

エネルギーモデルへの 多属性効用理論の利用について

高橋 亮一・及川 哲邦・鶴岡 一夫

1. はじめに

エネルギー問題は考察すべき範囲におのずとある定まった時間的・空間的な拡がりがある。ひとつの企業が経済合理性を追求すること、ある地域社会の開発とエネルギー産業との相関を吟味すること、わが国のエネルギー保障の問題を考えること、原子力開発における高速増殖炉の長期的戦略を立てること等のようにおのおのが拡がりをもっているが、いずれも経済、技術、環境という3つの側面から取り扱われている。

つまりエネルギー問題は E^3 (Economy, Engineering, Environment)空間の議論となっている。これらの軸に沿って複雑多岐にわたる因果関係を解き明かして、最も出現しそうな定量的指標を示さねばならないであろうし、またいくつかの目標のもとに適切な調和が得られるような選択はいかなることであるか等を論ずる必要が出てくる。

すなわち多目標のもとで最適解を求めること、精度よく予測・評価すること等という問題設定が可能となるために、また出現されるであろう状況が複雑であるために、エネルギー関連のテーマに

はモデル分析が用いられる[1][2]。

この報告では、原子力製鉄技術研究組合による「多目的高温ガス炉による2次エネルギー供給センター、Utility Complexの商用化」という構想[3]を例題に選んで、いわば技術評価型という分類[2]に入るBESOM型モデル[4]をもとに意思決定に至る道筋を調べ、与えられた問題の枠組み整理を行なうことを目的に多属性効用理論[5][6]による解法を試みた。

2. エネルギーモデル分析としての背景

これまでのエネルギーモデルの調査[2][7]によると、モデル開発の動機あるいは目的は、

(1) 資源・環境の制約のもとで石炭のガス化・液化などの新エネルギー技術の問題、超長期の原子力における高速増殖炉の導入、電気事業経営のための供給力の確保に関する条件というような技術を評価するものと、

(2) わが国の政策立案の基本的部分を担う長期のエネルギー需給予測、経済とエネルギーの因果関係を解明して石油価格の高騰に備えるためのもの、

(3) ひとつの企業の日々の石油製品の管理のため、あるいは操業によって生じる環境へのインパクトを制御するため等の業務遂行の効率化を旨とするもの等である。

しかし開発されたモデルがその機能を有効に発

たかはし りょういち、おいかわ てつくに 東京工業大学、原子炉工学研究所

つるおか かずお 原子力製鉄技術研究組合

揮しているとは必ずしも言い難く、エネルギーモデル分析が常に活用される状況でもない。

モデル分析は十分な場を与えられていない現実がある。いくつかの不安をもたれている状況を並べると以下のようなものである。前提と仮定をもとにエネルギーモデルは拡がりのなかに内部と外部に境界を本質的に有しているにもかかわらず、分析の結論の読者はモデルの適用範囲を超えた部分で議論をおこし分析を誤解する。また長期の需給予測が提示されたとしよう。予測値の読者は不安をもつが、おもに予測側に対する不確実性の主観的な評価によって、その程度に差異がでる。これは読者がすでに頭のなかに存在する自身のエネルギーモデルとの比較をしているためであろう。またモデルの機能は技術評価に適しているにもかかわらず、精度の良い予測値を要求するような誤解が生じる。

また大規模なモデルからいくつかの代替案あるいは選択肢が得られたとしても、モデル構造が複雑になるにつれてただし書きの多くついた結論となって読者への説得力が不足してくる。また非常に重要であるが、わが国には良く整備され取扱いの容易なエネルギー関連のデータベースが存在しないために、データベースに対する素朴な疑問が常についてまわる[8]。

さてモデル分析の実際的で重要な役割は、与えられた問題の枠組みを整理して代替案の集合を広い範囲から探し求め、意思決定のための判断材料を提供することである。通常ではモデルの作成者、利用者、分析の結論の読者がおのおのに分離していて、問題の議論が十分に展開し難い場面が多い。種々なモデルを頭のなかにすでに作成している結論の読者が、モデル分析の実際的部分を歪めて解決し結論を独り歩きさせる可能性があること、分析の説得力が希薄になりがちなる傾向をもつことになりやすい。

そこで問題の枠組み整理と将来あるべき代替案の集合をエネルギーモデルから求めて、あえて広

い場での議論を省略して意思決定過程へ短絡させたならば、いかなることになるのかという設定を調べようとした。これが筆者のエネルギーモデル分析に意思決定モデルのひとつである多属性効用理論をもち込んだ動機である。

3. 解析対象と意思決定集団としての背景

高温ガス炉 (High Temperature Gas-cooled Reactor : HTGR) が生産する核熱エネルギーを利用して発電することの他に、このエネルギーをわが国の約66%を占める非電力部門の需要に供給することを E³ 空間の問題として考察する意味は大きい。HTGR は軽水炉と呼ばれる発電用原子炉と同じようにウランを燃焼させるが、軽水炉と異なりヘリウム・ガスで冷却して約1000℃の高温ガスが取り出せる原子炉である[9]。

したがって高温の作業ガスは単に発電のみに利用されるものではなく、積極的に製鉄用還元ガスの生産、重質油・石炭からの合成ガス製造などのプロセス・ヒートとして産業分野のエネルギー需要を効率よく満たすことができるという期待が大きい[10]。米国、西独では開発が進んで、炉心出口でのガス温度が着実に上昇してきている状況にある[11]。ここで図1に Utility Complex (UC) のプロセスの一例を示すが、UC とは核熱エネルギーと重質化石燃料を組み合わせて利用しやすい各種の2次エネルギーを需要に応じて、それぞれの産業にその2次エネルギーを供給する形態である。

このような期待のために1973年に工業技術院の大型プロジェクトとして原子力製鉄技術研究組合 (Engineering Research Association of Nuclear Steelmaking; ERANS) が設置されて、還元ガス製造装置、高温熱交換器、還元鉄製造装置、超耐熱合金、高温断熱材料という研究開発と、それらをトータルシステムとして最適化するための研究がなされ、約8年の第1期研究開発が1980年度に終了するところである。

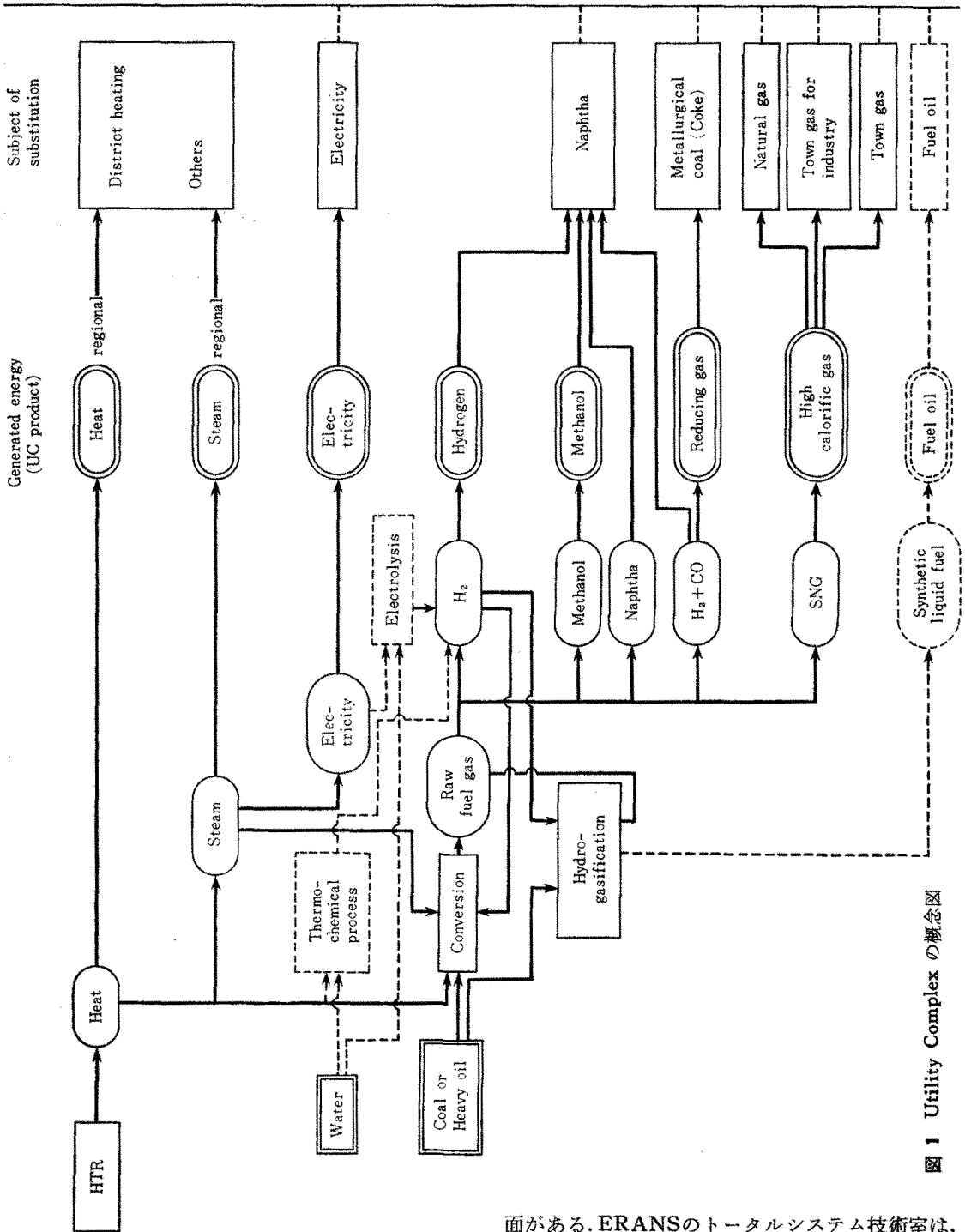


図 1 Utility Complex の概念図

このように核熱エネルギーの多目的利用は化石燃料資源の涸渇あるいは高騰化に対処する有望な将来の選択肢のひとつであり得るといった技術的側

面がある。ERANSのトータルシステム技術室は、HTGR と核熱利用プロセスおよびその目的を達成させる各種の装置の開発、実験データの収集・解析をつうじて原子力製鉄、USを熟知し、システム工学的思考に慣れた研究者の集団である。さら

に核熱利用に関連する経済的、環境的な側面の調査が実施されていて、すなわち将来の1次および2次エネルギー需要の予測、産業における非電力需要、核熱利用にかかわる諸問題を経てUCの成立・発展の条件の検討などが個別に研究者の意識にあった。

このような研究成果をふまえるとエネルギーモデルを用いてエネルギーシステムのなかでのUCの位置づけが容易に理解され、しかも多属性効用分析に必要な目標の階層化、嗜好構造の測定などの手順が円滑に実行できて分析の際の負担が軽減される。またERANSという組織の設立目的からすると意思決定のための判断材料の提供は決定過程に近い位置にある。すなわちエネルギーモデル分析者と分析の結論の読者を短絡させても大きな矛盾は生じないという背景があって、エネルギーシステム・モデルに多属性効用分析を利用できると見なした。

4. 解析の方法

意思決定論、多属性効用理論という分野にはいくつかの教科書[5][6][12]、解説[13]があるので詳細な説明は省略する。後者の理論では、多属性効用関数が選好独立、効用独立であると仮定されると表現定理（分解定理）から、これが線形計画法の目的関数のようにあたかも単一の目的関数の役割を担うように表現できる。幸いに多属性効用関数がエクスプリシットに求められると目的関数としての機能を持ち、多目的計画問題がひとつの目的の数理計画問題に帰着させられる。

さて期待効用最大化という意味にもとづいてくじを用いた実験から、決定分析を実行しようとする者の効用が実測可能となり効用関数の形が定式化できてくる。また分析のなかには不確実な状況にある部分が多くの場合で現われるが、測定から効用を求めるときに最も悪いレベルあるいは最も良いレベルでは目的がこの程度に達成されるというような範囲が与えられる場合にも理論が適用で

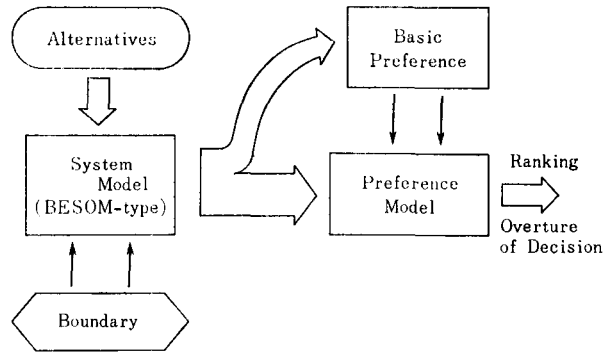


図2 エネルギーモデル分析への多属性効用理論の組み入れの概念

きる。

さらに目標間のトレードオフについて、たとえば核熱エネルギーの産業利用という構想の目標は階層化されて、安全性、経済性、環境性に関するいくつかの属性が選ばれ互いにトレードオフの関係にあるものがスケーリング定数によって決定され効用関数の数値的な評価もできる。このような特徴から大規模なプロジェクトおよびその代替案が順位づけの操作をつうじて評価が可能となる。すなわち効用関数を $U(x_1, x_2, \dots, x_N)$ と書くと、

$$J = \max_{a \in A} U(f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_N(x_N))$$

として目的関数が定義される。ここに a はひとつの代替案であり、その集合を A としている。代替案 a を選択することにより属性 X_1, X_2, \dots, X_N は各々 $X_1(a) = x_1, X_2(a) = x_2, \dots, X_N(a) = x_N$ を通して属性値 x_1, x_2, \dots, x_N をとる。いわば選択肢 a であればこれによって得られる結果は (x_1, x_2, \dots, x_N) であることになる。筆者のエネルギーモデルとしての多属性効用理論をもち込んだ概念を図2に示すが、システム・モデルとして BESOM[4] の考え方を土台にして図1にあるUCのエネルギーフローを中間エネルギー形態として記述して BESOM を修正した。また Keeney & Sichertman によって開発された MUFCAIP という計算プログラム[5]があり多くの適用例が紹介されているが[6]、ここでは意思決定過程のモデルとして

MUFCAP型のプログラム・パッケージ[14]を利用している。

図2の内容には、事前分析、決定構造の分析、効用関数の同定、評価および代替案の選択という段階が含まれている。

4.1 事前分析

まずわが国のエネルギーシステムへのUCの導入に対して実現の可能性の大きい代替案を明確にする必要がある。定量的分析ではないが、HTGRのテクノロジー・アセスメントが公表されていて、原子力製鉄および核熱エネルギー利用の社会的要請、技術的概要を把握したうえで、これら技術によるインパクトを抽出・整理し既存技術の積み上げから評価していた[15]。ERANSのトータルシステム技術室の研究成果のうちさらに商用HTGRに接続するプラントの研究開発のほかに、UCの実用時期を2010年頃と想定し1次エネルギー供給、鉄鋼需給予測の調査が進められていた。

さてBESOM型モデルは環境へのインパクトを規制値のうちに抑えつつ、できるだけ低いコストでエネルギー需要を満たすにはいかなる技術に依存すれば良いか、あるいは新エネルギー技術を選択して石油資源の強い制約のもとで供給力を確保するためにはいかなる供給系が望ましいか等の技術評価の問題を考察する道具として開発されたものである。すなわち供給系からエネルギーの最終需要へのフローをエネルギー中間形態で表わして、線形計画法の古典的な輸送問題として定式化されている。

ここでERANSによる定性的な技術評価では、後述の目標の階層化、効用関数の同定などには不十分であるのでBESOM型モデルによるいくつかの代替案とも言うべき解を求める。この解を吟味する過程は、いわば意思決定者が分析対象への数値的データに対する考慮を深くした効果をもたせた。

4.2 目標の決定

2010年の断面に核熱エネルギーの導入構想の目標を階層化するときに前述のテクノロジー・アセスメント[15]に着目した。しかし意味の不鮮明なもの、冗長であるものを除いた。この手順においては下位の目標設定、属性およびその測度の選択を十分に注意せねばならない。目標と分離して考えられない属性には、意思決定のうえから重要となるものすべてを含み、しかも互いに独立であり、その数は可能な限り少なく、意思決定に関与しない者にも容易に説明ができて客観的で定量的な表現であって種々の代替案に対して属性値が明らかに算出できること等が望ましい[6]。これらが属性に要求されるがゆえに、システムモデルとしてエネルギー分析のためのモデルが利用される。

筆者はエネルギーシステムのなかにHTGRによるUCの導入という構想を、次のように階層化して属性を選んだ。

X_1 環境へのインパクト

X_{11} 大気汚染の最小化

X_{111} SO_x , NO_x の年間排出量の最小化

X_{112} Kr^{85} , H^3 の年間排出量の最小化

X_{12} 土壌汚染の最小化

X_{121} 放射性廃棄物量の最小化

X_{122} 非放射性廃棄物量の最小化

X_2 安全性

X_{21} 労働災害の最小化

X_{22} 放射性被ばく人口の最小化

X_3 技術へのインパクト

X_{31} 高温ガス炉の出口ガス温度の最大化

X_4 経済性へのインパクト

X_{41} 2次エネルギーコストの最小化

X_5 エネルギー供給の保障

X_{51} 石油輸入量の最小化

X_{52} 供給エネルギー源の多様化

ここで属性についてすべての定量的な表現(物理量)を記述すべきであるが紙面の節約のために

表 1

$$\begin{aligned}
 U(x) &= \frac{1}{-0.904} [(1-0.241u_1) (1-0.241u_2) (1-0.0362u_3(x_3)) (1-0.362u_4(x_4)) (1-0.732u_5)-1] \\
 u_1(u_{11}, u_{12}) &= \frac{1}{-0.8738} [(1-0.655u_{11}) (1-0.350u_{12}) (1-0.470u_{13}(x_{13}))-1] \\
 u_2(u_{21}, u_{22}) &= 0.600u_{21}(x_{21}) + 0.400u_{22}(x_{22}) \\
 u_5(u_{51}, u_{52}) &= 0.400u_{51}(x_{51}) + 0.350u_{52}(x_{52}) + 0.250u_{53}(x_{53}) \\
 u_{11}(u_{111}, u_{112}) &= \frac{1}{-0.9258} [(1-0.555u_{111}(x_{111})) (1-0.833u_{112}(x_{112}))-1] \\
 u_{12}(u_{121}, u_{122}) &= \frac{1}{1.333} [(1+0.667u_{121}(x_{121})) (1+0.340u_{122}(x_{122}))-1]
 \end{aligned}$$

省略する。たとえば属性 X_{112} は HTGR から UC へのエネルギーフローと軽水炉による発電による年間の放出キューリー数を、労働災害を考慮する属性 X_{21} はエネルギー供給系から最終需要に至るエネルギーフローのおのおのの経路について年間の man-day lost を、属性 X_{31} は出口ガス温度を [°C] で表わし、2次エネルギーコストは [円/10⁴ kcal] で求めること等である。

また、属性値の最も良いレベル、最も悪いレベル、をおのおのに算出し、そのレンジを決定している。このようにして経済性、環境性、技術性の側面を表現し、効用関数を次のように同定した。

4.3 効用関数の同定

はじめに多属性効用関数をそのまま扱うわけではなく、多属性効用関数の分解表現にもとづいて、おのおのの属性について単一属性効用関数を50—50のくじによる測定から求める。この関数がすべての属性で評価されたところで目標の間の価値のトレードオフを測定した。

すなわち最も選好された属性 X_j を最も悪いレベル x_j^0 と仮定して、属性値 x_j^* として $(x_i^*, x_j^0) \sim (x_i^0, x_{jx})$ となる x_{jx} を、筆者が質問を用意しその解答にもとづいて、トレードオフを記述するスケール定数を評価した。ここに記号 \sim は右辺と左辺が無差別であるという意味である。

この手続きを繰り返すことからエネルギー供給の保障、環境性・安全性、経済性などの相互の順

位づけが明確となってきた。下位の目標にも同じような操作をほどこして、結果として上式に示す多属性効用関数が同定された(表1)。

4.4 代替案の選択

2010年頃に2次エネルギー供給センターが商用化されるという想定に立って、その断面における2次エネルギーに対する需要を予測をもとに最終需要における利用は次のようであるとした[3]。基準ケースは日本エネルギー経済研究所による予測値を用いる。石炭を SRC (Solvent Refined Coal) ガスオイルの形で原料とするガス化プロセスを一例として選び、UC 製品の代替先を石化用ナフサ、LNG、製鉄用石炭とし、さらに副産電力および副産アロマティクスを想定した。

この際、図2に境界として2010年の産業用、民生用、輸送用の電力・熱需要を前述の予測に固定し、わが国におけるエネルギーシステムのなかのひとつの選択として UC 構想を調べている。同じ図2の代替案という部分は、石油の輸入量を5000万kl減少させ、一般炭、LNGで代替するケース、石油をさらに削減させるケース、軽水炉とHTGRを合わせて1億kWとするケース等を考えた。

この報告はエネルギーモデルに多属性効用理論の利用という方法論を問題にしているので、UCの導入という構想の吟味は別の報告にゆずるが、結果の一部を紹介する。前のセクションで測定された選好構造をもとに代替案の順位づけを行なっ

た。ERANSの研究者集団から測定されたスケールリング定数は、エネルギー供給の保証を重要視し環境と経済性を均衡させた選好構造を示していた。代替案の集合のうちから、石油輸入量をエネルギー経済研究所の予測値よりも大幅に減少させたときにUC構想の評価が大きくなるという点が効用理論により定量的に得られた。いくつかの感度解析も実行したのは当然であるが、HTGRの技術開発、2010年断面の石油輸入量などを主なパラメータとした。

5. おわりに

エネルギー関連の問題を E^3 空間のものとして取り扱うためにエネルギーモデルの意義があつて、問題の枠組み整理という機能が重要な役割である。ひとつの構想が広い範囲にインパクトを与えるような問題に対して意思決定過程は大切であることは言うまでもないが、これまでに俗にエネルギーモデルとした部分をシステムモデルとして利用し、さらに多属性効用理論を導入することは良い意味の相互の補完効果が期待できるようである。今後、対話型による期待効用最大化規範のもとに代替案のランキング等が政策決定に活用されるはずである。

謝辞

この報告は稲谷稔宏(川鉄)、梶 克広(IHI)、田中 稔(千代田化工)、藤田慶喜(新日鉄)および宮杉 武(千代田化工)の諸氏からの貴重な示唆と有益な議論によるものである。記して諸氏に謝意を表わします。

参考文献

- [1] 高橋：エネルギー問題におけるモデル分析の効果，エネルギー・資源 1, 3 (1980)
- [2] エネルギーモデル開発の現状とその機能，総合研究開発機構，NRO-53-2 (1979)
- [3] 高温還元ガス利用による直接製鉄技術の研究開発(総合報告書)，原子力製鉄技術研究組合(1981)

- [4] Cherniavsky, E. A. : Brookhaven Energy System Optimization Model, BNL-19569 (1974).
- [5] 高原，高橋，中野(訳)：キーニィ・ライファ著；多目標問題解決の理論と実例，企画センター(1980)
- [6] 市川：多目的決定の理論と方法，計測自動制御学会(1980)
- [7] 経営科学部会OR分科会：エネルギーモデル，石油学会誌，20, 10(1977)
- [8] 竹野：エネルギー・データの整備，総合研究開発機構，NRC-78-3 (1978)
- [9] 山室・高橋：原子核エネルギー，共立出版(1980)
- [10] 多目的高温ガス炉研究開発の現状，日本原子力研究所(1978)
- [11] 水口：ガス冷却炉の将来性，原子力工業，25, 9 (1980)
- [12] 宮川：意思決定論，丸善(1975)
- [13] 竹田：最近の多目的決定理論の動向，オペレーションズ・リサーチ，10(1980)
- [14] Keeney, R. L. : 私信
- [15] テクノロジー・アセスメント報告書，工業技術院(1973)

次号予告

特集 TQC/CWQC

TQCシステムへの

- | | |
|------------------|-------|
| マトリックス・アプローチについて | 秋庭雅夫 |
| 品質機能展開について | 赤尾洋二 |
| 品質と経済性 | 小浦孝三 |
| 品質管理のシステム論 | 布留川 靖 |
| アメリカの再生化 | 唐津 一 |

(他2篇)

解説

ベトリネットについて(2) 篠沢昭二・松島俊章

連載講座

マトロイド理論の基礎(2) 大山達雄

事例研究

通信干渉防止のOR問題——相互変調干渉について 森戸 晋