

エネルギー資源と環境

伊原 征治 郎¹⁾

1. はじめに

エネルギー資源と環境の問題については、長年の間に数え切れないほど多くの書物や論文が公刊されている。しかし、問題の要因とみなされる経済成長や快適さの追求という時代精神に、それらが加えたフィードバックはささやかなもので、大勢は問題の顕在化に向かって進んで来た。世界のエネルギー消費量は絶えず増加を続け、その結果としての資源問題と環境問題がエネルギー利用に制約を課しつつある。この制約を乗り越えるためには、エネルギー節減の思想を技術システムに組み込むこと、及び自然エネルギー利用技術を確立することが必要である。これまでも幾度となく指摘されてきたこのことを再確認するのが、本文の目的である。

2. 非更新性エネルギーの資源量

2.1 確認可採埋蔵量

大きなエネルギー量を表わすのに、Qという表示法を用いることがある。千兆英熱量単位を意味する quadrillion BTU の頭文字 q から 10^{15} BTU を $1q$ と書き、さらに $1000q = 1Q$ とする。1 BTU = 1055J より、1 Q はおよそ 10^{21} J のエネルギー量である。石油、石炭、天然ガス、およびウラン 235 の資源量は不確かさを含んだ値

であるうえに、それらを発熱量に換算した数値が非常に大きいので、Qの表示法で丸めて表わすと比較したり記憶するのに便利になる。

第1表に世界の非更新性エネルギー資源量の大きさの程度をQの単位で示す。確認可採埋蔵量は、石油5.6Q、石炭32.8Q (褐炭を除く)、天然ガス4.4Q、ウラン235が2.3Qで合計45Q程度である。ただし、ウランだけは共産圏の資源量を算入していない。ここで確認可採埋蔵量とは、確認された埋蔵場所から経済的に採掘できる推定量の意味である。確認可採埋蔵量から年間に採掘された量を年生産量という。世界の年生産量の概略値は、1986年に石油0.14Q、石炭0.12Q、天然ガス0.074Q、ウラン235は0.024Q、合計0.36Q/年であった。合計のうち、日本が消費した分はおよそ4.5%である。

一般に、確認可採埋蔵量と年生産量をそれぞれRとPで表わして、両者の比R/Pを可採年数と呼ぶ。石油の可採年数はおよそ40年、非更新性エネルギー資源全体としては平均可採年数約127年が見込まれる。ただし、このような可採年数はRとPの値がある時点で固定しているので、確認可採埋蔵量の寿命を表わしているわけではない。先進工業国では毎年エネルギー消費量が増え続け、近年は開発途上諸国の経済成長に伴うエネルギー消費の伸びが著しい。したがって年生産量(P)は、石油のように市況が動因となってしきりに増減を繰り返す場合

第1表 世界の非更新性エネルギー資源量

単位: Q

	石 油	石 炭	天 然 ガ ス	ウ ラ ン 235	合 計
究 極 可 採 埋 蔵 量	10.7	257.0	12.2	8.6	289.0
確 認 可 採 埋 蔵 量 (R)	5.6	32.8	4.4	2.3	45.1
年 生 産 量 (P)	0.139	0.119	0.074	0.024	0.356
可 採 年 数 (R/P)	40	276	59	96	127

1) 電子技術総合研究所エネルギー部：
〒305 つくば市梅園1-1-4

キーワード：エネルギー、資源、環境、ダイナミックスモデル、LPモデル、自然エネルギー、省エネルギー

はあるけれども、全体的に増加せざるを得ず、これらの趨勢は可採年数を急速に短くする要因である。

2.2 究極可採埋蔵量

一方、確認可採埋蔵量は現状の技術と経済性を測度として推定されるから、増加する要因もある。例えば、資源の探査と採掘の技術が進歩すれば、地質学的に石油埋蔵の可能性が推定される地域で新しい埋蔵場所が確認される頻度が高くなる。また、経済情勢が変化すれば、それまで採掘費用が高く不経済であった確認埋蔵地域の原油が可採量に算入されるようになる。それらの追加可採量を推定して確認可採埋蔵量に加えた値が、究極可採埋蔵量である。第1表に示すように合計は約290Qで、その大部分は石炭が占める。

石油には、10.7Qの究極可採埋蔵量とは別に、その20%程度の量を上積みするオイルシェールとオイルサンドから採れる石油がある。現在は原油と価格的に競合できずほとんど利用されないが、採取技術は確立している。

その他に、ウラン238とトリウム232の核エネルギー利用を可能にする高速増殖炉に対して200Q、また重水素核融合反応に対して、海水中の重水素(0.02g/l)と地球の海水量(10^{20} l)に基づいて 10^8 Q、のエネルギーが試算されている¹⁾。ただし、高速増殖炉は経済性と安全性のほかに廃棄物処理の問題が未解決であるし、核融合の技術的可能性は実証されていないので、海水から重水素を抽出したり核融合を制御するためのエネルギーを差し引いてエネルギー収支を評価することもできず、これらは最も不確実な資源量と言わざるを得ない。

2.3 可採年数の意味

現在のエネルギー資源は可採年数が示す程度に有限であるから、もっと永續性があるエネルギー資源の利用法を確立することが人類の存続のために必要になるが、エネルギー需給体系は慣性が大きく、エネルギー技術開発と普及には長期間を要するのが一般的な傾向である。そして、新しい種類のエネルギー資源を開発するために必要な期間はとりわけ長いようである。

例えば、世界の石油の利用量が石炭と同程度になるまでの期間は、20世紀に入って60年程度かかっている。原子力の場合には、核分裂連鎖反応の制御に成功したのが1945年、それに基づいて最初の商用原子力発電所がアメリカで運転開始されたのが1957年、以来30年余を経過した現在、世界のエネルギー利用の中で原子力が占める比率は僅か4%程度である。そして核融合については、40年間の研究の蓄積にも関わらず、それを制御する技術を手に入れていない。

技術はいろいろな分野で加速度的に進歩を続けているから、将来のエネルギー資源の開発と利用にも革新が期

待される。経済活動を現状から未来へ穏やかについで行くためには、石油の確認可採埋蔵量から推定される可採年数の、40年程度以内をこの革新を確立するまでの期間の目安と考えてよいであろう。

ただし、次に述べる事情は、可採年数の意味をかなり曖昧にしている。

3. エネルギー資源のダイナミックス

3.1 消費の動向

エネルギーは大別して熱、動力、電気の三つのエネルギー形態で利用され、どのエネルギー資源からもさまざまな技術を用いてこれらの形態のエネルギーを取り出すことができる。つまり、エネルギー資源の間には互換性があるので、技術経済社会ではある程度自由度をもって資源を選択することができる。現代のこの選択の仕方は、資源の価格と技術のコストの和から成る経済性を比較することが原則になっている。

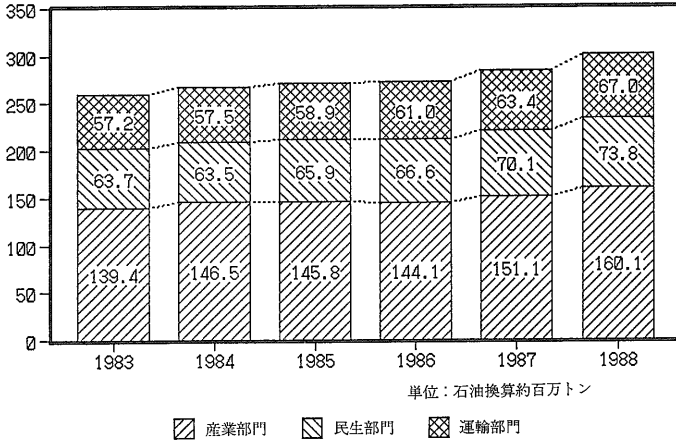
20世紀後半において最も経済性に優れたエネルギー資源は石油であるから、石油の価格はエネルギー資源全体の消費の動きを支配している。石油の価格を軸にした過去20年間のエネルギー事情は、およそ次のように要約できるであろう。

1969年から1970年にかけてのオイルショックを契機に、OPEC原油価格は値上げを繰り返して、1980年代のはじめには40\$/バレルあたりまで急上昇した。先進工業諸国はその対策として省エネルギーに努めるとともに、天然ガスや石炭、あるいは原子力などによって石油を代替する政策を推し進めた。さらに非OPEC産油国は生産量拡大に邁進し、その結果1988年の非OPEC産油量の合計は1970年当時の約5倍に達した。

これらの努力の成果は1985年頃から顕著に表われたので、サウジアラビアをはじめOPEC諸国は市場の喪失を防止するために次第に原油価格を下げ、1988年にはOPEC原油が17~18\$/バレル、スポット価格では10~14\$/バレルまで低下して、最高値時の半値以下となった。

その結果、省エネルギーやエネルギー代替の努力は消失しはじめ、非OPEC産油諸国での石油採掘と探索の意欲も低下した。例えば石油消費量が世界最大の米国では、1987年以降産出量が減少し輸入量の増加が続いている。

このような傾向は日本のエネルギー統計にも明らかに表われている。エネルギー消費量はオイルショック以後も民生部門と運輸部門で絶えず増加を続けて来たが、産業部門の省エネルギーが全体的増加を抑えて、第1図に示すように1980年代前半までは増え方が緩やかであっ



第1図 日本の需要部門別最終エネルギー消費量

た。しかし1987年以降は産業部門をはじめ全部門で増加に勢いがつき、原油と石油製品の合計輸入量も1986年を谷底として1987年以降増加に転じた。

そして石油価格は反転し、1989年末以降20\$/バレルを越え、再び価格急騰が世界的に危惧されはじめた。

このように、人間のエネルギー消費への欲求はとどまるところを知らないように見える。だから、将来のエネルギー需給を安定に維持するためには、省エネルギーを技術として経済システムの中に組み込むことと、更新性のエネルギー資源すなわち自然エネルギーの有効利用法を確立することが是非とも必要になる。

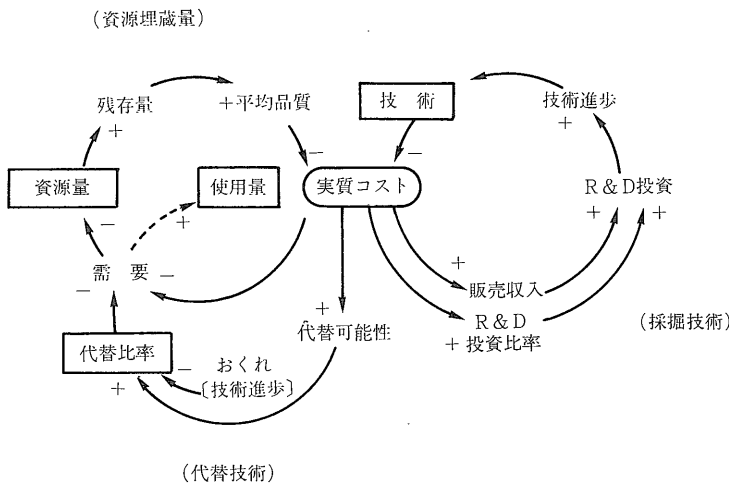
3.2 ダイナミックモデルが示唆すること

上に述べたような需要と供給の動態を、資源一般について、システムダイナミクスというシミュレーション手法を用いて可採年数の期間に拡張して見せた仕事があ

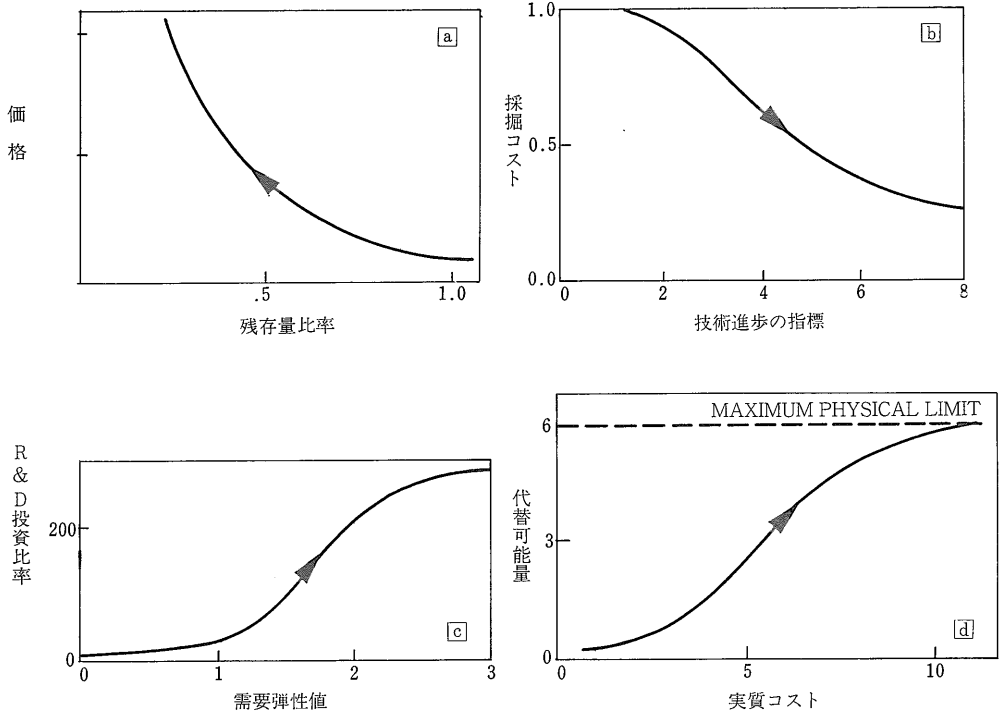
る²⁾。このシミュレーションモデルは資源のコストと、埋蔵量、採掘技術、及び代替技術のそれぞれとの因果関係を第2図のように表わして、それらの経年変化を差分方程式を用いて数値計算するものである。計算に必要な諸量間の関係は、過去の統計データを例えば第3図のように整理して、曲線が表わす数値をそのまま用いる。

この種の関係については厳密な理論がないために、さまざまな議論を呼び起こしがちである。事実、1970年代のはじめ頃にシステムダイナミクスに基づいて展開された資源・環境論³⁾には、厳密さの点では同様な批判や主張が無数に交錯した経緯がある。しかし第3図について言えば、これらはかなり常識的に理解できるであろう。

(a)は資源の残存量が減ると価格が上昇すること、(b)は採掘技術の進歩によって採掘コストが下がることを、それぞれ表わしている。(c)は、価格上昇よりも需要増加の



第2図 資源利用のダイナミックモデル²⁾



第3図 資源利用のダイナミックスの要因間の関係²⁾

勢いが強くなると、研究開発投資を増やして需要を満たそうとする一般的な企業行動を数量化した曲線である。(d)は、資源のコスト上昇に伴い代替の可能性がある様子を示している。経済的あるいは物理的理由から、多くの場合に曲線は右側に飽和に向かう。

シミュレーションの結果は次のように述べられている。1970年において R/P が400年の資源を毎年3%の需要伸び率で消費して行くと、第4図(a)に示すように資源量は急速に減少し、125年後にはほとんどがリサイクルしたものしか利用できなくなる。つまり、初期の可採年数は400年であるのに、ダイナミックな可採年数は125年ということになる。残存量の減少に伴い資源の品位が低下しても、2020年頃までは技術進歩によってコストをほぼ一定に保てるが、それ以後はコストの急上昇が起こり代替資源の比率が高まるので、この資源の利用率は低下する。

(b)は1970年における R/P を400年から800年に変え、その他の入力データはすべて等しくして計算した結果である。資源のコストは(a)の場合よりも50年長く一定に維持できるが、利用率の指数関数的な増加がその期間続いて、ダイナミックな可採年数は20年しか長くならない。このように、ある時期の R/P で示された可採年数は資

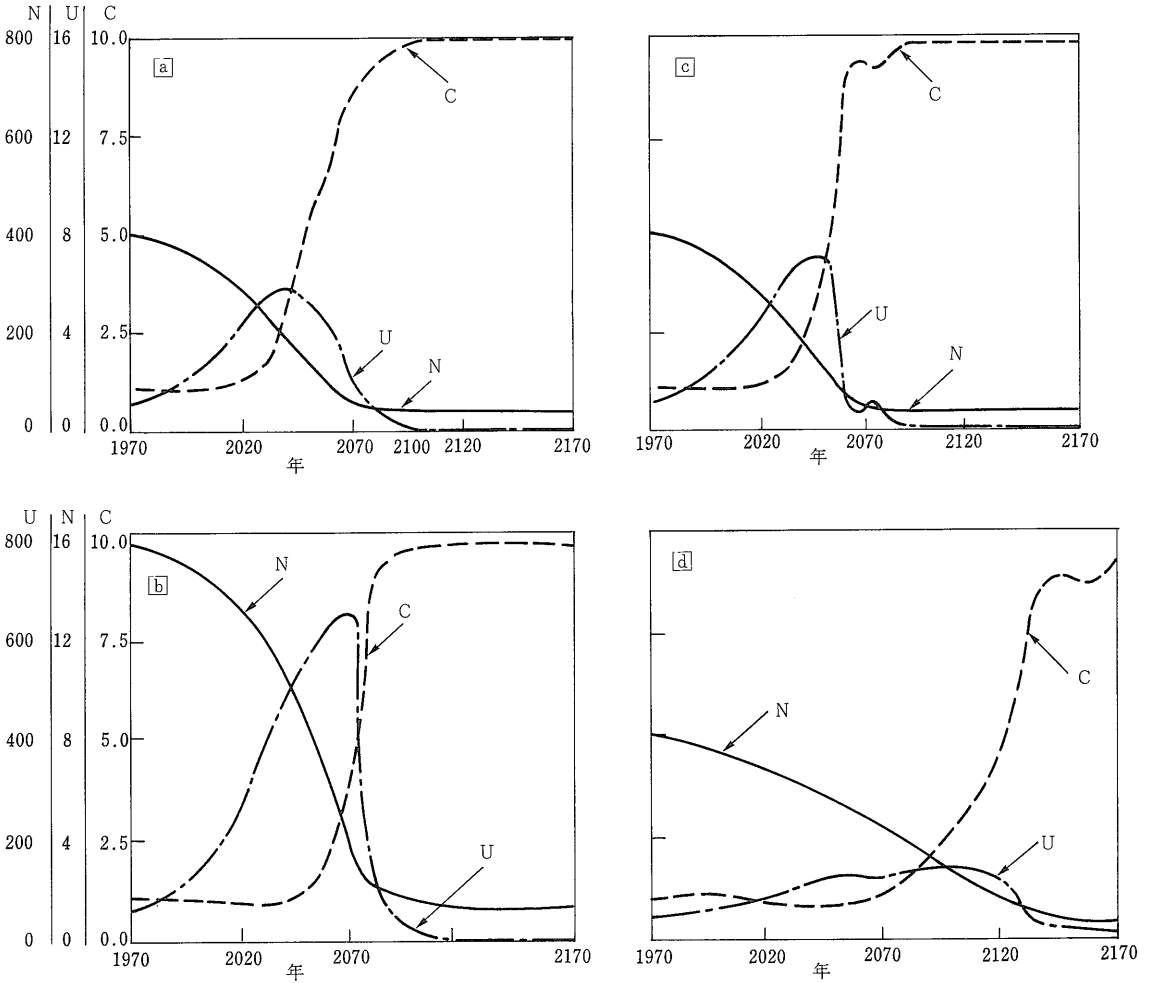
源の寿命を表わすものではなく、埋蔵量が可採年数で400年分追加されたとしても、3%/年の需要伸び率が続けば寿命の延長は僅かに過ぎないのである。

(c)は採掘技術に関する研究開発への投資額を、(a)の場合の2倍に増やした効果を示している。技術開発が市場に影響を及ぼすまでの時間遅れを20年程度と見なしたこのシミュレーションは、資源のコストを低い値に維持できる期間がおよそ10年延長された後、(a)の場合よりも急速なコスト上昇が起こる結果を示している。

(d)は需要の伸び率を3%/年から1%/年に抑え、その他の条件はすべて(a)と等しくしたシミュレーション結果である。資源の寿命は(a)の場合より75年以上長く延長され、コスト上昇も比較的ゆるやかになり、消費の成長率を抑えることが資源の寿命を有意にのばす最良の方策となっている。

以上のようにシステムダイナミクスモデルは、非更新性の資源を存続させる最も有効な方策は節約である、というきわめて常識的な主張を、実際にあり得る諸量の関係に基づいてトレースして見せている。

節約が有効とは言っても、可採年数に限界がある非更新性のエネルギー資源はいずれ消費され尽くしてしまう。しかし幸いなことに、地球環境には更新性の自然エ



第4図 資源利用のダイナミックシミュレーション²⁾ (N=資源量, U=利用率, C=コスト)

エネルギーが存在する。この資源量はどの程度に見積れるであろうか。

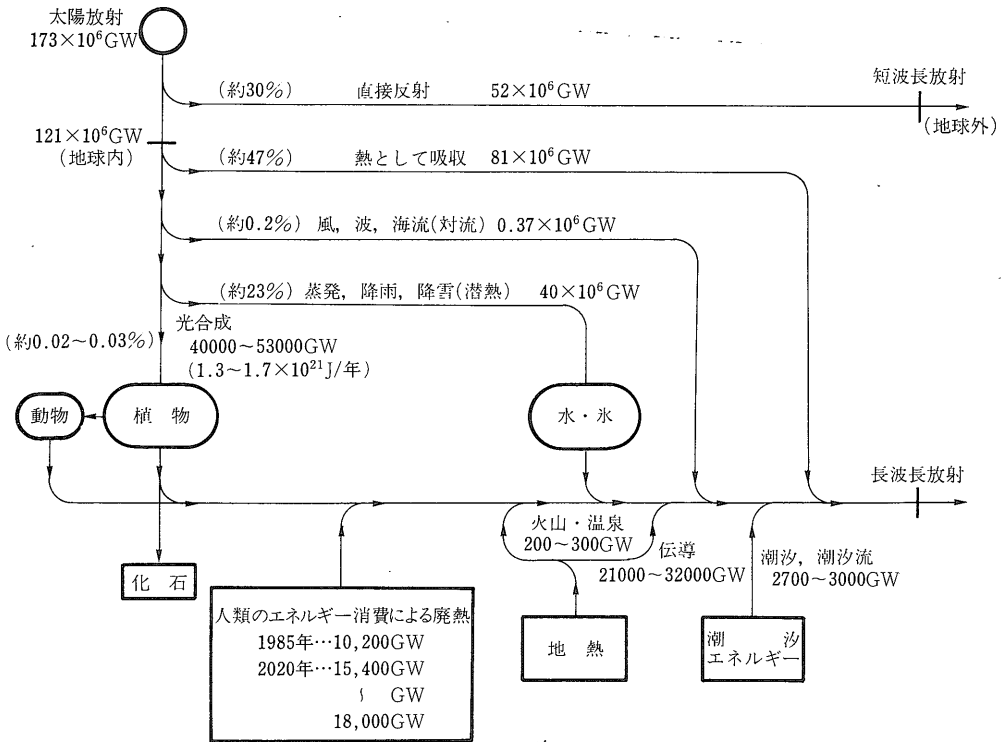
4. 自然環境のエネルギーフロー

4.1 資源としてのフロー

地球上のエネルギーの流れの起源は、太陽から受け取る放射光と、地球の中心部で発生する地熱と、月の引力作用による潮汐力、そして、人類が利用したエネルギーの廃熱である。第5図に、それらのエネルギーの大きさをGWの単位で示す(1GW=1GJ/s=10⁹J/s)。図は1960年代の文献によってまとめたものであるが⁴⁾、人類のエネルギー消費による廃熱の部分は、1985年の世界のエネルギー消費量と、その値から年2%の伸び率で増加する投影値とに書き換えた。

地球が受け取る太陽放射量の値173×10⁶ GWは、太陽定数として知られる大気圏表面の日射量1.353kW/m²に基づく計算である。その約70%が大気圏内に入射して、さまざまな自然現象のもとになるエネルギーフローを形成する。それぞれのフローは、地球上で偏在していたり希薄に分布しているために、資源量という観点でみると技術的に利用できるのはごく一部であり、経済性、自然保護、土地利用などの観点を加えるとさらに少なくなる。

たとえば、水の蒸発、降雨、降雪のフロー4千万GWのうち一部は水力発電で利用されるが、世界のエネルギー資源量としての可能性は1500~3000GWと考えられる。風力は1000~3000GW、海洋温度差は500~1000GW、潮汐力は数十GW、光合成は土地利用の可能性の評価によって著しく違って来るが5000~6000GW、などの



第5図 地球のエネルギー・フロー⁴⁾

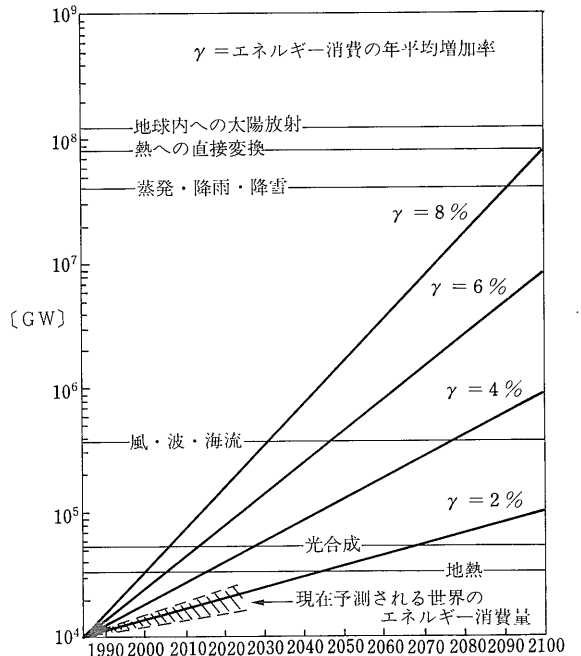
値が自然エネルギー利用の可能量として概算されている。これらの合計の目安は10,000GW前後で、現在の世界のエネルギー消費量とはほぼ同じ程度の大きさである。

太陽放射のうち地表に到達する日射量は、地球上の位置と季節と時間によって異なり、日照の少ない地域では $2.5 \sim 4 \text{GJ/m}^2 \cdot \text{年}$ 、温帯で $4 \sim 6.5 \text{GJ/m}^2 \cdot \text{年}$ 、熱帯や砂漠地域では $6.5 \sim 8 \text{GJ/m}^2 \cdot \text{年}$ の範囲に推定されている⁵⁾。これらの平均値から概算すると、地球の全表面積の約0.013% (日本の本州の面積のおよそ30%) に降り注ぐ日射量が、現在の世界のエネルギー消費量と同程度のエネルギー量に相当する。技術の現状から見込まれる太陽光のエネルギー利用効率は、熱利用の場合40~60%、電気に変換して利用する場合は10~30%であるから、技術に経済性が得られるようになれば、太陽放射はかなり大きな資源量として期待できる。

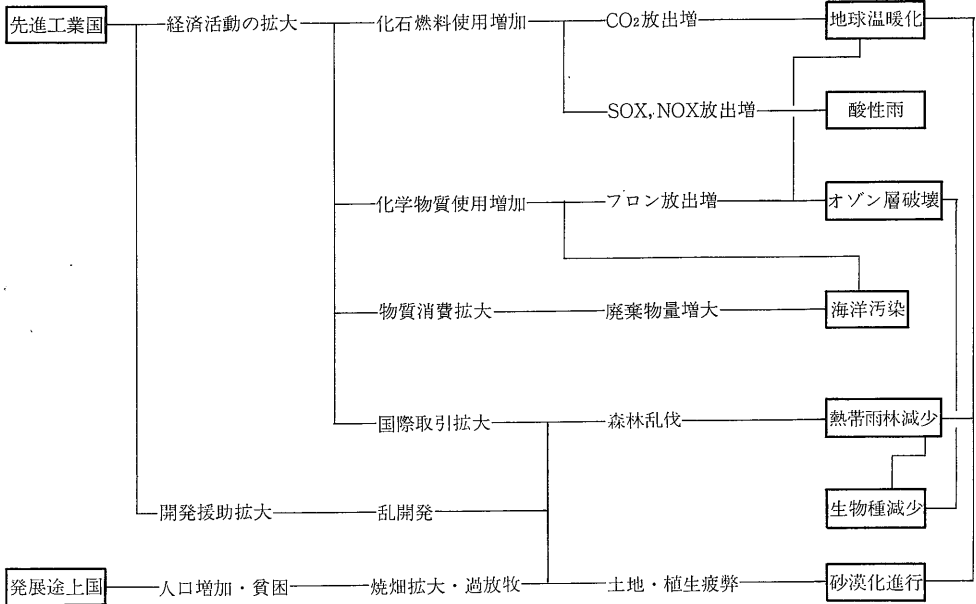
4.2 制約としてのフロー

自然環境のエネルギーフローを表わす数値は、エネルギー資源としての利用可能性を示すと同時に、エネルギー利用に対する制約の目安を与えていないだろうか。

第6図は、世界のエネルギー消費量の年伸び率と地球のエネルギーフローの大きさとの関係を表わしている。例えば $r = 4\%$ の線は、年に4%の増加率で非更新性の



第6図 世界の廃熱と地球のエネルギー・フローの関係



第7図 地球環境問題の構造⁶⁾

エネルギー消費量が増えて行くと、廃熱の量が地球の対流すなわち風・波・海流のエネルギーと同等になるのは2080年以前であることを示す。このように、エネルギー消費量が常に増加し続けることを期待するのは危険に思われる。最近2年間のエネルギー消費の伸び率は大きく、東南アジアでは10%/年を超える国々があるが、先進工業国では2~3%/年であるため世界全体ではおよそ3%/年である。エネルギーエコノミスト達は、2020年頃まで世界全体で年平均1.2~2.4%の伸び率で増加すると予測しており、それによると図の斜線を施した範囲に廃熱が増加すると試算される。エネルギー消費は地球上で局所的に行われており、廃熱は大気に直接放出したり温度の高い水として排出するので、熱汚染の自然環境への影響を実際に評価することは大変困難であるが、エネルギーの大量消費が自然のエネルギーフローを乱す恐れがあり、来世紀の中頃までにはこの問題が顕在化することも予想される。

エネルギー消費量が増加を続け、化石燃料などの非更新性エネルギー源が枯渇に近づくにつれて、人間は自然エネルギーにますます多く頼らざるを得なくなるであろう。裏返して言えば、自然エネルギー利用技術に革新を起すことによって、エネルギー資源の枯渇や熱汚染による文明の衰退などと言った心配から逃れることができるであろう。制約がエネルギー量の問題だけであるならば、このように楽観の余地がある。しかし最近では、エネルギー利用に伴う排出物質の環境問題が、近い将来の

制約として憂慮されはじめている。

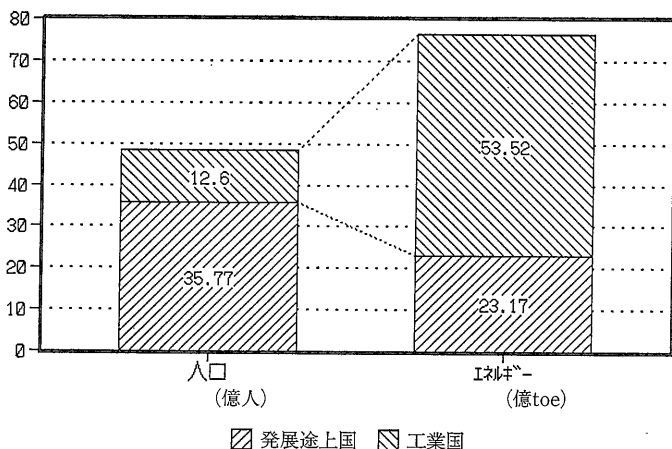
5. エネルギー利用と環境問題

5.1 地球環境問題の構造

最近の相次ぐ国際会議で議論されている地球環境問題は第7図⁶⁾、のように要約できるであろう。原因は先進工業国の経済活動と、発展途上国における人口増加及び貧困の両極端で生じている。この問題の解決が大変に困難である理由は、先進工業国が経済活動の縮小を望まないことはもちろん、先進国と開発途上国の経済格差があまりにも大きいことにある。

格差の例として、第8図に1985年の世界の人口とエネルギー消費量を、工業国と発展途上国に分けて示す。ここで、工業国とはカナダ、アメリカ、ヨーロッパ（西欧、東欧）、ソ連、日本、オセアニア、南ア連邦を指し、人口は全世界の26%であるのに対してエネルギー消費量は70%を占めている。多くの発展途上国がこれらの工業国なみに所得を得たいと望んでいるために、エネルギーと環境の問題に対する意識は全く異なり、国際協調のもとに解決に向かうところから程遠い状況にある。そして世界のエネルギー消費量は増加を続け、硫酸酸化物(SOx)、窒素酸化物(NOx)、及び二酸化炭素(CO₂)の大気排出量が急上昇している。

欧米諸国では深刻な被害が報告され日本でも楽観できなくなった酸性雨は、SOx及びNOxが原因物質と同定されているが、これらの排出量を現状から30~40%低減



第8図 世界の人口とエネルギー消費量

させることは、脱硫・脱硝技術が進歩しているので比較的容易に実行できそうである。ただしその場合、自動車が出す NO_x の対策には相当な困難を伴うと予想される⁷⁾。一方、地球温暖化の懸念を生むに至った CO₂ の温室効果問題は、現在の世界のエネルギー資源のほとんどが炭素を骨格とする化石燃料であることと、CO₂ を回収する技術がないことから、SO_x や NO_x とは比較にならないほど解決が困難視されている。

大気中の CO₂ 濃度が急上昇を続けていることは測定結果が示す事実であるが、その温室効果の影響は科学的な推論に基づく予測である。予測の精度を高めるのが先決と言うことで、知見の収集や予測モデルの改良が進められているが、予測結果が正しいと判明する頃には対策が手遅れになる危惧も強く、CO₂ 排出を減らす具体的方法の研究も、多くの先進工業国で盛んに行われるようになった。

CO₂ 排出抑制策の研究では、各種のエネルギー資源と技術の特性、経済、自然環境など多くの領域にわたる要因と、それらの相互関係を扱うモデルの利用が不可欠になる。とくに、最大効果と最小費用の観点から実行可能な答えを求める場合には、線形計画法(LP)に基づくモデルが有用である。以下の節では、CO₂ 排出抑制の可能性を MARKAL (Market Allocation) というエネルギー技術システム分析用の LP モデルによって分析した結果を紹介する。

5.2 LP モデル MARKAL

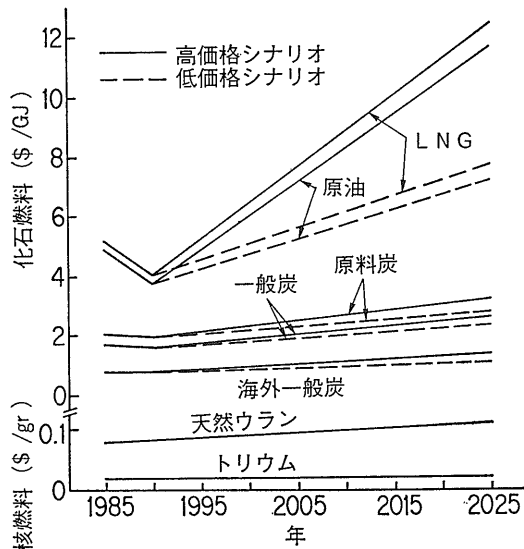
LP の論理に従う分析結果は、ダイナミックモデルを用いて行うような将来予測のシミュレーションとは異なり、さまざまな前提や制約条件に従って方策や技術の組合せを選択し、排出抑制の可能性を提示する性質のものである。与えられた条件下で最も良い方策を求めるためのモデルであるから、LP に基づくモデルを規範型モデ

ルと呼ぶことがある。名前の重々しさと相違して、このモデルは以下に述べる概要が示すように、単純さと勤勉さの積み重ねを身上とする分析の道具である。

モデルの構造 MARKAL は日本国全体のエネルギーフロー、設備の導入・運用・廃棄、及び種々の制約条件を、1期5年の9期から成る45年間について約7000の線形方程式群でモデル化し、入力データと前提条件に対して各期の設備量と運用の状態、及びその推移を求める。

モデルシステムは、19種類の一次エネルギーと21種類の二次エネルギー、及び177種類の精製・変換・輸送・貯蔵の設備と、129種類の最終利用設備で構成されている。開発中の技術、例えば燃料電池等は代替技術として分類する。技術の特性向上、例えば効率改善等については各期のデータを変えて与える。このように、モデル分析には予測される技術進歩を見込んでおく。エネルギーフローと設備の運用状態は、最終エネルギー需要を満たすと同時に導入や利用に対する制約条件がすべて成立する範囲内で、評価関数が最小値を示す最も経済的な状態に決められる。この評価関数は、45年分のすべての装置の資本費、燃料費、及び運転保守費を基準年の価値に換算して加え合わせた総システムコストに、さらに、CO₂ 排出抑制コストに相当する項を加えたものである。

分析の前提 (1)対象期間：1983-2027年の45年間、基準年は1985年とする。(2)コスト：割引率を6%/年として、基準年初頭のUS\$に価値換算する。(2)輸入燃料価格：各種の予測を参照して画いた第9図の高価格、低価格の二通りのシナリオによる。単位は燃料の低位発熱量1GJ当りのUS\$(1GJ=10⁹J)。(3)最終エネルギー需要：1985-2025年の国内総生産(GDP)の趨勢を、伸び率が3.4から1.5%/年に低下して全期間平均2%/年である場合と、伸び率が2.7から1.0%/年に低下し全期間平均1.6%/年である場合の二通りに仮定して、それぞれに



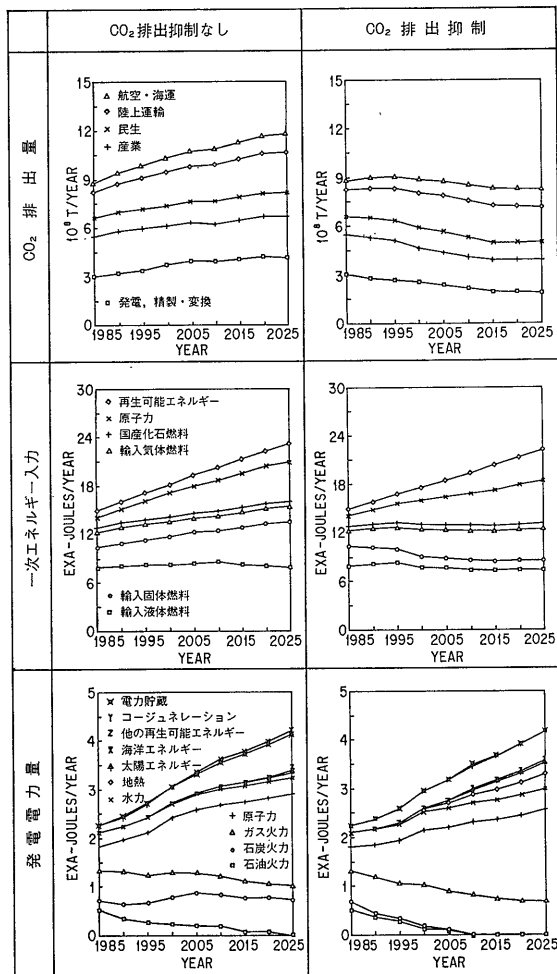
第9図 輸入燃料価格シナリオ⁷⁾

対応するエネルギー需要量を推定し、高需要と低需要の二通りの入力データを設定する。(4)分析シナリオ：最終エネルギーの高需要と燃料低価格を組み合わせた「高需要ケース」、及び最終エネルギーの低需要と燃料高価格を組み合わせた「低需要ケース」。(5)SO_xとNO_xの排出制約：将来の酸性雨対策を考慮して、年間排出量が1985年から2000年にかけて30%減少する制約条件をすべてのケースに設ける。(6)CO₂排出量 (kg・CO₂/GJ)：石炭92.2、原油及び石油製品78.5、メタノール64.9、天然ガス56.2、LPGが63.6とする。

5.3 LP モデルが示唆すること

高需要参照ケース CO₂排出抑制を計画しない「高需要参照ケース」の分析結果を、第10図の左の列に示す。このケースは、現在のエネルギー需給の趨勢を将来に延長して見た場合に相当する。1985年は実績統計値にほぼ等しく、一次エネルギーの合計量は低位発熱量換算14.9 EJ (1EJ=10¹⁸J)、石油55%、石炭19%、ガス10%、原子力10%、水力5%から成る。算出されたCO₂排出量は合計約8.8億tonで、内訳は発電部門34%、産業部門28%、民生部門13%、運輸部門25%である。なお、この年の世界のCO₂排出量はおよそ200億tonと推定されている。

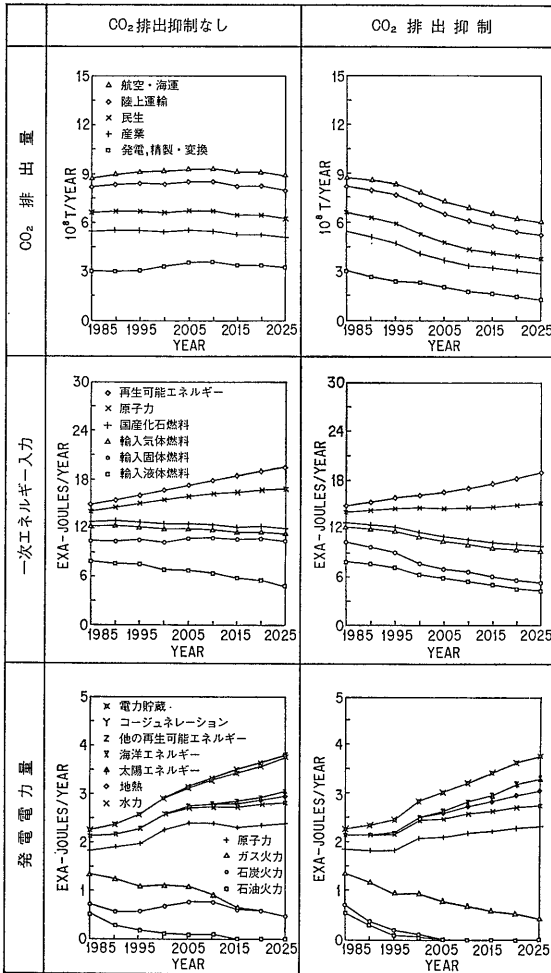
2025年には、1985年に対して一次エネルギー消費量が55%増、それに伴ってCO₂の排出量は34%増加する。エネルギー消費量の40年間平均伸び率は1.1%/年である。比較のため過去の例を示すと、1970年から1985年間の平均が1.7%/年、最近2年間はこれより数倍高い値である。



第10図 高需要ケース分析結果⁷⁾

高需要 CO₂ 抑制ケース 評価関数の排出抑制コストの項を幾通りにも変えて、CO₂低減量と総システムコストの関係を分析した結果、非現実的なコスト上昇を招かずに実行できる排出抑制は、高需要の場合、現在の排出レベルを維持する程度が限界と推定された。およその限界と思われる「高需要 CO₂ 抑制ケース」の分析結果を、第10図の右の列に示す。2025年には、1985年に対して一次エネルギー消費量が49%増加するが、自然エネルギーと炭素分の少ない天然ガスが石炭に置き替わる燃料代替効果によって、CO₂の排出量は1985年レベルにほぼ維持され、2025年は約6%減少して8.2億tonになる。

参照ケースとの相違は発電量の構成に顕著に現われ、石炭の代替には天然ガス、地熱、及び太陽光発電などが選ばれる。石油、原子力、水力の構成比は、主に現在の技術開発や電源計画の趨勢が影響して、CO₂抑制を計画



第11図 低需要ケース分析結果⁷⁾

しない参照ケースと大体同じ傾向で推移する。

2005年の排出量 8.7 億 ton の内訳を見ると、発電及び燃料精製変換部門27%、産業部門23%、民生部門15%、運輸部門35%で、先に述べた1985年の場合に比べて、燃料や技術の代替に柔軟性がある発電部門と産業部門で著しく減っている。民生部門と運輸部門の燃料代替は進まないで低減が少なく、相対的に排出量の比率が高まる。

低需要化の効果 第11図の左の列は、エネルギー需要増加だけを抑え CO₂ 抑制にはコストをかけない「低需要参照ケース」の分析結果である。一次エネルギー消費量は約 0.7 % / 年の平均伸び率で増加し、2025年には1985年に対して31%増となるが、CO₂ 排出量は 1.5 % 増の程度に抑えられ40年間ほぼ横這いである。すなわち、エネルギー消費量の伸び率を現在の趨勢の半分くらいに抑え

ることができれば、CO₂ 排出量は現在のレベル近くに維持される。

第11図の右の列に「低需要 CO₂ 抑制ケース」の結果を示す。2025年には、1985年に対して一次エネルギー消費量が27%増加するが、エネルギー消費量が少ないことと燃料代替効果によって、CO₂ 排出量は2005年に約17%減り、さらに2025年には約32%減となる。このケースは燃料高価格シナリオに従っていることも一因であるが、高コストの自然エネルギー利用技術が他の燃料に対して強い競争力を持ち、電源構成の中で太陽発電や地熱発電がそれぞれ導入可能な上限まで利用され、最終需要端でも太陽熱や光発電の技術が顕著に伸びている。

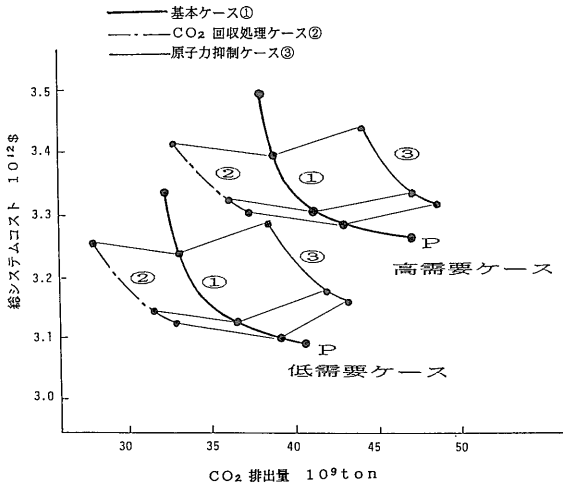
5.4 CO₂ 抑制の効果と費用

第12図は、分析結果から得た CO₂ 低減量とコストのトレードオフ関係を表わす⁸⁾。横軸は1983年から2027年の45年間の CO₂ 累積排出量、縦軸は同じく45年間の総システムコストを示している。

燃料及び技術の代替 代替燃料や代替技術は比較的成本の安いものから順に選ばれて導入されるので、曲線①に示すように、総システムコストは参照ケースの点Pから最初は緩やかに上昇する。排出量の減少が進むにつれて、高価格の燃料や高コストの技術を導入せざるを得なくなり、削減のコスト負担が増加して総システムコストは急上昇する。曲線の左端は削減量に対するコスト上昇の比率が極度に大きく、代替による削減の限界が現われている。45年間に削減できる CO₂ の総量は、点Pと曲線左端の累積排出量（横軸の値）の差が示しており、高需要と低需要の両ケースともおよそ90億 ton である。

CO₂ 回収処理技術の効果 CO₂ 回収処理技術として、燃焼ガス中の CO₂ を化学的に吸収して加熱分離した後には液化し、輸送管を通して海底深く貯蔵する方法が提案されている⁹⁾。この設備を微粉炭火力発電所に設けると建設費は約70%増加して、発電所総合効率率は34%程度になるが、排ガス中の CO₂ の90%が回収できるという試算がある。このような特性値を持つ設備を、すべての発電所を対象に1995年に 0.3 億 ton/年の回収容量で導入開始して、2025年迄に 5 億 ton/年に増設すると仮定した場合、CO₂ 低減量と総システムコストの関係は曲線②で表わされる。曲線①と②の対応を示す直線の傾きは、大幅な CO₂ 排出量の低減に対してコスト上昇が緩やかであり、この種の設備の導入効果が高いことを示している。

CO₂ 回収処理技術は燃料と技術の選択の自由度を広げ、とくに資源量が豊富で価格の安い石炭の利用を増やすことができるので、エネルギー需給バランス上きわめて必要性が高い。



第12図 CO₂ の45年間の排出量とコストのトレードオフ

原子力と CO₂ 抑制 原子力と CO₂ 低減の定量的関係を見るために、原子力発電設備容量のピークは2000年とし、それ以降は直線的に廃止して、2025年でゼロにするシナリオを分析した。その結果を曲線③に示す。自然エネルギーは CO₂ 抑制目的の代替エネルギーとして導入可能な上限まで利用され、原子力発電の削減分を補う余裕がないので、化石燃料発電所が増設されることになり、発電部門の CO₂ 排出量が著しく増加する。曲線③は、曲線②とほぼ同じ距離だけ曲線①の反対側にシフトして、45年間の原子力発電量は回収量が約5億 ton/年の CO₂ 回収処理技術の導入に相当することを示している。

省エネルギー 第12図の低需要ケースの曲線が三本とも、高需要ケースの曲線から左下にずれて位置することは注目すべき結果である。これは、エネルギーの節減が CO₂ 排出削減の最も費用のかからない有効な方法であることを意味している。例えば低需要の曲線③は、原子力を廃止した場合でも CO₂ 排出量を現在のレベルに維持できる解があることを示している。ただしこのような可能性は、一次エネルギー消費量の年平均伸び率がおよそ0.7%以下に抑えられた場合に得られる。

6. おわりに

急速に世界の関心事となった地球環境問題は、単純化して言えば、エネルギーと物質の消費量の増大から生ずる環境問題がそれらの利用を制約する因果応報の構図で

ある。問題の解決はこのループを断ち切ることであるから、節減と自然のフローの利用が基本的な答えであろう。

地球環境問題の中でも、対策が最も難しいとされている CO₂ 排出削減については、省エネルギー、燃料代替、技術の代替をうまく組み合わせて総合的に進めれば、相当のコスト負担はあるものの、排出抑制が可能であることを分析結果は示している。しかし、システム分析の結果という論理的な可能性と実現性の間には多くの場合ギャップがあり、それを埋めるには今後の研究開発に多くの創意と努力が必要とされることは言うまでもない。とくに、分析結果が示す将来の天然ガスと原子力の導入量は、現在の技術的、社会的状況から見て隔たりが大き過ぎ、実現には大きな困難を伴うことが予想される。この困難を軽減するために、より多くの省エネルギー量と自然エネルギー利用量を可能にする長期的研究開発の新しい展開が一層必要性を増すであろう。

謝 辞

本文の MARKAL による分析結果は、電子技術総合研究所エネルギー情報技術研究室の小山茂夫 主任 研究官、及び日本原子力研究所核エネルギー技術評価研究室の安川茂室長はじめ同研究室の方々に負うところが多いことを記し、あらためて深く感謝申し上げます。

引用文献

1. 大阪大学核融合研究センター要覧 (1989), p.3
2. Behrens, W. M. (1971) The dynamics of natural resource utilization. Proceedings 1971 Summer Computer Simulation Conference, AFIPS Press.
3. 例えば、Meadows, D. and Meadows, L. 大来佐武郎 監訳 (1972) 成長の限界, ダイアモンド社。
4. 伊原征治郎, 若松清司 (1973) 環境とエネルギー・システム, 電子技術総合研究所彙報, 37, 867-881.
5. Hafele, W. ed. (1981) Energy in a Finite World. Ballinger, Cambridge, Massachusetts.
6. 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1989) 新エネルギー開発シナリオ調査, NEDO-P-8820, 37.
7. 小山茂夫, 伊原征治郎 (1989) 環境排出抑制のエネルギーシステム構成への影響分析, 電総研研究速報TR-89-5, 6-12.
8. 伊原征治郎, 小山茂夫 (1989) CO₂ の排出抑制がエネルギーシステムへ及ぼす影響, 電気学会雑誌, 109, 873-876.
9. Steinberg, M. and Cheng, H. (1985) A System Study for the Removal Recovery and Disposal of Carbon Dioxide from Fossil Fuel Plant in the U. S., Brookhaven National Laboratory. BNL35666.

<受付: 1990年1月30日>