

世界エネルギー需給の構造分析

Analysis on the World Energy Supply-Demand Structure

熊倉 修*

Osamu Kumakura

はじめに

第一次石油危機から10余年の間に世界のエネルギー需給構造は大きく変化した。エネルギー需要の伸びは鈍化し、とくに石油需要は第2次石油危機以降大幅に減少した。一方供給側を見ると、非OPEC諸国の原油供給量の増加と世界の原油需要の減少とによって、世界全体の原油供給量に占めるOPEC原油の比重は低下し、このことがOPECの市場支配力にも影響を及ぼすことになった。また、石油代替エネルギーとして、原子力発電は70年代初めから急速に増加して来た。石炭も第2次石油危機以降石油との代替が進み生産量が増加し始めた。

こうして、世界の石油需給は軟化し、原油価格は1983年に5ドル/バレル(アラビアンライト)値下げされるに至ったのである。そして現在においても石油市場は弱含みのまま推移している。こうした世界エネルギー需給の現状は、長期的に見てどのように評価すべきであろうか。本稿では、この点について「世界エネルギー需給モデル」¹⁾を用いて行った分析の結果を報告する。ここではOPECの原油供給行動と需要国における原子力開発という2つの要因をとり上げ、これらの要因が世界のエネルギー需給と価格の動向に対してどのような影響を及ぼすかを検討する。

1. モデルの構造

モデルは約280本の方程式からなる計量経済モデルである。このモデルでは、世界の主要国については国別に、そしてその他諸国についてはグループ化して、そのエネルギー需要量、供給量が実質国内総生産、エネルギー価格などを説明変数とする関数によって決定される。そしてこれらの需給量を世界全体として均等化させ、世界のエネルギー需給量と国際価格とが解か

れる。¹⁾

表1に、モデルにおける地域区分と変数の扱いを示す。モデルにおいては、OECD主要7か国(日本、アメリカ、カナダ、フランス、西ドイツ、イタリア、イギリス)の国別エネルギー需給モデルが中核となっている。現実的にもこれらの7か国で自由世界全体の化石燃料需要量の67%、供給量の37%(1980年)を占めており、これらの国の需給動向が世界エネルギー需給を左右していると見ることができよう。これら7か国については、国別に石油、石炭、ガス、電力の各エネルギー種類別に最終消費量と一次エネルギー需要量が内生変数としてモデルの中で決定される。一方その他の諸国については、7か国以外の先進国、OPEC諸国、OPECを除く途上国というグループ別に石油と石炭の需要量と供給量が決定される(石炭供給についてはオーストラリアと南アフリカを別掲して扱う)。中央計画経済圏諸国については、自由世界への石油と石炭の純輸出が外生変数として与えられる。

表1 モデルにおける地域区分と変数のあつかい

	石油		石炭		ガス		電力	
	生産 1 最消 次 終費	需要 1 最消 次 終費	生産 1 最消 次 終費	需要 1 最消 次 終費	生産 1 最消 次 終費	需要 1 最消 次 終費	火原・ 子水 力力 終費	需要 1 最消 次 終費
OECD7								
日本	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
アメリカ	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
カナダ	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
フランス	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
西ドイツ	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
イタリア	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
イギリス	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	* ○ ○	* ○ ○	○ * ○	○ * ○
その他先進国	○ ○ ×	○ ○ ×	○ ○ ×	○ ○ ×	* × ×	* × ×	× × ×	× × ×
オーストラリア		石炭につ いて別掲	○ × ×	○ × ×				
南アフリカ			○ × ×	○ × ×				
OPEC13	Oor***	× × ×	× × ×	× × ×	× × ×	× × ×	× × ×	× × ×
その他途上国	○ ○ ×	○ ○ ×	○ ○ ×	○ ○ ×	× × ×	× × ×	× × ×	× × ×
中央計画経済 諸国	*	*	*	*	× ×	× ×	× ×	× ×
	純輸出	純輸出	純輸出	純輸出				

○；内生変数，*；外生変数，×；モデルではあつかわない

* (財)電力中央研究所経済研究所経済部エネルギー研究室主任研究員

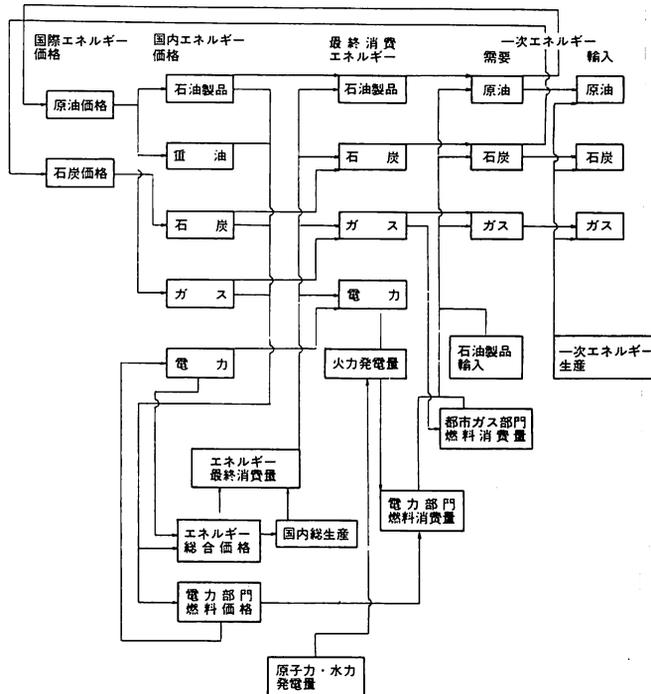


図-1 OECD7 国エネルギー需給モデル，フロー・チャート

こうして決定された世界全体の石油，石炭の需要と供給とがモデルの中で均等化される。つまり，世界市場における需給均衡メカニズムを通じて石油，石炭の需給量と国際価格が内生変数として決定される（なお在庫に関しては，自由世界全体の在庫変動が外生変数としてあたえられる）。

OECD7 国国別エネルギー需給モデルの構造は，図-1 のようになっている。モデルにおいては，まず実質国内総生産，一般物価指数，エネルギー最終消費量がエネルギー総合価格指数などとの間の単純なマクロ経済関係を通じて決定される。

エネルギー最終消費量は，次のようにしてエネルギー種類別最終消費量にブレイク・ダウンされ，さらにエネルギー転換部門における転換量および一次エネルギー需要量が導出される。まず，石油，石炭の国際価格が外生変数として与えられる。これら2つの価格が国内の石油製品，石炭・石炭製品，ガス，電力の価格を決める。これら4つの国内価格によって，最終消費エネルギーの総合価格指数が決まる。上で決ったエネルギー最終消費量はエネルギー種類別価格によってエネルギー種類別の最終消費量に分解される。このエネルギー種類別最終消費量にエネルギー転換部門（石油精製部門，都市ガス製造部門，電力部門）のエネルギー

転換量と二次エネルギー輸入量を加減してエネルギー種類別の一次エネルギー需要量が決定される。さらに一次エネルギー需要量から各エネルギーの国内生産量を差し引いて輸入量が決まる。

2. シミュレーション分析

モデルの主要な外生変数であるOPEC原油供給量とOECD7 国の原子力発電量とにいくつかのケースを設定して，これらの変数が世界のエネルギー需給と価格にどのような影響を及ぼすかを分析した。シミュレーションの期間は1983年から2000年である。第1のシミュレーションにおいては，今後のOPECの原油供給行動のあり方が，世界の化石燃料需給と価格にどのような影響を及ぼすかを分析した。第2のシミュレーションでは，化石燃料に代替するエネルギーである原子力発電の開発規模が，化石燃料の需給と価格にどのような影響を及ぼすかを分析した。

2.1 OPECの原油供給行動が化石燃料の需給に及ぼす影響

自由世界の原油供給に占めるOPECによる供給の比重は第1次石油危機以前には60%を越えていた。しかし第1次石油危機以降は，とくに第2次石油危機以後には，世界の原油需要の減少と非OPEC

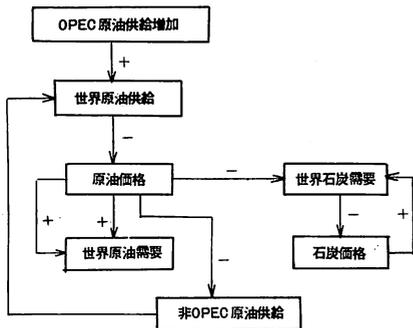
原油供給の増加とによって、OPECの比重は急速に低下し1980年には50%を割ることになった。これともなつてOPECの世界原油市場に対する影響力は次第に弱まって来た。さらにOPECに対する原油需要の減少とともにOPECの原油輸出収入は減少し、OPEC各国の経済はこれによって深刻な影響を受けるようになった。

こうした状況において、OPECが今後も加盟各国の利害を調整し生産量を抑制する機能を果しうるか否かが、OPECの原油供給行動のあり方を左右する重要な要因となつて来た。

シミュレーションはOPECの行動に次の2つのケースを設定して行った。標準ケースにおいては、OPECは加盟各国の増産要求を調整し総生産量を抑制し、原油価格の低下を阻止することができると想定する。第2のOPEC増産ケースにおいては、OPECは調整機能を失い、OPEC各国は1986年以降急速に原油生産を増加し、その結果原油価格の低下をまねく。

モデルにおいてはOPECの原油供給増加は、世界の化石燃料の需給と価格に対して、図-2に示すような影響を及ぼす。OPECの原油供給量の増加は世界の原油供給量の増加をもたらす、原油価格を低下させる。原油価格の低下は一方では石炭から石油への需要のシフトをもたらす、石炭価格を低下させる。また非OPECの原油供給量を減少させ、世界全体の原油供給の増加をOPECの増産量よりも小さくする。原油価格の低下は地方では原油需要を減少させる効果も持つ。そしてこれらの効果が均衡するところで原油と石炭の世界的な需給と価格が決まる。

標準ケースとOPEC増産ケースのOPEC原油供給量を図-3のように設定した。標準ケースにおいては、OPEC原油生産量は1985年の1,700万bbl/dから、1990年には2,100万bbl/d、95年に2,300万bbl/d、



図中の+は増加(上昇)、-は減少(低下)を示す。

図-2 OPEC原油供給増加の影響

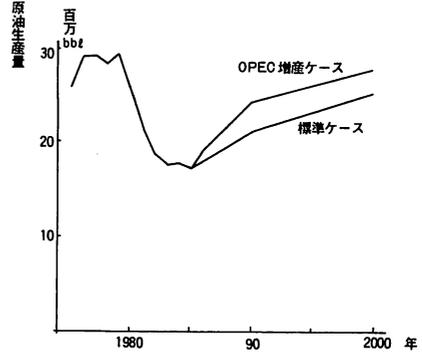
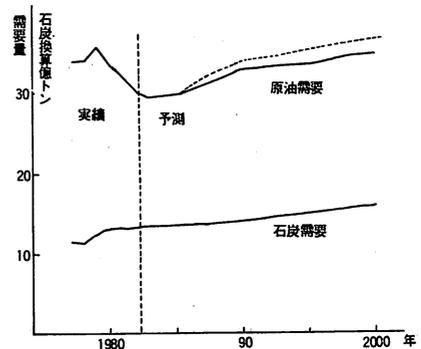


図-3 OPEC原油供給量の想定

2000年に2,500万bbl/dと、原油需要の回復とともにゆるやかに増加していく。一方OPEC増産ケースにおいては、1985年の1,700万bbl/dから、1986年には1,900万bbl/dに急増し、90年に2,400万bbl/d、95年に2,600万bbl/d、年に2,700万bbl/dと標準ケースを上まわつた生産を行う。

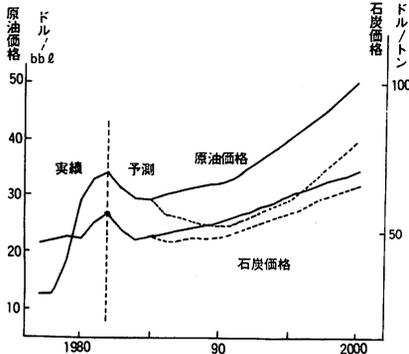
もう1つの主要な外生変数であるOECD7か国の原子力発電量は、1985年の石炭換算3.1億トンから、1990年に4.6億トン、1995年に5.3億トン、2000年には6.1億トンに増加すると想定している。

図-4、図-5にシミュレーションの結果を示す。はじめに標準ケースの推計結果について簡単に述べておこう。自由世界の原油需要量は1979年に過去最高の36億トン(石炭換算、以下同じ)に達したが、現在は30億トン程度に減少している。原油需要は世界各国の経済の回復と価格低下によってゆるやかに回復し、1990年には33億トン、2000年には35億トンに回復する。石炭需要は第2次石油危機以後とくに先進国における石油から石炭への代替によって急増したが、今後は年率1%程



— 標準ケース、…… OPEC増産ケース
標準ケースとOPEC増産ケースの石炭需要量はほとんど差がないので、標準ケースのみ図示した。

図-4 自由世界原油、石炭需要量



— 標準ケース, OPEC増産ケース
 図-5 原油価格, 石炭価格

度でゆるやかに増加し、2000年には16億トンに達する。一方原油価格は1990年ごろまでは横ばいないし若干上昇するが、それ以降はOPECが生産量の回復とともに増産のペースを低下させるので、年率4.5%程度で上昇し、2000年には50ドル/bblになる(1984年実績は29ドル/bbl)。石炭価格(アメリカ港湾におけるFOB価格)も原油価格の上昇に対応して上昇するがその上昇率は原油価格のそれよりも低く、2000年には69ドル/トンになる(1984年実績は46ドル/トン)。

次に標準ケースの結果と、OPECが原油生産を増加させるOPEC増産ケースの結果を比較しよう。図-5に示すようにOPEC増産ケースにおいては原油価格は、標準ケースに比べて1990年に8.1ドル、95年に10.9ドル、2000年に10.2ドルと大幅に低下し、2000年には40ドル/bblとなり、標準ケースの価格を20%下まわることになる。OPEC増産ケースの原油価格は90年ごろまでは低下するが、その後上昇に転じ90年代後半には年率7%という標準ケースのそれを上まわる上昇率を示す。一方石炭価格の低下は原油価格のそれよりも小さく、1990年に標準ケースに比べて4.4ドル、95年に5.6ドル、2000年に4.6ドルの低下にとどまり、2000年

の64.1ドル/トンは標準ケースの68.7ドル/トンの7%低下となる。

標準ケースとOPEC増産ケースの、自由世界の原油と石炭総需要量を比較するとOPEC増産ケースの原油需要量は90年には1.5億トン、95年には1.4億トン、2000年に1.0億トン増加する。原油価格と原油需要の、2つのケース間の変化率の比(原油需要変化率/原油価格変化率)をとると、90年に0.18、95年に0.16、2000年に0.15となる。原油価格の低下による原油需要増大効果は非常に小さいことが分る。一方石炭需要は、石炭価格の低下にかかわらず2つのケースではほとんど変化がない。これは石炭価格の低下による需要増大効果と原油価格のより大幅な低下による石炭から石油への需要シフト効果がほぼ均衡したことによると解釈できる。

原油価格の低下と原油需要の増大は、原油供給の地域的配分にも影響を及ぼす。図-6に示すように標準ケースに比べてOPEC増産ケースでは、OPECの原油供給量は90年に石炭換算2.3億トン、95年に2.3億トン、2000年に1.6億トン増加する。一方原油価格の低下は非OPECの原油供給を減少させる。OEC D 7か国の原油供給量は、90年に0.6億トン、95年に0.6億トン、2000年に0.4億トン減少し、その他諸国の原油供給量もそれぞれ0.2億トン、0.3億トン、0.2億トン減少する。すなわち、OPECの原油供給量の増加は、その約1/3に相当する量だけ他の地域の原油供給量を減少させることになるのである。つまり原油価格の低下はOPEC原油供給が自由世界全体の原油供給量に占める比率を上昇させる。この比率は1985年には50%弱であるが、2000年においては標準ケースでは56%に上昇する。さらにOPEC増産ケースでは58%と第2次石油危機以前の水準に近いところまで回復するのである。

OPECが増産し原油価格が低下することによる主な効果は次のようなものであろう。OPEC全体としては原油価格の低下によって原油需要を増加させても、原油輸出収入は増加しない。たとえば2000年時点でOPECが原油供給量を8%増加させるためには原油価格を20%引き下げなければならない。一方、原油価格の低下は、非OPEC原油供給を減少させOPEC原油供給の比重を上昇させることになる。さらに石炭価格低下によって石油代替エネルギーとしての石炭需要の増加を抑制することになる。また原子力発電など非化石燃料エネルギーの開発を減速させるという影響も現れよう。

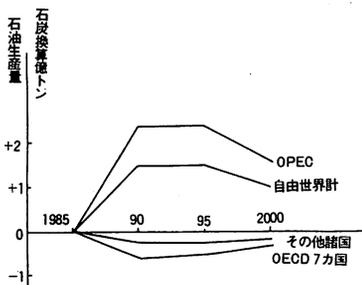


図-6 石油生産、標準ケースとOPEC増産ケースの差

2.2 原子力発電量が化石燃料の需給に及ぼす影響

原子力発電は1970年代に入って急速に増大した。自由世界全体の原子力発電量は1970年には800億kWhであったものが1980には6,300億kWhに達した。OECD 7か国について、原子力発電量の総発電量に占める比率を見ると1970年の1.5%から1980年には12%にまで上昇した。発電部門において原子力発電はすでに主要なエネルギー源の1つとなっている。

世界全体の一次エネルギー総供給量に占める原子力発電の比重は現在3%程度（一次エネルギー換算）になっており、原子力開発が今後どのように行われていくかは、世界の化石燃料の需給に対して無視できない影響を及ぼすであろう。

そこでOECD 7か国の原子力開発のペースに3つのケースを設定してモデルを解き、この問題を検討した。標準ケースは、2.1における標準ケースをそのまま用い、1986年以降の原子力発電量の伸び率を各国別に1.5倍とした場合を開発促進ケース、0.5倍としたものを開発停滞ケースとした（表2）。

表2 シミュレーション各ケースの原子の発電量 (OECD 7か国計)

	2000年 設備容量	1984~2000年 年平均伸び率
	百万kW	%
標準ケース	324.8	4.4
開発促進ケース	442.0	6.5
開発停滞ケース	221.7	2.0

(1984年末 162.6百万kW)

稼働率を1982年の水準に固定して2000年までの発電量を算出した。

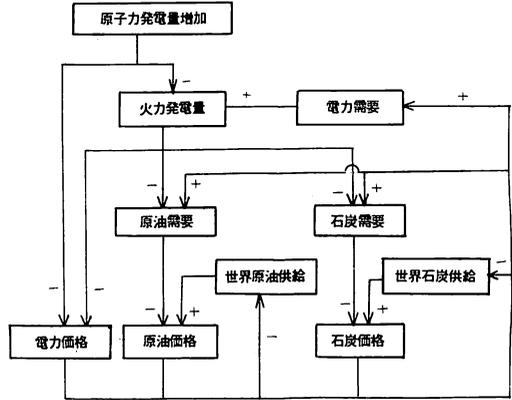
原子力発電は電力部門において化石燃料と直接に代替し、化石燃料の需要に影響を及ぼす、このモデルでは、原子力発電量の増減は図-7に示すような因果関係を通じて世界のエネルギー需給と価格に影響を及ぼす。

原子力発電量の増加は、まず火力発電量の減少をもたらす電力部門の化石燃料消費量を減少させる。モデルでは、電力価格は次の関数によって決定される。

$$PEL = f(PEEL, ELT/DEL, PG)$$

ここで PEL; 電力価格, PEEL; 電力部門燃料価格, ELT; 火力発電量, DEL; 総発電量, PG; 国内一般物価である。

この関数において、電力価格は化石燃料価格、総発電量に占める火力発電量（総発電量-原子力・水力発電量）の比率および国内一般物価によって説明される。



図中の+ は増加（上昇）、- は減少（低下）を示す。

図-7 原子力発電量のエネルギー需給、価格への影響

この式は、原子力発電量が化石燃料コストとのある種の均衡コストの下で決定されることを意味している。そしてこの式のELT/DELのパラメータはマイナスに推定されており、原子力発電量の増加が電力価格を低下させるという経験的な関係がこの式によって示されている。

次に電力部門は化石燃料消費の燃料種類別（石油、石炭、天然ガス）の内訳を、各燃料別価格に関して発電コスト最小化を仮定した関数によって決定する。

上の式から原子力発電量の増加は電力価格を低下させるが、電力価格の低下は最終消費段階で電力以外のエネルギーから電力への需要のシフトをもたらす。こうして、原子力発電量の増加は、直接、間接に化石燃料の需要量を減少させ、その価格を低下させる効果を持つ。

一方、価格の低下は逆に需要を増加させる効果も持つ。こうして各エネルギーの価格は、各エネルギーの需給が均衡する点で定まる。

以下に、2000年における各ケースの推計値によって原子力発電量の増減が化石燃料の需給と価格にどのような影響を及ぼすかを見よう。

図-8、表3にOECD 7か国の原子力発電量と、電力部門および一国全体の化石燃料消費量との関係を示す。2000年には、標準ケースの原子力発電量は石炭換算6.1億トンであり、総発電量から原子力、水力発電量を差し引いた火力発電量は石炭換算11.9億トン（発電効率35.1%で一次エネルギー換算）となる。そしてこの電力量を発電することによって消費される化石燃料は11.0億トンとなる。原子力発電量が標準ケースの1.5倍のペースで行われる開発促進ケースでは原子力

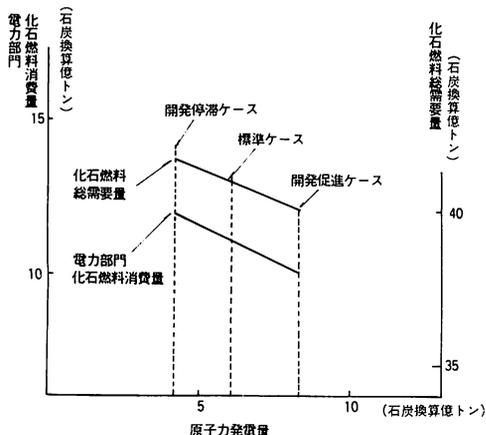


図-8 原子力発電量と電力部門化石燃料消費量，化石燃料総需要量との関係（OECD7か国）

表3 原子力開発規模のエネルギー需要に及ぼす影響（2000年）
OECD7か国合計，石炭換算100万トン

	原発 子電 力量	標と 準 ケの ス差	電燃料 部門消 費石量	標と 準 ケの ス差	化総 石需 燃要 料量	標と 準 ケの ス差
標準ケース	607.5		1104.5		4103.8	
開発促進 ケース	826.8	+219.3	1007.9	-96.6	4031.4	-72.4
開発停滞 ケース	414.6	-192.9	1200.0	+95.5	4175.0	+71.2

発電量は2.2億トン増加する。しかし、原子力の増加に伴う電力価格の低下によって電力需要（発電量）が増加するので、火力発電量の減少は原子力発電量の増加よりも小さくなり、化石燃料の消費量は1.0億トンの減少にとどまる。

さらに化石燃料の総需要量の減少はこれよりも小さくなる。標準ケースに比べて開発促進ケースでは化石燃料消費量は0.7億トン減少する。

原子力発電量の増加は、エネルギー価格全般を低下させエネルギーの最終消費量を増加させる。さらにエネルギー価格の低下は実質国内総生産を増加させることによってもエネルギー需要を増加させる。したがって原子力発電量の増加が一国全体の化石燃料需要量を減少させる効果は電力部門での直接的な効果よりも小さくなる。

次にエネルギー種類の需要量の増減を表4に示す。原子力、水力を含めた総エネルギー需要量は1.5億トン

表4 原子力発電量の増加にともなう一次エネルギー需要量の変化（2000年）
OECD7か国計，石炭換算100万トン

	標準ケース①	開発促進ケース②	②-①
石油	1865.3	1852.3	-13.0
石炭	1102.7	1053.8	-48.9
天然ガス	1135.8	1125.3	-10.5
化石燃料計	4103.8	4031.4	-72.4
原子力	607.5	826.8	+219.3
水力	346.9	346.9	0.0
計	5058.4	5205.1	+146.7

増加するが、化石燃料消費量は0.7億トン減少する。そして、その内訳は、石炭が0.5億トンと最も大きく天然ガスと石油がそれぞれ0.1億トンとなっている。

化石燃料需要のこのような変化によって、化石燃料価格はどのような影響を受けるであろうか。図-9は、

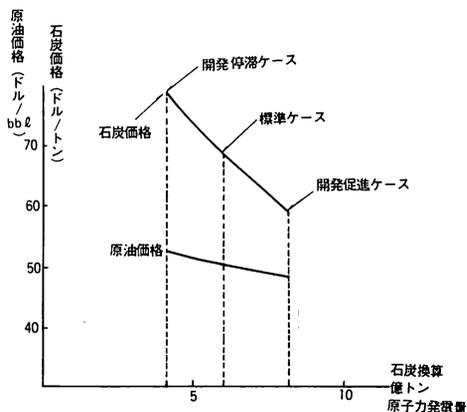


図-9 原子力発電量と化石燃料価格との関係(2000年)

OECD7か国の原子力発電量と石油、石炭の国際価格との関係を示したものである。標準ケースでは2000年における原油価格は50.2ドル/bbl、石炭価格は68.7ドル/トンである。原子力の開発促進ケースにおいては、原子力発電量が石炭換算3.1億トン増加するが、その結果原油価格は48.1ドル、石炭価格は59.0ドルとなり、標準ケースに比べて原油価格は4%、石炭価格は14%低下する。

原子力発電が電力部門で直接代替するのはおもに石炭であること、最終消費の段階では石炭需要は価格が低下してもあまり変化しないこと、などの理由から、原子力発電量の増加は石炭の需要をより多く減少させ、その価格を大幅に低下させる。一方、石油については電力部門では原子力による直接の代替および、最終消費段階では電力価格の低下という需要減少要因はある

が、エネルギー価格全般の低下にともなう実質国内総生産の増加による需要増加効果が大きいので、石炭に比べて石油需要の減少率は低く、価格低下率も低くなっている。

3. む す び

本稿は、電力中央研究所において佐和隆光京都大学教授、久保雄志筑波大学講師、中村二朗武蔵大学講師と筆者が共同で行って来た「世界エネルギー需給モデル」の構築とそれを用いた分析の結果を筆者がまとめたものである。また本稿執筆の過程で電力中央研究所

経済研究所の矢島昭所長、内田光穂次長から貴重な助言をいただいた。以上の方々に感謝の意を表します。ただし本文中のありうべき誤りは筆者のものである。

注

- 1) モデルの詳細については、電力中央研究所、研究報告「世界エネルギー需給モデルⅠモデルの構成」60年8月を参照されたい。関連報告書として、電力中央研究所研究報告、「国際石油市場の構造分析」59年5月、同、「国際石油市場のモデル分析第Ⅰ編～第Ⅳ編」56年3月～58年10月がある。

話 の 泉

超 微 粒 子 化 技 術 (その2)

(注) P. 43の続き

これらの新技術によって生成した微粒子はその性質から互の衝突などによって凝集、連鎖などいわゆるクラスターの状態となる傾向が強く、これを防ぐために新しく開発された方法として、衝突前に吸出すことによる急冷のため個々の粒子のまゝ取出すか、若し必要ならばその状態において高分子その他の薄い膜によって粒子の表面をコーティングすることによって安定な極微粒子が生産される。

別の情報によれば水素プラズマ中で nm オーダの F_2 、 TiO_2 の製造が高效率でなされる技術も開発されているらしい。

極微粒子は普通の微粒子とは材質的には同じとし、表面に存在する分子(活性化している)のミックスとしては別の分野が開拓されよう。その

理由は粒子が微細化するに従って比表面積が増加し、表面に存在する3分子(活性化している)の比率がそれだけ増加し、極限においては分子は全部表面分子となり化学的に極めて不安定な物質となるが、現実にはその途中における或程度の活性化による反応性或は触媒作用など新規機能性物質としての新しい活躍の場が開かれるものと思われる。

超微粒子化技術においてその蔭の力となるものは、超微粒子の大きさとその分布の測定技術で。その方法としてはセンサー、レーザー、電子顕微鏡、コンピュータなどの組み合わせによって粒子の形、表面構造などと相俟って先端粉体工学として新しい技術分野が開けるかも知れない。

(F)