キーワード

埋蔵量, 温暖化, 太陽光, バイオマス, カスケード化

正 員 茅 陽 一

(財)地球環境産業技術研究機構

1. エネルギーをめぐる制約

世界のエネルギー需要は、近代化に伴って急激に拡大してきた。20 世紀だけでも年平均 2% 強の伸びで、1 世紀でほぼ 1 けた近く増大したことになる。しかし、人間が地球の上で生活し、地球が有限である以上このような増加はどこかで制約に突き当たる。その制約とみられるのは、一つは資源、もう一つは環境である。

(1) 化石燃料資源の有限性

世界の一次エネルギーの 8 割近くは石油、石炭、天然ガスという化石燃料であり、その資源は当然有限である。問題はその有限性がどこまで深刻かだが、一時と異なって最近のエネルギー業界では割と楽観論が強い。

表 1 に示したのは、世界エネルギー会議とウィーンの国際研究所 IIASA の調査による数字¹⁾で、耐用年数、すなわち現在の消費量で資源量を除した値が記されている。

ここで確認埋蔵量が通常埋蔵量として知られている数字で、究極埋蔵量はまだ確認はされていないが、地質構造などからこの程度は将来回収出来るはず、と考えられる数字である。

見るとわかるように、たしかに石油の確認埋蔵量は 40 年程度と低いが、究極量は非在来資源（オイルシェール、タールサンドなど）を含めれば 100 年を超える数値が示されている。天然ガスはそれを上回る量があり、石炭にいたっては枯渇どころかまだ資源は豊富、といういい方が当てはまる。

(2) 温暖化の制約

一方、化石燃料を消費する際には様々な物質が排出される。かつて問題となったのは、硫酸酸化物と窒素酸化物で、それが溶解して酸性度が上がった雨が酸性雨である。

しかし現在最大の問題は二酸化炭素（CO₂）である。化石燃料は燃焼することによってエネルギーをうみ出すが、成分の大部分は炭素だから否応なしに CO₂ が発生することになる。過去 200 年の地球の大気中 CO₂ 濃度の変遷をみると、化石燃料の消費が始まった 1800 年ごろから急激に CO₂ 濃度が上昇しており、現在は 360~370 ppm の水準に達し、産業革命以前の自然のレベルと目される 280 ppm に比すると約 30% の増加となっている。

表 1 化石燃料の埋蔵量（耐用年数表示）
出所：WEC/IIASA, Global Energy Perspectives, 1997

	確認埋蔵量	究極埋蔵量
石油		
在来型	45 年	88 年
非在来型	54	162
天然ガス		
在来型	75 年	225 年
非在来型	103	241
石炭	500 年	1,700

このような CO₂ 濃度の上昇が地球表面の温暖化をもたらす可能性については、既にもう多くの出版物があるので言及を避ける。そして、この温暖化の持つ危険については各国の考えが一致し、1992 年に気候変動枠組条約という名で温暖化を抑止する対策を打つための国際条約が調印されたことは周知のとおりである。

この条約の基本精神は、条約冒頭に記されているように CO₂ を中心とする温室効果ガスの排出を抑制しその大気中濃度を安定化して温暖化の進行を食い止めることにある。しかし、これは容易なことではない。図 1 に示したのは、この大気中濃度安定化を実現するために必要な温室効果ガス排出シナリオ²⁾である。ここでは、最終的に安定化する温室効果ガスの大気中濃度レベルに対応してどのような排出が必要かを時間の推移とともに表示している。当然この曲線は一意に定まるものではなく、いろいろな曲線が考えられるが、ここでは代表的なものをそれぞれ 2 ケースずつ示してある。いずれにしても、現在からしばらくは発展途上国の経済発展と人口増大もあってどうしても排出は増加せざるを得ないだろう。しかし、やがては排出を削減せねばならず、それが図に示されている。

一体どのレベルに濃度を安定化すべきなのかについては定説はないが、考えられるシナリオとしてよく取り上げられるのは 550 ppm 安定化のケースで、同図をみると排出は最初しばらくは増大するものの、21 世紀末には現在の排出レベルまで削減し、3 世紀後には現在の排出レベルの 4 分の 1 程度まで低減することが要請される。

将来の世界の人口が少なくとも 100 億人を超え、発展途上国が大幅な経済発展を目指していることを考えると、この要請はきわめて大変なものと考えざるを得ない。

(3) 制約への対応戦略の必要

上記のように資源、環境の二つの制約を考えると、やは

Energy in 21 Century
By Yoichi Kaya, Member (Research Inst. of Innovative Tech. for the Earth).

図 1 CO₂ 大気中濃度安定化のための CO₂ 排出

り温暖化が最大のきびしい制約となることがわかる。一部には温暖化問題にはまだ科学的に解明されていない点が多い、として対応にちゅうちょする向きもある⁽³⁾が、気候変動がもたらす影響の大きさ、その時間的慣性の長さを考えると、やはり現在から対応を考えていくことが人類の子孫への責任であり、世界各国がそれを認識するからこそ気候変動枠組条約が締結されたといつてよいだろう。

そこで問題となるのは、図 1 のようなシナリオをいかにして実現するかで、基本となるのはエネルギー利用の大幅な効率化とクリーン化、特に脱炭素化であろう。最終的な CO₂ 排出のレベルの低さを考えると、その実現は従来の努力の単純な延長では到底無理で、抜本的な努力が必要となる。かつて 1977 年に A. Lovins が従来のエネルギーシステムの構造を批判して分散型のソフトパスという概念を主張した⁽⁴⁾が、この考えかたを従来のシステムを補完する形でいかにうまく取り入れていくかが今後の大きな課題となってくる。

以下の章では、その視点にたつて対応戦略のポイントについて述べる。

2. 自然エネルギーの利用

対応策の一つは自然エネルギー、すなわち太陽光、太陽熱、風力など太陽エネルギーの直接間接の利用である。また草木や農産廃棄物といういわゆるバイオマスの利用は、大気中の CO₂ をいったん光合成によって固定したものを再び放出するだけなのでネットの CO₂ の排出はゼロであり、太陽エネルギーの間接の利用と解釈することが出来る。これらのエネルギーの中でバイオマスは人類が昔から薪その他の形で活用してきたもので、現在でも発展途上国を中心に広く使われており、その量は世界のエネルギー総量の 10% を超えるといわれている。また、水力は、発電の形式で従来からもっとも利用されていたもので、現在世界の数% のシェアを占める。

問題は今後この自然エネルギーをどのような形でどこまで拡大出来るかにある。

図 2 太陽光発電コスト

(1) 太陽光

太陽電池の発展に伴って太陽光発電が急速にのびてきた。我が国では現在 13 万 kw の設備が存在するといわれ、これは米国を超えて世界第一位になる。ほとんどは住宅の屋根を利用する 3 kw 程度の小型電源で、電力系統と連携し利用されている。政府は 2010 年までの目標を 500 万 kw としており⁽⁵⁾、今後も太陽光発電は益々拡大する、と期待されるが、問題はやはりコスト、そしてそれに大きく関係するが出力の時間変動性である。

現在住宅用太陽光発電は 1,000 円/w 程度のコスト（耐用年限 20 年、メンテナンスフリーと考えて 50 円/kwh 程度）で、図 2 に示したように今後量産に従って益々コストは低下するものと見込まれる。しかし、この種変動電源は発電燃料を代替するといういわゆるエネルギー価値があるものの、従来電源の設備を代替するという設備価値はきわめて小さく、その breakeven cost はかなり低くなる。（現状の日本では数円/kwh）従って、同図に示すように今後の技術進歩と CO₂ や硫酸化物、窒素酸化物を排出しない、という環境上のメリットの考慮（例えば、炭素税の導入がこのコストの市場内部化にあたるが、日本ではまだ導入されていない）でこのコストギャップを埋めねばならない。

もう一つの大きな問題が出力の時間変動で、季節や一日の時間によって、また天候によって太陽光発電の出力は大きく変る。これは系統の従来発電設備にその変動のバッファとしての機能を要求することになる。太陽光発電は日照が強いときに高い出力を出すので、夏のピーク負荷時に出力が高くなる傾向を持つが、必ずしも日照がなくとも冷房負荷が大きくなるときが存在するので、太陽光発電があるからといって従来発電設備をその分省略するわけにはいかない。そして、この太陽光発電の出力変動は、短時間変動は系統の周波数制御、1 時間ないしそれ以上の長時間変動は経済的負荷配分 (ELD) にそのまま負担となる。従って、系統規模に対して相対的に大きな容量（数%ないしそれ以上）の太陽光発電を設置することは、技術的に大変困難な問題を引き起す。一方、太陽光発電の年間平均稼働率

は従来の系統発電所平均 50~70%の数分の 1 であるから、設備上限が容量ベースで数%ということはエネルギー (kwh) ベースではせいぜい%オーダーということになる。かなりきびしい制約といわなくてはならない。

これを克服するには、何らかの方法で出力変動を出来るだけ小さくすることで、将来の解決策は、

- a. 安価な蓄電設備の開発
- b. 宇宙の利用

であろう。前者については特に説明の必要はなからうが、後者は宇宙発電 (Space Power System, SPS) としてよく知られているコンセプトである。地球の食にならない程度の距離の宇宙空間に太陽電池の帆を打ち上げ、マイクロウェーブで送電するというアイデアで、各方面で注目されているが、実際の研究としては、1998 年に米国航空宇宙局がスタートした小規模な研究プロジェクトがほとんど最初だろう。たしかにこの方式は太陽エネルギーを時間的に変動しない形で採出出来るという大きな利点があるが、現状では設備そのものだけでなくその宇宙空間への打ち上げコストが大変高くまだ夢の段階でしかない。しかし、先に述べたように、温暖化問題は息の長い対応が求められており、その導入のインパクトを考えれば、現在から研究開発につとめるべき重要な技術ではなからうか。

(2) そのほかの自然エネルギー

現在世界的にみて、水力以外にもっとも導入が顕著な自然エネルギーは風力である。風力は、すでに中世の時代から使われていたという実績があり、またシステムも比較的簡単でコストも安いので、欧米でもかなりの量が導入されている (ドイツで 500 万 kw 規模)。しかし、風は本来太陽エネルギーの一部が変換されて生まれたもので、太陽光以上にエネルギー密度は小さく、現在行われている風力発電設備をみても平均太陽光の 7~10 倍という面積を要している。また時間変動も太陽光以上に大きい。従って、所詮部分的エネルギー源の域を出ないだろう。

一方、バイオマス、すなわち植物のエネルギー変換は、植物の光合成エネルギー効率が低いために太陽光、風力以上の大きな面積を利用しなくてはならない。その意味では困難があるが、一方、人間は農耕そのほかの形で大規模に植物生産を行っているの、それをうまく転用すれば状況は異なってくる。特に出力の時間変動という問題がないのも強みとなる。このため、IPCC の第二次報告書⁹⁾ではバイオマスは将来のもっとも有望な自然エネルギー源として扱われている。ただ問題はやはりコストである。従来のようにただ農産廃棄物を燃焼させる、といった方式は効率が悪いし使い勝手が悪いので、近年はガス化ないしメタノールなどへの液化技術の開発が進んでいる。ところが、この場合は、バイオマスの収集運搬に要するコストだけでも現在の石油・天然ガスの価格を上回り、どれだけ技術開発を行っても経済的に引き合いそうにないのが実情である。これを克服するには、植物の生産効率をバイオテクノロジーなどによって大幅に引き上げ、収集コストを相対的に引き下げ

る、バイオマスエネルギーのクリーン性を考慮して何らかの経済的優遇措置をとる、といった処置が必要だろう。

(3) 住宅・都市での自然エネルギー利用

これまで述べたのは、従来のエネルギー源と同様に、まず自然エネルギーを電気などの普遍的二次エネルギーに変換し利用する方策だったが、住宅や都市など比較的低温の民生熱需要に対して自然エネルギーを充当することが考えられる。従来から使われていた「パッシブソーラー」は、家を太陽熱を取り入れやすい構造に作るという形で太陽エネルギーを利用する一つの例であるが、最近はやり積極的ないろいろな形で住宅や都市周辺の自然エネルギーを利用する努力が進められている。

現在広く普及しているヒートポンプも自然エネルギーをくみ上げて用いている、という意味で自然エネルギー利用の一つの例といえるが、それ以外にもいろいろな方式がある。多いのは地下や周辺の水の利用で、いずれも熱容量が大きく、住宅内にくらべて夏は涼しく冬は暖かい熱源となることを利用している。東京箱崎のシステムは下水処理場の水を利用するものとしてよく知られているが、北海道大学の low energy house は地下にアースチューブを敷設し、地下を熱源として利用するシステムである¹⁰⁾。また、住宅周辺に緑を多く配置しようとする構想は、1990 年前後に建設省で行われた環境共生住宅構想をはじめとして多くのところでみられるが、これは夏の住宅の冷熱需要を低減する効果をもつ、という意味で別な形の自然エネルギー利用ということができよう。今後は、このような努力が一般住宅・都市に大きく広がっていくことを期待したい。

3. カスケード化によるエネルギー効率利用

自然エネルギー利用と並んで CO₂ 削減へ有効な方策は省エネルギー、すなわちエネルギー利用の効率向上である。そのためのもっとも一般的で有効な方策は熱のカスケード利用、すなわち高温利用の廃熱を低温需要に利用する方式である。

(1) 発電における利用

カスケード化の典型的な例が複合サイクル発電で、天然ガスでガスタービンを動かし、その廃熱を回収して蒸気を作り蒸気タービンを回す方式である。近年はタービン冷却技術の進歩でタービン入り口温度が 1,300 度台まで上がり、熱電変換効率は 50% (HHV ベース) にまで到達している。数年のうちには 53% 効率の複合サイクル発電も運開すると予想されている。世界的にも新しい天然ガス発電は大部分複合サイクル発電に移っているが、通常火力が 40% 未満の効率であることを考えると著しい効率向上といえる。

石炭火力、ごみ発電などの上流に天然ガスとガスタービンを追加しその廃熱を従来のボイラーに投入する repowering という方式もこの複合サイクル発電の一つの変形とみることが出来るが、天然ガスだけのケースに比べてどこまで有利かが明確でなく、どこまで導入されるかは今後

の技術的努力にかかっている。

(2) 分散電源とコ・ジェネレーション

最近注目されているのはマイクロタービン、固体高分子燃料電池などの新しい小型電源である。これらが予想されているように近い将来にkw当たり数万円のオーダーになれば、ビルや住宅に需要地近接電源として設置され、その発電廃熱を民生熱需要に充当するコ・ジェネレーションを行うことが期待される。

民生用熱需要は、たかだか数十度の温度のものが多く、このような方式だけでなく先きに述べたようにヒートポンプで周辺自然エネルギーを汲上げることでも供給出来るから、問題はコスト面でこれら既存方式にどこまで対抗出来るかにかかっている。

(3) 産業廃熱の民生利用

欧米の寒冷気候の地域では、産業廃熱を民生熱需要に供給するシステムがかなり普及している。ライン川中流のDuisburg付近のシステムは、石炭火力、製鉄所、化学工場など多種の産業が共同で廃熱を供給しており⁽⁸⁾、これが供給の安定化に大いに役立っている。我が国では気候が温暖で温熱需要が特に夏期に乏しいため、まだほとんどこうした方式は普及していない。しかし、将来冷熱技術が進歩し比較的低温の廃熱で低コストで冷熱が供給出来るようになれば、状況は大きく変わってくるだろう。

4. 原子力と核融合

原子力は、世界的に風当りの強い電源で、最近ドイツ政府が最終的には原子力撤廃に踏み切る決定をしたことは周知のとおりである。このような原子力のアクセプタンスの悪さが、チェルノビルで象徴されるような発電所事故にかなりの原因があることは明らかだが、今後の問題はむしろ放射性廃棄物の処理にある。物理的にはともかく、社会的に処理を受け入れる場所が乏しいため、多くの国で処理の最終的見通しがたっていない。このことは使用済み燃料の再処理のいかんとは別の問題である。

しかし、このようなアクセプタンスの悪さは裏腹に、現実には日本を含めて多くの先進国では原子力は電力の10%以上を占めている。今後の温暖化制約のきびしさ、自然エネルギーの拡大の困難性を考えると、少なくとも今後数十年の範囲では原子力は大型のエネルギー源の一つとして維持していくべきものであろう。

それ以後の原子力エネルギーをどうするかは、先に述べた放射性廃棄物処理の問題が解決し、しかも高速増殖炉などのウラン238を利用する技術がどこまで安定し、社会的に受け入れられるかにかかっている。

一方、核融合については従来の分裂炉に比べて放射性廃棄物の発生が格段に少なく、資源的にも問題が少ないが、何といてもまだエネルギーの生産が実証されていない技術であり、これに将来を託するのは尚早である。当面は、その開発を長期的な眼で支持し状況を見守るのが適当であろう。

5. 過渡期方策としての二酸化炭素回収処理

ここで見逃してはならないのは、火力発電所などのCO₂大規模排出源からのCO₂回収処理である。CO₂は硫酸化物などの公害物質に比すると格段に排出量が多く、しかも化学的に安定で常温気体であるので、その回収処理には従来の公害対策に比べれば大きなコストを要するし、エネルギーの損失も無視出来ない。従ってこの方策を軽視する向きがあるが、これまで述べたように当分の間は人類は化石燃料に頼らざるを得ず、省エネルギーに限界があることを考えるとその間の対応策としてCO₂回収処理は有効な方策である。すでにノルウェーでは北海の天然ガス田で随伴するCO₂を回収し、そばの海底帯水層に圧入する処理を1997年から実施している。回収処理コストは現状の推定では発電コストの数%とたしかに高いが、自然エネルギーなどに比べれば相対的に安く技術的にも容易である。処理の場所は、油田ガス田(石油や天然ガス増収のための方策としても利用可能)、地下帯水層のほか現在は海洋処理が大きなポテンシャルを持つものとして注目されている。この分野は現在2年に1回国際会議に数百人を集める⁽⁹⁾ほど世界的にも大きな関心を集めている。

このようにCO₂の回収処理は今後非化石燃料中心の世界に移行するまでの過渡期技術として重用されるだろう。

6. おわりに

今後の社会は、地球環境という大きな制約条件を満たしつつ長期的には資源制約の少ない非化石燃料へ移行する必要がある。それをいかにスムーズに実現するか、それが人類の今後の大きな課題だろう。

(平成12年8月18日受付)

文 献

- (1) N. Nakicenovic, et al ed: Global Energy Perspectives, Cambridge Univ. Press, (1998)
- (2) J. A. Lakeman, ed: Climate Change 1995, WG-I Contribution, p. 25, Cambridge Univ. Press, (1996)
- (3) G. T. Westbrook, : IAEE Newsletter 8, Fourth Q., p. 25 (1999)
- (4) A. Lovins, : Soft Energy Paths, Friends of the Earth, (1977)
- (5) 通産省編: 21C地球環境時代のエネルギー戦略, 通産産業調査会, (1998)
- (6) M. C. Zinyowera, ed: Climate Change, WG-II (1995) Contribution, Cambridge Univ. Press, (1995)
- (7) 浜田・落藤・ほか: 空気調和・衛生工学会論文集, No. 73, (1999)
- (8) GHGT-5 held in Cairns, Australia, August 13~16, (2000)

茅 陽 一 (正員) 1957年東京大学卒業, 78年同大学電気工学科教授, 95年退官, 同名誉教授となる。同年慶応義塾大学大学院教授, 98年(財)地球環境産業技術研究機構副理事長/研究所長。94年度電気学会会長, 現在, エネルギー資源学会会長, 政府総合エネルギー調査会会長。専門エネルギーシステム工学。