

太陽光発電に関する一考察

府川 伊三郎*、浮田 寛之**

A study on photovoltaic power generation

Isaburo Fukawa, Hiroyuki Ukita

We studied the characteristics of photovoltaic power generation and summarized as follows, 1. Very few ratio of solar power generation (0.4%) in total power generation in Japan. 2. The lowest annual utilization rate of photovoltaic power generation plant (~12%). 3. The beginning of drastic introduction in Japan and the further greater introduction of ~500MW/year. 4. The cost reduction is required for the introduction by large scale production and technology innovation.

Keywords: Solar cell, Photovoltaic power generation, Mega solar, CIS, Utilization rate, Alternative energy

はじめに

我が国の発電状況の解析より、太陽光発電の本格的導入を行うべき状況にあると考えた¹⁾。これは大きな技術的、経済的、社会的変革をもたらすものであり、壮大な社会実験である。実行に当たっては、議論すべき課題が多いが、技術、経済、社会、行政の専門家が協力して、具体的施策をまとめる必要がある。今回、その課題のいくつかについて取り上げ考察した。たとえば、太陽光発電と他の新エネルギーとの比較(太陽光は本当に本命か)、住宅用ソーラーとメガソーラーの比較(今後、重点的に増やすべきは何か)、各種太陽電池の比較、導入促進のための補助施策等である。実際には、膨大なテーマであり、その一部を検討するにとどまった。また、北海道・稚内市と山梨県・北杜市のメガソーラーを訪問し、実証データを入手した。

1. 新エネルギーへの期待

エネルギー源の大宗を占める化石燃料は資源枯渇と価格高騰の問題を内包し、さらに燃焼したとき二酸化炭素を大量に放出することより地球温暖化の原因とされている。二酸化炭素を出さない原子力が期待されていたが、福島原子力発電所事故により原子力に頼ることが難しい状況になった。将来的には再生可能エネルギーを開発し、エネルギー源の柱にすることが期待されている¹⁾。再生可能エネルギーのうち水力発電は大きな拡大が難しく、期待されるのは太陽光発電、風力発電、地熱発電、マイクロ水力発電等の新エネルギーである。

2010年度における我が国の発電構成を表1に示す。全電力に占める新エネルギーの割合はわずか1.2%であるが、2030年には20%位に拡大することが予想される。

* 産業ビジネス学科 ** 経営情報学科

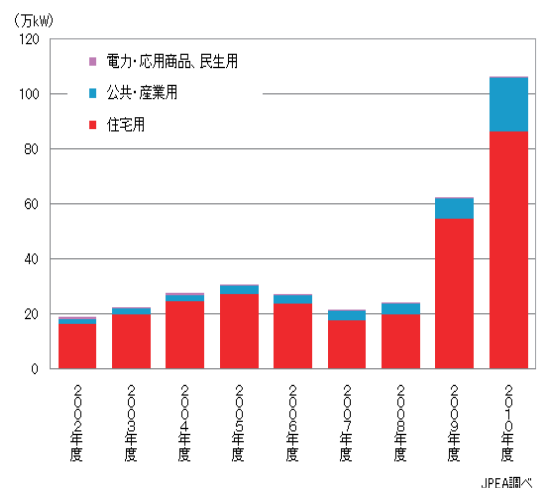
発電容量（能力） 単位 万 KW（％）	発 電 量 億 KWh	設備利用率 ％
日本全体 24,307（100％）	9,760（100％）	45.8
原子力 4,896（20％）	3,004（30.8％）	70.0
LNG火力 6,253（26％）	2,657（27.2％）	26.9
石炭火力 3,887（16％）	2,323（23.8％）	68.2
石油火力 4,601（19％）	811（8.3％）	20.0
水力（揚水含む） 4,670（19％）	848（8.8％）	20.7
新エネルギー	117（1.2％）	
太陽光 368	38	12（仮定）
風力（2009年） 219	42	20（仮定）
地熱（2009年） 53	30	64

表1 発電容量と発電量から計算される設備利用率（2010年度）（エネルギー白書²⁾等より作成）

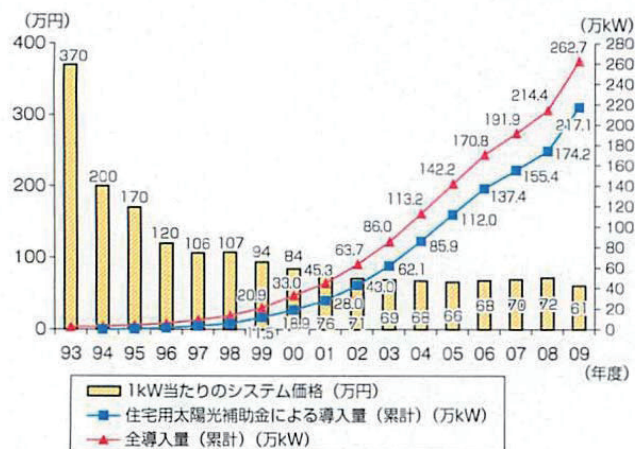
2. 各種新エネルギーの比較（表2）

新エネルギーを全発電量の20%にするためには、太陽光発電、風力発電、地熱発電、マイクロ水力発電等のすべてを総動員する必要があるだろう。しかし、その特徴を考えてどれくらいの比率で増やしていくかは大きなテーマである。それぞれの発電方式について、現在および将来の“コスト、生産能力、生産に伴うエネルギー消費、技術開発、寿命、環境、設置場所”を総合的に考えたロードマップとそれを総合化したいわば新エネルギーのベストミックスの作成が重要である。そのベースとして、各種発電方式の特徴を比較してみた。まず、新エネルギーの発電容量の推移を図1-4に示す。太陽光発電は補助制度の実施から2009年以降目覚ましく急増している。2010年の累積発電容量は370万KWに達したと思われる。また風力発電も図3の累積発電量のデータに示すように順調に伸びており、累積発電量は2009年に220万KWとなっている。表1に示すように太陽光発電は、夜間稼働しないこと雨天・曇天に稼働率が下がるため年間使用率は10-14%と低い。風力も風の強さに依存するため設備利用率は20%と低いが、太陽光発電に比べると高い。設備利用率を太陽光12%、風力20%と仮定したときの2010年の推定発電量は表1, 2に示すように、太陽光38億KWh、風力42億KWhである。地熱についてはデータがあり30億KWhである。

図1 太陽光発電の出荷量（出典 太陽光発電協会）
（JPEA HP: URL <http://www.jpea.gr.jp>）



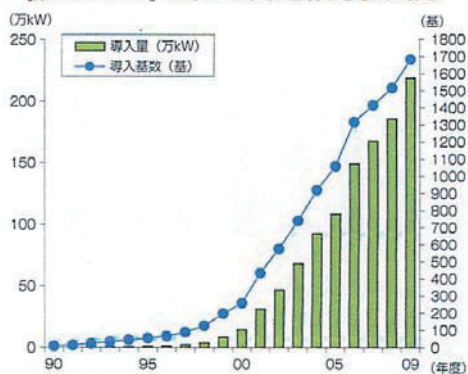
【第213-2-11】太陽光発電の国内導入量とシステム価格の推移



(出所) 資源エネルギー庁調べ

図2 太陽光発電の導入量とシステム価格 (エネルギー白書 2011²⁾)

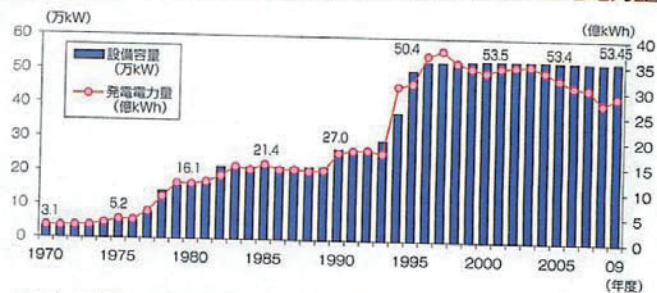
【第213-2-15】日本における風力発電導入の推移



(出所) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ホームページ

図3 風力発電導入量 (エネルギー白書 2011²⁾)

【第213-2-22】日本の地熱発電設備容量および発電電力量



(出所) 火力原子力発電技術協会「地熱発電の現状と動向 2005年」、電気事業連合会「電気事業便覧 (平成22年版)」をもとに作成

図4 地熱発電導入量 (エネルギー白書 2011²⁾)

太陽光発電に関する一考察

	太陽光発電	風力発電	地熱発電
国内 累積発電容量 (設備利用率) 発電量	368 万 KW (12%と仮定) 38 億 KWh	219 万 KW (1,683 基) (20%と仮定) 42 億 KWh	53 万 KW (64%) 30 億 KWh
世界の累積発電容量 (日本のシェア)	2,038 万 KW 13%	19,400 万 KW 1 %	1,071 万 KW 5%
単価 システム価格	48 円/KWh 住宅用、60 万円/KW 240 万円/4 KW	10～14 円/KWh	約 10 円/KWh
長所	安全。住宅用は分散型 (停電時)で送電ロスが ない。屋根における	コストが安い	資源量が多い
短所	コストが高い 不安定な発電	騒音、景観を損なう 不安定な発電	景観を壊す。 温泉に隣接。

表2 新エネルギーの比較 (各種資料より作成)

3. 太陽光発電の概要

(1) 日本の状況

- a. 日本の太陽光発電容量は 2009 年度以降速に伸びている。2010 年の累積設備容量 368 万 KW、また設備利用率 12%と仮定すると年間発電量は 38 億 KWh である。日本の全発電量の約 0.4%に当たる。今年 2012 年 7 月に予定されている企業向けの自然エネルギー固定買取制度制定により、導入は促進されよう。メガソーラー、中規模のルーフ型ソーラー等の発電事業に参入する企業が多くなるであろう (ソフトバンク等)。
- b. 2030 年に仮に、日本の発電量の約 10,000 億 KWh の 10%を太陽光発電で賄おうとすると (設備利用率 12%と仮定して)、9,510 万 KW の発電容量が必要となる (注)。これを 20 年で達成するには、年平均約 500 万 KW の導入が必要となる。2010 年の日本の生産実績は図 5 のように約 200 万 KW (国内分はその約 50%) であるから、すくなくとも 5 倍の設備規模拡大が必要となる。(注：電力の需要量は現在と変わらないと想定した。)
- c. 太陽光発電のシステム価格は、図 2, 7 に示すように徐々に低下しており直近の 2009 年度は前年の 72 万円/KW から 61 万円に低下した³⁾。2010 年以降の数字はないが、大量生産に基づき価格の低下が期待される。家庭用電気料金並コストを実現するためには、35 万円/KW 位になることが必要である。
- d. 住宅用ソーラーの平均設備容量は約 3-4KW (2008 年) であるが、今後 4KW を標準とするとシステム価格は現在約 250 万円の価格となる。太陽光発電システムコストの内訳は図 7 に示す³⁾。2008 年のシステムコスト 66.9 万円/KW の内訳は太陽電池 42.5 万円/KW、付属機器 15.5 万円/KW、設置工事 8.9 万円/KW となっている。ただこのデータは、設置工事費が低く見積もられている可能性がある。実際にはこ

れ以上の設置工事費が必要となっていることを示唆する情報も多いが定量的な分析レポートは見つからなかった。これは住宅用ソーラーの一つの課題である。

- e. 太陽光発電の用途別比率を図1に示すが、日本ではずっと住宅用ソーラーが主流で約90%を占めている。2010年は、公共・産業用が増えている。来る7月の法改正で採算に合う営業用発電の固定買取価格が設定されれば、メガソーラーやオフィス&アパート等の屋上につけるルーフ型の比率がかなり高くなるものと予想される。

世界の状況を調べると、住宅用ソーラー（平均3-4KW）23%、オフィスや工場のルーフ型ソーラー（10-100KW）52%、メガソーラー（1,000-数万KW）23%となっていて、中～大型設備の割合がはるかに大きい⁴⁾。太陽光発電トップであるドイツ、スペインは大量の太陽光発電を短期間に導入した。日本も太陽光発電の導入量を短期に増やすためには、同じような構成になるものと予想される。

- f. 太陽電池にはシリコン系太陽電池が主に生産されており、直近では多結晶シリコン133万KW、結晶性シリコン84万KW、アモルファスシリコン30万KW、CIS他5万KWとなっている（図5、6）。結晶系シリコンが主流なのはしばらく変わらないと考えられるが、最近化合物（CIS）が注目され、これがダークホースになる可能性がある。図13に示すように山梨県北杜市のメガソーラーでの試験結果では、化合物（CIS）の設備利用率が高いことが証明された。また、CISは幅広い太陽光を吸収すること、朝晩の弱い光でも発電効率が高いこと、製造時に結晶性シリコンのような大きなエネルギーを使わないのが特徴である。結晶系シリコンは太陽電池が発電するエネルギーの少なくとも1年分を製造に消費するといわれる。

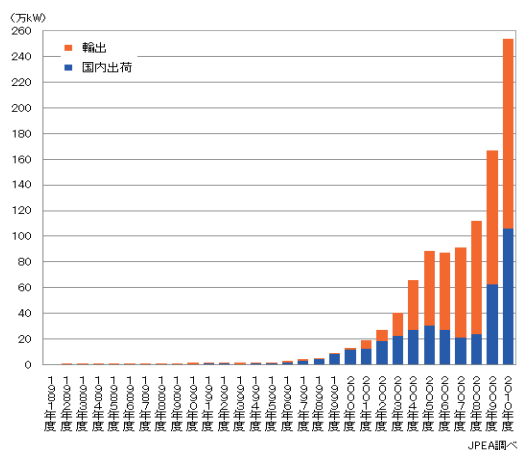


図5 総出荷量推移（出典 JPEA HP）

(<http://www.jpea.gr.jp>)

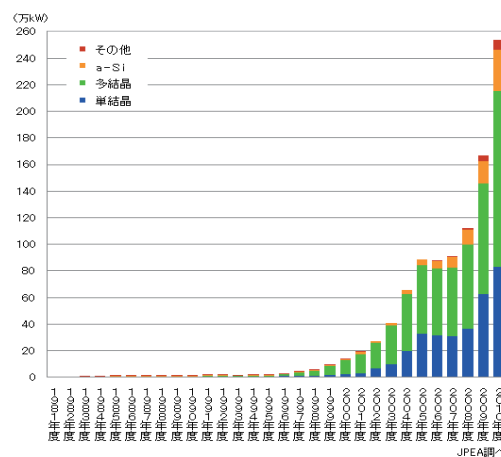


図6 品種別出荷量推移（出典 JPEA HP）

(<http://www.jpea.gr.jp>)

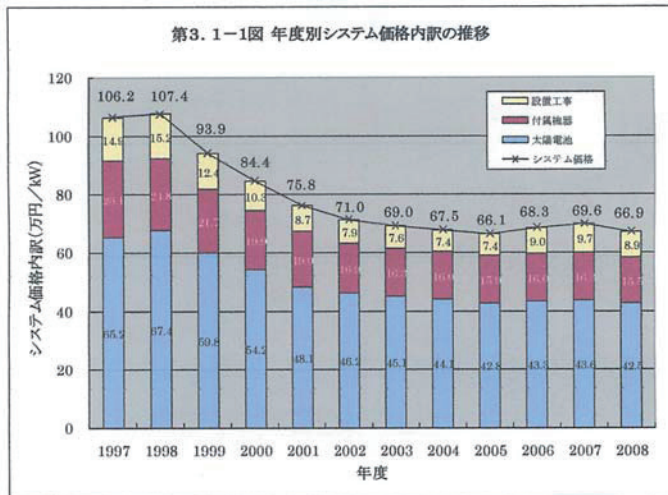


図7 コスト内訳³⁾ (平成20年度 住宅用太陽光発電システム導入状況に関する調査)

(2) 世界の状況

- a. 世界の太陽光発電の設置状況を図8に示す。これも大きく伸びている。ただし、同じ再生可能エネルギーである風力発電の10分の1程度である(図8-10)。国別では、ドイツ、スペインの太陽光発電導入量が急成長している。直近の2009年のデータによれば、累積発電容量は世界で2,038万KW、日本が262万KW(13%)、ドイツが984万KW(48%)、スペイン352万KW(17%)となっている。
- b. 太陽電池の生産量は、直近の2009年データによれば、世界の生産量は1,182万KWで累積発電容量の58%となっていて、いかに急成長しているかがわかる(図8、9)。2009年の生産量の国別シェアは中国32%、ドイツ21%、日本13%、台湾11%、マレーシア7%となっている。
- c. 図11にヨーロッパの太陽光発電の年間導入予測を示す。2012年には800万KW/年の導入が、2016年ごろに2,000万KW/年、2020年には3,100万KW/年の導入が予想されている。

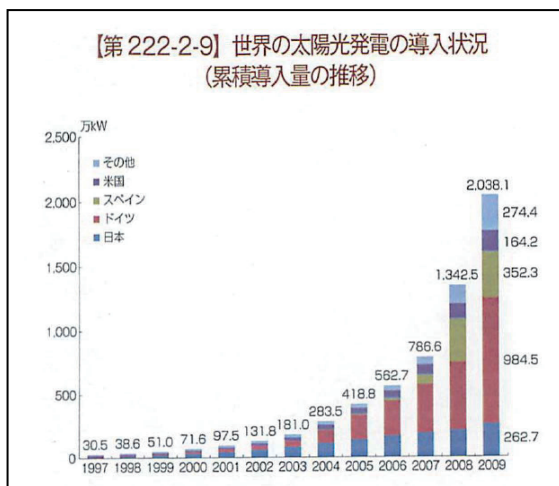


図8 世界の太陽光発電導入状況²⁾

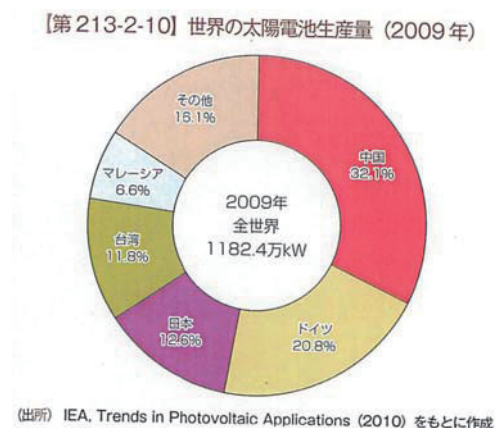


図9 世界の太陽電池生産量²⁾

【第222-2-10】世界の風力発電の導入状況

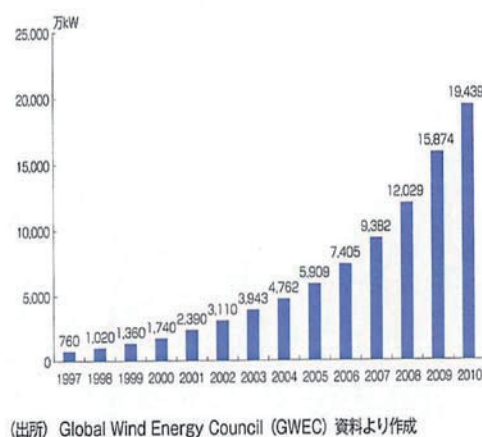


図10 世界の風力発電の導入状況（エネルギー白書 2011²⁾）

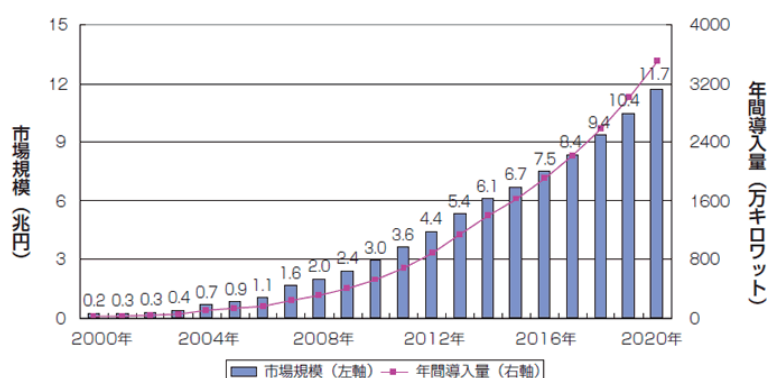


図11 欧州の太陽電池市場規模の推計（出典 エネルギー白書 2011²⁾）

(3) 太陽電池の種類と開発状況

a. 電池の種類、発電効率

電池としては結晶系シリコン、多結晶シリコン、薄膜アモルファスシリコン、CIS 太陽電池が実用化されている。また、実用化されている無機系太陽電池に迫いつき、追い越すべく有機系の色素太陽電池と有機半導体を使った有機薄膜太陽電池が活発に研究されている。ただ、色素太陽電池については依然として複雑な構造で高価な色素を使うグレッツェル方式の色素太陽電池が開発の主流であること、有機薄膜電池については革新的な p 型、n 型の半導体の組み合わせが見つからないことが課題で、これを超越するブレイクスルーが求められる。各電池のモジュール発電効率等を表3に示す。最高はシリコン単結晶太陽電池で約 18%である。

太陽光発電に関する一考察

	生産量 万 KW	厚み (ミクロン)	発電効率 モジュール (%)	設備利用率 (%) 北杜データ	総合効率 (%)
結晶シリコン	8.4	200～300	18	15.0 (仮定)	2.7
多結晶シリコン	13.3	同上	16	15.0	2.4
アモルファスシリコン	3.0	0.3～2	10	14.1	1.4
化合物 (CIS)	5	～1	12	16.2	1.9
色素太陽電池	未実用化		10	n. a.	n. a.
有機薄膜太陽電池	未実用化		9	n. a.	n. a.

表3 各種太陽電池の比較 (各種資料より作成)

b. 各種太陽電池の年間運転実績評価

NEDO はメガソーラー発電の実証試験を山梨県の北杜市で 2005 年から 5 年間実施した。そこで得られた各種太陽電池の年間の設備利用率を図 1-3 に示す (数字は表 3 にまとめた)。化合物 (CIS) が優れていることが注目される。また、図 1-3 よりわかるように結晶性シリコンは寒いところに強く (稚内ではベスト) で、気温が高くなると性能が下がる。一方、化合物 (CIS) は、気温によらず高い設備利用率を誇っている。アモルファスシリコンは、高温では強いが、低温では弱い傾向にある。発電効率と設備利用率を掛け合わせたものを総合効率と仮に定め、その太陽電池の実力を表示できると考え、計算した (表 3)。総合効率では、化合物 (CIS) の位置づけは上がる。

4. メガソーラー

(1) メガソーラー計画 (表 4)

主なメガソーラー計画を表 4 にまとめた。また、表 4 に一部含まれているが、電気事業者等は太陽光発電をさらに普及・拡充していくために、2020 年度までに全国約 30 地点 (電力会社 10 社合計) で約 14 万 kW のメガソーラー発電設備を設置する計画である。

事業主	場所	発電容量	設備費	面積	売電先
東電 (浮島、扇島)	川崎市 浮島、扇島	20 千 KW		約 23ha	東京電力
東京電力	山梨県所有地	10 千 KW		約 20ha	
三井化学	愛知県田原市	7.5 千 KW	200 億円	80ha	中部電力
メガソーラーしみず	静岡県清水区	8 千 KW	40～50 億	約 17 万 m ²	中部電力
北杜市	山梨県北杜市	2 千 KW	30 億円	約 10ha	中部電力
シャープ・関西電力	大阪府堺市	28 千 KW	約 50 億円	約 20ha	関西電力
稚内市	北海道稚内市	5 千 KW	70 億円	約 14ha	北海道電力

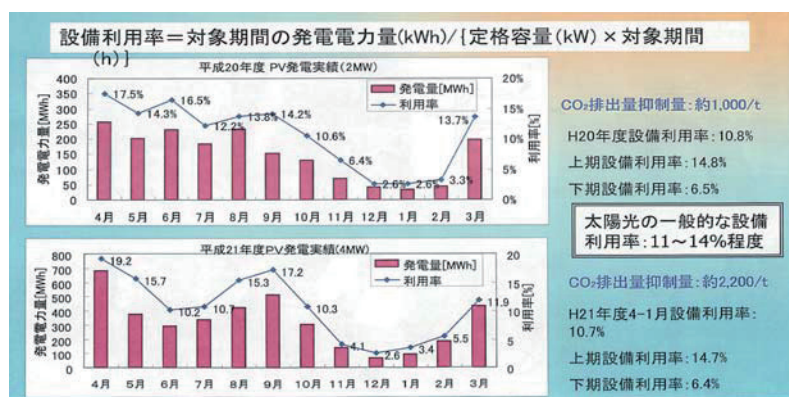
表 4 メガソーラー計画 (各種資料より作成)

(2) 稚内市と北杜市におけるメガソーラーの実証実験

二つのメガソーラーは、NEDOの実証実験として建設され、5年間運営された後、現在は市に移管され商業運転中である。両メガソーラーを実際に見学し、詳細な説明を受けた⁵⁾。

① 北海道 稚内市

次ページの写真の左上（筆者撮影）、下（訪問時入手）が稚内のメガソーラーである。右上の写真（筆者撮影）は同じ稚内の宗谷岬ウインドファームである。メガソーラーが5千KW、ウインドファームが約10倍の5.7万KW（57基）で、稚内市使用電力の90%をまかなっている。ウインドファームを見た時、正直のところ景観を損なっていて異様な感じがした。一方、メガソーラーは遠くから見ると農家のビニールハウスの様な外観である。稚内市は積雪・寒冷・強風と気象条件が厳しい中で、大規模太陽光発電システム（NAS電池に使用した蓄電装置を含む）を建設し、様々なデータを取得し、現在は電力会社に売電している。主として多結晶シリコン太陽電池が使用されている。年間の測定データを図12に示す。年間発電量 約5,000,000KWh/年（一般家庭1700戸分）、設備利用率 10.6%(H21年)である。

図12 稚内メガソーラー実証テスト⁵⁾

② 山梨県 北杜市 (下記写真は現地訪問時に撮影)

北杜メガソーラーは 19 カ国 27 種類の太陽電池の評価目的で建設され、現在は北杜市と NTT ファシリティズが共同で商業運営している。サッカーグラウンド 8 面ほどの面積に 2,000KW 級の太陽光発電システムが構築されている。北杜市は、日照時間が日本で日射量に依存する太陽光発電にとっては最適な環境である。加えて、標高約 650m であり夏でも比較的冷涼である。よって、高温になると変換効率が低下してしまう「結晶系 Si 太陽電池」でも、より多くの発電量を得ることができる。発電量は季節によってムラがあり、春先と夏場が高く、梅雨時や秋冬に落ち込む。写真は現地訪問時に撮影した。発電容量 2,000KW、年間発電量 約 2,000,000KWh/年 (一般家庭約 570 戸分)、設備利用率 15.2% (H21 年度) である。



図 13 に各種太陽電池の月別の積算発電量を示す。北杜メガソーラー全体の設備利用率は 15% であるので、単結晶を 15% と仮定して、他の太陽電池の設備利用率を求めたものを表 3 に記した。表 5 に北杜メガソーラーと稚内メガソーラーの比較表を示す。

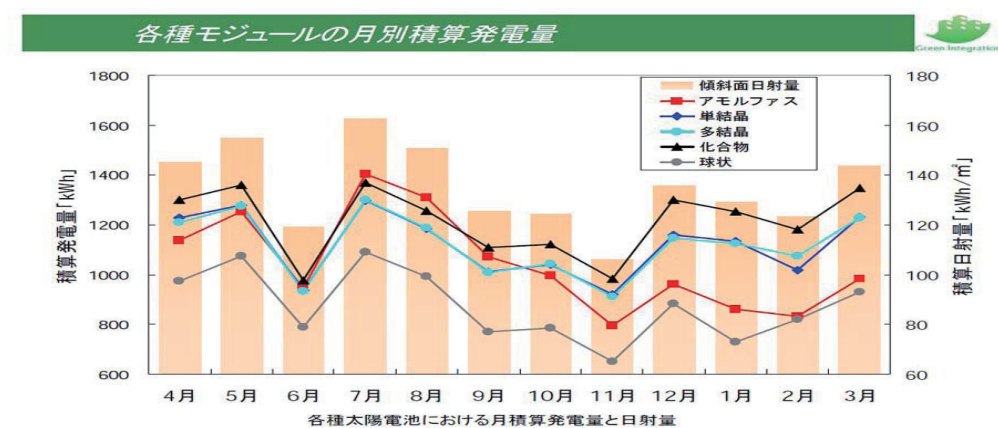


図 13 北杜メガソーラー実証テスト⁵⁾

正式名称	北杜メガソーラー	稚内メガソーラー
所在	山梨県北杜市	北海道稚内市 声間
設置団体	NEDO (現在北杜市に設置)	NEDO (現在稚内市に設置)
予算	30 億円	70 億円程度
テスト期間	第一期 2007～2008	第一期 2006 第二期 2007
	第二期 2008～2009	第三期 2008 第四期 2009
テストしている 太陽電池の種類	1. 結晶シリコン太陽電池 ・単結晶、多結晶シリコン太陽電池 2. アモルファスシリコン太陽電池 3. 化合物系太陽電池 (CIS 等) 等 27 種類	1. 単結晶シリコン型 2. 多結晶シリコン型 (中心) 3. アモルファスシリコン型 4. 化合物系 5. 複層薄膜型
面積	およそ 10 ヘクタール	およそ 14 ヘクタール
日照時間 (年間) 日本平均 2,000 時間	年間 2,500 時間以上	年間 1,500 時間程度
平均気候	弱曇天 6552kW	積雪・寒冷・強風と気象条件が厳しい
付帯設備	P S C	N A S 蓄電池
売電先	中部電力	北海道電力
年間利用率	約 2,000,000KWh/年 (一般家庭約 570 戸)	約 5,000,000KWh (一般家庭 1,700 戸分)
設立目的	・系統安定化制御が可能な大型太陽光パワーコンディショナーの開発 ・世界の先進的太陽電池を中心とした様々な太陽電池モジュールにより大規模発電システムを構築 ・将来の大規模太陽光発電技術の普及 ・コスト低減のための技術開発と実証 ・手引書の作成	・蓄電池設備等による太陽光発電出力の安定化と系統電力のピーク対策 ・電圧変動抑制効果等の実系統での検証 ・結晶系太陽電池モジュール比較 ・大規模太陽光発電システム導入時の指針となる手引書の作成
設備利用率	15.2% (H21 年度)	10.6% (H21 年度)

表5 メガソーラーの比較 (各メガソーラーから入手した資料⁵⁾ から作成)

(3) 住宅用ソーラーとメガソーラーの比較

規模的に両極端の住宅用ソーラーとメガソーラーを比較してみると、住宅用ソーラーの特長は、①分散電源であり、送電ロスがなく停電時も使用できること ②既存の屋根を利用できるため新たな土地を必要としないこと ③現在はシステム購入時の補助金制度や余剰電力の買取制度 (単価 48 円と太陽光発電のコスト並みの高い価格) があることである。欠点は施工費が高いことと考えられる。特に既設の家の屋根に取り付ける場合は新築に比べ高くなる。メガソーラーの特徴は大規模設備によるコストダウンが可能な点であるが、膨大な敷地が必要なのが欠点である。

5. 電力買い取り制度

図 14 が現在の買い取り制度である。2012 年 7 月に発電事業向けの買い取り制度が改定される予定である。これにより、大型の太陽光発電プラントの投資が積極的に始まると予想される。

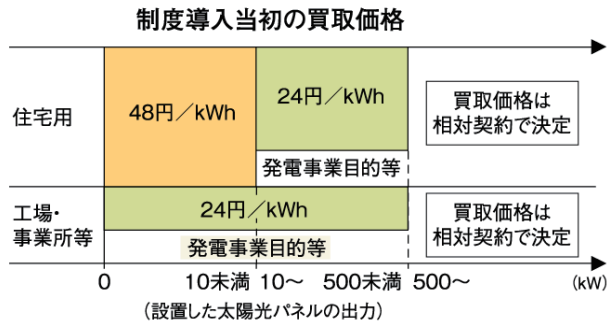


図 14 現在の買取価格（出典 電気事業連合会 HP、 <http://www.fepc.or.jp/>）

まとめ

太陽光発電が大きく導入されようとしているが、これは、大規模な経済、社会の実験である。

1. 今後、産業構造の変化、省エネ、節電、少子高齢化・人口減少により、電力需要は頭打ちになると思われる。そのなかで、新エネルギーは 2030 年には全発電量の 20% くらいを占め、太陽光で 10%、風力等で 10% くらいになろう。その場合、太陽光発電は 2030 年に発電容量 9,500 万 KW、発電量 1,000 億 KWh になる（2010 年の 25 倍）。これを達成するためには、平均毎年 500 万 KW くらいの導入が必要である。コストダウンにより平均 1 KW が 30 万円になるとすると、毎年 1 兆 5000 億円の市場となる。
2. 太陽光発電の大幅導入促進には、インセンティブとして各種の国の補助・支援策が必要である。2012 年 7 月の固定買い取り制度が決定されれば、新エネルギー発電企業（事業者）が新規参入し、市場は活性化すると予想される。ただし、各種の補助・支援施策がコストダウンのインセンティブを喪失させるようなことがないように、市場原理が働くような仕組みを織り込むことが重要である。
3. 太陽光発電の課題は、発電コストが高いことである。生産規模の増大、国際競争等により大幅なコストダウンを期待したい。太陽光パネルは構造的、形態的に液晶パネルに類似している。液晶のようなコストダウン（販売価格の低下）が太陽光発電でも実現するであろう。
4. 太陽電池材料としては化合物半導体（CIS 等）の発展が注目される。

参考文献

1. 府川伊三郎 「日本の発電状況と将来についての一考察」 福井工業大学研究紀要 2012 第 42 号
2. 経済産業省 資源エネルギー庁 エネルギー白書 2011
3. 新エネキ - 導入促進協議会 平成 20 年度住宅用発電システム導入状況に関する調査 平成 21 年 7 月
4. 富士経済 2011 年版 太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望
5. 訪問時入手資料 稚内メガソーラー（平成 23 年 8 月）北杜メガソーラー（平成 23 年 10 月）

（平成 24 年 3 月 31 日受理）