

研究論文

地域総合自然エネルギーシステムの統合評価

Design for Renewable Energy Systems with Application to Rural Area in Japan

久保 一雄*・中田 俊彦**

Kazuo Kubo

Toshihiko Nakata

(原稿受付日2003年1月20日, 受理日2003年8月22日)

Abstract

This study is based on the optimization and simulation modeling of the proposed integrated renewable energy system in rural areas in Japan. The model we have designed provides an optimal system configuration considering hour-by-hour data for energy availability and demands. The model leads a minimum cost design for the energy system as well as the capacities of each energy conversion facility. This tells us how to configure the energy system to meet the specific set of demand and what such a system will cost. The energy system consists of renewable resources and backup power stations in order to supply electricity and heat into the industrial, commercial and residential end users. In this study, the electricity market is consisted of the wind electricity, photovoltaic (PV), and backup generators (which is equivalent to un-served load in the model), and the heat market is configured by biomass co-generation, geothermal heat pump (GHP), petroleum, and gas. The result of our analysis clearly shows the following :

1. About 72 percent reduction in carbon dioxide (CO₂) emission can be obtained fairly inexpensively with the integrated renewable energy system.
2. Combining the wind electricity with GHP, we can configure the optimal renewable energy system to meet the changes in demand.
3. The PV has a possibility to reduce the need for peak fossil generation since the sun mostly shines during peak demand hours, but the contribution of the PV is relatively small in the integrated renewable energy system.

1. はじめに

再生可能エネルギーはCO₂の排出がないことから、21世紀に重要な役割を担うエネルギー源として注目されている¹⁾。また、資源制約が少ないことから持続可能性がきわめて高く、潜在的に一定の供給力を担う可能性を持っている²⁾。さらに、風力発電等の再生可能エネルギーは、地域分散型電源としても注目を集めている^{3, 4)}。そのため、多様な再生可能エネルギー導入促進策^{5, 6, 7)}の検討が始まっている。

しかしながら、再生可能エネルギーは、以下のさまざまな問題を抱えているために、導入が順調には進んでいないのが現状である⁸⁾。第1に、再生可能エネルギーは、エネルギー変換効率や設備利用率が低いため、大きな出力を得るには広大な土地が必要になる。第2に、太陽、風力といった再生可能エネルギーは自然条件に左右されるために、その出力は非常に不安定である⁹⁾。第3に、再生可能エネルギーの資源は地域によって偏在しているため、導入可能な範囲は限定される。また、再生可能エネルギーの電力系統への連結が増加するにつれて、その出力不安定性が一般需要家に対して影響を及ぼす可能性も指摘されている¹⁰⁾。

本研究は、地域総合自然エネルギーシステムを考案し、

その最適運用の解析、経済性の評価を行い、導入促進策の1つとして提案する。はじめに、地域総合自然エネルギーシステムの特徴を要約し、エネルギーシステムのモデル化と解析手法について述べる。つぎに、エネルギーシステムの運用特性についての解析結果を考察し、システムの性能評価、経済性評価について述べる。

2. 地域総合自然エネルギーシステム

これまで、1種類の再生可能エネルギーだけを対象にした評価研究は数多くなされてきた^{11, 12)}。しかし、自然条件に左右される再生可能エネルギーは、出力が不安定であるため、単独の再生可能エネルギーだけでは、安定したエネルギー供給を行うことが困難である。エネルギーの安定供給を行うために、複数の再生可能エネルギーを組み合わせたエネルギーシステムの設計研究が、近年になり欧米を中心として始まっている¹³⁻²¹⁾。

いっぽう、国内では、まだ再生可能エネルギーを組み合わせたエネルギーシステムの研究は見あたらない。そこで、日本の国土の特徴を考慮して、複数の再生可能エネルギーを組み合わせた地域総合自然エネルギーシステム^{*1)}を考

* 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻

** 〃 〃 助教授

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01

注1) このシステムの電力部門は、特定電気事業に該当する。「他者の供給能力に依存することなく、自ら保有する電気工作物により、その供給地点の需要に応じることが可能であること」が求められているため、本システムはその基準を満たすことができない。本研究は、電気事業法等の規制緩和を想定して行っている。

案した。その特徴を以下にまとめる。

- ・町村単位の比較的小さな地域を対象とする。
- ・1種類ではなく複数の再生可能エネルギーを組み合わせる。
- ・対象地域の特性によって、利用する再生可能エネルギーが異なる。
- ・既存の電力系統と連系し、出力が不足した場合のバックアップとして用いる。
- ・余剰電力は、連結する系統を通して電力会社に売却する。

3. 解析方法

3.1 解析ツール

解析ツールとして、米国ローレンス・リバモア国立研究所と共同開発中のエネルギー経済モデルMETA・Net^{*2)}を使用している。このモデルは、複雑なエネルギーシステムの開発、修正、解析が可能なボトムアップ型のエネルギー経済モデルである²²⁾。

本モデルは、ネットワークモデリング法というモデル化手法を採用している。この手法は、ノードとよばれるモジュールをリンクさせ、ネットワークを作成し、モデル化を行うものである。ノードには、大きく分類して、需要ノード、市場ノード、エネルギー変換ノード、資源ノードの4種類がある。図1に計算方法の概略を示す。

市場ノードには価格感応性のパラメータを設けており、このパラメータを利用して以下の(1)式により需要を配分している。

注2) META・Netは、米国エネルギー省(DOE)の支援のもとで共同開発中のエネルギー経済モデルで、その利用にはDOEの許可が必要である。担当部署：米国ローレンス・リバモア国立研究所技術移転推進課。Box 808, L-795, Livermore, CA 94550, USA, (925) 422-6416。

$$\text{Share of } i^{\text{th}} \text{ supplier} = \frac{P_i^{-\gamma}}{\sum_{j=1}^n P_j^{-\gamma}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- P_i = 各エネルギー供給源の供給価格
- γ = 市場の価格感応性 (price sensitivity)
- n = エネルギー供給源の数

である。また、(2)式でエネルギー供給価格を決定する。

$$(L_f * A_f) * [(P_c - C_c) * DCF + R_f] = SCC \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- P_c = ある期間 (period) における価格
- DCF = 割引率 (金銭価値を一定に保つように調整する)
- R_f = 将来の正味の歳入
- C_c = ある期間 (period) における単位出力あたりのコスト
- SCC = 比建設費
- L_f = 負荷率
- A_f = 設備利用率

である。

1回の計算で、期間数(後述する)×ノード数×2(量と価格)のデータ数を扱っている。システム全体の各種コストの総和を最小化することで、システムの最適化を図る。本研究では、約35万データの最適化をしている。

3.2 対象地域

本研究では、岩手県葛巻町を対象として解析を行った。この地域には2,974世帯、8,870人(平成15年4月1日現在)が暮らしている。主な産業は酪農を中心とした第一次産業である。

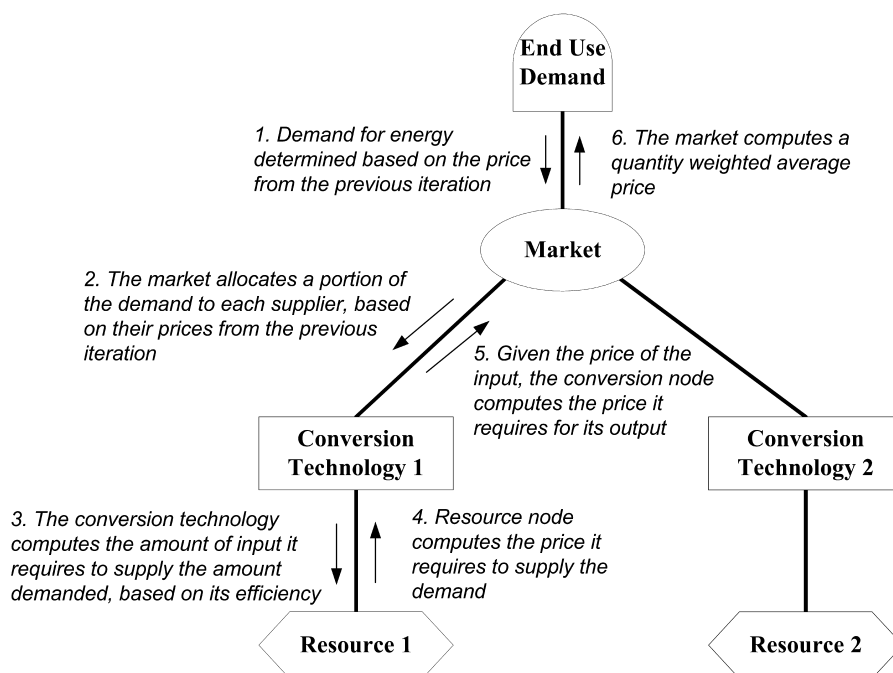


図1 モデルの計算方法

3.3 対象期間

解析の対象期間は1年間として解析を行った。META・Netは多期間均衡モデルであるため、対象期間の1年間に期間に分割する必要がある。本研究では、1期間=1時間として、1年間に8,760期間に分割している。

3.4 解析モデル

システムへの導入可能性を検討する再生可能エネルギーとして、対象地域の特性から、太陽光発電 (Photovoltaic)、風力発電 (Wind)、バイオマス発電 (Biomass)、地熱ヒートポンプ (Geothermal heat pump) の4種類を選択した。地域総合自然エネルギーシステムは、これら4種類の再生可能エネルギーと系統電力、石油熱源、ガス熱源を組み合わせたシステム構成とする。解析モデルの構成を図2に示す。電力供給は、風力発電、太陽光発電、バイオマス発電、系統電力によって行い、熱は、GHP、石油、ガスによって供給する。

3.5 入力データ

解析に用いた各種パラメータを表1に示す。なお、太陽光発電、風力発電の出力は、後述する日射量データ、風況データから決定されるため、機器の効率は100%と設定している。価格の導出に必要な利子率は5%と設定した。価格感応性は5と設定した。

需要データ、日射量データ、風況データは、期間ごとのデータが必要である。したがって、1時間刻み1年間にわたる8,760個のデータを用いている。

電力需要データは、対象地域の岩手県葛巻町が管轄区域に含まれる東北電力二戸営業所の平成12年度販売電力量から算定した。熱需要データは、対象地域の石油製品等の使

表1 各エネルギー変換ノードの入力データ

Type	Life (years)	SCC (\$/kW)	AOC (cents/kWh)	Efficiency (%)	Fuel cost (cents/kWh)
Electricity					
PV	20	5,000 ^a	0.88 ^a	100	0
Wind	20	2,000 ^a	2.06 ^a	100	0
Biomass	20	9,330 ^b	1.63 ^b	25 ^b	0
Heat					
Grid	-	0	0	100	18
GHP	20	2,250 ^c	0.026 ^c	4(COP) ^c	0*
Petrol	10	125 ^d	0.001 ^d	85 ^d	4 ^d
Gas					
Gas	10	92 ^d	0.001 ^d	80 ^d	12 ^d

SCC: specific capital cost.

AOC: ancillary operating cost.

*cost of geothermal energy.

^aBased on Assumptions to the Annual Energy Outlook 2002 (2001)²⁶.

^bBased on Kuzumaki town, Iwate prefecture (2001)²⁷.

^cBased on Takasugi et al. (2000)²⁸.

^dBased on The Institute of Energy Economics, Japan (2001)²⁹.

用量²³⁾から算定した。日射量データは、既に対象地域に導入されている太陽光発電システムの平成12年度実績データを用いた。地域内では、第3セクターが実施主体となって、既に風力発電が行われている。本解析では、発電事業者から提供された風況データを、風車の性能曲線を用いてデータ変換して使用している。

4. 解析結果および考察

以上の条件設定のもとで、META・Netによる地域総合自然エネルギー解析を行った。以下、その解析結果と考察を述べていく。

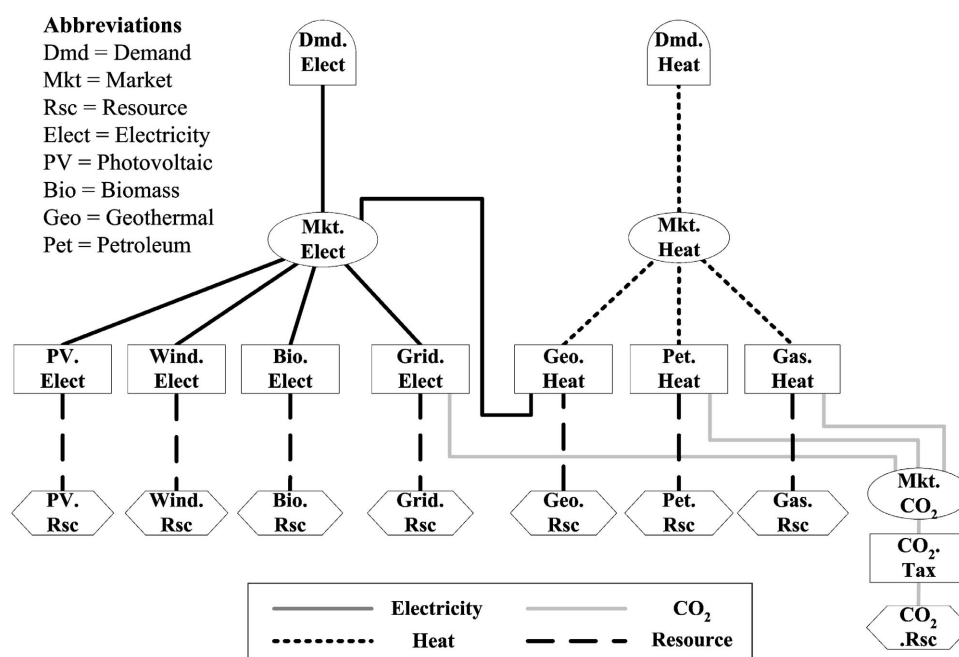


図2 モデルの構成

4.1 電力の供給内訳と電力価格

システムの電力供給について以下に述べる。電力の供給内訳を図3に示す。風力発電が稼動している場合には、電力需要の大部分は風力発電による電力によって供給される。風力発電による電力で地域の全電力需要を賄うことができないときは、その不足分を系統電力で補っている。太陽光発電による電力はほとんど供給されない。なお、この供給内訳が得られる理由は、後述の電力価格の変動(図4)にて説明する。

電力価格の変動を図4に示す。示した期間は、図3の期間と同じである。実際に地域に供給される電力価格(=システムの限界費用)は、図中のMarketの線が表している。風力発電の電力によって全地域需要を賄うことができるとき、風力発電の電力価格は2.06cents/kWhであり、他の電力価格に比べてかなり安価である。したがって、風力発電による電力が地域に供給される電力の大部分を占める。しかし、風が弱まり、風力発電による発電量が少なくなると、地域需要に対して発電量の不足が生じる。需要に対して供給量が不足しているため、需要と供給の関係から価格は上昇する²⁴⁾。風力発電の電力価格が他の発電技術の電力価格と同程度まで上昇すると、他の発電技術による電力供給が始まる。風力以外の発電技術には、太陽光発電とバイオマス発電、バックアップの系統電力がある。風力の発電量が不足するときに他の電力価格を比較すると、太陽光発電は

20~35cents/kWh、バイオマス発電は34~47cents/kWh、系統電力は18cents/kWhであり、市場は系統電力を優先的に選択する。

たとえば、図3の72時(4月6日午前0時に相当)に着目する。この時刻では、地域電力需要を風力発電がすべて賄っている。図4を見ると、このときの電力価格は、2.06cents/kWhである。6時間後に、夜が明けるにつれて電力需要が増加してくるが、風が弱いため風力発電だけでその需要を満足できない。このとき、系統電力と同程度の価格まで風力発電の価格は上昇し、系統電力が風力発電と競争力を持つ。こうして風力発電の不足分を補う形で、系統の電力が供給される。

図4に示す価格の急変は、市場原理によってもたらされるために、その上昇している部分の価格は仮想価格(shadow price)といえる。実際に運用する場合、再生可能エネルギーによる電力供給を優先的に行い、不足分を系統電力によって補うという形が現実的だろう。

4.2 熱の供給内訳と熱価格

つぎに、熱部門の解析結果を述べる。熱の供給内訳を図5に示す。結果をみると、GHPと石油が主要な熱源になっており、ガスによる熱供給はほとんど行なわれない。

つぎに、図6に熱価格を示す。GHPの動力源は電力であるため、GHPによって供給される熱の価格は電力価格に左右される。したがって、電力価格(図4のMarket)

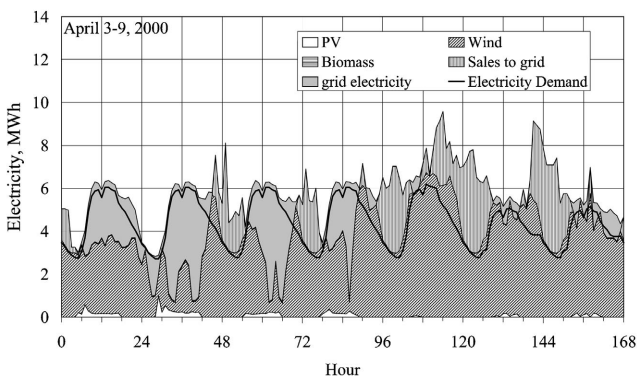


図3 電力の供給内訳

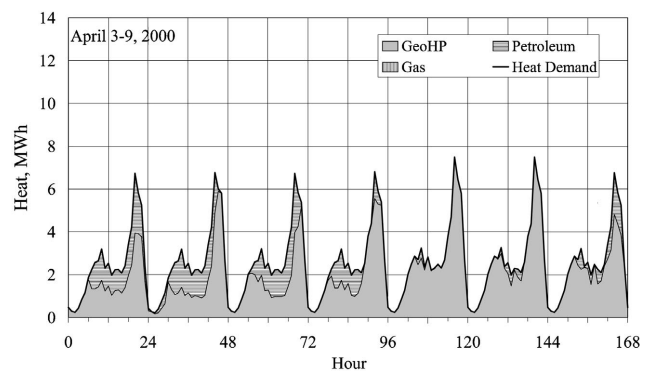


図5 熱の供給内訳

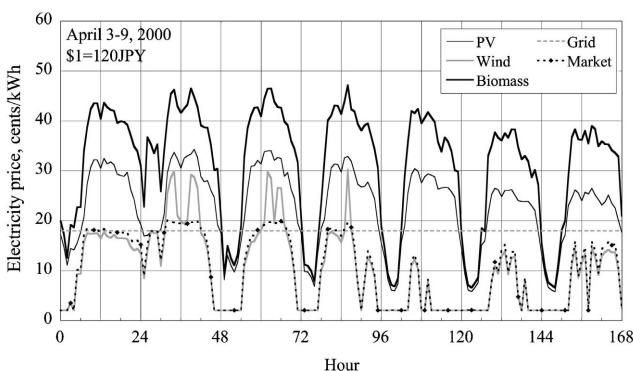


図4 電力価格の変動

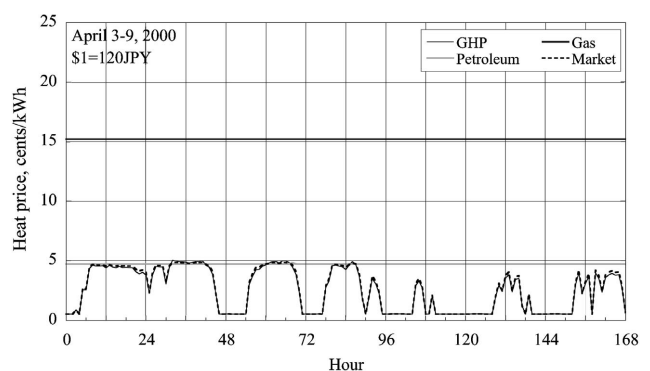


図6 熱価格の変動

の変動と比較すると、GHPの熱価格は、電力価格の変動に追従していることがわかる。つまり、電力価格が低い場合には、GHPの熱価格も低くなり、その逆の場合には、GHPの熱価格も高くなる。GHPの熱価格が低い場合には、その熱価格は0.54cents/kWhであり、他の熱源の熱価格と比較して、最も低くなるためにもGHPで熱供給が行なわれる。いっぽう、GHPの熱価格が高い場合には、その熱価格は5.0cents/kWh前後である。石油の熱価格は4.73cents/kWhであるため、2つの価格はほぼ同等になり、石油の熱供給量はGHPと同程度まで増加する。ガスの熱価格は石油の約3倍高く、GHPの熱価格が上昇しても競争力を持たないために、ガスによる熱供給はほとんど行われない。つまり、風力発電の電力で全地域電力需要が賄われている場合は、GHPによって熱供給が行なわれ、風力発電の発電量が需要に対して不足している場合には、GHPの他に石油が熱源として選択される。

4.3 最適な設備構成

地域総合自然エネルギーシステムの最適設備構成の解析結果を示す。この設備構成は、設備費と運転・維持費の各コストに加え、設備の遊休状態も考慮して導出している。

システムの全発電容量は15,800kWであった。そのうち風力発電設備が93%を占めており、電力供給は地域の風力エネルギーに大きく依存していることがわかる。いっぽう、熱供給設備は、地熱ヒートポンプ（GHP）が16,400kW、石油（灯油）が2,900kW、となり、ガス設備は導入されず、全体で19,300kWとなった。熱供給の大部分はGHPによって行なわれる。

4.4 二酸化炭素排出量の削減効果

地域総合自然エネルギーシステムと従来型エネルギーシステムのCO₂排出量の算出量を示す。排出量の算出には、化石燃料に関しては、環境省地球環境局温室効果ガス排出量算定方法検討会が発表しているCO₂排出係数を、系統電力に関しては、電気事業連合会が発表しているCO₂排出係数を用いた。

算定したCO₂排出量はエネルギー変換で発生するCO₂だけを対象としており、再生可能エネルギーを利用したエネルギー変換技術からはCO₂は発生しない。

従来のエネルギーシステムでは年間にCO₂が6,980炭素換算トン（tons of carbon, TC）排出される。いっぽう、地域総合自然エネルギーシステムを利用した場合には1,970TC排出することになる。従来のエネルギーシステムと比較すると、71.8%のCO₂排出量を削減することになり、非常に大きな削減効果が得られる。

4.5 システム全体の運用コスト

地域総合自然エネルギーシステムの運用コストと従来型のエネルギーシステムの運用コストを図7に示した。ただ

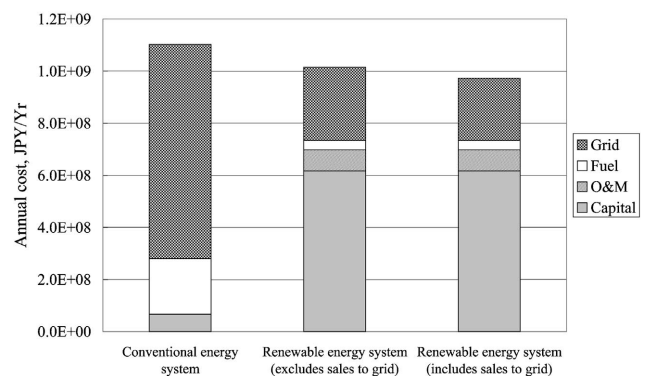


図7 システム全体のコスト比較

し、固定費に関しては、割引率5%とした減価償却費に換算して計上した。

従来のエネルギーシステムでは、年間あたり11.0億円の費用が必要である。いっぽう、地域総合自然エネルギーシステムの場合、年間に10.2億円が必要になる。したがって、地域総合自然エネルギーシステムを利用することによって、現在の運用コストに対して7.9%のコスト削減が可能になる。また、余剰電力の系統への売却分は4,200万円になる。この売却分も考慮すると、11.8%のコスト削減が期待できる。

ただし、本研究で行った解析では、発電された電力は既存の送電・配電設備を任意に使用して供給されるものとし、送電・配電等の設備費用は考慮していない。

5. 結論

複数の再生可能エネルギーを組み合わせた地域総合自然エネルギーシステムの運用特性、経済性とCO₂排出量への影響を評価し、以下のことが明らかになった。

風力発電とGHPについては、経済的に導入することが可能である。反対に、太陽光発電とバイオマス発電についてはほとんど導入されなかった。

また、本システムの利用により、従来に比べ72%のCO₂排出量が削減できることが明らかとなった。さらに、8%のコスト削減が可能となり、コスト面でも有利なことが明らかとなった。

謝辞 本研究は、東北大学大学院環境科学研究科 新妻弘明 教授、東北大学大学院工学研究科 新堀雄一 助教授、米国ローレンス・リバモア国立研究所Alan Lamont博士、岩手県環境生活部資源エネルギー課、岩手県葛巻町環境エネルギー政策課の協力を得ており、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 高見幸子, 羽田野祐治; 持続可能な社会を目指すヨーロッパの環境戦略—持続可能な社会構築を目指す試み—, 日本機械学会誌, 104-995 (2001), 26-30.

- 2) 新市場拡大措置検討委員会；新市場拡大措置検討小委員会・報告書，(2001)。
- 3) 駒橋徐；大容量システムから分散電源システムへ，原子力 eye, 47-6 (2001)，28-35。
- 4) 清水幸丸；自然エネルギー利用技術の小型分散化，空気調和・衛生工学, 75-8 (2001)，691-697。
- 5) S. G. Jensen and K. Skytte ; Interactions between the power and green certificate markets, Energy Policy, 30 (2002), 425-435。
- 6) D. A. Fuchs and M. J. Arentsen ; Green electricity in the market place : the policy challenge, Energy Policy, 30 (2002), 525-538。
- 7) S. Espey ; Renewables portfolio standard : a means for trade with electricity from renewable energy sources?, Energy Policy, 29 (2001), 557-566。
- 8) 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会；新エネルギー部会報告書，(2001)。
- 9) 堀米孝；再生可能（自然）エネルギーを基幹エネルギーに育てるための長期エネルギー政策（抜粋）－大胆なエネルギー政策の転換を－，資源環境対策, 37-6 (2001)，26-34。
- 10) 七原俊也；海外における風力発電の導入状況と電力システムへの影響，電気学会論文誌 B 電力・エネルギー, 120-3 (2000)，321-324。
- 11) 藤村亮一郎，安馬保吉；21世紀日本における太陽光エネルギー供給の可能性，日本エネルギー学会誌, 79-8 (2000)，819-825。
- 12) Y. A. Kara and B. Yuksel ; Evaluation of low temperature geothermal energy through the use of heat pump, Energy Conversion and Management, 42 (2001), 773-781。
- 13) A. Lamont ; Modeling renewable penetration using a network economic model, Lawrence Livermore National Laboratory, (2001), UCRL-ID-142082。
- 14) A. Lamont ; Design of storage systems using multiple storage technologies in renewable systems, Lawrence Livermore National Laboratory, (2001), UCRL-ID-142083。
- 15) G. Berry, A. Lamont and J. Watz ; Synergies in renewable energy systems, Lawrence Livermore National Laboratory, (2001), UCRL-JC-141615。
- 16) G. Berry and A. Lamont ; Carbonless transportation and energy storage in future energy systems, Lawrence Livermore National Laboratory, (2001), UCRL-ID-142084。
- 17) M. A. Elhadidy and S. M. Shaahid ; Optimal sizing of battery storage for hybrid (wind+diesel) power systems, Renewable Energy, 18 (1999), 77-86。
- 18) M. A. Elhadidy ; Performance evaluation of hybrid (wind/solar/diesel) power systems, Renewable Energy, 26 (2002), 401-413。
- 19) N. E. Bassam ; Renewable energy for rural communities, Renewable Energy, 24 (2001), 401-408。
- 20) S. Rozakis, P. G. Soldatos, G. Papadakis, S. Kyritsis and D. Papantonis ; Evaluation of an integrated renewable energy system for electricity generation in rural areas, Energy Policy, 25-3 (2001), 337-347。
- 21) J. K. Kaldellis and K. A. Kavadias ; Optimal wind-hydro solution for Aegean Sea islands' electricity-demand fulfillment, Applied Energy, 70 (2001), 333-354。
- 22) A. Lamont ; User's guide to the META*Net economic modeling system version 1.2, Lawrence Livermore National Laboratory, (1994), UCRL-ID-122511。
- 23) 葛巻町町づくり推進課；葛巻町新エネルギービジョン，(1999)。
- 24) J. E. Stiglitz；スティグリッツ 入門経済学，(1999)，269-323，東洋経済新報社。
- 25) Assumptions to the Annual Energy Outlook 2002, EIA, (2001), DOE/EIA-0554。
- 26) 葛巻町町づくり推進課；葛巻町バイオマスエネルギー導入可能性調査報告書，(2001)。
- 27) S. Takasugi, T. Akazawa, T. Okumura and M. Hanano ; Feasibility study on the utilization of geothermal heat pump (GHP) systems in Japan, Proceedings World Geothermal Congress, (2000), 3579-3584。
- 28) 財団法人日本エネルギー経済研究所計量分析部；エネルギー・経済データの読み方入門，(2001)。

