

新連載

第1回

低炭素社会実現のための 電化シナリオ

日本はこれから低炭素社会に向かって進んでいく。そうした時代要請の中で、「電気」は温室効果ガスの削減に決定的な役割を果たすことができる。しかし、その特性は一般に よく知られていない。温暖化対策における「電気」の有効性を12回にわたり連載する。

(財)電力中央研究所「電気と環境のフォーラム」

1 IPCC報告書を どう読むか

7月29日、「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定された。そこでは、「日本は2050年までに、60から80%という数値を目標として掲げ、大規模な温室効果ガス削減を図る」ことが掲げられている。このことを、どう解釈して、どのように取り組めばよいのか。

「60%から80%」という数字は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書に記載されていた数字で、この報告書から、以下のことが読み取れる。

まず、気候変動は重要な脅威であり、その緩和のための努力が必要というところ。そして、気候変動の被害を小さくするためには、50年ないし100年という長期にわたって、地球全体の温室効果ガス排出を極力少なくする必要があるということである。大気中の濃度上昇を止めるためには、排出量を現状の半分以下にしなければならず、かつ、そのタイミングは早ければ早いほうがよい。

ただし、60%から80%という数字そのものは、絶対視すべきものではない。この数字は、その実施可能性について吟味を経た数字ではないし、IPCCが推奨しているわけでもない。そもそも、IPCCの役割は既存の学術研究をレビューして整理することであって、数字についても、ある学者がそのような論文を書いたというところの域を出るものではない。温暖化問題は、それが人為的な温室効果ガスの排出によって引き起こされていることには疑いはない。しかし、具体的に、どの程度の被害が生じ得るかについては、大きな不確実性がある。このため、現状の科学的知見においては、どこまで排出量を減らさねばならないかという、その閾値を定めることはできない。

また仮に、地球全体での排出量を定めたとしても、それが各国間にどのように分配されるかについては、大きな自由度がある。日本については言えば、途上国に排出の機会を譲ろうとすれば、極端に言えば排出量はゼロだという意見もある。あるいは、世界で最もエネルギー効率の良い工業国として温暖化対策技術を世界に供給し続けるのだとすれば、現状より排出量が増えてもよいかもしれない。

以上を踏まえると、日本としては、どのように考えればよいだろうか。われわれは、以下のようなスタンスを採るべきと考える。途上国での排出増加を考えると、先進国としては、限りなく少ない温室効果ガス排出を



杉山 大志

(財)電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員。「エネルギー技術政策のシナリオ分析」プロジェクト課題責任者。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書主著者。著書に「これが正しい温暖化対策(エネルギーフォーラム賞優秀賞)」など。



西尾 健一郎

(財)電力中央研究所 社会経済研究所 主任研究員。エネルギーシステムの分析と評価に関する研究に従事。

目指すべきだろう。50年までに大きな削減を目指すにしても、決して、そこで止まるというものではなく、その先には、できる限り100%に近い排出削減を目指すための中間点と位置付けるべきである。そして、これは、先駆的に温暖化対策技術を開発し、世界に向けて供給するという、日本の重要な役割と調和するようにはしていきたい。

2 数値目標達成という理想と現実の不確実性について

多くの機関によって、60%以上の大規模な排出削減を達成するシナリオが描かれている。そこには、共通した特徴が見受けられる。いずれも、理想的な想定が描かれる傾向であり、それがどの程度現実的かという吟味が十分ではないことがある。理想的な想定は、社会像と政策の実施の両面にわたって現れる。

社会像としては、よくある「未来イメージ」のように、SFのような技術が普及するとか、あるいは、人々の道徳意識が変わり聖人君子の集まりになるとか、自給自足を始めると

いったような、「こうあってほしい」という将来像が描かれる。しかし、過去の経験的事実に照らして、そのような将来像は実現性に乏しいために、具体的な政策の指針とすることはできない。

政策の実施についても、省エネルギー政策によって、大幅なエネルギー消費削減ができるという理想的な姿がよく描かれる。しかし、これは、どの程度現実的だろうか？

過去にも、省エネルギー政策には大変な努力が払われてきたが、政策の設計も執行も理想的にはいかないことから、エネルギー消費を横ばいしないし緩やかな増加に抑える程度にとどまってきた。このことは、今後とも、どのような政策を採ったとしても、変わらないかもしれない。

また、エネルギー消費の量は経済活動の規模におおむね比例するので、エネルギー消費には、少なくとも、経済成長率と同じくらいの不確実性が存在する。つまり、1%だけ経済成長率が違うと、50年後には、50%以上の違いが出て

くる。このような理由により、50年後のエネルギー消費量やCO₂排出量の絶対値について、確たることを予言することは事実上不可能である。

以上のような不確実性があるために、長期的かつ大規模な排出削減の数値目標を確実に達成するということは、どのようなシナリオにおいてもできない。しかしながら、長期的に大規模に削減するための「戦略は何か」、そのための「手段は何か」ということであれば、それについて、われわれは提案をすることができよう。

3 低炭素社会実現の「電化シナリオ」

それでは、50年に60%ないし80%削減を「目指し」、さらに2100年にはなお一層——できれば、100%近くまで——の排出削減という方向性を掲げた場合に、具体的にどのような方法があり得るだろうか。

われわれは、電気利用を推進することで温暖化防止を実現するという

「電化シナリオ」を提案したい。このシナリオによって、排出削減量は60%に達しないかもしれないし、あるいはそれを上回るかもしれない。もちろん、結果としての排出量には不確実性はあるが、採るべき戦略および手段としては、われわれはこれが有望な方法であると考えている。

以下の作業の方針としては、現在確立している技術、および将来において確立する見込みの高い技術によってシナリオを構成する。このシナリオでは、人々のライフスタイルや国土の風景は、それほど今日と変わらない。われわれは、問題の解決に興味がある。従って、どこまでも現実の問題として考えたい。たとえ理想的であっても、空想的で、蓋然性の低い将来像の提示では、具体的な行動の指針とならないからである。

われわれのシナリオは、概念としては単純である。それは、①電気利用の省エネルギー、②電気による直接燃焼の置き換え、③発電のCO₂原単位の改善、の3つの柱から成る。手短かに説明をする。①について、電気機器については、新しい機器が

今後も多く開発されるだろう。そこでは、急速で大幅な進歩が見込まれる。特に、半導体についてはムーアの法則として知られる指数関数的な技術進歩が常態となっており、これを利用したIT・ディスプレイ・太陽電池・LED照明などの技術は、今後も急速な進歩が期待できる。

②については、ヒートポンプなどの技術によって、電気利用をできるだけ進め、ストーブやボイラーによる直接燃焼を置き換えることを想定する。給湯ヒートポンプや電気自動車に代表されるように、電気利用は直接燃焼に比べて効率が顕著に高い場合が多く、また、今後の技術進歩も見込めることから、これは排出削減にとって重要な手段である。大規模な排出削減のためには、可能な限り電化を進めることが重要である。しかし、すべてを電気で賄うことは難しい。これを表現するためには、非電気エネルギーの「本質的利用（エッセンシャル・ユーズ）」という考え方が便利である。

ここで、本質的利用とは、技術経済的なコストが非常に高つくため

に、どうしても電気で代替できないエネルギー利用のことを指す。例えば、製鉄業における高炉粗鋼生産やセメント業における焼結工程がこれに相当する。

もともと、この「本質的利用」という言葉は、オゾン層保護に関するモントリオール議定書の中で使用された。これは、フロン全廃を目指す中でも、医療用など、当面、有望な代替方法が見つからないものを総称するために出てきた言葉である。ここでは、同様な考え方を、温暖化問題における非電気エネルギーの利用に当てはめて考えていく。

すべて電化して、電気のCO₂原単位を下げれば、CO₂は大幅に削減できることになる。電化に限度があるとするれば、なぜなのだろうか？それは、将来も同じなのだろうか？電化されていない部分は、非電気の本質的利用なのか、それとも、新しい技術で電化できるようになるのだろうか？

③の「発電のCO₂原単位の改善」については、現在の人類の手持ちの技術の中から、最も日本で実績もあ

り今後有望な選択肢は、原子力発電である。もちろん、これ以外にも、幾つもある重要な技術は存在する。これらの組み合わせによって、今日に比べて大幅にCO₂原単位を削減することができるだろう。

このように、われわれのシナリオは、電気に専ら注目することになるが、この点については、ほかの研究機関のシナリオから、さほどかけ離れているわけではない。ほかの大規模削減シナリオを見ても、その多くは、電気が主要なエネルギー供給形態となっている。これは、発電側において原子力、天然ガス、再生可能エネルギーなどのCO₂の低いオプションがあり、需要側において高い効率の機器が存在するという電気の特徴による。

例えば、国立環境研究所のシナリオにおいても、民生部門においては、電気がエネルギー供給の大半を占めており、石油・ガスの直接燃焼は極めて少なくなっていく。ただし、これらの先行研究では、国など公的機関によってなされていることもあり、多くの産業やエネルギー利用技術の

バランスを取ることを重視する傾向にあり、技術的な実施可能性の吟味が必ずしも十分とはいえない。

また、これら既存のシナリオでは、電気が果たす極めて重要かつ特異な役割に着目した記述を十分に行っていないという点で、大規模な排出削減の本質を突いていない。

4 60%削減の試算例

以下、仮に50年までに日本のCO₂排出を60%削減するとしたら、どのようなエネルギー需給の姿が取り得るか、その試算例を紹介する(図1)。

●試算の前提

人口や世帯数については厚生労働省見通しに基づいて推定する。50年の人口は9500万人程度になる。エネルギー需要については大きな不確実性があり、予測は難しいが、以下のように想定する。

まず、民生・運輸部門については、さまざまな要因が寄与する結果として、エネルギーサービス需要の原単位が、今日と大きく変わらないとす

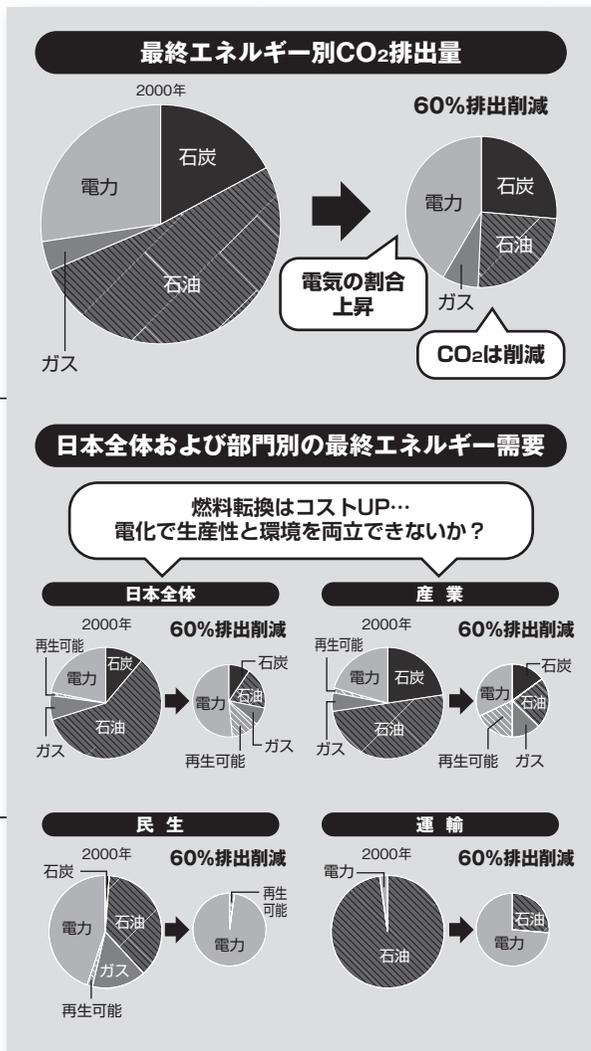


図1 低炭素社会実現のための「電化シナリオ」の試算例
 (上) =最終エネルギー別CO₂排出量、(下) =日本全体および部門別の最終エネルギー需要。
 共に、2000年実績値、および、2000年比で60%排出削減をする場合の試算例を示す。
 ここでは、経済活動水準を下げることなく、エネルギー利用を電化することを通じて、
 日本のCO₂を大幅に削減するようなエネルギー需給の姿を描いている。産業部門の燃料
 転換がコスト高で現実的でないならば、電化によって生産性向上と環境を両立できない
 だろうか。

る。すなわち、民生部門は世帯当たりエネルギーサービス需要を、運輸部門では人口当たりエネルギーサービス需要を今日と同じとする。なお、エネルギーサービス需要とは、エネルギーによって実現される物理的なサービスの量であり、例えば、自動車であれば人数×距離(人・キロ)、貨物輸送であれば重量×距離(トン・キロ)で表現される。家庭で言えば、世帯当たりの冷暖房負

荷や給湯負荷である。一般に、エネルギーサービス需要は、経済活動の増加に伴って増加するが、他方で、省エネルギーも推進される。これら両者が作用した結果として、過去10数年を見ると、エネルギーサービス需要はおおざっぱに言って横ばいないし緩やかな増加をしてきた。ここでは、今後、省エネルギーが一層進展するとの期待を込めて、今後はエネルギーサービス需

要が横ばいで推移すると想定する。なお、先行研究では、しばしば、省エネルギー政策が完全に設計され執行されると考えることで、省エネルギーのポテンシャルを技術的な限界まで最大限見積もっている例もあるが、ここでは、そのような想定はしない。よりよい政策を設計し執行することはもちろん重要であるが、現実の社会においては、その効果には限度があるのが常であり、この試

算でもそのように考える。

産業部門においては、過去、生産水準は向上しつつも、エネルギー消費原単位が改善してきた結果、過去10数年については、エネルギー消費量はほぼ横ばいで推移してきた。今後については、趨勢が継続し、わずかな減少にとどまると想定する。なお、生産水準に関しては、他機関の大幅排出削減シナリオの中には、産業の空洞化を想起させるものもある。

しかし、われわれは、これは温暖化問題の解決策ではないと考え、また、日本の製造業の今後への期待も込めて、そのような生産水準の低下は想定しないこととする。

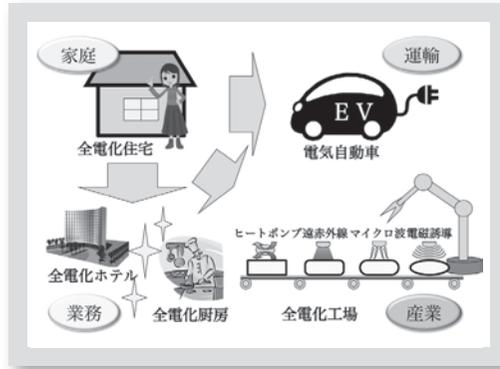
●電気利用の進行

このシナリオでは、現在進行している電化が着実に進行するとしている。家庭部門の全電化は今後も進行し、業務部門にも波及する。運輸部門についても、プラグイン・ハイブリッド自動車、電気自動車、鉄道輸送などによって電化が拡大する。また、産業部門でのヒートポンプ利用が拡大する(図2)。

ところで、このような徹底的な電

図2 あらゆるエネルギー利用における電化の進行

電気は便利・安全であるという特徴により、家庭においては大幅な全電化が進行している。技術進歩によって、電化の波は、運輸・業務・産業と、あらゆる部門で進行して、生産性の向上や労働環境の改善に寄与している。2050年までには、一層の技術進歩と地球環境への配慮によって、エネルギー利用の大半の電化が可能かもしれない。



化は、経済合理性を持つのだろうか？これについては、もちろん、技術開発や低コスト化が重要な鍵となることは間違いない。しかしながら、経済合理性を考える枠組みを小さくとらえずに、電化という現象の本質をとらえ損なう恐れがあることに留意が必要である。電化という選択肢は、多くの場合、見かけ上のコ

ストが高くても、選択される。それは、便利で、安全で、環境影響が少ないからである。これらの要素を含めると、電化の経済合理性は飛躍的に高まる。このような理由によって、家庭、業務および運輸部門においては、大幅な電化が進行する可能性がある。

家庭や業務部門で既に電化が進行しているのは、この議論の良い傍証である。運輸部門では、よりハードルは高くなるが、大気質の改善などの大きなメリットがあるため、電化の可能性はおおいにありと思われる。

●産業部門における電気利用の進行
ところで、産業部門においては、民生・運輸部門に比べると、非電気エネルギーが有利な場合が多いために、その利用は、一定程度継続するだろう。

このことを前提とし、かつ、「日本全体で50年比で60%の排出減」とするためには、産業部門においては、天然ガスやバイオマスの利用拡大によって、現在に比べてCO₂原単位を低減することが必要、という試算

結果になってしまふ。ただし、これは大幅なコスト負担になる可能性があるために、その実現のためには、国際競争力に悪影響を及ぼさない工夫が必要となる。このためには、国際的な政策協調が必要となるだろう。

これよりも、もっと魅力的な選択肢として、産業部門のさらなる電化が検討に値する。前記の試算では、産業部門の電化の可能性については、財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターの見積もりにおおむね沿っている。しかし、この見積もりは、100℃以下の熱利用の一部についてヒートポンプで置き換えることしか想定していない。今後は、120℃の蒸気利用をヒートポンプで供給できるようにするかもしれない。あるいは、多様な応用技術があり、かつ、急速な技術進歩が見込まれるという電気利用のメリットを最大限活用する形で、新しい生産工程を創出することも可能だろう。

民生部門での技術進歩が波及する形で、さまざまな「全電化工場」が出現するかもしれない。このようなことも検討すると、電化の可能性は

もつと高まると考えられる。産業部門における非電気エネルギーの「本質的利用」は、素材製造にかかわる高温エネルギー需要であり、それは、製鉄業、石油化学業、非鉄精錬業、窯業土石業に集中して、産業部門エネルギー消費の約半分を占めると考えられる。

これ以外は電化の対象になると考えると、産業部門の電化率は、現在の2割程度から、5割程度まで伸びることになる。電化によって、生産性の向上とともに温暖化対策を実現できるかもしれない。

●ゼロ・エミッション電源の拡大

日本全体でCO₂を60%削減するためには、試算上、発電部門のCO₂原単位は大幅に下げなければならなくなる。このためには、図3に示すように、高効率化などを通じて、火力発電の原単位改善に加えて、CO₂排出がゼロに近いゼロ・エミッション電源を大幅に拡大する必要がある。

ゼロ・エミッション電源として、これまで最も実績があるのは、原子力発電である。試算上は、原子力発

電を、現在の設備（50000万kW）、今後の全計画（17000万kW）に加えて、50年までに23000万Wを加えて90000万kWとする必要が出てくる。

これは大幅な拡大ではあるが、社会的な支持があれば、今後42年間で40000万kWの追加は不可能ではない（なお、この計算では、設備利用率は90%としている。これが80%

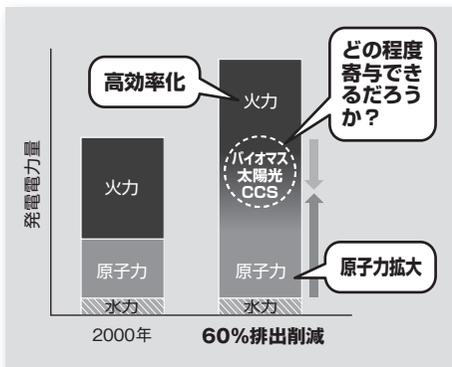


図3 低炭素社会実現のための「電化シナリオ」における発電電力量
2000年実績値、および2050年において日本全体で2000年比60%のCO₂削減をする場合。高効率化などによる火力発電原単位の改善に加えて、ゼロ・エミッション電源の大幅な拡大が必要となる。ゼロ・エミッション電源としては、実績に照らして原子力が最も有力な候補であるが、バイオ・太陽光・CCSなどにも期待がかかる。

ならば、さらに9000万kWが必要になる。

この時の全発電電力量に占める原子力発電の割合は5割強程度と高くなるが、フランスの現状である9割よりは低い。もちろん、欧州と日本は電力系統の性質が異なるので単純に比較はできないが、5割強程度であれば、運用上の問題もクリアできると考えられる。

もちろん、ゼロ・エミッション電源としては、原子力発電だけではなく、バイオ発電、太陽光発電、CO₂回収貯留（CCS）利用発電など幾つかの技術がある。

これらの技術については、クールアースエネルギー技術革新計画の下、野心的な目標が掲げられており、官民挙げての研究開発がなされている。大いに期待があるが、まだ技術シナリオとして成熟段階にはないため、どの程度まで大規模に発電に寄与することができるかについては予断を許さない。技術開発を推進することはもちろんのこと、冷静な技術評価も併せて実施していく必要がある。

●80%の削減は可能か？

なお、日本全体で80%もの排出削減をするとなると、極めて野心的な想定が必要になる。産業部門の排出は、一層の燃料転換ないし電化などの技術革新によって大幅に減らさねばならないことになる。また、ゼロ・エミッション電源がさらに大量に必要となり、この大半は原子力に頼ることになるだろう。

仮に必要なゼロ・エミッション電源のすべてを原子力で賄うならば、試算上それは1億2000万kWとなり、これは、現在の設備容量である5000万kWに対して今後42年間で7000万kWの増加となる。

これは160万kWの発電所で換算すると、44基分の増設に相当する。技術的に見れば決して不可能な数字ではないが、極めて大きな挑戦であることは間違いない。

5 世界と日本

本稿では、これまで、専ら日本の文脈でシナリオを考えてきたが、ここで、世界に目を転じてみたい。

世界規模でも、温暖化防止のため

には、電気利用が最も重要な柱になることは疑いがない。日本の果たす最も重要な役割としては、日本で培った先進的な電気利用技術を、ビジネスを通じて世界に提供していくことが挙げられるだろう。これは日本の国益にもかなう。

他方で、世界規模においては、日本とは技術的な優先順位が異なる場合もあるだろう。例えば、米国・中国・インドでは、国産石炭による火力が発電部門の主力であることから、大規模な排出削減のためには、CCS（CO₂回収・貯留）が不可欠な技術となるだろう。これらの国々でCCSが進む場合には、日本もCCSを実施しやすい環境が整うと考えられる。

このときには、海洋貯留への理解も進み、これも選択肢となるだろう。他方で、CCSがうまく進まない場合には、世界規模でのCO₂排出削減には限りがあるだろう。

他方で、世界規模でのCO₂排出がかなり抑制されるとしても、温暖化の被害が、かなりひどい形で、さまざまな場所で顕在化する可能性も

ある。このようなリスクをよく理解することがもちろん必要である。そして、そのようなリスクに受動的に対処する、気候変動への適応の研究や、緊急対策手段として、太陽光を直接に遮へいするジオエンジニアリング（地球工学）技術も、重要な研究対象となってくる。

6 結び

本稿で提示したシナリオについては、その実現に当たっての課題は幾つも考えられ、また、代替的な将来像も複数考えられる。それに対応する課題もさまざまなものが存在し、これらの技術の見直しについては、冷静な見極めが必要と考えられる。提示したシナリオは、あり得る将来像のひとつにすぎず、回答であるというよりは、議論の出発点である。

今後、われわれは、少なくとも、以下のような問いに答えていく必要がある。

- ▼すべての部門で、電気利用を推進するために必要なことは何だろうか。
- ▼原子力の拡大のために必要なこと

は何だろうか。

- ▼CO₂の地中および海洋貯留（CCS）、バイオマス発電、太陽電池発電などは、原子力発電を補完する役割を担うだろうか。その見直しはどうか。

▼太陽電池を大量に導入するための課題は何か。バッテリーなどの必要な補助設備を含むと、太陽電池のコスト目標はどこまで引き下げなければならぬだろうか。太陽電池・バッテリー・プラグイン自動車・系統接続といった機器を組み合わせて経済合理性の高いシステムを構築することは可能だろうか。

▼CO₂排出量の少ない電源構成になると、その運用上の課題は何だろうか。

▼省エネルギーによって、エネルギー需要はどの程度まで削減できるだろうか。

▼電化を推し進めた場合に弊害や脆弱性は無いだろうか。

▼エネルギー安全保障を重視すると、技術の選択はどのように変わるか。

電化も省エネルギーの推進も、温暖化対策とエネルギー安全保障の両

面に寄与するロバストな戦略である。ただし、エネルギー安全保障へ対処するためには、より多様な技術についての研究開発が必要になるだろう。例えば、石炭火力発電において、利用可能な石炭の種類を多様化するという技術課題は、このような文脈においてより一層重要になる。

現在の科学的知見によれば、地球温暖化は重要な問題であり、日本は、長期的に大規模な削減を目指す必要がある。遠い将来の排出量については、さまざまな不確実性があるために、それを予言することは、どのようなシナリオにおいてもできない。

しかしながら、われわれは、採るべき戦略および手段については、確たることが言える。電化の促進を通じた温暖化問題の解決が、現在の技術的知見に照らして、最も有望な方法であろう。

民生部門と運輸部門は電化を通じて大幅なCO₂削減が可能だろう。産業部門においては、燃料転換という選択肢もあるが、これは大きなコスト負担を伴うものになり、現実的でないかもしれない。これに代わる

方法として、産業部門の一層の電化によって、生産性を向上しつつ温暖化対策を進める可能性は、今後、大いに検討の価値があるだろう。

発電部門のCO₂原単位低下のためには、火力発電の効率向上とゼロ・エミッション電源の拡大が必要である。ゼロ・エミッション電源としては、実績に照らせば原子力が最も有力であり、これは、社会的な支持があれば、技術的には大幅な拡大が可能である。そのほかにも、太陽電池・バイオ、CCSなどの技術進歩に期待ができる。

大規模な排出削減は決して容易なことではなく、これを実現するための課題は多く存在する。他方で、さまざまな将来に備えるために、幅広く技術の将来性を見極めて、開発を進めていく必要がある。本連載では、次回以降、これらの個別の課題について専門的な立場から解説をしていく。

（掲載予定…2008年11月号より09年10月号まで12回）