

エネルギー源としての 電力の長期展望とORの適用

表 1 部門別電力需要の動向

(億 kWh ()内は構成比%)

昭和年度	35	40	45	50
部門				
民生	163(16.3)	362(21.4)	724(22.6)	1265(29.5)
家庭	134(13.5)	286(16.9)	535(16.7)	908(21.2)
業務	29(2.9)	76(4.5)	189(5.9)	357(8.3)
産業	832(83.6)	1333(78.6)	2473(77.4)	3018(70.5)
電力多消費産業 ¹	428(43.0)	701(41.4)	1341(42.0)	1574(36.8)
その他 ²	404(40.6)	632(37.2)	1132(35.4)	1444(33.7)
総需要	995(100)	1695(100)	3197(100)	4283(100)

注 1. 鉄鋼, アルミ, 石油, セメント, 化学, 紙パルプ等
2. 輸送用を含む (出所 [1])

1. 電力事業の現状

1.1 電力需要の現状

電力は、動力、照明、通信、熱等の利用形態の非常に広い清潔で安全なエネルギー源である。わが国の電力需要は1973年の石油危機以来その伸びは鈍化したものの1960年以来年平均10%程度の伸び率で増大しており、またエネルギー最終需要に占める割合も逐年上昇し、現状では1/3程度（一次エネルギー換算）になっている。

わが国の電力需給の特徴について述べてみると、表1でもわかるように昭和35年度には1000億kWhに満たなかった総需要電力量が昭和50年度には4283億kWhとなり、15年間に約4.3倍にまで増大している。その間に産業用需要のシェアは83.6%から70.5%にまで低下し、民生需要(家庭用と業務用)のシェアは16.3%から29.5%に増大した。このような相対的な民生需要の増大の傾向は昭和48年の石油危機以後顕著である。

なお、産業用のうちいわゆる電力多消費産業のシェアは1960年代ほとんど42~43%とほぼコンスタントに推移したが、石油危機を契機としてそのシェアはかなり低下している。また民生用需要のうちの家庭用は昭和35年度には13.5%のシェアでしかなかったものが次第に増大し、昭和50年度には21.2%にまで増加している。しかし西欧諸国に比べるとそのシェアはまだかなり低い水準にあるので(たとえば西独の25%、米国の33%)、今後国民の所得水準の向上、都市化の進展等にもなつてさらに上昇が見込まれている。

また年間の最大電力需要(ピーク需要)に関しては、昭和43年を境にそれまで冬季の12月に発生していたものが夏季の日中に発生するようになった。その後ピーク需要の伸び率は総電力需要の伸び率を上回って急増し、年負荷率は昭和43年の69%から昭和50年には61%にまで急速に低下し、年間負荷曲線のピークはますます尖鋭化してきている。これは主として民生需要としての冷房の普及が原因であろうが、この傾向は今後もさらに強まると予想される。なおまた負荷率の低下は発電設備の利用率を引き下げることになるので、電力設備の効率的利用、ひいてはエネルギー資源の有効利用という観点からも望ましくないものである。

1.2 電力供給の現状

1973年秋の石油危機はわが国の電力供給に大きな影響を与えた。さらにその後、石油供給の制約からくる資源問題としてのエネルギー問題、環境問題、電源立地問題などのために将来の安定的な

表 2 電源構成の年度別推移(電気事業用)(万kW)

昭和年度	30	35	40	45	50
電源					
水力	804	1177	1527	1892	2379
火力	415	888	2123	3871	6935
原子力	0	0	0	132	660
合計	1219	2065	3650	5895	9974

(出所 [2])

電力の供給をはかることは次第に困難になりつつある。まずこれまでのわが国の電力供給、電源構成の概略をみることにする(表2, 表3参照)。わが国の電源構成に関しては、水力が主体であったのが昭和38年に火力へと移行しはじめて以来、火力発電はその発電方式として石炭火力、重油・原油火力、LNG火力と多様化を経ながら増大し、昭和50年には構成比70%を占めるに至っている。重油・原油火力発電設備の増大は、燃料が比較的安定的に確保できたこと、発電コストが安いこと、建設期間が比較的短いことなどによる。また石炭火力は、石炭が石油と比べて輸送が困難であること、価格が高いことなどの不利な点を有し後述するように環境上のいくつかの問題点はあるものの資源として豊富であるので、今後の増大が期待されている。

原子力発電は昭和51年度末でわが国では13基743万kWが稼動中であるが、火力発電設備と比較して発電コストに占める燃料費のウェイトが小さく、燃料の価格上昇によるコストへの影響が少ないこと、また燃料としてのウランの輸送、貯蔵が容易であることなどの利点があり、今後の石油に代わる主要エネルギー源としての役割が期待されている。

水力発電は、火力・原子力発電がその燃料を資源的にほぼ輸入に依存し、しかも公害対策や燃料価格の上昇等の問題を有するのに対して、国産のきれいなエネルギーとしての有利さ、あるいは地域開発などのもたらす経済的波及効果などから今後可能な限りの開発が見込まれている。昭和50年度末では水力発電のうち一般水力が自家用を占

表 3 昭和50年度電源構成、発電電力量と燃料消費量

電 源	電源規模 (万kW, %)	発電電力量 (億kWh, %)	燃料消費量
原子力	660(6.6)	251(6.1)	
水力・一般 水力 揚水	1670(16.8)	774(18.7)	
火力・石油	710(7.1)	19(0.5)	6415万kl
石炭	5995(60.1)	2749(66.4)	
LNG	510(5.1)	153(3.7)	720万t
(含LPG)	420(4.2)	194(4.7)	330万t
地 熱	5(—)	2(0.0)	
計	9970(100)	4142(100)	

注) 自家用発電施設を除く

(出所 [1])

めて1778万kW、揚水式水力が712万kW、このうち河川の流量を利用した貯水池式発電所に揚水設備を付加したいいわゆる混合揚水式が397万kW、河川の流量を利用せず発電所の上部と下部に貯水池を設けこの間の落差を利用して揚水発電を行なう純揚水式が315万kWある。

2. 電力事業のかかえる諸問題

2.1 エネルギー資源問題

電力は、石油、石炭、ウランなどの一次エネルギーを電気という形の二次エネルギーに変換したものである。電力がエネルギー源としてその役割を増大していくであろうということは第1章に述べたが、ここでは上に掲げたような一次エネルギー資源をわが国の電力事業がどのようにして利用してきたかをみることにする(表4参照)。表4にあるように、これまで発電用燃料はわが国がほとんどすべてを輸入に依存している石油が主体となって増加してきた。また電力事業で消費する石油の量は、わが国全体の石油消費量の20%に及んでいる。しかしながら世界各国で行なわれている石油の資源としての将来予測に関しては、究極可採埋蔵量が約2兆バレルであってその生産は1990年頃をピークにその後は漸減傾向をたどるのであらうとされ、また1990年頃のピーク時の生産ですら現在の生産量の1.5倍以上にはならないであらうとみられていること、さらに石油資源が中東地域に偏在しているために、1973年の石油危機の経験

表 4 電気事業者発電用燃料消費実績 (固有単位, () 10^{10} kcal 換算)

昭和年度	30	35	40	45	50
石炭 (10 ⁸ t)	7210 (3802)	16600 (8191)	20070 (10150)	18257 (9933)	7180 (3596)
重油 (10 ⁸ kl)	307 (307)	4956 (4906)	11786 (11732)	34476 (34254)	35999 (35794)
原油 (10 ⁸ kl)	0	0	719 (676)	7239 (6816)	22666 (21306)
L N G (10 ⁸ t)	0	0	0	717 (954)	3326 (4423)

(出所 [2])

からもわかるように、その安定的な確保をむずかしくしていることなどを考え合わせると、発電用エネルギー源として現在以上に、石油への依存を高めることは危険であり、脱石油への道を探ることが今後の電気事業の大きな課題であると思われる。脱石油への有力な担い手が原子力であることはいままでもないが、石炭も石油に代わるエネルギー源として見直されつつある。石炭は、資源量として石油よりは約ひとけたは多いとされており、しかもその賦存が世界的に分散しているという利点があるために今後の発電用エネルギー源として期待されている。現在わが国における石炭需要はほぼ8000万tで、その大部分が鉄鋼用原料炭であり、電力向け一般炭は10%程度にすぎないが、上に述べたように資源的には豊富であるので次節で述べるような問題点が解決されれば利用はますます増加するであろう。

天然ガスは究極可採量で石油の70%程度とみられているが、その生産がピークに達するのは石油よりはかなり遅く、エネルギー資源としては石油より寿命が長いとみられている。しかも天然ガス(あるいはLNG)はきわめてクリーンなエネルギーであるために、環境問題の軽減にも重要な役割を果たすであろう。昭和50年度でわが国のLNGの需要は年間約490万tでその内訳は電力用330万t、都市ガス用160万tである。LNGの一次エネルギー消費全体に占める割合は2%に満たず、アメリカが全エネルギーの約30%を天然ガスに依存しているのに比べるときわめて対照的である。

2.2 環境問題

電力事業がいろいろの形のエネルギーを電気エ

ネルギーに変換し、これを長期的かつ安定的に供給するにあたっては、SO_x、NO_xなどの公害問題をはじめ多くの環境問題に対処していかなければならない。電力事業にとって環境問題は今後ますます重大になっていくであろう。たとえば石油、石炭などの化石燃料を火力発電用燃料として燃焼させることによる煤塵、硫黄酸化物、窒素酸化物などの汚染防止対策あるいは火力、原子力発電所の温排水対策などがそれである。さらにダム建設の地域環境への影響、原子力発電所の放射性廃棄物処理を含めた安全問題なども広く環境問題のひとつと考えることができる。このように電力事業のかかえる環境問題はかなり広範囲なものであるが、硫黄酸化物についてみると、その対策としては燃料の低硫黄化と排煙脱硫装置の設置がある。燃料の低硫黄化に関しては、表5でもわかるように火力発電所用石油燃料の硫黄分含有率は逐年低下している。それは低硫黄重油の使用、低硫黄原油の生だきのほかLNG、ナフサ、NGLなどの軽質燃料の活用によって達成されている。また排煙脱硫装置は昭和50年度に運開した設備にはほとんど装備され(表5で昭和50年度の重油硫黄分が前年度より増加しているのは、これが原因である)、これからも増加していくものと考えられる。窒素酸化物対策としては、新設既設の発電所とも地域特性に適合するように必要に応じ実情に即した対策が要求されるであろう。

2.3 電源立地問題

公害問題、環境問題が騒がれはじめて電源立地は地域住民との調整の遅れからますます長期化の傾向を強めている。前にも述べたように将来とも

表 5 9 電力会社燃料油硫黄分実績の推移

昭和年度	44	45	46	47	48	49	50
燃料							
重油 (10 ³ kl)	26927	30781	29242	30354	33487	24596	25599
硫黄分 (%)	1.74	1.56	1.33	1.01	0.77	0.77	0.84
原油 (10 ³ kl)	3939	7239	10996	17787	23601	23016	22666
硫黄分 (%)	1.59	1.45	1.27	0.89	0.54	0.32	0.23

(出所 [1])

電力需要の増加が見込まれることから考えても、電源立地難はきわめて深刻な問題である。電源開発調整審議会の新規着工地点の決定状況は昭和46年度において1704万kWで目標値に対する達成率は87%であったのが昭和51年度には696万kW、目標値に対する達成率77%となっている。とくに原子力発電所に関しては地域住民の原子力の安全性に対する危惧の念もあって住民の反対も強く、昭和48年度には1件も立地決定がなされず、昭和49年度になって2件、昭和50、51年度におおの1件ずつ立地が決定されたにすぎない状況である。したがって電源立地のテンポがこのままで推移すると近い将来に電力需給の逼迫が予想される。電源立地難打開のためには公害、環境、安全対策を充分に行ない地域住民の理解と信頼を得ることが必要である。

3. 電力の将来展望とOR

3.1 長期電力需給見通し

第1章にも述べたように、電力需要および全エネルギー需要に電力の占める割合は今後も増大していくであろう。そこでこの章では、増大する電力需要をまかなうための供給目標およびその見通しを長期的な電源構成のあり方という観点から眺めてみることにする。昭和60、65年度の電力需給見通し(電気事業審議会需給部会中間報告による)は表6に掲げられている。これは後に具体的に述べる電力需給対策としての電力ピーク対策、省電力対策などが積極的に促進されるとした場合の見通しである。

それによると昭和65年度に原子力が6000万kW程度まで拡大され、石油に代わる主エネルギー源としての役割を果たすことが期待されている。

また国産のクリーンエネルギーとしての水力発電に関しては、一般水力、混合揚水の未開発包蔵水力は各々約1350万kW、1465万kW、また純揚水としては開発可能規模が3億kW程度と見込まれているが昭和65年度までにはそのうち一般水力900万kW、揚水式1700万kWが新たに開発される見通しである。今後はとくに混合揚水あるいは大容量揚水の計画的な開発が重視されている。

石油火力は昭和50年度においては全発電設備の60%を占めていたが、資源的国際的な石油情勢からみてその割合は減少していくと予想されており、将来はベース負荷としての役割から中間負荷火力へと転換し、利用率も次第に低下していくものとみられている。石炭火力は石炭の資源としての豊富さからみても今後増大していくであろうがそのためには輸入量の拡大(昭和60年度には約4000万tが見込まれている)に対応した流通体制についてもコールセンター構想等によって供給の安定化をはかることが必要であろう。

表 6 昭和60年度、昭和65年度の電源構成、発電電力量と燃料消費量見通し

電 源	昭和60年度		昭和65年度	
	電源規模 (万 kW, (%)) 燃料消費量	発電電力量 (億 kWh, (%))	電源規模 (万 kW, (%)) 燃料消費量	発電電力量 (億 kWh, (%))
原 子 力	3300(18.8)	1880(24.4)	6000(27.4)	3415(35.2)
水 力・一 般 水 力	2150(12.2)	810(10.5)	2550(11.6)	950(9.8)
揚 水	1850(10.5)	160(2.1)	2450(11.2)	215(2.2)
火 力・石 油 (万 kl)	6490(36.8) 7050万 kl	2950(38.4)	5350(24.5) 4950万 kl	2070(21.3)
石 炭 (万 t)	980(5.6) 2200万 t	500(6.5)	2000(9.1) 4500万 t	1075(11.0)
L N G (含 L P G) (万 t)	2750(15.6) 2500万 t	1345(17.4)	3300(15.1) 3100万 t	1810(18.6)
地 熱	80(0.5)	55(0.7)	250(1.1)	175(1.8)
計	17600(100)	7700(100)	21900(100)	9710(100)

注) 自家用発電施設を除く

(出所 [1])

またさらに将来への対策としては、石炭火力は石油火力に比べて硫黄酸化物、窒素酸化物、煤塵等の排出量が多いので、公害対策として石炭をガス化、液化等クリーン化して利用することが望ましいが、実用化するのには昭和65年以降とされている。

また未開発エネルギー源としてのタールサンド（石油系炭化水素を含む砂でカナダに多く埋蔵しており、これから油が抽出される）、オイルシェール（油を含んだ頁岩でアメリカに大量に埋蔵しており、これから油を抽出する）等が合成燃料として実用化されるのも2000年以後になるであろう。

LNG 火力は昭和44年以来わが国でも導入されているが、石油依存度を低減させるという意味からも、また環境問題の上からも今後さらに増大するであろう。地熱発電に関しては、理論的賦存量として天然蒸気分が少なくとも2000万kWと見込まれているが、蒸気とともに熱水をも利用できればさらに大きくなるであろう。エネルギーの安定供給、地域開発への貢献という観点からも自然環境との調和をはかりながら推進すべきである。

ここでエネルギー源としての電気の有効な利用、浪費の防止という見地から電力需要対策としての電力ピーク対策と省電力対策について述べてみよう。まず電力ピーク対策としては、全電力需要の約60%を占める産業部門需要、とくに電力多消費産業としての鉄鋼、化学などにおける操業形態の変更などが考えられる。業務部門においてはビル業界における廃熱回収用ヒートポンプや蓄熱槽の活用、冷暖房温度管理などがある。また料金制度面からの措置として、とくに冷房用需要の増大による夏期におけるピークの尖鋭化が負荷率の低下を招きつつあることから、負荷調整特約、夏休等振替特約および蓄熱式冷房特約などの利用による電力ピークの調整がはかられつつある。

つぎに省電力対策としては、産業部門においては生産プラントの効率化、トータルエネルギーシステムによる廃熱利用、公害対策装置の省電力化

などが考えられる。業務部門においては、ビルの大規模化、空調設備等の普及などによって業務用需要の割合は増大するので、ビルの断熱化等が推進されるべきであろう。また家庭部門においては、エネルギー節約の認識と同時に家電製品の消費電力節減化、あるいは住宅の断熱化等がはかられる必要がある。

3.2 ORの適用

これまで述べてきた電力事業のいろいろの分野へのOR手法の適用例について、ここでは代表的なもののみを簡単に述べてみよう。まず発電設備の投資計画の選択に関しては、1954年フランス電力公社(EDF)のMassé, Gibratらが行った線形計画法の適用([3]参照)がその最初であろう。その後このモデルは改良を加えられ、発電設備の拡張をあらゆる変数ばかりでなく、それらの運転をあらゆる変数をも追加して、さらには地理的分割をも考慮に入れた非線形計画モデル、“Investment'85”モデルに発展している([4]参照)。わが国においてはこの方面での研究としては、著者らの“混合型整数計画法による発電設備の最適建設計画および最適運転計画”があげられるであろう([5]参照)。さらにこの分野での最近の研究の動向としては、環境問題、エネルギー資源問題を考慮したもの、あるいは時間帯別の限界費用測定などによって電気料金問題と関連させたものなどの研究が盛んになりつつある。つまりエネルギー源としての電力を考察し、その中で環境問題、資源問題等を考慮したモデルとして[6],[7]などがあり、そこでは電力システムが石油、石炭あるいは都市ガスなどのシステムとともにエネルギーシステムとして線形計画モデルで表現されている。わが国においてもこのようなエネルギーモデルの中で、電力システムをサブモデルとして表現したものとして著者らが作成中の“日本のエネルギー・経済モデル”がある。その概略はトロントで開催された1978年のIFORS大会で紹介がなされた([8]あるいは[9]参照)が、このモデルはわ

が国の経済の成長径路をエコノメトリックモデルによって予測し、その条件下で電力を含めた将来の望ましいエネルギーシステムを線形計画モデルによって描き出そうとするものである。

また電力事業の将来計画の作成を料金問題等と関連させたものとしては、線形計画モデルのシャドウプライスを用いて負荷曲線（1年間（8760時間）の電力の需要（負荷）の変動の状況を毎時間の電力量を用いてグラフにしたもので通常大きい順に並べてあらわす）中の時間帯別の限界費用測定を行なった[10]などがある。ここでは時間帯別の限界費用の測定を季節別時間帯別の料金構成理論に役立たせようとするを目的としている。その他負荷曲線に確率的要素を入れ、複合負荷曲線（Combined Load Duration Curve）を定義し、需要の不確定性をも考慮しようとしたもの（[11]参照）、あるいは LOLP（Loss of Load Probability）なる概念を導入し信頼性を考慮しようとしたもの（[12]参照）などがあるが、今後さらにこのような分野での研究がなされるであろう。

以上、電力事業の将来計画作成へのOR手法の適用例の代表的なものを掲げたが、もちろんこれら以外にも多くのOR的研究があることは事実である。それらの紹介は別の機会にゆずることにして、ここでは問題へのアプローチの代表例を紹介するにとどめておく。

参 考 文 献

- [1] 通産省資源エネルギー庁公益事業部編、電力需給の概要、1977。
- [2] 電気事業連合会統計委員会編、電気事業便覧、昭和52年版。
- [3] Massé, P. and Gibrat, R. : Application of Linear Programming to Investments in the Electrical Power Industry, *Management Science*, Vol. 3, No. 2 (1957), p. 149.
- [4] Bessiere, F. : The "Investment '85" Model of Electricite De France, *Management Science*, Vol. 17, No. 4 (1970).
- [5] 小川洋, 大山達雄; 混合型整数計画法による発電所の最適建設計画の作成, *電力経済研究*, No. 3, 1973-7.
- [6] Dantzig, G. B. and Parikh, S. C. : On a PILOT Linear Programming Model for Assessing Physical Impact on the Economy of a Changing Energy Picture, Technical Report No. SOL 75-14R, Department of Operations Research, Stanford University, 1975.
- [7] Hoffman, K. C. : "A Unified Framework for Energy System Planning," in *Energy Modelling*, M. Searl (ed.), Resources for the Future, Inc., pp. 150-162.
- [8] H. Ogawa and M. Uchida: Modelling Japan's Energy Economic Systems, K. B. Haley, ed., OR'78, North-Holland Publishing Company, 1978.
- [9] 齊藤雄志, 大山達雄, 中山博史, 長田紘一: エネルギー問題に対するひとつのOR的アプローチ, 1978年度OR学会春季研究発表会アブストラクト集。
- [10] Scherer, C. R. : "Estimating peak and off-peak marginal costs for an electric power system: an ex ante approach", *The Bell Journal*, Autumn 1976, pp. 575-601.
- [11] J. Vardi, J. Zahavi and B. Avi-Itzhak : The Combined Load Duration Curve and its Derivation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, No. 3, 1977.
- [12] ____ : Variable load pricing in the face of loss of load probability, *The Bell Journal*, Vol. 8, No. 1, Spring '77, pp. 270-288.

おがわ・ひろし 1925年生
電力中央研究所 経済研究所

おおやま・たつお 1945年生
電力中央研究所 経済研究所