

2. 解 説

エネルギーシステム構成と二酸化炭素の排出

電子技術総合研究所 エネルギー情報技術研究室

小山 茂夫，伊原征治郎

1. はじめに

最近，地球環境問題への関心が急速に高まり，それらの問題の解決あるいは緩和策のあり方が論じられている。とくに地球温暖化対策については，早期実施を検討する国際的な動向がある。

地球温暖化は大気中の二酸化炭素（以下CO₂と記す）濃度の上昇が主な原因とされているが，エネルギー利用に伴うCO₂の排出を抑制することは，他の地球環境問題の原因である硫黄酸化物，窒素酸化物（以下SO_x，NO_xと記す），フロンなどの排出を抑えるよりも一層困難である。

CO₂排出源の所在はエネルギー技術システム全領域に及ぶので，排出抑制の可能性を研究するためには，個々のエネルギー技術の特性を具体的に取り込んだシステム全体のモデルを分析するアプローチが必要になる。

本文では，日本のエネルギーシステムモデルを用いて，わが国のCO₂排出削減の可能性を予備的に分析した結果の概要を述べる。

2. エネルギーシステムの分析方法

分析に用いるモデルは，わが国の日本原子力研究所，電子技術総合研究所を含む10数カ国の研究者が参加して，国際エネルギー機関（IEA）の国際協力プロジェクトで開発したMARKALと呼ぶモデルである⁽¹⁾。電子技術総合研究所では，これを独自にプログラム化し，国情に合わせて改良すると共に環境分析の機能を追加している⁽²⁾。

MARKALは多段階線形計画法（LP）モデルであり，通常1国全体の45年間にわたるエネルギーシステムを対象とし，エネルギーフローの収支，設備の特性，導入・運用・廃棄，種々の制約条件などを線形方程式群でモデル化し，各時点におけるシステムの構造（設備量と運用状態）とその経年的な推移を，全期間同時最適化により求める。

今回の分析では，1985年を中心とする5年間の第1期から2025年を中心とする5年間の第9期までの9期間，合計45年間の日本のエネルギーシステム全体を対象とした。輸入燃料価格については，図1のような高低二通りの価格シナリオを設定し，最終エネルギー需要については，産業構造及び生活様式等の見通しに基づいて，高低二通りの用途別需要シナリオを作成した。

この需要シナリオでは、産業部門は省エネルギー構造化が進むものとして需要の伸びが小さく、民生及び運輸部門は伸びが大きいと仮定した。シナリオの国内総生産（GDP）の伸び率は、最初は大きく徐々に減少するとしている。すなわちGDPの伸び率は、高需要の場合には最初3.4%から最終的に1.5%迄低下し平均2.0%、低成長の場合には同じく2.7%から1.0%迄低下して平均1.6%と仮定した。

燃料価格と最終エネルギー需要のシナリオを組み合わせ、「高燃料価格-低需要」と「低燃料価格-高需要」の二組を基本シナリオとした。

モデルシステムには既存技術、建設中あるいは導入計画中の技術、及び研究開発中で対象期間中に有意な量の寄与が期待できる新技術が含まれている。従って分析計算における技術の選択は、主要な新技術のほとんど全部を対象としている。なお検討のため、CO₂回収処理技術を追加したケースについても試算した。

一次エネルギーの導入量、エネルギー設備の設置容量などの上限値は、昭和62年度の政府の長期エネルギー需給見通し等を参考にして設定した。輸入燃料については最適化における選択のための余裕分を加え、原子力発電及び水力発電に関してはほぼ見通しの値に合わせて設定した。

省エネルギーのうち生産効率の向上、エネルギー管理の改善、及び建物の断熱の向上等による所要エネルギー量の低減、などは入力データの作成の際外的に扱う。高効率技術の導入や既存技術の改善などによる省エネルギーは、モデル内の選択肢としても扱っている。

最適化は、現在価値換算したコストの総計値とCO₂の累積排出量の重み付け和を目的関数として、これを最小化する方法によっている。その際にSO_x及びNO_xの年間排出量については、1985年の排出量を基準として2000年までに30%減らし、以後排出がその値以下になるように上限制約条件を設けた。

現在のモデルは、技術306種、エネルギー媒体及び物質95種を含み、LP問題としての規模は式の数6,959、変数の数が8,440、非零要素数は50,633である。(3)、(4)

3. 基本シナリオの分析結果と考察

図2は、コスト対CO₂排出量トレードオフ曲線である。CO₂の排出低減が強化されると急激なコスト

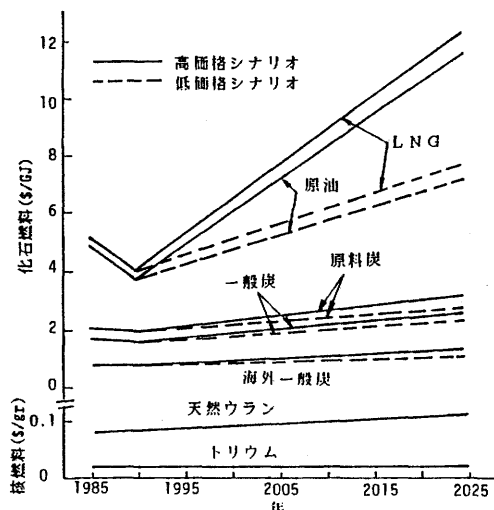


図1. 輸入燃料の価格シナリオ

の上昇を伴う。今回の分析の前提のもとでは、曲線に示す以上の低減はほぼ不可能と考えられる。なお、図には「高燃料価格－高需要」と「低燃料価格－低需要」のシナリオに対する曲線も示した。

図3～6は、CO₂排出抑制を行わない場合（排出フリーケース）と行う場合（排出抑制ケース）におけるCO₂排出量、一次エネルギー入力、及び電源別発電電力量の経年的推移を示す。排出抑制ケースは、CO₂排出低減のための最善の努力をした場合を示しているが大幅な低減は困難であることがわかる。

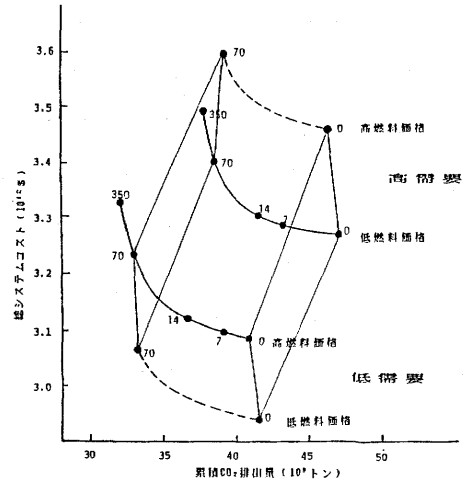


図2 コスト対CO₂排出量トレードオフ曲線（曲線上の数値は目的関数におけるCO₂排出量に対する重み係数）

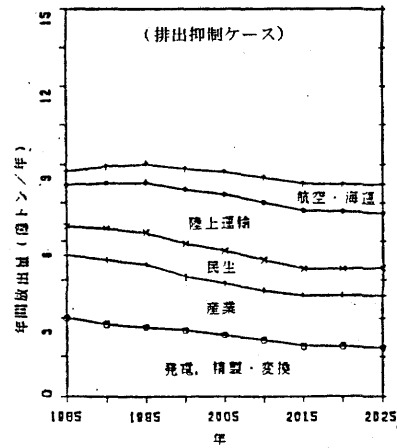
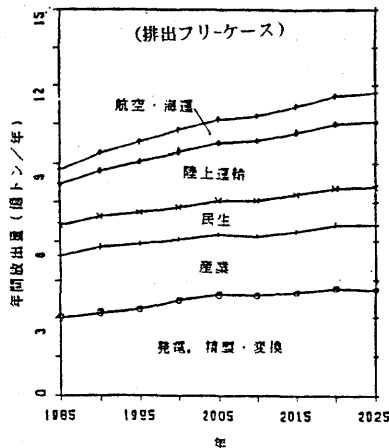


図3. CO₂排出の状況（高需要／低燃料価格シナリオ）

各ケースにおいて、CO₂低減は主に発電、精製・変換部門で生じている。

これらの図に見られるCO₂排出抑制の強化に伴うシステムの変化は、次のようである。種別一次エネルギー入力では固体燃料がかなり減少し、液体燃料がやや減少、それを補って気体燃料及び再生可能エネルギーが増加している。原子力は増加傾向を示すが、どのケースでもほぼ上限値まで入っているため排出

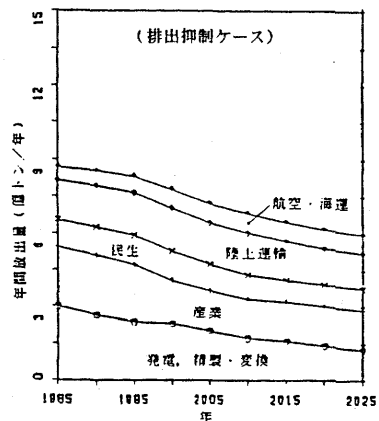


図4. CO₂排出の状況（低需要／高燃料価格シナリオ）

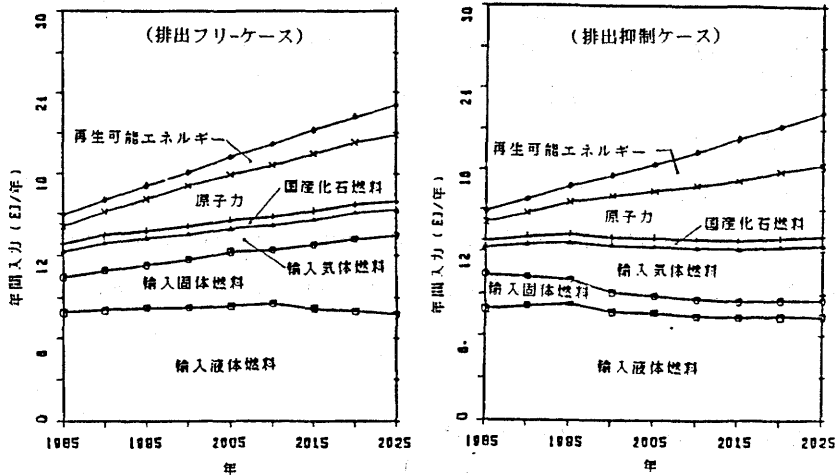


図5 一次エネルギー入力の状況（高需要／低燃料価格シナリオ）

抑制の強化に伴う変化は少ない。石炭利用は鉄鋼業用コークス製造のように代替が難しい用途にほぼ限られ、それ以外ではほとんど使われなくなる。液体燃料は運輸用以外の消費が減るため、液体燃料利用における運輸用及び化学原料用の比率が高まる。気体燃料の消費は、発電用をはじめとして最終利用でも増加している。

発電においても排出が抑制されると燃料及び技術の代替が進み、後半にはほとんど全ての電力が原子力、気体燃料、再生可能エネルギー、及びコージェネを用いて発生される。そのうち気体燃料発電は、後半の期間には高効率の複合サイクル発電と燃料電池によるコージェネ等が主となり、大部分がCO₂低排出型の技術に置き換わる。

石炭の液化並びにガス化などの変換技術において、変換用エネルギー及び添加水素等を石炭自身で賄う方式は、変換過程の排出が加わるため、石炭を直接利用する場合よりもCO₂排出が増加することになる。この種の変換は、運輸用液体燃料の確保ならびにSO_x及びNO_xの排出低減の観点からは重要であるが、液体燃料が十分に確保されかつCO₂排出削減を進めなければならない場合には導入が困難になる。ただし石炭を燃料改質するための変換用エネルギーを原子力などの非炭素エネルギーで供給する方式は、CO₂排出低減に関する限り有利である。

再生可能エネルギーの利用は、CO₂排出抑制が強化されると増加する。再生可能エネルギーの半分

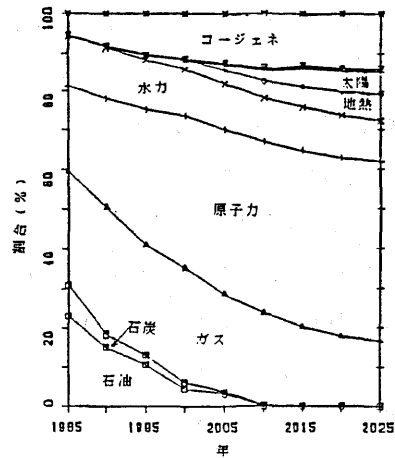


図6. 発生源別発電電力量の割合の変化（高需要／低燃料価格シナリオ、排出抑制ケース）

以上を占める水力発電は、既設が大部分であり増加分は少ない。主な増加は地熱による発電及び熱供給、太陽エネルギー利用の発電、及び太陽熱の分散型直接利用などによる。

住宅部門では、太陽エネルギー利用技術などの非炭素エネルギー源、ヒートポンプ式冷暖房等の高効率技術が、排出制約の強化に伴い導入が進む。

運輸部門では、CO₂排出低減のためにガソリン車よりもむしろディーゼル車のような総合効率の高い方式が要求される傾向がある。電気自動車、水素自動車は今回の分析における前提では、競争力が十分ではないが、電気や水素の発生に化石燃料以外のエネルギーが利用できる場合には受け入れられる。

4. CO₂ 回収処理技術及び原子力の効果

米国ブルックヘブン国立研究所のM.Steinbergらによって提案されているCO₂回収処理技術は、燃焼ガス中のCO₂を化学的に吸収し、熱を加えてそのCO₂を分離した後に液化して、深海底（500m程度の深さで十分であるが、CO₂の密度が水より大きくなる3000m以上の方がより安定化する）に送り込むものである。石炭火力発電所に設けた場合、CO₂の回収効率は90%、建設費の増加は約70%、発電所総合効率は34%程度になる、と推定されている⁽⁶⁾。この方法の実現性については海洋の振舞い、生態系への影響など検討すべき点も多いが、エネルギー収支の点からは注目に値する。

この技術の導入効果を見るためにモデルシステムの集中型エネルギー変換技術に組み込んだケースについて分析を行ったが、かなり効果的であるとの結果を得た。また回収処理装置の波及効果としてCO₂排出が少ない化石燃料発電が増加するため最終需要段階での電力利用が増加し、さらに化石燃料発電における石炭火力の割合が増加することによって低炭素燃料利用に余裕が生じ、その分が最終需要へ振り向けられるので、全体として排出をさらに低減できる可能性がある。

図7は、コスト対CO₂排出量トレードオフ曲線に、CO₂回収処理技術を導入した場合、並びに原子力を抑制した場合についての関係を加えたものである。基本ケースでは、CO₂排出抑制によって急激なコスト増を生じるが回収技術を導入した場合にはそのコスト増分がかなり小さくなる。原子力を抑制した場合にはCO₂排出量及びコストのいずれもが増加して、トレードオフ曲線が右上の方向に移動する。この移動の状況から、逆に原子力の導入による効果が推測される。

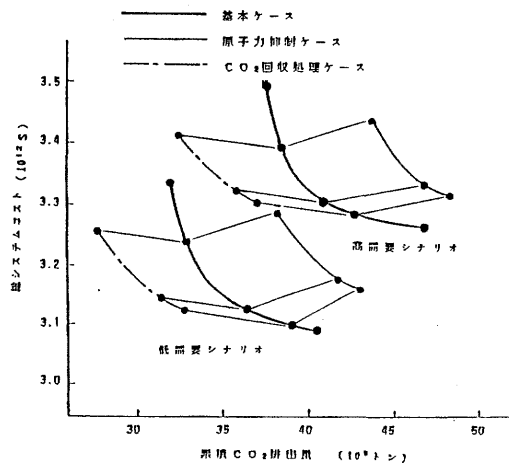


図7. CO₂回収技術及び原子力抑制のコストとCO₂排出への影響

図8は、種々のCO₂排出低減方策が総システムコストとCO₂排出量に与える効果を、分析結果に基づいて概念的に表わしており、それぞれの効果が得られる向きを矢印が示している。但し、矢印の長さには意味を持たせていない。方策の効果は、システムの基準状態や制約条件などに依存するので一概に断定できないが、今回の分析の前提とシステムの基準状態のもとではこの図のような傾向が推定される。図において矢印が左下に向う方策が、コストとCO₂排出を同時に減らすものとして導入が望まれ、例えばガス複合サイクル発電、燃料電池 コージェネレーション、地熱発電などがこれに当たる。なお、これらは高い効率と経済性が期待される技術であるため、排出制約がない場合の分析結果でも多く導入される結果を得ている。CO₂排出制約が強化されるに従って、左上方向の勾配が小さいものから順に大きいものへと導入が進み、排出低減上不利なものが置き換えられる。

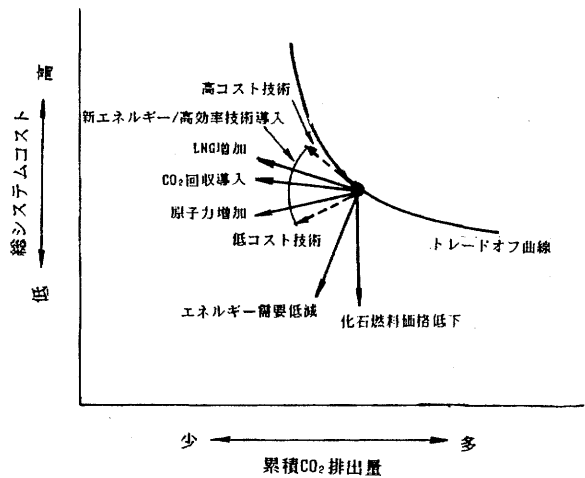


図8. システム構成変化の総システムコストとCO₂排出量への影響

5. CO₂ 排出と水素エネルギーシステム

今回の分析には、水素エネルギーシステムに関する技術として熱化学法、水電解法などの水素製造技術の他、航空機、自動車における利用などごく限られた技術を含めているにすぎないが、これまでの考察によれば次のようなことが言える。

- (1) 水素エネルギーは最終利用段階においてはCO₂無排出であるが、主として水素の供給側（生産段階）いかんによっては、排出量が増えたりコスト対有効性が劣ることもあるので、技術毎の効果はシステム全体を通して評価する必要がある。
- (2) 原子力や再生可能エネルギーなどの、CO₂を排出しないエネルギー源を用いる水素エネルギー供給は、排出抑制が強化されると導入が促進される性質がある。そのようなエネルギー源が十分にある場合、あるいはそれらが水素専有的な場合には、コストと排出削減量のトレードオフ関係により導入が決められるが、供給源が十分ではない場合には水素エネルギーと同様な性格をもつ電力システムとの間に競合が起こり、輸送や貯蔵の利便性、用途の性質、総合効率、コスト、CO₂低減効果などの評価を通して選択される。
- (3) 化石燃料を供給源とする水素エネルギーシステムは、変換段階から先へは炭素を送り出さないため、利用段階ではCO₂の排出はないが、変換（燃料改質、発電・電解など）段階で発生するCO₂を

大気に放出する場合には、化石燃料を直接利用する場合よりも、全体としてCO₂の総排出量が多くなりやすい。

- (4) 化石燃料による場合でも、発電あるいは水素製造の過程で発生するCO₂を回収・処分する方法が適用できるならば、CO₂低排出システムを構成できるため電力並びに水素エネルギーの導入が促進される。

6. おわりに

以上、エネルギーシステムからのCO₂排出の低減の可能性を、モデルを用いて分析した結果について概要を述べた。それによると排出低減はかなり困難であり、可能なあらゆる手段を適切に導入して対処していく必要があると考えられる。今後CO₂排出低減についての洞察を深めると共に、新たな低減方策を見い出すため、関連する技術についてより多くの情報とデータを収集し、モデルと入力データを見直した後、新たな分析を行う計画である。

地球温暖化問題の解決は世界的な協力によりはじめて達成できることであり、今後は具体的なCO₂抑制方策の国際的な情報交換が重要になる。それらの方策の効果はエネルギーシステム全体の分析に基づいて評価されることが必要であることから、IEAをはじめとしていくつかの技術システムの分析に関する国際協力研究が計画されている。わが国もこの種の計画には先導的に参加して、地球環境問題解決に貢献することが望まれる。

参 考 文 献

- (1) L. G. Fishbone, G. Gieasen et. al : User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0), A Multi-Period, Linear Programming Model for Energy Systems Analysis, BNL 51701, July 1983。
- (2) 遠藤栄一, 小山茂夫 : エネルギーシステムモデルMARKAL の実用化と応用に関する研究, 電子技術総合研究所研究報告, 第869号, 昭和61年7月。
- (3) 小山茂夫, 伊原征治郎 : 環境排出抑制のエネルギーシステム構成への影響分析, 電総研究速報, TR-89-5, 1989年4月18日。
- (4) 伊原征治郎, 小山茂夫 : 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巻11号, 1989年11月。
- (5) 小山茂夫, 伊原征治郎 : 二酸化炭素排出抑制のエネルギーシステム構成への影響分析, 第10回水素エネルギーシステム研究発表会, 1989年11月16日。
- (6) M. Steinberg and H. Cheng : A System Study for the Removal, Recovery and Disposal of Carbon Dioxide from Fossil Fuel Power Plants in the U.S., BNL 35666, Feb., 1985。