

ゴビ砂漠における大規模太陽光発電システムのライフサイクル評価

学生員 伊藤 雅一 (東京農工大学)
会 員 河本 桂一 (富士総合研究所)
会 員 吉見 哲夫 (資源総合システム)

会 員 加藤 和彦 (NEDO)
会 員 杉原 裕征 (関電工)
会 員 黒川 浩助 (東京農工大学)

A Preliminary Study on Potential for Very Large Scale PV System (VLS-PV) on the Gobi Desert from Economic and Environmental view points

Masakazu ITO*, Kazuhiko KATO**,
Keiichi KOMOTO***, Hiroyuki SUGIHARA****,
Tetsuo KICHIMI***** and Kosuke Kurokawa*

*Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan
E-mail: itomasa@cc.tuat.ac.jp

**New Energy and Industrial Technology Development
Organization (NEDO)

***Fuji research Institute Corporation (FRIC)

****Kandenko Inc.

*****Resources Total System Co., Ltd.

ABSTRACT

A 100MW very large scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system is designed assuming that it is installed on the Gobi desert in China. All the parts of the system are designed and evaluated from economic and environmental view points. Energy Payback Time (EPT), CO₂ emission rate and generation cost are estimated based on the methodology, Life-Cycle Assessment (LCA). As a result of the estimation, 1.8 year of EPT and 12g-C/kWh CO₂ emission rate are obtained. Assuming PV module price of 1USD/W, system lifetime of 30 years and interest rate of 3%, the generation cost is calculated as 6.3cent/kWh on the Gobi desert. These results suggest that the VLS-PV system is very promising for the global warming and energy issues.

キーワード：太陽光発電システム，ライフサイクルアセスメント，砂漠

Keywords: Photovoltaic power generation system, Life-cycle assessment, Desert

1. はじめに

近年、世界の経済成長、人口増加は顕著であり、それに伴いエネルギー需要も増加を続けている。Fig.1 に示す様に、特に発展途上国においては増加が激しい。世界のエネルギー需要が増加の一途をたどる場合、世界の一次エネルギーが枯渇する事は確実であり、さらに、温暖化、酸性雨等の環境問題も増加するであろう。これらの問題を解決する手段には、再生可能エネルギー

が挙げられるが、その中でも太陽光発電システムは特に有望である。それは、燃料が不要、メンテナンスの必要がない等の、従来の発電システムにはないメリットが存在するからである。また、太陽の光はエネルギー密度が低いため、大容量の発電を行うためには広面積に太陽光発電システムを設置する必要があるが、この問題の解決策が砂漠にあった。世界に広がる砂漠には高い日射量と広大な未利用地がある。例えば、日本における東京と中国における内モンゴルのゴビ砂漠の年間全天日射量を比較した場合、東京は 1,268kWh/m²/年であるが、ゴビ砂漠は東京よりも高緯度に位置するにも関わらず 1,701kWh/m²/年と日射量が非常に多い。さらに、赤道付近のサハラ砂漠を例に取れば、2,685kWh/m²/年という東京の約 2 倍の日射量が存在する。理論的には、システム効率 10%の太陽光発電システムをゴビ砂漠へ 50%の面積率で設置を行うと仮定した場合、約 367EJ の発電量が見込め、これは 1997 年の世界の 1 次エネルギーの消費量とほぼ等しい。

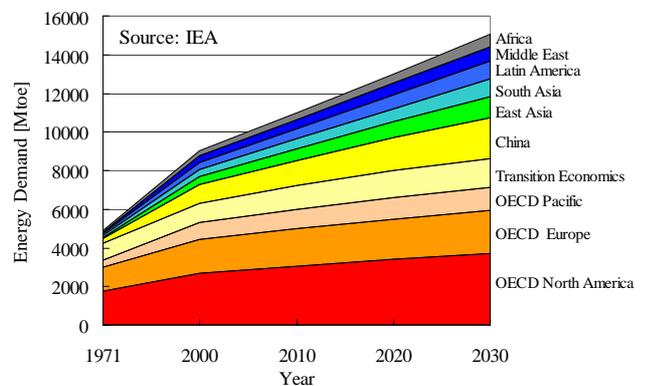


Fig.1 World Energy Demand by Region (1971-2030)^[2]

本研究は、この様に日射量の非常に高い砂漠へ大規模に太陽光発電システムを設置し、電力基幹系統へ送電する事を想定し、実際に実証試験を行う前段階としてのシステムの設計を行い、経済的な視点、環境的な視点からの評価を行うことを目的とする。また、安価に太陽光発電システムが設置できるのか、砂漠の自然条件に設備が長期間耐えられるのか、また広い面積に設置した発電設備が気象や地域社会に悪影響を及ぼさないかなどの諸問題を解明し、世界のエネルギーと環境問題を早期に貢献できる可能性を明らかにし、さらに太陽光発電の大規模実用化を促進する為の開発シナリオを提案する。

2. 評価手法の概念

大規模太陽光発電システムの是非を明確に評価を行うためには、ライフサイクルアセスメント手法 (Life-Cycle Assessment (LCA)) が最も適している。この手法は、原料の採掘から利用・消費、そして廃棄・リサイクルまでを対象とした手法であり、システム全体のコストや投入エネルギー、排出物を定量的に評価ができる。本研究では、経済的な視点から発電コスト、環境的な視点から、エネルギーペイバックタイム (EPT) と CO₂ 排出原単位の 3 つの指標を算出し、評価を行う。その導出式を以下に示す。

$$\text{発電コスト (cent/kWh)} = \frac{\text{システム年間必要額 [cent/year]}}{\text{年間発電電力量 [kWh/year]}} \text{----- (1)}$$

$$\text{EPT (Year)} = \frac{\text{ライフサイクルにおける全エネルギー投入量 [kWh]}}{\text{年間発電電力量 [kWh/year]}} \text{----- (2)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排出原単位 (g - C/kWh)} = \frac{\text{ライフサイクルにおける全CO}_2 \text{ 排出原単位 (g - C)}}{\text{年間発電電力量 [kWh/year] \times \text{耐用年数 [year]}} \text{----- (3)}$$

エネルギーペイバックタイムは、太陽光発電システムのライフサイクルにおける全投入エネルギー量を、年間発電電力量で割った指標である。つまり、太陽光発電システムを構築し、廃棄されるまでのエネルギーを何年間の発電によって等しいエネルギー量となるかを示している。また、CO₂ 排出原単位は、単位発電電力量当たりの炭素の排出量であり、太陽光発電システムがどの程度地球温暖化に影響を与えるかを評価する指標である。

3. システムの設定

本研究では 100MW 大規模太陽光発電システムを LCA の概念に基づいて評価を行うため、システムの架台から運営・保守まで全てに渡り設計を行った。以下にシステムの設定条件を示す。

3.1 想定設置地域

大規模太陽光発電システムを設置すると想定した場所として、中国ゴビ砂漠を選択した。それは、次のような理由からである。

日射量が非常に多い。

緯度が高く平均気温が低いため、太陽光発電に適している。

労務単価が低い。

日本から近いため、輸送コストが低い。

情報が豊富である。

以上の理由から本地を選択した。地理情報は日本気象協会より、中国ゴビ砂漠に位置する内蒙古自治区呼和浩特市のデータ^[3]を用いた。また、斜面日射量直達成分の推定には rb モデル、斜面日射量天空散乱成分の推定には Hay モデル、斜面日射量地面反射成分の推定には均一反射モデルを用いた。^[4]Table 1 に主な情報を示す。

Table 1 Geographic information for Huh-hot

Location		40°49'N, 89°12'E
Ambient temperature		5.8°C
In-plane irradiation	Tilt angle=10o	1,854 kWh/m ² /yr.
	Tilt angle=20o	1,964 kWh/m ² /yr.
	Tilt angle=30o	2,026 kWh/m ² /yr.
	Tilt angle=40o	2,037 kWh/m ² /yr.

3.2 システム

- (1)モジュールの配置は Fig.2 に示すように、モジュール 21 枚を 1 スtring とし、5 String 縦に並べて単位アレイとする。単位アレイを横に 5 つ、縦に 8 つ並べることで 500kW を実現する。また、500kW ユニットが 50 セットで 25MW ユニットとし、それを 4 セット構成することで 100MW の大規模太陽光発電システムとする。500kW 毎にインバータキュービクルを設置、25MW 毎に 6.6kV GIS、110kV/6.6kV 変圧器、110kV GIS を設置する。この時、太陽電池モジュールには変換効率 12.8% である京セラ製 KC120S(120W) を想定し、840,000 枚のモジュールを必要とする。また、システム寿命は 30 年と設定した。
- (2)システム出力係数は、温度、汚れ、劣化、アレイ回路補正係数、アレイ負荷整合補正係数、インバータ補正係数を考慮して分析を行い、78% とした。
- (3)アレイには平板固定架台を用い、南向きに設置を行う。また、設置を行う土地の不陸製正も考慮した。
- (4)モジュール価格、インバータ価格をパラメータとし、モジュールは 1、2、3、4USD/W とし、その場合に 500kW 毎に設置されるインバータ価格はそれぞれ 0.15、0.17、0.20、0.22MUSD と想定した。
- (5)金利は 3% のソフトローンを想定し、為替レートは 120 円/USD とした。

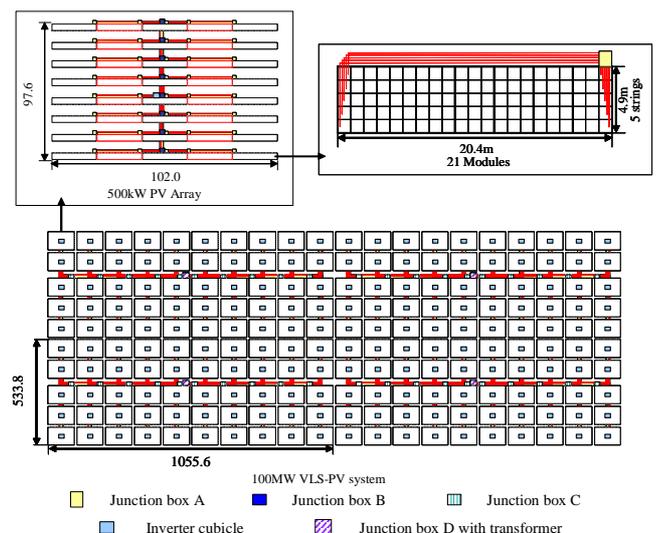


Fig.2 Array Layout of 100MW VLS-PV system

3.3 輸送

Fig.3 に示すように、モジュール、インバータ、ケーブル、その他共通機器は日本から海上輸送にて中国へ輸送し、アレイ架台、基礎、送電鉄塔、トラフは中

国で生産を行い、合わせて陸上輸送にて現地へ運び、建設を行い、運営・保守へと移る。



Fig. 3 Transport flow of Gobi desert case

3.4 運営・保守

100MW 当たり 9 人の整備士を配備し、3 シフト制で運営・保守を行う。また、修理を行う際のコストを修繕保守材料費率とし、0.084%と設定した。これは PV-USA プロジェクト^[5]における実際のコストから参照した。建設、運営・保守にかかる人件費は ILO 統計年鑑^[6]より引用を行ない算出した。

4. システムの概念設計

上述の設定条件を用い、大規模太陽光発電システムの設計を行った。

4.1 モジュールレイアウト

モジュールのレイアウトの違いによるコストと投入エネルギーの違いを調べるため、3 種類のレイアウト (Wide model、Moderate model、Tall model) を作成した。結果、Wide model が優れていることが証明されている。^[1]

4.2 架台・基礎の設計

Fig.4 に基本架台の概要を示す。架台は日本建築学会鋼構造設計基準に準じ、亜鉛メッキ鋼(SS400)を用い、風速 42m/s に耐えるよう設計された。また、北側に設置されたモジュールに影がかからないよう、適切な間隔をおく。

基礎は電気学会 電気規格調査会標準規格の送電用支持物設計標準に準拠し、強度 240kg/cm² コンクリートとなるよう設計し、同様に風速 42m/s に耐えうる直方体を設計した。

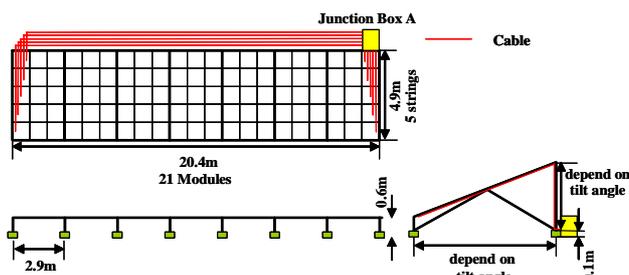


Fig.4 Basic structure of array support

4.3 ケーブル

ケーブルは配線ミスが起きないようにシンプルかつ最小経路を通るように配線した。また、ケーブルの線種は電圧降下が 4%以内(日本工業規格)となるように選択した。

4.4 送電

大規模太陽光発電システムは既存の電力系統へ接続することを想定している。送電設備は 100km、2 回線、110kV 送電、標準経間は 300m とし、送電塔は架台同様 42m/s の風速に耐えるよう設計を行った。

5. 設計結果の分析・評価

上記設計を総合し、ゴビ砂漠における 100MW 大規模太陽光発電システムのライフサイクルを経済面、環境面から分析・評価を行う。

5.1 システム設計結果

上記設計の結果、100MW のシステム当たり、架台傾斜角 10°時に 1.3km²、20°時には 2.6km² の土地を必要とする。これは、傾斜角の上昇と共に影が大きくなるため、間隔を大きくとる必要性からである。架台に必要な亜鉛メッキ鋼は 8,200 トンから 10,800 トン必要とし、基礎は 91,000 トンから 193,000 トン必要となる。傾斜角の上昇と共に強くなる風圧力に耐えるため、傾斜角が高くなるにつれて量を多く必要とする。また、送電鉄塔は一基当たり 22.0 トン、送電用基礎は 22.1m³ である。また、Fig.5 はゴビ砂漠における分析結果の一例である。

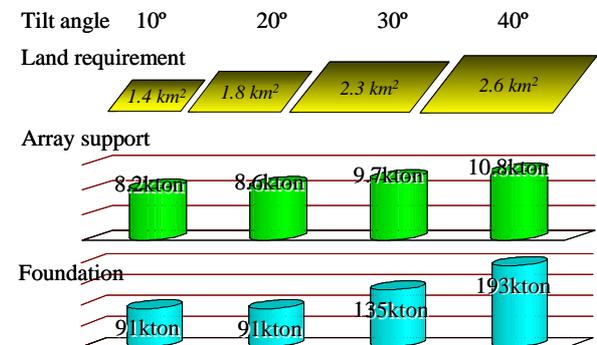


Fig.5 Example of system requirement

5.2 経済評価

100MW 大規模太陽光発電システムの初期投資コスト、年間経費を Fig.6、Fig.7 に示す。モジュール価格 1USD/W 時には初期投資コストは約 180MUSD となり、そのうちモジュールは 6 割、BOS は 3 割を占める。また、年経費に関しても同様に、モジュール価格 1USD/W 時には年経費は約 9MUSD となり、モジュールが 6 割、BOS (架台、基礎、トラフ、ケーブル、インバータ、変圧器等) は 3 割を占める。

各傾斜角における発電コストを Fig.8 に示す。モジュール価格 1USD/W 時には傾斜角 30°時に最適角となり、6.3cent/kWh となる。また、モジュール価格 2USD/W 時においても 10.1cent/kWh となり、経済性が高いことが分かる。

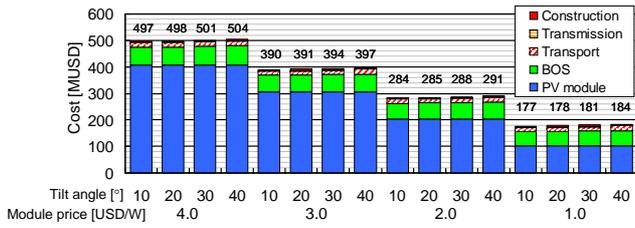


Fig.6 Initial cost for 100MW VLS-PV system

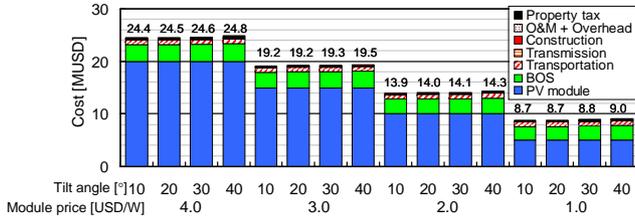


Fig.7 Annual cost for 100MW VLS-PV system

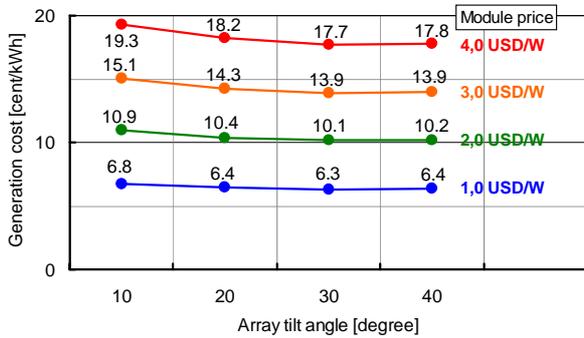


Fig.8 Generation cost for 30years operation

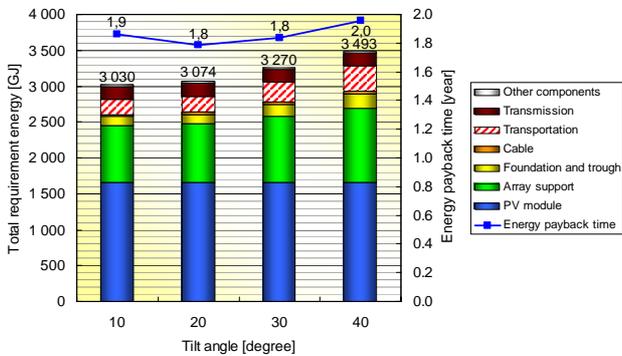


Fig.9 Total primary energy requirement and EPT of 100MW VLS-PV system

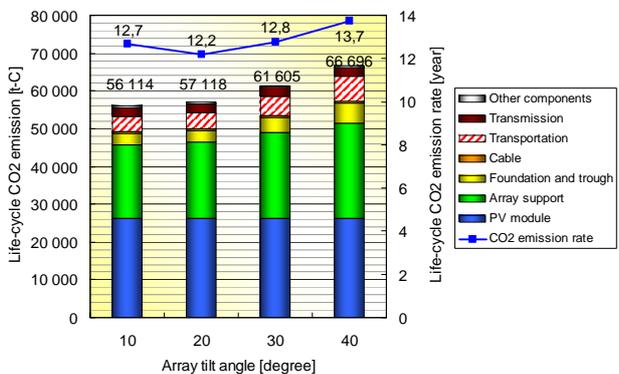


Fig.10 Life-cycle CO₂ emission and life-cycle CO₂ emission rate of a 100MW PV system

5.3 環境影響評価

ゴビ砂漠における 100MW 大規模太陽光発電システムのエネルギーペイバックタイムと CO₂ 排出原単位の評価結果を Fig.9、Fig.10 に示す。Fig.9 から傾斜角 20° の時に最適傾斜角となり、そのときエネルギーペイバックタイムは 1.8 年となる。つまり、100MW 大規模太陽光発電システムは 2 年未満の運転により、製造や輸送に必要とした全投入エネルギーを回収可能となる。

Fig.10 から CO₂ 排出原単位についても傾斜角 20° の時に最適となり、12.2g-C/kWh となる。既存の火力発電システムと比較した場合、CO₂ 排出原単位はその 10 分の 1 よりも小さい値となり、大規模太陽光発電システムによる環境負荷が非常に低い事がわかる。また、経済性の評価の際には傾斜角による変化は小さいが、環境影響評価の際には架台、基礎、輸送が多くを占め、傾斜角による変化が大きいことが分かる。

6. まとめ

中国ゴビ砂漠への設置を想定した 100MW 大規模太陽光発電システムを、現実に基づいた詳細設計を行った。また、その設計結果から経済的な面、環境的な面について、LCA 手法を用いて評価した。エネルギーペイバックタイム、CO₂ 排出原単位の評価結果からは、既存の発電システムと比べ、非常に環境に優しく、地球温暖化、エネルギー問題の解決に大きく貢献することが明らかとなった。また、経済的な視点からも太陽電池モジュールの価格が 2.0USD/W 以下となった場合には既存の電力とも競争できる。さらに、発展途上国への大規模太陽光発電システムの設置には多くの雇用の創出が見込め、また、使用する機材を現地において生産することから商工業の発展等、国の経済発展も期待できる。以上から、大規模太陽光発電システムが地球環境問題の解決に非常に有望であると結論づける。

参考文献

- [1]M. Ito et al : "A PRELIMINARY STUDY ON POTENTIAL FOR VERY LARGE-SCALE PV (VLS-PV) SYSTEM ON THE WORLD DESERTS", 17th EU-PVSEC
- [2]IEA : World Energy Outlook 2003
- [3]日本気象協会 : 太陽光発電システムの研究開発利用システムに関する調査研究、平成 3 年度 NEDO 成果報告書
- [4] 日本気象協会 : 太陽光発電システム実用化技術開発周辺技術の研究開発、昭和 61 年度 NEDO 成果報告書
- [5] C.Jennings, A.B.Reyes & K.P.O', Brien : PVUSA utility-scale system capital and maintenance costs, WCPEC-1, Dec, 5-9, 1994, Hawaii.
- [6]ILO : Year Book of Labour Statistics 1999