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

Table 6 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	③	Day time (8am~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	Day time (10am~5pm)	B	-	33.4	-	-	-	-	-	-	-	38.4
		Night time (11pm~7am)	A	-	9.17	-	-	-	-	-	-	-	11.5
	④-1	Morning (7am~10am)	C	-	23.1	-	-	-	-	-	-	-	26.2
		Evening (5pm~11pm)	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	④-2	Day time (10am~5pm)	B	-	-	-	32.7	-	32.3	-	-	-	-
		Night time (10pm~8am)	A	-	-	-	8.05	-	7.43	-	-	-	-
	④-3	Morning (8am~10am)	C	-	-	-	20.6	-	20.2	-	-	-	-
		Evening (5pm~10pm)	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	④-4	Day time (9am~5pm)	B	-	-	31.4	-	-	-	-	-	-	-
		Night time (11pm~7am)	A	-	-	9.33	-	-	-	-	-	-	-
④-5	Morning (7am~9am)	C	-	-	21.2	-	-	-	-	-	-	-	
	Evening (5pm~11pm)	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
④-6	Day time (1pm~6pm)	B	-	-	-	-	31.1	-	-	-	-	-	
	Night time (10pm~8am)	A	-	-	-	-	8.65	-	-	-	-	-	
④-7	Morning (8am~1pm)	C	-	-	-	-	24.2	-	-	-	-	-	
	Evening (6pm~10pm)	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

量により、3段階で設定されている。以下のケーススタディでは、電力使用量に依存する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。

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。昨年度と比較すると、夏季の朝晩電力料金体系については2社から6社に増加し、朝晩電力料金体系を採用している電力会社は10電力中6社である⁵⁾。

3. 1次近似的経済性簡便評価手法の概要

3.1 基本的考え方

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、コンテンジェンシーを含んだままのスタートとなることが一般的である。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1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。

1次近似的に経済性が成立しないとはコスト試算による最終的な経済性評価でも経済性は成立しないことを意味し、1次近似的に経済性が成立するとはコスト試算による最終的な経済性評価では経済性が成立しない場合があることを意味する。したがって、本開発手法による1次近似的経済性評価結果で、電力量料金体系を変更し、1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、開発断念を決断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。 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、

昼間買電したとした場合の買電コスト $\geq$ 夜間の買電コストである。

Fig. 5は、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。システムは成立するためには、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および③-1の1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。

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

パターンT②及び③での経済性成立条件は、昼

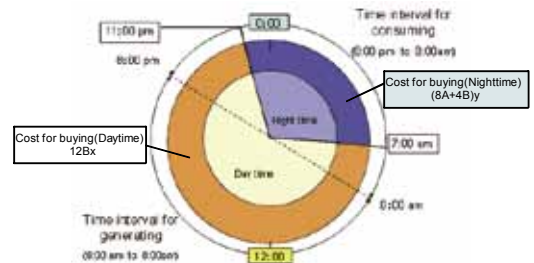


Fig. 5 Cost for selling electrical power and that for buying

間買電コスト $=12Bx$ ，夜間買電コスト $=(10A+2B)y$ となるから

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{1}{6} + \left(\frac{5}{6}\right) \cdot \left(\frac{A}{B}\right) \quad (7)$$

パターンT③での経済性成立条件は，昼間買電コスト $=12Bx$ ，夜間買電コスト $=(9A+3B)y$ で，次式で与えられる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{1}{4} + \left(\frac{3}{4}\right) \cdot \left(\frac{A}{B}\right) \quad (8)$$

パターン④での経済性成立条件は，昼間買電コスト $=(7B+5C)x$ ，夜間買電コスト $=(8A+4C)y$ で，次式で与えられる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{(8A+4C)}{(7B+5C)} \quad (9)$$

ここでCは朝晩電力量料金単価である。

パターン④-1での経済性成立条件は，昼間買電コスト $=(7B+5C)x$ ，夜間買電コスト $=(10A+2C)y$ で，次式で与えられる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{(10A+2C)}{(7B+5C)} \quad (10)$$

パターン④-2での経済性成立条件は，昼間買電コスト $=(8B+4C)x$ ，夜間買電コスト $=(8A+4C)y$ で，次式で与えられる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{(8A+4C)}{(8B+4C)} \quad (11)$$

パターン④-3での経済性成立条件は，昼間買電コスト $=(5B+7C)x$ ，夜間買電コスト $=(10A+2C)y$ で，次式で与えられる。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq \frac{(10A+2C)}{(5B+7C)} \quad (12)$$

3.2 限界昼夜時間及び限界発電・消費時間

発電時間は8am～8pmの12時間とし，Fig. 6に示したように，夜間時間を $(8+b)$ 時間，昼間時間を $(16-b)$ 時間とし，パターンT①及びパターンT③において，それぞれ次式を成立させるb値を求める。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} = \frac{(4-b)B + (8+b)A}{12B} \quad (13)$$

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} = \frac{(3-b)B + (9+b)A}{12B} \quad (14)$$

ここで， $16-b$ 及び $8+b$ が限界昼夜時間である。

また，これまでのスタディではFig. 5に示したように，発電時間は8am～8pmの12時間であったが，ここでは，Fig. 6に示すように $h_{FC}=12+a$ ， $h_{WE}=12-a$ とし，通期パターンであるパターンT①及びパターンT③においてそれぞれ次式を成立させるa値を求める。

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} = \frac{8A + (4-a)B}{(12-a)B} \quad (15)$$

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} = \frac{9A + (3-a)B}{(12-a)B} \quad (16)$$

ここで， $12+a$ 及び $12-a$ が限界発電・消費時間である。

以上，(13)式～(16)式において η_{FC} ， η_{WE} の実績値を代入することにより，a値，b値を算出することが出来る。

3.3 限界電力量料金単価

パターンT①及びT③における経済性成立条件はそれぞれ，(6)式及び(8)式で表わされるが，これらの式は，すなわち，夜間電力量料金単価Aと昼間電力量料金単価Bの比(A/B)の関係で示せる。等号が成立するA/B値を限界電力量料金単価と呼称する。

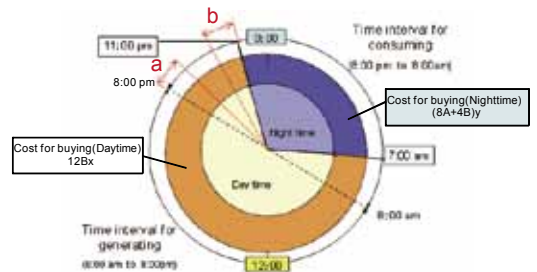


Fig. 6 Cost for selling electrical power and that for buying to evaluate critical values of night time and so on

4. 評価結果と考察

4.1 直近の電力量料金体系に対する評価

Fig. 7は各パターンにおける η_{FC} と η_{WE} の関係を示したものである。図中、一点鎖線、点線、二点鎖線はそれぞれパターンT①、T②及びT③の特性を示す。パターン③系は実線群、パターン④系は波線群で示した。図中、×は η_{FC} 、 η_{WE} の実績値を示す。表4の考察結果から、 η_{FC} の実績値は0.5、 η_{WE} の実績値は0.81とした。

この実績値より下にある特性が経済性が成立する。これをクリアするのはパターン④-1の特性のみで、KYSとHORの夏季電力量料金単価である。図中、+はインバータ効率99%とした場合の実績値($\eta_{FC}=0.58$, $\eta_{WE}=0.81$)を示す。これを基準とすると、先の実績値ベースに加えて、パターン③ (HOR) 及びパターン④-3 (HOR) がクリアするが、いずれも夏季電力量料金単価の場合であり、通期でのものはない。

4.2 限界昼夜時間及び限界発電・消費時間

Fig. 8⁵⁾及び**Fig. 9**⁵⁾は、**Fig. 10**に示すように、夜間時間を12時間と増加した場合のパターンT①及びT②における η_{FC} - η_{WE} の関係を示す。図中、記号×及び+は、**Fig. 7**と同じ実績値を示す。この場合の経済性成立条件は、**Fig. 8**中に示した

$$\eta_{FC} \cdot \eta_{WE} \geq A/B \text{ である。}$$

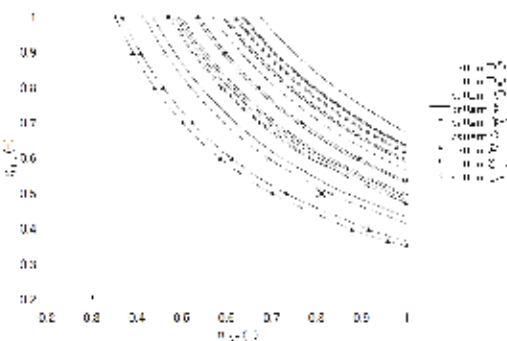


Fig. 7 Relationship between η_{FC} and η_{WE} in pattern shown in Table 6

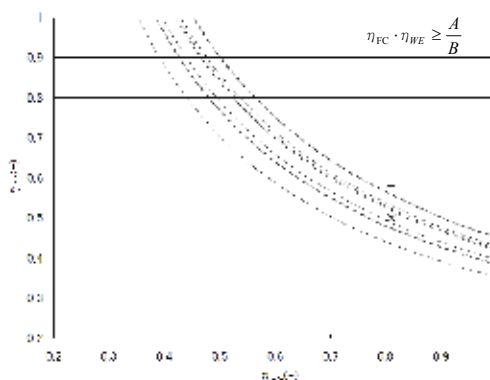


Fig. 8 Relationships between η_{FC} and η_{WE} in companies with pattern T①

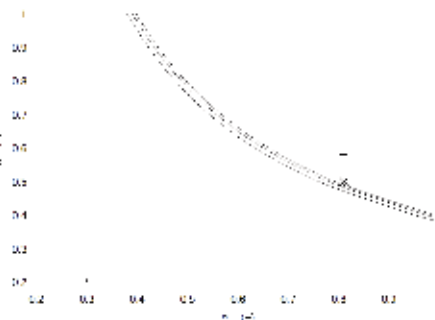


Fig. 9 Relationship between η_{FC} and η_{WE} in companies with pattern T②

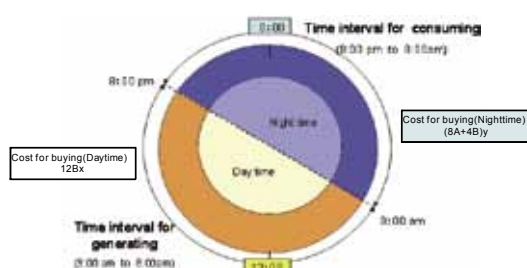


Fig. 10 Cost for selling electrical power and that for buying in assuming that daytime hours is equal to nighttime hours

これより、パターンT①の一部が、パターンT②のすべてが成立条件をクリアすることが分かる。また、実績値+に対しては、すべての通期のパターンに対して成立条件をクリアする。

表7は実績値 $\eta_{FC}=0.5$, $\eta_{WE}=0.81$ に対するパターンT①及びT③における限界昼夜時間を示す。こ

表 7 パターンT①及びT③における限界昼夜時間
($\eta_{FC}=0.5, \eta_{WE}=0.81$)

			電力会社										
			TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
			4.38	4.30	5.00	3.81	3.58	3.02	4.51	3.61	-	5.04	
Pattern T①	限界昼夜 時間	b値											
		夜間時 間(h)	6:37 ~7am	6:42m ~7am	6:50 ~7am	7:12m ~7am	7:25 ~7am	7:59m ~7am	6:29m ~7am	7:29m ~7am	-	5:58m ~7am	
		時間(h)	12:38	12:3	13	11:58	11:58	11:02	12:52	11:62	-	13:03	
		夜間時 間(h)	1:11	1:1	1am	1am	1am	1am	1am	1am	-	1:03	
		昼間時 間(h)	6:37am	6:42m	6:00m	7:12m	7:25m	7:59m	6:29m	7:23m	-	5:58m	
			時間(h)	11:62	11:7	11	12:02	12:42	12:98	11:48	12:38	-	10:97
Pattern T③	限界昼夜 時間	b値											
		夜間時 間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4:13	
		時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5:58m ~8am	
		夜間時 間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13:13	
		昼間時 間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8am~ 6:32m	
			時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	10:67	

表 8 パターンT①及びT③における限界昼夜時間
($\eta_{FC}=0.58, \eta_{WE}=0.81$)

		電力会社										
		TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
Pattern T①	限界昼夜 時間	b値	3.04	2.96	3.58	2.52	2.32	1.82	3.15	2.35	~ 3.62	
		夜間時間 ~ 7am	8:02pm ~ 7am	7:25pm ~ 7am	8:29pm ~ 7am	8:41pm ~ 7am	9:11pm ~ 7am	7:51pm ~ 7am	8:39pm ~ 7am	~ 7:23m m		
		時間(h)	11.03	10.97	11.58	10.52	10.32	9.82	11.15	11.35	~ 11.62	
		時間(h)	7am 7:58pm	7am 8:02pm	7am 7:25pm	7am 8:29pm	7am 8:41pm	7am 9:11pm	7am 7:51pm	7am 8:39pm	~ 7:23m	
		時間(h)	12.97	13.03	12.42	13.48	13.68	14.18	12.85	12.65	~ 12.38	
		b値	-	-	-	-	-	-	-	-	~ 2.70	
Pattern T③	限界昼夜 時間	夜間時間	-	-	-	-	-	-	-	-	8:18pm ~ 8.7m	
		時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	~ 11.1	
		時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	8am ~ 8:18pm	
		時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	~ 12.3	
		b値	-	-	-	-	-	-	-	-	~ 2.70	
		時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	8:18pm ~ 8.7m	

表 9 パターンT①及びT③における限界発電・昼夜時間
($\eta_{FC}=0.5, \eta_{WE}=0.81$)

		電力会社										
		TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
Pattern T①	a値	4.25	4.19	4.61	3.97	3.71	3.29	4.32	3.73	-	4.64	
	発電 時間帯	～8am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am
		15min	0.11am	0.37am	11.52pm	11.43pm	11.17pm	0.19am	11.44pm	-	-	0.38am
		瞬間(h)	16.25	16.19	16.61	15.67	15.21	16.32	15.73	16.34	-	16.64
		消費時間	0.15am	0.11am	0.37am	11.52pm	11.43pm	11.17pm	0.19am	11.44pm	-	0.38am
Pattern T③	a値	4.25	4.19	4.61	3.97	3.71	3.29	4.32	3.73	-	4.64	
	発電 時間帯	～8am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am
		15min	0.11am	0.37am	11.52pm	11.43pm	11.17pm	0.19am	11.44pm	-	-	0.38am
		瞬間(h)	7.75	7.81	7.39	8.13	8.29	8.71	7.68	8.27	-	7.36
		消費時間	-	-	-	-	-	-	-	3.78	-	-
Pattern T③	a値	4.25	4.19	4.61	3.97	3.71	3.29	4.32	3.73	-	4.64	
	発電 時間帯	～8am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am	3am
		15min	0.11am	0.37am	11.52pm	11.43pm	11.17pm	0.19am	11.44pm	-	-	0.38am
		瞬間(h)	7.75	7.81	7.39	8.13	8.29	8.71	7.68	8.27	-	7.36
		消費時間	-	-	-	-	-	-	-	3.78	-	-

表 10 パターンT①及びT③における限界発電・昼夜時間
($\eta_{FC}=0.58, \eta_{WE}=0.81$)

		電力会社											
Pattern	T①	a値	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
			3.30	3.24	3.71	2.88	2.69	2.23	3.39	2.72	3.71	-	-
			8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~
			時間(h)	11:18m	11:14m	11:43m	10:53m	10:41m	10:14m	11:23m	10:43m	10:43m	11:44m
			消費時間(h)	15.37	15.24	15.71	14.88	14.69	14.23	15.39	14.72	15.74	15.47
Pattern	T③	a値	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
			3.30	3.24	3.71	2.88	2.69	2.23	3.39	2.72	3.71	-	-
			8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~
			時間(h)	11:18m	11:14m	11:43m	10:53m	10:41m	10:14m	11:23m	10:43m	10:43m	11:44m
			消費時間(h)	15.37	15.24	15.71	14.88	14.69	14.23	15.39	14.72	15.74	15.47
Pattern	T③	a値	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
			3.30	3.24	3.71	2.88	2.69	2.23	3.39	2.72	3.71	-	-
			8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~
			時間(h)	8.63	8.76	8.29	9.12	9.31	9.77	8.61	9.28	8.26	8.26
			消費時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pattern	T③	a値	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI	
			3.30	3.24	3.71	2.88	2.69	2.23	3.39	2.72	3.71	-	-
			8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~	8am~
			時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			消費時間(h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

れより、経済性をクリアするには、夜間時間を現状より3時間から5時間程度増加させる必要があることが分かる。夜間時間の最大は12時間である

から、夜間時間が12時間を超えている電力会社は経済性が成立せず、Fig7に示した結果に一致する。TOH, TOK, CHB, SHK, CHG及びOKIは不成立である。

表8は実績値 $\eta_{FC}=0.58, \eta_{WE}=0.81$ とした場合の限界昼夜時間を示す。これより、経済性をクリアするには夜間時間を1時間から3時間半程度増加させる必要があることが分かる。この場合、すべての会社が夜間時間を増加させることにより、経済性をクリアすることが出来る。

表9は実績値 $\eta_{FC}=0.5, \eta_{WE}=0.81$ に対するパターンT①及びT③における限界発電・消費時間を示す。これより、経済性をクリアするには、発電時間を3時間から4時間半程度増加させる必要があることが分かる。この場合夜間時間は8時間の設定であるから、発電時間は最大16時間までで、これ以上の会社は経済性が成立しない。TOH, TOK, CHB, SHK及びOKIが不成立である。

表10は実績値 $\eta_{FC}=0.58, \eta_{WE}=0.81$ とした場合の限界発電・消費時間を示す。

これより、夜間時間を現状より2時間から4時間程度増加させる必要があることが分かる。この場合には、すべての会社が発電時間を増加することにより経済性をクリアすることができる。

4.3 限界電力量料金単価

表11はTable. 6における通期の場合に、A/B値を

表 11 通期パターンにおけるA/B値

		Electric utilities									
Through-out seasons	Patterns	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI
Through-out seasons	Patterns	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI

表 12 通期パターンにおける限界電力量料金単価

		電力会社									
Through-out seasons	Patterns	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI
Through-out seasons	Patterns	TOH	TOK	CHB	KYS	HOK	HOR	SHK	KAS	CHG	OKI

追加したものである。これに対し、表12はパターンT①及びT③における限界電力量料金単価を、表11に示したA/B値と比較して示した。限界電力量料金単価をクリアする電力会社はなく、4.1節での結論を裏付ける。これより経済性を成立させるためには、A/B値を現状より0.2から0.3程度減少させる必要がある。すなわち夜間電力量料金単価Aの減少、または昼間電力量料金単価Bの増加が必要である。

以上、経済性を成立させるための限界昼夜時間、限界発電・消費時間及び限界電力量料金単価の算出式を示し、実績値 η_{FC} 、 η_{WE} に対して、それぞれの値を試算した。これにより、経済性を成立させるための電力量料金体系の設定が可能となる。

5. 結言

1次近似的に経済性が成立する限界昼夜時間帯等を求めることができる経済性簡便評価手法を検討し、以下の結論を得た。

- (1)最も単純化した場合での1次近似的経済性評価ではあるが、夏季の電力量料金体系で、現時点での $\eta_{FC}(0.5)$ と $\eta_{WE}(0.81)$ の実績に対して、電力平準化システムは1次近似的経済性が成立する場合もあることを示した。特に夏季の3つの時間帯に分けて設定した電力料金体系で1次近似的に経済性が成立するが、通期の電力量料金体系で1次近似的に経済性が成立するものはなかった。
- (2)通期の電力量料金体系で1次近似的に経済性が成立するためには、夜間時間を現状より、3時間から5時間に増加させる必要がある。
- (3)通期の電力量料金体系で1次近似的に経済性が成立するためには、発電時間を現状の12時間より、2時間から4時間増加させる必要がある。
- (4)通期で1次近似的に経済性が成立するためには、夜間電力量料金単価の減少、または昼間電力量料金単価の増加が必要である。限界電力量料金単価を現状より0.2～0.3程度減少させる必

要がある。

- (5)以上により、1次近似的経済性が成立する電力量料金体系の設定が可能である。

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)
- 6) T.kato, New-Energy Division Seminar of The Japan Institute of Energy, pp.1-11 (2008)
- 7)T.Ozawa, The Journal of Fuel cell Technology, Vol.1, No.1,pp.54-58(2001)
- 8)燃料電池 実用化への挑戦,工業調査会, p.42(2007)
- 9)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) 燃料電池の全て, 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>
- 15)<http://www.rohm.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>