

新エネルギーの国内供給ポテンシャルと 原子力の資源評価

(財)電力中央研究所 経済社会研究所 上席研究員

東京工業大学大学院 人間環境システム専攻 客員教授 内山洋司

1. はじめに

我が国は一次エネルギーの85%を化石燃料に依存している。化石燃料への大量依存は、酸性雨やCO₂問題など地球環境問題を深刻にするだけでなく、エネルギーセキュリティにおいても将来の不安を大きくすることにもなる。政府は、長期エネルギー需給見通しで供給構造に脆弱な我が国が持続的な経済発展を確保しながら地球規模の環境保全を図っていくためには、化石燃料への依存を2010年には75%にまで削減するという目標を掲げている。化石燃料への依存度を下げるために期待されているのが新エネルギーと原子力発電である。それらは我が国がエネルギー供給において自立する上で重要なエネルギー源である。ここでは新エネルギーが国内でどこまで供給できるかそのポテンシャルを、また原子力発電の燃料であるウラン資源が高速増殖炉の開発によりどの程度の賦存量になるかについて調べた。

2. 新エネルギーの供給ポテンシャル

環境問題の高まりから、太陽光、風力、廃棄物発電といった新エネルギーに対して導入の期待が高まっている。新エネルギーについては1994年12月に総合エネルギー対策推進閣僚会議で新エネルギー導入大綱が策定され、将来の導入目標が設定された。同大綱は新エネルギーの導入を促進するための国の基本方針となるもので、次に示す重点分野について具体的な開発計画を打出している。

- ①太陽光発電など再生可能エネルギー
- ②廃棄物発電などリサイクル型エネルギー
- ③コージェネレーションなど従来型エネルギーの新利用形態

表1は、政府目標を示したもので、二次エネルギーベースで新エネルギーのシェアは、2000年には3.6%、さらに2010年には5.8%としている。新エネルギーの中で将来のポテンシャルが最も大きいのは、“従来型エネルギーの新利用”である。そのエネルギー源は、石油や天然ガスといった化石燃料である。それを除くと、国内で供給できる新エネルギーのシェアは、2010年で2.8%になる。

ここでは非化石燃料の評価に焦点を絞り、“従来型エネルギーの新利用”を除く“再生可能エネルギー”と“リサイクル型エネルギー”について供給ポテンシャルを検討してみることとする。再生可能エネルギーとリサイクル型エネルギーは、基本的にはローカルエネルギーである。再生可能エネルギーには太陽光発電、風力発電、森林バイオマスがあり、リサイクル型エネルギーには一般廃棄物と産業廃棄物がある。それらについて国内の供給ポテンシャルを調べてみることにする。

表1 新エネルギーの導入目標〔単位：万キロワット時〕

	1992年度 (実績)	2000年度 (新規施策)	2010年度 (新規施策)
再生可能エネルギー	113.74(12.6%)	325(21.2%)	655(24.1%)
太陽光発電	0.04	4	45
風力発電	0.1	1	2
太陽熱	113	300	550
温度差エネルギー	0.6	20	58
リサイクル型エネルギー	515.1(56.8%)	618(40.3%)	765(28.1%)
廃棄物発電	23.2	106	212
ゴミ処理排熱等	3.9	7	14
黒液・廃材等	488	505	539
従来型エネルギーの新利用	277.5(30.6%)	601.5(39.2%)	1,422(52.2%)
コージェネレーション	277	523	879
燃料電池	0.2	10.5	123
メタノール、石炭液化等	0	0	96
グリーンエネルギー自動車	0.3	68	324
合 計	906 (100%)	1,534(100%)	2,723(100%)
二次エネルギーに占める割合	1.5%	3.6%	5.8%

(1) 太陽光発電による発電電力量

太陽電池の生産が近年、急速に伸びてきている。1991年度の我が国の太陽電池の生産量は16,883kWpで、52%が電卓、時計などの民生用、43%が家庭電源や街灯などの電力用、4%が発電試験用に生産されている。電力用の太陽電池の導入先は、独立設備と系統連系設備とに大きく分けられる。独立設備は、さらに離島や僻地などの発電設備と、出力が500Wp以下で使われる公園休憩所の電源、屋外時計、交通標識などがある。系統連系設備は、一般住宅や工場など電気を通じている地域に電力系統と連系して設置するもので、個人住宅用の小規模システム(3kW程度)から電気事業用の大規模発電設備(1MW以上)まで様々である。

太陽電池の製造コストは、1974年頃は20,000円/Wp以上もしていたが、1980年には5,000円/Wp、現在では800円/Wpにまで下がっている。さらに将来は技術進歩と量産化により、そのコストを100～200円/Wpにまで下げていく目標がある。目標が達成できれば、太陽電池の発電コストは、設備利用率を12%と仮定して計算すると16～31円/kWhになり、そのコストは昼間の電気代程度になる。しかしこのコストはセルの製造コストだけで計算した値で、それにはインバータ、保護装置、輸送、据付けなどの費用は含まれていない。それらの費用は設置条件に大きく依存し正確な値を出すことは難しいが、現状でみると住宅用で約50万円/kW、地上設置で約100万円/kWである。

太陽光発電(PV)はクリーンな電源として、将来、我が国への大量導入が期待されている。ここでは、PVシステムについて我が国への導入量および導入過程を詳細に検討した結果^{4)・5)}を説明する。その分析は、全国を離島を含めて36地点に区分し、それぞれ

の地域における太陽光発電システムの需要先（約100種類）とその導入形態（約20種類）を詳細に調査し、それぞれについて導入ポテンシャルを推計したものである。さらに経済モデルによる普及分析シミュレーションで将来の導入時期と導入規模を求めている。主な結果は以下のとおりである。

①PVシステムの導入ポテンシャルを、イ) 立地制約はあるが導入可能、ロ) 立地制約と経済性は厳しいが導入の可能性はある、について調べた結果、前者の供給ポテンシャルは、独立型と系統連系型を含めて2,470万kWp、それに後者のポテンシャルを加えると4,660万kWpとなった。このPVシステムの供給ポテンシャルは、現在の我が国の総発電容量2億2,700万kWと比較した場合、それぞれ11%と20%、発電電力量9,900億kWhとの比較では、それぞれ2.6%と4.9%に相当している。

②経済モデルを用いた分析によると、設備費への資金助成なしに導入できるPVシステムは、通信用電源などの独立型システムに限られ、その普及量は2000年で1万kWp、2010年で9万kWp程度である。

③PVシステムの普及を早めるには資金補助が不可欠であり、もし家庭部門に設備費の50%を15年間補助し続けたとすると、2020年ころから急速に普及し始め、2030年までには累積量で43万kWpになる。

④全体の補助額を高めると普及量が大幅に高まる効果がある。年間補助総額80億円の場合の普及量は、40億円に比べ3倍になり、120億円にすると4倍になる。

⑤年間補助額が200億円で15年補助すると、助成期間終了と同時に市場だけで普及していくようになり、2030年には年間売上が1000億円のPV産業に成長する。PVシステムの累積普及量は2030年で460万kWpになり、政府の2010年の目標が達成されることになる。それによってCO₂排出量を3百万ト（炭素）／年だけ削減可能となる。

（2）風力発電のポテンシャル

風力発電は、風の持つ運動エネルギーを風車により機械的エネルギーに変換し、これにより発電機を駆動して電気を得る発電方式である。風から取り出せる風力発電の出力は、理論的には空気密度と風車ローターの面積に比例し、かつ風速の3乗に比例する。風車にはプロペラ形の水平軸風車とダリウス形の垂直軸風車とがある。これまでの導入実績を調べると、大きな出力が出せるプロペラ形風車のほうが数多く建設されている。

風力発電は、1970年代の石油危機を契機に、米国およびヨーロッパを中心にして導入が飛躍的に進んでいる。世界の風力発電は、独立発電機（平均出力100W）として約50,000基、系統連系しているもので約23,000基、その出力は220万kWになる。カリフォルニアは風力発電が最も多く導入されている地域で、1991年の実績では、約1万8,000基、発電出力で150万kW以上、年間電力量で約25億kWhにもなる。米国のカリフォルニア州では、州の電力量の42%が再生可能エネルギーで供給されている。その内訳は、水力23%、地熱13%、バイオマス4%、風力1.3%、太陽熱0.3%、太陽光0.1%である。

わが国における風力発電は、欧米に比べその導入量はまだ僅かである。発電出力が比較的大きい250kWの風車の他に、出力が3kW程度の風車も数多く普及している。日本の風況は、米国に比べて良くない。年平均の風速は小さく、山岳地や丘が多いため風も不安定で、ウィンドファームに適した広い面積の土地が少ない、また立地制約として、搬入道路の敷設、自然公園法の規制、送配電線の敷設、騒音、景観、ラジオ・テレビなどへ

の電波障害、さらに離島においては資材の搬入用の港湾施設を新たに建設するなどといった問題点もある。こういった様々な障害を考慮すると、我が国で実際に導入できる風力発電はカリフォルニアに設置されている数より少ないものと考えられる（カリフォルニアにおける風力による年間発電量は、我が国の総発電量の0.25%に相当する）。

日本における風車の運用実績はまだ少ないが、比較的風況のよい離島の風力発電（出力250kW）を例にみると、1～4月、11月、12月に強い風が吹き、設備利用率は年平均で20%程度である。一日の発電出力は平均して一定であるが、夕方になると風向きが変るため、島の電力ピーク時に電気が発生せず設備としての価値を得ることが難しいといった問題がある。また風車が駆動を始めるカットインの風速を5m/秒としているが、年間の風速分布を表す出現頻度は5m/秒以下が約半分もあり、風速の小さいエネルギーをいかに利用していくか、その技術開発もこれからの大きな課題となっている。

わが国における風力発電の導入を土地利用と風況から判断してみると、半島や岬、海岸、離島といった地点が最も有望である。日本の風況は冬季の季節風に最も大きく左右されている。強風地点として、北海道や東北地方の海岸が期待されるが、それ以外に、本州日本海側の海岸沿い、濃尾平野から遠州灘、房総半島の先端、宮城県の高城山附近、久慈海岸などがあげられる。また半島や岬では、北海道の北部と南部の襟裳岬、秋田県と青森県の半島、佐渡島の北側、犬吠崎、石廊崎、潮岬、室戸岬、足摺岬などが比較的強い風に恵まれている。

（3）森林のエネルギー生産量

我が国の森林面積は、国連食料農業機構の統計データ（1990年）によると25.1 haである。年平均の森林蓄積量は温帯林としてみると約240 t/haと推定される。その蓄積に要する期間は時定数で表すと40年と言われており（依田恭二、1982）、年間平均の蓄積量は6 t/ha/年になる。これから全森林面積を利用したエネルギー生産可能量を概算すると、 $25.1 \text{ Mha} \times 6 \text{ t/ha/年} \times 3.6 \text{ Gcal/t} = 5.4 \times 10^{14} \text{ kcal/年}$ となる。現在の我が国の一次エネルギー総供給が $5.44 \times 10^{15} \text{ kcal/年}$ であることから、森林によるエネルギー供給ポテンシャルはその10%に相当する。もちろん日本の森林は険峻地が多いため、実際にエネルギー生産に利用できる面積は限られており、すべてが利用できるわけではない。

（4）ゴミのエネルギー生産量

我が国の一般廃棄物の量は年間5,060万ト（1991年）になり、国民一人当たりにして1.12トである。ごみ焼却施設は、1995年6月現在で建設中を含めると181ヶ所になり、発電出力は769,642kWに達している。ゴミ発熱量は紙やプラスチックの消費に伴って増大しており、その値は石炭の3分の1の2,200 kcal/kg（低位）である。一般廃棄物をすべて焼却してエネルギーとして利用した場合、そのポテンシャルはボイラ熱回収率を74%として82,300 Tcal/年になる。

一般廃棄物とは別に、産業廃棄物である廃木材などの可燃性ゴミが年間約2,500万トだけ発生しており、この保有エネルギーは74,000 Tcal/年（発熱量：4,000 kcal/kg）となる。これから我が国で利用できるリサイクル型エネルギーの供給ポテンシャルは156,000 Tcal/年で、それは我が国の一次エネルギー供給の2.9%に相当する。

3. 原子力の資源評価

原子力発電は、新エネルギーと同様に、化石燃料の代替エネルギーとして導入が期待されている。特に高速増殖炉（FBR）が開発されてウラン（U）238が利用できるようなれば、ウラン資源は準国産エネルギーとして活用できることになる。

原子力発電は、火力発電に比べ燃料の消費量が極めて僅かである。100万kWの発電所を1年間稼働させると、通常、石炭火力で240万トンの燃料が必要になるが、軽水炉で消費される正味ウラン量は約1トンの僅かな量である。発電所からの排出物をみても、石炭火力からは430万トンの炭酸ガスと30万トンの石炭灰が排出されるが、軽水炉では炉内の核分裂で発生する核分裂生成物は約1トンである。核分裂生成物の量は、燃料の高燃焼度化やFBRの開発でさらに減少することになる。

ここでは、現在、推定されているウランの埋蔵量が、軽水炉によるU235の利用とFBRの開発によるU238の利用で、どの程度のエネルギー供給源になるかについて評価している。

（1）軽水炉

埋蔵量は枯渇性の天然鉱物資源に適用される概念であり、一般に「現在の技術と価格で生産しても利益が得られる鉱物の既知量」と定義される。ウラン資源量の評価は、OECD/NEAと国際原子力機関（IAEA）の協力で出版されている通称レッドブックと呼ばれる「URANIUM 1993-Resources, Production and Demand」に取りまとめられている（表1）。

表1 ウランの資源量（「URANIUM 1993-Resources, Production and Demand」）

単位：千トン・ウラン（金属）

	既知資源		未知資源	
	確認資源 (RAR)	推定追加資源 - I (EAR-I)	推定追加資源 - II (EAR-II)	期待資源 (SR)
経済的				} ~10,627
\$80/kgU以下	1,424	670	984以上	
\$80~130/kgU	659	296	1,137以上	
準経済的				
\$130/kgU以上	—	—	—	

RAR (reasonably assured resources)：確認埋蔵量(proved recoverable reserves)に相当する。

EAR (estimated additional resources)：地質学的な調査で採掘可能と看做された追加資源量。Iは既知の資源量でIIは未発見の推定量。

SR (speculative resources)：未開発地域で採掘の可能性のある推測値。

それによると西側世界における確認資源量(RAR)は、208.3万トン・ウラン（金属）である。確認資源量とは、その大きさ、品位および形状が明らかになった既知の鉱床中に存在するウランで、現在の実証された採掘・精錬技術により一定の生産コスト範囲内（山元での回収コスト：\$130/kgU以下）で生産されうる量である。それに対して推定追加資源(EAR)-Iとは、信頼度が確認資源に準ずるもので、「主に直接の地質学的事実に基づいて、良く探鉱された鉱床の延長部か、あるいは地質学的な延長性は明らかになってい

るが、鉱床の広がりや特性に関する知見などの特定データが確認資源と分類するには不十分な鉱床に存在すると推測されるもの¹²⁾と定義されている。RARとEAR-Iを合わせた資源量は、\$130/kgU以下のもので304.9万トンになる。ウラン資源には、さらに未発見の推定量であるEAR-IIとSRとがある。それらをすべて足し合わせたウランの総資源量は、現状では1,580万トン(海水からの採集ウランを除く)に達する。

もし世界の原子力発電所(3.56億kW:1994年現在)が天然ウランに0.71%だけ含まれるウラン(U)235を消費する軽水炉として発電を続けたとき、ウラン資源の可採年数はどの程度になるだろうか。計算を簡単にするため、世界の原子力発電所をすべて加圧水型軽水炉と仮定することにする。発電出力100万kWの在来型軽水炉の場合、ウランの年間平衡装荷量は、燃焼度31.9GWD/tで計算すると25.4トンである(燃焼度が51.2GWD/tにまで改良された加圧水型軽水炉の場合は17.2トンになる)。注1の計算式に従って可採年数を求めると、資源量により、36.7年(RAR)、53.7年(RARとEAR-I)、278年(RAR, EAR, SR)になる。

次に軽水炉のワンス・スルー方式で利用できるウラン資源量(U235)を石油に換算してみる。換算方法として、原子力発電の発電量を石油火力に置き換え、それから石油消費量を算出することにする。石油火力で1kWhの電気を得るためには、2,234kcalの石油が必要になる(送電端熱効率:38.5%)。これから100万kWの軽水炉の年間発電電力量(年設備利用率75%)を石油火力に置き換えると、石油必要量は14,180Tcal(=141.8万トン)になる。世界の原子力発電所をすべて石油火力に置き換えてみると、石油の年間必要量は5.05億トンになる。この方法でウランの資源量(U235)をすべて石油に換算すると、182億トン(RAR)、266億トン(RARとEAR-I)、1,360億トン(RAR, EAR, SR)の石油資源に相当する。石油の確認可採埋蔵量が1,383億トン(1996年B.P.統計)であることから、ウランの確認埋蔵量(RAR)はU235だけでみると、石油の確認埋蔵量の13%にしか過ぎない。

(2) 高速増殖炉

高速増殖炉(FBR:fast breeder reactor)は、天然ウランの99.3%を占めるウラン(U)238を親物質としてプルトニウムを生産し、それを燃料に発電するものである。FBRでの反応条件でプルトニウム(Pu)242までの連鎖反応を考慮すると理論的にみてU238の約98%がエネルギーの生産に寄与できることになる。これからエネルギー生産に寄与するU238の利用可能な資源量を求めると、天然ウランの資源量の0.973(=0.993x0.98)倍になる。しかし実際の増殖炉システムでは燃料サイクル工程における燃料損失を考慮して計算しなければならない(注2)。燃料損失を考慮して表2に示すFBRの炉特性²³⁾から燃料利用効率を求めると0.849になる。すなわちU238の資源量の84.9%がFBRで燃料として利用できることになる。

FBRはウラン資源の可採年数を飛躍的に伸ばすことができる。現在、世界にある原子力発電と同容量のFBRを運転し発電すると、消費する年間U238量は427トン(=1.2 x 356)になる。これから可採年数を計算すると(注3参照:ただし $\beta=0$ と仮定)、資源量により4,028年(RAR)、5,900年(RARとEAR-I)、30,000年(RAR, EAR, SR)の値が得られる。このように世界にある原子力発電所をFBRに置き換えて可採年数を計算すると、その値は軽水炉の112倍にまで増えることになる。

表2 高速増殖炉の炉特性²⁾

発電出力[MWe]	1,000				
熱効率[%]	40				
年平均燃焼度[MWD/t]	70,000				
設備利用率[%]	90				
燃料諸元	重金属 [t/年]	ウラン [t/年]	(U 238) [t/年]	プルトニウム [t/年]	ウラン濃縮度 [%]
平衡装荷燃料	11.75	10.69	(10.66)	1.06	0.295
平衡取出燃料	10.75	9.48	(9.46)	1.27	0.129

次にFBRで利用できるウラン資源量(U 238)を石油に換算してみることにする。発電出力100万kWのFBRが年設備利用率90%で発電する電力量は7.628GWhになる。それを軽水炉で計算した方法を用いて石油の一次エネルギーに換算すると17,040Tcal(=170.4万ト)のエネルギーになる。現在の世界の原子力発電容量に等しいFBRを運転すると、その年間のエネルギー量は石油火力に換算して6.07億トの石油に相当する。この計算方法でFBRで利用できるウラン資源量(U 238)をすべて石油に換算してみると、その値は24,400億ト(RAR)、35,800億ト(RARとEAR-I)、18兆ト(RAR, EAR, SR)になる。

このうちウランの確認埋蔵量であるRARの資源量を石油の確認埋蔵量と比較してみると、その値(24,400億ト)は石油の17.6倍にもなる。また石油換算18兆ト(RAR, EAR, SR)のウラン資源量は、石油の確認埋蔵量の130倍、地球上で採掘可能といわれている化石燃料資源量5.1兆ト²⁾(メタンハイドレイドを除いた石油系、天然ガス系、石炭系の在来型および非在来型の総資源量)の3.5倍に相当する膨大な量である。もし高速増殖炉の技術が確立できれば、化石燃料より遙かに多くの資源が確保でき世界のエネルギー資源の枯渇不安は解消することになる。

4. おわりに

新エネルギーである再生可能エネルギーとリサイクルエネルギーについて国内供給ポテンシャルを調べた結果、我が国の現在のエネルギー供給量と比較して、太陽光発電が約2%(電力量で約5%)、風力発電が1%以下、森林バイオマスが約10%、ゴミが約3%である。これらのエネルギーが最大限に利用できたとしても、その供給ポテンシャルは我が国の現在のエネルギー供給量の約16%を賄うにすぎず、国内で利用可能な再生可能エネルギー(水力と地熱を除く)やリサイクル型エネルギーが化石燃料を代替して我が国の主要なエネルギー供給源になることは不可能である。その打開策として、海外で再生可能エネルギーをメタノールや水素に転換して輸入することも考えられるが、その方法は経済的な困難さはもちろん化石燃料と同じ供給途絶の不安も大きい。

それに対して準国産エネルギーとなる原子力は、化石燃料に代って安価で安定に供給できるエネルギー源として十分な供給ポテンシャルがある。その確認埋蔵量はU 235で評価すれば石油の確認埋蔵量の13%にすぎないが、FBRを用いたU 238の評価では17.6倍になる。またウラン埋蔵量(RAR, EAR, SR)のエネルギー供給ポテンシャルは、石油の確認埋蔵量の130倍、地球上で採掘可能といわれている化石燃料資源量の3.5倍に相当する膨大な量である。高速増殖炉の技術が確立できれば、化石燃料より遙かに多くの資源が確

保で世界のエネルギー資源の枯渇不安は解消することになる。

特に資源小国である日本あるいはアジアの国々にとって原子力は、エネルギー供給の自立のためには不可欠な技術である。また原子力は地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出を抑制する技術でもある。世界が化石燃料から脱却していくためには、FBRを含めた原子力開発が大切である。

(エネルギーレビュー誌掲載予定原稿)

[引用文献]

- 1) 石堂昭夫「天然ウラン産業—その将来に対する考察—」動燃技報(PNC TN7410) No. 94(1995.6)
- 2) 米田文重「我が国におけるFBR導入のシナリオ」原子力工業、Vol. 40, No. 9(1994)
- 3) 内山洋司、伊東慶四郎「エネルギー資源」原子力基礎講座9、日本原子力文化振興財団(1996)
- 4) 今村栄一、内山洋司「太陽光発電の普及分析」電力中央研究所研究報告Y94011(1995)
- 5) 今村栄一、内山洋司「太陽光発電システムの普及展望」電力経済研究RY96002(1996)

注1) 軽水炉の可採年数(ワンスルー方式)

$$R/P = R_0 \times (C_n - C_d) / (P_r \times C_m)$$

R/P : 可採年数[年]

R_0 : 天然ウラン資源量[t]

C_n : 天然ウランのU235濃度[%] (= 0.71%)

C_d : 劣化ウラン濃度[%] (= 0.2%)

P_r : 軽水炉による年間ウラン消費量[t/年] (= 25.4 x 356)

C_m : 軽水炉燃料のU235濃度[%] (= 3.2%)

注2) 燃料損失を考慮したFBRの燃料利用効率 η の計算式。

$$\eta = m_r / (m_r + \alpha \cdot M)$$

m_r : 親物質反応量

α : 燃料損失率(= 0.02)

M : 親物質装荷量

注3) FBRによるウラン資源の可採年数(実際にはFBRの運転は余剰プルトニウムに依存するため、正確な式ではない)。

$$(R/P)_{FBR} = R_0 \times (1 - C_n/100) \times \eta \times (1 - L) \times (1 - \beta) / P_{238}$$

$(R/P)_{FBR}$: FBRの可採年数[年]

L : FBRでの未利用燃料割合(= 0.02)

β : FBR以外でのウラン238消費割合

P_{238} : FBRによる年間U238消費量[t]