

## ■ 展望・解説 ■

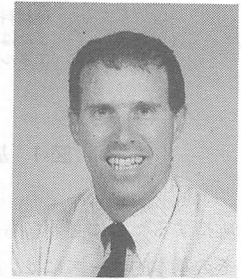
# デマンドサイドマネージメントによる効率的な エネルギー使用とその限界について

Toward More Efficient Energy Use through Demand-Side Management and Its Limit

アラン マイヤー\*

Alan K. Meier

(日本語訳：武田 宣輝，スタンフォード大学)



## 1. はじめに

デマンドサイドマネージメント (DSM) の概念は、既に世界中の電気・ガス業界で広く知られるところであり、程度の差はあれ多くの国で実施されている。しかし、その普及があまりに急速であったため、エネルギー需要と、エネルギー効率の向上との関連に対して十分に理解されていない場合が多い。その結果、エネルギー使用の削減に対するDSMの役割と、その可能性に関する議論が、しばしば不完全となっている。本論文は、エネルギーに対する需要を広い見地から改めて吟味することを目的とし、さらに省エネを理解するためのフレームワークを提案してみたい。また、その全体像の中でDSMの利点と限界を明確にしていきたい。

諸外国では、DSMは省エネとピーク需要の削減の両方の意味合いを含むものと定義づけられている。しかし日本では、DSMはピーク電力需要を削減するための電力会社のプログラムであると捉えられている向きがある。本稿では、更に広義の定義に基づいて論を進める。すなわち、輸送業や他の産業部門を含めて、全てのエネルギー関係のコストを削減する行為をDSMに含めるものとする。この場合DSMは省エネとピーク需要の削減を含むばかりでなく、政府のプログラム (エネルギー効率基準・規格の策定等)、エネルギーに関する地方建築条例、公共料金制度等もその対象となる。

## 2. 需要サイドから見たエネルギー

エネルギー種別需要量については良く知られているが、それがどの様に使われているかということについ

ては無関心なことが多い。例えば、電気を供給するのに利用されている技術についてはよく知られているが、アメリカにおいて冷蔵庫の消費電力がアメリカの全消費電力の8%を占める<sup>1)</sup>ことや、電気モーターがアメリカの電力消費の半分以上を占めている<sup>2,3)</sup>事実を知らされると驚くであろう。おそらく日本の場合、これらの割合はアメリカのそれ以上であると思われる。冷蔵庫の例は機器別に、電気モーターの例は最終用途別に需要サイドのエネルギーを分類する方法を示しているが、需要サイドから見たエネルギーの分類方法には、重要なものとして次のものが挙げられる。

- ・燃料別

- ・機器別

- ・最終用途別

- ・業種別

- ・熱力学的性質別

この様に分類することによって、エネルギーがどの様に使われているのか、あるいは変換効率の向上や再生可能エネルギーへの転換によってエネルギー需要をいかに減らすことができるかといったことについての示唆を見出すことが可能となる。

DSMの観点から見ても、この分類方法は重要である。DSMプログラムでは機器別、最終用途別、あるいは燃料別にそれぞれ基準を定めているであろう。このような分類をすることによって、何が省エネを実行するために最も重要な対象かということが浮かび上がってくる。(但し、いつもそれが最も費用効率の高いものを示しているとは限らない)

## 3. エネルギーと基本的ニーズ (fundamental needs)

人間はエネルギーを消費することそのものを目的としているわけではない。とはいえ、エネルギーがなぜ必須かということを理解することは重要である。人間は単にいくつかの「基本的ニーズ」、すなわち生命を

\* Staff Scientist, Energy and Environment Division  
Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory  
住所: Bldg 90-2000 University of California Berkeley,  
California 94720, U.S.A

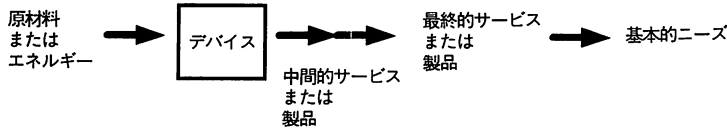


図-1 基本的ニーズを満たすためのエネルギー、デバイス、中間サービスの役割

維持するために必要なものを求めているに過ぎない。

その基本的ニーズには、次のものがある。

- ・空気、食物、水
- ・住居
- ・快適な気温
- ・衛生状態
- ・他人との接触（生殖という意味ばかりでなく、会話等の社会的刺激も含む）

多くの中間的サービス・製品（intermediate services and products）は、基本的ニーズを満たすための最終的なサービス・製品（final services and products）に実際に到達する前に使用される。例えば、人間には食料（基本的ニーズ）が必要であるが、その食料を加工するためには、コンロ、照明、その他の器具の助け（中間的サービス）が必要であるし、その食料を調達するために車（中間的サービス）を利用する。従って、エネルギーに対する需要とは、実際には中間的サービスに対する需要ということになる。すなわち、エネルギーと、中間的サービス・製品との関係を理解することが重要となってくる。

図-1では、その関係は「デバイス」と書かれた箱で単純に示されているが、このデバイスとはエネルギー・原材料を、中間的サービス・製品に変換するものことである。このデバイスには、電球等の簡単なものから、石油精製工場のような複雑なものまで含んでいる。産業界では、上に挙げたような基本的ニーズを直接的に満たすことは希であるが、考え方は応用可能である。この「デバイス」箱を理解するためのひとつの方法を以下に述べる。

ほとんど全てのサービスまたは出力は、図-2の「サービスプロット（service plot）」で表すことができる。このサービスプロットは、あるデバイスがどの様にエネルギーを測定可能なサービスに変換するのかを示している。例えば、温水器は電気を何リットルかのお湯に変換するし、飛行機は航空燃料を何kmかの乗客輸送に変換し、また電球は電気を何時間分かの明りに変換する。

サービスプロットは主に下記の要領で描写されている。

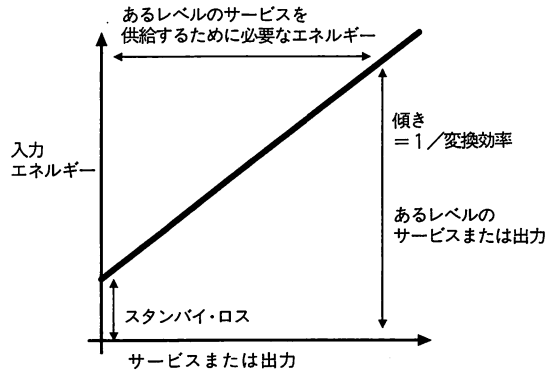


図-2 サービスプロットとその主な特徴

る。

- ・横軸は供給されるサービス・出力を示す。
- ・縦軸は入力エネルギー量を示す。
- ・サービス・ライン（service line）は、入力エネルギーと、供給されるエネルギー・出力の関係を示す。

暖房の様な簡単なサービスでは、「デバイス」は単にヒーターである。飲料用アルミ缶の製造の様な複雑なサービスでは、「デバイス」はアルミ缶工場全体を意味する。表1ではサービスまたは製品、そしてそれらを測定する方法を例示する。

簡略化のため図-2ではサービス・ラインは直線として示されているが、曲線にも成り得る。一度サービスのレベル（あるいは製造レベル）が（給湯量：リットル/日という具合に）特定されると、入力エネルギーは計算可能な量となる。

サービス・ラインは、入力エネルギーがゼロより上のところで縦軸と交差している。これは多くのデバイスが、たとえサービスや製品を全く供給しない時であってもエネルギーを消費しているためである。これは、「スタンバイ・ロス（standby loss）」と呼ばれる。

スタンバイ・ロスは、エネルギー消費全体と比べ些細な部分として片づけられがちであるが、実際にはスタンバイ・ロスは看過できないことが多い。表2にスタンバイ・ロスの例を挙げる。

スタンバイ・ロスは古い機器、または機械的システ

表1 サービス・出力の例と実際に測定される量

サービスまたは出力	測定可能な量
暖房	特定の温度における時間 (hour)
冷蔵	特定の温度に維持されている重さ (kg)
給湯	特定の温度で供給される一日当たりの量 (リットル)
照明	建物内における一週間当たりのルーメン (lumen) 時
セメント	一月当たりに使用されるセメントの重さ (トン)
コココーラの製造	リットル/日
パンの製造	斤/日
パイプライン輸送	立方メートル/時間
エレベーター	乗客数・階/時間
鉄道	乗客数・km

表2 様々な活動に見られるスタンバイ・ロス

機器またはシステム	どの様にスタンバイ・ロスが起こるのか?
冷蔵庫	冷蔵庫の中身に関わらず壁から損失する熱
テレビ	瞬時起動用の予備電源およびリモコンのセンサー
ラジオおよび小型電気機器	低圧トランス側にスイッチがあることによる低圧電源ロス
車,トラック,バス,その他	スピードに関わらず稼働しているファン,ポンプによる燃料消費
発電所	待機中予備発電機
無停電電源	充電ロス (topping-off losses)
スーパーコンピューター用電源	AC/AC (60Hz->400Hz) 周波数変換ロス
建物および産業用換気装置	負荷に関わらず発生する定常流
変圧器	無負荷損失
オフィス照明	非常口用電灯
エレベーター	AC-DC変換損失
信号	交通量がない時の点灯

ムのみに限られたものではない。実際多くの電気機器はスタンバイ・ロスとしてかなりの部分のエネルギーを消費している。自動車用エネルギーの約半分はスタンバイ・ロスである。すなわち、停車中でもアイドリング、ファンの回転、他の装置などからエネルギーを失っている<sup>4)</sup>。

サービス・ラインの傾きは、エネルギーからサービス・製品に変換する際のデバイスの効率の逆数に対応している。平らな線は高い変換効率を意味する。この概念は、より複雑なデバイス、例えば石油精製所のようなところにも適応できる。実際、アメリカでは石油精製所あるいはセメント工場の操作管理者は、厳密にこの変換効率を監視している。(そしてそれは社外秘であることが多い)

4. 様々なデバイスに対するサービスプロット

入力エネルギーとそれに対するサービスとの関係を示すフレームワークは、単純であるが、そのデバイスがどの様に機能するかという点において驚くほど強力である。

デバイスのおかれている様々な状況を例示するため、いくつかの典型的なデバイスに対するサービスプロットを以下に示す。

白熱灯は最も単純なサービスプロットである。サービスの定義を一週間に白熱灯を点けている時間とするならば、サービスプロットは図-3の様になる。サービスレベルが高ければ高いほど、週当たりの白熱灯の使用時間が長いことを表している。すなわち、サービスレベルが横軸方向右に移動する。白熱灯に関してはスタンバイ・ロスはない。

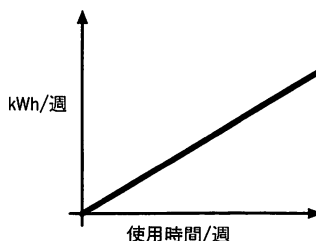


図-3 白熱灯のサービスプロット

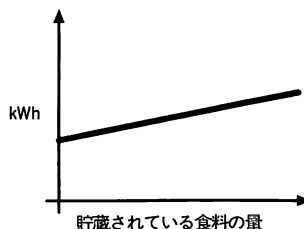


図-4 冷蔵庫のサービスプロット

冷蔵庫は、スタンバイ・ロスが全体のエネルギー使用の大部分を占めるので、異なる特徴を示す。(図-4) 大半のコンプレッサーでの仕事は、外部から壁面を伝って侵入する熱を除去するために使われる。ドアの開閉に伴う温度上昇の再冷却や、冷蔵庫内部の食品の冷却のために使用される仕事は比較的少ない<sup>1)</sup>。サービスを冷蔵庫の中で食品の貯蔵と定義するならば、サービス・ラインは(より大きな冷蔵庫が必要となるまで)ほとんどフラットになる。たとえ空の冷蔵庫であっても、沢山のエネルギーを消費する。高レベルのサービスにおけるわずかなエネルギー使用の増加は、ドアの開閉や食品の冷却に起因するものである。大規模輸送システム、レーザープリンター、冷却塔用ポンプ、エスカレーターといったデバイスでも、サービスプロットは冷蔵庫と同様の挙動となる。

ある種のデバイスのサービスプロットでは、スタンバイ・ロスとそれ以外のエネルギー使用量がほぼ等しくなる。アメリカの典型的な家庭での給湯は、水を加熱した後、それを150~200リットルのタンクに貯蔵している。古いタンクの断熱性能は低く、スタンバイ・ロスは給湯に要する全エネルギーの約半分を占めている。サービスプロットは図-5のようになる。この場合、変換効率は、ヒーター部分と給湯システム全体の効率を反映している。このようなサービスプロットの特徴を持つデバイスは、エネルギー使用状況を解析することにより省エネの余地を見いだす可能性が高いので、一般的に最も興味深い。自動車は、このタイプのもう一つの重要な例である。

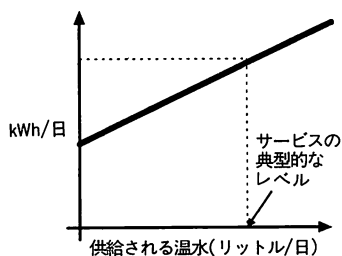


図-5 (貯水タンク付) 温水器のサービスプロット

## 5. 直接的省エネ (direct energy saving) 行動の種類

経済的な意味でのエネルギー消費行動の大多数は、比較的単純なサービスプロットで表現され得る。そのサービスプロットは、直接的省エネ行動を理解する上

でも有益である。多くの省エネ行動は、次のタイプのうちのどれかに分類される。

- ・スタンバイ・ロスの削減
- ・変換効率の向上
- ・出力・サービスレベルの縮小

これら3種類の省エネ行動の違いは、サービスプロットを用いて次のように説明される。

### 5.1. スタンバイ・ロスの削減

スタンバイ・ロスの削減は、サービス・ラインの垂直方向下側へのシフトに対応する。(図-6) 例えば、冷蔵庫壁面の断熱性を改善したときに、このようなシフトが起こる。省エネ効果( $\Delta E$ )は、縦軸に現れる。

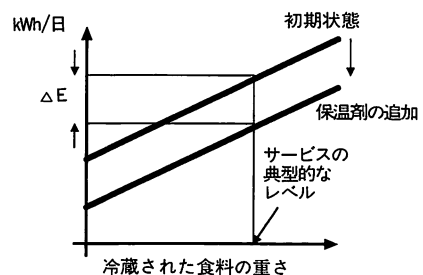


図-6 スタンバイ・ロスの削減

### 5.2. 変換効率の向上

変換効率の向上は、サービス・ラインの傾きの減少に対応する。図-7に自動車または照明の効率向上の例をサービスプロット上に示す。ここでも、効率向上による省エネ効果 $\Delta E$ (すなわち入力エネルギーの減少)は縦軸上に現れる。

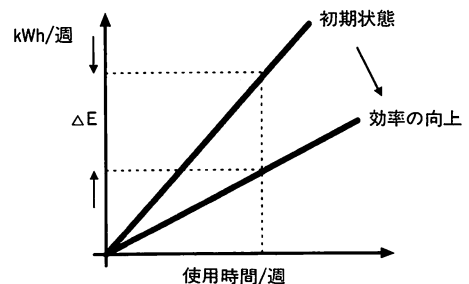


図-7 変換効率向上の影響

### 5.3. サービスレベルの縮小

サービスプロットは、あるレベルのサービス・出力を供給するのにどのぐらいのエネルギーが必要なのかを示しているが、実際にどのぐらいのサービスが必要とされているかということを示している訳ではない。例えば、暖房のサービスプロットにおいては、サービ

は建物に供給される暖かい空気量として定義されるが、建物の暖房負荷は固定値と仮定している。しかしながら、建物に断熱材を施したり、空気の漏れ込み量を減少させれば、暖房のための熱量をより少なくすることが可能である。自動車のエンジンは燃料を消費し、ある量の動力を供給するが、自動車の空気抵抗を減少させれば、燃料消費量を削減することが可能である。

建物における暖房負荷や車の空気抵抗を減少させることは、サービスプロット上のサービスレベルを縮小させることに対応する。これは図-8におけるサービス・出力レベルの左方向のシフトとして表される。

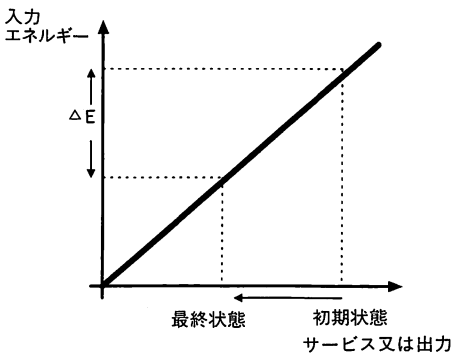


図-8 サービス・出力レベルの縮小による省エネルギー

快適さや生産性を損なうことなく、サービスの量のみを減らすには様々な方法がある。例えば、暖房において暖気量を減少させる方法に次の3つが挙げられる。

- ・伝熱損失を減少させるために壁に保温材を施工する。
- ・輻射損失を減少させるために低放射率コーティングの窓を採用する。
- ・換気熱損失を減少させるため熱交換器を導入する。

これらの方法は基本的要求、すなわち熱的快適性 (thermal comfort) には何ら影響を及ぼさないが、エネルギーの必要量は減少させる。ところが、エネルギーに対する需要を削減することはコストの削減につながり、時にそれがより高いサービスレベルへの欲求を促す。それがエネルギー使用量を増加させるため、結果的に需要削減の効果を相殺してしまうことがある。例えば、保温材を施工することによって暖房のためのエネルギー需要が減少し、暖房費が少なくなるはずである。しかし、それがために暖房の使用時間が増加し、結果的にエネルギー必要量は削減されないということが起こる。日本において重要な問題は、熱的快適性の

要求水準が依然向上しているという点である。すなわち人々は、冬にはより暖かい建物を、夏にはより涼しい建物を依然として欲しているのである。暖房のサービスレベルを下げることによって得られたエネルギー削減効果のうちいくらかは、人々の冬により暖かく、夏により涼しくという欲求によって相殺されてしまうであろう。

サービスプロット上に現れるこれら3種の直接的省エネの組合せによって、広範囲の既存の省エネ手法を説明することができる。また、これら3種の省エネは、アメリカ、日本、ヨーロッパ、カナダにおける従来のDSMの目標と同じである。電力会社のDSMプログラムをこれら三つのカテゴリーに分類することは容易である。例えば、断熱性の向上は暖房負荷を削減するし、オフィスの照明の改良は変換効率を向上させる等である。政府のDSMプログラム (機器の基準効率の策定等) は、全てのタイプの組合せであるためより複雑ではあるが、それでも尚スタンバイ・ロスの削減、変換効率の向上、サービスレベルの縮小を目指していることに変わりはない。

## 6. 二次的省エネルギー (secondary energy savings)

上述した3種の省エネは、特定の省エネ行動の直接的な結果である。多くの場合、その行動の中には間接的、あるいは“二次的”省エネも含まれる。例えば典型的な冷蔵庫には、少なくとも4つの“ヒーター”、(すなわちファンモーター、自動霜取り装置、照明、結露防止ヒーター) がその中に設置されている。新しい高効率ファンモーターが導入されれば、(変換効率の向上により) 電気の使用量を直接削減することになる。しかしながら、この新しいモーターの導入は、コンプレッサーが取り去るべきモーターからの廃熱量の削減にもつながるであろう。この廃熱の削減による更なる省エネが二次的省エネである。航空機や自動車の製造者は、この二次的省エネを以前から熟知しており、継続的に再最適化設計を図っている<sup>9)</sup>。一方、建物や産業用機器では、多分に二次的省エネの余地が残されていることが多い。

二次的省エネはサービスプロット上に現れるとは限らない。なぜならば、それは通常他のシステムの機器の小型化や燃料費の削減といった形で現れるからである。二次的省エネは、一般的に直接的省エネよりも小さいが、直接的省エネ行動と結びついたとき (エンジ

ンやエアコンといった)重要な機器の小型化を可能にし、複合的な効果として初期コストを削減する。

伝統的に人々は、エネルギー使用の削減には(たとえ投資期間全体でみると費用の節約になっていたとしても)ある程度の投資が必要だと考えている<sup>6)</sup>。最近の研究によると、二次的省エネによって、寿命においても初期投資においても、エネルギー効率の高い方法をより廉価にすることが可能であることが指摘されている<sup>7,8)</sup>。例えば、オフィスビルにおいて高効率照明機器を導入するためのコスト増加は、空調システムの小型化によるコストの削減によって相殺され得る。この場合、冷房に要するエネルギーも減少するため、省エネ効果は更に大きくなる。

二次的省エネの存在は、省エネの経済性をより好ましいものにするので、DSMに対し重要な意味を与える。残念ながら、二次的省エネを活用するには、高度の専門知識、エネルギー関連の意思決定に関わっていること、適切なタイミング等が要求されるため、現状では困難な状況にある。航空機や自動車といった細心の注意を払って構築されたシステムでは、その認識および活用が比較的容易である。DSMにおける最も大きな課題の一つは、顧客に二次的省エネの認識を植え付けることであり、それを設備投資の際に反映してもらうことである。多くの場合、LNGや石油の消費を節約することは、二次的に節電にもつながることに着目しなければならない。ある場合においては、燃料節約の効果より節電効果の方が大きいことも有り得るのである。

## 7. ルール (the rules of the game) の変更

省エネの中には、直接的省エネや二次的省エネ以外に3つめのカテゴリー、「ルールの変更」が存在する。このカテゴリーには中間的サービスを省略する行動が含まれる。言い換えれば、中間的サービスの“飛び越え”である。ルールの変更による省エネとは、(直接的省エネに伴う付加的变化という意味ではなく)典型的な技術的転換を意味する。

ルールの変更による省エネは、しばしば劇的な効果をもたらす。最も良く知られている例は、電子レンジである。ここでは、最終的な目的は食物を暖めることである。従来のオープンではまず食物の周囲の空気を暖め、その後その空気からの伝熱により食物を暖めている。このゆっくりした過程の間、熱はオープンの壁から、あるいはドアの開閉によって逃げていく。電子

レンジは直接食物を暖め、空気を暖めるという中間的サービスを飛びこえるため、ルールを変えることになる。たとえマイクロ波を発生させる効率は約50%に過ぎなくても、エネルギー利用の手法を大幅に改善することによって(ある種の食物に対しては)正味の省エネを達成することができる。

ルールの変更による省エネの多くの例では、原材料の削減を伴うことが多い。例えば、日本ではまもなく政府によってコピー機に対する基準効率が設定される。効率が規格化されることによって、コピー機の効率向上のための努力が払われるであろう。一方(紙工場において)一枚の紙を製造するために必要なエネルギーは、(オフィスで)一枚のコピーをするために必要なエネルギーよりも数倍大きい<sup>9,10)</sup>。すなわち、新しい紙を使わず、両面コピーをすることによって大きな省エネを達成することができ、それが紙資源の使用量の削減にもつながるのである。興味深いことに、基準効率の設定にはこの原材料の削減といった特徴は直接的には含まれていないが、政府や企業が従業員に対してできる限り両面コピーをするように奨励することにより、結果的に紙資源の節約をしていることになる。

リサイクルはもう一つのルールの変更の例である。アメリカではアルミニウム地金製造の約25%が飲料用缶になる。過去20年間、製造技術の進歩によりアルミ缶一缶当たりの重量は約20%減少した。このことは、すなわち一缶当たりのエネルギーの使用量が約20%減少したことを意味する。更なる重量の削減は困難であるが<sup>11)</sup>、リサイクルの比率を65%(カリフォルニア州、日本)から95%(ミシガン)まで高めることによって、アルミ地金の需要を50%以上削減することが可能である。ルールの変更は、ここでは新しいテクノロジーを追加するというよりも、社会を変えることを意味する。

DSMプログラムにおいては、ルールの変更を省エネの手段として捉えることは容易ではない。通常は外因的な要素が状況を変化させるのである。アメリカでは人々が電子レンジを購入するのは、おいしいポップコーンを作るためであって、エネルギーを節約するためではない。ミシガン州でリサイクル率が高いのは、一缶あるいは一ビン当たり12セントの保証金が戻ってくるからである。ミシガン州の試みは、高速道路のポイ捨てのための清掃費用の削減が主目的であり、エネルギーの削減が主たる考慮事項だった訳ではない。

## 8. おわりに

本稿では、エネルギーの用途を理解し、省エネの機会を正しく捉えるためのフレームワークを提案した。また、3種類の省エネのカテゴリー、すなわち直接的省エネ、二次的省エネ、ルールの変更を定義した。この単純なフレームワークを用いることによって、エネルギーの用途と節約に関する主要な特徴をほとんど説明することが可能である。また、スタンバイ・ロスによるエネルギー損失の大きさ等、新しい見識を見いだすことも可能である。

今日までDSMは、エネルギーの消費行動とそれから得られる効果の間に明確な関係が存在するため、直接的省エネに重点を置いていた。しかし、その考え方は二次的省エネの持つ大きな省エネの可能性を無視している。この二次的省エネは、更なる省エネによる経済効果によって設備投資がより魅力的になるという点でも重要である。

二次的省エネは、自発的に起こるものではない。なぜならば、それは集積的な手法や、設計を変更し得る能力が必要とされるからである。二次的省エネを推進するのは、綿密な投資計画の調整や、高いモチベーションが要求されるため、容易なことではない。いくつかの最も魅力的な二次的省エネの機会が、電力業界や他の燃料業界の中にあるが、競合する公益事業同士がDSMにおいて協調し合うというのは現実的には困難であり、政府による調整が望まれる。

最後に、ルールの変更には大きな省エネの可能性が存在しているが、DSMによって省エネに有効なルールの変更を推進することが可能であろうか？おそらく可能であろう。しかしながら、その省エネの効果が分散し過ぎているため、電気・ガス事業が単独で行うことは困難である。ここでも政策による後押しが必要となる。

## 9. 謝辞

本稿の着想の多くの部分は、名古屋におけるセミナー「Toward More 3 E Energy Systems : More Efficient, More Environmentally Benign and More Economical」で最初に発表したものを基にしている。今回の執筆にあたって、ご助言およびご協力を頂いた慶応義塾大学教授・茅陽一氏、住環境計画研究所研究室長・村越千春氏に深く感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) Meier, A., "Refrigerator Energy Use in the Laboratory and the Field." *Energy and Buildings*, 1995. 22 (3) : p. 233-243.
- 2) Nadel, S., et al., *Energy-Efficient Motor Systems : A Handbook on Technology, Programs, and Policy Opportunities*. 1991, Washington, DC : American Council for an Energy-Efficient Economy.
- 3) Almeida, A.D. and S. Greenberg, "Technology Assessment : Energy-Efficient Belt Transmissions." *Energy and Buildings*, 1995. 22 (2) : p.245-253.
- 4) Ross, M., "Energy Efficiency," in *Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*. 1995, John Wiley & Sons, Inc. : New York. p.1141-1179.
- 5) Daimler-Benz, "Trading Kilos for Kilometers." in *Daimler-Benz HighTech Report*. 1994 : p.33-40.
- 6) Ruegg, R.T. and H.E. Marshall, *Building Economics: Theory and Practice*. 1990, New York : Van Nostrand Reinhold.
- 7) Deringer, J. and H. Misuriello, "A Baseline for Energy Design'." *Progressive Architecture*, 1982. 4 : 82.
- 8) Cilurso, E., "Insulation, Window Upgrades to Save Michigan Hospital \$ 30K / Year." in *Energy User News*. February 1996 : p.11.
- 9) Nordman, B., "Saving Energy by Saving Paper." in *Recent Research in the Building Energy Analysis Group*. November 1993 : p.1.
- 10) Tsuchiya, H., "Energy Analysis in Daily Life," *Research Institute for Systems Technology*, February, 1994.
- 11) Hosford, W.F. and J.L. Duncan, "The Aluminum Beverage Can". *Scientific American*, 1994. 271 (3) : p. 48-53.