

Title	技術と社会の相互作用：風力発電と住宅用太陽光発電のケース
Author(s)	井上，芳範；宮崎，久美子
Citation	年次学術大会講演要旨集，23：26-29
Issue Date	2008-10-12
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7493
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

技術と社会の相互作用-風力発電と住宅用太陽光発電のケース-

○井上 芳範、宮崎 久美子 （東京工業大学）

1.はじめに

近年、環境汚染や地球温暖化現象等が問題となり、温暖化ガスを排出しない風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの利用拡大に注目が集まっている。風力発電に関しては、2010 年導入目標 3000MW に対し 2006 年末で 1574MW と近年急速の導入が進んできた。しかしながら、EU 諸国に比較し、日本の風力発電の導入速度は遅く、目標に対し 52%の達成率である。普及率ランクでは世界第 15 位で国の需要電力量の 0.22%を賄っているに過ぎない。太陽光発電に関しては、同様に 2010 年導入目標 4820MW に対し 2006 年末で 1708MW、目標に対し 35%の達成率である。普及率ランクでは世界第 2 位であるものの、国の需要電力量の 0.19%を賄っているに過ぎない。

地球温暖化対策に有効であるはずの再生可能エネルギーの多くはエネルギー密度が低く、利用に当たり大容量化技術や経済性の面で問題がある。その結果、企業経営では施設導入コストと投下資金回収のバランスが成立しないことに起因して普及拡大には繋がっていないのが実状である。今後、再生可能エネルギーの普及を加速する為には、制度的な仕組みに加えてアクターの参加動機を高める取り組みが不可欠である。

2. 本研究のフレームワーク

風力発電や太陽光発電の普及を促進していく上で最も重要なのは経済的要因である。これらのシステムから得られる電力で投資コストを回収出来るようにしなければならない。この為に、自然エネルギーを効率よく電気に変換する為に、利用環境に適合させながら、設備を大型化し規模の経済を高めることが不可欠となる。ところが台風など苛酷な自然環境から設備を守り安全性を高める為の技術に関する要求レベルが高く、大型化するには技術的課題が多い。あるいは、太陽エネルギーを利用するにあたり適切な材料が十分確保できるか、さらには発生する電力を利用していく上で、これらシステムは自然エネルギーに由来する変動する電力の品質問題を内抱しており、発生した電力の価値が市場で相対的に低く評価される問題を抱えている。この為、普及していくには、技術的課題を解消し、風力発電システムや太陽光発電シ

ステムの設置コストを削減し、効率を上げ、既存の発電システムと競合できるレベルまで作り上げる技術と、これらの技術が社会的に受容され、維持継続していくことが重要になる。そこで、目下進行中のイノベーションという観点から、風力発電や住宅用太陽光発電システムの技術性能や効率、経済的効率性、社会的有効性に焦点をあて、技術、経済、社会的要因を分析、検討し、今後の普及拡大にむけたエネルギーや技術政策への提案を行う。

3. 技術イノベーションの分析

3.1. 風力発電システムに用いられる風力タービン技術の進化

風力発電システムを構成する中心的要素である風力タービンに関し、近代風車である 3 枚翼、モノポール式が 1980 年代にデンマークでドミナントデザイン化された。その後、このドミナントデザインにピッチ制御が採用された。それまではストール制御により定格風速以上の風速域では失速現象により風力エネルギーを電力に変換できなかったが、設計耐量を超える余剰風力エネルギーを調整し、風力タービンへの風荷重を軽減させ、失速させることなく定格出力で運転できるようになり、効率が上がるようになった。技術不均衡(Rosengerg 1976)が解消されたのである。次の段階では可変速機能の採用により風の強さに合わせて発電機の回転数を変動させ、突風エネルギーを回転数エネルギーに変換することで風荷重を軽減し、安全に運転できるようになった。そしてこれらの技術が大型機に採用され、上空の高風速領域の風を受風できるようになってきた。これらは、設置環境にあわせたエンジニアリングプロセスを通して、ドミナント化されたオリジナルコンセプトが再構成され、実現したのである。

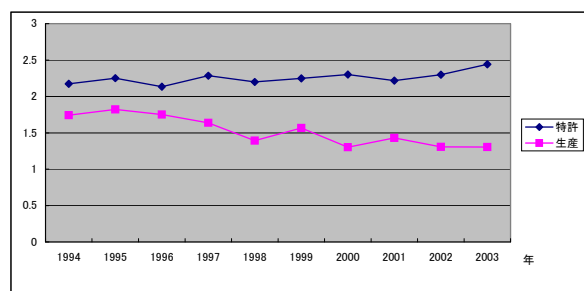
わが国で設置が進むにつれ、当初は先行するデンマークやドイツから低価格の輸入機が採用されたが、日本でも 1996 年に中型の 500 kW 機が産官連携で開発された。そして、1999 年までにはピッチ制御を備えた大型の 1000kW機、2003 年には可変ピッチ、増速機レスの可変速型で大型の 2000 kW 機が開発された。これらの機械を使って、日本特有の地形に合わせたエンジニアリングが行われ、国産期による日本型風力タービンの設置が進

にはじめた。また、日本においては、特許・実用新案では1999年から2006年までにピッチ制御に関し97件、可変速制御に関して15件、日本の地形に適用できるよう山岳設置に関わる特許が85件出願された。従来日本は風力発電に適さないという風説があったが、日本特有の風土に適合する様、エンジニアリングプロセスを通じて技術イノベーションが進み、利用環境に適合するイノベーションが発生した。

3.2 太陽光発電システムに用いられる太陽電池モジュール技術の進化

太陽電池の開発プロセスでは、シリコン材料の入手困難がきっかけとなって代替性技術のイノベーションが発生した。初期には高純度のシリコン半導体が使われたが、その後低品位の半導体を活用する技術が開発された。次に薄膜化の技術開発による省資源化のイノベーションが発生した。これらの技術をベースにして、漸進的に変換効率が向上し、太陽エネルギーをより効率的に電力に変換できるようになってきた。これらの技術が需要の約8割を占める住宅用の太陽光発電システムに採用されることになった。

技術の発展過程の背後には NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization: 新エネルギー・産業技術総合開発機構) を中心とした先導的技術開発があり、産学官連携で同時期に多くの企業が並行して技術開発に取り組み、シーズ先行形のサンシャイン計画に端を発する技術開発プロジェクトが過去30年間、約2000億円の費用を投じて行われたことである。この成果により、太陽光発電モジュールでは材料の入手困難という技術不均衡があったとしても、産学官連携による技術イノベーションにより解消され、システムのモジュール性能が向上した。また、サンシャイン計画の先導的開発によりコアレジディティ (Barton 1995) に陥ることなく、技術イノベーションが発生し低品位材料を活用する技術、薄膜化の技術開発の多様化へと進んで来た。図1に多様化指数の推移を示す。生産は集中方向に進んでいるが、技術イノベーション (特許出願) は多様化し



測定対象 単結晶Si 多結晶Si 7μm7μmSi a-Si/ 薄膜Si CdTe GaAsInP
測定式 Shannon-Weaverの種多様度指数
図1 太陽光発電モジュールの多様化

方向にあることが判る。

3.3 技術イノベーションの特徴

以上をまとめると、表1に示す技術イノベーションが発生している。

	技術イノベーション	特徴
風力発電	利用環境に適合する技術	技術システムの再構成
マイクログリッド	安定化を得るための技術	自立化
太陽光発電	原料供給不足を解消する技術	多様化

このように、技術の社会への受容という面では、後述する経済的優位性がなくともCO₂削減という環境付加価値があれば、既存エネルギーシステムに対し技術イノベーションの機会を創造し、イノベーションが発生している。このことの意義は、従来非常に限られた条件でしか使用されていなかったエネルギー源を有効に使える技術が社会に受容され始め、地球温暖化防止に貢献し始めたということである。

4. 経済・社会要因分析と政策への提言

4.1 風力発電及び住宅用太陽光発電の設置コスト

図2に風力発電システムと住宅用太陽光発電システムの経済性に関わる設置コストの推移を、対数関数を用いた回帰式を付記して示す。

この回帰式により、累積容量が10倍になった時のコスト低減係数は風力発電が0.74に対し住宅用太陽光発電では0.54となることが算出される。この差について以下のように説明できる。

つまり、日本では、風力発電システムの多くはデンマークやドイツの機器を使用して設置されてきた。この為設置コストの約56%を占める風力タービンのコストが先行するデンマークやドイツで量産化され、経験効果により既に低下しており、機器による経験効果の寄与分は少なく、むしろ、残りのコストを占める設置に関わる建設の経験効果が上記のコスト低減係数に影響していると考えられる。

一方、太陽光発電ではコスト構成比率の約55%を占

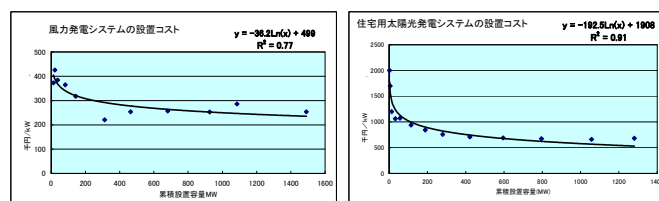


図2 風力発電及び住宅用太陽光発電システムの設置コスト

める太陽電池モジュールを初期段階から開発する必要があったことに加え、初期コストがかなり高い状況から市場に提供されたことから、より大きなコスト低減となっ

たとえられる。

4.2 風力発電の発電コスト

近年日本で単機で建設された大型風力タービンの事例（600kW、1500kW）から経済性を比較すると、風況はほぼ等しいと考えられる地域に設置された 600kW 機より 1500kW 機のほうが運転維持費を除く発電単価では 9% 下がることが確認できた。技術イノベーションが進み、可変速・可変ピッチ制御技術が大型機である 1500kW 機に採用され、上空の高速な風力エネルギーを効率よく受風する運転が行えるようになり、風力タービンの性能が向上した為である。

集合設置では山岳設置など道路や送電線に関わる付帯費用が変動するので単機設置ほど顕著ではないが集合設置することによる規模の経済効果により発電単価が低下してきた。集合設置することにより石油火力発電並みの発電単価（約 11 円/kWh）になり、電力としての経済価値が得られるようになってきたことである。

4.3 太陽光発電の発電コスト

初期には単結晶 Si を使って太陽電池モジュールが製造された。その後、材料の供給不足懸念から低品位の多結晶 Si を使ったモジュールが製造される様になり、1980 年代には変換効率は 13% 程度であったが、技術イノベーションにより 2000 年には 16% を記録することになった。並行して省資源化の観点から、薄膜系の技術開発が行なわれ、アモルファス Si を使った太陽電池モジュールが製造される様になり、1980 年代には変換効率は 6.5% 程度であったが技術イノベーションにより 2005 年には 12-16% を達成する様になってきた。

これらの効率向上に加え、生産量の増加に伴う経験効果で太陽電池システムのコスト低下が進み、住宅用太陽光発電システムの発電単価が低下してきた。住宅用太陽光発電システムでみると、1994 年に 140 円/kWh であったが、指数関数的に 2004 年には 46 円/kWh まで低下した。しかし、石油火力発電に比較してこのシステムによる発電単価は約 4 倍と高く、普及拡大には今後一層の高効率化と設置コストダウンが必要である。

4.4 風力発電と住宅用太陽光発電の社会的受容分析

風力発電事業者や住宅用太陽光発電オーナーが投資して得られる価値を VIR という概念を定義し、風力発電と住宅用太陽光発電の魅力度を評価する。VIR (Value Investment ratio) とは風力発電による電力価値と環境付加価値（新エネルギー等電気相当量）の合計を産出価

値をとり、設置に関わる総費用から設置補助金を差し引き、保守費用を加算した投資費用で除したものである。尚、産出価値は相対取引されている電力買い取り価格を用い、利用率で補正する。住宅用太陽光発電についても同様に電力買い取り価格、利用率、システム設置費、設置補助金、保守費から算出する。

図 3 に計算結果を kW あたりの設置補助金とともに年代トレンドとして示す。

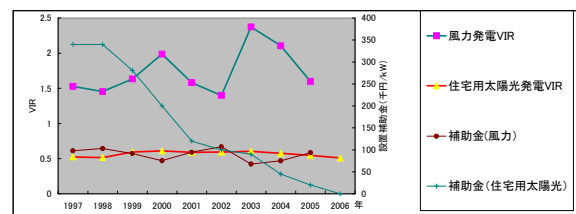


図 3 風力発電と住宅用太陽光発電の VIR

風力発電の VIR は 1.5 から 2.0 でばらつきながらもわずかに上昇傾向にある。これは産出価値では、電力買い取り額が風況のよい地方を除き約 11 円/kWh で推移した反面、投資費用では建設コストは設置場所による工事費用、ビジネスの場面で価格交渉による機器購入費用が大きく変動しながらも、定率で補助される建設補助金により事業者への投資負担が軽減した為である。一方、住宅用太陽光発電の VIR は 0.5 から 0.6 であり、2003 年以降下がり気味である。これは算出価値では電力買い取り単価が電気料金と同じで、1994 年には約 23 円/kWh、その後の電力自由化の影響で価格は低下傾向にあり、2006 年には約 21 円/kWh と変動したことによる。投資費用面ではシステム設置コストが減少してきたがそれとともに設置補助金が減少したからである。

本図から、太陽光発電の VIR は風力発電のそれよりも約 1/3 になっていることが読み取れる。それは設備利用率が風力発電では約 20% に対し太陽光発電では約 11% であること、及び風力発電のシステム価格は下がりながらも補助金は従来どおりに維持されており発電単価は既存の電源システムに近づきつつある反面、住宅用太陽光ではシステム価格は下がりながらも発電単価は依然として、既存の電源システムより大幅に高い為である。このことは現在の普及政策で有効な成果が得られるか検討の余地があることを示しており、個人の環境意識に基づく自主的行動で普及が進んで来たが、今後ビジネスを通じて普及していくには、政策面での検討が不可欠である。

次に、普及拡大という面から住宅用太陽光発電システムの設置補助金政策に関する問題点を指摘できる。即ち、設置補助金をシステムコストの低下を基準に決めていることであり、導入目標に対し普及を加速する、あるいは

普及の進捗度に応じて対策を講じるといった観点から決められていないということである。電力買い取り単価が発電単価の約半分の状況で設置補助金がなくなった事と2006年の年度設置容量が対前年15%減少となって現れたこととは無関係ではない。普及を加速するのであれば電力買い取り価格を上げるか適正な補助金を復活することが必要である。

5. エネルギー及び技術政策への提言

日本では政府による設置補助金制度と、電力会社の自主的プログラムである「余剰電力購入メニュー」によって普及が加速されてきた。これまでのところ、政府の補助金政策とあいまってわが国における再生可能エネルギーによる電力の導入促進に一定の成果を上げてきた。しかし目標に到達するのかが疑問を感じるのは筆者だけではないと思われる。その原因は、日本には導入目標があるがどのような普及カーブで加速していくのか筆者の知る限りでは定められていないことと、普及進捗基準と現状のギャップを埋める施策が見えないことから来ていると考えられる。そこで本稿ではこれに関し、ロジスティック曲線を用いた基準曲線により、ある時点ごとの普及進捗度が把握できるよう、見える化について提案する。

多くの実証研究からイノベーションの採用がロジスティック曲線で示されることが示されている。この曲線の考え方は初期時点の採用率と飽和点の採用率を結ぶ曲線がロジスティック曲線となることである。この考えに基づき導入目標時点の設置容量を想定し、出発点の時期と設置容量を結ぶ曲線を描けば、基準となる普及曲線を得ることになり、年毎の設置容量とのギャップが認識できるようになる。このためには普及の飽和点を有識者によりある程度見極めることになるが、それは国の政策上の重要事項として優先的に決定されるものであると筆者は考える。そして得られた曲線と直面する時点との乖離を認識し必要な普及施策を、しかも頻繁に、打つことを提案する。

一例として上述の手法で計算すると2006年末時点での風力発電の基準曲線と実績との乖離率は25%、住宅用太陽光発電のそれは46%となる。このような手法によって、普及上の乖離率を政策立案者やその実行者のみならず国民に示すことにより、両者への危機感が伝達され、彼らの地球温暖化対策への意識に拍車がかかり、風力発電や住宅用太陽光発電の普及拡大へと繋がっていくことが期待される。

将来目標に目を向けると、風力発電のロードマップには2030年までの設置容量として20.0GW、太陽光発電

のロードマップには同様に34.2GWが想定されている。これらを確実にするには政策的決断と新たな制度の導入に加え風力発電では森林、海浜、洋上での建設、太陽光発電では日当たりの良い戸建て住宅の25%にシステムを設置することが必要になる。

これらの計画を今後の風力や太陽光エネルギーの開発能力の中で生かしていくには、目標普及特性との乖離が見えるようにすることが尚更、重要になってくる。

6. おわりに

風力発電及び住宅用太陽光発電の利用拡大に関し、イノベーションの発生と普及の両サイドから技術、経済、社会要因について分析した。その結果、長年限定的にしか使われてこなかったエネルギー資源である風力や太陽光エネルギーに対し、我が国には普及拡大に向けたポテンシャルパワーが存在し、効果的な取り組みが行われたことによって技術が進歩して来ており、技術的効率性は高まりつつあるが、社会的有効性が低い為に普及拡大に至っていない事が明らかになった。技術と社会の相互作用を高め、利害関係者にインセンティブを与える仕組みの強化・継続をまだ必要としているのである。国民全員がこのインセンティブに必要な費用を負担し、イノベーションの市場適合が早期に実現し、今後我が国において風力発電や太陽光発電を始めとする自然エネルギーの利用が更に拡大することを切に期待したい。

参考文献

- Barton, D. 1995: *Wellspring of Knowledge*, Harvard Business School Press.
- Inoue, Y. and Miyazaki, K. 2009 (Forthcoming): "Technological Innovation and Diffusion of Wind Power in Japan," *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 2.
- Inoue, Y. and Miyazaki, K. 2007: "Technological Diffusion of Residential Photovoltaic (PV) Systems in Japan," *Integrated Systems Science in Tokyo*.
- Metcalf, S. 1981: "Impulse and Diffusion in the Study of Technological Change", *Future*, 13, 347-359.
- 井上 芳範, 宮崎久美子. 2006: 「技術と市場の相互作用□太陽光発電の普及過程より」研究・技術計画学会, pp57-60
- 井上 芳範, 宮崎久美子. 2007: 「再生可能エネルギーのイノベーションと普及—風力発電と太陽光発電」研究・技術計画学会, 2H13
- Rosenberg N. 1976: *Perspectives on Technology*, Cambridge University Press.