

住宅用太陽光発電システムの
環境優位性と投資効果の定量的評価

武蔵工業大学 環境情報学部
環境情報学科 伊坪研究室

学籍番号 0431073 高 爽

学籍番号0431126 田部井 博史

学籍番号 0431151 西田 篤史

学籍番号 0431173 堀口 健

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 既存論文の整理	3
第2章 研究概要	4
2.1 目的	4
2.2 対象製品の概要	4
2.2.1 太陽電池の分類	4
2.2.2 太陽光発電システムの概要	5
(1) 太陽光発電システムとは	5
(2) 普及の状況	5
(3) 発電の仕組み	5
2.3 調査方法	6
2.3.1 調査範囲	6
2.3.2 機能単位／基準フロー	6
2.3.3 運用段階における使用条件	6
2.3.4 投資効果の検証方法	7
(1) 投資とは	7
(2) 効果とは	8
(3) 投資効果の検証方法	8
第3章 環境影響評価	9
3.1 本章の目的	9
3.2 太陽光発電システムの環境影響評価	9
3.2.1 プロセスの設定	9
3.2.2 インベントリ分析	10
(1) 評価方法	10
(2) メーカーへのヒアリング	10
(3) 結果と考察	11
3.2.3 LIMEによる影響評価	12
3.3 系統電源の環境影響評価	13
3.4 太陽光発電システムの環境影響削減効果の分析	14
3.4.1 分析方法	14
3.4.2 分析結果	15
3.5 結論	16

第4章 経済性評価	17
4.1 経済性評価の方法.....	17
4.2 経済性評価の結果.....	18
第5章 投資効果の検証	19
5.1 投資効果の検証結果	19
5.2 投資効果の検証のまとめ	19
第6章 結言	20
6.1 現状の赤字に関する考察	20
6.2 導入費用の低減に関する考察 ～量産効果の考慮～	20
6.2.1 太陽光発電システムの今後の価格変動予測.....	21
6.2.2 太陽光発電システム価格の今後の予測を踏まえたコスト評価	22
6.2.3 量産効果を考慮した場合の投資効果の検証.....	23
6.2.4 量産効果の考慮のまとめ	23
6.3 おわりに.....	24
謝辞	26
参考文献	27

第1章 序章

1.1 背景

今日、人類は有限な化石燃料を主なエネルギー源として利用している。予測によると、2003年末の時点で埋蔵が確認されている化石燃料を今のペースで使い続けると、石油はあと41年、天然ガスはあと67年で枯渇する計算となる。また、化石燃料は、20世紀の高度な文明・経済成長を支える原動力となった一方で、環境汚染や健康被害などさまざまな問題の発生につながった面も否定できない。化石燃料に由来する二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスの排出による地球温暖化問題は、既に私たちの生活に影響を与え始めている。さらに、発展途上国の急速な経済成長により、この傾向がますます加速していくことが懸念される。このような背景の下、世界中の人がクリーンで持続可能かつ再生可能なエネルギーの重要性を認識しはじめている。

こうした情勢の中、国際的な地球温暖化対策の第一歩として2005年2月に京都議定書が発効し、日本をはじめとした温室効果ガス排出量の削減を約束した京都議定書締約国は、その数値目標を達成する責務を負うこととなった。二酸化炭素(CO₂)を始めとする温室効果ガスの排出量について、2008年から2012年の間に、締約国全体で対1990年比5%を削減することとし、日本は6%削減することとされている。

これ以来、日本は6%の二酸化炭素の削減の目標を実現するために、さまざまな研究や政策を実施するなどして努力している。その結果、「国内二酸化炭素の部門別排出量の推移」(平成18年)によれば、日本の企業や工場などから排出された二酸化炭素の量は年々減少の傾向を示している。さらに、グリーン購入法や資源循環基本法などの整備により、エコ商品や省エネ製品などが普及するようになり、大きな効果を生んでいる。

しかしその一方で、家庭からの二酸化炭素の排出量は依然大きいという結果も表れている。これは、京都議定書で定められた温室効果ガスの排出削減目標を達成するには企業だけでなく、国民一人ひとりの行動が必要だということを示している。そこで、今、家庭でできる具体的なCO₂削減方法のひとつとして太陽光発電システム(以下、PVシステムとする)が脚光を浴び始めている。

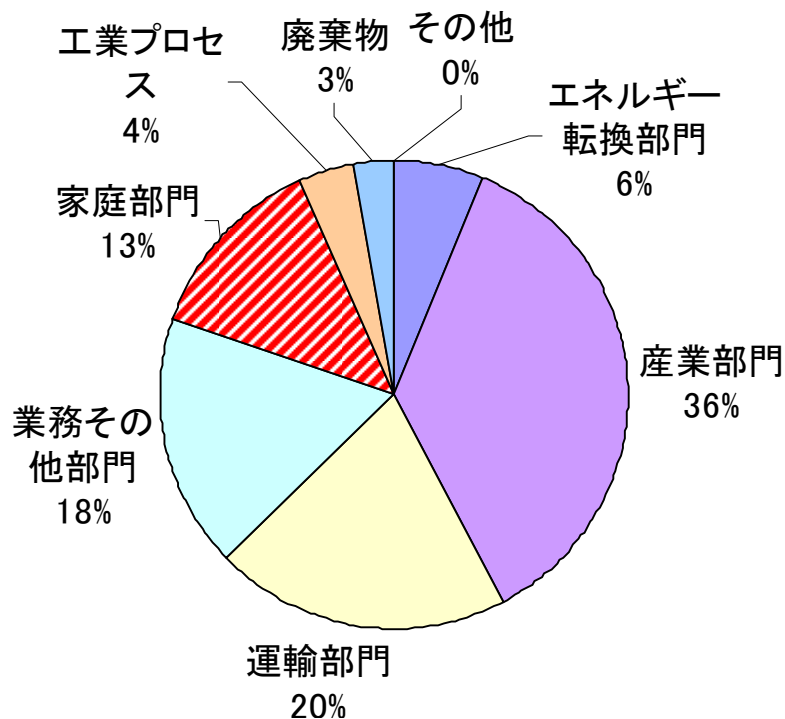


図 1.1-1 日本のCO₂排出量の構成（平成 16 年度）¹⁾

前述した化石燃料に関するグローバルな課題に加え、エネルギー自給率が 4%と極端に低いという日本固有の問題も抱えている。さらに近年の原油価格高騰もあり、将来に向けて安定的なエネルギー確保について、長期的な視点にたって考える必要があり、この点に関してもPVシステムに注目が集まっている要因のひとつとなっている。

ところで、こうした環境に関する諸問題の解決に役立つと考えられる新エネルギーを始めとした環境対応新技術の普及・拡大を図る上の問題点として、その初期投下費用の高さがある。つまり、短期的視点で見るとコスト高にしかならないために、思うように普及しないという現状があるのである。

このような中、イギリスのSternが興味深い意見を述べている。それは「気候変動により将来こうむるであろう大きな被害を、今から環境に対する資金投下することで小さくすることができる」²⁾というものである。こうした意見があることから、環境配慮型製品を評価する上で、その経済性に注目する価値が十分あるということがわかる。

以上述べてきたように、地球温暖化のインパクト低減に対する家庭レベルでの有効な手段として注目を浴びている PV システムについて、その環境負荷削減効果と経済性両者について定量的に分析し包括的な評価をすることが求められている。

1.2 既存論文の整理

PV システムを対象としたライフサイクルアセスメントはまだ限られているが、これまでに以下に示す 2 件の研究が挙げられる。

稲葉らによる「太陽光発電システムのライフサイクルアセスメント」³⁾では、PVシステムのライフサイクルインベントリのデータを作成しており、その中でもCO₂とSO₂に注目している。稲葉らは生産規模 10MW/年として生産されるモジュールを用いてインドネシアに大規模な太陽光発電所を建設することを想定しており、発電所建設によるCO₂・SO₂の排出量がそれぞれ総排出量の半分・3/4 を占めている。しかしながら、現在の国内における生産規模は 300MW/年以上であり、本研究の対象は住宅用PVシステムであるため、現在の製造条件を考慮する必要がある。

加藤による「大規模普及のための太陽光発電システムのライフサイクル評価の研究」⁴⁾では、PVシステムの環境影響評価に加えて、ライフサイクルコストの評価も行っている。加藤も生産規模 10MW/年と想定しており、CO₂排出量はエネルギー由来のものが 8 割を占めている。コストについては材料費が全体の約半分を占め最大となっている。このため、現状の生産規模を考慮することでCO₂排出量並びにコストに関しても低減することが予測される。

表 1.2-1 太陽光発電に関する LCA の動向

著者	稲葉敦ら (1993)	加藤和彦 (1999)
論文名	太陽光発電システムのライフサイクルアセスメント	大規模普及のための太陽光発電システムのライフサイクル評価の研究
評価対象	事業用太陽電池 (発電所)	住宅用太陽電池
調査範囲	資源調達・製造 環境影響のみ	資源調達・製造 環境影響及び経済性評価
評価物質	CO ₂ ・SO ₂	CO ₂

第2章 研究概要

2.1 目的

PVシステムは、エネルギーペイバックタイムやCO₂ペイバックタイムなどを用いて、その高い環境パフォーマンスが立証されている。しかし、コストの面においては、長年の研究成果と普及効果などにより、その価格は着実に下がってはきているものの、依然としてシステムの購入・設置にかかるコストを売電収入や自家消費することで浮いた電気代でペイバックすることは難しく、システムを導入しても最終的に赤字になってしまうケースは多いようである。

そこで本研究では、運用の段階で回収し切れなかった分のコストを環境影響削減のための投資とし、PVシステムによる環境影響削減効果をその効果として考え、この両者を比較することで、環境影響削減に対する投資効果を検証することを目的とした。

2.2 対象製品の概要

2.2.1 太陽電池の分類

太陽電池は、使用する半導体によって、シリコン半導体、化合物半導体、有機半導体の3種類に大別されている。現在、主として用いられている太陽電池は、地球上に豊富に存在するシリコンを材料としたシリコン半導体型太陽電池である。シリコン系太陽電池には、結晶系と非結晶系（アモルファス系）があり、さらに結晶系には単結晶系と多結晶系がある。結晶系シリコン太陽電池は安定した動作、高い信頼性、優れた変換効率により屋外用途の太陽電池が主流を占めている。アモルファスシリコン太陽電池は現状では変換効率が若干低い、将来の低コスト薄膜太陽電池の候補として期待されている。また、色素増感型太陽電池という従来より安く、原材料の資源の制約が少ない新型の太陽電池も開発が進んでいる。太陽電池がますます繁栄する時代が来るだろう。

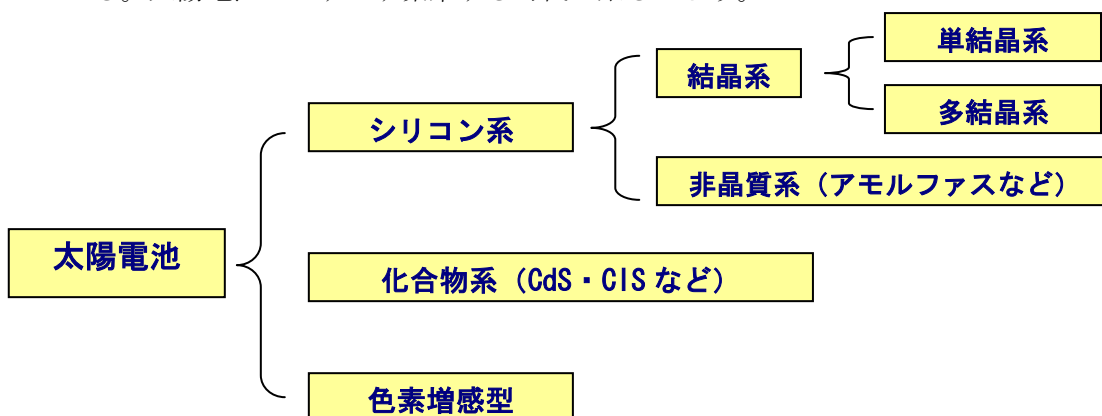


図 2.2-1 太陽電池の種類

2.2.2 太陽光発電システムの概要

(1) 太陽光発電システムとは

先に述べたように、家庭からのCO₂排出量の削減は進まず依然高い割合を示している。そこで、家庭レベルでのCO₂排出抑制に有効な住宅用PVシステムについて本研究では調査することとした。住宅用PVシステムは、太陽電池により発電した直流電流をパワーコンディショナに通すことによって電力会社と同じ交流電流に変換し電圧を調整し、さまざまな家電製品に電気を供給するシステムのことである。また、PVシステムは電力会社の電線とつながっているため、発電電力が余った場合には、電力会社へ逆送電し、電力を売るという仕組みになる。

(2) 普及の状況

PVシステムの導入量は下図 2.2-2 に示すように年々世界的に増加しており、日本は1132MW（2004年）と世界最大となっている。

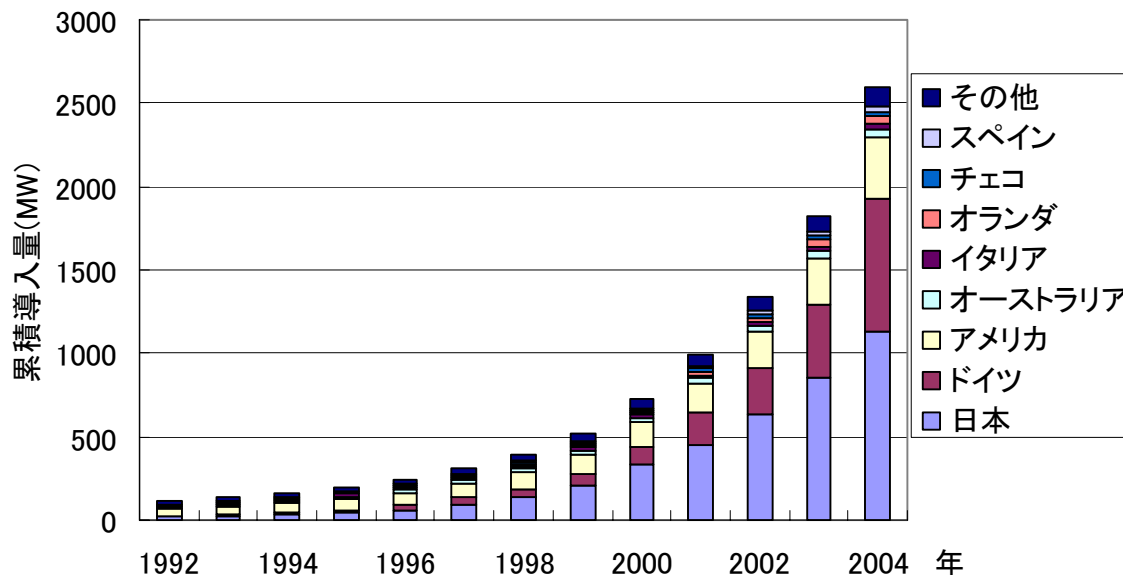


図 2.2-2 太陽光発電システムの累積導入量 (MW) 5)

(3) 発電の仕組み

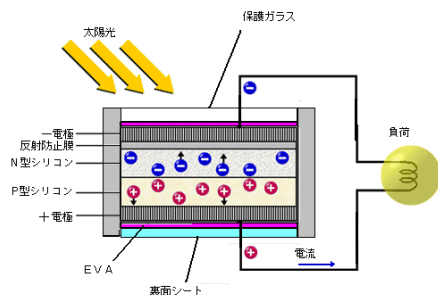


図 2.2-3 太陽光発電の仕組み⁶⁾

太陽電池に光が当たると、シリコンの中にプラスの電荷を持った正孔とマイナスの電荷を持った電子が生じ電位勾配により PN 接合部を境にして正孔は P 型シリコンに電子は N 型シリコンに集まり、PN 接合の両端に電位差ができ、電気が生じる。

2.3 調査方法

2.3.1 調査範囲

本研究では、多結晶シリコン型の住宅用 PV システムを対象とした。太陽電池の発電量は、主要メーカーが公表している年間予想発電量を平均した。よって、設置場所や設置方位に関する詳細な条件は設けていない。

システム境界は、PVシステムの「製造」から「使用」とした。PVシステムには、「太陽電池モジュール」、「パワーコンディショナ」、「架台」、「配線機材」を含めた。

2.3.2 機能単位／基準フロー

本製品の主たる機能は、太陽光を電気エネルギーに変換し、家庭で使用できるように配電することである。太陽電池によって発生した電気は、パワーコンディショナに送られて直流から交流に変換され、分電盤によって各負荷に分配される。

一般的な一戸建て住宅では 3～4kW のシステムが標準的といわれている。また、メーカーのカタログによれば、4kW 程度のシステムで、一般家庭での平均的な電力消費量を賄うことが可能である。そこで本研究では、4kW のシステムを想定した。システムのタイプは、現在、日本で最も普及している多結晶シリコン型で住宅用のものを採用した。

また、寿命の設定は、メーカーへのヒアリングの結果より、太陽電池モジュールが 30 年、システムに付属する周辺機器等は、パワーコンディショナが 15 年、その他の機器は 30 年とした。本研究では、システムの根幹を成す太陽電池モジュールを寿命いっぱいの 30 年間使用するものとした。よって、基準フローは、太陽電池モジュールが 1 台、パワーコンディショナが 2 台、それ以外の周辺機器はシステム導入時点で取り付けたものをそのまま 30 年間使い続けるものとする。

2.3.3 運用段階における使用条件

本研究では、住宅用のシステムを 4 人が居住する一戸建て住宅に設置することを想定した。

始めに、PV システムを設置するケース (Case1・PV) と系統電源のみを使うケース (Case2・系統電源) を用意し、両者の 30 年間に発生する環境影響／コストを比較し、その差を環境影響／コストの削減効果とする。Case1 では、太陽電池でまかない切れない分を系統電源からまかなうという形で電力会社から購入し、逆に太陽電池の発電電力が余った場合は電力会社へ売電する (系統連携・逆潮流あり)。但し、このときの売電価格は系統電源(電力会社)から購入するときの価格と等価とし、売買による利ざやはないものとする。これに対して Case2 では、すべての電力を系統電源から賄う。

この他、運用段階における使用条件として、年間の電力消費量と電気代、太陽電池モジュールの発電量を次のように算出し定めた。

まず、「家計調査年報」⁷⁾より 4 人世帯における一月あたりの平均電気代 9,801 円を引用した。年間の電気代は、これを 12 倍して 117,612 円とした。

次に、電力消費量は一月あたりの平均電気代 9,801 円を基に電力会社で用いられている電気料金算出方法に従って、一月あたり 492kWh を得た。さらに、これを 12 倍して年間電力消費量 5,904kWh を得た。

年間予想発電量は、主要メーカーが公表している年間予想発電量を参考にした。各社とも前提となる太陽電池の出力が異なっていたので、これを 4kW システムに換算した。それを平均することで 4,138kWh を得た。

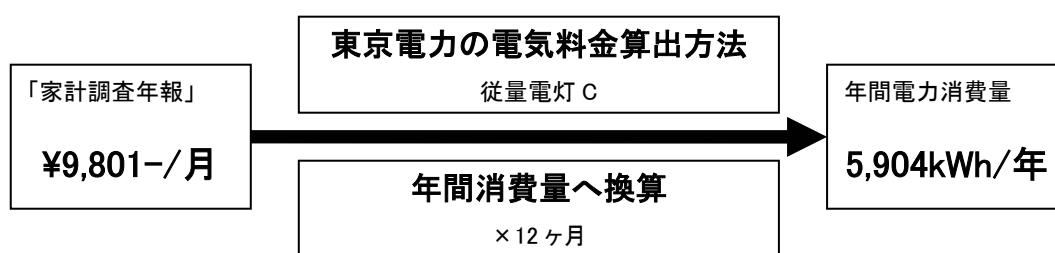


図 2.3-1 年間電力消費量の算出

2.3.4 投資効果の検証方法

投資効果の検証は、投資に掛かる金額とその効果の金額を比較することで行う。

(1) 投資とは

一般的には、利益を得ることを目的とした資金投下を「投資」というが、本研究では PV システムの初期投下費用ではなく、PV システムの導入による経済的な不利益分を「投資」と呼ぶこととした。

PV システム設置に伴い、発電した電気を自家消費することで電力会社からの電力購入量が減り、かつ余った電気を売電することで収入を得られる。これにより初期投下した設置費用を相当程度回収することができるが、回収しきれない分が出てくる。これを環境負荷削減のための「投資」とし、その金額を「投資額」と定義した。

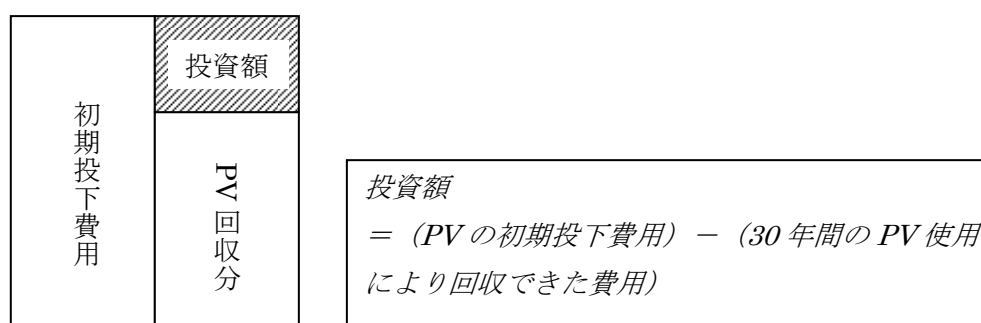


図 2.3-2 本研究における投資額の定義

(2) 効果とは

「効果」は一般的な定義と同様、PVシステムの効き目として考える。

系統電源のみを使用した場合とPVシステムを導入した場合の環境影響の外部費用をLIMEを用い比較し、その差を環境影響削減効果とした。これを「投資」に対する「効果」と定義した。

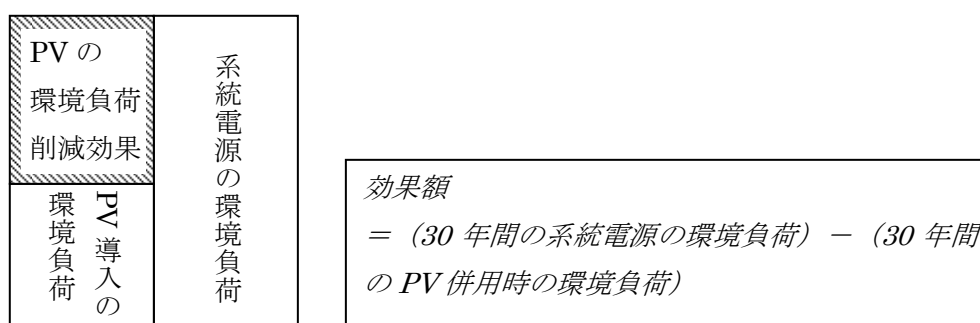


図 2.3-3 効果の定義

(3) 投資効果の検証方法

以上の様に定義した「投資」と「効果」の大小を比較することで投資効果の検証とする。

第3章 環境影響評価

3.1 本章の目的

本章では、PVシステムの製造と運用における環境影響について述べる。

始めに、PVシステムの製造段階における環境影響について、インベントリ分析とLIMEによる環境影響評価から考察する。但し、PVシステムの運用段階における環境影響はないものとした。次に、PVシステムを設置せずに系統電源のみを使用した場合についても同様に分析した。

これらの結果から、Case1・PVとCase2・系統電源の環境影響を求めて比較することで、PVシステムの環境影響削減効果について検討することを目的とする。

3.2 太陽光発電システムの環境影響評価

3.2.1 プロセスの設定

本章において、PVシステムの製造プロセスを図3.2-1のように整理した。それぞれのプロセスに含まれる製造工程は、表3.2-1に示すとおりである。これらのプロセスには、そのプロセスで使用する材料や部品の製造工程も含んでいる。

但し、図3.2-1と表3.2-1の「システム組立」はシステムを組み立てて設置する工程を含んでいるが、この工程の環境影響は全体に比べて極めて小さいため、本研究における環境影響評価では考慮していない。

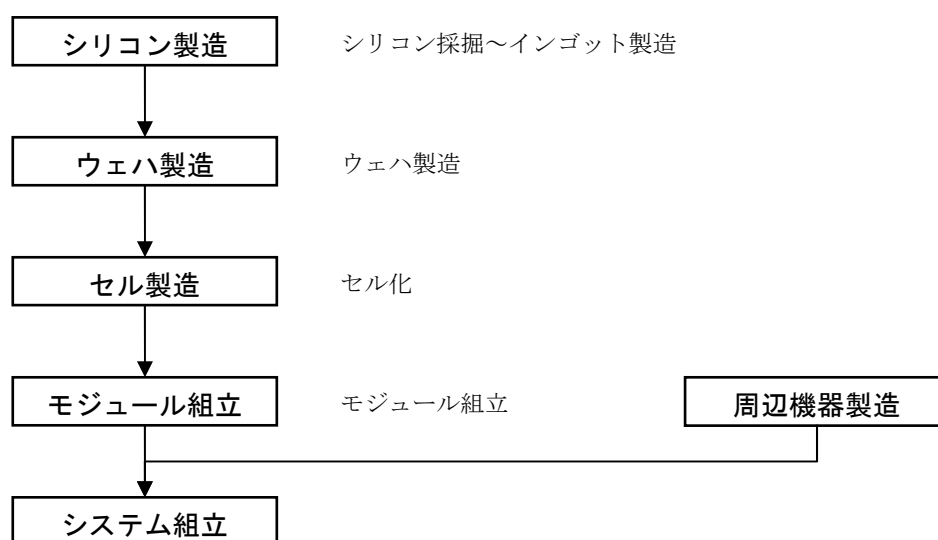


図 3.2-1 システム境界

表 3.2-1 システム境界

シリコン製造	シリコンの採掘からインゴット製造までの工程。
ウェハ製造	インゴットをスライスしてウェハを製造するまでの工程。
セル製造	ウェハを半導体するまでの工程。
モジュール組立	セルを組み立てて太陽電池モジュールにするまでの工程。
周辺機器製造	太陽電池モジュール以外にシステムを構成する機器を製造する工程。
システム組立	システムを組立・設置するまでの工程。(但し環境影響の計算には含まず)

3.2.2 インベントリ分析

(1) 評価方法

インベントリ分析の原単位は、AIST-LCA Ver.4（独立行政法人産業技術総合研究所）に搭載されているデータベースを用いた。算出も同ソフトウェアを使用した。

また、インベントリ分析に用いる入出力データは、1.2 で示した既存研究のインベントリデータを基に、主要なPVシステムのメーカーへ行ったヒアリングの結果などを参考にして作成した。ヒアリングの内容については、次項で述べる。ヒアリングからは、生産工程についてはあまり変わっていないが、ウェハの厚さが $350\mu\text{m}$ から $180\mu\text{m}$ へと薄くなった、という結果が得られた。本研究では、この結果を既存研究からのデータに織り込んで入出力データを作成した。

(2) メーカーへのヒアリング

インベントリ分析にあたって、太陽電池メーカーと周辺機器メーカーへヒアリングを行った。

まず、太陽電池についてのヒアリングでは、論文が書かれた 1999 年と 2006 年現在の相違について伺った。質問項目としては、太陽電池の生産工程の変化、太陽電池そのものの技術的進歩、太陽電池モジュールの寿命の 3 点である。その結果、太陽電池の生産工程には特に大きな変化はないことが分かった。太陽電池そのものの変化については、ウェハの厚さが $350\mu\text{m}$ から $180\mu\text{m}$ へ薄くなっているという結果も得た。また、寿命はメーカーによる保証期間は 20 年だが、使おうと思えば 30 年くらいまでは使えるのではないかとのことだった。インベントリ分析にあたって、これらの結果を考慮した。

次に、周辺機器についてのヒアリングでは、パワーコンディショナの寿命について伺った。パワーコンディショナは、PV システムの中でも主要な要素であると同時に、太陽電池モジュールに比べると寿命が短くシステムのライフサイクルで考えると必ず 1 回は買い換える必要がある。それゆえ、基準フローの設定するにあたって重要となる。また、次章で述べるべきことではあるが、パワーコンディショナは購入価格が比較的に高いので、買い替える回数によってコスト評価に大きく影響することも考えられる。ヒアリングの結果、

パワーコンディショナの寿命は長くて15年という回答を得た。ここで、パワーコンディショナが寿命を迎えたときに、パワーコンディショナの中の特定の部品を交換することで引き続き使用することが可能ではないかということも考えられる。しかし、これについては、部品の交換で延命することも可能かもしれないが、15年も経つとさらにパフォーマンスが良いパワーコンディショナが開発されていることが予想されるので、結果的には丸ごと買い替えた方が得策のようである。そこで、本研究では、寿命を15年として運用開始16年目に2台目を購入することとした。

(3) 結果と考察

インベントリ分析の結果を製造段階におけるプロセスごとにまとめて、表 3.2-1 に示す。また、図 3.2-2 は、表 3.2-1 を百分率で示したものである。本研究ではエネルギーの消費による化石資源枯渇問題や地球温暖化に着目しているため、表 3.2-1 と図 3.2-2 では、これらの問題に大きく寄与している、原油、一般炭、天然ガス、CO₂、CH₄、N₂Oの6項目に着目して示した。尚、実際の分析では入出力合わせて40項目を分析の対象としている。

表 3.2-1 と図 3.2-2 より、入出力量が多いのは「シリコン製造」となっている。これは主に、シリコンの精製や鋳造に投入されるエネルギーの消費に由来している。次に多いのは、「モジュール製造」となっている。本工程では、基本的にセルを組み立てて配線する作業がメインであり、それ自体はあまり大きな影響はもたらさない。この工程が大きな割合を占めている原因は、モジュールに使用するガラス板やアルミ枠の製造工程を含めていることにある。

表 3.2-1 インベントリ分析の結果

	シリコン製造	ウェハ製造	セル製造	モジュール製造	周辺機器製造	合計
原油	7.82E+01	2.41E+00	7.54E+00	8.63E+01	4.40E+01	7.82E+01
一般炭	1.73E+02	1.07E+01	3.36E+01	7.33E+01	1.57E+02	1.73E+02
天然ガス	1.25E+02	7.37E+00	2.31E+01	1.82E+01	1.97E+01	1.25E+02
CO ₂	1.03E+03	5.34E+01	1.67E+02	5.39E+02	6.35E+02	1.03E+03
CH ₄	2.62E-02	1.23E-03	3.83E-03	9.54E-03	6.82E-03	2.62E-02
N ₂ O	4.62E-02	2.52E-03	7.89E-03	3.65E-02	1.56E-02	4.62E-02

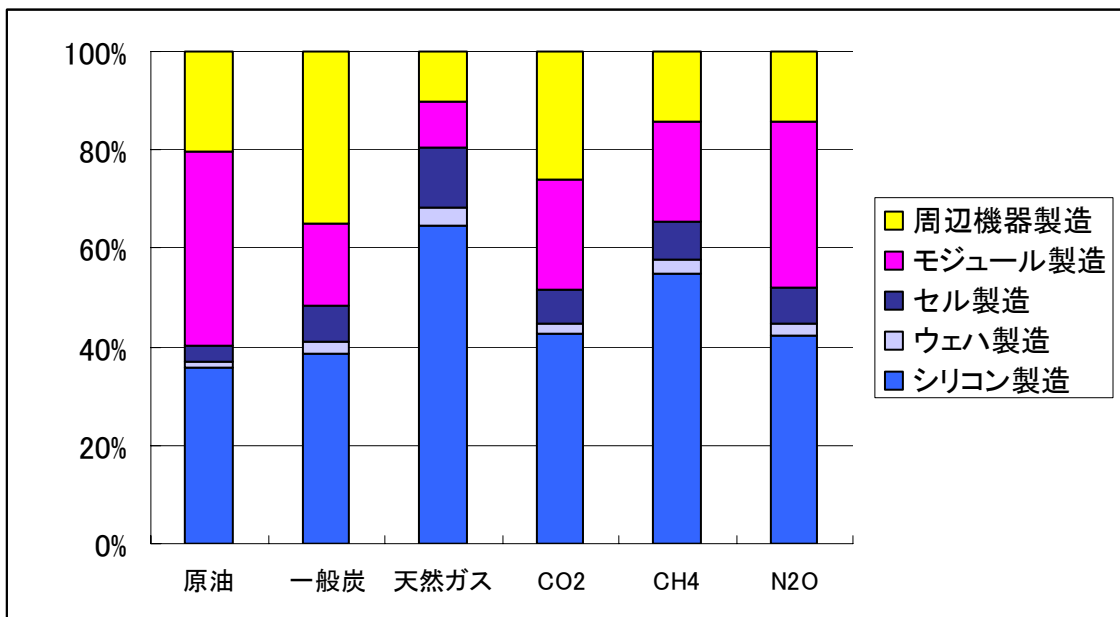


図 3.2-2 製造プロセス別排出割合

3.2.3 LIME による影響評価

次に、インベントリ分析の結果から環境影響評価を行う。環境影響評価の分析対象とする項目は、インベントリ分析で対象としていた 40 項目である。環境影響の算定には LIME (日本版被害算定型影響評価手法) を用いる。

図 3.2-3 (上) は、PV システムの製造段階における環境影響を統合化した結果である。LIME では円換算による被害算定を行うため、単位は [円] で示されている。「太陽電池モジュール製造」には太陽電池モジュールの製造工程が、「周辺機器製造」にはパワーコンディショナと配線設備の製造工程が含まれる。この図から分かるとおり、PV システムの製造段階を「太陽電池モジュール製造」と「周辺機器製造」に分けると、ほぼ 7 対 3 の割合となり、モジュールの製造工程における環境影響が大きな割合を占めることが分かる。

次に、これをさらに製造プロセス別に細かく分けて、環境影響の発生源を考察する。図 3.2-3 (下) は、図 3.2-3 (上) の製造プロセス別の内訳を示したものである。これによると、

「シリコン製造」が最も大きな割合を占めている。これは、シリコンの精製や鋳造のために消費された化石燃料とそれによって排出された温室効果ガスや大気汚染物質によるものである。

次に大きな割合を占めているのは、「モジュール製造」である。前述の通り、「モジュール製造」にはセルを組み立てる工程の他に、モジュールの表面に貼るガラス板やモジュールの外枠となるアルミ枠の製造工程を含んでいる。「モジュール製造」についてさらに細かく分析すると、この中で最も大きい割合を占めているのはアルミ枠の製造であり、続いて

ガラス板の製造となる。ここで、1999年から2006年にかけてウェハの厚さが薄くなったことによって、モジュールも薄くなっていることも考え得る。再度、ヒアリングを行ってメーカーに確認する必要があるが、モジュールも薄くなっていた場合、アルミ枠とガラス板の分の環境影響が小さくなることが予想される。或いは、今後の技術進歩によってモジュールが薄くできる場合、アルミ枠とガラス板について、さらに環境影響を小さくできる余地が大きく残されているということも考えられる。

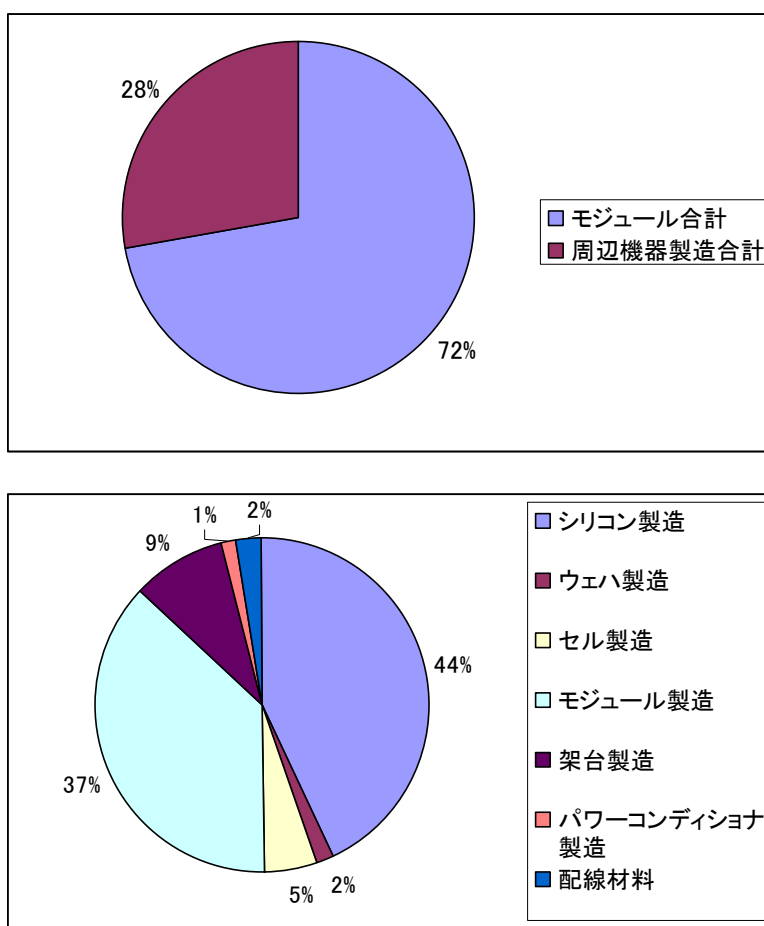


図 3.2-3 環境影響の統合化の結果

3.3 系統電源の環境影響評価

本研究では、PV システムの環境影響削減効果を分析するために、PV を使わずに系統電源のみ使用するケースも想定し、比較している。そこで、系統電源の環境影響についても触れておく。

系統電源の環境負荷原単位は、「JLCA-LCAデータベース 2004 年度 2 版」から引用した。このデータの基準年は 2004 年である。このデータをシステムと同様に AIST-LCA に入力し、

インベントリ分析を経てLIMEを用いて外部費用を算出し、1kWhあたり 0.972 円という結果を得た。環境影響評価対象物質は、システムと同様に 40 項目である。

系統電源の電源構成比は、実際には時間帯による電力需要の変化に伴って大きく変動する。PV システムは、その特性上、昼間の時間帯に発電し日没後は発電しなくなるため、PV システムが系統電源を代替して環境影響を削減できるのは、事実上、太陽が出ている時間帯のみである。そのため、その時間帯の電力を削減するとなると、発電量の調整を比較的柔軟に行える火力発電による電力を削減したと想定するのが妥当とも考え得る。しかし、PV システムが大規模に普及して系統全体にその効果が現れるような場合、電力会社としても、その変化に応じて細かに電源構成比が最適な状態になるように見直しを行っているとのことである。日本では既にある程度の規模で PV システムが導入されており、現在もある程度の割合をもって増加しているという観点から、現在の電源構成は、その影響も考慮されているものと考えられるため、本研究では平均的な電源構成比を採用した。

3.4 太陽光発電システムの環境影響削減効果の分析

これらの結果から、PV システムの環境影響削減効果を分析する。

3.4.1 分析方法

環境影響削減効果の分析は、図 3.4-1 に示すような形で行う。Case1 (図 3.4-1 の「PV 設置」) では、0 年目に PV システムの製造段階における環境影響を初期値として設定し、そこに系統電源から補う分の環境影響を積算していく。一方、Case2 (同「系統電源」) の場合は、すべての電力を系統電源でまかなったとして排出される環境影響を積算していく。

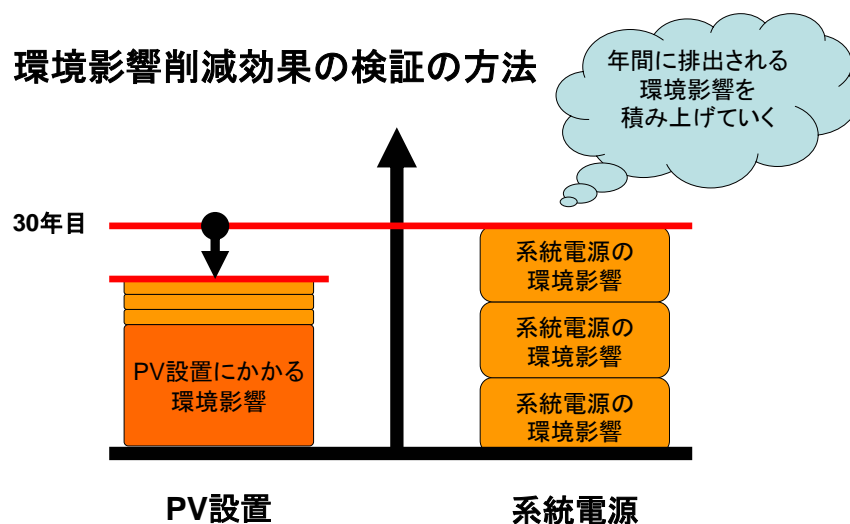


図 3.4-1 環境影響削減効果の検証方法

「2.3.3 運用段階における使用条件」において計算した電力消費量と発電量より、系統電源の年間使用量は、Case1 の場合は 1,769kWh、Case2 の場合は 5,907kWh となる。Case1 は、年間電力消費量から年間予想発電量を差し引いて算出したものである。また、Case2

の場合は 2.3.3 で求めた年間電力消費量そのものである。

これらによる環境影響を外部費用に換算して積算していく。「3.3 系統電源の環境影響評価」で算出した外部費用 0.972 円/kWh を上述の年間の系統電源使用量に乗じると、Case1 の場合は 1,719 円/年、Case2 の場合は 5,739 円/年となる。

3.4.2 分析結果

これらの方法によって分析した結果を、図 3.4-3 に示す。

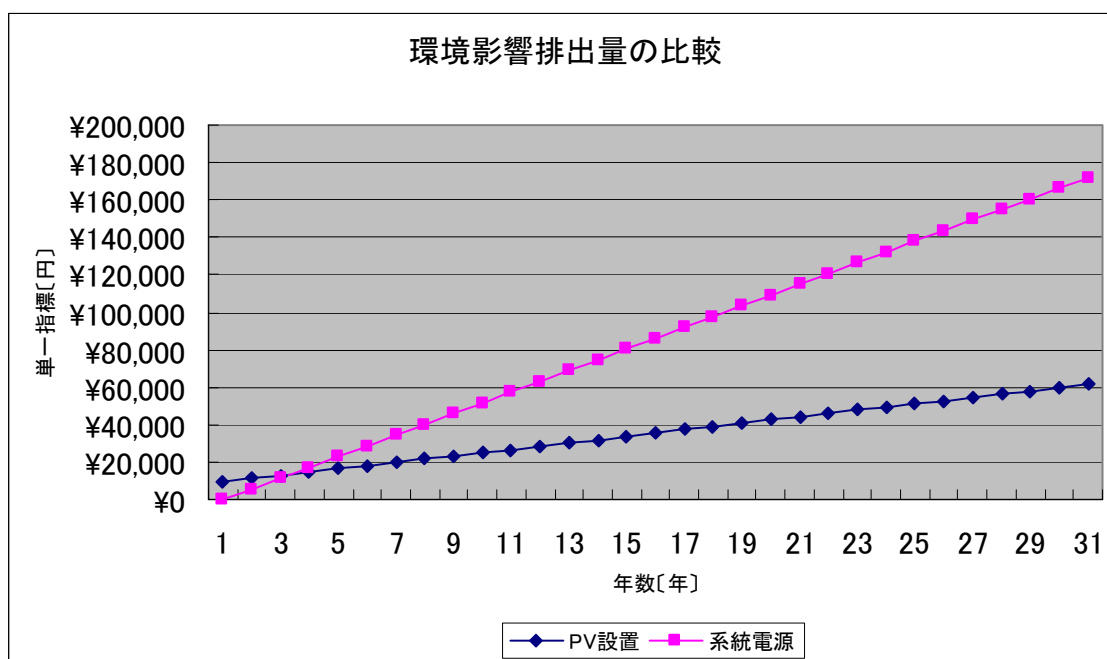


図 3.4-3 環境影響排出量の比較：3 年目で環境影響による外部費用をペイバックできる。30 年目での環境影響削減効果は 110,739 円となった。

Case1 は 0 年目に PV システムの製造段階の環境影響分として 20,066 円を加算しているが、年々積み上げている量が Case2 に比べて小さいため、途中で交差して、5 年目以降は Case2 の方が大きくなっている。このことから、環境影響による外部費用のペイバックタイムは 3 年であることが分かる。

尚、パワーコンディショナの寿命が 15 年であることから、2 台目のパワーコンディショナの製造にかかる環境影響は 16 年目に加算しているが、全体に比べて非常に小さいため、グラフにはほとんど表れていない。

最終的な 30 年目の環境影響は、Case1 が 61,434 円、Case2 が 172,172 円となり、Case1 が Case2 よりも約 11 万円低い結果が得られた。これを、PV システムの導入による環境影響削減効果とした。

3.5 結論

本章では、PVシステムの製造段階における環境影響評価を実施するとともに、系統電源との比較を行うことでPVシステムの導入による環境影響削減効果を検証した。但し、PVシステムの運用段階における環境影響はないものとして、製造段階で排出される環境影響と使用段階に代替される環境影響についてのみ検証した。

まず、システムの製造段階における環境影響評価では、シリコンを製造する段階が最も大きいことが分かった。これは、シリコンの精製や鋳造の工程で投入されるエネルギーの消費に伴う化石燃料の消費やそこから排出される温室効果ガスや大気汚染物質による影響が大きかった。次に影響が大きかったのは、太陽電池モジュールを組み立てる段階だった。これは、太陽電池モジュールに取り付けるガラス板とアルミ枠の製造に由来する環境影響が大きいものと考えられる。尚、太陽電池モジュールの廃棄・解体の際に、これらをはがして処理する技術がある。この技術を用いて、廃棄段階においてこれらをリサイクルすることができれば、ここでの発生が小さくなると考えられる。

次に、系統電源の環境影響評価を行った。ここでは、1kWhあたりの外部費用0.972円を得た。これは、日本で使用されている主要な電源を合わせて算出した結果である。日本では既にある程度の規模でPVが導入されているため、PVシステムによる自家発電は系統電源全体に対して影響を及ぼすという観点から、PVシステムによる環境影響削減効果を検証するときもこの数値を用いた。

以上の結果から、PVの環境影響削減効果を検証した結果を以下にまとめる。

- PVシステムの環境影響削減効果を確認できた。
- PVシステムの環境影響削減効果は110,739円。
- PVシステムを製造する段階で排出される環境影響は、運用開始3年目でペイバック可能であることが分かった。

第4章 経済性評価

4.1 経済性評価の方法

ここではPVシステムのコスト面での評価を行う。本来ならば、環境影響評価で行ったように、製造と使用の段階を工程別に詳細に分けて積み上げていくべきであるが、今回は一般消費者の立場から見たコストで評価を行うため、製造については販売価格および取り付け工事費、使用については購入電力料金と売電電力料金の差額を用いた。廃棄については、今日ではPVシステムのリサイクル方法や廃棄方法が確立していないため、廃棄段階は除外した。

評価の方法については、PVシステムを導入したケースと現状のケース、すなわちPVシステムを導入せず、電気は全て電力会社から購入しているものとした。

使用段階については定期的な掃除等のメンテナンスが必要となるが、主に点検と掃除がメインであり個人でもできる作業であるためコストからは除外した。

表 4.1-1 コスト評価の条件概要

	現状維持	PV導入(4kW)
製造(導入)段階		
モジュール価格	¥0	¥1,740,000
パワーコンディショナ価格	¥0	¥300,000
周辺部品価格	¥0	¥200,000
工事費用	¥0	¥400,000
使用段階		
年間電気代(4人)	¥94,692	¥94,692
年間売電料金	¥0	¥87,939
年間電気代合計	¥94,692	¥6,753

- ・モジュール価格、パワーコンディショナ価格、周辺部品価格、工事費用についてはNEDOの研究資料より2004年度のデータを引用した。
- ・年間電気代については総務省統計局家計調査年報平成17年度版より、4人家族の年間平均電気代を引用した。
- ・年間売電料金についてはシャープ、京セラ、三菱電機が出している年間発電量予測の平均を取り金銭に変換した。
- ・使用段階でのメンテナンスにかかる費用については除外する。
- ・廃棄、リサイクル段階の費用については、確立されている方法がないため除外する。

以上の条件及びシステムでモジュールの寿命でもある30年間稼働させたとしてコスト評価を行う。

4.2 経済性評価の結果

表 4.2-1 経済性評価結果

	0年	5年	10年	15年	20年	25年	30年
Case1 (PV導入)	¥2,640,000	¥2,680,518	¥2,714,283	¥2,748,048	¥2,981,813	¥3,015,578	¥3,087,299
Case2 (系統電源)	¥0	¥568,152	¥1,041,612	¥1,515,072	¥1,988,532	¥2,461,992	¥2,935,452
差額 (2-1)	¥-2,640,000	¥-2,112,366	¥-1,672,671	¥-1,232,976	¥-993,281	¥-553,586	¥-151,847

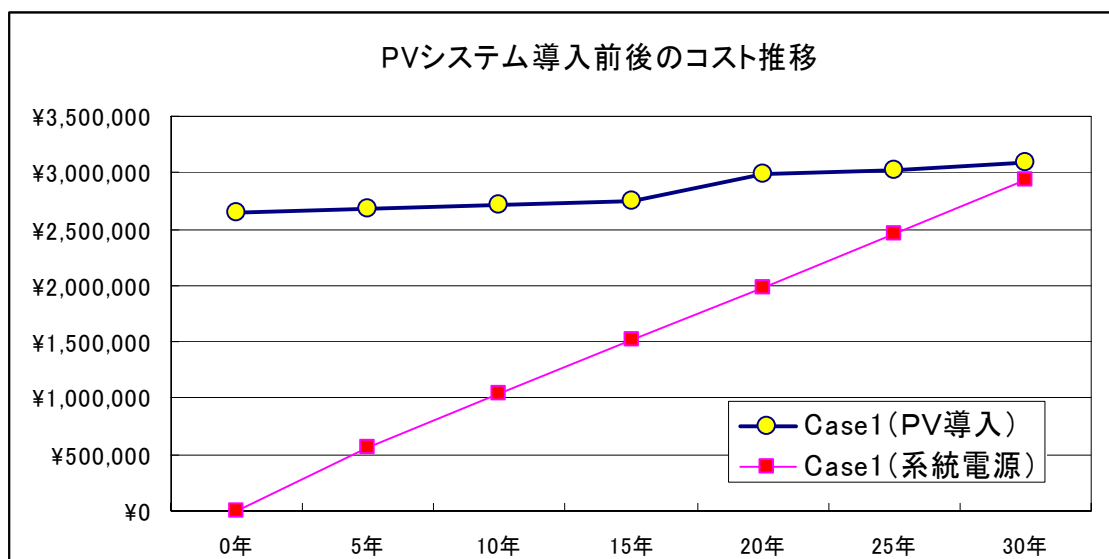


図 4.2-1 コスト評価結果

図 4.2-1 からわかるように PV システムを導入した場合、売電した分による電気代の削減で、年間の電気代（グラフの傾き）が大きく下がっていることがわかる。しかしながら導入費用が削減額を上回ってしまっているため、30 年間使い続けても経済的にはもとが取れないのが現状である。なお、導入したケースの 15 年目から 20 年目にかけてのグラフの傾きが大きくなっているのは、パワーコンディショナ 1 台目が寿命を迎え 2 台目の購入が必要となるからである。

第5章 投資効果の検証

第3章でLCAにより得られた環境負荷削減効果、及び第4章で得られたPVシステム導入に伴う追加的費用を比較することで、本章ではPVシステムの導入に対する環境面・経済面を包括した評価を実施する。

5.1 投資効果の検証結果

投資効果の検証結果を以下に示す。

投資額 = 3,087,299 円 - 2,935,452 円 = 151,847 円

効果額 = 172,172 円 - 61,434 円 = 110,739 円

投資額に比べ効果額のほうが 41,108 円 低くなった。

以上より、現状では投資効果は小さいことがわかった。

しかし、初期投入コスト 264 万円に対し 41,108 円 (1.56%) という小さい赤字であるため、補助金や価格交渉など条件次第では正の投資効果が得られる可能性があるがこともわかった。

5.2 投資効果の検証のまとめ

投資効果の検証のまとめを以下に示す。

- 現状では、環境影響の削減効果は確認できたが投資効果より費用が大きくなることがわかった。
- 効果に対するマイナス分 41,108 円は初期投入額の 1.56% と非常に小さいものであるため、購入時の補助金や価格交渉などによる値引きが伴えば投資効果が得られることもわかった。

第6章 結言

If a wider range of risks and impacts is taken into account, the estimates of damage could rise to 20% of GDP or more.

In contrast, the costs of action – reducing greenhouse gas emissions to avoid the worst impacts of climate change – can be limited to around 1% of global GDP each year.

(Nicholas Stern:”STERN REVIEW: The Economics of Climate Change”)

本研究では経済性と環境負荷削減効果という2つの視点からPVシステムを見つめることで、PVシステムを導入する環境的意味・経済的意味があるのかについて考えてきた。現状でも一定の効果を認めることができたが、より投資効果を上げ、積極的なPVシステムの普及を促すには何が必要なのかについて、考えてみることにする。

6.1 現状の赤字に関する考察

第5章より、PVシステム導入の投資効果はマイナス5万円であった。これをユーザーの努力によって、つまり節電行為によって回収することができるかについて、その可能性を探る。

まず、この赤字を日当たりの費用に換算し、電力消費単価を20円/kWhとしたとき毎日どれだけの節電が必要かを明らかにする。

$$5万0463円/30年/12か月 = 140.175円/月$$

$$140.175円/月/20円kWh/30日 * 1000 = 233.625Wh/日$$

この233Whという電力消費量は32型液晶テレビを見る時間を1日当たり84分減らすことで賄える量である。また、白熱灯を蛍光灯に変えるだけで748Wh(17時間/日使用の場合)の省エネが実現できることから、現状価格のままでも個人レベルの努力でPVの正の投資効果を上げることはもちろん、同時に節電によるさらなる環境負荷削減効果が期待できることがわかった。

6.2 導入費用の低減に関する考察 ～量産効果の考慮～

PVは発電して余った電気を売ることができるため系統電源では得られない経済的利益を得ることができる。しかし初期費用が大きすぎるため、30年間たっても系統電源の費用を下回ることではなく、15万1847円ほどPVシステムの累積コストの方が大きくなることがわかった。

ところで、一般には量産が進むことでその効果により一製品あたりの費用は低減するとされている。そこで、本研究においても量産効果を考慮したコスト評価を実施することにした。

6.2.1 太陽光発電システムの今後の価格変動予測

量産効果における価格の低下率だが、遠藤による「太陽電池の製造原価低減に対する研究開発と導入助成との投資効率の比較」⁸⁾内にて以下のような数式が与えられていたため、本研究ではそのまま引用した。

$$CC = CC_i \times (CL / CL_i)^b$$

CC・CC_i：太陽電池の製造原価・基準製造原価

CL・CL_i：太陽電池の生産規模・基準生産規模

b：価格低減率 太陽電池の種類によっても異なるが-0.2前後が妥当である(アメリカSPIRE社)とあったため今回は-0.2を採用した

また、上記の数式の整合性についてだが1995年と2004年のデータを基に試算してみたところほぼ現状と同じ金額(60万円/kW)となったため整合性は取れていると思われる。工事費については量産効果と工事費用の関係は薄いと考えられるため、今回工事費については2004年現在の費用と将来の費用で変化がないものとしている。データの基となる将来の生産規模については目標値で考察してしまっは予測の意味がなくなってしまうため、株式会社日本エコノミックセンターが出していた現状からみた今後の生産規模推移予測のデータ⁹⁾を基とした。

以下がコスト予測の結果である。

表 6.2-1 コスト予測結果

	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年
標準工事費	¥67	¥47	¥40	¥40	¥40	¥40	¥40	¥40
周辺部品	¥67	¥27	¥20	¥17	¥14	¥12	¥10	¥9
パワーコンディショナ	¥120	¥40	¥30	¥25	¥20	¥18	¥16	¥14
太陽電池モジュール	¥320	¥236	¥174	¥146	¥118	¥102	¥91	¥83
計	¥573	¥349	¥264	¥228	¥192	¥171	¥157	¥146

販売価格：万円/4kW

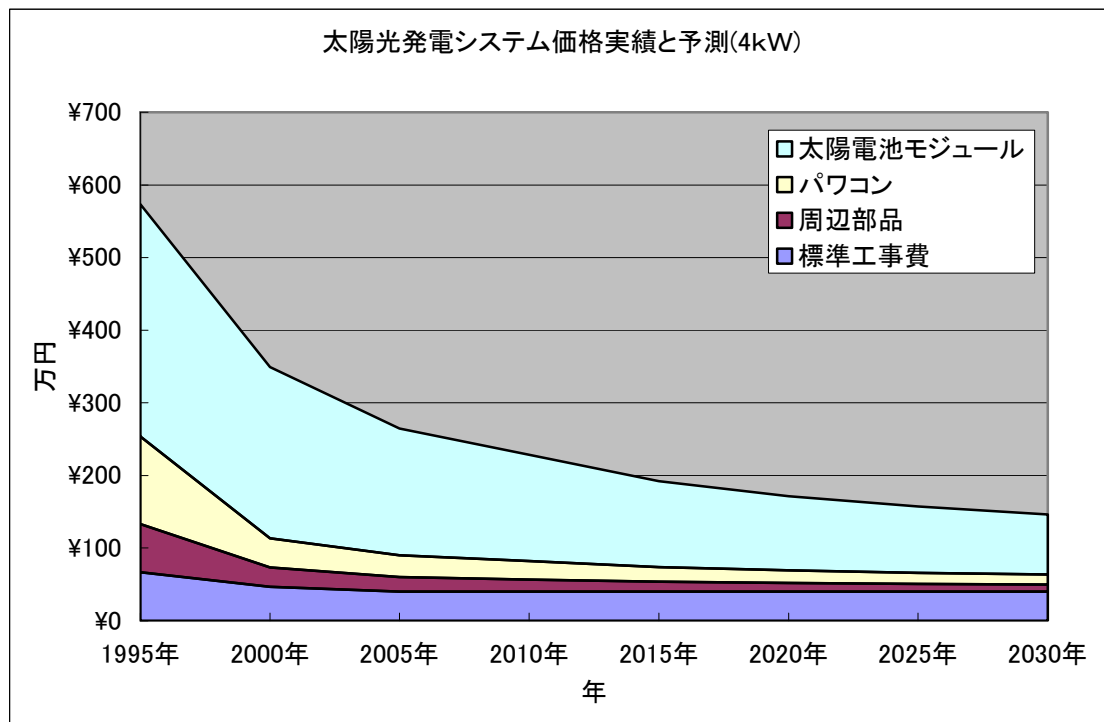


図 6.2-1 コスト予測結果

2005年より前の価格については実績値をそのまま入力したものである。グラフから見てわかるように、2005年以降緩やかではあるが着実に価格は低下していく傾向を示し、2030年には現状の約60%になることが予測された。

今回の研究対象が多結晶シリコン型の太陽電池であるため、このコスト評価についても多結晶シリコン型を対象としている。従って他タイプの太陽電池が開発されることにより、PVシステムのさらなる価格低減も期待できる。

6.2.2 太陽光発電システム価格の今後の予測を踏まえたコスト評価

現状での評価については30年間使い続けた結果経済的には元がとれない状況であるということがわかった。しかしながら先にも述べたようにPVシステムはまだ普及途中であり、今後生産規模が拡大することによって価格の低下が期待できることも確認できた。ここでは将来(2030年)の時点でのPVシステムの価格をもとにコスト評価を再び行った。以下に結果を示す。

表 6.2-2 将来の価格から見たコスト評価結果

	設置開始	5年	10年	15年	20年	25年	30年
(現)PV導入	¥2,646,753	¥2,680,518	¥2,714,283	¥2,748,048	¥2,981,813	¥3,015,578	¥3,087,299
(2030)PV導入	¥1,466,753	¥1,500,518	¥1,534,283	¥1,568,048	¥1,801,813	¥1,835,578	¥1,907,299
現状維持	¥94,692	¥568,152	¥1,041,612	¥1,515,072	¥1,988,532	¥2,461,992	¥2,935,452

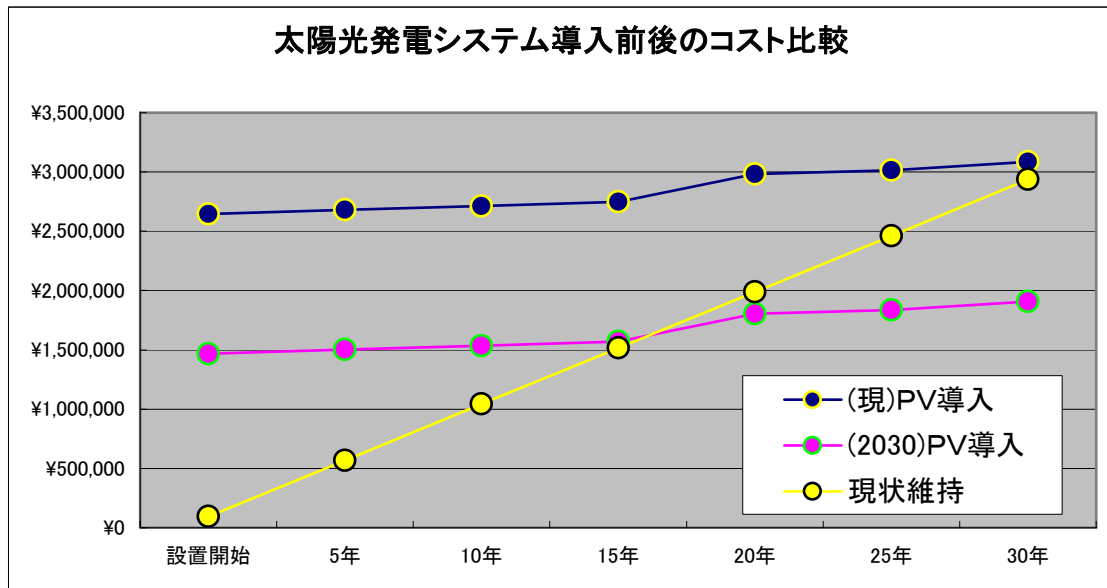


図 6.2-2 将来の価格からみたコスト評価結果

4-2 の結果とは大きく異なり、今回は初期費用が大幅に削減されているため約 16 年で初期費用の回収が終わるといった結果が出た。そして 30 年間このシステムを稼働させた場合には 112 万 9537 円もの利益が生み出されることも予想される。以上より、今後の PV の普及促進を通じて、初期投資を抑えることにより PV システムが経済的に優位になることがわかる。

6.2.3 量産効果を考慮した場合の投資効果の検証

量産効果による費用低減が実現した場合の投資効果は以下ようになった。

投資額＝マイナス 1,028,153 円（売電収入が初期費用を上回った）

効果額＝110,739 円

投資額に比べ効果額のほうが 1138,892 円 高くなった。

以上より、量産が進めば十分大きな投資効果が得られることがわかった。

このレベルまで費用低減が進めば他の電源に対し大きな優位性を得られるため、普及が一層進むことで環境負荷低減にも大きく寄与できると考えられる。

6.2.4 量産効果の考慮のまとめ

量産効果の考慮のまとめを以下に示す。

- 量産効果によるコスト低減が実現できれば、大きな経済的利益が期待でき、競合電源に対して経済面でも大きな優位を得ることがわかった。
- 今回考慮した量産効果については経済面のみで環境影響の考慮はしていない。量産効果が進むことで費用のみならず環境影響も低減することが予測できるため、量産効果を環境面についても考慮することが今後の課題となる。

- 補助金など積極的な環境配慮型製品展開の支援政策が重要になる。これにより需要量を増やすことで生産量も伸びれば、さらに短期間で製造コストを低減することが可能にある。
- 以上より、現状では利益を生み出すのが難しい環境配慮型製品であっても、積極的にそれを導入することで環境負荷低減効果はもとより大きな経済的利益をもたらすということがわかった。

6.3 おわりに

地球温暖化に伴う温室効果ガス排出削減が求められるなか、家庭部門の排出削減も重要になってくることは第1章でも述べたとおりである。これを果たすための手段としてPVシステムを導入することが大きな効果を生むということが本研究においてわかった。

また本研究における課題として以下のことが挙げられる。

- 環境影響評価における製造段階のデータに関して、ウェハの厚さ以外についても更新することでより現実に近い評価が実現できる。特に、ライフサイクルインベントリ分析に用いる環境負荷原単位を、近年のLCA分析用に用意されているデータと差し替えることで、より現状に近付いた形の評価ができるものと考えられる。
- 今回の評価では不確実性や変動性を持った値を用いたにもかかわらず、その考慮をしていない。特にコストドライバーとなっている初期投下費用については、不確実性分析をすることが必要であると考えられる。30年間使用したときの差額が約15万円という結果から見れば、ばらつきによっては総費用が系統電源とほぼ同額になることが考えられるからである。
- また、上記に関連して、助成金の考慮も必要である。例えば神奈川県横浜市は平成19年度の補助金として、「1kWあたり3万円(税込み)とし、4kWまで補助(上限12万円)」¹⁰⁾としている。また東京都港区は「助成対象経費の総額の4分の1に相当する額とし、30万円を限度」¹¹⁾としているため、総費用で系統電源を下回るということになる。
- 経済性評価に関しては、LCCを実施しより詳細な初期投下費用の分析を行うことも必要である。
- 本研究においては廃棄・リサイクル段階は調査範囲に含めなかった。その理由はそれぞれの方法が確立していないためであったが、一部で中古太陽電池モジュールの販売・再利用が実現している。これを含め、使用後を考慮した評価も必要になると考えられる。
- 今後の方向性として、PVシステムとオール電化を組み合わせるシナリオや、この比較対象としてオールガスを設定するなど、PVに付随する設備と組み合わせた評価も行う価値があると考えられる。また今回対象とした多結晶シリコン型以外のCISや色素増

感型などの今後主力となるであろう太陽電池に関する評価も行う必要がある。

以上の課題を解決することで、より高精度かつ現実に即した評価が可能になる。

ただし、私たちが研究で最も為したいことは、PVシステムという一つの環境配慮型製品の導入について検証することを通じて、環境配慮のための投資の意義について理論的、かつ、合理的に考察することの重要性を示すということである。

環境に投資することは自ら進んで地球の将来を描いていくことにつながるということ、そしてこれが今まさに求められているということをも本研究により一人でも多くの方に認識していただける研究成果の発信を行っていきたい。

謝辞

本研究は、夏休みのインターンシップに端を発し、それ以来、試行錯誤を繰り返しながらも、無事、今回の結果に達することができました。

本研究を進めるにあたり、指導教官の伊坪徳宏先生には、ご多忙にもかかわらず、懇切丁寧なご指導を賜りました。心よりお礼申し上げます。

また、夏休みのインターンシップでは、班のメンバーの一人である堀口を受け入れて下さいました、独立行政法人産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターの皆さま、並びにお話を伺い上がった同研究所太陽光発電研究センターの皆さまには、大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

特に、ライフサイクルアセスメント研究センターの遠藤栄一様、太陽光発電研究センターの加藤和彦様と土井卓也様には、インターンシップ終了後にも文献のご提供など、ご自身の仕事でお忙しい中、ご尽力賜りました。私たちにとって大変有益だったことは言うまでもありません。心よりお礼申し上げます。

また、ヒアリングの受け入れや資料をご提供いただきました、東京電力株式会社の横関まゆみ様、シャープ株式会社の飽本正浩様、京セラ株式会社の東洋一様にも、お忙しい中、大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

最後に、本研究を進めていく上で、私たちに多数の助言を与えて下さいました研究室の諸先輩方、並びに共に助け合い励まし合ってきた同期の仲間たちにも、心よりお礼申し上げます。

2007年3月31日

太陽電池班一同

参考文献

- 1) 環境省：“環境白書（平成 18 年版）” 環境省，（オンライン），入手先 < <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/honbun.php3?kid=225&serial=26646&bflg=1>>，（参照 2007-4-20）
 - 2) Nicholas Stern：“Stern Review final report”，[HM TREASURY](#)，（オンライン），入手先
<http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm>，（参照 2007-4-20）
著者名（全員）：雑誌名（略記にて可），巻（号），（発行年），pp.頁-頁
 - 3) Atsushi I., Yasuhiko K., Mitsuo K., Kouji K., Nobuhide T., Suguru N., Shintaro M., Hideki M., Hiroshi K：Energy & Resouce, 16 (5), (1995), pp.65-81
著者または編者名，“書名”，出版元の名前，出版元所在地，（発行年），pp.頁-頁
 - 4) 加藤和彦，“太陽光発電システムのライフサイクルアセスメント”，（1999），pp.27-74
 - 5) IEA：“Total photovoltaic power installed in IEA PVPS countries”，IEA Photovoltaic Power Systems Programme，（オンライン），入手先
< <http://www.iea-pvps.org/isr/22.htm> >，（参照 2007-4-20）
 - 6) 三菱電機：“発電の原理”，三菱電機，（オンライン），入手先
< http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/taiyo/what/t_index4.htm >，（参照 2007-4-20）
 - 7) 総務省統計局：“家計調査年報”，総務省統計局，（オンライン），入手先
< <http://www.stat.go.jp/data/kakei/2005np/index.htm> >，（参照 2007-4-20）
 - 8) 遠藤栄一：“太陽電池の製造原価低減に対する研究開発と導入助成との投資効率の比較”，産業技術総合研究所，（オンライン），入手先 < <http://staff.aist.go.jp/endo.e/13denB+.pdf> >，（参照 2007-4-20）
 - 9) 日本エコノミックセンター：“太陽光発電市場の実態と将来展望”，日本エコノミックセンター，（オンライン），入手先 < <http://www.j-economic.co.jp/070220-taiyoukou.htm> >，（参照 2007-4-20）
 - 10) 辻原 浩：“平成 19 年度 住宅用太陽光発電システム 設置費補助事業の募集開始について”，横浜市，（オンライン），入手先 < <http://www.city.yokohama.jp/me/kankyou/kisha/h19/070410.html> >，（参照 2007-4-20）
 - 11) 環境課地球環境係：“港区住宅用太陽光発電システム設置費助成の案内”，港区，（オンライン），入手先 < <http://www.city.minato.tokyo.jp/kurasi/sumai/hatuden/index.html> >，（参照 2007-4-20）
-