

モデルの役割

Role of Model

安 川 茂*

Sigeru Yasukawa

1. モデルの背景

「モデル」という言葉は一体どんな響きを持つ言葉だろうか。我々の日常を見まわしてみた場合、子供の遊び玩具である「プラモデル」とか、駅前や新興住宅街の近くに建っている「モデルハウス」とか、シーズンの変わり目に先きがけて催される「ファッション(モデル)ショー」などがすぐに思い浮ぶ。他方、理学や工学等の学問分野に目を転じてみると、ここでもモデルなる用語、例えば「原子核モデル」とか「エネルギーモデル」などが散見できる。

プラモデルが隆盛であった頃、オモチャのピストルが暴力行為や銀行強盗に登場してきたことすらある。新聞やTVで報道されたそれらは形や色彩が本物そっくりで、一部には実弾を撃てる機能すら備えていたともいう。駅前のモデルハウスはいかにもモダンで人目を引く。見学の群れに従ってハウスのなかを見てみると、洋室あり和室あり、ユーテリティも機能的で、たちまち造りの雰囲気魅了されてしまう。ファッションショーやそのモデルさんたちもまた人々をして時代の先端性や美意識へかりたててしまう。

「原子核モデル」とか「エネルギーモデル」なる学術用語に出会うと、とたんにその響きは堅くなる。自然が原子や分子で構成されていると信じて疑わない者にとっては、原子や分子、あるいは原子のなかの原子核が何故にモデルなんかに支配されねばならないのかと訝るにちがいない。自動車で路ゆく人々はガソリンがどのような工程で製造され販売されてゆくか知らなくとも彼等の目的は果たせよう。

かように「モデル」なる言葉に色々な意味あいと響きがある。しかし、その底流には、モデルは、所詮、「模型」であって「実物」ではないとの認識があるろう。また、如何なるモデルでもそれを製作する者にとって

は「モデル」が「原型(=実物)」が持っている現実味、客観性、あるいは実証性のいくらかでも備えるよう、それに接近する努力をする。ひとたび接近に成功すれば、次に普遍性を求めてつっ走り、場合によっては時空を越えた美意識の郷に入ることを願うようにもなる。

原型への接近が、たとえそれが成立している根元的要素に立帰ってそこから思考をはじめ、いわゆる要素還元的思考法、に基づく仮説・演繹・検証といったプロセスを踏んだ論理実証的な方法によったとしても、あるいはまた社会を動かす価値規範や社会的動きの実感を総体的にとらへ工学してゆく「漸次工学的帰納主義」の方法によったとしても、モデルはしょせんモデルである。

では、モデルは無用の長物であろうか。いや、そうではない。1936年に発表になったケインズの一般理論は経済大恐慌後のニューディール政策で威力を発揮したし、我が国では戦後経済の復興で大きな力を貸した。また、新古典派経済理論や新厚生経済学の出現は1960年代のアメリカの高度大衆消費社会の発展の理論武装に寄与したし、続く西欧、日本の経済発展にも寄与した。勿論、このような範型は、それにそぐわない変則性、例えば環境汚染(外部不経済の調整)、都市化(公共部門の立遅れ)、所得格差(マクシミン原理に裏付けされた高福祉経済)が現われはじめると説明力を失いモデルの改良が余儀なくされた。

要素還元的思考法の代表格である物理学でも同様の過程をたどる。原子核モデルを例に引くと、ボーアによって提唱された複合核モデルは核反応の共鳴現象を説明するのに威力を発揮したし、液滴モデルは原子核の構造を外側から概観するのに役立った。これらのモデルは原子核を構成している基本要素—核子—の核内における配位の研究、核子そのものの構造の研究が進んでゆくにつれ、シエル構造モデル、…、を経てクオークモデルにまで発展している。発展の各段階で諸原理

* 日本原子力研究所核エネルギー技術評価研究室長
〒319-11茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

とそれを支える実験事実との関連が検証され擬似科学性が厳しく排除されていった。

自然科学，社会科学を問わず，いずれの分野においても，ひとたび範型を得るとそれなしではやってゆけないようになる。また，諸物の発展の常として，範型もまた普遍化の道をたどろう。その際，論理実証のプロセスを踏まずに範型の普遍化へと進むと変則性がパラダイムの中で尖鋭化し，範型自身が現実性を欠いてゆく。対象が自然科学の場合，そのような範型は科学性を欠いたものとして自然に排除されてゆこう。しかし，対象が社会科学であると事柄はややこしくなる。というのは，天下有用の具として既に有用性が誇示されてきた範型ほど社会の管理や計画遂行に重宝がられていたはずで，変則性から不即不離を保つことは困難である。変則性が顕在化し，その重要性が増していく下で，若し既製の範型を無理押しすれば大衆からは必ず「理性の濫用」との連判状がつけつけられるにちがいない。

にもかかわらず「モデル」は数量的・形態的自然観に魅了されて事象の数量化に走るであろう。質の差異を捨象した数量化や論理のない数量化はかえって事象を見えにくくするものである。このような認識を踏まえつつ，エネルギーシステムのモデル化の意義と役割を以下に考察してみたい。

2. 原型と模型

エネルギーが最終需要者に渡って役目を終えるまで，どれほどのプロセスを経なければならぬだろうか。電気を例にとってそのプロセスを調べてみよう。単純化の為に需要者は一般家庭とする。調べにあたっては前半でTV局の社会部記者A氏に石炭火力関連設備のルポをお願いすることにし，後半ではシステムズ解析の専門家B氏に登場してもらおう。

A氏は早春の或る日，豪州へ飛んだ。レミングトンで石炭採掘業者のヘリコプターに乗り係員の案内で採炭現場を空から視察した。眼下に見える露天掘の現場では幾重にも折り重なるようにみえる縞模様の筋目から時折きらっと光る物がみえる。携帯している望遠カメラでのぞいてみるとショベルカが休むことなく炭層の石炭を切り壊しベルトコンベアーに移している。掘鑿機械の運転手はガラス窓の反射光にさえぎられて見えないが，機械はこれだけ広い空間ではただの一点にしか見えない。掘鑿機に接近すべく高度を下げてもらう。

掘鑿機が大きく見えてくる。ガラス張りのボックスの中で1人の作業員が機械を運転している。ショベルカから石炭をベルトコンベアーに移すたびに土埃を周りに舞い上げている。ふと，ショベルカの運転室はこの埃で汚染されていやしないかと気になった。係員の説明では，最近，大型の切羽を備えたマシーンで炭層を切り取っているところもあるという。ベルトコンベアーの動きに沿ってカメラを移動してゆくと，ところどころに溜りのような広がりがある。ここで石炭は選別されてゆく。さらにベルトコンベアーの流れに沿って下ると長蛇の列の貨車にたどりついた。ここで選炭したばかりの石炭を貨車へ移している光景に出会った。

再び高度を上げ，露天掘りの上空を巡回してみた。大地に巨大な掘りが幾重にも走っている。この掘りは全て採炭にて人工的に出来たものだ。掘を埋めて元の形状に復元するのだろうか。採炭現場の空気はなんとなく土埃でくもっているように見える。土埃からどれほどの重金属やラドンが環境に排出されるのだろうか。そんな事を考えているうちにヘリコプターは船積港へと戻っていった。途中，眼下に石炭輸送の長い長い貨車の列がゆるゆると動いてゆくのをみた。

船積港の事務所へ戻ってきたA氏は，日本までの石炭輸送について事務所長の説明を次のようにレポートした：最近，豪州から日本へ一般炭が1400万t，原料炭が3000万t輸出されている。その大半は長期契約に基づくもので，船積み価格が一般炭の場合で33.25 \$ /tだそうだ。この価格には採炭の費用，輸送の費用，税金，保険，環境対策費，設備の減価償却費，一般管理費が含まれている。一般に石炭も含め鉱石の採掘は事前準備が大変で，地質調査から始まり，試掘り，それが成功すれば本事業展開の為に周辺設備の開発整備，例えば事務所の建設，鉄道の敷設，港湾施設の整備，輸送船の建造を行なわねばならず，その為の先行投資が莫大な額になる。そのうちのどのひとつをとってみても豪州経済と不可分であるので，船積み価格にそれらの動きが全て反映されているとみてよい。

帰国後，A氏は我が国で代表的な石炭火力発電所Cの施設をみてまわりながら再び次のレポートを続けた：この発電所は出力500MW×2基からなる我が国初の海外炭専焼火力で，輸入炭（中国，米国，豪州，南ア）および国内炭を10種以上にわたって専焼または混焼している。輸入炭はこの石炭受入用バース（6万DWT）から揚炭装置（アンローダと呼ばれている）にて受入れコンベアーに移される。運炭ベルトコンベアー

施設は石炭を受入れ、いったん貯炭し、さらにバンカーまで送りこむ石炭運搬の動脈である。ベルトの駆動と制御、保安、環境保全対策等の設備はもとより秤量機や試料採取装置も付設されて石炭の購入量や払出量の計量、品質管理も同時に行っている。コンベアに乗った石炭は向うに見える貯炭場に移される。

ここの発電所は民家から比較的遠方に立地しているので擁壁方式による屋外貯炭を行っている。あそこに見える背の高い建造物がスタッカといってコンベアより受入れた石炭を貯炭ヤードへ投炭する機械である。リクレーマという機械も見える。これは貯炭されている石炭をバスケットですくいブームコンベアに乗せてバンカーへ送る機能を持っている。屋外貯炭は屋内貯炭とちがって自然発火やガス爆発の危険性は少ないが炭塵飛散防止や排水処理等の環境対策が必要である。貯炭容量は45日間の定格運転相当量で約90万tである。

貯炭場から払出された石炭は給炭機（ここで必要に応じて混炭も行う）、微粉炭設備（ミルとも呼ぶ）を経て石炭焚きボイラーに投入される。混炭設備は品質の異なる石炭を硫黄分、窒素分を調整して環境規制を満足できるようにすると同時にカロリーの調整も行いう重要な設備で、勿論、これらの操作は中央制御室の電子計算機にて行なう。ミルはたんに石炭を粉砕するという機能だけでなく、粉砕した石炭を粗粉の分級を行ない微粉粒子のサイズを揃えるほか、石炭中の水分の乾燥も行う重要な設備である。設備は稼働の信頼性が高く、ボイラーに付置される設備であるから配置スペースが小さく、運転操作が容易で、消費電力の少ないことが条件である。

いよいよ石炭火力発電所の心臓部のボイラーのところにやってきた。実に背の高い建物でこの中に放射再熱式超臨界圧貫流型のボイラー2基が納められている。石炭ボイラーを効率よく且つ安全に稼働させる為には石炭の燃焼性、灰のボイラー伝熱面への付着、推積—これをスラッキングおよびファウリングと呼んでいる—、NO_xの発生、集塵性等に注意が払われているわけで、火炉やバーナに特別な工夫がこらされている。この発電所のボイラーでは火炉断面積をコンサバティブにとり炉内スラッキングによる火炉の熱吸収量を下げ、低NO_x SGR (Separate Gas Circulation) バーナが使用されている。

石炭火力では環境対策上排ガスと灰の処理が必要となる。排ガス中には煤塵や窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x) が多量含まれ、煤塵は電気集塵装置

(EC) で、NO_xは脱硝装置で、SO_xは脱硫装置で除去する。ECをボイラーの出口、即ち高温側 (360—400℃) に設けるか脱硝装置の後部 (低温側: 140—160℃) に設けるかの選択がある。集塵効率は99%と高く、脱硫率、脱硝率もそれぞれ90—99%、95%以上 (選択接触還元法、SCR法と呼ぶ) で、環境対策上問題のないレベルに達している。しかし、この為の費用としては脱硫・脱硝合せて発電原価の10%以上にもなるとの評価もあり経済上の負担が高い。最近問題になっているCO₂等による地球温暖化に対しては石炭火力はまだその対策の準備を考えていない。

灰はボイラーの火炉下に落下するボトムアッシュ (クリンカアッシュとも呼ぶ) と火炉から燃焼ガスに伴って移動し、電気集塵器等で捕集されるフライアッシュに大別され、クリンカアッシュの処理の方法には水封式チェーンコンベア方式、灰捨場直接水流 (スラリー輸送) 方式、脱水槽方式が、またフライアッシュの処理は灰捨場直接水流方式 (真空またはスラリー輸送)、サイロ回収方式 (真空、加圧、それらの組合せ輸送) 等がある。ここの発電所は敷地内に大容量の灰捨場が設けられているのでクリンカアッシュは直接水流方式で、またフライアッシュは1部有効利用することからサイロ回収方式によっている。灰処理の為にも電力 (10—25kw/灰t) と補給水 (0.1—1.2t/灰t) [クリンカアッシュ処理の場合] を使う。

A氏はさらに排水処理や制御装置、所内電源設備、ならびに総合管理システムについてもレポートしてくれたが、それらの説明は時間の都合で省くことにし、次にB氏に登場を願うシステムズ解析の視点からA氏のレポート内容を整理してもらい、このようなシステムがどのようにモデル化されてゆくかを聞くことにしよう。

B氏は先ず「システムの境界」の定義から説明を始めた。システムの境界として次のふたつの定義が考えられる。第1はA氏のルポのように豪州における採炭現場から始まり鉄道輸送、輸出の手続き、海上輸送、…、輸入手続き、荷上げ、貯炭場への移送、…、ボイラーへの投入、…、そして灰の処理、…、最後には所内変電所から電力系統へ送電するまでをそれぞれの出入口で境界を設定して各々の設備を明示的に取扱う。第2は豪州炭の受入れバースを一方の境界とし所内変電所の送電端を他方の境界としてその内部を一括して取扱う。

いずれにおいても設備の「機能と活動」を端的に表

わし、それらの数量水準を示しうる指標が必要である。そのような指標として設備の「容量」と設備の「稼働量」を導入する。容量はその設備の能力を表わし、例えば先のルポの石炭ボイラの場合、1時間当りに発生しうる最大蒸気量1640t/hを指し、稼働量はその設備の実際の活動量を表わし、このボイラーの例では実際の運転で発生している蒸気量1542t/h（設備利用率94%）を指す。

設備はその技術性能、経済性能を示すことにより活動の水準や経済的価値の大小を計量することができる。例えば、A氏のルポの100万Kw石炭火力発電所に関していえばその「耐用年数」が示されれば稼働開始から幾年後に発電所は廃止になり、次機のものに置換せねばならないかがわかるであろうし、設備の凡その減価償却率も推定できる。設備の点検や修繕をも含め計画停止時間が示されれば「最大設備利用率」を想定でき、この量は設備容量、設備稼働量相互間を拘束する。「燃料の投入原単位」あるいは「発電効率」を与えれば稼働量を使って燃料所要量を求める。さらに、SO_x、NO_x、CO₂等の「環境排出原単位」を与えれば、それらの排出量が計量しうる。運転に必要な補給水や資材量、マンパワーも同様に求まる。

費用等の経済諸量に関しても「コスト原単位」、例えばユニット当りの資本費、運転維持費（固定分、可変分とも別々に）、燃料費、ならびに「規模の経済指数」が判明しておれば任意規模のプラント資本費、運転維持費、燃料費がプラントの容量、稼働量の関数として表しうる。この費用に環境排出の抑制費用も取り込むこともできる。

B氏はA氏のルポで必ずしも言及されなかった次の点を強調した：電気という単品の製品（実際には電圧や電力量のちがいに応じて複数の製品とみるべきであるが）を作るにしても、原子力、火力、水力の如く異なった技術による発電が考えられ、また、火力といっても石油、石炭、天然ガス等の種類別けができ、さらに石炭火力といっても使用する燃料に関して国内炭、中国炭、豪州炭、南アフリカ炭等の選択の予地がある。また、ボイラに関して微粉炭ボイラーから流動床ボイラー等の選択もありうる。このことを一言でいえば、単品のエネルギー（またはエネルギーキャリア）を生産するのに複数のエネルギー技術にて対応ができ、その場合、技術相互間の「競争、代替、補完」が生じうる。また、燃料についてみて複数の種類間で「選択または切替え」が行いうる。

代替・補完あるいは選択・切替は生産側（または供給側）だけで起っているわけではない。エネルギーの需要側でもそれらは起りうる。例えば民生部門での給湯を考えてみる。熱源として電気、ガス、石油製品、太陽熱等が考えられる。一軒一軒の家庭をみれば、給湯機器が固定されているので代替はむずかしい。しかし、機器の買い替え時にはよりよい機器へ切替えが可能になりうるし、民生部門全体でみれば自由度は増し、代替も切替えも可能になる。

代替や切替えはシステムの価値判断基準に照して行なわれよう。そのような「価値判断の指標」としては「システムの総費用」、「効用」、「堅牢性」、「希少資源消費量」、「環境排出量」等が屢々とりあげられ、システム運用の行動原理としてはこれらを最大化ないし最小化するか、あるいは、相反する2指標間のトレードオフ関係、例えば費用と希少資源消費量との間のトレードオフを追求することが重要になりうる。

では、上記の最適化行動は自由自在に行なわれうるのだろうか。答は否である。その理由は、我々が住んでいる社会システムは技術的にも経済的にも、制度上や資源・環境上においても何等かの制約下にある。従って、我々のエネルギーシステムをモデル化して、モデルの上で現実のシステムの挙動をシミュレートしようと思むならば（そしてそのようにせざるをえないのがまた現実であるけれども）、そのような様々の制約をモデルに組み入れられねばならない。例えば、既にみてきた設備の耐用年は設備の更新にとって大きな拘束である。設備の初期導入量にしても、工場での生産能力が追従しえるかどうかなんらかの制約を伴うであろうし、また、発展段階の技術である場合にはその発展に歩調を合せて規模を拡大してゆくことが考えられ、その場合技術進歩が大きな拘束となりうる。さらに、経済的価値以外の価値規範の存在、例えば生活の慣習、社会制度、が十分に拘束たりうる。地球規模でみた場合、地球的共有物たる大気や希少資源もまた制約条件になる。

B氏はさらに価格変動がシステムの調整に大きく機能することを強調し、価格変動の帰還効果がモデルにビルトインされている必要を説いた。先の石炭火力発電所の例でいえば、この発電所の建設と運転には莫大な資本と労働及び資材や燃料が必要で、それらのあるものは財・サービスの市場価格、為替レート等の変動の影響を受けて、種類や量が決定されてゆく。燃料たる石炭等は最も代替、切替えの対象たりうる。彼は、

さらにモデルが過去から現在に至る事象の変化を説明でき、且つ、現在から将来への事象の発展が推定する両方の機能を持つことを強調した。過去から現在までの事象は凡そ技術固定の枠組みの中にあるのに対し、現在から将来への発展は現状の技術フレームで律しえないものを多く含むであろう。従って、シナリオ的、あるいは規範的に問題の処理をせざるをえない側面も有する。このように不確実性の伴う事象のハンドリングへの対応の為にはモデルを対話型に構築しておくことも必要になる。

B氏は具体例を引用しながらモデルの役割を次のように普遍していった：社会の経済活動量が小さかった頃はいざしらず、今や地球上の多くの国々は科学技術の恩恵を受けて一時期前に比して較べものにならない発展を遂げている。その結果、経済は肥大化し、社会システムも高度複雑化し相互依存度が高まる一方天然資源や環境面で地球規模の問題にまで遭遇している。我々の社会システムには生命体が持っている自浄復元機能がある程度備えてはいるものの、システムが肥大化し活動水準が高まってくれば循環の硬直化や自浄能力の低下が現われる。そのような状況変化に即応してゆくには常にシステムの「内科的診断」を行ない必要に応じて「外科的処置」も要る。モデルの活用によるシステムズ解析は将に内科的診断の役割を有している。

3. MARKALモデル

エネルギーシステムズ解析においては、現に、MARKALやEFOM, MESSAGE, MARNES等のモデルが世界中で広く使われている。特にMARKALはエネルギーシステムを技術サイドから接近して分析するのに適している。

このモデルは図-1に示した如く4断面を通して外界と接触する。即ち、第1断面は社会経済活動との接触である。経済活動別財・サービスの生産に必要な最終需要部門における「有効エネルギー需要量」はこの断面を介してMARKALへ入力される。第2断面はエネルギー-経済活動との接触面である。諸技術の技術的、経済的特性及びこれら技術のシステムへの導入に付随して生じる費用等に対する取引がこの断面を通じて行なわれる。第3断面はエネルギー-資源及び世界貿易との接触面である。この断面を介して一次エネルギー資源の供給制約や価格予測がMARKALへ持込まれる。第4断面は環境との接触面である。環境排出量への規制やエネルギー施設の立地条件等がこの断面を介してやりとりされる。

エネルギーシステムはそれを構成している設備、機器毎にとらえ、設備、機器間をエネルギーキャリアで連結して需要側から供給側までのネットワークを形成する。各設備、機器はその容量と稼働量を区別する為に容量変数と稼働量変数を導入する。さらに、各機器、設備の技術性能（例：設備利用率の上限値、燃料の投入、産出原単位、または効率、耐用年数等）、経済性能（例：資本費、運転維持費、燃料費等のコスト原単位、割引率等）、環境・資源条件（例：SOx, NOx, CO₂等の環境排出原単位、排出抑制の為のコスト原単位、石油確認埋蔵量等）を与件とする。

エネルギーシステムを内生的に制約する条件としては(1)各エネルギーキャリアーの需給均衡、(2)特に電気と熱に対しては季節別・昼夜別に需給均衡が保たれる。さらに(3)ピーク時でも需給が均衡していなければならない。(4)設備利用率を介して容量変数と稼働量変数が連動している。(5)基底負荷電源に対する存立条件がこれに加わる。さらに、(6)設備の容量に関してはストック量と新設量との間に容量保存の関係式が成立する。(7)電気や熱を生産する設備に対しては保守・点検にまわされる容量と稼働中の容量が区別されて容量バランス、電力・熱の需給バランスが陽表的にとられる。(9)最終需要部門においては需要者が必要とする有効需要と需要設備・機器が供給する有効需要が量的に均衡する。(10)集中立地、分散立地等も当然数量化の対象になりエネルギー効率や費用、ロードマネージの制約のなかにそれらが表現される。(11)資源、費用、環境に関

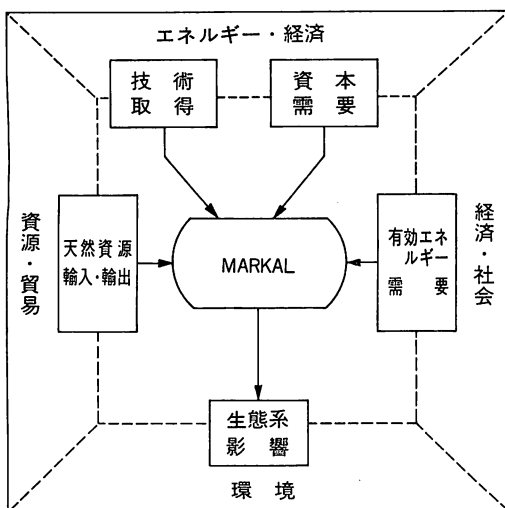
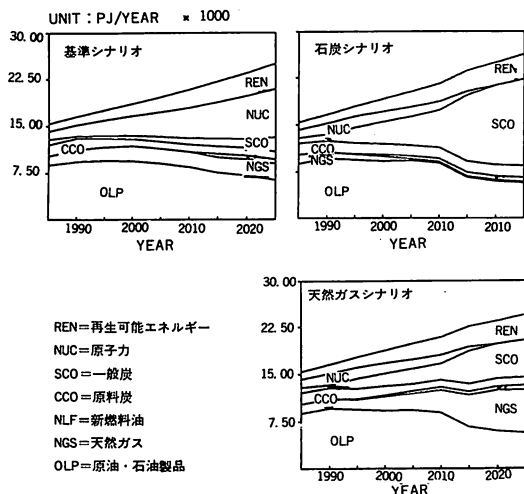


図-1 MARKALモデルの境界



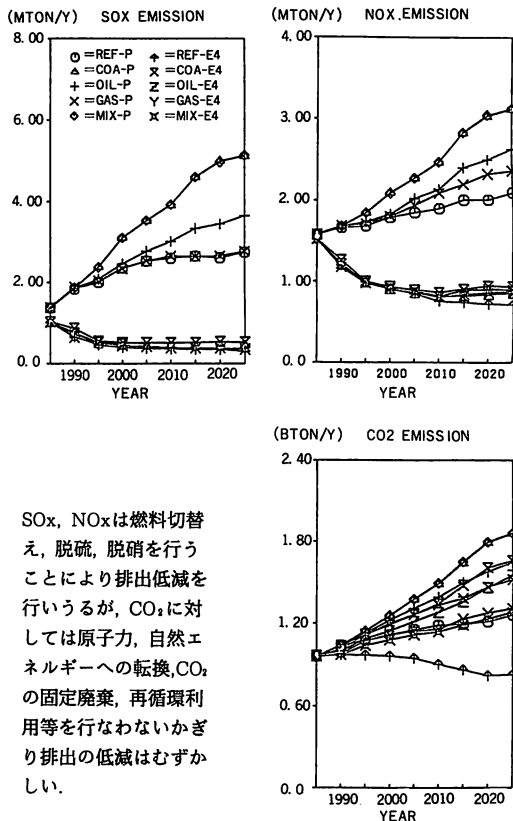
エネルギー源の選択がSOx, NOx, CO₂の排出量に与える影響を調べる目的で、石炭シナリオでは原子力を石炭へ、天然ガスシナリオでは原子力を天然ガスに切替えている。

図-2 (A) 1次エネルギー供給のエネルギー源別構成

連するシステム諸量も同時に計量されて、それらの諸量あるいはそれら諸量の線形関数を目的関数に選んで線型計画法のフレームの中で最適化が行なわれる。相反する2量や競争する2量間のトレードオフ関係や競争代替もこのモデルでは自動的に取り扱える。結果の整理についても、例えば付加価値解析結果も含め、多様な出力項目が用意されている。

4. あとがき

B氏は「モデル」というものは簡明にして簡便、理屈や観念ではなく「実践的であること」が望まれるとて、本稿の「1. モデルの背景」は言葉の遊びに終りはしないかと心配した。そして、より実務的に、最近D氏がMARKALモデルを用いて行った「エネルギーシステムからのCO₂環境排出に関する検討—核エネルギー利用の影響と効果—」の解析研究(図-2)を引用してモデル解析の役割をアピールしながら本稿を閉じる提案をした。



SOx, NOxは燃料切替え、脱硫、脱硝を行うことにより排出低減を行っているが、CO₂に対しては原子力、自然エネルギーへの転換、CO₂の固定廃棄、再循環利用等を行なわないかぎり排出の低減はむしろ小さい。

図-2 (B) SOx, NOx, CO₂の排出低減効果

参考文献

- 1) 佐和隆光, “経済学とは何だろうか” 岩波新書 (1982).
- 2) 火力原子力発電第337号 [石炭火力発電特集] (1984).
- 3) Fishbone, L. G., et al., “USER’SGUIDE for MARKAL: A Multi-Period inear-Programming Model for Energy Systems Analysis” (1982).
- 4) 佐藤 治, 他, “エネルギーシステムからのCO₂境排出に関する検討—核エネルギー利用の影響と効果—”, 文部省科学研究・エネルギー重点研究/エネルギーシステムの新しい構成と運用 (代表: 茅 陽一 (東大工))(1989).
- 5) コール・ノート (昭和62年度版), 資源エネルギー庁石炭部監修, 資源産業新聞社刊 (1988).