住宅用エネルギー・システムの評価

辻　毅一郎

1. はじめに

夏はできるだけ涼しく，冬は暖かく，湯も十分に使って快適な生活が営みたいという希望は誰しもが抱いている．住宅には通常，厨房機器および給湯機が付属設備として備えられており，冷房や暖房については，入居する人々がそれぞれの好みに応じて適切な機器を購入している場合が多い．これらの機器によって各住宅におけるさまざまなエネルギー・システムが構成されていることになる．

2度の石油危機をきっかけとして，脱石油が叫ばれ，住宅においてもエネルギーの有効利用が重要な課題となり，自然エネルギーや天然ガスを利用した新しい型の住宅用エネルギー・システムが種々提案されている．近い将来，これらの新しいシステムがそれぞれの技術的課題を克服し，われわれの目の前にならべられたとすると，どのようなシステムを選択することになるのであろうか．

筆者らは，関西文化学術研究都市内の住宅におけるエネルギー・システムの望ましい姿について詳しい検討を行なったが，その中で，このような評価問題に直面することとなり，本特集のテーマであるＡＨＰ[1,2] を用いて比較評価を行なうこととなった．以下でその内容について紹介する．

つじ　きいちろう　大阪大学　工学部　電気工学教室
〒565　吹田市山田丘 2—1

2. 住宅用エネルギー・システムの選択

住宅用エネルギー・システムは，要素技術の組合せで数多く考えられる．表 1 は，文献[3] の研究で考察の対象とした住宅用エネルギー・システムの代替案である．住宅は一戸建て住宅（以下では，戸建住宅と記す），低層集合住宅(タウンハウス)，高層集合住宅に大別できる．備考欄に，そのシステムが特に意識した住宅の種類を示した．表 1 では高層住宅向きのものは省いてある．

表 1 の住宅用エネルギー・システムには，現在普通に使われている従来型のシステムだけでなく，現時点ではまだ技術的開発課題をもつ将来指向型のものも含まれている．将来指向型のシステムの特徴として，太陽(自然)エネルギーの利用，天然ガスの有効利用および電力化（負荷平滑化に貢献）をあげることができよう．個々のシステムを明確に定義するにはシステムフロー図が欠かせないが，ここではそれを論じるのが目的ではないので，主要な構成要素機器を記述するにとどめた．詳しくは文献 [3,4,5] を参照していただきたい．なお，厨房機器はここでは考察対象から除外されている．

表 1 からわかるように，将来指向型のシステムを含めると，住宅用エネルギー・システムの代替案は多く，選択の余地が大きい．戸建住宅を建てるさいにエネルギー・システムを自由に選択できるとすると，表 1 ではＡからＫまでの11種類もの

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

システムがあり，各代替案の優劣をいかに評価し，好みにあったシステムをどう選択するかが問題となる．このためには快適性や経済性あるいはエネルギーの有効利用度といった次元の異なる評価を総合的に行なう必要が生じる．ＡＨＰを採用したのは，そのような評価が比較的簡単に，合理的に行なえると判断したためである．

表 1　住宅用エネルギー・システムの代替案

記号	システム名	内容		備考
		冷暖房機器	給湯機器	
A	ガスストーブ暖房・クーラー冷房方式	ガスストーブあるいはガスファンヒーター，クーラー（冷房専用）	ガス給湯器	
S—B	電気ストーブ暖房・クーラー冷房方式	電気ストーブあるいは電気ファンヒーター，クーラー（冷房専用）	ガス給湯器	
C	ヒートポンプ暖冷房方式	マルチヒートポンプエアコン	ガス給湯器	
S—D	全電化方式	マルチヒートポンプエアコン	深夜電力利用給湯機	
E	ガスセントラル暖房給湯方式	ガスセントラル暖房給湯機およびクーラー（冷房専用）	ガスセントラル暖房給湯機	
S—F	パッシブソーラー方式	原則として使用せず	自然循環式太陽熱温水器	戸建住宅用
G	太陽熱強制循環式給湯システム	マルチヒートポンプエアコン	強制循環式太陽熱給湯	
S—H	太陽熱ヒートポンプ冷暖房・給湯方式	電動ヒートポンプ・冷却塔高温・低温蓄熱槽によるシステム		戸建住宅用
I	蓋電池式太陽熱・光ハイブリッド方式	ソーラーセル電源駆動電動ヒートポンプ	太陽熱給湯機	戸建住宅用タウンハウス用
S—J	砕石蓄熱・蓄冷槽式太陽熱・光ハイブリッド方式	ソーラーセル電源駆動電動ヒートポンプ砕石槽	太陽熱給湯機	戸建住宅用タウンハウス用
S—K	全ガス化方式	ガスエンジン駆動ヒートポンプ	排ガスボイラ給湯システム	戸建住宅用
L	太陽熱利用冷暖房給湯方式	吸収式冷凍機太陽熱暖房	太陽熱給湯	タウンハウス用

3. 住宅用エネルギー・システムの評価構造

住宅用エネルギー・システムの評価にＡＨＰを適用するに当り，図１に示すような評価構造が採用された．これは評価に参加した20数名の討議によって決定したもので，一般に住宅用として望ましいエネルギー・システムに要求される条件がほとんど網羅されている．

利便性は，設置しようとする機械設備に関する要件を表わしており，４項目から構成されている．安全性は，基本的な要件で，住宅用エネルギー・システムはいずれも十分安全でなければならないことから，比較評価のための独立な基準としては採用せず，信頼性の中に含めて考えることとした．

快適性は，住宅に住む人が，十分快適に過ごせるかを表わすもので，肉体的感覚からの評価基準で５項目で構成されている．

環境性は，周辺の他の住民に対して負うべき社会的責任に関する評価基準としてとらえており，３項目から構成されている．

経済性は，初期コストとランニングコストの２項目にわけ，それぞれに対する金銭的感覚の相違を考慮することとした．

最後に省エネルギー性は，１次エネルギーの利用効率の高さ，あるいは自然エネルギーの有効利用の程度を表わすもので，エネルギーの有効利用という観点からの評価基準である．ランニングコストがこれに相当すると見られがちであるが，両者は異なる評価基準と考えるのが妥当であろう．

4. 戸建住宅用エネルギー・システムの評価過程

表１に掲げた住宅用エネルギー・システムの代

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

替案は，戸建住宅用，タウンハウス用，および高層住宅用のそれぞれについて別々のグループにより評価された．ここでは戸建住宅の評価過程についてのみ述べる．

評価は，住宅用エネルギー設備の専門家を含む十数名のグループにより行なわれた．評価の対象となったのはAからKまでの11種類であるが，一度に比較するには代替案の数が多く，実施が困難であると判断された．そこでまず，従来型のシステムであるAからEまでの5代替案についてAHPを適用し，そのなかのいくつかと，将来指向型のシステムとで再度AHPを適用するという2段階をとることとした．

詳細は省略するが，従来型のシステムをAHPで評価した結果，B（電気ストーブ暖房・クーラー冷房方式）およびD（全電化方式）が比較的高い評価を得た．そこでこれらのシステムとF（パッシブソーラー方式），H(太陽熱ヒートポンプ冷暖房・給湯方式)，J(砕石蓄熱・蓄冷槽太陽熱・光ハイブリッド方式）およびK（全ガス化方式）の計6種類についてあらためて評価を行なった．表1でこれらのシステムには記号Sをつけた．

Fは，南面開口部のひさしを長くする，風通しを良くする，温室効果を利用するなどの方法で建物を省エネルギー型構造とし，暖冷房機器を原則として使用せず，給湯も動力を使用しない自然循環式太陽熱給湯器により行なう．Hは太陽熱を給湯だけでなく暖房にも積極的に利用する．冬期には集熱器で集熱した10～20℃の熱を低温蓄熱槽にたくわえ，電動ヒートポンプで30～50℃に昇温して高温蓄熱槽に送り，暖房・給湯用熱源として利用する．夏期には同じ電動ヒートポンプを冷凍機として用い，低温側は太陽集熱系から切り離して蓄冷槽として利用する．Jは太陽エネルギーを熱だけでなく電気にも変換して利用し，昼間発電した電力によりヒートポンプを駆動して得られた熱あるいは冷熱を砕石槽に蓄え，エアダクトにより温風あるいは冷風を送って暖冷房に利用する．K

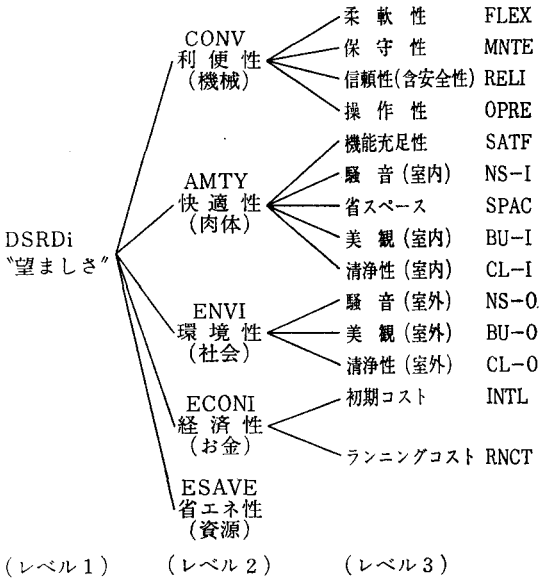

図 1 住宅用エネルギー・システムの評価基準とその階層構造

は天然ガスによりガスエンジンを駆動し，ヒートポンプを動かすとともに，その排熱を給湯などにも利用する．

評価は図1の階層図にしたがい，下位のレベルから順次行なわれた．評価の前提として，評価の対象となったシステムはいずれも技術的問題が解決され，どのシステムも同じように選択できるものとした．レベル3の評価基準のうち快適性，経済性および省エネルギー性に関連した基準について表2に一対比較の結果ならびに，そのような結果に至ったおよその根拠の一部を示した．経済性については，評価の対象としたシステムが将来指向型のシステムで不確定要因が多く，問題が多い．しかし，ここでは，一応現時点での主要機器およびエネルギー価格を参考とし，初期コストおよびランニングコストを表3のような前提条件のもとで算出し，その結果を評価に用いている．これらレベル3の評価基準すべてについて，専門家を含む評価グループの間で一応の合意が得られ，かなり客観的な評価となっていると思われる．

表4に各々の評価基準についてウエイトを計算

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

表 2 一対比較の結果の一部

S—B：電気ストーブ暖房・クーラー冷房方式　S—D：全電化方式　S—F：パッシブソーラー方式
S—H：太陽熱ヒートポンプ冷暖房給湯方式　S—J：砕石蓄熱・蓄冷槽太陽熱・光ハイブリッド方式
K：全ガス化方式

一対比較結果および重みの計算結果

SATF	S-B	S-D	S-F	S-H	S-J	S-K	weights
S-B	1	1/3	7	1/3	1	1/3	.102
S-D	3	1	9	1	3	1	.260
S-F	1/7	1/9	1	1/9	1/5	1/9	.024
S-H	3	1	9	1	3	1	.260
S-J	1	1/3	5	1/3	1	1/3	.094
S-K	3	1	9	1	3	1	.260

NS-1	S-B	S-D	S-F	S-H	S-J	S-K	weights
S-B	1	3	1/9	3	1/3	3	.093
S-D	1/3	1	1/9	1	1/5	1	.041
S-F	9	9	1	9	7	9	.603
S-H	1/3	1	1/9	1	1/5	1	.041
S-J	3	5	1/7	5	1	5	.183
S-K	1/3	1	1/9	1	1/5	1	.041

ESAVE	S-B	S-D	S-F	S-H	S-J	S-K	weights
S-B	1	1/3	1/7	1/7	1/9	1.5	.028
S-D	3	1	1/5	1/5	1/7	1/3	.052
S-F	7	5	1	1	1/2	2	.216
S-H	7	5	1	1	1/2	2	.216
S-J	9	7	2	2	1	3	.363
S-K	5	3	1/2	1/2	1/3	1	.124

注　釈

機能充足性
- D, H, Kは冷暖房を十分に行なうのであるから，充足性が高い．これらの間に差異はない．
- B, F, Jを比べると，気象条件などに左右されやすいパッシブ型が最も不利，また長期間(1～2週間)の蓄熱，蓄冷を前提としたJも気温変化に十分速く対応できず，充足性に乏しいと考えられる．
- C.R.＝0.019

室内騒音
- 騒音の発生そのものがないパッシブシステムは，この点きわめて有利である．
- D，H，Kは，年間通じてコンベクタのファンからの騒音が避けられない．
- Jはエアダクトから流速の遅いエアが流れるので，騒音はほとんどないと考えてよい．
- C.R.＝0.055

省エネルギー性
- 自然エネルギー以外の1次エネルギーの年間消費量 (Gcal) はおよそ以下のとおり．

	都市ガス	電力	合計		都市ガス	電力	合計
S—B	4.8	8.6	13.4	S—H	—	3.0	3.0
S—D	--	10.5	10.5	S—J	0.3	—	0.3
S—F	1.1	1.4	2.5	S—K	5.4	—	5.4

- C.R.＝0.024

した結果をまとめて示した．柔軟性，保守性では設備の大がかりでないものが有利になっている．信頼性ではBの電気ストーブが安全性の面から低い評価となっている．操作性では，B，F以外のシステムはマイコン制御であるのでそれらの間に差はないとされている．環境性に関する評価基準では騒音発生源の有無，室外設備の有無，排ガスの有無が考慮されている．

レベル2および1の評価基準は，省エネルギー性を除いて主観的要素が強く，グループで評価した場合，合意の得られにくい基準であるといえよう．しかし利便性，快適性，および環境性については以下のような見方が採用された．まず利便性に関しては，信頼性と操作性に高いウエイトがかけられた．これは，戸建住宅においては住宅ごとにエネルギー・システムをもち，個人の責任でそ

表 3 コスト計算のための前提条件

暖冷房対象室数	3室	電力熱換算	860 kcal/kWh
給湯負荷	3.87 Gcal/年	電気温水器効率	0.8
暖房負荷(冬期4カ月運転)	2.4 Gcal/年	FF式ストーブ効率	0.83
冷房負荷(夏期4カ月運転)	1.5 Gcal/年	電気料金単価	30円/kWh
ヒートポンプCOP	2.5 (冷房時)	深夜電気料金単価	15円/kWh
	3.5 (暖房時)	ガス料金単価	16円/Mcal
給湯用熱効率(η)	0.8		

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

表4 ウエイトの計算結果

		FLEX	MNTE	RELI	OPRE	SATF	NS-I	SPAC	BU-I	CL-I	NS-O	BU-O	CL-O	INTL	RNCT
レベル3	B	.351	.267	.050	.086	.102	.093	.058	.087	.167	.186	.324	.062	.443	.026
	D	.180	.133	.226	.221	.260	.041	.226	.162	.167	.095	.324	.333	.197	.042
	F	.351	.416	.512	.028	.024	.603	.039	.043	.167	.581	.169	.114	.145	.201
	H	.060	.054	.121	.221	.260	.041	.226	.147	.167	.042	.051	.296	.025	.201
	J	.029	.096	.063	.221	.094	.183	.226	.414	.167	.071	.051	.172	.044	.434
	K	.029	.035	.028	.221	.260	.041	.226	.147	.167	.025	.082	.022	.145	.095

	CONV		AMTY		ENVI		ESAVE		ECON1		ECON2
レベル2	FLEX	.044	SATF	.551	NS-O	.637	B	.028	INTL	.750	.250
	MNTE	.131	NS-I	.136	BU-O	.105	D	.052	RNCT	.250	.750
	RELI	.562	SPAC	.035	CL-O	.258	F	.216			
	OPRE	.264	BU-I	.069			H	.216			
			CL-I	.208			J	.363			
							K	.124			

		DSRD1	DSRD2	DSRD3
レベル1	CONV	.091	.186	.031
	AMTY	.289	.489	.061
	ENVI	.041	.100	.254
	ESAVE	.041	.040	.476
	ECON	.537	.186	.178

れを利用するため，安全性，使いやすさを考慮したことによる．快適性についてはまず暖冷房が十分きかなければならないし，また室内の空気を汚すようなものは歓迎できない点が考慮された．環境性に関しては近所迷惑にならないような配慮が最も重要とされている．

経済性および最終目標である望ましさについてはグループでの合意を得ることはできないと思われたので，経済性については初期コスト重視（ECON 1)とランニングコスト重視 (ECON 2)の2つのシナリオが，望ましさについては，経済性重視(DSRD 1)，快適性重視(DSRD 2)，省エネルギー最重視(DSRD 3)の3つの立場のシナリオが意図的に設定されウエイトが計算された．

これらの組合せから得られる6つのシナリオについての総合的なウエイトが表5のように計算された．これによると，特にきわだって高い評価となったシステムはないが，B(電気ストーブ暖房・クーラー冷房方式）は，初期コストの安い，手軽なシステムとして評価され，J（砕石蓄熱・蓄冷槽式太陽熱・光ハイブリッド方式）は，ランニングコストが安く，省エネルギー性からも優れたシステムとして評価されている．F（パッシブソーラー方式）は表4からわかるように充足性で他のシステムより劣っているにもかかわらず，快適性重視のシナリオで高い評価となった．これは，Fが基本的に冷暖房機器を使用しないため，柔軟性，保守性，信頼性，騒音で他よりいちじるしく優れていると評価され，かつ DSRD 2 のウエイトからわかるように，快適性が重視されると同時に，利便性にもかなりのウエイトがかけられているためである．

表1に示したタウンハウス用のシステム，および表からは省いたが，高層住宅用のシステムについても上と同じ階層図を用い，同様の考え方で評価が行なわれた．これらの結果については文献[3, 4, 5] に詳しく述べられている．

5. むすび

住宅用エネルギーシステムの評価へのAHPの適用について述べた．AHPによる総合的な評価結果は，評価構造すなわち採用する評価基準とその階層構造に依存しかつ評価を行なう人々の立場にも大きく依存する．また住宅用エネルギー・システムについては，技術の進歩や価格の変化により評価が大幅に変わり得る．したがって，本文で紹介した住宅用エネルギー・システムの評価結果は絶対的なものでないことに十分注意しておくこ

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

表5 総合的なウエイト

	経済性重視シナリオ		快適性重視シナリオ		省エネルギー最重視シナリオ	
	初期コスト重視ケース	ランニングコスト重視ケース	初期コスト重視ケース	ランニングコスト重視ケース	初期コスト重視ケース	ランニングコスト重視ケース
B	.231	.119	.154	.116	.126	.089
D	.172	.131	.188	.173	.118	.104
F	.183	.198	.214	.219	.257	.262
H	.121	.168	.156	.173	.159	.175
J	.147	.252	.143	.179	.234	.269
K	.143	.130	.146	.141	.105	.101

とが必要であろう．

本文で見たように評価基準の中には専門家を含むグループが何度か一対比較をくりかえすことにより合意に達し，客観的な評価が得られたものと，本質的に，評価する者の主観に依存するものとがある．前者については，評価過程を通じて対象とするシステムのイメージが明確になるにつれ，自然に合意形成ができたようである．一般の人々にとっては，システムのイメージを作ることや評価の階層図を考えること自体がそもそもむずかしいであろう．そこで評価構造の決定ならびに一部の評価基準に関する判断を専門家にゆだね，残りの基準に関して主観的判断をするようにすれば，誰にでも専門家の意見をとり入れたかなり高度な判断ができるということになるであろう．

ここの実施例では，たとえばレベル2の利便性，快適性，環境性，経済性および最終目標であるレベル1の望ましさについてだけ，個人が入力を行ない，レベル3については表2の結果をそのまま用いることによって，好みに応じたエネルギー・システムを選択するというようなことができる．

一方，専門家にとっては，特定の代替案が有利または不利となった原因を，一部の一対比較表を変化させるといった一種の感度分析を行なうことによって追求し，その代替案に関する重点的技術開発課題を明らかにすることができよう．また異なる評価者の立場や意見の相違がどのような点にあるのかを判断することにも利用できよう．

ここで紹介した住宅用エネルギー・システムの評価は，(財)大阪科学技術センターのもとに組織された新トータルエネルギーシステム部会において，2日間をかけ，パーソナルコンピュータの支援のもとに実施された．AHPによる評価を示唆された大阪大学鈴木胖教授ならびに同部会のメンバー諸氏に感謝の意を表する．

参考文献

[1] Saaty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.

[2] Special Issue on Modeling of Social Decision Processes, Mathematics and Computers in Simulation, Vol. XXV, No. 2, April 1983.

[3] 大阪科学技術センター，21世紀都市のトータルユーティリティシステムの提言とその評価，新トータルユーティリティシステム部会報告書，1983.3

[4] 辻，朴，鈴木：Analytic Hierarchy Process による住宅用エネルギー・システムの比較評価，第10回システムシンポジウム，1983.8

[5] 辻，朴，鈴木：階層分析法による高層住宅用エネルギー・システムの評価，エネルギー資源，6，6 (1985)，63～70.

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．