

発電システムを備えた省エネルギー住宅の エクセルギー経済評価（その2）

－モデル住宅のエクセルギー経済評価－

Exergoeconomic Evaluation of Low Energy Houses Equipped with Electric
Generation Systems (Part 2)

－Exergoeconomic Evaluation of a model case－

太田 勇 *1
Isamu OHTA

長野 克則 *2
Katsunori NAGANO

Abstract

Exergoeconomics, an exergy based economics mainly used in chemical plants or energy conversion processes, is applied for evaluating energy performance of a test house. Performances of systems for different usages are now comparable by using the index exergy efficiency and specific exergetic cost. Performance of co-generation system is well understood by the index since exergetic evaluation considers the value of energy loads or produced energies. Several simulative trials made clear that values of houses with newly introduced energy systems are better expressed with the concept of exergoeconomics.

キーワード：省エネルギー住宅、エクセルギー、太陽光発電、コージェネレーション、環境評価、コスト評価

Key Words : Low energy house, Exergy, Photo Voltaic system, Co-generation, Environmental evaluation, Cost evaluation

はじめに

住宅では質の異なる様々なエネルギー用途負荷に対し、質の異なる様々なエネルギーを供給している。従って、エネルギー利用の効率性と経済性を評価する上で、エネルギーの量的な評価だけでなく、質的な観点も考慮するべきであると考え。質を含めたエネルギー利用の効率性と経済性を評価する手法として、エクセルギー経済学 (Exergoeconomics) があり、住宅への適用方法について前報 (その1) でまとめている。本報では、前報の手法を用いてモデル住宅のエクセルギー経済評価を行った結果について報告する。

初めに、モデル住宅の各エネルギー用途に対するエクセルギー負荷を求め、用途ごとのエクセルギー負荷に対するエネルギーコスト (エクセルギー単価) と、エクセルギー負荷に対する一次エクセルギー投入量 (エクセルギー効率) の関係を述べる。また、モデル住宅の断熱と設備を変更した複数の仕様についても、エネルギー利用の効率性と経済性を検証したので、その結果について述べる。

1. エクセルギー負荷の試算

1.1 暖冷房エクセルギー負荷

住宅の暖冷房エクセルギー負荷をFig.1、2及びTable.1のモデル住宅を用いて試算してみる。延床面積156 m²の二階建て住宅で、一階にリビングダイニングと和室、二階に主寝室と子供室が二つある。窓開口面積 (32.2 m²) の、59.6 % (19.2 m²) を南面に配置することで冬季の日射取得量を増やし、軒の出とバルコニーの出で夏の日射負荷を抑えるプランとなっている。

この住宅の暖冷房エクセルギー負荷を求めるにあたって、まず年間の暖冷房熱負荷と室内温湿度環境を時刻ごとに算出した。暖冷房熱負荷と室内温湿度環境の計算にはSIM-HEAT⁽¹⁾を用いた。SIM-HEATは、熱回路網による多数室動的熱負荷計算プログラムで、窓開け・換気口などによる自然換気 (通風) 量計算も可能にした汎用ソフトである。各室の設定温湿度、内部発熱、供給熱量等の条件を設定し、毎時の暖冷房負荷、室の温湿度、室内表面温度などの計算を行うことができるため、前報 (その1) の1章に示した室内温度 T_i 、外壁室内側表面温度 $T_{s,i}$ 、室内空気絶対湿度 X_i などの計算に用いた。SIM-HEATは、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」に基づく性能表示項目のうち「省エネルギー対策等級」に関し、

*1 (株) ミサワホーム総合研究所 研究員 (〒168-0071 東京都杉並区高井戸西1-1-19) e-mail : isamu_Ohta@home.misawa.co.jp

*2 北海道大学大学院教授
(原稿受付：2007年4月11日)

「年間暖冷房負荷の計算方法を用いて評価する方法」として国土交通大臣の認定を受けたものである。建設地は札幌を仮定した。暖房は24時間全館暖房で設定温度22℃、冷房は在室時冷房で設定温度26℃、設定湿度50%とした。伝達エクセルギー負荷は、熱負荷計算の際に得られる各室の室温と、天井、床、壁の熱流及び表面温度のデータを、前報(8)式及びTable1,2の関係を用いて時刻ごとに求めて積算した。開口部から入った日射に伴う暖冷房エクセルギー負荷も、室内各面で熱として吸収され、表面温度が高くなることによる熱エクセルギーとして同式で計算できる。同様に、換気エクセルギー負荷も、外気と室内の温湿度の計算結果と前報(26)式を用いて求めた。換気エクセルギー負荷を同式で求める際の機器発熱 q_g には、標準的な照明及び家電機器を想定し、機器発熱温度 T_g は室温+10℃と仮定した。厨房排気ロスに伴う暖冷房エクセルギー負荷の増減についても考慮し、前報(39)式を用いて求めた。

Fig.3に暖冷房熱エネルギー負荷と暖冷房エクセルギー負荷の計算結果を示す。暖房熱エネルギー負荷は、39,512MJ/年(10,976kWh/年)であるのに対し、暖房エクセルギー負荷は、3,171MJ/年(881kWh/年)であり、暖房熱エネルギー負荷に対する割合は3%に過ぎない。また、冷房熱エネルギー負荷は4,936MJ/年(1,371kWh/年)であるのに対し、冷房エクセルギー負荷は144MJ/年(40kWh/年)であり、冷房熱エネルギー負荷に対する割合は3%とさらに小さい。

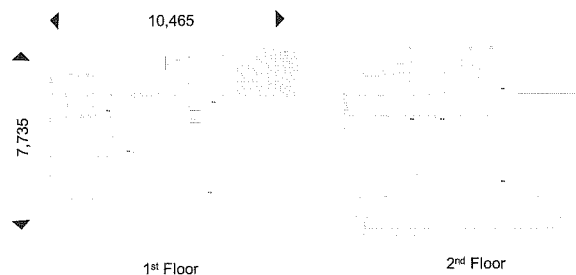


Fig.1 Floor plan of the house

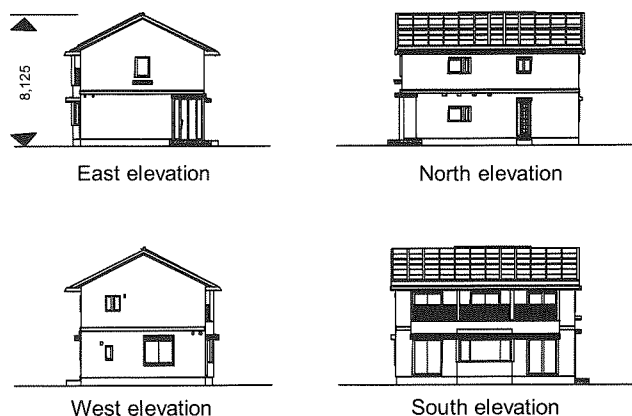


Fig.2 Elevation plan of the house

Table.1 Specification of the house

	Specification
Ceiling	GW24 kg/m ³ fine fiber 200 mm
Wall	GW24 kg/m ³ fine fiber 100 mm
Floor	GW24 kg/m ³ fine fiber 100 mm
Window	Plastic sash double Low-E pair glass (Ar gas)
Ventilation	Balanced type central ventilation system with heat recovery unit (Heat recovery rate 70%)

GW : Glass wool

Table.2 Equipment specification of the house

	Specification
Heating	Heat pump hot water heating (COP=2.2) ⁽²⁾
Cooling	Room air conditioner (COP=3.0)
Hot water	CO ₂ Heat pump system (COP=3.0)
Cooking	IH cooking heater (Thermal efficiency 83%) ⁽²⁾
Lighting	Conventional bulbs

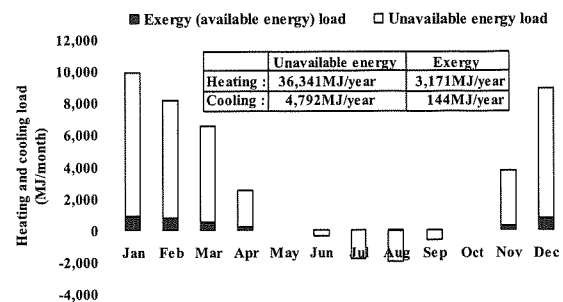


Fig.3 Heating and cooling load

エネルギー負荷に対するエクセルギー負荷の割合は小さく、環境温度と室温が近くなる冷房エクセルギー負荷はさらに小さいものとなる。暖冷房は、質的に低い熱エネルギー負荷のために高質なエネルギー(電力・ガス・灯油など)を利用しており、改善の余地が高いことを示唆している。

1.2 給湯・厨房・照明・家電機器等電力の各用途エクセルギー負荷

給湯のエクセルギー負荷は前報(33)式を用いて月別に算出した。その際、給湯エネルギー負荷は、IBECモードの給湯使用換算量(421リットル/日、43℃)に貯湯タンク放熱ロスを見込んだ給湯量と、各月平均給水温度から算出した。貯湯タンク放熱ロスは、製造メーカー技術資料データ⁽³⁾から10%と概算し、給湯使用量を割り増すことで負荷に反映させた。給湯エクセルギー負荷を求める際の環境温度 T_a には、各月の平均外気温度を用いた。

厨房熱エネルギー負荷は、家庭用エネルギー統計年報⁽⁴⁾の北海道のデータにおいて、暖房・冷房・給湯以外のガス消費量を厨房ガス消費量と仮定し、想定されるガス厨房加熱効率(40%)をもとに年間負荷を算出して各月に割り振った。厨房エクセルギー負荷は前報(37)式を用いて月別に算出した。厨房エクセルギー負荷を計算する際の調理温度 T_k は453K(180℃)と仮定し、環境温度 T_e には各月平均外気温度を用いた。

照明・家電機器等電力負荷も前述の統計年報データの値をもとに各月に割り振り、前報(40)式でエクセルギー負荷を求めた。

暖冷房に加えて給湯・厨房・照明・家電機器等電力を含めた住宅の年間エクセルギー負荷と無効エネルギー負荷の関係をFig.4に示す。無効エネルギー負荷は、エネルギー負荷からエクセルギー負荷を差し引いた残りの部分である。各用途エネルギー負荷に占めるエクセルギー負荷の割合は図中に併記した通りである。照明・家電機器等電力負荷は100%エクセルギー負荷である。一方、暖房、冷房、給湯及び厨房エクセルギー負荷は熱エクセルギー負荷であり、比較的質の低い負荷である。その中で、厨房に必要なエネルギーは他の用途と比べて高温であることから、エクセルギー負荷の割合が比較的高い(36%)。厨房エネルギー負荷は、冷房エネルギー負荷の1/3に満たないが、エクセルギー負荷で比較した場合、厨房の負荷が冷房の負荷を上回っている。

2. エクセルギー負荷、エネルギー負荷及びエネルギーフロー

モデル住宅の設備はTable.2に示す全電化仕様である。暖房は空気熱源ヒートポンプ温水暖房で、北海道での使用を可能にしたものである。暖房のCOP(Coefficient of Performance 成績係数。ヒートポンプ機器において供給される熱量に対して投入される動力の比)は札幌の外気条件において期間COP=2.2である⁽²⁾。冷房は一般的なルームエアコンを想定し、そのCOPを仮定した。給湯は、寒冷地仕様のCO₂ヒートポンプ給湯システムで定格COP=4.9、札幌の外気条件における年間平均COP=3.0の製品である。CO₂ヒートポンプ給湯システムは、冷媒にCO₂を用いた貯湯式のヒートポンプ給湯システムで、CO₂の特性上、従来の冷媒と比べて地球温暖化係数が小さく、また、貯湯温度を高くできるという特徴がある。厨房設備にはIHクッキングヒーターと排気効率90%のレンジファンが使用されている。照明は一般的な電球照明である。家電機器は標準的なものが使われることを想定した。

各用途の二次エネルギーフロー(一般的に二次エネルギー消費と呼ばれるもの)を算出するにあたって、機器を使用する時間帯を想定する必要がある。時間帯によって、後に計算するエネルギーコストの単価が変わることと、コージェネレーションシステムの運転や太陽光発電の売電量にも影響するためである。暖冷房は前述の運転パターンとした。給湯は日中(7時から23時)の追い炊きがないものとし、夜間電力により沸き上げて日中使用するものとした。厨房設備は日中のみ使用するものとした。照明・家電機器等電力は負荷

の16/24が日中に発生し、残りの8/24が夜間(23時から7時)に発生するものとした。北海道電力の「時間帯別電灯契約(ドリーム8契約)」を想定したものである。

暖冷房用電力は、時間帯ごとに求めた暖冷房熱負荷と機器効率をもとに算出した。給湯、厨房、照明・家電機器等電力は月別に求めた負荷と各機器効率をもとに算出した。Fig.5に用途別のエクセルギー負荷、エネルギー負荷、二次エネルギーフローを示す。エネルギー負荷では、暖房負荷が全体に占める割合は48%(=39,512/82,377)にのぼり、照明・家電機器等電力が占める割合は15%(=12,762/82,377)と少ない。一方、エクセルギー負荷では、暖房負荷が全体に占める割合は18%(=3,171/17,525)に過ぎず、照明・家電機器等電力の占める割合が73%(=12,762/17,525)にもなる。エネルギーの質を考慮すると、寒冷地である北海道でも暖房負荷の割合は小さく、その小さな負荷に対して多くの一次エネルギーが投入されており、エネルギー有効利用の観点から改善が望まれる。

住宅全体の負荷を見ても、エネルギー負荷に対する二次エネルギーフローは51%(=42,202/82,377)と小さく、ヒートポンプや高効率設備による“省エネ”の効果であるが、エクセルギー負荷に対する二次エネルギーフローは241%(=42,202/17,525)であり、依然として改善の余地が高いことを示唆している。

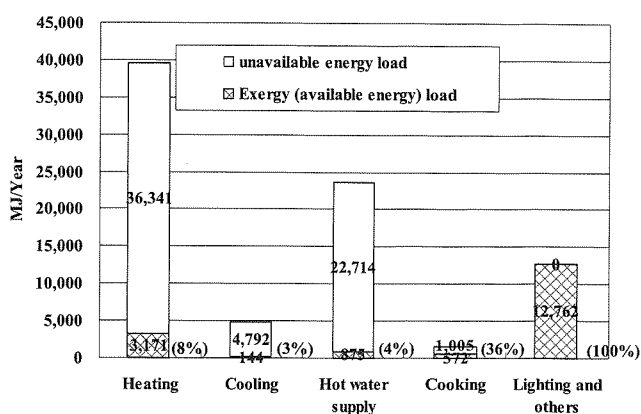


Fig.4 Exergy and energy load of each usage

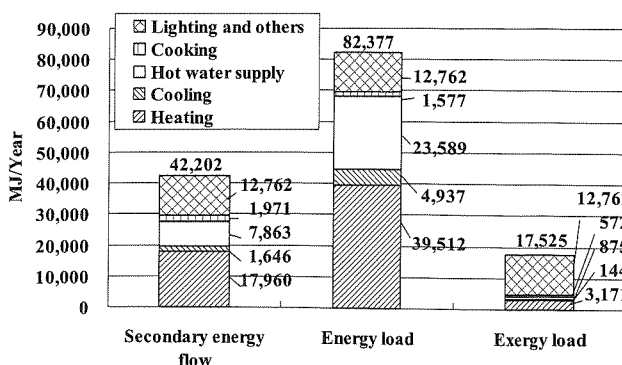


Fig.5 Relation of energy flow, energy load and exergy load

3. 太陽光発電システムの利用

Fig.1.2 のモデル住宅は全電化住宅であるため、42,202MJ/年 の二次エネルギーはすべて電力会社から供給される。一方、この住宅の屋根全面に太陽光発電システムを設置した場合の二次エネルギーの収支はFig.6 のようになる。太陽光発電には多結晶シリコン（セル効率15%）建材型モジュール（モジュール効率10%）を仮定し、南北屋根面にそれぞれ5.0kW の容量を設置するものとした。太陽光発電システムによる発電量は、8,515kWh/年 である。発電量は、地域の日射量データとモジュール変換効率から月別に算出し、その際、積雪、モジュール面の汚れ、温度上昇による効率低下、パワーコンディショナーでの損失などを考慮した⁶⁾。太陽光発電による電力供給は前節記載の日中の時間帯に発生するため、この時間帯の電力負荷から太陽光発電による発電量を差し引き、超過する分については系統へ逆潮流されるものとした。モデル住宅の二次エネルギーフローのうち、太陽光発電で宅内利用される割合は38%（= 15,954/42,202）、系統から供給される割合は 62%（= 26,248/42,202）である。また、宅内利用されずに系統に逆潮流する割合は 35%（= 14,700/42,202）となった。

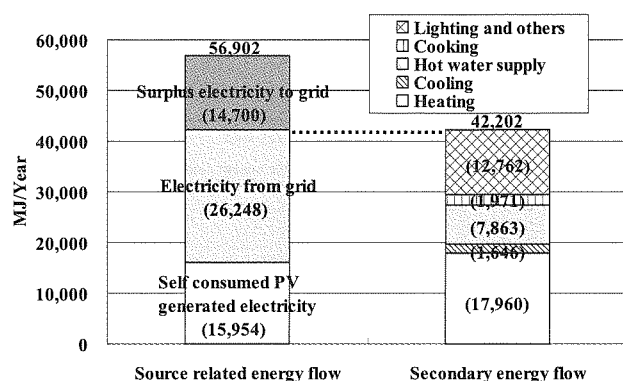


Fig.6 Relation of energy flow

4. エクセルギー経済評価⁶⁾

4.1 設備機器ごとの評価

用途 i の年間エクセルギー負荷に対するコストを以下のように定義する。

$$k_p^i = \frac{K_T^i}{Ex_p^i} = \frac{K_V^i + K_F^i}{Ex_p^i} \quad (1)$$

年間コスト K_T は、年間の変動費 K_V （エネルギーフローに伴ういわゆるエネルギーコスト）と年間の固定費 K_F （イニシャルコスト償却費）を合算したもので表す。固定費は、設備にかかったイニシャルコストをそれぞれの償却年数で償却すると仮定した。

前述の用途別負荷で、異なる設備機器を用いた場合の用途別エク

セルギー単価 k_p を算出した。比較検討設備は、照明・家電機器等、ガスレンジ（加熱効率 40%）、IH クッキングヒーター（加熱効率 83%）、ガス給湯機（加熱効率 80%）、CO₂ ヒートポンプ給湯機（平均 COP 3.0）、ルームエアコン（冷房 COP 3.0）、ガス温湯暖房（暖房効率 80%）、ヒートポンプ温湯暖房（暖房 COP 2.2）である。各用途の負荷は 1.1 及び 1.2 節で述べた方法で仮定した。設備等のイニシャルコストはそれぞれ定価を用いた。照明・家電機器等のイニシャルコストは 100 万円とした。いずれの設備も償却年数 10 年とした。変動費 K_V を求める際のエネルギー単価は北海道ガスと北海道電力を想定し、照明・家電機器等及びルームエアコンは「従量電灯契約」、ガスレンジ、ガス給湯機、ガス温湯暖房は「一般ガス契約」、IH クッキングヒーター、CO₂ ヒートポンプ給湯機、ヒートポンプ温湯暖房は「時間帯別電灯契約（ドリーム 8 契約）」の単価で算出した。いずれも機器ごとの評価であるため、想定した契約条件は必ずしも同一ではない。Table.3 はエクセルギー単価 k_p の算出結果である。用途及び用いる設備によって、多少異なるが、同じ用途で異なる設備を用いても大きな差は見られない。一方、用途間では差が見られ、特に冷房エクセルギー単価は他の単価と比べて高いことが特徴的である。エクセルギー負荷の小さい用途に対して、大きなコストを掛けていることが見て取れる。

Table.3 Comparison of specific exergy cost, annual cost and exergy load

	k_p (Yen/MJ)	K_T (Yen/Year)	Ex_p (MJ/Year)
HP hot water room heating	56	177,912	3,171
Gas boiler room heating	85	270,953	3,171
Room air conditioner	431	62,210	144
CO ₂ HP hot water supply	101	88,674	875
Gas boiler hot water supply	145	126,530	875
IH cooking heater	71	40,645	572
Gas oven	64	36,469	572
Lighting and others	14	170,487	12,762

Table.4 Comparison of generation systems

	k_p (Yen/MJ)	K_T (Yen/Year)	Ex_p (MJ/Year)
Engine co-generation	13	95,001	7,352
Fuel cell co-generation	5	77,998	17,328
PV system (10kW)	4	126,347	30,654

Table.4 に住宅用発電設備に関するエクセルギー単価 k_p を示す。住宅用エンジンコージェネレーションは、発電機能付き給湯機である。定格のエネルギー効率 HHV（高位発熱量）基準で発電 18%、排熱回収 59%、総合効率 77% と公表されている⁷⁾。一方、潜熱回収型のガス給湯機は定格の給湯熱効率が HHV 基準で 95% あり、熱と電気という質の異なるエネルギー量を単純に足し合わせたエネルギー効率比較ではコージェネレーションを導入する意義は見出せない。これに対し、環境温度 T_0 を 15°C（288K）、給湯温度を 43°C（316K）としてエクセルギー効率を計算すると、潜熱回収型のガス給湯機が $0.95 \times (1 - 288/316) = 8.4\%$ 、エンジンコージェネレーションは $0.59 \times (1 - 288/316) + 0.18 = 23.2\%$ となり、定格値においてコージェ

エネレーションを導入する意義が理解できる。さらに、エンジンコージェネレーションのエクセルギー単価 k_p を計算すると13円/MJとなり、ガス給湯機のエクセルギー単価 k_p 145円/MJと比較して初期費用を含めた費用対効果も高いことが分かる。

燃料電池コージェネレーションも発電機能付き給湯機であり、定格のエネルギー効率HHV基準で発電33%、排熱回収45%、総合効率78%と公表されている⁷⁾。単純に比較すると、エンジンコージェネレーションの総合効率とほとんど変わらないが、エクセルギー効率を計算すると、 $0.45 \times (1-288/316) + 0.33 = 37.0\%$ となり、エンジンコージェネレーションを上回る。また、現状では国の補助金を含めても初期投資に100万円必要であり、本格的な普及には至っていないが、エクセルギー単価 k_p を計算すると5円/MJとなり、エクセルギー経済の観点では現状でもエンジンコージェネレーションを上回る価値を有している。なお、エンジンコージェネレーション及び燃料電池コージェネレーションの計算に当たっては、前述の給湯熱負荷量に対して機器が日中に運転され、発電効率に応じた電力が得られるものとして計算した。その際、発電電力が一般的なガス併用住宅の日中の電力負荷を上回る場合には、システムは停止されるものとして発電及び排熱回収量に反映させた。ガス料金には「家庭用コージェネレーション契約料金」を用いた。なお、給湯負荷量は日々変わらず発生すると仮定しているため、負荷の日変動に伴う排熱回収量、発電量への影響は見込んでいない。

太陽光発電システムは、ガスや電気を系統から購入することなく太陽からのエネルギーを電力に変換している。従って変動費 K_v はマイナスの値となる。一方、固定費 K_f は高く、経済的に不利という印象もある。しかし、モデル住宅に設置する太陽光発電システムの発電量に対するエクセルギー単価 k_p を計算すると4円/MJとなり、エクセルギー経済の観点ではコストメリットの高い設備との評価になる。なお、エクセルギー単価の計算に当たっては、「時間帯別電灯契約(ドリーム8契約)料金」を用い、固定費 K_f 算出の際の償却年数としては実状に合わせて、太陽光発電モジュール20年、パワーコンディショナー10年とした。

4.2 住宅トータルの評価

住宅では暖房・冷房・給湯・厨房・照明・家電機器等の様々な用途負荷がある。それらの用途に対する設備が一对一の関係にあり、かつ、エネルギーフローが相互に影響しないものであるならば、住宅のエクセルギー経済評価は個々の用途ごとの評価を足し合わせることで足りる。しかし、照明や家電機器の排熱が暖房・冷房負荷に影響したり、電力負荷に対応するために運転したエンジンの排熱が給湯負荷の一部を賄うようになるなど、住宅は全体をエネルギーシステムとして評価することが必要になってきている。

Fig.7は、Fig.1、2の住宅において、設備機器の組み合わせあるいは断熱仕様を変えた場合のエクセルギー効率 η^* とエクセルギー単価 k_p^* の関係を示したものである。エクセルギー効率 η^* は、

住宅全体の一次エクセルギー投入 Ex_{prim} に対するエクセルギー負荷 Ex_p の割合を表す。一次エクセルギーとは、一次エネルギーに含まれるエクセルギー量を意味し、一次エネルギー源の高位発熱量の97.5%である⁸⁾。エクセルギー単価 k_p^* は全用途のエクセルギー負荷 $\sum Ex_p^i$ に対するコスト K_T を表す。住宅のエクセルギー単価に影響するものとして、暖房設備、冷房設備、給湯設備、厨房設備、照明・家電機器、発電設備、構造躯体用断熱材、屋根材、開口部材を仮定し、変動費 K_v と固定費 K_f を積算した。固定費 K_f を計算する際の償却年数は基本的に10年とし、太陽光発電モジュール、屋根材、開口部材、構造躯体用断熱材については20年とした。固定費はいずれも平成18年度の値を用いた。

$$\eta^* = \frac{\sum Ex_p^i}{Ex_{prim}} \quad (2)$$

$$k_p^* = \frac{K_T}{\sum Ex_p^i} = \frac{K_v + K_f}{\sum Ex_p^i} \quad (3)$$

k_p^* は $\sum k_p^i$ とは必ずしも一致しない。前述のように、機器排熱が暖冷房負荷を増減したり、コージェネレーションのように他の用途の一次エクセルギー Ex_{prim} と変動費 K_v の削減につながる場合があるからである。厨房排熱ロス(10%)は、各月の暖房負荷から減算し、冷房負荷に加算した。ガスエンジンコージェネレーション、燃料電池コージェネレーションは、給湯熱負荷量に対して機器が運転されて一次エネルギーが供給され、それに伴って発電効率に応じた電力が得られるものとして計算した。住宅用コージェネレーションは、系統への逆潮流がないように制御されるため、計算上も発電電力がその住宅の日中の電力負荷を上回る場合にはシステムは停止されるものとして発電及び排熱回収量に反映させた。太陽光発電により発電された電力が住宅の電力負荷に利用される場合には、一次エクセルギー投入の削減につながる。一方、太陽光発電の余剰電力は、系統を経由して他のエクセルギー負荷に利用されることから、エクセルギー負荷 $\sum Ex_p^i$ に加えることとした。

比較検討にあたっては、Fig.1,2及びTable.1,2の住宅(図中の◆)に対して、設備あるいは断熱を変更した7つの仕様を比較した。比較対象となる仕様のエクセルギー効率とエクセルギー単価の交点に対して、図の①の領域に属する設備仕様の組み合わせは、エクセルギー効率は優れているものの経済的には不利となることを意味する。②の領域に属する設備仕様の組み合わせは、エクセルギー効率、経済性共に不利である。③の領域に属する設備仕様の組み合わせは、エクセルギー効率は劣るものの経済的にはメリットのある組み合わせであることを意味する。④の領域に属する設備仕様の組み合わせは、エクセルギー効率に優れ、かつ経済的にもメリットがあることを意味する。

	Heating	Cooling	Hot water	Cooking	Generation
◆	Electric HP	Room AC	CO ₂ HP	IH	
▲	Gas boiler	Room AC	Gas boiler	Gas oven	
●	Gas boiler	Room AC	E-co-generation	Gas oven	E-co-generation
▼	Gas boiler	Room AC	FC co-generation	Gas oven	FC co-generation
★	GS HP	Room AC	CO ₂ HP	IH	
■	Electric HP	Room AC	CO ₂ HP	IH	Photo Voltaic 10kW

(1) HP:Heat pump IH:Induction heater GS:Ground Source E:Engine FC:Fuel cell AC:Air conditioner

(2) Specifications of ○ and □ are the same with those of ◆ except for thermal insulation.

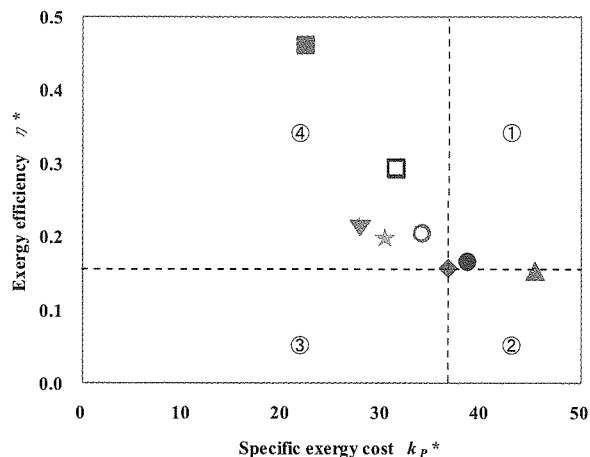


Fig.7 Correlation of specific exergy cost and exergy efficiency in relation to equipment combination

比較対象の設備仕様から、暖房をガス温水ボイラ（ボイラ効率80%）、給湯をガス給湯機（加熱効率80%）、厨房をガスレンジ（加熱効率40%）、の一般的な設備仕様に変更した場合の結果を図中に▲で示す。エクセルギー効率はほぼ同等であるものの、エクセルギー単価が高くなり、経済的に不利であることが分かる。一般的な仕様である▲の設備に対して、給湯をエンジンコージェネレーションに置き換えた場合（図中の●）、エクセルギー効率、エクセルギー単価共に改善されることが明らかとなった。さらに、エンジンコージェネレーションを燃料電池コージェネレーションに換えた場合（図中の▼）、エクセルギー効率、エクセルギー単価共に一層の改善が見られる。燃料電池コージェネレーションの定格上のエネルギー総合効率はエンジンコージェネレーションとほぼ同等であるが、質の高いエネルギーである電力をより効率よく出力し、またその排熱が有効利用できることを表している。比較対象住宅（図中の◆）の暖冷房設備を地盤熱源ヒートポンプシステムとした場合（図中の★）、期間暖房COP=4.0、期間冷房COP=9.1⁽⁹⁾の高い効率が期待できることから、やはりエクセルギー効率、エクセルギー単価共に改善される。比較対象住宅（図中の◆）に、太陽光発電システムを南北面屋根にそれぞれ5kW、計10kW設置した場合（図中の■、詳細は

3章記載）、エクセルギー効率、エクセルギー単価共に大きく改善されている。エクセルギー単価には原価償却費も含まれており、太陽光発電システムが住宅というエネルギーシステムの価値を高める要素であることを改めて示す結果となった。

図中の○は、比較対象住宅（図中の◆）の断熱性能向上により暖冷房負荷を1/2に低減できた場合の結果である。さらに住宅性能を向上させて、暖冷房に伴う一次エクセルギー投入 Ex_{prim} と変動費 K_v がゼロとなった場合の結果を□で示す。いずれも固定費 K_F は同等とした。図からも明らかのように、住宅性能向上により暖房負荷を削減することは、他の用途を含めた住宅全体のエクセルギー効率を引き上げる効果が高く、今回検討した高効率設備機器による効果と比較してもそのポテンシャルが高いことが分かる。なお、計算の際、電力は北海道電力、ガスは北海道ガスを想定し、▲は「従量電灯契約」及び「一般ガス契約」、◆・■は全電化のため「時間帯別電灯契約（ドリーム8）」、●・▼は「従量電灯契約」及び「家庭用コージェネレーション契約」を想定した変動費 K_v とした。いずれも基本料金を含めた計算としている。

よりエクセルギー効率の高いエネルギーシステムを構築することを模索する際に、経済性の観点で不利になるようなものは現実性がない。エクセルギー効率を高めるためには一般的に設備機器や住宅部材に、より一層のインシヤルコスト（固定費 K_F ）をかける必要がある。エクセルギー効率の向上は結果としてエネルギーコスト（変動費 K_v ）の低減につながることを期待することから、エクセルギー効率向上のために負担し得る固定費 K_F の増額分 ΔK_F は、変動費 K_v の減額分 ΔK_v 以下であることが条件となる。

$$\Delta K_F < -\Delta K_v \quad (4)$$

モデル住宅の場合、暖房負荷を半減させてエクセルギー効率を高めるために掛けられる固定費償却の増加は5.5万円/年(110万円)となった。同様に、暖房負荷をゼロとするために掛けられる固定費償却の増加は11.1万円/年(222万円)となった。

5. まとめ

モデル住宅のExergoeconomics（エクセルギー経済）評価を行うため、まず始めに、質の異なる様々な用途に対して、それぞれの質を考慮したエクセルギー負荷評価を行った。その結果、寒冷地である北海道でも、他の用途負荷を含めた住宅全体の負荷に対する暖冷房負荷の割合は小さいことが明らかとなった。暖冷房は、環境に対して低温度差で、質の低い負荷であることを表している。

暖冷房エクセルギー負荷は小さいものの、一般的な暖冷房設備は多くの一次エネルギーとコストを消費している。これに対し、住宅性能を高めて暖冷房負荷を削減すると、エネルギー利用の効率性を表す「エクセルギー効率」と経済性を表す「エクセルギー単価」は大きく改善され、設備機器を高効率化する場合と比較してもその改

善効果は高いことが明らかとなった。

一つのエネルギー源から質の異なる二つのエネルギーに変換するコージェネレーションも、エネルギーの質を考慮したエクセルギー経済評価が有効である。一般的な指標である発電効率と排熱回収効率を足し合わせた総合効率で比較すると、燃料電池コージェネレーションはエンジンコージェネレーションとほぼ同等であり、価格においては2倍近い開きがあるため、住宅に導入する意義が不明確であるが、エクセルギー経済の指標では燃料電池コージェネレーションの価値が明確に示される結果となった。質の高いエネルギーである電力に効率良く変換できるためである。

自然エネルギーを利用した太陽光発電は、イニシャルコストが高く経済的に不利という印象もあるが、イニシャルコストを含めたエクセルギー単価による評価では、他の発電機器を上回る価値があることが明らかとなった。

住宅では、質の異なる様々なエネルギー負荷があるが、これまではその量が議論されても質を含めた評価がなされることは少なかった。しかし、同じ量の一次エネルギー、あるいはコストを投入するにしても、その対象が質の高いエネルギー負荷なのか質の低いエネルギー負荷なのかによって、エネルギーとコストの効率性が異なることは明らかである。Exergoeconomics (エクセルギー経済) の導入により、初期投資を含めた経済性と、質を考慮した負荷に対する一次エネルギーの有効利用度が評価できるようになった。これにより、比較的質の低い暖冷房や給湯負荷に対して、自然エネルギーや未利用エネルギーを活用することの意義がより明確になり、一層の普及促進と環境負荷低減に寄与できると考える。

モデル住宅の評価結果を踏まえ、よりエクセルギー経済評価の高い住宅を設計し、検証する予定である。

記号表

Ex_p^i	: エクセルギー負荷 (J/年)
Ex_{prim}	: 一次エクセルギー投入 (J)
k_p	: エクセルギー単価 (円/J)
K_T	: 合算コスト $K_V + K_F$ (円/年)
K_V	: 変動コスト (円/年)
K_F	: 固定コスト (円/年)
ΔK_V	: 変動コストの差分 (円/年)
ΔK_F	: 固定コストの差分 (円/年)
η^*	: エクセルギー効率 (-)
i	: 用途

参考文献

- (1) 山内設計室ホームページ: www.yip-i.co.jp
- (2) 平成15年度 住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業
NEDO指定の住宅・建築物高効率エネルギーシステム、新エネルギー・
産業技術総合開発機構、平成15年6月

- (3) 三菱電機、三菱自然冷媒ヒートポンプ式電気給湯機技術マニュアル、
2006年11月
- (4) 家庭用エネルギー統計年報 (2003)、住環境計画研究所、2003
- (5) 太陽光発電技術研究組合、太陽光発電システム設計ガイドブック、(1994)、
オーム社、東京
- (6) D.Hebecker・Petra Bittrich・K.Riedel、Hierarchically restructured exergetic and
exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion process, Energy
conversion & Management 46、1247-1266、2005
- (7) 東京ガス (株)、マイホーム発電 (2006)、8-11、2006
- (8) 押田勇雄、エクセルギー講義、1986年3月、図書印刷
- (9) 濱田靖弘・落藤登・鳴原亮・長野克則・中村真人・土師範子・横山真太郎、
自然エネルギーをハイブリッドに活用したエネルギー自律型住宅
に関する研究第4報—省エネルギー・環境保全・経済性に関する評価、
空調調和・衛生工学会論文集No.84、77-86、2002