

■ 研究論文 ■

太陽光発電システムの導入によるCO₂排出削減効果Reduction of CO₂ Emission for the Introduction of Solar Photovoltaic Energy Systems

稲葉 敦*・近藤 康彦**・小林 光雄***・喜多 浩之****・高橋 伸英****
Atushi Inaba Yasuhiko Kondo Mitsuo Kobayashi Kouji Kita Nobuhide Takahashi

野田 優****・松本真太郎****・森田 英基****・小宮山 宏****
Suguru Noda Shintaro Matsumoto Hideki Morita Hiroshi Komiyama

(1994年9月29日 原稿受理)

Abstract

In this paper, the quantity of CO₂ emitted resulting from the construction of a photovoltaic power plant in Indonesia using Japanese-manufactured modules was compared with that from the production of an analogous plant in Japan using the same modules. The CO₂ emitted per unit of electrical energy generated by the power plant in Indonesia is less than that of the analogous Japanese plant, because solar energy is available in larger quantities. However due to the present relative inefficiency of Indonesian thermal power plants, CO₂ emissions per unit electrical energy grows larger than their Japanese counterpart if Indonesian-manufactured modules are used. This analysis suggests that solar photovoltaic power generation systems be used in low latitudes where high-efficiency has been demonstrated, and that cooperation between developed and developing countries is essential for the utilization of solar energy in these regions.

1. 緒言

地球規模の環境維持, 中でも化石燃料の使用に起因するCO₂の排出削減のためには, 化石燃料利用技術の効率向上と自然エネルギーの利用が重要である。また, 今後の人工増加が予想される発展途上国での対策が必要である。

一般に, 発展途上国の化石燃料利用技術は効率が低いことが多く, 先進諸国の火力発電技術などの移転が重要とされる。しかし, CO₂排出削減のためにも, またエネルギー供給の面からも, 長期的には自然エネルギーの利用が不可欠であるとの視点に立てば, 発展途上国のエネルギー需要を自然エネルギーで供給することが重要となる。特に, 低緯度に存在する発展途上国には, 太陽エネルギーの利用が望ましい。

著者らは既に, この観点から, 太陽光発電モジュール

ルを日本で製造し, インドネシアで集中型発電所を建設するケースについて, ライフサイクルアセスメントの手法を用いて, CO₂排出量を試算した¹⁾。インドネシアは石炭や天然ガスの供給国としてわが国との関係が深まることが予想される²⁾ためである。

本報告では, 日本でモジュールを製造し日本に集中型発電所を建設するケース, および, インドネシアでモジュールの製造し集中型発電所を建設するケースについてもCO₂排出量を試算し, CO₂排出削減対策としての優劣を比較する。日本で太陽光発電モジュールを製造し, インドネシアで集中型発電所を建設するケースでは, 日本でのCO₂排出量は増加するが, それにもまして, インドネシアでの排出削減が期待される。

さらに, 本報告では, インドネシアに日本の石炭火力を技術移転することによるCO₂排出削減量と比較し, 太陽光発電技術の導入の重要性を指摘する。

* 資源環境技術総合研究所 エネルギー資源部燃料物性研究室長
** " " " 研究官
*** " " " ガス化研究室主任研究官

**** 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻
***** " 工学部化学システム工学科教授
〒113 東京都文京区本郷7-3-1

2. 対象とするシステム

シリコン系太陽光発電セルには、アモルファス、単結晶、多結晶などがあり、製造コストと発電効率がトレードオフの関係にある。多結晶シリコンセルはその両者のバランスの上で集中型発電所への利用には最適と考え、ここでは、多結晶シリコンによる太陽光発電を取り扱う。

太陽光発電モジュールの生産規模は10MW/年とし、1年間に生産されるモジュールを用いて、太陽光発電所1基が建設される。モジュールの製造および集中型発電所建設に関するデータは「CO₂と地球環境問題研究会」の報告書³⁾および稲葉ら⁴⁾から引用した。

わが国で太陽光発電モジュールを製造し、インドネシアに輸送して集中型発電所を建設するケースの試算前提条件は前報¹⁾に示した。これをケースAと呼ぶ。インドネシアでの集中型発電所の建設に必要なセメント以外の素材は日本で製造され輸出される前提になっている。

日本でモジュールを製造し、日本に集中型発電所を建設するケースBは、モジュールのインドネシアへの輸送が不要であること、およびセメントも日本で製造されることがケースAと異なっている。

ケースCでは、インドネシアでモジュールを製造するが、セメント以外の素材の製造工程でのエネルギー原単位は日本と同じであると仮定している。

これらのケースの立地の相違を表1に示す。日本からインドネシアへのモジュールの輸送によるCO₂排出

表1 想定した各ケースの立地場所

ケース	A	B	C
モジュールの製造	日本	日本	インドネシア
発電所の建設	インドネシア	日本	インドネシア

量は、システム全体の排出量に比べて小さく¹⁾、また、セメントを除いて基礎資材の製造工程でのエネルギー消費原単位を同じと仮定しているため、これらのケースの間の相違は主として、インドネシアと日本の発電効率の相違による電気のCO₂原単位の相違に帰着する。

また、発電電力量あたりのCO₂排出量を評価する場合には、日本とインドネシアの日射量の相違に基づく発電電力量の相違が影響を与える。インドネシアの年平均日射量は年平均4.5kWh/日であり⁵⁾、これはわが国の年平均日射量3.29kWh/日の約1.37倍に相当する。1基あたりの日本とインドネシアの年間発電電力量はそれぞれ、31.1TJ (8.64×10⁶ kWh)、42.6TJ (1.183×10⁷ kWh)となる。

3. 評価手法

前報¹⁾に示したデータを用い、ライフサイクルインベントリ (LCI) の手法に基づいて、CO₂排出量を求めた。

4. 計算結果および考察

4.1 太陽光発電システムのCO₂排出量

表2に、各ケースでの集中型発電所1基あたりのCO₂排出量を示す。1年間に製造されるモジュールを使用して集中型発電所1基を建設することを前提とし

表2 太陽光発電システム1基あたりのCO₂の排出量と発電電力量あたりのCO₂排出量

	ケースA	ケースB	ケースC
CO ₂ 総排出量(×10 ⁴ kg)	4039.13	3721.30	4687.25
モジュールの製造	1969.05(日本)	1969.05(日本)	2597.18(インドネシア)
SOGシリコンの製造	1055.61	1055.61	1214.84
基板化工程	359.81	359.81	631.58
セル化工程	107.73	107.73	194.39
モジュール化工程	434.03	434.03	543.64
PV-Plant	11.86	11.86	12.73
モジュールの輸送	3.71	0.00	0.00
発電所建設	2066.39(インドネシア)	1752.25(日本)	2090.07(インドネシア)
鉄の製造	895.36(日本)	895.36(日本)	951.20(インドネシア)
銅の製造	34.70(日本)	34.70(日本)	31.72(インドネシア)
プラスチックの製造	86.92(日本)	86.92(日本)	74.83(インドネシア)
セメントの製造	181.03(インドネシア)	149.57(日本)	181.03(インドネシア)
素材の輸送	17.09	0.00	0.00
建設用重機の使用	283.23(インドネシア)	290.69(日本)	283.23(インドネシア)
電気	568.06(インドネシア)	295.02(日本)	568.06(インドネシア)
30年での発電電力量(TJ)	1278.3	933.1	1278.3
CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /TJ)	31.6	39.9	36.7

表3 太陽光発電システム1基あたりのSO₂の排出量と発電電力量あたりのSO₂排出量

	ケースA	ケースB	ケースC
SO ₂ 総排出量(×10 ⁴ kg)	11.4151	5.0769	33.9420
モジュールの製造	2.5111(日本)	2.5111(日本)	22.1345(インドネシア)
SOGシリコンの製造	1.2078	1.2078	7.8190
基板化工程	0.4247	0.4247	6.4982
セル化工程	0.1418	0.1418	2.1255
モジュール化工程	0.7210	0.7210	5.6445
PV-Plant	0.0408	0.0408	0.0473
モジュールの輸送	0.0408	0.00	0.00
発電所建設	8.8633(インドネシア)	2.5658(日本)	11.8076(日本)
鉄の製造	1.2470(日本)	1.2470(日本)	3.6816(インドネシア)
銅の製造	0.1515(日本)	0.1515(日本)	0.3055(インドネシア)
プラスチックの製造	0.2078(日本)	0.2078(日本)	0.7514(インドネシア)
セメントの製造	0.3580(インドネシア)	0.0708(日本)	0.3580(インドネシア)
素材の輸送	0.1879	0.00	0.00
建設用重機の使用	0.4693(インドネシア)	0.5412(日本)	0.4693(インドネシア)
電気	6.2418(インドネシア)	0.3475(日本)	6.2418(インドネシア)
30年での発電電力量(TJ)	1278.3	933.1	1278.3
SO ₂ 排出量(kg-SO ₂ /TJ)	89.3	54.4	265.5

たので、表1のCO₂排出量は、各ケースでの年間排出量に等しい。

ケースAとケースBは、モジュールは日本で製造するので、モジュールの製造によるCO₂排出量は等しく、発電所建設のためのCO₂排出とモジュールおよび建設資材の輸送によるCO₂排出が異なる。モジュールおよび建設資材の輸送によるCO₂排出は、全体の排出に比べて小さく、両者のCO₂排出量の相違は集中型発電所の建設に要する電気使用のCO₂排出に起因すると見てよい。

ケースAとケースCは、モジュールの製造が日本で行われるか、インドネシアで行われるかの相違を示す。インドネシアでモジュールを製造するケースCでは、モジュール製造段階でのCO₂排出量が、日本で製造するケースAの約1.3倍となる。これには、モジュール製造時の電力消費によるCO₂の排出が大きく影響している。著者らの計算では、既存の電源構成によるCO₂の排出を、日本では0.145kg-CO₂/MJ-electricity、インドネシアでは0.279kg-CO₂/MJ-electricityと仮定している。

表2の最下段に、発電所の耐用年数を30年と仮定して算出した発電電力量あたりのCO₂排出量を示す。CO₂排出量は、全てを日本で行うケースBが最小となるが、発電電力量あたりのCO₂排出量は、日本でモジュールを製造しインドネシアに集中型発電所を建設するケースAが最小となり、日本で全てを行うケースBが最大となる。これには、インドネシアの日射量が1.37倍であることによる発電電力量の相違が大きく影

響している。太陽光発電システムの導入では、その立地場所を検討することが重要である。

表3に、CO₂排出量と同様に算出したSO₂排出量を示す。SO₂排出量は、SO₂発生量のデータ^{6),7)}を基に、日本では工業部門のSO₂発生量の84%、発電部門では87.9%が除去され、インドネシアでは全てが排出されると仮定して算出されている。この仮定の下では、既存の電源構成によるSO₂の排出が、日本での1.71×10⁻⁴kg-SO₂/MJ-electricityに対し、インドネシアでは30.69×10⁻⁴kg-SO₂/MJ-electricityと、インドネシアのSO₂排出が大きく算出される。したがって、発電電力量基準に換算しても、日本で全てを行うケースBがSO₂排出量最小となる。インドネシアを始めとして、発展途上国の公害防止技術の普及に関するデータは入手することが困難である。SO₂の排出については、今後のデータの整備が望まれる。

4.2 CO₂回収年数

表4に、試算した太陽光発電システムが30年稼働することによる発電電力量を、既存の火力発電電力構成での発電で補うことを想定した場合のCO₂排出削減量を示す。日本でモジュールを製造し、インドネシアで発電する場合(ケースA)は、日本でのCO₂排出は3.0×10⁷kg増加するが、インドネシアで3.2×10⁸kg削減され、この差30年で除すと、年間1.06×10⁷kgのCO₂排出削減となる。日本でモジュールを製造し、日本で使用する場合(ケースB)では、発電電力量が少なく、かつ既存の電力でのCO₂排出が少ないので、年間0.34×10⁷kg-CO₂の排出削減になるにすぎない。

表4 太陽光発電の導入によるCO₂削減量

	ケースA	ケースB	ケースC
太陽光発電の導入の場合のCO ₂ 排出量			
30年での発電電力量(TJ)	1278.3	933.1	1278.3
CO ₂ 総排出量(×10 ⁴ kg)	4039.13	3721.30	4687.25
日本での排出	3006.81	3721.30	
インドネシアでの排出	1032.32		4687.25
太陽光発電による発電電力量を既存の発電で補う場合のCO ₂ 排出量			
発電電力量(TJ)	1278.3	933.1	1278.3
CO ₂ 排出量(×10 ⁴ kg)			
日本での排出		13885.6	
インドネシアでの排出	35986.1		35986.1
既存の発電と比較してのCO ₂ 削減量(×10 ⁴ kg)			
日本での排出削減量	-3006.8	10164.3	
インドネシアでの排出削減量	34953.8		31298.8
全体での排出削減量	31947.0	10164.3	31298.8
年間CO ₂ 削減量(×10 ⁴ kg/y)	1064.9	338.8	1043.3

既存の発電電力構成を基準とした太陽光発電システムの導入によるCO₂排出削減量は、その耐用年数に依存する。これを定式化すると、式(1)となる。

$$CO_2 \text{ 排出削減量} = (A \times N \times B - C) / N \quad (1)$$

ここで、

A = 太陽光発電の発電電力量(MJ/y)

N = 耐用年数(y)

B = 既存の発電でのCO₂排出量(kg-CO₂/MJ)

C = 太陽光発電システムのCO₂排出量(kg/CO₂)

ケースAとケースBについて、式(1)を図-1に示す。インドネシアで発電所を建設する方が、日本に建設するよりCO₂排出削減量が多い。またCO₂排出削減量は、耐用年数の増加と共に増加するが、20年以降の増加率は小さい。

図-1に見られるように、耐用年数があまりに短い

場合はCO₂排出が削減されない。この耐用年数は、式(2)で示され、集中型太陽光発電所1基を建設するために排出されるCO₂が、同じ発電量の既存の発電によるCO₂排出の何年分にあたるかを示す。これを、CO₂回収年数と呼ぶことにする。太陽光発電システムは、ここで示すCO₂回収年数以上の稼働によって初めてCO₂排出削減効果を持つことになる。

$$CO_2 \text{ 回収年数}(N) = C / (A \times B) \quad (2)$$

表5にそれぞれのケースでのCO₂回収年数を示す。日本でモジュールを製造し、インドネシアに集中型発電所を建設するケースAが最も短く3.4年、全てを日本で行うケースBが最も長く約8.0年となる。日本で製造したモジュールをインドネシアで使用することによりCO₂回収年数は半減されることになる。

表5 想定した各ケースのCO₂回収年数

ケース	A	B	C
回収年数(年)	3.37	8.04	3.91

4.3 インドネシアに日本の石炭火力を導入することによるCO₂排出削減量との比較

モジュールを日本で製造しインドネシアで発電する場合(ケースA)の年間発電電力量を、日本の石炭火力を導入することで補うことを想定する。

本研究では、日本の石炭火力発電の効率を37%として、直接燃焼によるCO₂排出を0.247kg-CO₂/MJ-electricityと仮定している。火力発電では、発電所建設のためのCO₂排出量が、燃料の燃焼による直接排出

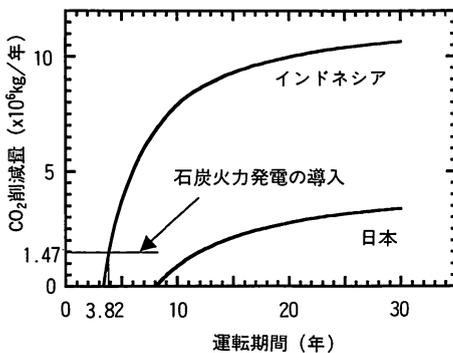


図-1 既存の発電電力構成を基準とした太陽光発電システムの導入によるCO₂排出削減量

に比べて極めて少ない⁸⁾。したがって、これを無視し、 $0.247\text{kg-CO}_2/\text{MJ}$ にケースAでのインドネシアでの年間発電電力量 42.6MJ を乗じ、既存の発電で 42.6MJ の発電電力量に相当する CO_2 を減ずれば、年間の CO_2 排出削減量が $1.47 \times 10^6 \text{kg-CO}_2$ と算出される。これを表6に示す。

表6 日本の石炭火力の導入による CO_2 削減量

年間発電電力量(TJ/y)	42.61
石炭火力の CO_2 排出原単位(kg- CO_2/MJ)	0.247
インドネシアでの CO_2 排出量($\times 10^4 \text{kg/y}$)	1052.47
既存の発電での CO_2 排出量($\times 10^4 \text{kg/y}$)	1199.53
既存の発電と比較しての年間削減量($\times 10^4 \text{kg/y}$)	147.1

図-1に示すように、この年間削減量は、ケースAの3.82年の耐用年数に相当する。ケースAで想定した集中型発電所が4年以上稼働すれば、日本の石炭火力発電所を導入するより CO_2 排出削減の効果があることになる。

しかし、ケースAでの年間発電電力量 42.6MJ は、石炭火力では約 1400kW の設備にしか相当しない。石炭火力の導入による年間の CO_2 排出削減量は、その導入規模に比例するので、インドネシアに大規模な石炭火力発電所を導入することで、ケースAの年間削減量を凌ぐことができる。ケースAで30年稼働する場合の年間 CO_2 排出削減量に相当するためには、 308MJ の年間発電電力量を有する石炭火力を導入することが必要であるが、これでも $10,000\text{kW}$ の設備にすぎず、百万kWクラスの日本の火力発電の規模に比べればかなり小規模となる。

一方、ここで想定した 10MW/y の太陽光発電モジュールの生産規模は、世界全体のモジュールの生産規模が約 60MW/y であることを考えるとかなり大規模である。しかし、この生産規模でも、年産約 $7 \times 10^4 \text{m}^2$ のモジュール面積にしかならず、集中型発電所としてその4倍の面積が必要であったとしても、約 $500\text{m} \times 500\text{m}$ の敷地が必要とされるにすぎない。また、その発電電力量 42.6TJ/y は、インドネシアの年間発電電力量の 0.03% にしか相当しない。

このように、火力発電は既存の確立した技術であり、大規模な導入が容易であるが、太陽光発電技術は未だ開発中であり、モジュールの生産規模も小さいことが、現状での CO_2 排出削減対策として、大規模な火力発電の導入を選択する因子となっている。

しかし、図-1に示すように、同規模の発電設備と

して比較すれば、 CO_2 排出削減技術として太陽光発電技術は石炭火力よりも優れている。したがって、今後、先進諸国での太陽光発電モジュールの生産規模の拡大と、発展途上国でのその導入を図ることが必要である。

また、一般に、発展途上国では、都市への人工の集中と農村部での過疎化が問題になることが多い。現状の太陽光発電モジュールの生産規模を考慮すると、短期的にはその導入規模には限界があり、集中型発電所を想定する場合には、地方都市程度の電力消費を想定した導入を目的として、その技術開発および生産規模の拡大を指向することが現実的であると考えられる。ここでは、集中型発電システムの CO_2 排出削減量を議論したが、過疎地域では、アモルファスシリコンモジュールによる屋根置き分散型発電が効果的であるとす

5. 結言

太陽光発電モジュールの製造と集中型発電所の立地を、日本とインドネシアで組み替えた3ケースについて、ライフサイクルインベントリーの手法に従って、 CO_2 排出量を試算した。その結果、次のことが明らかになった。

1) 日本でモジュールを製造し、インドネシアに集中型発電所を建設するケースの CO_2 回収年数は、日本で全てを行うケースの半分以下である。これには、インドネシアの日射量がわが国の約1.37倍であることが大きく影響しており、太陽光発電システムの導入には、その立地が重要である。

2) インドネシアでモジュールを製造するよりも、日本でモジュールを製造する方が、発電を始めとする日本の技術が高効率であるため、 CO_2 回収年数が少ない。

3) 化石燃料の高効率利用技術の移転は、大規模な導入が容易であるため、現状の低効率発電技術に代わる即効性のある CO_2 排出削減対策として有効である。しかし、同一の発電規模で比較すれば、太陽光発電の導入が CO_2 排出削減対策として優れている。

これらを総合すると、太陽光発電技術の導入は、日射エネルギーが豊富な低緯度地域で導入することが効果的であり、そのためにも、先進諸国での太陽光発電モジュールの効率向上と生産規模の拡大が必要であることが分かる。現状では、太陽光発電モジュールの生産規模が小さく、発展途上国の電力消費に対応できないことが問題であると言える。

CO₂排出削減対策としては、太陽光発電システムを構築するためのモジュールおよび基礎資材を、CO₂の排出が少ない国で生産することが重要である。今後、途上国においても基礎資材生産技術の効率化が進行すると思われるが、それにはCO₂排出の少ないエネルギーの供給技術が必要である。発展途上国への化石燃料の有効利用技術の移転は、現状の技術の効率向上のために重要であるが、化石燃料でのエネルギー供給技術を発展途上国の中核とすれば、経済発展とともにCO₂の排出が増大することを避けることはできない。途上国においては、先進諸国よりもなお自然エネルギーの供給利用技術を普及することが重要である。そのためにも、先進諸国は、自国内に既に存在する化石燃料の高効率利用技術を最大限活用すること、またさらなる化石燃料の高効率技術を開発することが必要と、著者らは考える。

引用文献

- 1) 稲葉敦, 近藤康彦, 小林光雄, 喜多弘之, 高橋伸英, 野田優, 松本真太郎, 森田英基, 小宮山宏; 太陽光発電システムのライフサイクルアセスメント, エネルギー・資源, 16巻, 5号(1995),
- 2) 西山孝; 発展途上国インドネシアの資源を考える, エネルギー・資源, 15巻, 4号(1994), 393-398
- 3) 太陽光発電技術の評価Ⅰ(1994), CO₂と地球環境問題研究会(代表:小宮山宏);
- 4) 稲葉敦, 島谷哲, 田畑総一, 河村真一, 渋谷尚, 岩瀬嘉男, 加藤和彦, 角本輝亮, 小島紀徳, 山田興一, 小宮山宏; 太陽光発電システムのエネルギー評価, 化学工学論文集, 19巻, 5号(1993), 809-817
- 5) 平成5年度太陽エネルギー国際共同開発可能性調査(インドネシア)調査報告書(1994), p.5, 財団法人エンジニアリング新興協会;
- 6) 科学技術庁科学技術政策研究所編; アジアのエネルギー利用と地球環境(1992)
- 7) 安藤淳平; 世界の排煙浄化技術(1990), 石炭技術研究所
- 8) 内山洋司, 山本博己; 発電プラントの温暖化影響分析, 電力中央研究所報告Y910005(1992), 電力中央研究所

他団体ニュース

第6回(平成7年度)

21世紀型省エネルギー機器・システム表彰応募要領

1. 応募対象機器・システム

既に製品化され、研究開発済で商品化見込みのある民生用の機器・資材及びシステム(エネルギーを使用するもの)のうち、省エネルギー性に優れているもの。

2. 審査、表彰の区分

(1)家庭部門

- ①冷暖房機器 ②給湯機器 ③家事・衛生機器
④調理機器 ⑤AV・情報機器 ⑥その他

(2)業務部門

業務用(民生用)の機器・システム及び上記家庭部門に含まれないもの

3. 応募

- ・個人, グループ及び法人(会社・団体等).
- 申請費用は無料

4. 問い合わせ先

〒104 東京都中央区八丁堀 3-19-9 ジョ八丁堀
(財)省エネルギーセンター

技術部 舟岡 TEL 03-5543-3020

調査部 原田 TEL 03-5543-3017