

再生可能エネルギーから見た世界のエネルギー供給特性
— 比較分析による我が国の現状評価 —
Renewable Energy Supply in the World and Japan

四 蔵 茂 雄* 原 田 秀 樹**
SHIKURA Shigeo* HARADA Hideki**

Abstract: In order to prevent global warming by reduction of CO₂ emission, it is needed that not only a change of present socio-economical situation in this world, but also more efficient energy use and energy conversion to more sound source must be pursued. Renewable Energy (RNE) is most promising energy source in an aspect of energy supply. In this paper, we analyze the present state of this energy in the world and in Japan. As a result, we conclude that (1) biomass energy is playing very important role not only in energy mix in less developed nations, but also in RNE mix in more developed nations, (2) Japan is now on the particular position in a context of RNE mix and a trend of energy supply and of governmental budget allocated for energy.

Keyword: Renewable Energy, Biomass, Hydropower, New Energy, Typology of Countries

1 はじめに

地球温暖化防止を図るためには、現在の社会・経済システムの変革を含めた抜本的な対策が必要であるが、なかでもエネルギー対策、特に省エネルギーとエネルギー転換を推進していく必要がある^{1), 2)}。再生可能エネルギー (Renewable Energy: RNE)^{3), 4)} は、途上国⁵⁾ では比較的安価なエネルギーとして概に広く利用されているが、先進国においても化石燃料に替わるエネルギー源として近年注目されつつある^{3), 4)}。石油・石炭等の化石燃料資源のほとんどを輸入に頼っている我が国においても、その開発と利用拡大は急務の課題であり、国際公約を達成するためにも必要不可欠な要件になっている。しかしながら一般に我が国では、途上国を含めた世界のRNEの利用状況と、国際的な状況に照らして見た場合、我が国の現状はどうなっているのか、についてはあまり明らかにされていない。本論文では、世界の国々をRNEによるエネルギー供給構造から類型化すると共に、個別RNEによる供給状況の先進国間比較分析により、我が国の現状と取り組みを評価するものである。

2 研究方法

2.1 利用データ

現在、アジア開発銀行 (ADB) や国連 (UN)、国連食糧農業機構 (FAO)、国際エネルギー機関/経済協力開発機構 (IEA/OECD) 等の機関において、エネルギー関連データが収集整備されている。しかしながら再生可能エネルギー (RNE) について見ると、ADBの提供データにはこのデータが含まれておらず、またUN、FAOではバイオマスエネルギーの一部が提供されているに過ぎない。これに対しIEA/OECDでは、バイオマスエネルギーや新エネルギーも含めたエネルギーのバランス表と、主要エネルギー指標の時系列データが提供されている。途上国については、データの入手性や分類方法に加え、データそのものの信頼性が低いなどの問題があると言われているが、現存する資料の中で唯一包括的な情報源であるため、本研究ではこれを利用し分析を進める (論文末の利用統計データ参照)。なお最近我が国の研究機関でも、RNEの重要性に着目し、そのデータ

* 舞鶴工業高等専門学校 Maizuru National College of Technology

** 長岡技術科学大学、環境システム工学系 Department of Environmental Systems Engineering,
Nagaoka University of Technology

をコンパイルしようという動きがあるが^{補註3)}、データそのものはまだ提供されていない。

2.2 研究方法

本研究では上述したデータを利用し、まず3.1節においてRNEに関する世界全体と先進国、途上国の概略を整理する。次に3.2節において、RNEを(1)水力発電、(2)地熱や風力、太陽光等の新エネルギー、および(3)まきや木炭、廃棄物等のバイオマスエネルギーに3分類し^{補註4)}、それらの供給エネルギー量と内訳から世界の国々を分類し、各国毎の特性を明らかにする。分析ツールはクラスター分析K法とし、市販ソフト (SYSTAT8.0) を利用する。分割数はあまり多すぎると意味を失うため、2分割から試行錯誤的に増やしていき、最終的に適切な解釈が可能な6分割のケースを結果として示す。さらに3.3節で、先進国のデータを用いて各国のRNEの構成比を比較分析することにより、個別RNEの普及状況を把握すると共に、我が国の状況を明らかにする。最後に3.4節で先進各国のRNEおよびエネルギー政府予算^{補註4)}の過去のトレンドを比較し、我が国の取り組みを評価する。

3 結果と考察

3.1 世界のRNE

Table1は、一次エネルギー総供給量 (Total primary Energy Supply: TPES) に占める化石燃料とRNEの割合およびRNEの内訳を、先進国と途上国に分けて表

Table 1 World Energy Supply and Renewable Energy

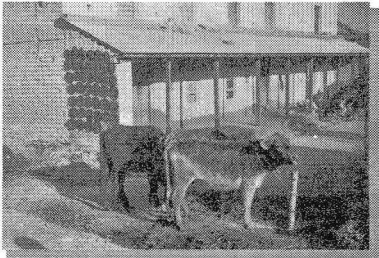
(%)	Fossil& Nuclear	Renewable Energy			
		Hydro	Biomass	New	
DC	79	21	11	88	1
OECD	94	6	38	53	9
World	87	13	18	79	3

DC: Developing Countries

したものである。これより、このエネルギーは先進国ではわずか6%に過ぎないが、途上国に限れば21%とかなりの割合を占めていること、また先進国のRNEはバイオマスエネルギーに加え、水力発電の割合が高い(38%)ことが特徴であるのに対し、途上国のRNEはそのほとんど(88%)がバイオマスエネルギーであること、さらに新エネルギーは先進国でもまだ9%程度であることなどがわかる。バイオマスエネルギーの重要性に対する認識は、我が国ではあまり高くはないように思われるが、世界的に見るとこのエネルギーは、石油、石炭、天然ガスに次ぐ第4位の貴重なエネルギー源である。またこのエネルギーに含まれる形態は実にバラエティー豊かであり、途上国では薪材や木炭はもちろん、家畜ふん、農業残渣なども利用されている (Photo.1 参照)。



(1)Fuelwood (Cambodia)



(2)Cow-Dung (Nepal)

Photo. 1 Examples of Biomass Energy used in Developing Countries

3.2 RNEの国際比較

Fig.1は各クラスターのプロファイルを表している。それぞれのグラフにおいて、ある国のプロフィールは、6変数の値を結んだひとつの折れ線として表されている。横軸は標準化されたデータの値であり、ゼロ点は全データの平均値を意味する。以上より、各々のクラスターを解釈すると、クラスター1は水力、バイオマス、新エネルギー共にその供給量が多いため「RNE型」、同様にクラスター2はバイオマスによるエネルギー供給量、供給割合が共に高い「バイオマス型」、クラスター3は水力発電の供給量、供給割合が高い「水力型」、クラスター4は新エネルギーの供給量、供給割合が高い「新エネルギー型」、クラスター5は水力発電の供給割合は高

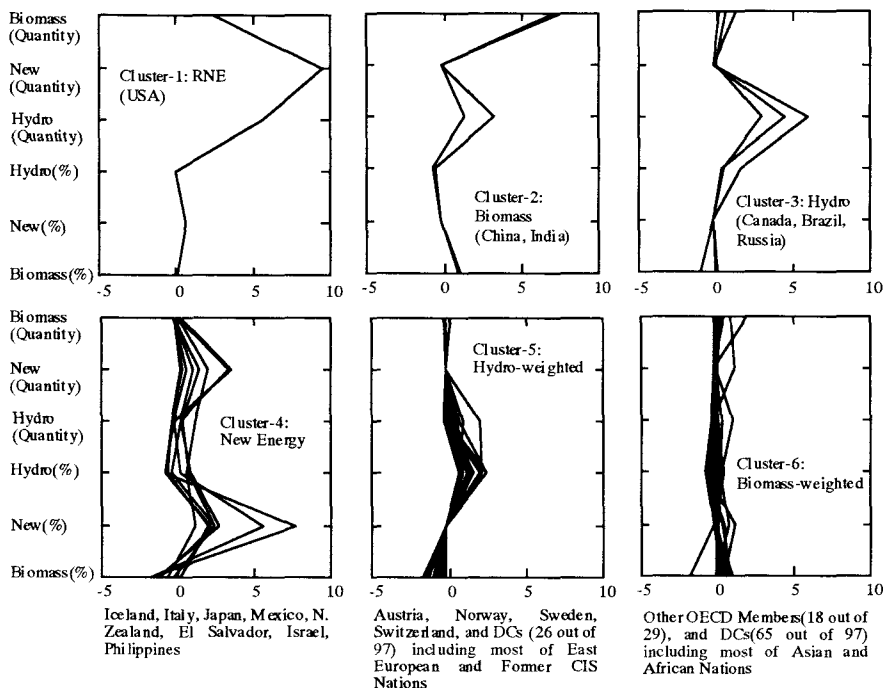


Fig. 1 Cluster Parallel Coordinate Plots

Note : Obscissa in each panel represents a data value in standardized form.

いが、その供給量は相対的に多くない「水力高比重型」、クラスター6はバイオマスの供給割合は高いが、その供給量は多くない「バイオマス高比重型」と命名した^{補注6)}。

米国は世界のRNEの25%を占めており、そのエネルギー供給量が他の国々を圧倒していることに加え、水力、バイオマス、新エネがバランス良く開発されているため単独でクラスター1に分類された。インドと中国は世界のバイオマスエネルギーの21%、20%をそれぞれ占めており、両国で「バイオマス型」クラスターを形成した。このエネルギーは、国内的にはインドでは第1位の、中国では石炭に次いで第2位のエネルギー源となっており、国内のRNEに占めるその割合もそれぞれ97%、92%と極めて高い。なお中国は、カナダ、米国、ブラジルに次いで現在世界第4位の水力発電国であるが、国内のRNEに占めるその割合は8%と小さい。次にカナダ、ブラジル、ロシアの3カ国は、水力発電量も（それぞれ世界第1位、3位、5位）、国内におけるその割合も高く「水力型」クラスターを形成している。我が国は、アイスランド、イタリア、メキシコ、ニュージーランド、エルサルバドル、イスラエル、フィリピンと共に「新エネ型」クラスターに含まれている。クラスター5は「水力高比重型」の国であり、国内のRNEミックスに占める水力発電の比重は高いが、カナダ、ブラジル、ロシアに比べ発電量は小さい国々のクラスターである。ここには、オーストリア、ノルウェー、スウェーデン、スイスなどの先進国に加え、旧ソ連邦諸国や東欧諸国を中心とした26カ国の途上国が含まれている。最後に、「バイオマス高比重型」のクラスター6には、多くの先進国（18カ国）と途上国（64カ国）が含まれている。特に途上国64カ国の構成を見ると、圧倒的にアジア、アフリカ諸国が多いのが特徴になっている。

以上より、世界のエネルギー供給をRNEから見た場合、米国は水力、バイオマス、新エネルギーのいずれに関しても、その供給量が極めて大きく特異な地位を占めていること、そしてこれとは対照的に圧倒的多数の国々は、いずれのエネルギー源に特化しているのかに関わらず、また先進国、途上国を問わず、比較少量のRNEを利用しているに過ぎないということが結論として導かれる。ただし、バイオマスについては、中国とインド、水力発電については、カナダ、ブラジルとロシア、新エネルギーについては、我が国を含む8カ国がこの例外として挙げられるということになる。結論の二つ目は、先進国でも約6割（18/29）の国々がバイオマ

ス高比重型クラスターに属しており、このエネルギーの重要性は単に途上国ばかりではないということである。現在このエネルギーは、我が国ではほとんど忘れ去られた存在になっているが、人類の歴史と共に長く利用されてきた、我々の最も身近にある貴重なエネルギー源である。今後我が国もこのエネルギーの利用に注目していく必要があるのではなからうか。

3.3 個別 RNE の普及状況

歴史的にもまた現在も、新エネルギーを初めとする RNE は、先進国を中心として開発が進められてきているため、本節では先進国のデータを用いてその普及状況をまとめる。Table2は各国の RNE の構成割合と供給量を表している。この表では前節で示されたクラスター毎に、上部（クラスター1）から順に下部（クラスター6）まで各国がまとめて配置されている。また構成割合が20%を越えるものは太字で示されている。まず一見して、カナダやオーストリアなどの「水力型」あるいは「水力高比重型」クラスターに属している国ばかりでなく、その他の国々も一般に水力発電の比重が高い事がわかる。ベルギーやデンマーク、ルクセンブルグ、ポーランド等は例外的に低くなっているが、これは水力資源量など各国のおかれた事情によるものと思われる。次に新エネルギーについては、我が国を初めとする「新エネ型」クラスターに属する国々は、地熱発電の比重が高いのが特徴となっている。ほとんどの国では、地熱は電力生産にのみ利用されているが、アイスランドでは熱の直接利用も進んでいる。米国では地熱の寄与は全 RNE の1割程度とあまり高くないが、供給エネルギー量自体は世界最大である。風力発電や太陽熱・太陽光利用は近年各国共積極的に開発を進めているとはいえ、依然名目的な状況に留まっている。風力発電御三家の米国、ドイツ、デンマークを見ても0.3%、3%、6.6%である。太陽熱・太陽光利用についても同様に、熱利用の進んでいるギリシャ（10.7%）以外は、まだ統計に現れる程の規模とはなっていない。

Table 2 Renewables in OECD Countries (1996, %)

	Hydro	Geo thermal	Solar	T, W & O	Wind	Heat Pump	Wood	Vegetal Waste	Black Liquor	Other Biom.	Indust. Waste	Munic. Waste	Other	Ktoe
USA	26.3	11.8	0.1	0.0	0.3	0.0	13.5	19.4	17.5	0.0	2.6	6.0	2.6	114,796
Canada	77.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	5.8	11.8	0.0	0.0	0.0	0.0	39,517
Iceland	29.2	70.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1,403
Italy	49.0	32.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	14.7	1.4	0.9	0.6	7,381
Japan	39.9	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.4	1.4	0.0	3.8	0.0	17,374
Mexico	17.4	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	37.6	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15,572
N. Zealand	48.0	36.8	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	8.6	0.0	0.0	1.2	0.0	1.3	4,619
Austria	55.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.7	8.3	4.5	0.0	0.4	1.0	0.1	5,261
Norway	88.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	0.0	2.0	0.0	0.0	1.2	0.2	10,126
Sweden	35.8	0.0	0.0	0.0	0.1	2.4	7.8	24.2	25.2	1.3	0.0	3.0	0.3	12,358
Switzer.	62.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	13.9	0.2	0.0	0.0	5.5	16.1	1.4	3,916
Australia	21.2	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	36.7	32.9	3.3	0.0	3.3	0.0	1.2	6,226
Belgium	3.6	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0	30.0	3.4	4.8	0.0	19.8	36.7	1.2	586
Czech	28.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.8	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	5.7	596
Denmark	0.1	0.1	0.4	0.0	6.6	0.3	14.7	36.5	0.0	0.1	0.0	38.2	3.0	1,585
Finland	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3	21.5	41.5	2.5	2.5	0.3	0.3	6,279
France	34.3	0.7	0.1	0.3	0.0	0.0	46.0	0.5	6.5	0.0	5.6	4.9	1.1	16,344
Germany	32.5	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	16.4	4.8	2.0	0.0	17.4	20.8	2.9	5,809
Greece	35.8	0.4	10.7	0.0	0.3	0.0	41.2	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1,046
Hungary	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	80.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	236
Ireland	34.3	0.0	1.1	0.0	0.6	0.0	60.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	181
Korea	16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.5	0.0	0.0	0.0	1,259
Luxemb.	12.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.5	0.0	0.0	0.0	0.0	46.2	2.6	39
Nether.	0.9	0.0	1.2	0.0	5.2	0.0	22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	54.8	15.1	737
Portugal	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.7	9.4	0.0	0.0	6.4	0.0	22.4	5,501
Portugal	52.2	1.8	0.7	0.0	0.1	0.0	0.2	39.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.1	2,431
Spain	48.8	0.1	0.4	0.0	0.4	0.0	25.6	10.4	8.8	0.0	1.9	2.4	1.1	7,008
Turkey	32.3	1.5	0.7	0.0	0.0	0.0	51.2	3.7	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	10,766
UK	18.1	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	10.3	6.7	0.0	3.5	5.8	28.3	24.7	1,596

Note: 1) Figures having more than 20% are made bold, 2) "T, W & O" means Tide, Wave & Ocean

これに対し、前節で指摘したように各国ともバイオマス利用が盛んである。「バイオマス高比重型」に属する国々では、木材（チェコ、アイルランド、ポーランド等）、植物残渣（デンマーク、ハンガリー、ポルトガル等）、黒液（フィンランド）、都市廃棄物（デンマーク、ルクセンブルグ、オランダ等）など、バラエティに富んだバイオマスの利用が進んでいる。「バイオマス高比重型」以外の国でも、メキシコやオーストリアで木材が、我が国やスウェーデンで黒液の利用割合が高い。

我が国は、総供給量では米国、カナダに次いで先進国中第3位（17,374Ktoe）であるが、その内訳は水力発電と地熱、黒液に特化しており、他の国に比べ木材や植物性廃棄物などの利用が遅れている。今後RNEによるエネルギー供給量を高めていくのはもちろん、エネルギー源の多様化を図っていくことが必要であろう⁷⁾。

3.4 取り組みの評価

Fig.2は各国のRNEとTPES（Total Primary Energy Supply）の過去のトレンドを対比したものである。45度の斜線より上は、TPESよりRNEの増加率が大きい国々が、下にはその反対の国々が位置している。TPESの増加率がマイナスであった国は、チェコ、ドイツ、ハンガリー、ポーランドのたった4カ国であり、我が国を含めた他の国々は相変わらず増加していることが示された。また、我が国は全29カ国の中で、アイスランドや韓国、ニュージーランド等（9カ国）と共に、RNEの増加率がTPESの増加率以下である国に含まれていた。これは極めて残念な結果である。

次に、Fig.3は政府のエネルギー研究開発予算におけるRNE予算と全予算の過去のトレンドを対比したものである。45度の斜線より上は、全予算よりRNE予算の増加率が大きい国々が、下にはその反対の国々が位置している。全予算が増加している国は、全20カ国中我が国を含めてわずか5カ国に過ぎないこと、またRNE予算が増加している国は、全20カ国中7カ国であり、我が国は全予算が増加する一方で、RNE予算は減少している数少ない国であること、さらに両予算の増減に関わらず、他の国が大きくそれらを変動させている中で、我が国は比較的小さな変動に留まっていることなどがわかる。

これらのことより、我が国ではRNEは期待されるほど増加していないこと、政府予算から見る限り我が国がRNEの利用を積極的に推進しているとは思えない状況であることが結論されよう。今後ヨーロッパの一部の国で見られるような大胆な政策転換が必要ではなからうか^{8, 9)}。

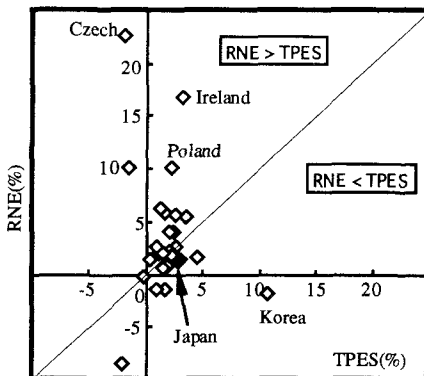


Fig.2 Average Annual Growth Rate of Energy Supply (1989-96)

RNE: Renewable Energy

TPES: Total Primary Energy Supply

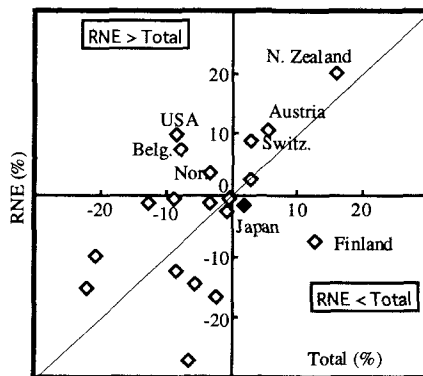


Fig.3 Average Annual Growth Rate of Government Energy Budget (1989-96)

4 おわりに

本論文では、バイオマスエネルギーはインドや中国を初めとする途上国ばかりでなく、先進国においてもRNEミックスにおける重要な地位を占めていること、また我が国のRNEは水力、地熱と黒液に特化している

ため、今後一層の多様化を（特に木材や植物性廃棄物等の利用を含めて）図る必要があること、しかしながら我が国では期待されたほどRNEの進展は見られず、政府の対応もこのエネルギーの普及にあまり前向きであるとは言えないこと、などが示された。

本研究に用いたデータは1996年時点のものであり、その後のRNEに対する積極的な民間セクターの参入や京都会議を受けた政府の対応等の影響が、実際の統計に現れるのは今後の事であると思われ、さらに注意深く見守っていく必要がある。

【補 注】

- 1)本論文では再生可能エネルギー（RNE）と廃棄物などの最利用性エネルギー源をまとめてRNEと呼ぶ。
- 2)本論文では、OECD メンバー国と「先進国」、非メンバー国と「途上国」をそれぞれ同義語として使う。
- 3)アジア経済研究所
- 4)廃棄物の主体は紙や食物残渣、植物残渣等であるため^{6, 7)}、ここではバイオマスに分類した。また、地熱については、我が国では新エネルギーとは見られていないが、本論文では分析の都合上新エネルギーに含めた。
- 5)最近各国ともRNEに対する民間投資が活発に展開されており、政府予算のみからその普及状況を評価することはできないと思われるが、ここでは以上に強く留意した上で分析を試みるものである。
- 6)クラスター6は、グラフからは読みとりにくい、その他の変数のクラスター内平均値が全て負であるのに対し、バイオマスの供給割合のそれは正の値となっている。

【利用統計データ】

- 1)IEA/OECD: Energy Balances of OECD Countries 1995/96
- 2)IEA/OECD: Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995/96
- 3)IEA/OECD: Energy Policies of IEA Countries

【参考文献】

- 1)IEA/OECD(1997): Energy and Climate Change
- 2)IEA/OECD(1997): The Link between Energy & Human Activity
- 3)IEA/OECD(1997): Renewable Energy Policy in IEA Countries Vol. I, Overview
- 4)IEA/OECD(1997): Key Issues in Developing Renewables
- 5)OECD(1999): OECD Environmental Data Compendium 1999, pp.166
- 6)四蔵、原田(1997): アジア開発途上国の都市廃棄物管理における技術オプション、一嫌気性消化技術の可能性について、環境システム研究 Vol.25, pp229-238
- 7)四蔵、原田(1999): 都市廃棄物の嫌気性消化－現状と課題－、廃棄物学会誌, Vol.10, No. 3, pp.241-250, 1999
- 8)四蔵、原田(2000): リニューワブルエネルギーに関する調査報告－デンマークとスウェーデンの現状－、舞鶴工業高等専門学校紀要, 第35号, pp.31-37
- 9)IEA/OECD(1998): Energy Policies of IEA Countries, Denmark 1998 Review