設備製造を考慮した太陽光発電システムの普及戦略に関する研究

正員 松橋 隆治 (東京大学)

正員 石谷 久 (東京大学)

A Study on Dissemination Strategies of Photovoltaic Systems Taking Their Manufacture into Consideration
Ryuji Matsuhashi, Member, Hisashi Ishitani, Member (The University of Tokyo)

This article deals with life cycle CO₂ emissions and dissemination strategies of photovoltaic (PV) systems for houses. For this purpose, we first proposed a novel concept of life cycle analysis, real-period-LCA. A mathematical model was established so as to estimate the life cycle inventories utilizing the input-output table. Then life cycle CO₂ emissions of photovoltaics and other power generation systems were estimated with this model. Estimated results indicated that life cycle CO₂ of PV systems were much less than those of fossil-fueled power generation systems when growth rate of the systems is zero per cent. However, the difference between PV and other power generation systems was shown to dramatically decrease as the growth rate increases.

Next we investigated appropriate dissemination strategies for the PV systems. Effects of mass production and subsidies to accelerate dissemination were taken into consideration in this analysis. In conclusion, we clarified a desirable strategy of disseminating PV systems so as to reduce CO₂ emissions. Namely PV systems should be increased with the appropriate economic incentives estimated in this paper. If this strategy were adopted, PV systems could be a promising technology in long term as an abatement option of global warming.

キーワード: 住宅用太陽電池, LCA 指標, システム成長率, CO₂ 削減策, 普及戦略, 量産効果, 助成金

Keywords: photovoltaic systems for houses, life cycle analysis, growth rate of the systems, CO₂ reduction, dissemination strategy, subsidy

1. はじめに

本論文では、民生部門における住宅用太陽光発電システム (PV システム) の普及戦略に関する分析をおこなった。技術評価の結果を環境排出削減方策の普及戦略に用いるためには、各時点での環境排出に合致するライフサイクル分析 (LCA) 指標を用いる必要がある。これには、評価対象システムの成長率 (設備の増加率) を考慮しなければならない。本論文では、まずこの点を考慮した LCA 手法の基本的枠組みを示した。

次に、上述した LCA の評価例として PV システムを取り上げ、ライフサイクル CO₂ (LCCO₂) の発生量を評価すると共に、他の主な発電システムと比較した。これより、システム成長率を上昇させると、設備製造負荷の大きいシステムの LCCO₂ は急速に増大することが定量的に示された。

さらに、住宅用 PV システムの普及戦略に関する分析をおこなった。その結果、住宅用 PV システムは、適切な助成の実施により、2010 年以降における CO₂ 削減策として期待できることが示された。

2. 本研究における LCA の概念とその定式化

<2.1> LCA 評価例とその示唆 発電技術の LCA 評価は数

多くの研究例がある。図 1 には文献 (1) より引用した火力発電の LCA 評価に、著者らがおこなった住宅用 PV システムの評価結果を加えたものを示す。これらの評価結果から以下の示唆が得られる。

図 1 発電技術のライフサイクル CO₂ 比較

Fig. 1. Life cycle CO₂ emissions of power generation systems.

吉岡らによる火力発電の LCA 評価⁽⁷⁾(図 1)においては、燃料消費に起因する CO₂ 発生が殆どで、設備資本の製造に起因するものは無視できるほど小さい。こうした部門における温室効果ガスの削減には効率改善が有効となる。

一方、PV システムにおいては設備の製造に起因する CO₂ が 100%であるため、設備製造の負荷を小さくすることが重要である。

これらの評価結果をみると、主に設備製造と運転に起因する排出の割合に応じて、有効な対策の質が異なることが分かる。このことは、これらの技術/システムの時間的推移を考慮すると、さらに重要になる(相違が顕著となる)。そこで、次節では、この点に着目した LCA の基本的枠組みについて述べる。

〈2.2〉本研究における LCA の概念 著者が文献(2)などで述べてきた LCA の枠組みでは、設備製造の環境負荷を耐用年数で除して一年当たりの環境負荷とし、これを一年当たりの生産量で除することにより製品一単位当たりの環境負荷を算定していた。このような過程による算出されたライフサイクル指標を期間均等化 LCA 指標とよぶことにする。

このような期間均等化 LCA の特徴は、図 2 のように設備の製造時に生じた環境負荷を耐用期間全体に平均化して評価する点にある。

図 2 期間均等化 LCA における設備製造起源の環境排出の配分
Fig.2. Allocation of environmental emissions from manufacturing capital plants in period-averaged-LCA.

このような評価が各時点毎の現実の環境排出と合致しないことは自明であるが、以下のような場合には、耐用期間で平均化した期間均等化 LCA 評価と現実の排出との乖離は比較的小さいと考えられる。すなわち、評価対象の設備 1 基当りの規模に対し、十分大きな総設備容量を持つ技術に対する LCA をおこなう場合で、しかも長期間にわたりほぼ一定の総設備容量を維持している場合である。この場合、当該技術の総設備全体の年齢構造もほぼ均等化していると考えられる。したがって、評価対象の時点において、その

寿命を終え、更新される設備容量は、図 3 のように全体の設備容量を耐用年数で除した値で近似できる。その結果、期間均等化 LCA 評価と現実の排出との乖離は小さくなるのである。

他方、総設備容量が安定的に推移していない技術、特に普及を急速に推進している PV システムなどの新技術では、期間均等化 LCA 指標と現実の当該設備からの環境排出の乖離は大きくなる。

したがって、こうした技術の LCA 評価結果を環境排出削減の意思決定支援に用いるためには、各時点での環境排出に合致する LCA 指標を考案する必要がある。これには、評価対象システムの成長率(設備の増加率)を考慮に入れなければならない。上記の問題点を考慮し、本研究における LCA 指標を以下のように定義する。

(評価期間における当該システムの設備製造及び運転に起因する環境排出) / (評価期間における当該システムによって生産される製品量)

図 3 定常状態において期間均等化 LCA で評価される環境排出と実際の環境排出の比較

Fig.3. Comparison of environmental emissions allocated in period-averaged-LCA with actual emissions in stationary state.

上記のような概念で、エネルギー収支を評価した例としては、Chapmann(9)が挙げられる。Chapmann は、文献(9)において原子力発電を例に取り、これを急速に増加させると、原子力発電により生産されるエネルギーと原子力発電を建設するためのエネルギーとの比が小さくなることを指摘した。本研究は、文献(9)とは、その概念において類似した部分があるが、PV システムに着目して、その LCCO₂ を素材データから詳細に検討している点と、京都議定書遵守期間あるいはそれ以降の CO₂ 削減のための具体的な普及戦略を検討している点が異なる。

〈2.3〉本研究における LCA 指標の定式化 以下では、この前節で定義した LCA 指標の定式化をおこなう。そのた

めに、評価対象技術の設備製造に伴う環境負荷を取り扱う手法について、PVシステムを例に説明する。

まず、現在のPVシステムの設備容量を取り、この設備の製造に必要な財の投入量を調査する。この投入量を吉岡らによって開発された環境分析用産業連関表⁽¹⁾にある405種類の項目に格付けして投入金額に換算し、最終需要ベクトル f の各項目に投入する。次に t 期におけるPVシステムの設備容量に対する財の投入量 $f(t)$ と $t+1$ 期における投入量 $f(t+1)$ の差より、 t 期において製造しなければならない増設分に必要な財の投入量を(1)式のように表す。ただし、 t 期における設備の中、一定率 γ だけは、設備の耐用年数を過ぎたため廃棄されるものとする。

$$\text{設備建設に必要な財の投入ベクトル} = f(t+1) - (1-\gamma)f(t) \quad (1)$$

γ : 設備廃棄率

これ以外は、通常の産業連関分析と同様に(1)式によって誘発される財の生産額ベクトルを x とし、投入係数行列を A として、(2')式が成り立つ。ただし、太陽光発電システムの製造は、次章で述べるように複雑な生産工程を経ておこなわれるため、生産工程間にタイムラグが生じる場合もある。ここでは、このタイムラグを考慮したモデルを(2)式のように表した。タイムラグを考慮した(2)式においては、 t 期に生産された各中間素材が $t+1$ 期に次の生産過程に投入されるという前提条件を用いた。したがって、中間投入部分 Ax を $Ax(t+1)$ としている。一方、生産工程間にタイムラグのない従来のモデルの場合、上述したように(2')式が成り立つ。

$$x(t) = Ax(t+1) + f(t+1) - (1-\gamma)f(t) \quad (2)$$

$$x(t) = Ax(t) + f(t+1) - (1-\gamma)f(t) \quad (2')$$

<2.4> 評価対象システムの成長率とLCA指標の関係

(2)式より、当期および次期の最終需要 $f(t)$ 、 $f(t+1)$ と今期の生産 $x(t)$ が与えられれば、次期の生産 $x(t+1)$ を決定することができる。しかし、このような手続きに基づく解の導出は、単なる動学シミュレーションとなり、評価対象システムに固有のライフサイクルに関する性質を表すものとはいえない。そこで、以下では評価対象システムの成長率(設備の増加率)を与えて、この成長率に対するLCA指標を導くことにする。すなわち、(2)式よりPVシステムの設備容量の増加率を α とすると(3)式が成り立つ。

$$f(t+1) = (1+\alpha)f(t) \quad (3)$$

ただし、本研究では、現実の評価対象のシステムが常に一定率で成長すると想定しているのではない。評価対象システムの成長率は、経済全体の動向やエネルギー需要の構

造に応じて変動するものである。本研究の目的は、評価時点でのシステム成長率がLCA指標に与える影響を定量化することにあり、その準備として上の仮定をおくのである。(3)式を(2)式に代入すると、以下の式が得られる。

$$x(t) = (1+\alpha)Ax(t) + (\alpha+\gamma)f(t)$$

ここで、 $\frac{1}{1+\alpha} = \beta$ とおいて α を消去し、 $x(t)$ について解くと(4)式が得られる。

$$x(t) = (1-\beta+\beta\gamma)(I-A)^{-1}f(t) \quad (4)$$

生産工程間にタイムラグがない場合は(4')式ようになる。

$$x(t) = Ax(t) + (\alpha+\gamma)f(t)$$

$$x(t) = (\alpha+\gamma)(I-A)^{-1}f(t) \quad (4')$$

(4)式、(4')式より、タイムラグの有無にかかわらず、システム成長率が高いほどライフサイクル環境排出が大きくなると考えられる。本論文の主題はこの点を定量的に評価し、普及戦略に利用することにあるので、次章において太陽光発電などの発電システムを例に取り、システム成長率とLCA指標の関係を定量化する。

なお、(4)式、(4')式は最終需要から財の生産額を算出する式であるが、この最終需要ベクトルの該当する要素に太陽光発電システムの必要素材の評価額を代入することにより、太陽光発電システムの製造に必要な各財の生産額を算定することができる。さらに、算定された各財の誘発生産額と、各財の単位生産額当り CO_2 排出量の積をとって合計することにより、太陽光発電システムの製造に起因する CO_2 排出量を算定する。

3. LCA評価例 -PVシステムと他の発電システムの比較-

<3.1> 発電システム評価の前提条件 本章においては、PVシステムの $LCCO_2$ 指標を算定し、これを他の主な発電システムと比較してみる。まず、PVシステムの製造に必要な素材のデータに関しては、主に、文献(3)、(4)より引用するが、特に $LCCO_2$ に影響を及ぼす電力投入など一部のデータに関しては、太陽電池を製造する大手電機メーカーへのヒアリングに基づき推計した。本論文では、文献(3)、(4)とPVシステムの $LCCO_2$ を検討している点で共通しているが、前章に述べたLCA指標の概念を適用している点、得られた $LCCO_2$ 値を京都議定書遵守期間あるいはそれ以降の CO_2 削減のための具体的な普及戦略に応用している点、および上記の修正されたデータを用いている点が異なる。

本稿で採用するPVシステムの主な前提条件は以下の通り

である。

- (i) PVシステムとしては、一般住宅の屋根置き型PVシステムを想定する。
- (ii) 年間日射量は日本の気象データを基に1200時間/年とする。⁽³⁾
- (iii) 多結晶太陽電池システム（セルの発電効率15%）を想定する。ただし、アモルファスなど他の太陽電池についても今後分析を進める予定である。

上の前提条件を基に、PVシステムの構築を、シリコンウエハの製造、製造されたウエハのセル化、セル化された太陽電池のモジュール化、周辺装置（いわゆるBOS）の付加、の四段階に分け、各段階における必要な投入財を評価する。まず、シリコンウエハの製造に要する投入財は表1の通りである。

表 1 シリコンウエハ製造に要する各種原材料 (10MW規模)
Table 1. Input materials to manufacture silicon wafers. (10MW)

			投 入 単位 量	
高 純 度 シ リ カ の 製 造	原料	ガラス用珪砂	462	t
		炭酸ナトリウム	272	t
	水ガラス化	原油	172.8	k l
		硫酸	1051	t
	析出・精製	石灰石	959.7	t
		電力	525.6	MWh
		上水	22987	k l
		カーボンペレット 製造	アセチレンブラック	161
	レゾール		97	t
	電力		4028	MWh
塩素	36.6		t	
水酸化ナトリウム	22		t	
太陽電池シリ コン製造	シリカ還元	アルゴン	16.4	1000m³
		黒鉛ノズル	1.8	t
		黒鉛電極	9.1	t
		電力	2548	MWh
	ろ過脱炭・酸化脱炭	電力	309.4	MWh
		一方向凝固	煉瓦	4830
	電力		250	MWh
	多結晶Siの 基板化	シリコンカーバイド砥粒	231	t
		切断用ピアノ線	37	t
		電力	1750	MWh

また、太陽電池セル製造に要する各投入財を表2に、太陽電池のモジュール化に要する投入財は表3に示す。なお、BOS（周辺装置）の付加に関しては、インバータおよび制御装置を考慮の対象とし、金額によって産業連関表と対応づけ評価をおこなった。また、火力発電および原子力発電シス

テムのデータに関しては、紙面の制約により詳述を避けるが、文献(1)にもとづき、現状の技術における設備製造および運転に起因するCO₂排出を算定した。

表 2 太陽電池セル製造に要する各種原材料 (10MW規模)
Table 2. Input materials to manufacture photovoltaic cells. (10MW)

		投入量	単位
基盤表面化処理（テクスチャエッチングと洗浄）	水酸化カリウム	11	t
	イソプロピルアルコール	27	t
	DI水	3666.7	t
	テフロン治具	0.38	t
	電力	80	MWh
拡散接合形成（リン拡散）	POCl ₃	0.59	t
	N ₂ /O ₂	1.18	t
	石英管	0.25	g
	石英ホルダ	0.05	g
	DI水	3666.7	t
	テフロン治具	0.38	t
保護膜形成（TiO ₂ CVD）	電力	450	MWh
	TPT	0.7	t
裏面エッチング	電力	280	MWh
	水酸化カリウム	11	t
	イソプロピルアルコール	27	t
	DI水	3666.7	t
	テフロン治具	0.38	t
裏面電極形成	電力	80	MWh
	スクリーン	0.0073	個
	Ag-Al ペースト	1.28	t
	N ₂ /O ₂	200	t
受光面電極形成	電力	420	MWh
	スクリーン	0.0073	個
	Ag-Al ペースト	0.66	t
	N ₂ /O ₂	400	t
セル特性検査	電力	420	MWh
	キセノンランプ	金額評価	—
	ケース	同上	—
	電力	15	MWh

表 3 太陽電池モジュール化に要する各種原材料 (10MW規模)
Table 3. Input materials to manufacture photovoltaic modules. (10MW)

	投入量	単位
板ガラス	84.5	1000m ³
アルミ枠	154	t
配線材料	7.7	t
充填剤（EVA）	92.2	t
テドラ（PVF）	12.7	t

アルミシート	6.6	t
裏面シール	19.3	t
周辺シール（ブチルゴム）	9.3	t
電力	188	MWh

〈3.2〉PVシステムのLCCO₂評価結果 表1から表3までの投入原材料を基に、その評価額を算定し、これを吉岡らによって開発された環境分析用産業連関表⁽¹⁾に投入して、その10MW PVシステムに起因する直接、間接のLCCO₂を求める。

素材量から、その生産額を導く方法は以下のとおりである。産業連関分析の公表データには、投入係数行列の他に財の単価表が含まれている。そこで、表1から表3のデータを上述の単価表データと照合し、該当する財への格付けをおこない、その単価を乗じることにより生産額に換算する。この際、前章で述べたLCAの枠組にしたがって、PVシステムの成長率（発電設備の増加率）とkWh当りのCO₂発生量の関係を(4)式を用いて算定した。なお、システムの設備廃棄率 γ は（寿命を20年と仮定して）5%とした。算定結果を図4に示す。

図4 PVシステムのLCCO₂とシステム成長率の関係

Fig. 4. Relationships between LCCO₂ of PV systems and their growth rate.

図中でシステム成長率0%のLCCO₂とは、定常状態を仮定しており、これまで多くのライフサイクル分析で採用されてきた期間均等化LCAの結果に相当するものである。この点（定常状態）においては、PVシステムのLCCO₂は73g-CO₂/kWhと算定された。これは同じ定常状態におけるLNG火力（632g-CO₂/kWh）、石油火力（847g-CO₂/kWh）、微粉炭火力（1225g-CO₂/kWh）を大きく下回る値であり、原子力（加圧水型軽水炉）の21.6g-CO₂/kWhよりは大きい。

ところが、システムの成長率を上昇させると、PVシステムのLCCO₂は急速に増加する。一方、火力発電システムにおいては、設備製造に起因するCO₂が運転（特に燃料使用）に基くCO₂と比較して極めて小さい。このため、システム成長率が上昇しても、LCCO₂は殆ど変化しない。原子力発電の場

合は、設備製造のCO₂負荷の全体に占める割合が両者の中間にあるため、システム成長率に対する変化もPVシステムよりは小さく、火力発電よりは大きい。

これらの要因により、成長率16%/年でのPVシステムのLCCO₂は430g-CO₂/kWhとなった。この値を全電源構成の平均のLCCO₂値500g-CO₂/kWh⁽¹⁾と比較すると、急速普及の場合におけるPVシステムや原子力発電システムの有利さが小さくなるのが分かる。これを、次章に述べる普及戦略との関連において考える。平成10年6月に改訂された通産省総合エネルギー調査会による長期エネルギー需給見通しでは、その政策加速ケースにおけるPVの2010年度目標を5000MWとしている。これは、平成12年3月時点の住宅用PVの設備容量121MWの40倍以上の規模である。これを毎年の成長率に換算すると約45%となり、図4より、この成長率でのLCCO₂は全電源構成のLCCO₂を上回ると考えられる。ただし、このことは、PVシステムの初期における急速普及をやめるべきであるということ必ずしも意味しない。上述の長期エネルギー需給見通しでは、PVシステムを5000MWに増加させたとしても、2010年の一次エネルギー供給に占める比率は1%をはるかに下回る値である。このような小さい比率では、kWh当りのLCCO₂値が多少大きくなっても全体に対する影響は小さい。また、2010年迄に急速に増加させることにより、2010年以降のCO₂削減に十分な寄与ができるように土台を作るという戦略もありうる。こうした普及戦略については、量産効果など他の要因も考慮して、次章で詳しく述べる。

次に、設備の耐用年数とLCCO₂の関係を評価するため、設備廃棄率 γ による感度分析をおこなった。評価結果を図5に示す。耐用年数の向上はLCCO₂の低減に重要であるが、成長率の上昇と共に増加する傾向は変わらない。

図5 設備の耐用年数（廃棄率）とLCCO₂の関係

Fig. 5. Relationships between LCCO₂ of PV systems and their lifetime.

また、2章で述べた、生産工程間にタイムラグのないLCAモデル（(4')式）とタイムラグのある(4)式の結果の相違を図6に示す。タイムラグのないモデルでは、多次波及の影響

が軽減されるため、成長率上昇に伴うLCCO₂の増加がやや緩和されていることが分かる。

これらの結果より、PVシステムの大量導入に際し、以下のような改善策が有効である。すなわち、太陽電池の薄膜化などの技術開発、設備製造プロセスの効率化、設備の長寿命化などである。また、原材料からの一貫生産工場の建設などにより、生産工程間のタイムラグを縮小することも有効である。

図6 生産工程間のタイムラグがある場合と無い場合のLCCO₂ ($\gamma=0.05$)

Fig.6 LCCO₂ of PV systems with and without time lags between manufacturing processes ($\gamma=0.05$).

4. PV住宅の普及戦略に関する分析

本章においては、前章までの結果を受けて、住宅用PVシステムの普及戦略に関する分析をおこなった。本分析において考慮すべき事項は以下の通りである。

- (i) 量産効果による価格低減
- (ii) 量産効果によるLCCO₂改善（技術改善）

上記2項目は、適切な技術戦略により、技術自身の改善や経済性の改善が見込めることを前提としており、下の普及のための方策によって影響を受けると考えられる。

- (iii) 助成措置と普及率との関係

現在のPVシステムへの助成は、2002年に打ち切られる可能性があるが、このような助成打ち切りは、離陸しつつある同技術の普及を妨げる可能性がある。したがって、助成の有無あるいは適切な助成のレベルについて検討し、同技術の普及戦略を検討する必要がある。

これらの要因を考慮して、京都議定書の遵守期間あるいはそれ以降の長期的な温室効果ガスの削減に寄与するための、住宅用太陽電池の普及戦略と、そのための政策としての助成金の適切な方式を求めるのが本章の目的である。

まず、(i)の量産効果による価格低減について以下のように仮定する。前章の産業連関表の単価データおよびマージンデータを用いた多結晶PVシステムの製造に要する費用は、22.5万円/kWと算定された。このように、産業連関表

の単価表を用いて推定された費用は、十分量産化が進んだ段階での（産業が成熟した段階での）究極のコストであると考えられる。また、NEDO報告書のデータから現段階あるいは過去の生産量とコストの関係が求められる。(6),(8)そこで、習熟曲線概念を用い、現段階のコストが、生産量の増加に伴って上述した究極のコストに漸近すると仮定する。この仮定の下で回帰分析を行うことにより、PVシステムの量産に伴う発電原価の低減を以下のように推計した。

$$\text{Ln}\{\text{Cost}(t) - 22.5\} = 6.02 - 0.20 \times \text{Ln}\{\text{Production}(t)\} \quad (5)$$

Cost(t) : t年におけるPVシステム設備単価

Production(t) : t年におけるPVシステム年間生産量

(ii)の量産効果によるLCCO₂改善（技術改善）についてであるが、この点については、スケールメリットによる効率改善と共に、太陽電池セルの薄膜化などの新技術導入が期待されている。ただし、本論文においては、これらの点に関する定量的なデータが入手できていないため、今後の課題とする。

また、本章の普及戦略に関する検討では、現状から将来までのシミュレーションをおこなうため、将来の各時点における産業連関表に基づいた推定をおこなうことが望ましい。産業連関表の推移の推定に最もよく用いられる方法は、RAS法と呼ばれる方法である。この方法は、異時点間（例えば1990年と1995年）の産業連関表Aを比較し、その推移を対角行列RとSを用いて推定するものである。この方法は、過去の二時点間における推移を対角行列RとSを用いて近似する。しかしながら、過去の推移から得られたRとSをそのまま将来推定に利用できる訳ではない。将来の産業連関表の推定は一般に極めて困難であり、上記のRAS法に基づくRとSを利用した将来推定をおこない、推定された産業連関を用いてLCCO₂の算定を行っても、精度の保証は困難である。そこで、本研究では、現状の産業連関表を利用するものとし、将来における産業連関表の推定については、今後の課題とする。

次に(iii)の助成措置と普及率の関係については、手塚らのロジット推計による式を用いて(6)式のように表す。(7)

また、助成措置については、一般家庭から低率の炭素税を徴収し、これを財源として当該年度のPV生産量に割り当てる。すなわち、1kW当たりの助成額は(7)式で表される。

$$\text{Prob}(t) = \frac{\exp[42.03 - 3.110 \times \text{Ln}\{\text{Cost}(t) - \text{Subsidy}(t)\}]}{1 + \exp[42.03 - 3.110 \times \text{Ln}\{\text{Cost}(t) - \text{Subsidy}(t)\}]} \quad (6)$$

Prob(t) : 住宅着工数に対するPVシステム導入希望率

屋根置きPVシステムに対する潜在需要 = Prob(t) × 年住宅着工数 × 一戸当PV容量 …………… (6')

Subsidy(t) = 炭素税率 × 既存住宅世帯数 × 世帯当平均CO₂発生量 / Production(t) …………… (7)

(5)から(7)式を連立させて各年度の需給均衡生産量を算定する。ただし、(6)式による太陽電池への潜在需要が当該年度の生産能力の上限を上回る場合には、当該年度の生産量は生産能力の上限で決まるものとし、逆に潜在需要が生産能力の上限を下回る場合には、繰り返し計算により、均衡生産量、PV価格、および助成額を決定する。

一方、こうして決定された各年度のPVハウスにつき、 $LCCO_2$ および、その普及による CO_2 削減量を以下のように算定する。 $LCCO_2$ については、前章に示したタイムラグのないモデルを用いて(8)式のように表す。

$$LCCO_2 = 1460 \{ \text{Production}(t+1) / \text{Production}(t) \} - 1390 \quad \dots (8)$$

普及戦略として、現在の方策に近いCaseAと、低率炭素税を一般家庭のエネルギー消費に課し、得た財源を屋根置きPVシステムの助成に当てるCaseBの二つを考慮した。

CaseA：2002年まで一般住宅の屋根置きPVシステムの購入および設置に対し、27万円/kWの助成を継続し、2003年以降は助成を打ち切る。

Case B：2000年より2000円/t- CO_2 の炭素税を一般家庭のエネルギー消費に課し始める。得た財源を屋根置きPVシステムの助成に当てる。炭素税率は年率10%で上昇させる。

図7 住宅用PVシステム年間生産量

Fig.7. Annual productions of PV systems for houses.

評価結果を図7~10に示す。図7、8におけるCaseBの結果より、住宅用PVシステムは、適切な助成措置により着実に普及することが分かる。また、CaseBでは、前述の長期エネルギー需給見通しの政策加速ケースにおけるPVの2010年度目標(5000MW)を達成しており、目標達成のための目安となる。

図8 住宅用PVシステム累積生産量

Fig.8. Cumulative productions of PV systems for houses.

図9 住宅用PVシステム $LCCO_2$

Fig.9. $LCCO_2$ of PV systems for houses.

CaseB1: PVが石油火力に代替すると仮定

CaseB2: PVが全電源の平均値に代替すると仮定

図10 住宅用太陽電池の普及による CO_2 削減量

Fig.10. Reduction of CO_2 by dissemination of PV systems for houses.

逆に、Case Aのように、2002年以降の助成を打ち切ると、離陸しつつある同技術の普及を妨げる可能性がある。また、図10より、こうした政策の相違は、特に2008年以降の長期的なCO₂削減量に大きく影響することが分かる。

5. おわりに

本論文では、住宅用PVシステムのライフサイクル分析ならびに普及戦略の検討をおこなった。

まず、LCAをおこなうに当たって、ライフサイクル環境排出に占める資本設備製造の比重を考慮することが重要であることを述べた。これまでのLCAは、定常状態を仮定した期間均等化分析が主体であり、時間の推移におけるシステムの成長とそれに伴う資本設備の増減は考慮されていないものが多かった。(期間均等化LCA) もちろん、この期間均等化LCAからも技術評価に有用な示唆を得ることは可能である。しかし、LCAの結果を環境排出削減方針の意思決定支援に用いるためには、各時点での環境排出に合致するLCA指標を考案する必要がある。これには、評価対象システムの成長率(設備の増加率)を考慮に入れなければならない。本論文では、この点を考慮したLCA手法の基本的枠組みを示した。

次に、このLCA評価指標の例として、PVシステムを取り上げ、LCCO₂の発生量を評価すると共に、他の主な発電システムと比較した。これより、システム成長率を上昇させると、設備製造負荷の大きいシステムのLCCO₂は急速に増大することが定量的に示された。

次に、住宅用PVシステムの普及戦略に関する分析をおこなった。その結果、住宅用PVシステムは、適切な助成の実施により、特に2008年以降の長期的なCO₂削減策として期待できることが定量的に示された。

本研究は、その緒についたばかりであり、今後基本的枠組みおよび利用法について考慮する必要がある。例えば、PV一つを例にとっても、多結晶の他に単結晶やアモルファスによるものがあり、さらにシステムの種類として、本研究で取り上げた住宅用の他に、将来技術として砂漠での大規模発電システムや宇宙発電衛星などがある。今後、評価対象技術の拡充と共に、将来のエネルギー需給シナリオにおけるLCAの応用をおこなう予定である。

(平成12年10月23日受付、平成13年1月19日再受付)

参考文献

- (1) 池田明由・篠崎美貴・菅幹雄・早見均・藤原浩一・吉岡完治:「環境分析用産業連関表」, 慶応義塾大学産業研究所(1996).
- (2) 松橋隆治・石谷久・菅幹雄・吉岡完治:「ガソリン自動車と電気自動車のライフサイクルアセスメント」, 日本

エネルギー学会, 77-12(1998), 1184-1192

- (3) 小宮山宏・山田興一他:「太陽光発電技術の評価Ⅱ」, 化学工学会第一種研究会「CO₂と地球環境問題研究会」報告書(1995).
- (4) 加藤和彦・温慶如・岡島敬一・山田興一:「住宅用太陽光発電システムのライフサイクル分析とCO₂排出削減効果の経済性」, エネルギー資源20巻4号(1999)
- (5) 松橋隆治・石谷久:「持続可能なシステム実現のためのエネルギー技術の評価」, 電気学会論文誌B, 118, 775-780(1998)
- (6) NEDO:「太陽光発電の導入ビジョンに関する調査研究」昭和58年度調査報告書, NEDO報告書
- (7) 奥島啓介・手塚哲央・佐和隆光:「炭素税による太陽電池導入とその二酸化炭素削減効果」, エネルギー資源学会第19回研究発表会, 2000.6
- (8) NEDO:「新エネルギー技術開発関係データ集作成調査(太陽光発電)」, 平成10年度調査報告書, NEDO-P-980
- (9) Chapman, F.P.: "Energy Analysis of Nuclear Power Stations", Energy Policy, Vol.3, No.4, p.285, 1975.
- (10) 吉岡完治・菅幹雄・野村浩二・朝倉啓一郎:「宇宙太陽発電衛星のCO₂負荷」, KEO DISCUSSION PAPER, WG2-1日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業, (1998).

松橋隆治(正員) 平成2年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同大学資源開発工学科助手を経て、平成6年1月東京大学地球システム工学科助教授に着任。平成11年4月より東京大学大学院新領域創成科学研究科、環境学専攻の助教授に着任。エネルギー資源学会、電気学会会員。

石谷久(正員) 昭和44年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年東京大学宇宙航空研究所に勤務。同研究所講師、助教授、同大学先端科学技術研究センター勤務を経て、昭和64年東京大学工学部資源開発工学科(現地球システム工学科)教授に着任。エネルギー資源学会、IEEE、電気学会、計測自動制御学会会員。