

エネルギーと技術予測

近年、資源有限論の高まりや、OPEC 諸国の石油戦略の活発化に伴い、エネルギー関連の将来技術への関心が急激に高まってきた。筆者らは、約半年ほど前から、通産省その他の協力のもとに、さまざまな分野での技術発展の将来像を描く作業を行なっている。方法論としては、技術予測手法の一つとして知られているクロス・インパクト・マトリクス法を大幅に改良して用いているが、エネルギー分野についても試行的作業を行なってみた。

本文では、この内容を中心として、技術予測手法とそのエネルギー技術への応用について述べてみたい。

1. デルファイ法による予測

技術予測は、1960年前後から盛んになったものであるが、基本的にはつぎの2つの型の目的のもとづくものと考えられる¹⁾。

第1は、技術開発計画策定のための基本情報の作製である。技術が大規模複雑化し、その開発に10年ないしそれ以上といった長期間を要するようになる、開発計画のもつ重要性はまことに大きく、そこでは開発各項目のプライオリティの設定や、開発投資の配分の仕方が鍵となってくる。したがって、この場合は、技術体系がどのように構成され、その中で各部各部がどのような重要度ももち、全体の整合的発展のためにはそれらがどの程度の力点をおいて開発されるべきか、といった情報が必要になる。こう考えると、この問題への接近法は、“どうなる”ことを予測するより、“どうすべきか”を考える規範的(normative)な方式がのぞましい。関連樹木法の1つである、米国

Honeywell 社の開発した PATTERN(Planning Assistance Through Technical Evaluation of Relevance Number)²⁾は、その典型例といえる。

第2の目的は、企業経営戦略、さらに大きくは国家の産業政策の策定に必要な情報を得ることであって、技術革新が産業発展の原動力であるという観点からするならば、技術予測は政策策定上必須の手段となる。この場合は、方法は第1の場合と異なり、“どうなる”か、という面に焦点をあわせた予測手法が必要となる。

Jantsch³⁾は、予測型の手法にも計量モデルを用いるような客観的手法の他に、主観的手法・システムの手法があることを指摘しているが、この中でもっとも知られ、また使われているのは、主観的手法として分類されたデルファイ法⁴⁾であろう。

この方法は知悉の読者がかなり多いと思うので詳細はさけるが、個別の問題に関する多数(多くの場合、その分野の専門家)の意見を、各人データの集計・その結果の各個人へのフィードバック、各人意見の再集計、といった一連の操作のくり返しにより取りまとめていくものである。各専門家の意見を比較的バイアス少なく吸い上げることのできる方法だといわれ、わが国の科学技術庁は、昭和45年、昭和52年にそれぞれ行なった大規模な技術予測ではこの方法を用いている。

そこで、この科学技術庁の予測結果⁵⁾のうち、エネルギー関連技術について少し紹介しておこう。これは、数十名の専門家を対象に実施したもので西暦2000年前後までの33の技術開発課題が取り上げられている。これらについては、その重要度・実現時期・研究開発推進方法等が評価項目

として用いられているが、その一部として、新エネルギー開発関係の結果を表1に示す。ここで、重要度とあるのは全回答中該当の重要度を答えた人の数を示す。それぞれの回答が1、2と2段になっているのは第1回アンケート結果、それを回答者にフィードバックしてとり直した第2回アンケート結果である。実現時期のグラフは、斜線入りが第2回、そうでないものが第1回の結果

で、回答者を回答実現時期の順にならべたとき、5角形の左端が回答者総数中の1/4番目、中央が半分、右端が3/4番目の回答者によって示された回答時期をあらわす。

この表1を見ると、原子力関連技術の重要度は非常に高く、反面石炭関連技術については思ったより低い。このことは、エネルギー関係者の将来の期待が、原子力反対の動きが多々あるにもかかわらず

表1 昭和52年科学技術庁技術予測結果(文献5), pp.144-147より抜粋)

課題	重要度 (%)					実現時期				
		大	中	小	不要	1980	1990	2000	2005年	
4 石炭の低カロリーガス化発電技術が実用化される。	1	30	49	15	5					
	2	30	54	14	3					
5 石炭の高カロリーガス化技術が実用化される。	1	35	52	10	2					
	2	21	69	8	1					
6 石炭の液化技術が実用化される。	1	49	42	6	2					
	2	56	40	3	0					
7 遠心分離法による商業用のウラン濃縮工場稼働する。	1	63	29	8	0					
	2	81	17	2	0					
⑨ 原子炉熱を利用した製鉄・化学工業のプロセスヒートを軸とした原子力コンビナートが実現する。	1	62	35	3	-					
	2	82	18	0	-					
10 核燃料サイクルを含めたFBR(高速増殖炉)システムが開発される。	1	75	17	5	1					
	2	89	10	1	0					
⑩ FBR(高速増殖炉)をサイクルの中に入れた核燃料サイクルが実現する。	1	75	21	4	-					
	2	88	10	2	-					
12 レーザー方式核融合により臨界プラズマ条件が達成される。	1	52	32	13	3					
	2	68	29	3	0					
13 磁場閉じこめ方式核融合によりローソンの条件(1億度、10^14個/cm^3、1秒程度)が達成され、電力を取り出すシステムが開発される。	1	63	21	11	3					
	2	78	22	0	0					
14 人工衛星方式を用いた太陽光による発電技術(出力数kW程度)が開発され、地上にミリ波で送電することが可能となる。	1	11	39	35	13					
	2	7	41	43	7					
⑬ 人工衛星方式を用いた太陽光による発電所(出力100万kW程度)が設置され、地上にミリ波で送電することが実現する。	1	19	33	48	-					
	2	5	25	70	-					

ならず、やはり原子力に向けられていることをはしなくも示している。また、この表では、太陽発電については太陽光発電のみで太陽熱発電にはふれていないが、大規模発電となると重要度も低く実現時期も相当先であり、SFの技術と見られていることがわかる。

この表を含め、全結果を概観して感ずるのは、それぞれの技術の実現時期がほとんど1990年以降であって、それ以前にはめばしいものがないことである。もちろんこれは選定課題が長期的なものであることに大きな原因があるだろうが、新技術開発が相当の年月を要するという人々の見方がよくあらわれている。

また実際、昭和45年時の予測結果と上記の結果を対比してみると、実現時期予想がかなり遅れていることがわかる。原子力の場合をとっても、遠心分離法によるウラン濃縮工場稼働という課題については、昭和45年予測では1983年、昭和52年予測では1989年で6年のおくれであり、またFBRシステムについては前者が1988年、後者が1999年で11年の遅れが生じている。

このようなずれは、1つには、昭和45年以後、世界の景気がめだって悪化し、高成長型の発想が減少したことにもよるが、もう1つには、開発に伴うさまざまな困難が、当初の予想より大きいと考えられるようになったことによるのであろう。実はこのような開発の遅れという事情は、エネルギーにかぎらず他の多くの技術分野に生じており、予測のもつむずかしさを示している。

2. クロス・インパクト・マトリクス法

前節で述べたデルファイ法は、個別の項目に対する多数の人間の予測を集約するには有効な方法であるが、最大の欠点は、各項目間の関連をまったく考慮に採り入れられないことである。しかし、多くの技術は互いに相補的、あるいは競合的な関係をもっている。エネルギー技術にしてもこの例外ではもちろんない。たとえばFBRと核融

合を取り上げると、前者をめぐるさまざまな安全性に関する問題が解決され、そのシステムが世界的に普及していくことになるならば、核融合開発をいそぐ必要性は少なくなり、その開発速度にはかなりのブレーキがかかることとなる。

デルファイ法の場合、このような技術間の干渉を考慮し、全技術体系の将来の予測を行なうことは本質的に不可能で、これを行なうには他の方法が必要となってくる。Jantschは、それらの方法をシステム的手法とよんだ⁵⁾が、その中で比較的よく使われたものにクロス・インパクト・マトリクス法(Cross Impact Matrix Method, 以下X-I法と略記する)がある。この方法は、1960年代後半に、米国の未来研究所のGordonらが中心となって開発した⁶⁾もので、基本的にはつぎのような考えにもとづいている。

すなわち、考慮すべき技術課題(あるいは予測すべき事象)を仮に X_1, X_2, \dots, X_n とすると、人間は自己の判断にもとづき、それらが目標年度までに生起する確率 $\{p(i); i=1, 2, \dots, n\}$ を予測する。また、同時に、ある事象 X_i が生起したとき、それが他の事象 $X_j(j \neq i)$ の生起確率におよぼすインパクトをなんらかの数値の形で評価する。これを用いると、ある事象 X_i が生起した以後での他事象の生起確率が算定できることになる。このような準備の上で、目標期間までの各事象の実際の生起確率を、モンテ・カルロ法で算定する。この場合、得られた確率は初期の推定値とはずれてくるが、この差は他事象からのインパクトによって発生したもので、他事象との関連度をあらわすと考える。

この方法は、問題を一次および二次元の生起確率としてとらえ、取り扱うという点で他の方法とは抜本的に異なっている。将来事象は基本的には確率的事象である以上、このアプローチは人々にはきわめて受け入れやすいものであり、事実、1970年前後にはいろいろな応用が試みられている^{7,8)}。しかしながら、この当時の方法論は、確

率論的にみるとかなり本質的な誤りがあることが、Turoff⁹⁾、Dalkey¹⁰⁾らにより指摘され、X-I法はここにおよんで新局面を迎えることとなった。この誤りは、上記の方法で形成された確率が、 n 個の多次元事象の生起に関する確率体系として合理的な体系となっていないということに基本的には帰着する。すなわち、これら事象に関する確率は、基本的にはこのすぐあとに述べるような諸条件を満たしていなければならないにもかかわらず、上記で求めた確率はこのような条件を満たす保証がまったくない。

このために、その後、いくつかの新しいX-I法の提案が行なわれたが、最大の注目を浴びたのが、1975年に発表されたDuperrin-Goditの手法である¹¹⁾。

この手法は、つぎの原理にもとづいている。いま、 n 個の事象を考えたすると、それらの複合事象は、

$$F_r = (e_1, e_2, \dots, e_n) \quad (2.1)$$

とかけ、その数は全部で 2^n 個あり、互いに排反である。ここで、 $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ は、事象 X_i が生起するとき1、非生起のとき-1をとる変数である。この F_r に対応する確率をいま f_r とかくと明らかに、

$$\sum_r f_r = 1 \quad (2.2)$$

$$f_r \geq 0 : r=1, \dots, 2^n \quad (2.3)$$

が成立しなくてはならない。ここで、(2.2)の \sum は 2^n 個の全 n 次元事象について行なったものとする。さらにいま、事象 X_i の生起確率を $p(i)$ とすると、

$$p(i) = \sum_r \theta_{ir} f_r \quad (2.4)$$

が成り立つ。ここで、 θ_{ir} は、 f_r に $e_i=1$ が含まれているとき1、それ以外のとき0である。また、条件付確率 $p(i|j)$ 、 $p(i|\bar{j})$ をつぎのように定義しておく。

$p(i|j)$: j が観測期間中に生起しているという条件の下で i が生起する確率

$p(i|\bar{j})$: j が観測期間中に非生起という条件

の下で i が生起する確率

すると、(2.4)と同様にこの2変量は次式を満たさねばならない。

$$p(i, j) = p(i|j)p(j) \quad (2.5)$$

$$p(i, \bar{j}) = p(i|\bar{j})(1-p(j)) \quad (2.6)$$

$$p(i, j) = \sum_r \theta_{ijr} f_r \quad (2.7)$$

$$p(i, \bar{j}) = \sum_r \theta_{i\bar{j}r} f_r \quad (2.8)$$

ここで θ_{ijr} は、 f_r が $e_i=e_j=1$ を含むときのみ1、それ以外0、 $\theta_{i\bar{j}r}$ は f_r が $e_i=1, e_j=0$ を含むときのみ1、それ以外0。

そこで、人間はまず $p(i), p(i|j), p(i|\bar{j})$ を推定する。ここで推定値には*のsuperfixをつけておく。Duperrin-Goditの方法は、得られる確率体系が(2.2)~(2.8)の条件をすべて満足し、しかも推定値との距離の二乗、

$$J = \sum w_i (p(i) - p^*(i))^2 + \sum w_{ij} (p(i, j) - p^*(i|j)p^*(j))^2 + \sum v_{ij} (p(i, \bar{j}) - p^*(i|\bar{j})(1-p^*(j)))^2 \quad (2.9)$$

を最小となるよう f_r 、したがって $p(i), p(i, j)$ を定めようとするもので、これは明らかに典型的な二次計画問題となり、容易に解くことができる。

この方法は、確率論的には完全に整合のとれた確率が得られるという利点があるが、欠点は、あつかう事象の数とともに変数 f_r の数が 2^n の形で増大し、あまり大きな数の事象はあつかえない(実用的には $n \leq 8$ 程度)こと、またこの問題からすぐわかるように評価に採り入れた一次および二次の確率は一意に定まるが、三次以上の高次確率は必ずしも一意には定まらないことなどがあげられる。後者の欠点は、後述するように若干の演算の附加によってかなり補なうことができる。

3. クロス・インパクト・マトリクス法によるエネルギー技術予測

前節のDuperrin-Goditの改良手法を用い、今後10年の将来におけるエネルギー技術について、予測作業を行なってみた¹²⁾。この場合、予測は、2つのグループでそれぞれ独立に行なったが、グ

ループ構成メンバーはいずれもエネルギー専門ないしはかなり専門に近い大学の研究者2名ずつである。選択した項目は表2に示す7つである。

これらを見るとわかるように、技術とはいっても、ある程度、社会予測の色彩をもたざるを得ない。

その予測で得た結果の一部を表3にかかげる。ここでは、紙面の都合上 $p^*(i|j)$, $p^*(i|\bar{j})$ についてはかかげていないが、 $p(i)$ と $p^*(i)$ の比較によって推定値の修正の程度がおおよそわかるであろう。表のように、グループAの場合、推定値がすでにかなり合理的な体系に近く、修正量は大きくても0.015程度にすぎない。しかし、グループB

表2 X-I法によるエネルギー技術予測項目

—今後10年を対象として—

- (1) 石炭転換技術が発展し、石炭の日本のエネルギー供給における比率が増大する。
- (2) 高速増殖炉(FBR)が全システムとして実用化の段階に入る。
- (3) 核融合炉の実用性が検証される。
- (4) 水素エネルギー利用技術の実用性が検証される。
- (5) 太陽熱発電が実用化の段階に入る。
- (6) 石油および天然ガス開発・発見が進み、その可採量が大幅に増大する。
- (7) 軽水炉の安全性・経済性が保証され、その受入れの空気が増大する。

表3 X-I法結果

グループA

P(I) TABLE	$p^*(I)$ (推定値)						
P(1)=	0.58215		0.60000				
P(2)=	0.41542		0.40000				
P(3)=	0.20285		0.20000				
P(4)=	0.60664		0.60000				
P(5)=	0.16428		0.15000				
P(6)=	0.49594		0.50000				
P(7)=	0.26677		0.25000				

P(I, J) TABLE	$p^*(I)$ (推定値)						
i/j	1	2	3	4	5	6	7
1	0.58215	0.23999	0.11768	0.35671	0.07452	0.24751	0.12902
2	0.23999	0.41542	0.06106	0.25363	0.04901	0.19218	0.13088
3	0.11768	0.06106	0.20285	0.13803	0.03902	0.08691	0.04254
4	0.35671	0.25363	0.13805	0.60664	0.11253	0.28813	0.15941
5	0.07452	0.04901	0.03902	0.11253	0.16428	0.06933	0.02496
6	0.24751	0.19218	0.08691	0.28813	0.06933	0.49594	0.11911
7	0.12902	0.13088	0.04254	0.15941	0.02496	0.11911	0.26677

グループB

P(I) TABLE	$p^*(I)$ (推定値)						
P(1)=	0.66531		0.70000				
P(2)=	0.46811		0.50000				
P(3)=	0.28963		0.30000				
P(4)=	0.19967		0.20000				
P(5)=	0.23303		0.20000				
P(6)=	0.46429		0.50000				
P(7)=	0.75594		0.80000				

P(I, J) TABLE	$p^*(I)$ (推定値)						
i/j	1	2	3	4	5	6	7
1	0.66531	0.25397	0.20913	0.11518	0.12051	0.24747	0.45370
2	0.25397	0.46811	0.09893	0.08953	0.06503	0.21612	0.43885
3	0.20913	0.09893	0.28963	0.06906	0.03321	0.13681	0.19831
4	0.11518	0.08953	0.06906	0.19967	0.06463	0.06581	0.15066
5	0.12051	0.06503	0.03321	0.06463	0.23303	0.09876	0.12482
6	0.24747	0.21612	0.13681	0.06581	0.09876	0.46429	0.35377
7	0.45370	0.43885	0.19831	0.15066	0.12482	0.35377	0.75594

表 4 関連度 K^+ , K^- , K^0 , K^a

1985年までのエネルギー技術展望	グループA				グループB			
	K^+	K^-	K^0	K^a	K^+	K^-	K^0	K^a
1. 石炭の発展・シェア拡大	0.01	-0.54	-0.53	0.55	0.09	-0.84	-0.75	0.92
L								
2. FBRの全システム実用化	0.19	-0.63	-0.44	0.82	0.24	-0.91	-0.67	1.15
3. 核融合実用性の検証	0.29	-0.62	-0.34	0.92	0.30	-0.87	-0.58	1.17
②					③			
4. 水素技術実用性の検証	0.28	-0.06	+0.21	0.32	0.58	-0.47	+0.11	1.05
③	L	①	L	①	L	①		
5. 太陽熱発電の実用化	0.30	-1.08	-0.78	1.38	0.39	-1.51	-1.12	1.90
①	①	L	①	②	①	L	①	
6. 石油・NG可採量の増大	0.20	-0.49	-0.30	0.69	0.03	-0.58	-0.56	0.61
					L	L		L
7. 軽水炉安全性経済性保証と 受入れ空気増大	0.18	-0.93	-0.75	1.11	0.25	-0.49	-0.24	0.73
		②		②		L		

①②③：大きいほうから数えた順位

L：最小を示す

の場合は、かなり大きな修正が必要で、平均して0.05程度のずれを生じている。このように人間の推定した確率は、かなり体系としては矛盾もっていることがあり得るので、ここに示した修正手法が意味をもってくる。

このグループAとBの結果を比較すると、一見かなりよく似ているが、第4事象の水素技術に対する見通しは大きく異なり、グループAは楽観的、Bは悲観的である。そして逆に、第7事象の軽水炉の将来についてはAは悲観的、Bは楽観的である。グループAは、水素技術をかなりよく知悉している専門家を含み、グループBは原子力専門家を含むことを考えると、自己の専門に対しては概して楽観的に予測をたてていることがわかり、興味深い。

一方、この表3であると、事象相互間の関連が必ずしも把握しやすいとはいえない。そこで、新たにつぎのような指標を定義し、それらを各項目について計算してみたのが表4である。

$$\text{関連度 } K(i, j) = \frac{p(i|j)}{p(i)} - 1 \quad (3.1)$$

$$= \frac{p(j|i)}{p(j)} - 1 \quad (3.2)$$

$K^+(i)$ ： $K(i, j)$ のプラスのもののみ j に関する和

$K^-(i)$ ： $K(i, j)$ のマイナスのもののみ j に関する和

$$K^0(i) = K^+(i) - K^-(i) = \sum_j K(i, j) \quad (3.3)$$

$$K^a(i) = K^+(i) + K^-(i) = \sum_j |K(i, j)| \quad (3.4)$$

これらの指標はつぎの意味をもつと解される。

$K^+(i)$ ：他の項目との相補的関係の強さを示す

$K^-(i)$ ：他の項目との競合的関係の強さを示す

$K^0(i)$ ：その項目が相補的か競合的かを示す

$K^a(i)$ ：その項目の他項目との関連の強さを示す

表4を見ると、各項目の性格についての評価は両グループとも似かよっており、技術としての他との相補性では水素技術を最大と考え、他技術との関連では太陽熱を大きく評価していることがわかる。太陽熱の場合は、その実現確率が低いだけに、いったん実現すると他への波及が大きいと考えたと予想される。意外なのは、石油や天然ガスの可採量の増大のインパクトの小ささであるが、本来これらの有限性が強く認識されている現状を

考えるとこの結果は理解できる。

この結果の分析のもう1つの方向は、高次の複合事象の実現確率を調べることである。たしかに、前述のように3次以上の確率はこれからは一意に定まらないが、前節に示す制約条件を満たしかつ同一の1次、2次元確率を与える高次確率はある範囲にあるはずであり、これはその確率の最大最小を線形計画法を用い求めることにより知ることができる。その計算結果を見ると、グループBの場合、たとえば5次元確率を考えると、事象1, 2, 7が生起し、4, 6が生起しないという確率が、他に比するともっとも最大値も最小値も大きい。すなわち、石炭・FBR・軽水炉という石炭—原子力オプションが進み、石油中心の体制がくずれていくというシナリオが、このグループにとって最尤シナリオということになる。

この結果は、あくまでも試行的なものであるが、以上の説明からわかるようにこのX-I法は、相互関連する技術全体をシステムとしてとらえ、整合的な将来像を描きだすのが特色である。

4. 結 言

技術予測はまだ揺籃の時代といえるが、ここに示す改良X-I法のように、次第に有効な手法が生まれつつある。ここでは、エネルギー技術を例に、デルファイ法の結果とX-I法の結果を対比的に示した。これが技術予測の考え方を知る1つのよすがともなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 只野文哉編, ソフト・テクノロジー, p. 5丸善, 昭47.
- 2) 1と同じ, 第8章.
- 3) E. Jantsch: 技術予測, マネージメント・センター, 1968.
- 4) 只野文哉, デルファイ法, 技術と経済, 4, 9, 1970.
- 5) 科技厅編, 日本の技術, 科学技術と経済の会, 昭52.
- 6) T. J. Gordon & H. Hayward, Initial Experiments with the Cross Impact Matrix Method of Forecasting, Futures, 1, 2, 1968.
- 7) 1と同じ, 第5章.
- 8) S. Enzer: Delphi and Cross Impact Techniques, Futures, 4, 2, 1971.
- 9) M. Turoff: An Alternative Approach to Cross Impact Analysis, Technological Forecast and Social Change, 4, 3, 1972.
- 10) N. C. Dalkey: An Elementary Cross Impact Model, Technological Forecasting and Social Change, 4, 3, 1972.
- 11) J. C. Duperrin and M. Godit: Method for Constructing and Ranking Scenarios, Futures, 7, 4, 1974.
- 12) 現代研究会報告書51-3, 技術発展の社会に対するインパクトに関する調査研究, 産業研究所, 昭52.

かや・よういち 1934年生
東京大学 工学部 総合試験所

JORSJ 未公開採択論文リスト

- 沢木勝茂, 市川 朗: "An Algorithm for Partially Observable Markov Decision Processes over an Infinite Horizon"
- 須永照雄, 近藤英二, Shamal Kanti Biswas: "An Approximation Method Using Continuous Models for Queueing Problems"
- 茨木俊秀, 寺中勝美, 岩瀬次郎, 長谷川利治: "The Multiple-Choice Knapsack Problem"

- 坂口 実: "When to Stop: Randomly Appearing Bivariate Target Values"
- 大鈞史男, 児玉正憲, 西田俊夫: "M+1-out-of-N:G System with Correlated Failure and Single Repair Facility"
- 大山達雄: "Necessary Conditions for the Completion of Partial Latin Squares"
- 石井博昭, 西田俊夫, 南部康徳: "A Generalized Chance Constraint Programming Problem"
- 石井博章: "A New Method Finding the Kth Best Path in a Graph"