

# 世界の砂漠における 100MW 大規模太陽光発電システム (VLS-PV) の ライフサイクル評価

An Economic Analysis of Very Large Scale PV system on the World Deserts

伊藤 雅一<sup>\*1</sup> 加藤 和彦<sup>\*2</sup> 河本 桂一<sup>\*3</sup> 杉原 裕征<sup>\*4</sup> 吉見 哲夫<sup>\*5</sup> 黒川 浩助<sup>\*1</sup>

Masakazu Ito, Kazuhiko Kato, Keiichi Komoto, Hiroyuki Sugihara, Tetsuo Kichimi, Kosuke Kurokawa

## 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。図 1 に示すように、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る。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/m<sup>2</sup>/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/m<sup>2</sup>/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/m<sup>2</sup>/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。

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

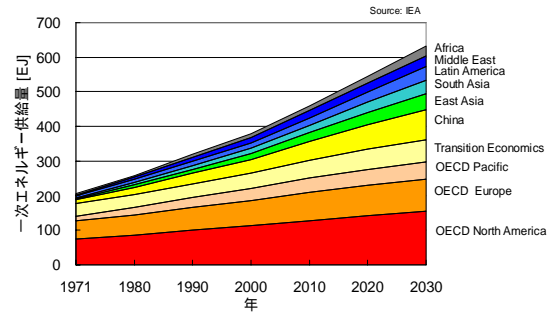


図 1 世界のエネルギー供給量

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 (VLS-PV) 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を算出し、評価を行う。

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

## 3. システムの設定

本研究では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図 2 に示す地点を選択した。サハラ砂漠、ネゲブ砂漠、タール砂漠、ソノラ砂漠、グレートサンディ砂漠、そしてゴビ砂漠である。地理情報は日本気象協会より、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

<sup>\*1</sup> 東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology

<sup>\*2</sup> 新エネルギー・産業技術総合開発機構 New Energy and Industrial Technology Development Organization

<sup>\*3</sup> 富士総合研究所 Fuji research Institute Corporation Inc..

<sup>\*4</sup> 関電工 Kandenko Inc.

<sup>\*5</sup> 資源総合システム Resources Total System Co., Ltd.

地面反射成分の推定には均一反射モデルを用いた。<sup>[3]</sup>

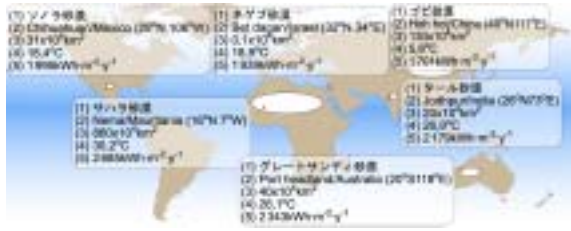


図2 本研究で用いた砂漠  
(1)砂漠名 (2)参照地 (3)広さ  
(4)年間平均気温 (5)年積算水平面日射量)

### 3.2 システム

本研究では100MW VLS-PVを10集めた1GW VLS-PVを目標とする。本論文では100MWシステムの評価を行う。また、それぞれで発電された電力は110kVまで昇圧され、送電される。送電距離は100kmとした。そのイメージを図3に示す

(1)モジュールの配置は図4に示すように、モジュール21枚を1ストリングとし、5ストリング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VLS-PV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。この場合、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)を用い、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。

それぞれの機器の価格を表1に示す。

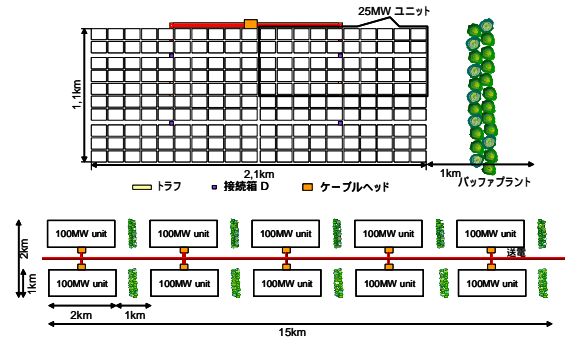


図3 1GW VLS-PV システムコンセプト

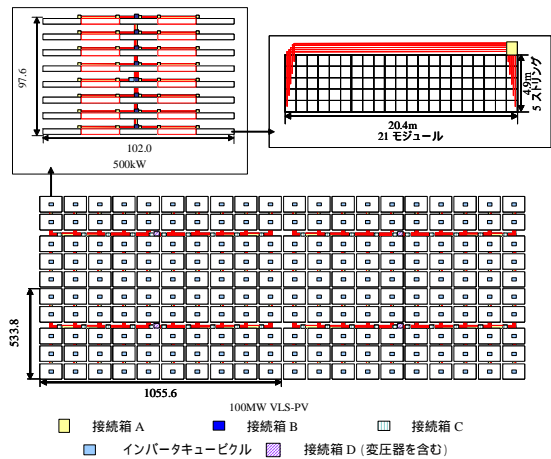


図4 100MW VLS-PV アレイレイアウト

表1 共通機器価格

項目	価格	項目	価格
ケーブル [USD/m]		600V CV 60sq	2.43
600V CV 2.0sq	0.25	600V CV 8.0sq 二芯	1.13
600V CV 100sq	3.98	6600V CV 200sq	10.0
6600V CVT 22sq	8.25	TACSR 410sq	5.58
110kV CV 150sq	79.2		
AC 70sq	1.75		
インバータ[USD/W]			
モジュール価格	0.41	3 USD/W	0.36
4USD/W			
2 USD/W	0.32	1 USD/W	0.27
共通機器 [MUSD/unit]			
6.6 kV capacitor	0.034	6.6 kV GIS	0.26
110kV/6.6kV 変圧器	0.62	110 KV GIS	0.57
2.4 MVA capacitor	0.34	所内電源装置	0.27

### 3.3 輸送

モジュール、インバータ、ケーブル、その他共通機器は近隣の先進国から海上輸送にて現地へ輸送する。具体的にはサハラ砂漠とネゲブ砂漠へはヨーロッパから、ソノラ砂漠へはアメリカから、グレートサンディ砂漠へはオーストラリア本国にて生産、タール砂漠、ゴビ砂漠へは日本から輸送を行う。海上輸送コストには1000kmと設定し、保険を含めたCIF価格とした。アレイ架台、基礎、送電鉄塔、トラフは現地にて生産を行い、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。今回、陸上輸送のコストは省略した。

### 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<sup>[4]</sup>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<sup>[5]</sup>より引用を行ない算出した。その値を表 2 に示す。

表 2 各砂漠における労働人件費

サハラ：	1102	ネゲブ：	15227
タール：	403	ソノラ：	2187
グレートサンディ：	30747	ゴビ：	545

単位：USD/人年

### 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は横に 21 毎並べて 1 スtringとし、5 列並べるシンプルな構造とした。

#### 4.2 架台・基礎の設計

図 5 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/cm<sup>2</sup> コンクリートとなるよう設計し、同様に風速 42m/s に耐える直方体を設計した。

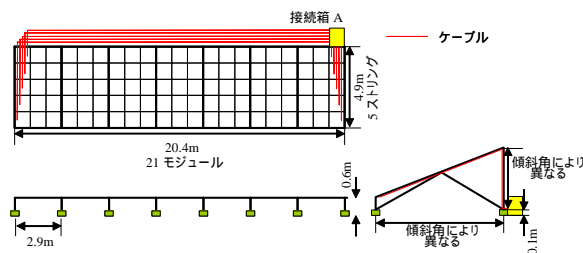


図 5 アレイ構造 (傾斜角 30°時)

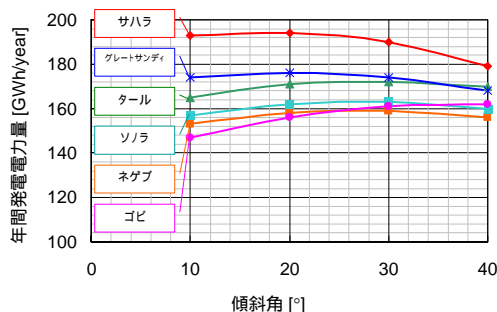


図 6 各砂漠における年間発電電力量

### 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のコスト分析・評価を行う。

#### 5.1 年間発電電力量

各砂漠における年間発電電力量を図 6 に示す。サハラ砂漠は赤道付近に位置することから一番高い結果となっている。ついでグレートサンディ砂漠となる。この 2 箇所の砂漠は傾斜角が 20° 時に最適傾斜角となり、ゴビ砂漠においては傾斜角 40°、タール砂漠、ソノラ砂漠、ネゲブ砂漠は傾斜角 30° 時に最適となる。

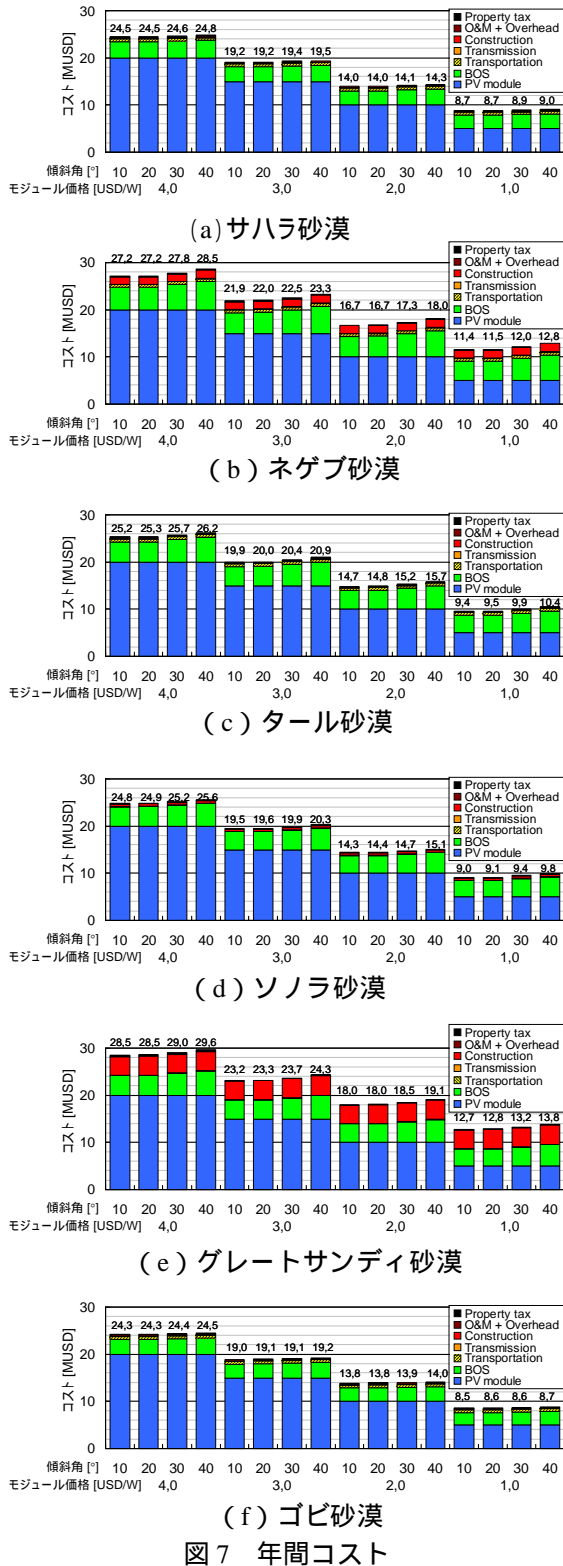
#### 5.2 システム設計結果

システムの設計結果を表 3 に示す。100MW のシステム当たり、ゴビ砂漠の場合には架台傾斜角 10° 時に 1.4km<sup>2</sup>、40° 時には 2.5km<sup>2</sup> 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 22.1m<sup>3</sup> である。

表 3 システム設計結果

傾斜角	10°	20°	30°	40°
土地面積[km <sup>2</sup> ]				
サハラ	1.3	1.3	1.5	1.6
ネゲブ	1.3	1.6	1.9	2.1
タール	1.3	1.5	1.7	1.9
ソノラ	1.3	1.5	1.8	2.0
グレートサンディ	1.3	1.4	1.6	1.7
ゴビ	1.4	1.8	2.2	2.5
架台[10 <sup>3</sup> ton]	8.3	8.6	9.7	10.8
基礎[10 <sup>3</sup> ton]	91	91	136	193
ケーブル[10 <sup>3</sup> km]	1.4	1.6	1.6	1.7

注) 架台、基礎、ケーブルは各砂漠共通である

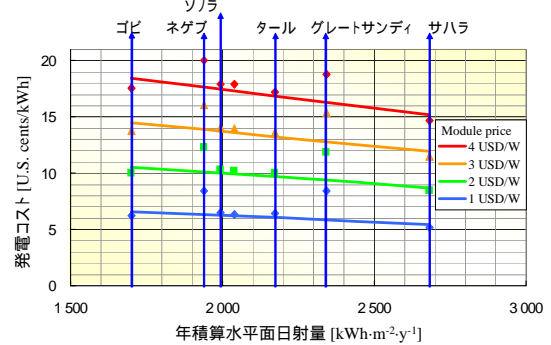


## 5.2 経済評価

100MW 大規模太陽光発電システムの30年利用時の年間コストを図7に示す。モジュール価格1USD/W時には年経費は年経費は約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。ネゲブ砂漠、グレートサンディ砂

漠においてコストが高くなっているが、これは人件費が高いために建設コストが高くなったためである。また、最適傾斜角は20°、ゴビ砂漠のみ緯度が高いため30°となっている。ソノラ砂漠、グレートサンディ砂漠は、海上輸送を必要としない。

年積算水平面日射量に対する最適傾斜角における発電コストを図8に示す。モジュール価格1USD/W時には5-7cent/kWhとなり、モジュール価格2USD/W時においても8-11cent/kWhとなり、経済性が高いことが分かる。



## 6. まとめ

砂漠地域への設置を想定した100MW大規模太陽光発電システム(VLS-PV)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LCA手法を用いてコストの評価を行った。結果、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どの砂漠においても発電コストは低い値をとり、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、使用する架台、基礎等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経済的な面からでも有望であると結論づける。

## 参考文献

- [1]IEA : World Energy Outlook 2003
- [2]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
- [3]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
- [4] C.Jennings, A.B.Reyes & K.P.O', Brien : PVUSA utility-scale system capital and maintenance costs, WCPEC-1, Dec, 5-9, 1994, Hawaii.
- [5]ILO : Year Book of Labour Statistics 1999