太陽電池の研究開発に関する費用効果分析

正員 遠藤栄一 (産総研)

正員 田村佳彦 (産総研)

Cost-Effectiveness Analysis of R&D on Solar Cells in Japan

ENDO Eiichi, Member (AIST)

TAMURA Yoshihiko, Member (AIST)

R&D planning is important for promoting R&D effectively and efficiently. But it is examined and decided mainly by experts' judgements based on their intuition and experience. The authors consider that systems analysis should be introduced to make R&D planning more rational and persuasive and to make R&D more effective and efficient.

This paper has two purposes. One is to propose a method for analyzing cost-effectiveness of R&D, which is based on cost-efficiencies derived from technological progress models with variable of cumulative R&D expenditure. And the other is to validate plan of R&D on solar cells in the (New-) Sunshine Program of Japan by using the proposed method with demonstrating its effectiveness.

Based on the cost-effectiveness analysis, R&D goals or allocation of R&D expenditure for multicrystalline silicon (mc-Si) solar cells might not be appropriate during FYs 1997-2000. And during FYs 1989-1996, R&D on mc-Si solar cells might have been planned without well forecasting increase of the mc-Si solar cell production by subsidization programs after that.

This analysis demonstrates that the cost-effectiveness analysis of R&D by using the proposed method is effective and helpful in planning R&D. The authors expect that this method will be used widely for decision making in R&D planning for energy technologies.

キーワード : 費用効果分析, 技術進歩モデル, 投資効率, 研究開発計画, 太陽電池, (ニュー)サンシャイン計画

Keywords : cost-effectiveness analysis, technological progress model, cost-efficiency, R&D planning, solar cell, (New-) Sunshine Program

1. はじめに

近年, 研究開発の効果的かつ効率的な推進が要求され, 研究開発評価も実施されるようになってきている¹⁾。しかし, その一方で, 研究開発計画は, 一般には専門家の経験的総合判断に基づいて立案されていることが多く, 研究開発をどのように計画立案すれば, このような要求に応えられるかが課題となっている。

筆者らは, このような意思決定に合理性を持たせ, 説得力を高めるためには, 科学的分析手法²⁾の導入が不可欠であり, このような手法を用いた分析によって, 過去の研究開発計画の妥当性を検証したり, 将来の研究開発計画の適切な方向を明らかにすることが必要であると考えている。

エネルギー技術の研究開発計画立案にかかわる分析としては, 最適化モデル³⁾を用いたエネルギーシステム分析が広く実施されている。しかし, エネルギーシステム分析は, 研究開発の目標の設定や研究開発の効果の定量化には役立つものの, 効率的か否かにかかわる, いつ, どの課題に, どれだけ研究開発費を投資すべきかについては, 分析の対

象とはなっていない。

このような研究開発における資源配分に関する研究は, エネルギー技術に関しては, 研究開発プロジェクトの選択を資源配分問題として扱ったもの⁴⁾があるだけであり, 費用効果分析の適用も, 需要側, ないしは供給側のエネルギー技術の設備投資に関するもの⁵⁾⁶⁾, および民間企業における設備投資と研究開発投資を比較したもの⁷⁾がある程度である。

ところで, わが国の太陽光発電の研究開発は, 1974 年度からサンシャイン計画(1993 年度からはニューサンシャイン計画)の一部として実施され, 今日に至っている。太陽光発電は, 二酸化炭素排出削減の観点から, 1999 年度実績 20.5 万 kW に対して, 2000 年度目標 40 万 kW, 2010 年度目標 500 万 kW という高い導入目標が掲げられている⁸⁾⁹⁾。そして, 1992 年度以来, 補助金による導入助成事業も実施されているものの, 現時点では既存電源に比べてコストが割高なこともあり, 目標の達成はなお予断を許さない。

太陽電池は, 研究開発と商業生産が並行して進められて

おり、その製造原価は、おおむね、変換効率、正味のコスト、および生産規模(生産量)で決まる。そこで、研究開発から量産化までの時間的遅れ、すなわちリードタイムはあるものの、将来、ある太陽電池の生産量のシェアが大きいと予想される場合、その太陽電池に研究開発資源を集中的に投入して性能を向上させ、かつ、生産もその太陽電池に特化して量産効果を拡大することで、さらに製造原価を低減でき、太陽光発電の導入をより促進できるのではないかと考えられる。

以上の背景から、筆者らは、太陽電池の研究開発に着目し、その計画立案を資源配分問題として定式化し、モデル化を進めている⁽¹⁰⁾。このモデルの一部でもある太陽電池の技術進歩モデルは、累積研究開発費を変数としており、その微分係数は、投入した研究開発費に対する投資効率をあらわす。この投資効率を一つの基準とすることで、太陽電池の研究開発の妥当性や将来の方向を議論することができる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

本論文では、累積研究開発費を変数とする技術進歩モデルから求まる投資効率に基づいた、研究開発の費用効果分析手法を提案する。そして、この方法をわが国の(ニュー)サンシャイン計画における太陽電池の研究開発に適用する。すなわち、まず、太陽電池の種類別、目標別の研究開発費を推定する。次に、この推定結果を利用し、太陽電池の種類別、目標別に技術進歩をモデル化し、それぞれの投資効率を明らかにする。さらに、これらの投資効率が相互比較できるような投資効率の指標、および研究開発の効果に関する指標を導入する。これらに基づいて研究開発計画の妥当性について検証するとともに、本方法の有効性を明らかにする。

2. 技術進歩モデルと投資効率

〈2.1〉 技術進歩モデルの変数 技術進歩をモデル化することによって、技術予測⁽¹³⁾も可能になるが、関数形や変数の選択は、その精度を左右し、特に、変数によって、モデルの機能も異なってくる。一般に、変数は、何が技術進歩に貢献しているのか、何を技術進歩の駆動力とみなすのか、また、どのようなデータが利用できるかによって決まる。主なものには、時間、累積生産量、そして累積研究開発費がある。前の二つは、研究開発費が得られていない場合にも有効であり、特に累積生産量を変数とするモデルは、学習曲線として広く利用されている。

学習曲線による技術進歩モデル⁽¹⁴⁾は、例えば、累積生産量と価格などの技術指標との関係をあらわし、学習率とよばれるパラメータで技術進歩の速度が規定され、分かりやすい。しかし、研究開発、量産化、技術的習熟などが含まれた総合的な効果が一括して表現されているため、研究開発だけの効果を分離して議論することはできない。

本論文では、研究開発を分析の対象としていること、累積研究開発費を変数とすれば、投資効率が技術進歩モデル

の微分係数として得られることから、累積研究開発費を変数として、技術進歩をモデル化する方法を採用する。

太陽電池の技術進歩のモデル化においても、累積生産量を変数とした学習曲線を種々の分析に用いた例はある⁽¹⁴⁾。しかし、研究開発費が得られており、研究開発費と変換効率の改善には十分な相関が見られること⁽¹⁵⁾、研究開発と補助金による導入助成との投資効率の比較が可能になることから、累積研究開発費を変数とすることは妥当と考えられる。

〈2.2〉 技術進歩モデルの関数形 技術進歩をモデル化するには、一般に成長曲線が用いられる。技術成長曲線としては、Logistic 曲線、Gompertz 曲線、および Weibull 曲線の三つがよく知られている^{(16)~(18)}。また、得られているデータが少なく、変曲点にまで達しない場合は Logistic 曲線、変曲点以降を含む十分なデータが得られている場合には Gompertz 曲線の適合性がよいことが経験的に知られている。

本論文では、パラメータを推定するためのデータが十分得られていること、単結晶シリコン太陽電池の変換効率に関する技術進歩をモデル化した際に、最も適合性が高かったこと⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾から、Gompertz 曲線を採用する。

Gompertz 曲線は、(1)式であらわされ、その微分係数は(2)式であらわされる。本論文では、(1)、(2)式の変数 x を累積研究開発費とし、 y を変換効率などの技術指標とする。また、パラメータのうち K は、上限値で、理論的に決定することも、曲線を当てはめる際の二乗誤差を最小にするように選ぶこともできる。 α 、 β は、それぞれ S 字カーブの立ち上がりの開始時点とその速度をあらわし、実データに回帰分析を適用して推定する。

$$y = K \exp\{(-\exp(-\alpha - \beta x))\} \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$dy/dx = \beta \exp(-\alpha - \beta x) \cdot y \cdots \cdots \cdots (2)$$

(1)式であらわされる技術進歩モデル y の変数 x を累積研究開発費とすることによって、(2)式であらわされる技術進歩モデルの微分係数 dy/dx は、投資した研究開発費当たりの技術指標の改善の程度、すなわち投資効率をあらわす。

3. 太陽光発電の研究開発費

製造原価の低減は、太陽電池の研究開発の最も重要な目標である。太陽電池の製造原価は、変換効率や生産規模(生産量)にも依存する。ここでは、製造原価から変換効率と生産量による影響を除いたものを正味のコストとよび、製造原価が変換効率、正味のコスト、および生産規模(生産量)で規定されるものとする。そして、変換効率と正味のコストは、研究開発によって改善されていくものとする。なお、製造原価と変換効率や生産規模との定量的な関係については、〈4.2〉で詳しく述べる。

研究開発費と変換効率や正味のコストとの関係を技術進歩モデルであらわす場合、変換効率改善や正味のコスト低

減に使われた研究開発費を特定しておく必要がある。

研究開発に関するデータには、大別して、研究開発費に関するもの^{(21)~(23)}と研究開発の成果に関するもの⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾とがある。ただし、(ニュー)サンシャイン計画においても、研究開発費の額や使途について、成果報告書には何らの記述もないため、予算要求書と成果報告書を用い、次の手順で研究開発費の使途金額を推定する。

1. 予算要求書と成果報告書とから研究開発テーマを列挙する。

2. 予算要求書に基づいて、各研究開発テーマごとの予算額を特定する。

3. 成果報告書に基づいて、各研究開発テーマごとに予算の使割割合を推定する。

(ニュー)サンシャイン計画では、太陽エネルギーの研究開発計画が一つのまとまりになっているため、単結晶シリコン太陽電池、多結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池、結晶系薄膜シリコン太陽電池、その他太陽電池、太陽電池を除く太陽光発電システム、その他太陽光発電、太陽熱のカテゴリーを設けた。さらに、シリコン系の太陽電池については、研究開発の目標別に変換効率改善、正味のコスト低減、およびその他の区分を設けて、それぞれの区分への研究開発費の配分割合をウェイトとして、数値(百分率)で与えた。この結果得られたものが図1である。

ウェイトの数値は、成果報告書に記述されているテーマ名、目標、内容、成果などに基づいて、一定の基準を設け、数値の一貫性と妥当性をできる限り保持できるよう配慮しながら推定した。

例えば、「その他」の基礎的な研究とそれ以外のウェイトは、変換効率改善やコスト低減が言及されているか、目標として列挙されているか、変換効率やコストの数値目標があるか、成果として実際に改善されているかなどで判断した。

また、研究開発目標として、変換効率改善とコスト低減(製造原価低減)とが併記されてあることが多い。変換効率改善は、研究開発目標における変換効率改善そのものとコスト低減の双方に寄与する。一方、正味のコスト低減は、研究開発目標のうちのコスト低減にだけ貢献する。このことから、変換効率改善とコスト低減とが研究開発目標として併記されている場合には、変換効率改善の方が、より重要な目標であり、研究開発費の配分を与えるウェイトも、正味のコスト低減より重いと判断した。

このウェイトの推定は、定性的な記述の定量化に相当する。しかし、成果報告書の記述は、その担当者によって様ではなく、必ずしも統一がとれていないこともある。そのため、一定の基準を当てはめた推定でも、個々のテーマをみると、一貫性が保証されているとはいいがたい部分もないわけではない。

しかし、以上の研究開発費の使途金額の推定に関しては、複数の研究担当者から支持が得られていること、テーマ数

も多く、それらの区分間のウェイトの異なるものが多数含まれていることから、本論文における以下の分析の基礎デ

図 1(a) (ニュー)サンシャイン計画における太陽光発電の研究開発費

Fig.1. R&D expenditure for photovoltaics in the (New-) Sunshine Program of Japan.

図 1(b) (ニュー)サンシャイン計画における多結晶シリコン太陽電池の研究開発費

Fig.1. R&D expenditure for multicrystalline silicon solar cell in the (New-) Sunshine Program of Japan.

図 1(c) (ニュー)サンシャイン計画におけるアモルファスシリコン太陽電池の研究開発費

Fig.1. R&D expenditure for amorphous silicon solar cell in the (New-) Sunshine Program of Japan.

ータとして使用するに足るものと考えている。

図 1 から、1984 年度以来、多結晶シリコン太陽電池に比べ、アモルファスシリコン太陽電池に多くの研究開発費が配分されており、特に 1997 年度以降、研究開発費の配分が大きく変化し、多結晶シリコン太陽電池の研究開発費がごくわずかになってしまったことが見てとれる。

4. 太陽電池の技術進歩モデルと投資効率

〈4.1〉 変換効率の技術進歩モデルと投資効率 投資効率の比較を目的として、太陽電池の種類別、性能別に技術進歩をモデル化する。このとき、変換効率や製造原価など、太陽電池の性能は研究開発段階からおおむね明示的に得られている。そこで、3.で推定した太陽電池の性能の改善に投資された研究開発費を用い、累積研究開発費と性能の関係に成長曲線をあてはめる。

図 2 に(ニュー)サンシャイン計画における各種太陽電池の変換効率の推移⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾を、図 3 に太陽電池の変換効率に関する技術進歩モデルを、図 4 に太陽電池の変換効率改善に対する投資効率を示す。

研究開発の対象となっている多結晶シリコン太陽電池、アモルファス太陽電池は、図 2 に示されるもの以外にも種々あるが、本論文では、それらの研究開発は、図 2 に示される 100cm²、225cm² 多結晶シリコン太陽電池 (mc-Si)、100cm²、1200cm² アモルファスシリコン太陽電池 (a-Si) で代表されるものとみなす。すなわち、多結晶シリコン太陽電池、アモルファスシリコン太陽電池に関する種々の研究開発に投資された研究開発費は、基礎的な研究を含む各研究開発を通じて、図 2 に示される太陽電池の性能の改善に使用されているものとする。なお、図 2 の変換効率は 1984 ~ 1992 年度(225cm² 多結晶シリコン太陽電池のみ 1996 年度)の値⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾である。

図 3,4 の累積研究開発費は、図 1 (b),(c) に示した種類別の太陽電池の研究開発費のうち、多結晶シリコン太陽電池やアモルファスシリコン太陽電池において変換効率改善に分類した部分、およびその他に分類した部分を変換効率改善と正味のコスト低減とに比例配分したものの合計である。

変換効率に関する技術進歩のモデル化に際しては、(1)、(2)式をそのまま用いることができる。添え字 *e* を導入し、変換効率改善に関する累積研究開発費を *x_e*、変換効率を *y_e* とし、その上限値を *K_e*、残りのパラメータを α_e 、 β_e とすると、(3),(4)式のようにあらわされる。(3),(4)式のパラメータ *K_e* には、データと曲線の適合性をよくするため、理論変換効率⁽²⁸⁾ではなく、小面積(1cm²)での変換効率の世界最高値、多結晶シリコン太陽電池 19.8%、アモルファスシリコン太陽電池 12.7%⁽²⁹⁾を用いている。このとき、パラメータ α_e 、 β_e は、表 1 のように推定された。

$$y_e = K_e \cdot \exp\{-\exp(-\alpha_e - \beta_e \cdot x_e)\} \quad \dots \dots (3)$$

$$dy_e/dx_e = \beta_e \cdot \exp(-\alpha_e - \beta_e \cdot x_e) \cdot y_e \quad \dots \dots (4)$$

図 3 から明らかなように、累積研究開発費と各種太陽電池の変換効率との関係は、ほぼ成長曲線上にある。また、図 4 から、多結晶シリコン太陽電池の方が、変換効率改善

図 2 (ニュー)サンシャイン計画における太陽電池の変換効率

Fig.2. Conversion efficiencies of solar cells in the (New-) Sunshine Program of Japan.

図 3 太陽電池の変換効率に関する技術進歩モデル
Fig.3. Technological progress models of solar cells from the viewpoint of conversion efficiency.

図 4 太陽電池研究開発の変換効率改善に対する投資効率

Fig.4. Cost-efficiencies of R&D on solar cells from the viewpoint of conversion efficiency improvement.

表 1 太陽電池の変換効率に関する
技術進歩モデルのパラメータ値

Table 1. Parameters of technological progress models
of solar cells from the viewpoint of conversion efficiency.

	α_0	β_0 (1/million yen)
100cm ² mc-Si	0.544	0.000181
225 cm ² mc-Si	0.442	0.000157
100cm ² a-Si	0.0330	0.000134
1200cm ² a-Si	0.129	0.0000862

に対する投資効率が高い傾向にあることが分かる。ただし、これは、多結晶シリコン太陽電池の方が、変換効率が高いことも理由の一つと考えられる。

〈4.2〉 正味のコストの技術進歩モデルと投資効率

変換効率とは異なり、正味のコストは、明示的には得られていないので、太陽電池の製造原価から、変換効率と生産量の影響を除いて推定する。

わが国における太陽電池の価格⁽³⁰⁾としては、図 5 に示す生産額と生産量から算出された平均価格、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の購入価格の二つが知られている。両者とも、製造原価ではなく、種類別の価格でもない。ただし、NEDO の購入価格は、研究用原材料費として決定された価格で、ほぼ製造原価に相当するものとして設定されており⁽³¹⁾、本論文ではこれを製造原価のデータとして使用する。

図 6 に示す太陽電池の種類別の生産量⁽³²⁾⁽³³⁾から得られる市場占有率をもとに、価格による市場原理⁽³⁴⁾を仮定して、種類別の価格を推定することも可能ではある。しかし、データの得られている期間について、市場原理が十分機能していたとは考えにくく、価格には、種類による違いはなかったものとみなす。

正味のコストを推定するための変換効率は、図 2 の 100cm² 多結晶シリコン太陽電池と 1200cm² アモルファスシリコン太陽電池の値を用いる。このとき、(5)式に示すように、製造原価は変換効率に反比例するものとし⁽³⁵⁾、研究開発から量産化までの時間遅れ(リードタイム)は考慮しない。

生産規模の拡大によって、太陽電池の製造原価は低減する。これは量産効果とよばれている。量産効果は太陽電池の種類によっても異なる。生産規模と製造原価との関係を(5)式であらわす。生産規模年産 10MW 未満の生産ラインの増設によるものなど、 $n = -0.1$ 程度のものもあるが、10 ~ 100MW 近辺では、おおむね $n = -0.2 \sim -0.25$ 程度である

(30)(35)。

$$MC = MC_0 \cdot 1 / (CE/CE_0) \cdot (NC/NC_0) \cdot (LC/LC_0)^n$$

$$\dots \dots \dots (5)$$

ただし、MC は製造原価、CE は変換効率、NC は正味のコスト、LC は生産規模、添え字 0 はそれぞれの基準値をあ

らわす。

このように量産効果は本来、生産規模に対して定義されるものであるが、生産量と生産規模には相関があるとみなすことができるので、本論文では生産量に対して適用する。また、生産量から、価格データの得られている期間の生産規模は 10MW 未満と判断されることから、 $n = -0.1$ とする。

推定した太陽電池の正味のコストは図 5 に示した。図 7 に太陽電池の正味のコストに関する技術進歩モデルを、図 8 には、太陽電池の正味のコスト低減に対する投資効率を示す。図 7,8 の累積研究開発費は、変換効率改善の場合と同様に、その他に分類した部分を変換効率改善とコスト低減とに比例配分したものを含む。

図 5,7 に見られるように、正味のコストは、研究開発によって徐々に下がっていく。このため、図 7 に示す太陽電池の正味のコストに関する技術進歩モデルは、正味のコストを Gompertz 曲線の逆数曲線でモデル化したものである。すなわち、添え字 c を導入し、正味のコスト低減に関する累積研究開発費を x_c 、正味のコストを y_c 、正味のコストの下限値を K_c 、残りの二つのパラメータを α_c 、 β_c とす

図 5 わが国における太陽電池の価格
と推定した太陽電池の正味のコスト

Fig.5. Solar cell prices in Japan
and estimated net-costs of solar cells.

図 6 わが国の太陽電池の生産量

Fig.6. Solar cell/ module production in Japan.

図7 太陽電池の正味のコストに関する
技術進歩モデル

Fig.7. Technological progress models of solar cells
from the viewpoint of net-cost.

図8 太陽電池研究開発の正味のコスト低減
に対する投資効率

Fig.8. Cost-efficiencies of R&D on solar cells
from the viewpoint of net-cost reduction.

表2 太陽電池の正味のコストに関する
技術進歩モデルのパラメータ値

Table 2. Parameters of technological progress models
of solar cells from the viewpoint of net-cost.

	K_c (yen/W)	α_c	β_c (1/million yen)
100cm ² mc-Si	905	-3.02	0.000639
1200cm ² a-Si	830	0.00889	0.000251

ると、 y_c は、(1)式の逆数曲線(6)式であらわされ、その微分係数は、(7)式であらわされる。ただし、投資効率を正の値とするため、実際には微分係数の絶対値を用いる。

$$y_c = K_c \cdot \exp(\exp(-\alpha_c - \beta_c \cdot x_c)) \quad \dots \dots (6)$$

$$dy_c/dx_c = -\beta_c \cdot \exp(-\alpha_c - \beta_c \cdot x_c) \cdot y_c \quad \dots \dots (7)$$

ここで、パラメータ K_c 、 α_c 、 β_c は、表2のように推定された。正味のコストの下限値は、多結晶シリコン太陽電

池よりもアモルファスシリコン太陽電池の方が低いことから、変換効率改善や生産規模拡大の程度が同じ条件であれば、将来の製造原価は、アモルファスシリコン太陽電池の方が安くなる可能性を示唆している。

5. 太陽電池の投資効率の比較

〈5.1〉 製造原価低減率に対する投資効率 4.で得られた変換効率改善および正味のコスト低減に対する投資効率を相互比較するために、製造原価の低減率に対する投資効率を導入する。変換効率改善による製造原価の低減率に対する投資効率は、製造原価が変換効率に反比例すると定義しているため、変換効率改善に対する投資効率を各時点での変換効率で正規化したものではなく、(8)式のように定義する。ただし、実際には投資効率を正の値とするために絶対値を用いるので、変換効率改善に対する投資効率を各時点での変換効率で正規化したものと一致する。

$$\{d(1/y_c)/dx_c\}/(1/y_c) = -\beta_c \cdot \exp(-\alpha_c - \beta_c \cdot x_c) \quad \dots \dots (8)$$

同様に、正味のコスト低減による製造原価の低減率に対する投資効率は、正味のコスト低減に対する投資効率を各時点の正味のコストで正規化したものとして、(9)式で定義する。

$$(-dy_c/dx_c)/y_c = \beta_c \cdot \exp(-\alpha_c - \beta_c \cdot x_c) \quad \dots \dots (9)$$

製造原価の低減幅ではなく、低減率に対する投資効率とすることで、多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の変換効率の絶対値の差に起因する投資効率の違い、および変換効率に比べ精度がやや劣ると考えられる正味のコストの推定精度に起因する投資効率の不確かさを補償することができる。また、(8),(9)式から明かなように、製造原価の低減率に対する投資効率は、(4),(7)式の係数部分だけの簡単な式になる。

図9に変換効率改善による製造原価の低減率に対する投資効率を、図10に正味のコスト低減による製造原価の低減率に対する投資効率を示す。図9,10から変換効率改善による製造原価の低減率に対する投資効率は、多結晶シリコン太陽電池が、正味のコスト低減による製造原価の低減率に対する投資効率は、アモルファスシリコン太陽電池が、それぞれ他より高い傾向にあることが分かる。

アモルファスシリコン太陽電池については、1993～1996年度の研究開発の実際の目標は、安定化後の変換効率である⁽²⁷⁾。安定化後の変換効率に関する技術進歩はモデル化できていないので、投資効率は、得られている初期変換効率のものをを用い、次のように推定する。

すなわち、1996年度の安定化後変換効率の目標は、小面積(1cm²)で12.0%、1200cm²で8.5%である⁽²⁷⁾。このとき、小面積(1cm²)での初期変換効率は、12.7%が実現されている⁽²⁸⁾。大面積化で、初期変換効率も安定化後変換効率と同様の割合で低下するものとみなせば、安定化後変換効率8.5%は、初期変換効率9%に相当する。そこで、投資効率

も 1200cm² で 9.0%の初期変換効率が実現されていた時期 (1988 年度)の値と同程度であるとみなす。

この結果、1992 年度、1996 年度の(ニュー)サンシャイン計画における太陽電池研究開発の製造原価低減率に対する投資効率は、それぞれ表 3、表 4 に示すようにまとめられる。なお、これらの投資効率の数値は、変換効率改善を目標とする研究開発、ないしは正味のコスト低減を目標とする研究開発にそれぞれ 10 億円を投じると、その時点での製造原価から、投資効率の数値(%)だけ、製造原価が低減できることを意味している。また、(ニュー)サンシャイン計画における太陽光発電の研究開発は、4 年毎に見直されており、1992 年度、1996 年度は、それぞれ 1993 ~ 1996 年度、1997 ~ 2000 年度の計画を立案する年に当たっている。

表 3 から分かるように、1992 年度においては、変換効率改善、正味のコスト低減の両者を合わせた製造原価低減

図 9 太陽電池研究開発の変換効率改善による製造原価低減率に対する投資効率

Fig.9. Cost-efficiencies of R&D on solar cells from the viewpoint of manufacturing cost reduction rate by conversion efficiency improvement.

図 10 太陽電池研究開発の正味のコスト低減による製造原価低減率に対する投資効率

Fig.10. Cost-efficiencies of R&D on solar cells from the viewpoint of manufacturing cost reduction rate by net-cost reduction.

表 3 太陽電池研究開発の製造原価低減率に対する投資効率 (1992 年度)

Table1. Cost-efficiencies of R&D on solar cells from the viewpoint of manufacturing cost reduction rate in the FY1992.

	mc-Si	a-Si
by conversion efficiency improvement (%/billion yen)	2.6/ 3.0	1.3/ 1.7
by net-cost reduction (%/billion yen)	2.0	5.2

100cm²/ 225cm² for multicrystalline silicon (mc-Si) and 100cm²/ 1200cm² for amorphous silicon (a-Si).

表 4 太陽電池研究開発の製造原価低減率に対する投資効率 (1996 年度)

Table2. Cost-efficiencies of R&D on solar cells from the viewpoint of manufacturing cost reduction rate in the FY1996.

	mc-Si	a-Si
by conversion efficiency improvement (%/billion yen)	1.9/ 2.3	1.3/ 2.9
by net-cost reduction (%/billion yen)	0.6	2.8

100cm²/ 225cm² for multicrystalline silicon (mc-Si) and initial/ stabilized for 1200cm² amorphous silicon (a-Si).

率に対する投資効率は、多結晶シリコン太陽電池より、アモルファスシリコン太陽電池が若干高い程度である。また、アモルファスシリコン太陽電池に関しては、正味のコスト低減に比べ、変換効率改善による製造原価低減率に対する投資効率がかかなり低く、1993 年度以降の変換効率に関する目標が、初期変換効率から安定化後変換効率になったことは妥当であったことがうかがえる。

一方、表 4 からは、変換効率改善、正味のコスト低減を目標とする研究開発に 10 億円を投資すれば、多結晶シリコン太陽電池で平均 1.5%程度、アモルファスシリコン太陽電池ではそれぞれ 3%程度の製造原価低減効果があり、アモルファスシリコン太陽電池の投資効率が、2 倍ほど高かったことが分かる。

<5.2> 研究開発目標から求まる投資効率 <5.1>で求めた投資効率の実績値とは別に、モジュールコストと変換効率の二つの研究開発目標が設定されていれば、計画上の投資効率を直接計算できる。多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の研究開発の目標⁽²⁴⁾と、それらから得られる製造原価の低減率に対する投資効率を表 5.6 に示す。

モジュールコストは生産規模を年産 100MW としてあるので、量産効果を考慮することなしに比較できる。多結晶

シリコン太陽電池の 1996 年度の変換効率は実績値である⁷⁰⁾。アモルファスシリコン太陽電池の面積は、1996 年度と 2000 年度でそれぞれ $30 \times 40(\text{cm}^2)$ 、 $90 \times 90(\text{cm}^2)$ と異なっているが、モジュールコストに反映されているものとする。投資効率を計算する際の研究開発費は、2001 年度以降は、2000 年度と同様であると仮定する。

投資効率は、研究開発の成果とそれに要する費用との関係を記述しており、技術的な前提が大きく変わらない限り、前後の計画ではほぼ同様の値をもつ。研究開発計画の立案においても、投資効率は、研究開発目標と配分すべき研究開発費との関係を決定する上での規範になりうる。

〈5.1〉で求めた投資効率とここで計算した投資効率を比較すると、多結晶シリコン太陽電池では、1996 年度と比べ、その後、非常に高い投資効率が期待されていることが分かる。何らかの技術的ブレークスルー、特許等の購入を

表 5 多結晶シリコン太陽電池研究開発の目標
と製造原価低減率に対する平均投資効率
(1997～2002 年度)

Table 3. Goals and averaged cost-efficiencies from the viewpoint of manufacturing cost reduction rate of R&D on mc-Si solar cells in the FYs 1997-2002.

R&D goals	FY1996	FY2002
module cost (yen/W)	210	147
module conversion efficiency (%)	15	
cell conversion efficiency (%)	17.1	20
averaged cost-efficiencies	FYs 1997-2002	
by conversion efficiency		8
improvement (%/billion yen)	10.3	
by net-cost reduction (%/billion yen)	5.5	

R&D expenditure includes that of NEDO's SOG-Si project.
Cell conversion efficiency 17.1% in the FY1996 is achieved one.

表 6 アモルファスシリコン太陽電池
研究開発の目標と製造原価低減率に対する
平均投資効率(1997～2000 年度)

Table 4. Goals and averaged cost-efficiencies from the viewpoint of manufacturing cost reduction rate of R&D on a-Si solar cells in the FYs 1997-2000.

R&D goals	FY1996	FY2000
module cost (yen/W)	170	140
stabilized conversion efficiency (%)	8.5	10
averaged cost-efficiencies	FYs 1997-2000	
by conversion efficiency		
improvement (%/billion yen)	2.8	
by net-cost reduction (%/billion yen)	1.2	

含む海外からの技術移転、委託先の自己資金の投入などが前提になっていないとすれば、研究開発目標に対して研究開発費が少なすぎる、あるいは研究開発費に対して研究開発目標が高すぎることになる。

一方、アモルファスシリコン太陽電池については、この間の技術進歩に伴う投資効率の低下を考慮すると、ほぼ同程度の値であり、一連の分析結果を支持するとともに、設定した研究開発目標と配分した研究開発費との関係は妥当であったといえる。

〈5.3〉 生産量を考慮した投資効率 〈5.2〉では、投資効率に基づいて、研究開発の目標と研究開発費との関係に着目した。ここでは、限られた研究開発費をどの研究開発に投資すれば、より大きな効果を得られるかという、資源配分にも着目する。

研究開発で実現された太陽電池の性能は、実験室レベルのものであり、その性能で直ちに量産化できるわけではない。図 2 に示した(ニュー)サンシャイン計画で実現された多結晶シリコン太陽電池の変換効率は、5 年程度の時間遅れ(リードタイム)で量産化された太陽電池でも実現されていると考えられている⁷¹⁾。研究開発が将来の量産化を目標に置いている限り、その計画立案においては、この時間遅れを考慮しなければならない。

図 6 に示したように、1997 年以降、わが国の太陽電池の生産量は急激に増加しており、中でも多結晶シリコン太陽電池の生産量が大幅な伸びを示している。これは、1992 年度から実施されていた各種の太陽光発電の導入助成事業が拡大され、補助金の増額⁷²⁾と太陽光発電システムの価格の低下とが相まって、太陽光発電システムの普及が拡大したことによる。太陽電池の必要量が急増したことによって、その時点で性能的に優位にあった多結晶シリコン太陽電池に生産が集中したものと考えられる。

この傾向は、導入助成事業が継続される 2002 年度ころまでは続くと思われる。前述の時間遅れが、アモルファスシリコン太陽電池や正味のコストにおいても同程度であるとすれば、分析の対象とした 1989～1996 年度において、この生産量の増加を考慮した研究開発が実施されていなければならなかったことになる。

太陽電池全体に対する研究開発の効果は、生産量で重みづけした太陽電池全体の性能改善であり、この場合の投資効率は、〈5.1〉で述べた製造原価の低減率に対する投資効率に、研究開発から量産化までの時間遅れを考慮して、太陽電池の生産量で重みづけしたものになる。

多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の製造原価低減に対する投資効率は、表 3.4 に示したように、1992 年度はアモルファスシリコン太陽電池が若干高い程度で、1996 年度にはアモルファスシリコン太陽電池が 2 倍程度高いと推定された。一方、その後の生産量は、図 6 に示したように、逆に、多結晶シリコン太陽電池がアモルファスシリコン太陽電池を上回っており、2000 年度には 4 倍以上に上っている。このことは、生産量を考慮し

た投資効率は、1989～1996年度において、多結晶シリコン太陽電池がアモルファスシリコン太陽電池と同程度ないしは2倍以上もあったことになる。

投資効率に基づく資源配分としては、投資効率が均衡するまで一方にのみ資源を配分する方法、目標の改善率をほぼ同程度とし、投資効率に比例するように資源を配分する方法などが考えられる^{(38)～(41)}。いずれの方法をとるにせよ、生産量で重みづけした太陽電池の製造原価低減率に対する投資効率を考えると、この時期、多結晶シリコン太陽電池により多くの研究開発費を投資し、変換効率の改善、正味のコストの低減、および量産効果の観点から製造原価の低減を図ることが、より妥当な計画ではなかったかと考えられる。

しかし、該当する時期に実際に配分された研究開発費は、図1に示したように、多結晶シリコン太陽電池よりアモルファスシリコン太陽電池の方が多い。これは、本論文の分析結果に基づく限り、(ニュー)サンシャイン計画における研究開発費は、必ずしもここでいう投資効率や、研究開発の効果を基準として配分されてはおらず、他の要因が重要視されていたか、導入助成事業による生産量の変化を考慮していなかったものと推測される。

6. おわりに

本論文では、累積研究開発費を変数とする技術進歩モデルから求まる投資効率に基づいて、研究開発の費用効果を分析する方法を提案するとともに、それをわが国の(ニュー)サンシャイン計画における太陽電池の研究開発に適用し、研究開発計画の妥当性を検証した。

分析の結果、1997年度以降の多結晶シリコン太陽電池の研究開発計画に関して、設定された研究開発目標に対して配分された研究開発費が少なすぎる、あるいは研究開発費の配分に対して研究開発目標の設定が高すぎる可能性があること、および、1989～1996年度の研究開発において、1992年度に開始された補助金による導入助成事業の効果を予測し、反映させていなかった可能性があることが明らかになった。

ただし、以上の分析には、今後の課題として、さらに調査、検討を要する点もいくつかある。すなわち、データの入手の制約から、最近のアモルファスシリコン太陽電池の研究開発費に関しては、推定の精度がそれ以前と比べ若干劣る可能性がある⁽²²⁾⁽⁴²⁾。研究開発費の使途は、より正確な分析のためには、担当者に直接インタビューし、実際の使途を確認するなどの方法で妥当性を高めなければならない。また、本論文の分析では、基礎的な研究(研究開発費の使途を推定した際、その他とした部分)を変換効率改善、正味のコスト低減に配分したが、量産化までの時間遅れ(リードタイム)が異なる研究開発として、分けて取り扱うことも考えられる。正味のコストは、変換効率と異なり、徐々に低減し、限界値も明確でないため、技術進歩のモデル

化に際して、別の曲線を適用することも考えられる。研究開発から量産化までの時間遅れについては、さらに調査を進める予定である。

本論文の分析で得られた結論は、ニューサンシャイン計画における研究開発評価⁽⁴³⁾の主張と一致するところも多く、本論文で提案した研究開発の費用効果分析手法の有効性は十分確認できたと考えている。今後、本手法を太陽電池の研究開発に関する資源配分モデルによる分析へと展開し、シミュレーション、最適化を通じた研究開発計画策定支援へと発展させたいと考えている。

太陽光発電は、二酸化炭素排出量の削減という観点から、最も期待されているエネルギー技術と言っても過言ではない。普及を促進し、導入目標を達成するためにも、効果的、かつ効率的に研究開発を推進していく必要がある。本論文のような費用効果分析の結果が、今後、太陽光発電をはじめとするエネルギー技術の研究開発計画の策定に活用されるようになることを期待する。

本研究をまとめるにあたり、研究継続の機会を与えていただいた電子技術総合研究所エネルギー部長大田野芳郎氏(当時)、また、本研究に関して貴重なご意見をいただいた作田宏一氏をはじめとする電子技術総合研究所太陽光発電システムラボ(当時)のメンバー各位に謝意を表する。

(平成12年12月25日受付、平成13年5月31日再受付)

文 献

- (1) 竹下寿英:「エネルギー技術開発政策の評価」, エネルギー・資源, Vol.20, No.2 131-138 (平11-3)
- (2) 栗田洵:「研究評価の手法」, オペレーションズリサーチ, 525-532 (昭58-11)
- (3) 遠藤栄一・小山茂夫:「エネルギーシステムモデルMARKALの実用化と応用に関する研究」, 電子技術総合研究所研究報告第869号, (昭61-11)
- (4) F.A.Lootsma, T.C.A.Mensch and F.A.Vos: "Multi-criteria Analysis and Budget Allocation, with Applications in Energy R and D Planning, A Feasibility Study", Delft University of Technology Report 88-07, (1988)
- (5) H.C.Cheng, M.Steinberg and M.Beller: "Effects of Energy Technology on Global CO₂ Emissions", DOE/NBB-0076 (1986)
- (6) B.Keepin and G.Kats: "Greenhouse Warming: Comparative Analysis of Nuclear and Efficiency Abatement Strategy", Energy Policy, 16, 538 (1988)
- (7) C.Watanabe, B.Zhu and N.Murao: "Dynamic Optimality Analysis on Techno-economic Interaction in the Japanese PV Development", International Collaboration on Experience Curves for Energy Technology Policy, (2000)
- (8) 通商産業省:「新エネルギー導入見通しの試算結果」, 第9回総合エネルギー調査会新エネルギー部会資料4

- (平 12-10)
- (9) 資源エネルギー庁編: 「エネルギー 2001」, 電力新報社, (平 13-2)
- (10) Endo, E. and Tamura, Y.: "Resource Allocation Model for Planning R&D on Solar Cells", Solar Energy Material & Solar Cells, 67, 655-661 (2001).
- (11) 遠藤栄一: 「太陽電池の研究開発における投資効率」, 平成 8 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (論文 I) 157-162 (平 8-7)
- (12) 遠藤栄一・田村佳彦: 「太陽電池の研究開発に関する投資効率の分析」, 第 43 回自動制御連合講演会前刷 161-164 (平 12-11)
- (13) Endo, E. and Tamura, Y.: "Technological Forecasting of Crystalline Silicon Solar Cells by Using Technological Progress Models", Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Vol.I, 115-118 (1997)
- (14) OECD/IEA: "Experience Curves for Energy Technology Policy", 64-74 (2000)
- (15) Endo, E. and Tamura, Y.: "Correlation between R&D Expenditures and Conversion Efficiency Improvement in R&D on Solar Cells", Renewable Energy, Part I, 523-526 (1998)
- (16) R.Nallari: "Models of Technological Change", Journal of Scientific Industrial Research, Vol.51, No.3, 195-201 (1992)
- (17) P.Young: "Technological Growth Curves, A Competition of Forecasting Models", Technological Forecasting and Social Change, Vol.44, No.4, 375-389 (1993)
- (18) P.Meyer: "Bi-logistic Growth", Technological Forecasting and Social Change, Vol.47, No.1, 89-102 (1994)
- (19) 遠藤栄一・田村佳彦: 「太陽電池の技術進歩モデルの比較」, 計測自動制御学会第 36 回学術講演会予稿集, 81-82 (平 9-7)
- (20) Endo, E. and Tamura, Y.: "Technological Progress Model of Crystalline Silicon Solar Cells by Using Bi-logistic Curve", Proceedings of the 15th IMACS World Congress, Vol.3, 769-774 (1997)
- (21) 工業技術院: 「平成 3 年度新エネルギー技術研究開発計画の概要(サンシャイン計画)」, (平 2-9)
- (22) 「産業技術審議会エネルギー・環境技術開発部会第 14 回太陽エネルギー分科会資料」, (平 11-3)
- (23) (株)資源総合システム: 「太陽光発電情報 2000 年 8 月分」, 10, 8, 2 (平 12-9)
- (24) 工業技術院, NEDO: 平成 9 年度ニューサンシャイン計画成果報告書概要集(太陽エネルギー), (平 10-12)
- (25) NEDO, 太陽光発電技術研究組合: 第 13 回太陽光発電連絡会平成 12 年度報告, (平 13-4)
- (26) 杉上孝二: 「潜在力ある薄膜系」, 通産新報, (平 3-3)
- (27) 工業技術院, NEDO: 平成 8 年度ニューサンシャイン計画成果報告書概要集(太陽エネルギー), (平 9-12)
- (28) 林豊・黒川浩助: 「太陽電池」, 応用物理, Vol.63, No.8, 792-797 (平 6-8)
- (29) M.A.Green, K.Emery, D.L.King, S.Igari and W.Warta: "Solar Cell Efficiency Tables (Version 16)", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 377-383 (2000) and past issues.
- (30) 太陽光発電技術研究組合: 「平成 11 年度研究成果報告書太陽光発電産業動向調査」, (平 12-3)
- (31) 産業技術審議会新エネルギー技術開発部会太陽エネルギー分科会: 「太陽光発電技術開発の今後の進め方について 中間報告書 資料編」, 4 (平 5-3)
- (32) P.D.Maycock: "2000 World Cell/ Module Production", PV News, 20, 3, 2 (2001) and past issues.
- (33) (社)日本電機工業会: 「新発電システムの標準化に関する調査研究報告書第 1 部」, (平 7-3)
- (34) Edmonds and Reilly: "A Long-term Global Energy-economic Model of Carbon Dioxide Release from Fossil Fuel Use", Energy Economics, 5, 74 (1983)
- (35) P.D.Maycock: "Spire PV Module Manufacturing Cost at \$1.78/Watt", PV News, 17, 1, 3-4 (1998)
- (36) 今野国輔: 「NEDO における太陽光発電システムの開発動向」, 電気評論, 11-17 (1999-10)
- (37) 太陽光発電協会: 「普及促進策とその展開」, 第 17 回太陽光発電システムシンポジウムテキスト, (平 12-6)
- (38) 茨木俊秀: 「資源配分問題」, オペレーションズリサーチ, 756-764 (昭 55-12)
- (39) 加藤直樹: 「離散資源の公平な配分方法」, オペレーションズリサーチ, 572-580 (昭 61-9)
- (40) 山口俊和: 「プロジェクト選択問題に関する効率指標を利用した近似解法」, オペレーションズリサーチ, 21-25 (昭 61-1)
- (41) 豊田吉顕: 「プロジェクト選択と有効勾配法」, オペレーションズリサーチ, 329-334 (昭 62-6)
- (42) 福田正広: 「ニューサンシャイン計画における平成 12 年度太陽光発電技術開発について」, PVTEC ニュース, Vol.32, 3-8, 28-29 (平 12-3)
- (43) 産業技術審議会評価部会太陽光発電技術研究開発評価委員会: 「ニューサンシャイン計画太陽光発電技術研究開発プレ最終評価報告の概要」, PVTEC ニュース, 3-13 (平 12-7)

遠藤 栄一 (正員) 1980 年 3 月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月電子技術総合研究所入所。エネルギーシステム分析, エネルギー技術評価に関する研究に従事。2001 年 4 月から独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。計測自動制御学会, エネルギー・資源学会会員。

田村 佳彦 (正員) 1970 年 3 月京都大学大学院工学

研究科電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月電気試験所入所。計画・スケジューリング問題，意思決定支援システム等の研究に従事。電子技術総合研究所を経て，2001 年 4 月から独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。計測自動制御学会，システム制御情報学会，情報処理学会会員。