

## ■ 研究論文 ■

## マルチエリア協調型コージェネレーション・システムの最適計画

## Optimal Planning of Cooperative Cogeneration Systems for Multi-Areas

伊東 弘一\*・横山 良平\*\*・蒲生 恵司\*\*\*・松本 芳一\*\*\*\*

Koichi Ito Ryohei Yokoyama Satoshi Gamou Yoshikazu Matsumoto

(1994年1月10日原稿受理)

## Abstract

It is investigated effects electric wheeling - mutual accommodation of electric supply through an electrical grid - on both economical and energy saving properties of cogeneration systems installed into multi-areas. An optimization approach is adopted to evaluate a critical effect of electric wheeling. Equipment capacities and utility maximum demands in each area are determined so as to minimize the annual total cost of the total system in consideration of operational strategies for energy supply to the respective areas and mutual electric wheeling. Numerical studies are carried out on the total system with fuel cells. The results show that the introduction of electric wheeling brings the reductions of both the annual total cost and the annual primary energy consumption by reflecting the more effective utilization of fuel cells through the wheeling function.

## 1. 緒 言

資源枯渇および地球環境問題がクローズアップされている現在、エネルギー有効利用技術の一つであるコージェネレーション・システムが注目を集め、産業用および民生用に広く導入されてきている。このコージェネレーション・システムに対して、エネルギー有効利用という本来の目的をより高度に達成するためには、単にシステムの導入だけではなく、その設計および運用計画を合理的に行う必要がある。また、このような計画を個々に導入されたシステムに対して独立して行うだけではなく、よりグローバルな視野から、これらのシステム間のエネルギー利用に関する協調関係も考慮に入れて総合的に行っていくことが必要となるであろう。

上記のような観点から、本研究では対象としてグローバルなシステムであるマルチエリア協調型コージェネ

レーション・システムを取り上げ、その設計および運用計画に最適化手法を適用し、エネルギー有効利用による経済性と省エネルギー性の向上の可能性を検討する。

マルチエリア協調型コージェネレーション・システムを実現する一方法として、ここでは電力託送<sup>1)</sup>を採用する。ここで取り上げる電力託送とは、電力会社の系統網を介して複数エリア間で相互に電力を融通するものであり、既存の系統網の利用が可能であるために新たな設備導入が不要であること、電力の輸送損失が非常に小さいことなどの利点がある。また、電力託送によってエネルギー供給の協調を行うことにより、個別に導入されたコージェネレーション・システムに比較して運用の柔軟性が増し、経済性や省エネルギー性の面から有利になる可能性がある。

以下では、最適化手法に基づいた設計・運用計画を通して、電力託送を行った場合にエリア全体に対して

\* 大阪府立大学工学部エネルギー機械工学科教授

\*\* " " " 助教授

\*\*\* " " " 助手

〒593 堺市学園町1-1

\*\*\*\* 関西電力㈱総合技術研究所主席研究員

〒661 尼崎市若王寺3-11-20



図-2で示されるシステムでは、エネルギー需要量として電力、冷房、暖房および給湯の4種類を想定している。図中の機器記号は、FC：燃料電池ユニット、RW：温水吸収冷凍機、RG：ガス吸収冷温水機、BG：ガスボイラ、RD：放熱器、EP：受電設備、PC、PH、PW：ポンプを、またエネルギー記号はE：電力量、F：都市ガス消費量、Q：熱流量をそれぞれ表す。上付添字は、d：需要、a：補機、c：冷房、h：暖房、w：給湯、e：排熱を、下付添字は、buy：買電、gas：都市ガス、wheel：託送電力、disp：廃熱をそれぞれ示し、下付添字としての機器記号は、エネルギー量が各機器に関する量であることを示す。この図では表現上、買電と託送電力は異なる線で描かれているが、実システムでは両エリアからの電力託送の同時発生防止、および電力を買いながら託送することの防止のために同一の配線を利用するものとする。

このシステムでは、個々のエリアで燃料電池ユニットによる発電と電気事業者からの買電および他エリアからの託送電力によって電力が供給され、その電力は一般の電力需要ならびにシステム内で消費されるポンプや各種補機用の電力および他エリアへ託送するために消費される。その際、燃料電池ユニットから回収された排熱は各需要の必要に応じて冷房、暖房および給湯に利用され、過剰の排熱は放熱器により廃棄される。冷房需要は燃料電池ユニットからの排熱を利用する温水吸収冷凍機およびガス吸収冷温水機によって、暖房需要は排熱、ガス吸収冷温水機およびガスボイラによって、給湯需要は排熱およびガスボイラによってそれぞれ賄われる。

### 2.3 最適計画問題の定式化

このようなマルチエリア協調型コージェネレーション・システムの設計計画では、各機器の容量や買電および都市ガスなどのユーティリティ最大契約量に関して多くの代替案が存在する。長期的経済性の観点から各エリアで各機器容量やユーティリティ最大契約量(以下ではこれらを総称して、一般的に機器規模と呼ぶ)を合理的に決定することは大変重要な目的である。例えば、燃料電池ユニットと買電最大契約量との間では重要な関連性が存在する。言いかえると、もし燃料電池ユニットの容量が小さく見積られるならば、買電最大契約量と電力の購入量が大きくなり、導入の効果は比較的小さくなる。また逆に、もし燃料電池ユニットの容量が大きく見積られるならば、買電最大契約量と電力の購入量が小さくなるが、燃料電池ユニット

の利用率は減少するだろう。さらに、エリアAのコージェネレーション・システムの各機器の容量は、両エリアの電力託送の効果によって、エリアBの各機器容量に対して影響を及ぼす可能性がある。一例として、もしエリアAの燃料電池ユニットの容量が比較的大きく決定されるなら、エリアBの燃料電池ユニットの容量を小さくする効果があるということも考えられる。

本研究では上記のような観点から、この計画問題に最適化手法を適用する。すなわち、この計画問題を与えられた機器構成、入力エネルギー料金体系、エネルギー需要量に対して、エネルギー需要量の季節的・時間的変動に対する電力託送を含むシステムの運用方を考慮しながら、機器規模を最適に決定する最適化問題として捉える。また、この考え方はここで検討する電力託送の効果の限界を把握する点からも合理的なものである。

以下に具体的な定式化について簡単に説明する。

未知変数はエリアA、Bの機器規模を表す設計変数ベクトル $x^A, x^B$ と、各時間のエネルギー需要量に対応する機器運用方策に関連する制御変数ベクトル $y_i^A, y_i^B, z_i^A, z_i^B$ とする。ここで、上付添字A、Bはエリアを表し、下付添字は離散化した各時間を表す。また、 $y$ は、エネルギー流量を表す連続変数ベクトルで、 $z$ は運転・停止条件に対応する0-1整数変数ベクトルである。

目的関数としては、長期的経済性の観点からエリア全体の年間総経費の最小化とする。年間総経費は年価法によって年間設備費と年間運用費の和として求められる。ここでは、各構成機器の初期設備費を容量の関数として表し、年間設備費を評価する。一方、年間運用費をユーティリティ基本料金とその従量料金の和として算定する。基本料金はユーティリティ最大契約量の関数として表すものとする。また、従量料金は、年間の機器運用方策に基づいて決定されるユーティリティ消費量から算定される。以上より目的関数である年間総経費 $J$ は次式で表せる。

$$J = F(x^A, x^B) + \sum_i V_i(x^A, x^B, y_i^A, y_i^B, z_i^A, z_i^B) \quad (1)$$

ここで、 $F$ はエリア全体の年間設備費と年間基本料金との和であり、設計変数ベクトル $x^A, x^B$ の関数として表される。関数 $V_i$ はエリア全体の各時間あたりのユーティリティ従量料金を表す。 $V_i$ は直接的には、ユーティリティ消費量のみ関数であるが、後述の制約条件によって、 $x^A, x^B, y_i^A, y_i^B, z_i^A, z_i^B$ の関数となる。

なお、 $\Sigma$  は各時間についての総和を表す。

制約条件としては、各エネルギー需要量に対して各構成機器の性能特性を表すエネルギーの入出力関係、各エネルギー・フローについてのエネルギー・バランスおよび需給関係を考慮する。ここで、各機器の入出力関係に関する性能特性値は容量の関数として表す。これらの制約条件式は各時間  $t$  について、

$$C_t(x^A, x^B, y_t^A, y_t^B, z_t^A, z_t^B) = 0 \quad (2)$$

と表される。ここで、 $C_t$  は制約条件式を表す関数からなるベクトルである。

### 2.4 最適計画問題の解法

上記最適計画問題は、エリア間のエネルギーの相互利用関係や与えられたエネルギー需要に対して多くの代替案が存在する機器容量と運用方策の決定を同時に行う必要があるため、複雑かつ大規模となる。ここでは、この問題に対して効率的に最適解を得るために、著者らによって開発された階層的最適化手法<sup>3)</sup>を適用した。この解法は、上述の最適化問題を上位レベルの機器規模決定問題と下位レベルの機器運用方策決定問題の2つに分離し、両者の整合性をペナルティ法によって有機的に保ちながら効率よく最適解を求めるものである。なお、上位レベルの機器規模決定問題を非線形計画問題として考慮し、その解法には逐次線形計画法を適用する。下位レベルの機器運用方策決定問題では混合整数線形計画問題として定式化し、その解法には分枝限定法に基づくアルゴリズムを採用する。

### 3. 計算事例

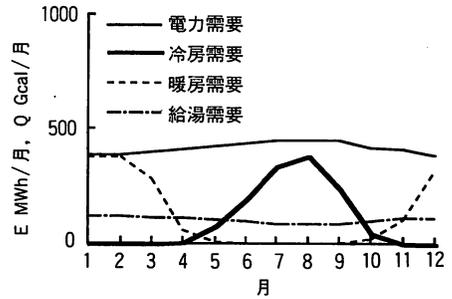
上述の最適計画に基づいて電力託送の効果を検討した数値計算事例の結果について以下に示す。

#### 3.1 入力データ

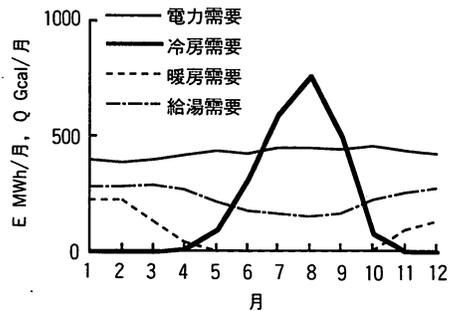
検討対象施設としては、エリアAにビジネスホテルを、エリアBにシティホテルを選択する。図-3はエリアA、エリアBの各月の電力・熱エネルギーの需要量を示したものである。それぞれのエネルギー需要量は年間12代表日を設定し、1代表日につき12分割したものを推定した。さらに機器規模の余裕率を考慮するため、8月および1月のエネルギー需要量からそれぞれ夏期および冬期のピーク需要量を推定し、機器規模の決定に考慮する。電力最大需要量は両エリアとも約1000kWとし、電力需要に対して同規模施設とする。

電力および都市ガスの料金体系は、次の4つのケースを検討する。

料金体系-1：電力；業務用電力料金



(a) ビジネスホテル



(b) シティホテル

図-3 各月エネルギー需要量

都市ガス；空調用夏期三種と一般料金をとを併用

料金体系-2：電力；大口電力料金

都市ガス；空調用夏期三種と一般料金をとを併用

料金体系-3：電力；業務用電力料金

都市ガス；空調用A一種

料金体系-4：電力；大口電力料金

都市ガス；空調用A一種

ただし、各料金体系についてガスボイラに関しては一般料金を採用する。また、託送料金単価は $\alpha$ と表現し、パラメータとする。

構成機器の性能特性については実データに基づき決定した。ここでは主要な機器である燃料電池ユニットの発電効率についてのみ表1に示す。また、各機器の初期設備費は表2に示す単価に従うものとする。

なお、年価法に基づく年間総経費の評価において、機器耐用年数を15年、機器残存価値を零、年間利率を10%とする。

#### 3.2 検討ケース

ここでは電力託送による効果を調べるために、以下の二つの計算事例を取り上げた。

計算事例1：託送料金単価 $\alpha$ に関するパラメータ分

表1 燃料電池ユニットの発電効率

負荷率 %	0 (待機)	25	50	75	100
発電効率 %	—	33.9	36.8	37.9	37.8
排熱回収率 %	66.3	39.7	38.9	39.0	46.4
総合効率 %	66.3	73.6	75.7	76.9	84.2

表2 構成機器の初期設備費単価

機器名	初期設備費単価
燃料電池	25万円/kW
ガス吸収冷温水機	5.1万円/(Mcal/h)
ガスボイラ	1.2万円/(Mcal/h)
温水吸収冷凍機	6.5万円/(Mcal/h)
放熱器	1.5万円/(Mcal/h)
受電設備	5.0万円/kW

析.  $\alpha$  は 0 ~ 10円/kWhまで 1円/kWh ごとに変化させる。比較対象として、託送を行わない独立したコージェネレーション・システム群（以下、独立システムと呼ぶ）を取り上げる。なお、料金体系-1を採用する。

計算事例2：料金体系別による比較・検討。料金体系-1~4に対応するケースをそれぞれ1~4とする。ただし、 $\alpha$  は計算事例1より設定する。比較対象として、各料金体系に対して独立システムを取り上げる。

以上のような計算事例を通して、電力託送がエリア全体の経済性、省エネルギー性に及ぼす影響を検討する。なお、電力託送を行う協調型コージェネレーション・システム群を独立システムに対して、以下では単に協調システムと呼ぶことにする。

3.3 計算結果および考察

(1) 計算事例1（託送料金単価  $\alpha$  の変化による影響）

図-4に託送料金単価  $\alpha$  に対する燃料電池ユニットの最適容量の変化を示す。なお、独立システムの場合の最適容量を右端の二点として示す。ここでは主な設計変数として燃料電池ユニット容量のみを取り上げている。また、託送料金単価  $\alpha$  に対する託送電力量の変化も図-5に示しておく。

図-6には託送料金単価  $\alpha$  に対する託送効果率の変化を示す。託送効果率として、ここでは独立システムに対する年間一次エネルギー消費量の削減率、すなわち省エネルギー率と年間総経費の削減率を採用した。その定義は以下の通りである。

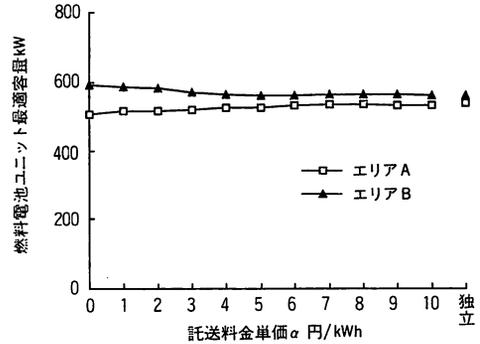


図-4 託送料金単価  $\alpha$  に対する燃料電池ユニット最適容量の変化

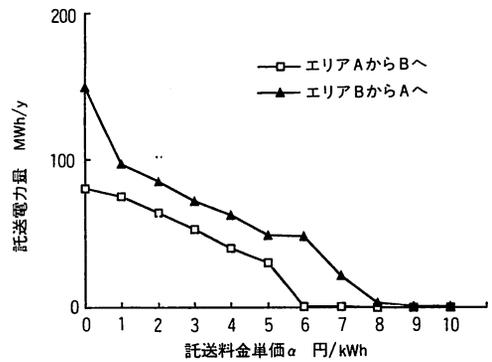


図-5 託送料金単価  $\alpha$  に対する託送電力量の変化

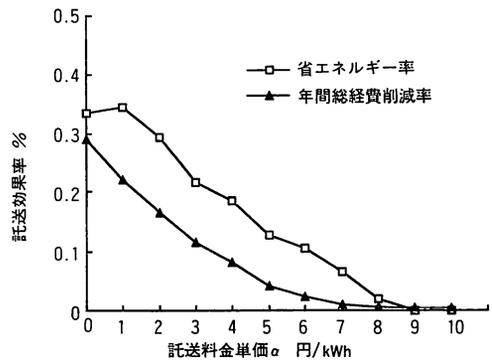


図-6 託送料金単価  $\alpha$  に対する託送効果率の変化

$$(\text{省エネルギー率}) = 100 (Q_i - Q_w) / Q_i \quad (3)$$

$Q_i$ : 独立システムの年間一次エネルギー消費量

$Q_w$ : 協調システムの年間一次エネルギー消費量

$$(\text{年間総経費削減率}) = 100 (C_i - C_w) / C_i \quad (4)$$

$C_i$ : 独立システムの年間総経費

$C_w$ : 協調システムの年間総経費

ただし、年間一次エネルギー消費量の評価に関しては買電の効率を38.8%（低位発熱量換算）とする。

まず、燃料電池ユニットの容量について考察する。図-4より燃料電池ユニットの最適容量の変化は、 $\alpha$ に関して大きく次の二つに分けられる。すなわち、(a)  $\alpha$ が0～5円/kWhの範囲、(b)  $\alpha$ が5円/kWh以上の範囲である。(a)では独立システムの最適容量と比較して全体的にエリアAで縮小、エリアBで拡大している傾向がある。しかし、 $\alpha$ が大きくなるにつれて、その傾向は薄れて独立システムの最適容量に近づいている。(b)では独立システムとほぼ同じ最適容量であり、大きな変化はみられない。

この燃料電池ユニット最適容量の変化の影響は託送電力量に現れている。図-5から(a)では両エリアから多くの電力託送を行っており、 $\alpha$ が大きくなるにつれてその量が減少していることがわかる。燃料電池ユニットの最適容量が変化していない(b)では、ほとんどエリアBからのみ電力託送を行っている。

以上から、(a)での燃料電池ユニット最適容量の変化は、託送電力量を増やすために行われたものであると思われる。このように燃料電池ユニットの容量を変化させると、設備費はそれほど変化しないが、安価な託送電力の使用によって年間総経費を削減することができる。

次に託送効果率について考察する。図-6より、年間総経費削減率、省エネルギー率のどちらも向上させることができていることがわかる。年間総経費削減率は上述の燃料電池ユニット最適容量の変化を反映して、(a)で大きく変化し、(b)ではほとんど変化がなく横ばいとなっている。この傾向より、電力託送の経済性の効果は(b)ではほとんどなく、(a)内で $\alpha$ が低下するにつれて大きくなっていることがわかる。

一方、省エネルギー率は $\alpha$ が大きくなるにつれて、ほぼ直線的に低下している。ただし、省エネルギー率が $\alpha$ が1円/kWhの時に0円/kWhの時より向上しているのは、0円/kWhの時の方がエリア全体で燃料電池ユニット容量が小さく見積もられているためであり、目的関数を年間総経費の最小化としていることに起因している。また、年間総経費削減率と比較すると、 $\alpha$

が小さい場合には省エネルギー率の方が大きい値を取っており、電力託送は省エネルギー性に対する効果が大きいことがわかる。

この計算事例では、託送効果率を考慮すると、 $\alpha$ として5円/kWhより小さい範囲で設定するのが適当であると判断できる。また、省エネルギー率を重視すると、1円/kWh付近が適当であるかもしれない。

#### (2) 計算事例2 (料金体系別による影響)

計算事例1の結果から、 $\alpha$ を1円/kWhと設定して検討を行っていく。

ここでも設計変数として燃料電池ユニット容量のみについて検討を行う。表3に独立システムと協調システムの燃料電池ユニット最適容量および託送電力量を示す。また、表4に各ケースにおける年間一次エネルギー消費量、年間総経費および託送効果率を示す。

ケース1を基準にして、料金体系の違いによる影響について考察していく。

電力従量料金単価の小さいケース2では、協調システムにしても、燃料電池ユニットの最適容量、年間総経費および年間一次エネルギー消費量に全く変化はなく、電力託送も行われておらず、電力託送の効果はないということがわかる。これは、電力従量料金単価が小さいと、安価な託送電力の価値が下がり、電力託送の効果は現れにくくなるためであると思われる。このことは、ケース3と4とを比較することによっても確認できる。

都市ガス従量料金単価の小さいケース3では、協調システムにすると、両エリアで燃料電池ユニットの最適容量を拡大し、また両エリアから電力託送を行っている。その結果、年間総経費も年間一次エネルギー消費量もどちらも削減させることができ、託送効果率はケース1に比較して、大きいものとなっている。このことから、都市ガス従量料金単価を小さくすると、コージェネレーションの導入が促進され、電力託送の効果が大きくなることがわかる。また、ケース2と4を比較しても同じことがいえる。

電力および都市ガス従量料金単価の小さいケース4

表3 燃料電池容量および託送電力量

	システム	ケース1		ケース2		ケース3		ケース4	
		エリアA	エリアB	エリアA	エリアB	エリアA	エリアB	エリアA	エリアB
燃料電池容量 kW	独立	540.1	562.1	265.6	384.9	737.7	747.4	656.6	678.2
	協調	517.3	586.0	265.6	384.9	753.7	784.9	689.0	705.5
託送電力量 MWh/y	協調	74.9	97.2	0.0	0.0	56.6	272.9	38.4	235.0

表4 エリア全体の年間一次エネルギー消費量、年間総経費および託送効果率

		システム	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
年間一次エネルギー消費量 Gcal/y	独立		27180.7	30698.0	27011.1	26970.7
	協調		27084.3	30698.0	26860.0	26808.4
年間総経費 百万円/y	独立		281.70	266.43	191.05	189.78
	協調		281.09	266.43	189.19	188.26
託送効果率 %	省エネルギー率		0.35	0.00	0.56	0.60
	年間総経費削減率		0.22	0.00	0.97	0.80

でも、ケース3と同様に両エリアで燃料電池ユニットの最適容量を拡大し、電力託送を行うことにより年間総経費、年間一次エネルギー消費量を削減できている。託送効果率もケース1に比較して大きくなっている。これは、都市ガス従量料金単価が小さい影響の方が強いと考えられる。

以上から、電力従量料金単価が大きく、都市ガス従量料金単価が小さい料金体系のもとで、電力託送の効果は大きくなるということが確認された。

最後に、電力最大需要に対する燃料電池ユニットの導入割合について料金体系別に考察する。表3をみると、エリアA、Bの燃料電池ユニットの最適導入容量は料金体系別に大きく変化している。その容量が電力託送の効果に大きく影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、燃料電池ユニットの最適導入容量がエリアA、Bとも電力最大需要の40%以下であるケース2では、全く電力託送の効果はなく、50%~80%の大容量を導入しているケース1、3、4では、燃料電池ユニット容量が大きいくほど電力託送の効果は大きくなっている。

#### 4. 結 言

本研究では、電力託送によるエネルギー供給の協調を認めた複数エリアのコージェネレーション・システムに対して、エリア全体の経済性や省エネルギー性に及ぼす電力託送の限界効果について、最適化手法に基づいて検討した。その結果、以下の事柄が判明した。

- (1) 電力託送を行うことによって、年間総経費削減と省エネルギー率向上とを同時に達成できる。
- (2) 最適化手法の適用によって、電力託送の効果を合理的に評価することができた。
- (3) 電力託送の効果に対する託送料金単価 $\alpha$ の影響を明かにすることができた。本研究で対象とした施設に対しては、 $\alpha$ として5円/kWh以下とするのがより

効果的であることがわかった。

(4) 料金体系の違いが電力託送の効果に大きな影響のあることを明かにした。本検討ケースでは、料金体系は電力従量料金単価が大きく、都市ガス従量料金単価の小さいものを選択すると、電力託送の効果が大きく現れ、年間総経費削減と省エネルギー率向上が成し遂げられることがわかった。

なお、上記(3)に関連して以下の事柄を追記しておく。託送料金単価 $\alpha$ の影響については限られたケースのみ言及したが、その他のケースについても基本的に本手法に基づいて $\alpha$ の影響に関する知見を得ることが可能である。ただし、 $\alpha$ の影響は対象施設の組合せ、料金体系、システム構成などの条件によって変わる可能性があり、今後これについて検討していく必要がある。例えば、計算事例2で取り上げた各種料金体系の下で $\alpha$ に対するパラメータ分析を行った場合を考えると、計算事例1と同様に電力託送をより効果的にする $\alpha$ が存在し、その値は料金体系に依存して、1~10円/kWhの広範囲にわたっている。

また、本論文では、エネルギー供給の協調として電力のみを取り上げたが、熱供給の協調に対しても検討を行う必要がある。特に最近では、広域エネルギー利用<sup>9)</sup>に関連して長距離熱輸送に対して積極的な取り組みが必要とされており、今後上記のような検討が重要となってくるであろう。

#### 参 考 文 献

- 1) 浅野浩志；欧米電気事業における規制と競争—電力託送を中心に—、電気学会雑誌、111巻、9号(1991)、755~762。
- 2) 燃料電池発電システム編集委員会(編)；燃料電池発電システム(1992)、オーム社。
- 3) 伊東弘一、横山良平；コージェネレーションの最適計画(1990)、産業図書、111~131。
- 4) 小林博行；ニューサンシャイン計画の総合展開、エネルギー・資源、14巻、4号(1993)、332~338。