

太陽光発電システムの発電コスト及び CO₂削減率に関する一考察

A Study on power energy cost and CO₂ reduction rate of PV system

島田有宇斗^{*1} 小林哲也^{*1} 沖村祐也^{*2} 鮎澤優輔^{*2} 谷 辰夫^{*3}
Yuto SHIMADA Tetsuya KOBAYASHI Yuya OKIMURA Yusuke AIZAWA Tatsuo TANI

Abstract

A Study on power energy cost and CO₂ reduction rate of PV system

As a part of various electric power sources, the photovoltaic power systems are expected to be one of the important power systems to solve global warming. The authors have developed the simulation program of evaluating grid-connected photovoltaic power systems named individual and integrated types from points of view of electrical energy cost and CO₂ reduction rate.

In this paper, their values for two type PV systems are simulated by using the various system performance models, the cost models, the daily electric load patterns, the environmental data (METPV) of Suwa-city and so on. It is found that CO₂ exhaust is reduced about 40% two type PV systems with rated capacities 3kW a residence proportionately to the commercial network. And the integrated type PV system is effective compare with the individual one for the power energy cost.

キーワード：太陽光発電、戸別設置、集合設置、発電コスト、CO₂削減率

Key Words：PV system、Individual type、Integrated type、Energy cost、CO₂ reduction rate

1. はじめに

昨今、地球温暖化問題が深刻化しているなか、世界各国が集まった COP13 では、2012 年以降の温室効果ガス等の削減目標値の提示は見送られた。しかし、近い将来、2020 年や 2030 年の温室効果ガス等の削減目標値が決定されることは確実であり、大幅削減値が予想される。そうすると、現在産業界を中心として展開している削減目標値をさらに広げて、オフィスや学校、一般家庭にも設定され、国全体で取り組まなければならない状況が想定できる。

日本政府は 2007 年末に地球温暖化対策の一環として、太陽光発電の普及促進を挙げている。それによれば、現在約 40 万戸の太陽光発電の設備を 2030 年までに、全世帯の約 3 割に当たる 1400 万戸に拡大する方針を打ち出している⁽¹⁾。

太陽光発電（以下 PV とする）システムは温室効果ガスの排出削減に大きく寄与することは明らかであり、積極的な導入が期待されている。本論文は設置方法の違いによる個人住宅用 PV システムの発電コスト [円/kWh] を、システムを構成する各構成要素のパフォーマンスと調査して入手したコストモデルを用いて求めるとともに CO₂ 削減効果についても論述したものである。

2. システム構成

2.1 PV システムの設置方法

本論文では、PV システムの発電コストを個人住宅に導入する際の設置方法を、個別に設置する場合（以下、戸別設置）と一箇所に設置し複数の住宅にまとめて供給する場合（以下、集中設置）について比較している。

^{*1} 諏訪東京理科大学卒業生（〒391-0292 長野県茅野市豊平5000-1）
E-mail: tani@rs.suwa.tus.ac.jp

^{*2} 諏訪東京理科大学院生

^{*3} 諏訪東京理科大学教授
(原稿受付：2008年3月25日)

戸別設置型システムとは、従来通りの設置法で図 1 のように PV システムは個人住宅 1 軒毎に設置され、各家庭の住宅負荷へ供給するシステムである。一方、集中設置型システムとは、図 2 のように PV システムを一箇所に集中して設置し、複数の負荷に供給するシステムである。このシステムは新しいコンセプトで建設されたニュータウンへの適用等を想定している。たとえば、太陽電池アレイを一部住宅の南側屋根面とその近くの駐車場など共通施設の未利用の屋上に設置し、電気的に接続して構成するシステムである。

本論文では、10 軒の個人住宅を想定した。これはすでに述べたニュータウンへの適用や両設置方法の特徴を見出すことを意図したものであり、2 種類の設置方法による特性を比較している。また、電力供給方式は、両システムとも系統連系システムとしている。

システムの構成については、戸別型設置システムの太陽電池アレイは多結晶シリコン太陽電池で構成され、1 台のパワーコンディショナを介して負荷と系統に連系されている。このときの定格容量は 3kW である。また、集中型配置システムも太陽電池アレイは多結晶シリコン太陽電池で、全定格容量（3 から 30kW）に対して 1 台のパワーコンディショナで構成されているとした。また、両システムの太陽電池アレイは屋根設置であるとして、建設費や発電コストを算出している。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

本シミュレーションでは太陽電池アレイで発電された電力はパワーコンディショナで DC-AC 変換され負荷へ供給される。このとき余剰電力発生時には電力会社に売電、不足電力発生時には電力会社から買電し負荷へ供給される。

以下に示す環境データ、システムを構成する要素機器のシステムデータより年間発電量を求めている。また、年間

発電量、建設費を用いて、発電コストを求めている。さらに各システムの CO₂ 排出原単位から 2 種類の設置方法における年間 CO₂ 排出量を求めた。

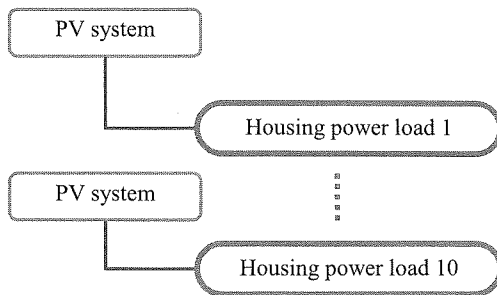


Fig.1 Individual type PV system
図 1 戸別設置型 PV システム

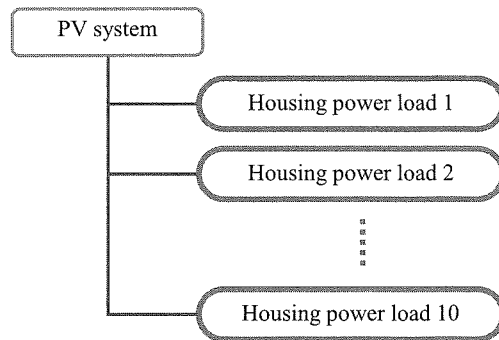


Fig.2 Integrated type PV system
図 2 集中設置型 PV システム

3.2 環境データとシステムデータ

太陽電池アレイへの入力データとして、(財)日本気象協会 (JWA) が開発した太陽光発電システム用標準気象データ (METPV) を用いた。このデータは全国約 150 地点の気象データベースで傾斜面全日射量、傾斜面直達日射量、外気温、風向、風速などが 1 年分のデータとして、1 時間毎に整理されている。本論文で用いたデータは、長野県諏訪市に真南にしかも傾斜角度 30 度で設置された太陽電池アレイに入射する傾斜面全日射量とこの地点の外気温である⁽²⁾。また、システムデータとして表 1 の値を用いた。

Table 1 Specifications
表 1 PV システムの仕様

PV Module Conversion Efficiency [%]	15.0 (A.M=1.5, Cell Temperature 25°C)
Integrated Coefficient	0.70

表 1 で示したようにシステム各部の効率をまとめて統合係数とし、次の係数の積であるとした。まず、フロントガラスの塵埃などによる汚れ係数を 0.93、日射強度の強弱、負荷の重い軽いに拘わらずパワーコンディショナ変換係数 (効率) を 0.91 とした。また、アレイ出力の集電用導線、離れた位置にあるアレイからパワーコンディショナ、パワー

コンディショナから負荷への導線などの配線による損失をまとめて回路配線係数とし、この係数を 0.94 とした。さらに、アレイ最大出力電力と負荷電力との不整合性をアレイ負荷整合係数と称し、この値を 0.88 とした。その結果、統合係数は 0.7 となった。

3.3 太陽電池モジュール

PV システムの出力算出には次式を用いた。

$$P(n) = \eta [1 - \alpha (T_c - T_0)] \times I \times S \times K \cdots (1)$$

ここで、 $P(n)$: 1 月 1 日 0 時から n 時間後の発電量 [kWh]、 P_0 : 外気温 25°C 時の発電量 [kW]、 α : 温度係数で -0.004、 T_c : n 時間後の外気温 25 [°C]、 T_0 : 基準温度 25 [°C]、 I : 1 時間当たりの日射量 [kWh/m²]、 S : 太陽電池アレイ面積 [m²]、 η : 太陽電池アレイの変換効率、 K : 統合係数。

3.4 年間負荷電力量と負荷パターン

個人住宅を想定した負荷として、15 種類の一般住宅用電力負荷パターンを用いた^{(3), (4)}。この 15 種類の電力負荷パターンの一例を図 3 に示す。図の横軸は 0 から 24 時の時刻であり、縦軸は電力の最大値を 1.0 として規格化して示しており、単位は kW である。住宅負荷 1 軒当たりの年間負荷電力量はすべて 4,000kWh としている。電力負荷パターンは春季 (3 月～5 月)、夏季 (6 月～8 月)、秋季 (9 月～11 月)、

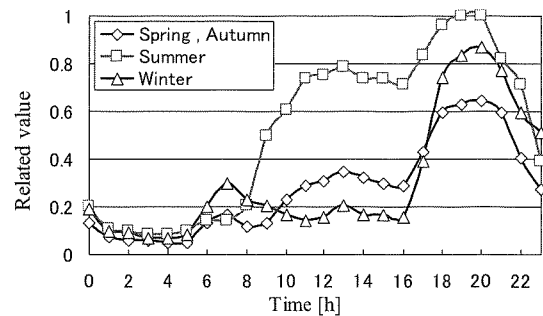


Fig.3 Daily electric load patterns
図 3 電力負荷パターン

冬季 (12 月～2 月) の 4 種類とし、各々の期間中はいずれも同一パターンとした。また、春季と秋季は同じパターンを使用した。

15 種類の電力負荷パターンは実測値に基づいてモデル化したものであり、電力負荷パターンを分類するため負荷形状率を式 (2) のように定義した⁽⁴⁾。

$$\text{負荷形状率} = \frac{\text{平均負荷レベル以上の負荷電力量}}{\text{年間の負荷電力量}} \times 100 [\%] \cdots (2)$$

この式は図 3 に対応した 1 時間毎の負荷電力量を年間 (8760 時間) にわたり降順に並べ、年間負荷電力量 (4,000kWh) に対する平均以上の負荷電力量の割合で表している。15 種類の電力負荷パターンの負荷形状率は約 7.5% から約 32% まで幅広く分布しており、現状のわれわれの生活パターンに対応した電力負荷パターンであるといえる。

3.5 発電コストの算定式

PV システムの発電コスト E [円/kWh] は式 (2) で表わされるとした⁽⁵⁾。

$$E = \frac{M(r_c + O \& M)}{8760 \times C_f} \quad \dots (3)$$

ここで、 M : 1kW 当たりの建設コスト [円/kW]、 r_c : 資本回収率、 $O \& M$: 運転・保守費率、 C_f : 年間設備利用率 (システム利用率)。 r_c は金利、保険・税率、残存価格率の合計である。2007 年現在金利は 3.7%、保険・税率は 0%、残存価格率は耐用年数 20 年とし、20 年目の価格は当初の 10% であるとして求めた。その結果 r_c は 8.4% となる。

$O \& M$ は容量の大小によらず 1 システム当たり年間 3,000 円かかるとした。また、システム利用率 C_f は式 (3) により得ることができる。

$$C_f = \frac{\text{年間発電量 [kWh/年]}}{\text{定格容量 [kW]} \times 8760[h/年]} \quad \dots (4)$$

3.6 CO₂ 削減効果

15 種類の電力負荷パターンから得られた、負荷への年間直接供給量および年間売買電電力量をもとに年間 CO₂ 排出量を算出した。系統連系方式では CO₂ 排出量原単位は図 4 に示すようになる。商用電源から直接負荷へ供給される CO₂ 排出量原単位は 0.45 [kg-CO₂/kWh] である。また、PV システムの発電量を直接負荷へ供給する場合の CO₂ 排出量原単位は 0.053 [kg-CO₂/kWh] であり、商用電源へ売電する余剰電力量のそれも同一である。ただ、一旦売電した同量の電力量を商用電源から買電して負荷へ供給した場合の CO₂ 排出量原単位は両者の差 (0.45-0.053) である 0.397 [kg-CO₂/kWh] とした⁽⁷⁾⁽⁸⁾。たとえば、4,000kWh の年間負荷電力量に対して、PV システムの年間発電量の直接負荷へ供給される割合を 35%、一旦商用電源に売電した余剰電力量を買電して、負荷へ供給する割合を 60%、商用電源から購入した電力量を 5% とすると、これら 3 種類の年間 CO₂ 排出量を合計すると約 1,100kg となる。一方、商用電源のみで負荷へ電力量を供給すると年間 CO₂ 排出量は 1,800kg となる。その結果、PV システムを設置することにより、年間 CO₂ 排出量は約 40% 削減されることになる。

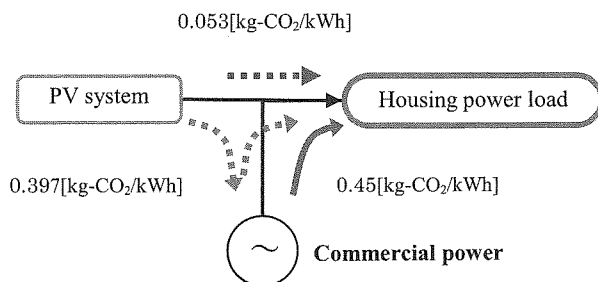


Fig.4 CO₂ emissions unit
図 4 CO₂ 排出原単位

3.7 総費用の比較

PV システムを導入した場合と導入しない場合の総費用を比較し、発電コストがどの程度まで下がれば採算が取れるか検討し考察した。

3.7.1 商用電源のみ

図 5 のように商用電源で運用する際の総費用を求めるために、以下の条件を用いた。

- 1) 年間負荷電力量は 12 ヶ月で配分し、月別の負荷電力消費量を決定した。
- 2) 電力会社の基本月額料金、段階料金を用い、月別の支払金額を算出した⁽⁹⁾。なおこのときの料金プランは 4 人家族を想定し、従量電灯 B・40A 契約とした。また本論文では料金体系が 20 年間不変であると仮定し、20 年間の総支払金額を計算した。

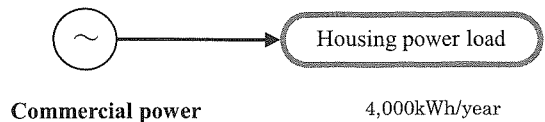


Fig.5 Supply power from electric power company

図 5 商用電源のみによる供給

3.7.2 系統連系型 PV システム

式 (1)、(2)、(3)、(4) より発電コストを求め、20 年間の総費用を求めた。このとき、売買電力コストは同一金額であるとしている。

4. 結果と考察

4.1 定格容量と発電コスト

図 6 は PV システムの定格容量 [kW] に対する太陽電池アレイ面積 [m²]、発電コスト [円/kWh] の関係である。図中の ● 特性は定格容量に対する太陽電池アレイ面積の関係であり、直線関係にあることが分かる。公表されている PV システム建設費は 66.1 万円/kW であり、その時の発電コストは図中の ? の特性で 約 45 円/kWh ある⁽⁹⁾。これは定格容量の変化に関わらず現状の建設費 (66.1 万円/kW) が一定であるとした場合の発電コスト特性である。定格容量の増加に伴って、わずかに発電コストが低下するが、これは $O \& M$ が定格容量にかかわらず 1 システム当たり定額としたことによる。この理由については、4.2 で記述している。

また、定格容量の増加に対する建設費の関係について複数の企業に調査し、その結果に基づいて求めた発電コストをケース I、II として図中に示す⁽¹⁰⁾。定格容量の増加に伴って発電コストが低減する。また、図 6 より、定格容量 3kW の戸別設置型システム 3 軒と集中設置型システムで定格容量 9kW とを比較すると、集中設置型システムは個別設置型システムに比べ約 7 円/kWh、同様に 10 軒の場合では、約 12 円/kWh 安価になった。なお、これらのデータは、今後の技術開発や導入状況によって変わることが十分考えられる。本論文では、現状で企業が把握しているデータとしてそのまま使用した。

4.2 設置方法別の建設費と発電コスト

図 6 で示したケース II のコストモデルを用いて、戸別設置型、集中設置型両システムの軒数に対する建設費と発電コストの関係を示すと図 7 のようになる。図の横軸は PV システムの設置軒数であり、縦軸は 1 軒当たりの発電コストと PV システム設置軒数当たりの建設費である。ここで、1 軒当たりの定格容量は 3 kW (アレイ面積は 21.3m²) である。

図 7 より、10 軒 (戸別型設置では 1 軒毎に定格容量 3kW のシステム、集中型設置では定格容量 30 kW のシステム) に PV システムを導入した場合、戸別型設置型システムの総建設費は約 1890 万円となる。一方、集中配置型システムでは

約 480 万円安価な 1410 万円で、約 25% のコストダウンが図られる。また、同じ定格容量 (30kW) の発電コストは、戸別型設置システムに対しては 44 円/kWh、集中型設置システムに対しては 31.5 円/kWh で、集中型配置のシステムは約 28% 安価となる。両方式の建設費の低減率に差が有るのは、戸別配置型システムでは定格容量 3kW を基準にしているのに対し、集中型配置システムでは容量増加によって部材の共通化が図られるなど価格が安価になるとの調査結果にもとづいている。一方、集中配置型システムの定格容量増加に対する発電コストは、建設費の低減と同様に容量増加に従って安価になることがわかる。たとえば、集中型配置システムで 1 軒 (3kW) の発電コストが 44 円/kWh から 10 軒分の定格容量 30kW のシステムのそれは約 31 円/kWh と計算され、約 30% 低減される。また、戸別配置型システムの発電コストは図 6、図 7 に見られるように定格容量の増加にしたがって、わずかに低減している。これは、現在定格容量の大小に拘わらず一定金額を徴収している点検費 (3,000 円/年) を年間当たりの運転・保守費 (O&M コスト) としたことによる。この値は、多様な定格容量のシステムが数多く設置されることなど、今後状況が変われば、変わることが十分考えられる。今後の課題である。

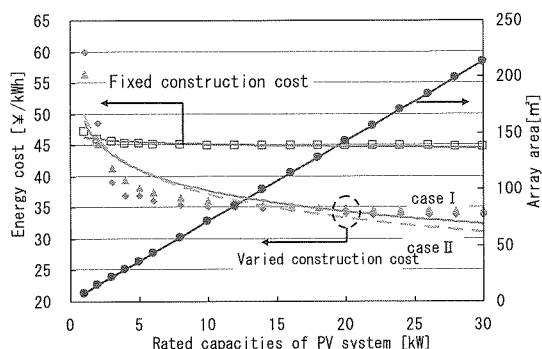


Fig.6 Relationship between rated capacities and energy cost, array area

図 6 定格容量と発電コスト、アレイ面積の関係

4.2 設置方法別の建設費と発電コスト

図 6 で示したケース II のコストモデルを用いて、戸別設置型、集中設置型両システムの軒数に対する建設費と発電コストの関係を示すと図 7 のようになる。図の横軸は PV システムの設置軒数であり、縦軸は 1 軒当たりの発電コストと PV システム設置軒数当たりの建設費である。ここで、1 軒当たりの定格容量は 3 kW (アレイ面積は 21.3m²) である。

図 7 より、10 軒 (戸別型設置では 1 軒毎に定格容量 3kW のシステム、集中型設置では定格容量 30 kW のシステム) に PV システムを導入した場合、戸別型設置システムの総建設費は約 1890 万円となる。一方、集中配置型システムでは約 480 万円安価な 1410 万円で、約 25% のコストダウンが図られる。また、同じ定格容量 (30kW) の発電コストは、戸別型設置システムに対しては 44 円/kWh、集中型設置システムに対しては 31.5 円/kWh で、集中型配置のシステムは約 28% 安価となる。両方式の建設費の低減率に差が有るのは、戸別配置型システムでは定格容量 3kW を基準にしているのに対し、集中型配置システムでは容量増加によって部材の共通化が図られるなど価格が安価になるとの調査結果にもとづいている。一方、集中配置型システムの定格容量増加

に対する発電コストは、建設費の低減と同様に容量増加に従って安価になることがわかる。たとえば、集中型配置システムで 1 軒 (3kW) の発電コストが 44 円/kWh から 10 軒分の定格容量 30kW のシステムのそれは約 31 円/kWh と計算され、約 30% 低減される。また、戸別配置型システムの発電コストは図 6、図 7 に見られるように定格容量の増加にしたがって、わずかに低減している。これは、現在定格容量の大小に拘わらず一定金額を徴収している点検費 (3,000 円/年) を年間当たりの運転・保守費 (O&M コスト) としたことによる。この値は、多様な定格容量のシステムが数多く設置されることなど、今後状況が変われば、変わることが十分考えられる。今後の課題である。

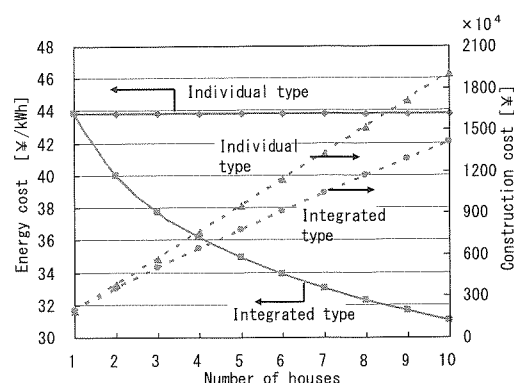


Fig.7 Construction cost and Energy cost of two types (case II)
図 7 戸別型と集中型の建設費と発電コスト (ケース II)

4.3 CO₂ 削減効果

系統連系方式では CO₂ 排出原単位は図 4 の通りであり、図 8 は戸別配置型 PV システムの 1 軒当たりの定格容量に対する CO₂ 排出量の関係である。図の横軸は 1 軒に設置するシステムの定格容量であり、0 値は商用電源のみの使用を意味している。このときの年間 CO₂ 排出量は約 1,800 kg である。図の縦軸は年間 CO₂ 排出量であり、0 値は商用電源を使用した際の年間 CO₂ 排出量と同量を PV システムで削減できることを示している。マイナス値は商用電源のみを使用した際の年間 CO₂ 排出量を上回る削減量をあらわしており、これ以外の意味はない。

図より明らかなように、定格容量 3~4kW の戸別設置型システムを設置することにより、商用電源のみ使用した年間 CO₂ 排出量を約 40% 削減することが出来る。また、定格容量 18kW の PV システムを設置すれば、商用電源で排出する年間 CO₂ 排出量と同量の排出量が削減できることがわかる。

図 9 は集中配置型システムの定格容量に対する年間 CO₂ 排出削減率の関係である。図の横軸は集中配置型 PV システムの 10 軒分の定格容量 (~30kW) であり、縦軸は商用電源のみを使用した年間 CO₂ 排出量を基準にした削減率を示している。図のプロットは作成した 15 種類の負荷形状率の違いによる電力負荷パターンから、無作為に 10 種類を選んだ 10 軒分の電力負荷パターン 3 ケースについての計算結果である。図から集中配置型システムの年間 CO₂ 排出削減率を 25% 削減するには、定格出力 18kW のシステムを、40% 削減するには 30kW のシステムを設置する必要があることが分かる。

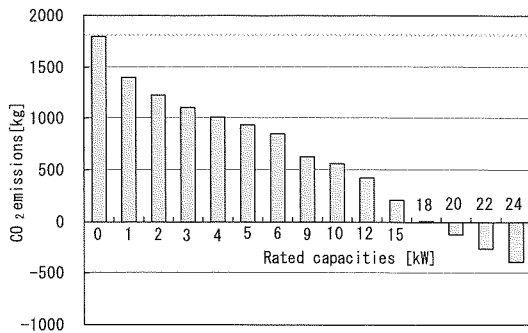


Fig.8 Annual CO₂ emissions vs. PV capacities per house
図8 1軒当たりのPV容量に対する年間CO₂排出量およびPV容量

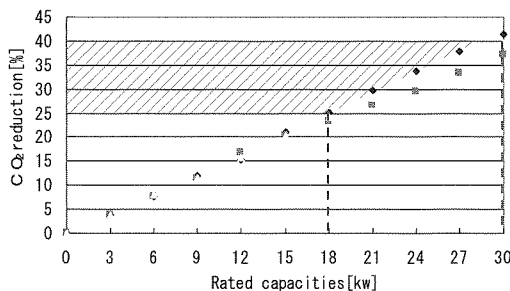


Fig.9 Rated capacities of PV system vs. CO₂ reduction rate
図9 PVシステム定格容量に対するCO₂削減率の関係

4.4 システムの運用総費用の比較

4.4.1 商用電源のみ使用した場合

商用電源のみ使用した場合、一軒ごとの年間電気料金が20年間変化しないとすると従量電灯B・40A契約で、20年間の支払額は約153万円となる。

4.4.2 系統連系方式によるPVシステム

図10は、横軸が定格容量、縦軸が商用電源のみを使用した場合と、系統連系方式PVシステムを使用した場合との、20年間にかかる総費用の差を表している。発電コストEの45.7円/kWhは調査を行った結果得られた現状の発電コストである。また23円/kWh、7円/kWhはNEDOが発表した2030年に向けた太陽光発電の発電コストのロードマップに基づいている⁽¹¹⁾。

図中から発電コストEが19円/kWhのとき、商用電源のみを利用した場合とほぼ一致する。このことは発電コストが19円/kWhより安価になれば、PVシステムの導入が有効であるといえる。

5. まとめ

以上大胆な前提条件のもとでの解析結果より、次のことが明らかになった。

- 1) PVシステムの定格容量を大きくすれば、建設費、発電コストともに安価となり、戸別配置型と集中配置型システムの1軒当たりの比較では、後者が有利である。
- 2) 10軒の個人住宅負荷に供給する両システムの建設費では、集中配置型システムは戸別配置型システムに比

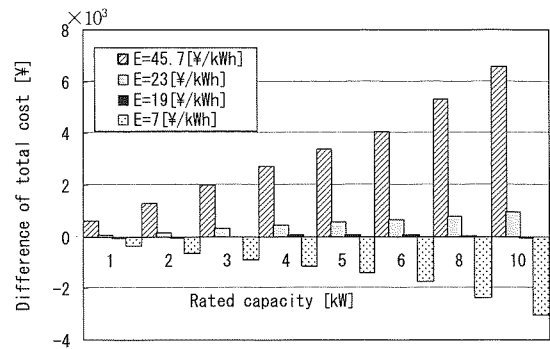


Fig.10 Relationship between rated capacities and a total cost
図10 定格容量と総費用の関係

べ約25%安価となり、発電コストについては28%安くなった。

- 3) CO₂排出削減率の観点から商用電源のみ使用した場合に比べ、個人住宅へ定格容量3kWの戸別配置型システムを導入すれば、CO₂排出量は約40%削減される。また、10軒の負荷へ定格容量18~30kWの集中配置型システムを導入すれば、年間CO₂排出量は25~40%削減される。
- 4) PVシステムの発電コストが19円/kWhより安価であれば、商用電源を使用するより経済的である。

今後、企業のみならず、地域ぐるみでCO₂の削減が求められる可能性があり、なかでも集中設置のPVシステムが有効であるといえる。さらに、地域ぐるみのCO₂排出量取引の検討も必要と考えられる。

参考文献

- 1) 山梨日日新聞 (2007年12月31日掲載記事)
- 2) NEDO; NEDO資料「標準気象データ(METPV2)」
<http://www.nedo.go.jp/METPV2.exe>
- 3) (社)日本建築学会 住宅内のエネルギー消費量に関する調査研究委員会; 住宅におけるエネルギー使用データベース(2006.8.19取得)
<http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>
- 4) 沖村、鮎沢、田子、中村、原山、平田、谷; 太陽電池・燃料電池複合システムに関する研究、太陽エネルギーvol.33, No.4, 57~62p(2007年7月)
- 5) 谷、横内; 系統連系形太陽光発電システムの最適設計 電気学会論文誌D, 111巻, 6号, 475~480p(平成3年6月)
- 6) (財)電力中央研究所 (2000.10.20)「ライフサイクルのCO₂排出量を電源別に求める」(2007.9.27取得)
<http://criepi.denken.or.jp/jp/pub/news/pdf/den338.pdf>
- 7) 中部電力「地球温暖化対策 環境家計簿」(2007.11.22取得)
http://www.chuden.co.jp/torikumi/kankyo/action/on_kakeibo.html
- 8) 中部電力 <http://www.chuden.co.jp/> (2007.12.2取得)
- 9) (財)新エネルギー財団「住宅用太陽光発電システム設置価格の推移」2005年度の数値 (2007.10.30取得)
<http://www.solar.nef.or.jp/josei/kakakusuii.htm>
- 10) S社とI社との私信による。(2007年11月)
- 11) NEDO「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」
http://www.nedo.go.jp/informations/other/161005_1/161005_1.html