

宇宙太陽光発電システムの概要 (第2報)

齊藤 孝¹・中村 修治²・佐々木 謙治²・三原 莊一郎²

1 第一工業大学 (〒899-4332 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

E-mail: t-saito @daiichi-koudai. ac. jp

2 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 (〒105-0011 東京都港区芝公園三丁目 5 番 8 号)

Brief Overview of Space Solar Power Systems(2)

Takashi Saito, Shuji Nakamura, Kenji Sasaki, Sho-ichiro Mihara

Abstract: Space Solar Power System (SSPS) is thought as an ultimate application for that purpose in space. On the other hand, concept of very large scale photovoltaic power generation systems (VLS-PV) are advocated and studied by International Energy Agency (IEA). In this paper typical concepts of SSPS and VLS-PV are introduced and their estimated cost of power generation are compared.

Key Words: space solar power, SSPS, SPS, SSP

1. はじめに

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 (旧称: 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構、USEF) では経済産業省等からの委託を受けて宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power System、SSPS) に関連する調査研究を行ってきた。ここでは、文献[1]の中から、経済面の検討をとりあげて紹介する。

2. 経済性評価指標としての発電コスト

電源別のモデルプラントの発電コスト (発電単価) の定義は次のようである。[2]

$$\text{発電コスト} = \frac{\text{資本費} + \text{運転維持費} + \text{燃料費}}{\text{発電電力量}}$$

(円/kWh) ここに、

- 資本費: 建設費、固定資産税、水利使用料、設備の廃棄費用の合計
- 運転維持費: 人件費、修繕費、諸費、業務分担費の合計
- 燃料費: 単位数量当たりの燃料価格に必要燃

料量に乗じた値 (原子力は核燃料サイクル費用として別途算出)

これらは「狭義の発電コスト」即ち電気事業者の費用負担分に相当するものを示しているが、それ以外のものに関しては定義は必ずしも明確ではない。例えば、CO₂対策コストについて加算されることもある。

「広義の発電コスト」(外部コスト・系統対策コスト等) については、社会的費用として別途評価されることが多い。また研究開発費用も含まれない。

政府によって開かれたエネルギー・環境会議のコスト等検証委員会 (2011年12月) および発電コスト検証ワーキンググループ (2015年2~4月) では、発電コストの試算結果を報告している。ここでは、2014年時点の値と2030年での予測が並列して示されている [2]。(表 1)

3. 大規模太陽光発電の経済性

再生可能エネルギー活用の大きな柱として太陽光発電(太陽電池)の利用が推奨されているが、これを大規模に利用する案として地上の大規模太陽光発電システム(VLS-PV: Very Large Scale Photovoltaic)と宇宙太陽発電システム(SSPS)が考えられている。ここでは、それぞれのシステム案の例を紹介し、それらの発電コストの比較を試みた結果を紹介する。(ただし、既存のモデルプラントと比べれば、前項で述べたような費用構成要素はずっと簡略化されている。)

3.1 宇宙太陽発電システム(SSPS)の経済性評価

(1) 評価対象モデル

評価対象は、文献[1]で検討されたマルチバス型SSPSである。(図1)

なお、地上システム(レクテナ)の概要は以下のようである。

- マイクロ波周波数 =5.8 GHz
- レクテナ直径 =3.5 km
- 電力収集効率=90%以上(電力密度 T^{-2} なし)
- レクテナでの最終出力(DC)=1GW(出力一定型)

SSPSの建設シナリオとしては、1基のテザーSSPSユニット(約45トン)を単位として、折り畳んだ貨物を再使用型輸送機(RLV)を用いて高度約500kmの低高度軌道へ輸送し、そこで軌道間輸送機(OTV)に積み替えて静止衛星軌道まで輸送する。静止軌道上ではランデブードッキングにより、625ユニットから成るSSPSが構築される。(図2)

(2) 評価手法

SSPSの発電コスト評価については、JAXAの評価ツールをベースに、USEF、JAXAそれぞれのSSPS案について評価を行った。評価の流れは概略、図3のとおりである[3]。コスト要素の各単価を設定し、その積み上げから発電コストを推算する。単価設定については現状からの将来予測は難しく、多分に期待値的な要素が入り込む。図4は、米国

のFresh Look Study(1995-1997)で用いられた値であるが、発電コストの目標値(5cent/kWh)を実現するための各構成要素の目標値の積み上げとなっている。[4]

(3) 評価に使用した設定値

USEFでは平成14年度の調査においてもSSPSの経済性評価を実施している[5]。平成19年度では、表2中にあるように、②共通ケース(単価設定はJAXAと共通)、あるいは③目標ケース(更なるコスト低減を目指した場合:平成14年度並み)を考えた。

(4) 評価結果

この結果、②共通ケースでは主として打上げコストの関係から、建設費ひいては発電コストが高めになるが、③目標ケースでは火力発電コスト(10円/kWh)と同等以下の約9円/kWhとなった。

(表3)

3.2 大規模太陽光発電システム(VLS-PV)の経済性評価

(1) 評価対象モデル

国際エネルギー機関(IEA)のTask8では、砂漠などを利用した大面積・高出力の太陽光発電大規模利用案が検討されている[6]。ここでの検討は比較的近い将来の実現を想定しているため、技術およびコストレベルは現状の値に近いものを使用している。ケーススタディは世界の6地域の砂漠(Sonoran, Negev, Gobi, Sahara, Thar, Great Sandy)について行われたが、ここでは日本にも近いゴビ砂漠の例をとりあげる。

図5に示す十組の平面固定型100MWシステムで構成される1GWのVLS-PVシステムが、それぞれの砂漠に導入されるものと仮定している。

(2) 評価手法

基本的に単価設定と数量による積み上げ方式である。

(3) 評価に使用した設定値

砂漠などで利用される VLS-PV については、SSPS より実現が早いであろうことから、表 4 に示すような値を用いた。

(4) 評価結果

ゴビ砂漠のケーススタディでは、初期の 100MW システムについての経済性評価が行われている。100MW システムの経済性評価の前提条件および評価結果を表 4 に示す。SSPS とは前提条件・技術段階が異なるため直接の比較は困難であるが、ひとつの参考と理解されたい。

VLS-PV が 1GW システムにまで成長したとき（普及期）の発電コストは、開発スタート時の太陽電池価格と砂漠の日射量に依存するとしている。ゴビ砂漠（年間日射量 1700kWh/m²/year）で 100MW（実証期、太陽電池価格 2USD/W）からスタートした場合、1GW 級システムに成長した場合の発電コストは 5.4cent/kWh=6.48 円/kWh と見込まれている。

（表 5）

4. ベースロード電源としての考察

現状では輸送（打上げ）コストが高くつくため経済面（発電コスト）では VLS-PV は SSPS を凌駕しているように思われる。ただし宇宙空間に比べて地上では、夜間はもちろん昼間でも安定した発電が必ずしも期待できないため、24 時間安定した電力供給を行うには蓄電設備の建設が必須となる。現在では余剰電力を揚水ダムなど利用しての蓄電が行われているが、ダム建設には立地の制約を受ける。現在、種々の蓄電システムが考えられているが、将来的には 15,000 円/kWh（寿命 20 年）が目標とされている [7]。

仮に 1 か所の VLS-PV で、24 時間にわたって消費地に 1GW の電力を供給する (24GWh/day) ことを考えると、日照（6～18 時まで）の無い時間を補うために 13.2GWh の電力を蓄える必要があり、そのためにはピークの発電能力は 3GW 強のシステムが必要となる。このとき蓄電のための設備投資に

より、発電コストには約 2 円/kWh のコストが加算される。

この値には、充放電の損失や設備のメンテナンス費は含まれていない。特に重要なのは、実際の発電パターンは理想的なサインカーブなどではなく、雲などの天候や季節により不安定な出力であることが多い。となると蓄電設備の規模も上記仮定より大きなものが必要となり、発電コストの増分も 2 円/kWh では済まなくなる可能性が高い。

文献 [6] によれば、（砂漠に限定しない）地上太陽光発電のロードマップでは 2030 年頃に 7 円/kWh の発電コストを目指している。これに SSPS 同様、ベースロード電源としての役割を付与しようとすると 2 円/kWh 以上の蓄電コストが加算される。その結果、SSPS と同等以上の発電コストとなる可能性も考えられる。

5. まとめ

- 1) マルチバス型 SSPS の発電コストを推算した結果、約 9 円/kWh を得た。
- 2) 同規模の VLS-PV の発電コストは、蓄電コストまで含めると SSPS と同等ないしはそれ以上となる可能性がある。

ただし、1) が成り立つための条件として、

- 太陽電池コスト：30～50 円/W
- 打上げコスト：10,000 円/kg-payload 程度を目標に据える必要がある [1]。（図 6）

なお実際のエネルギー供給方法は、単一の手段に頼るのではなく、他の電源とのかねあいの中で最適な組合せ（ベストミックス）が求められるべきであることは論をまたない。

6. あとがき

異なる電源システムの発電コストを比較する場合、そこには公平性が求められるが、既存のもの、将来出現するであろうものとの比較では、完全な公平性は期待できない。しかし設定目標が達成可能であると感じられる時代が到来すれば、結果としての発電コストもまた信頼に値するも

のとなろう。

グリッドパリティという概念が最近注目されている。一般に、既存の発電所で電力をつくるまでのコスト（発電コスト）の他に、送電コスト、企業体運営に関わる諸経費、利益などが加わって商用電力としての売電価格になる。ある電源が、これと同等あるいはそれ以下の価格を達成した状態をグリッドパリティという。住宅用太陽光発電はすでにグリッドパリティを達しつつあると言われている。[8]

VLS-PV は、そう遠くない将来に、また SSPS は安価な打上げ手段が実現されたあかつきには、グリッドパリティを達成することが期待される。

謝 辞

本研究報告は、齊藤が所属していた財団法人無人宇宙システム研究開発機構（USEF、現 J-spacesystems）が経済産業省からの委託を受けて実施した調査結果に基づいています。共著者を含めた関係者の皆様にもひとかたならぬお世話になりました。また、当時、共同作業を実施した宇宙航空研究開発機構（JAXA）の皆様にお礼申し上げます。

参考文献：

- [1] 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構：「平成 19 年度 太陽光発電利用促進技術調査」（平成 20 年 3 月）
- [2] 資源エネルギー庁：「長期エネルギー需給見通し関連資料」（平成 27 年 7 月）
- [3] 齊藤・長山：「JAXA SSPS コストモデルに関する検討」（2006 年 9 月）
- [4] 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構：「平成 12 年度 宇宙太陽発電システムに関する調査研究」（平成 13 年 3 月）
- [5] 財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構：「平成 14 年度 宇宙太陽発電システム（SSPS）実用化技術調査研究」（平成 15 年 3 月）
- [6] 国際エネルギー機関（IEA） Task8: 「Energy

from the Desert」（2003 年 5 月）

[7] 経済産業省：「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」（平成 20 年 3 月 5 日）

[8] 電力計画.com：「各電源の発電コスト比較と一覧」

<http://standard-project.net/energy/statistics/cost.html>

表 1 各電源の発電コスト比較（円/kWh）

電源	2014年 モデルプラント	2030年 モデルプラント	電源	2014年 モデルプラント	2030年 モデルプラント
原子力	10.1～	10.3～	地熱	16.9	16.8
石炭火力	12.3	12.9	産業用太陽光	24.2	12.7～15.6
LNG火力	13.7	13.4	住宅用太陽光	29.4	12.5～16.4
石油火力	30.6～43.4	28.9～41.7	一般水力	11.0	11.0
陸上風力	21.6	13.6～21.5	小水力	23.3～27.1	23.3～27.1
洋上風力	—	30.3～34.7	バイオマス(専焼)	29.7	29.7
			バイオマス(混焼)	12.6	13.2

表 2 経済性評価に使用した設定値（2030年頃を想定）

項目	平成14年度検討 ①	平成19年度検討		単位
		②共通ケース	③目標ケース	
(1) 宇宙機システム				
太陽電池	30	50	30	円/W
DC-RF 変換素子	180	300	180	円/W
パネル構造等	5,000	35,000	5,000	円/kg
バッテリー	—	(30)	10	円/Wh
バス制御部	2	(2)	2	億円/ton
バス・ダミー重量	0.005	(0.005)	0.005	億円/ton
テザーシステム	0.05	(0.05)	0.05	億円/本
(2) 地上システム				
RF-DC 変換素子	100	100	100	円/W
レクテナ建設単価	80	76.33	76.33	億円/km ²
土地単価	—	5.29	5.29	億円/km ²
(3) 輸送				
打上げ (LEO まで)	0.1	0.173	0.1	億円/ton
軌道間輸送機 (OTV)	0.35	0.35	0.35	億円/ton
OTV 推進剤	400	500	400	円/kg
建設期間	2	1	1	年
(4) 保守・運用				
宇宙機システム	2.875	3	3	%/年
地上システム	2	1	1	%/年
(5) その他				
経済寿命	40	40	40	年
システム稼働率	90	—	—	%
商用電源網への接続率	—	95	95	%
借入金金利	3.0	1.55	1.55	%/年

表 3 SSPS の建設コストおよび発電単価

	②共通ケース	③目標ケース	
宇宙機システム	11,165	5,683	億円
地上システム	2,286	2,286	億円
輸送	7,770	4,747	億円
建設総コスト	21,221	12,716	億円
保守・運用	591	336	億円/年
発電単価	15.86	9.28	円/kWh

表 4 前提条件および VLS-PV 発電コスト (近い将来)

項目	VLS-PV	備考	SSPS (目標)	備考
実現時期	近い将来		2030 年頃	
建設年数	1 年	中国の場合	1 年	
電力規模	100MW		1GW	=1000MW
太陽電池	12.8%	現状	35%	将来
	240 円/W	2USD/W、実証期	30 円/W	将来
土地代	0	中国の場合	5.29 億円/km ²	
金利	3%		1.55%	
輸送費	7.99 oil/kton mile	日本から中国へ海上輸送 (1,000km)	1,000 万円/ton	低軌道まで打上げ
	0.3 元/ton km/truck 0.048 oil/t km	中国内の陸上輸送 (600km)	350 万円/ton	低軌道から静止軌道まで
メンテナンス費	0.084%		3%	
経済寿命	30 年		40 年	
発電コスト	12.1 円/kWh	10.1cent/kWh、 (傾斜角 30°)	9.28 円/kWh	出力一定型

表 5 前提条件および VLS-PV 発電コスト (30 年後)

項目	VLS-PV	備考	SSPS (目標)	備考
実現時期	30 年後	開発開始後	2030 年頃	
電力規模	1GW		1GW	
太陽電池	240 円/W	実証期 (開始時)		
	120 円/W	普及期	30 円/W	将来
発電コスト	6.48 円/kWh	5.4cent/kWh、	9.28 円/kWh	出力一定型

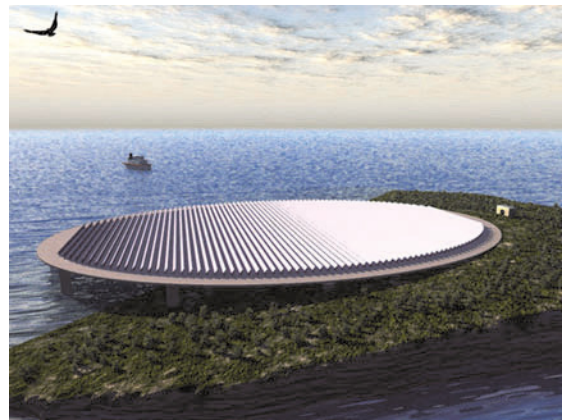
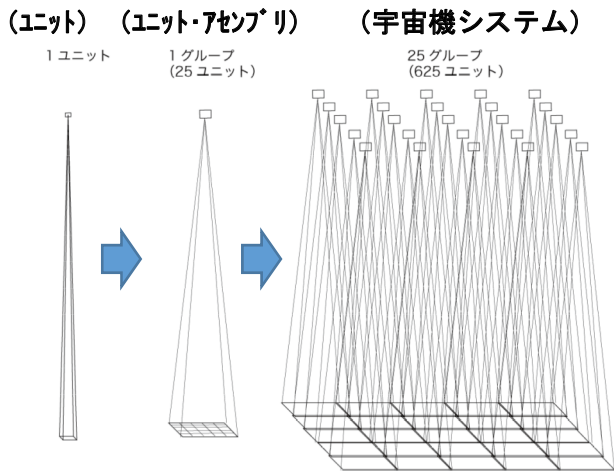


図 1 宇宙機システムの構成および地上受電システム（レクテナ，USEF）

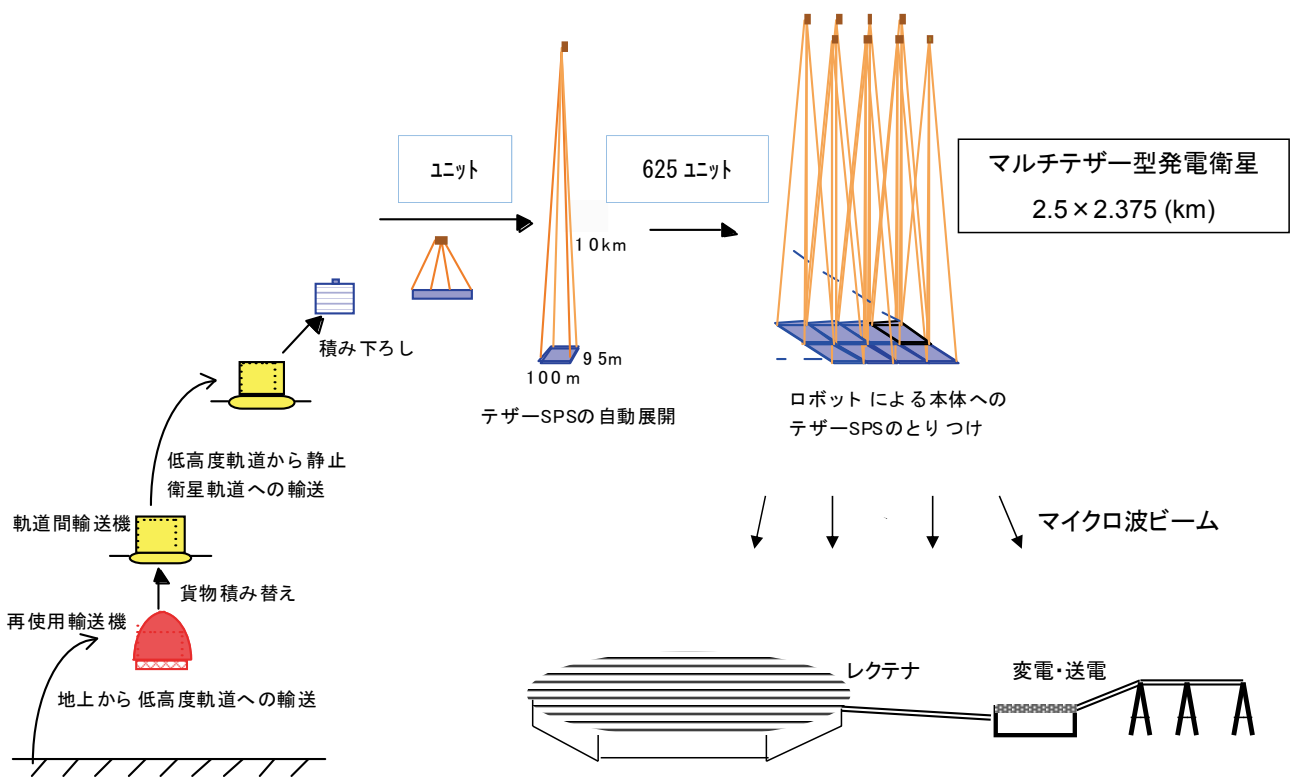


図 2 建設シナリオ（宇宙，USEF）

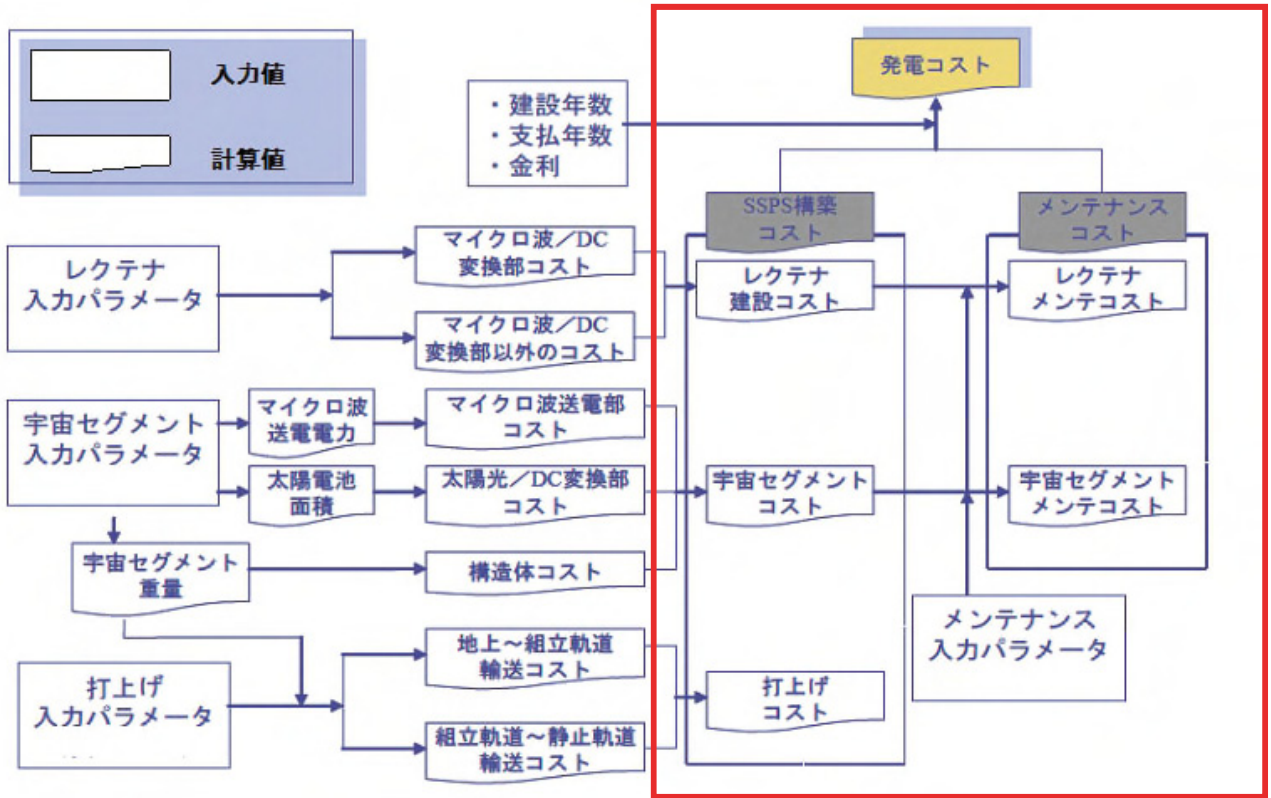


図 3 経済性評価ツールの計算フロー(SSPS, JAXA)

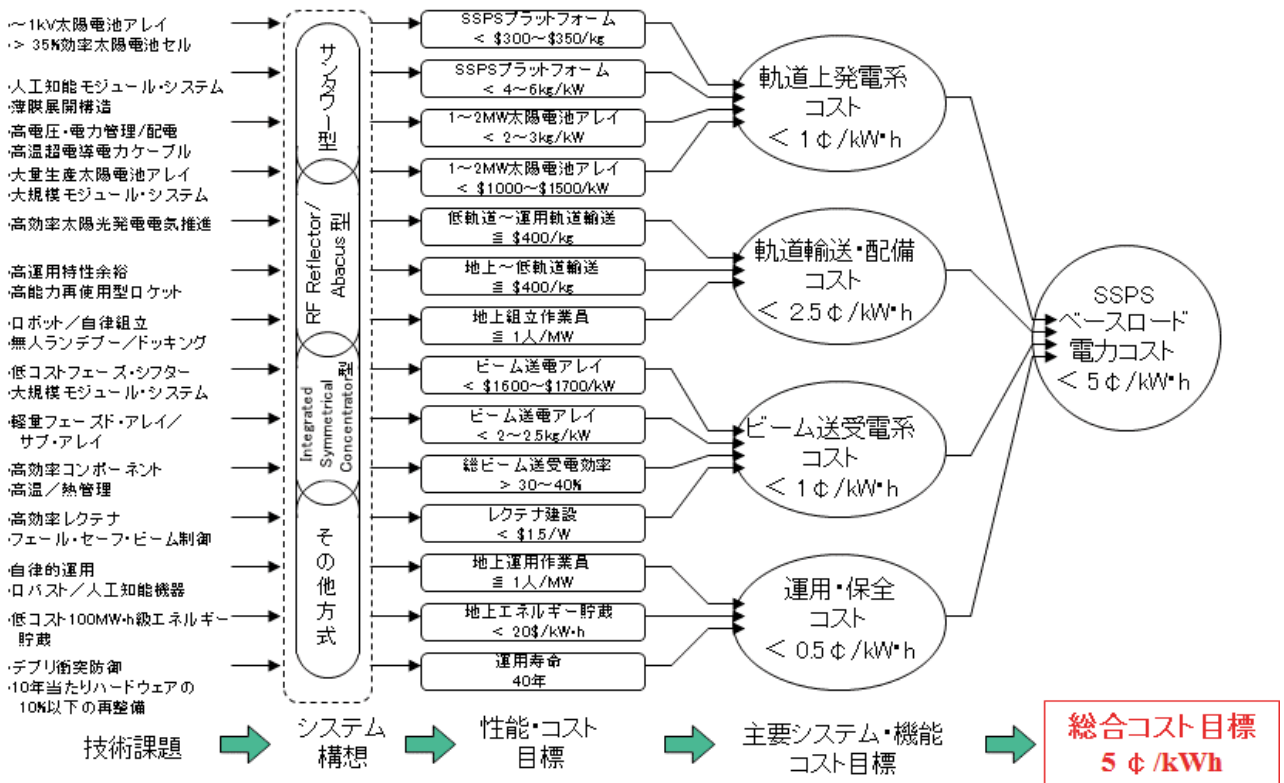
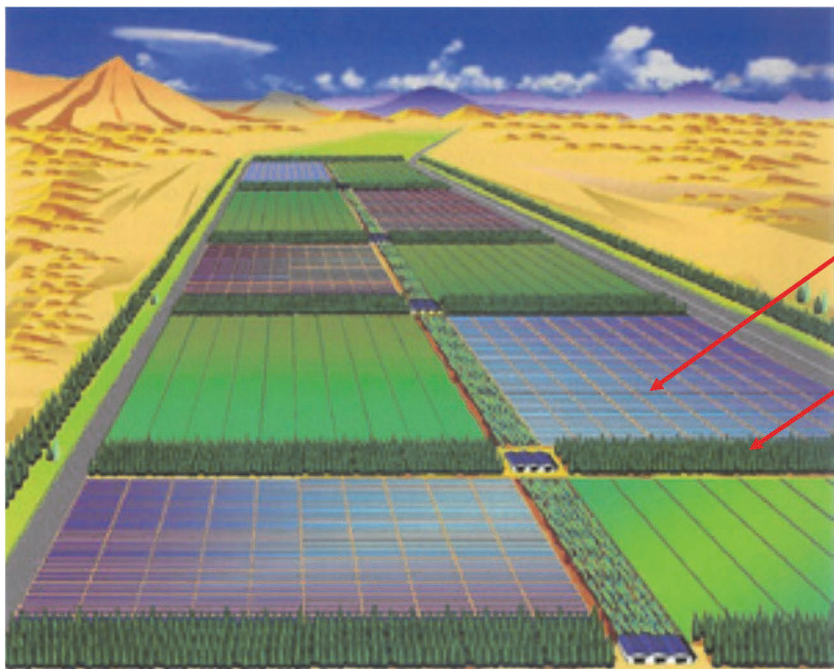
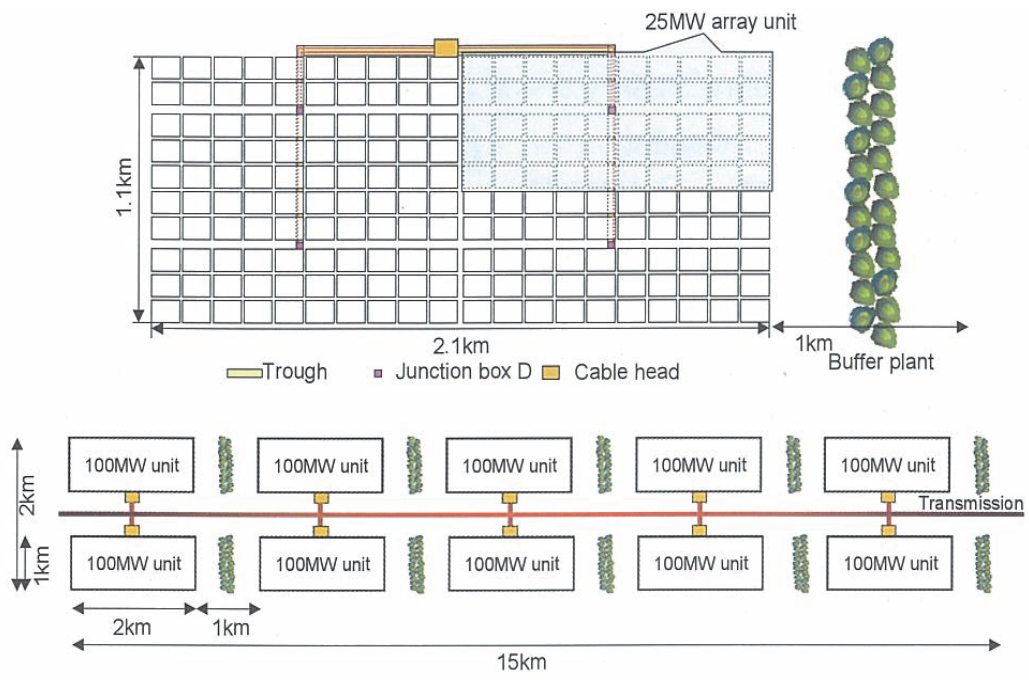


図 4 経済性評価ツールの計算フロー(SSPS, NASA)



太陽電池(PV)

緩衝帯(樹木)

図 5 1GW VLS-PV システムの概念的イメージ (IEA)

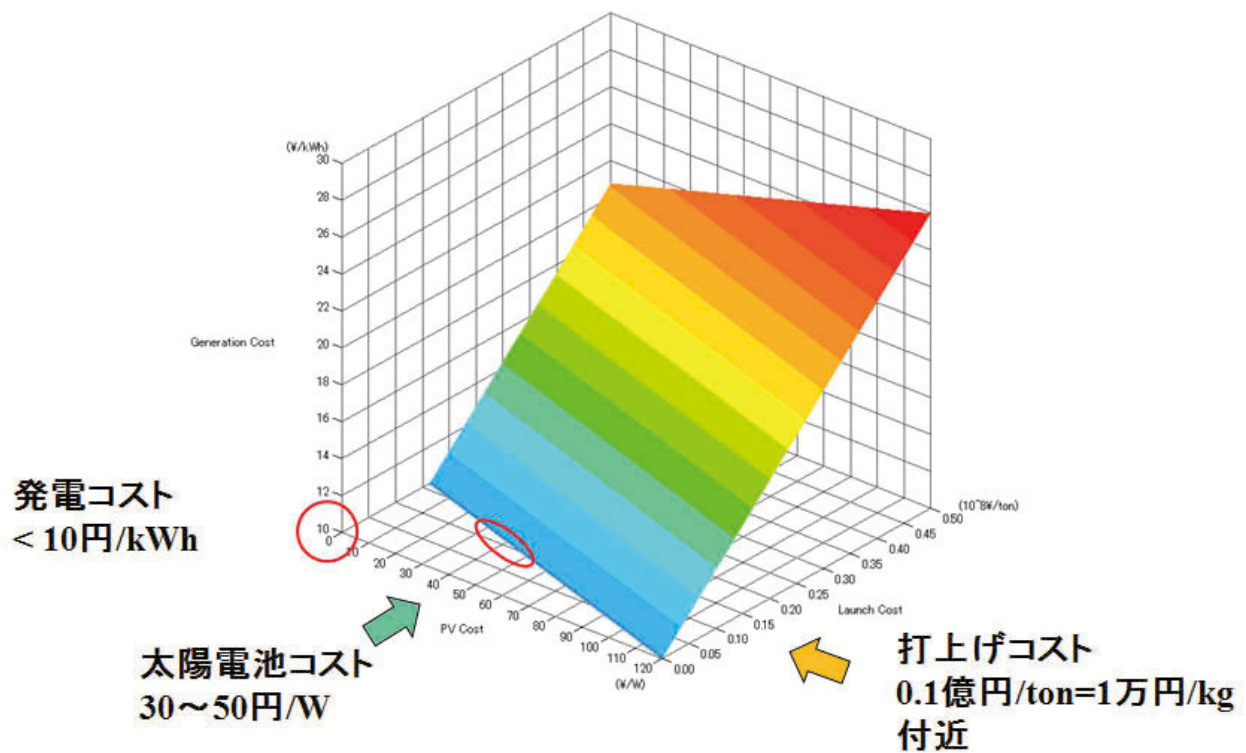


図 6 マルチバス型 SSPS の発電コスト感度解析