

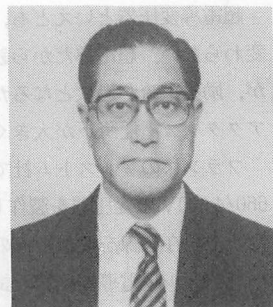
■ 展 望・解 説 ■

化石燃料資源の評価と将来展望

Appraisal of and Outlook on Fossil Fuel Resources

津 村 光 信*

Akinobu Tsumura



化石燃料資源とは

人類が1年間に10億トン以上消費している物資というと石炭・石油・天然ガスの3品目で、この3品目はすべて主としてエネルギー源として消費されている化石燃料である。1985年に石炭が33億トン(カロリー換算で石油22億トン相当)、石油が28億トン、天然ガスが11億トン(15兆 m^3 、石油換算で14億トン相当)生産・消費されたが、この3種の燃料の燃焼エネルギーは、1985年に世界中で消費された総エネルギーの88%を占めている。このほかのエネルギーのうち水力・風力・薪炭は循環エネルギーである。地熱はまだ資源として量的に把握されるに至っていない。原子力の源のウラン235は地下資源ではあるが、増殖炉や核燃料サイクルなど全く別種の専門的議論があり、本稿では扱わない。

本稿で扱う化石燃料資源はいずれも、泥や砂が水底に堆積する時に混入した生物の遺骸が、長い地質的時間にわたって還元環境の中で圧密加熱を受けて生成された地下資源であるが、石炭と石油・天然ガスとではその鉱床のあり方が全く異なるので、埋蔵量の確認・推定の仕方とも全く異なる。

石油と天然ガスは、発生した一連の炭化水素のうちの炭素数が1のメタンを主として軽質ガス体のものが天然ガスで、石油鉱床中には必ずガスが溶存している。天然ガス鉱床にはガスだけのものからガスにNatural Gas Liquid=NGLと言われる軽質の油を溶存しているものまである。NGLの資源量を掲揚している国もあり、無視している国もあり、信頼できる世界的統計はないが、その量は石油や天然ガスに比して1桁小さいので、石油資源量の誤差に埋没すると見るか、その1割プラスと見るかである。

地下にある原油が重質で流動性に乏しく、加熱して流動させないと採取できないようなものはヘビオイル

ないしビチューメン(オイルサンド油)と言われ従来採取対象資源とされていなかった。また石油生成一歩手前のケロジェンを含み加熱乾留すると石油を発生するオイルシェールもある。これらは非在来型の炭化水素資源として将来の採取可能性が関心を持たれ、一部で稼行も始まっている。

埋蔵量は充分の石炭

石炭鉱床は、陸水生の水成岩中で形成されているため、石油に比べると相対的に地下浅所に存在する場合が多く、地表で露頭が見られることもまれではない。そして鉱床そのものがひとつの地層をなしていることから、その一端を地表または地下浅所で確認すれば、あとは地質情報を手掛かりにかなり広い範囲にわたってその賦存を推測し鉱量を計算することが可能である。このため、先行調査によって地下に存在することが探知・推測されている資源量は莫大であり、これを地質資源量(geological resources)という。

一方石炭は、圧密・変成の程度により挟雑物や水分を多く残存し発熱量の低いものも多く、また固体鉱物であるため、人力または機械力を鉱床内にまで持ち込んで採掘しなければならず、地下深くなると採掘の困難性が大きくなるし、またそうでなくても炭層の厚さが薄い場合には採掘が経済的でない。このために実際に経済的に採掘が可能と考えられる量(可採埋蔵量)は存在が知られている量の一部でしかない。

石炭資源量の調査は各国においてかなり昔から継続的に行われてきたが、地質資源量についても、地下のどの深度までをとりあげるか各国まちまちであり、また可採埋蔵量の評価については深度ならびに、炭層

(脚注)

[換算率] 標準石炭1トン = 7×10^6 kcal = 石油0.7トン; 石油1トン = 7.4バーレル = 10×10^6 kcal = 石炭1.4トン; 天然ガス1,000 m^3 = 35.3立方フット = 9×10^6 kcal = 石油0.9トン; 天然ガス6,000立方フット = 石油1バーレル。

* 石油公団理事

〒100 東京都千代田区幸町2-2-2

表1 世界の石炭資源量 (WEC1977)
(標準炭換算: 億トン)

国	地質資源量		可採埋蔵量	
	石炭	褐炭	石炭	褐炭
ソ連	39,930	8,670	829	270
アメリカ	11,900	13,804	1,132	644
中国	14,247	134	989	n. a.
その他	11,171	1,396	1,975	525
世界計	77,248	24,004	4,925	1,439
	101,253		6,364	

厚のどこまでを商業的可採とするかもまちまちであった。

1970年代になって世界エネルギー会議 (WEC) が一定の定義の下に世界の石炭資源量および可採埋蔵量を集計する努力を数年にわたり行った。その結果として1978年の世界エネルギー会議に報告されたものの要約が表1である。WECが設定した定義においては、品質に関しては、発熱量5,700k cal/kg以上のものを石炭 (Hard Coal) とし、それ以下のものを褐炭 (Brown Coal) と分類されている。後者には泥炭 (Lignite) と呼ばれる低品位炭も含まれる。地質的資源量に関しては、石炭については深度2,000mまで、褐炭については深度1,500mまでに存在する資源量とし、炭層厚については特に下限を設けないこととされている。可採埋蔵量に関しては、石炭については深度1,500mまでに存在する炭層厚60cm以上のもの、褐炭については深度600mまでに存在する炭層厚2m以上のものと定義されている。なお表1の資源量および可採埋蔵量は、産地ごとに品位の異なる石炭・褐炭をいずれも7,000k cal/kgに換算した標準炭量として表したものである。

表1に見られるように、石炭と褐炭とを合わせた地質的資源量は10兆トンと龐大であるのに対して、可採埋蔵量は6,400億トンと、資源量のわずか6%程度である。それにしてもこの量は現在の年産量の約190年分であり、石炭の将来については埋蔵量が制約条件となると考える必要はない。むしろ石炭は、石油危機後の石油の他種エネルギーによる代替の中でも、その単価は安いにもかかわらず発電用と一部の大量燃料使用産業用にしか使われなかったのに象徴されているように、その利用・輸送における取扱い上の利便や環境問題など、その燃料としての質から需要面で制約されることの方が問題である。

ようやく峠が見えてきた石油資源

石油鉱床は一般に石炭鉱床よりも深部にあり、井戸を掘り当ててその存在を知り、井戸を通して採取する以外にない。その産出は石油が地層水とともに保留されている地層孔隙内の流体のもつ物理的エネルギーにより押し出されるのであって、井戸からの産出によってその地層内流体の圧力が抜け、また油に溶存していたガスが抜けてしまうともはや産出して来ず、その時点で孔隙中には油が多くとり残されている。したがって地下の鉱床内に存在すると計算される量 (原始埋蔵量 = Oil-in-Place) に対して地上に採り出すことができる量 (可採埋蔵量 = Recoverable Reserves) は一部にすぎない。その比率は可採率 (Recovery Factor) と称される。石油鉱床は、流体である石油が地層内を流動してきて貯留するので、その形成にはいくつもの要件がすべて満たされている場合に限るので、石炭のように一端が知れると広域の賦存が推算されるというわけにはいかない。そしてその存在も賦存範囲も井戸を掘って確かめないとわからないので、石炭のように国家機関等による先行的な調査によって全国土にわたって資源量が既知になるという事情にはない。このため石油の埋蔵量は年々の生産によって減少する一方、年々の試掘による新しい発見によって増え、毎年変化するものである。

これでは「石油資源はいったいどれだけあるのか?」という情報を得たことにはならない。そこで現に見つかったもののみでなく未発見のものも含めて、地質的地域 (堆積盆地) ごとに、その地域内には究極的にどれだけの石油資源が賦存していると考えられるかについて、地質学者達がマクロ的な手法で考究した結果が時々発表される。これは究極資源量 (Ultimate Resources) と称され、まだ発見されていない鉱床の資源量をも含んでいる点で石炭の場合の地質資源量とは異なる概念である。なお一般に発表される埋蔵量や資源量はすべて可採率のかかった可採量で表示されている。各国の石油埋蔵量については公表していない国も多い。このため毎年末の全世界の石油確認埋蔵量を調査集計して発表しているのは2大石油雑誌、Oil and Gas Journal (OGJ) 誌と World Oil 誌である。両誌の数値は毎年10%前後の差があり、また年によって誤まりがあり後年に修正されることもよくあり、決して權威ある正確なものとは言えないが、長年にわたり毎年継続的に発表されているのでよく引用されるとともに、推移を知るにはよい。

OGJ 誌によれば1985年末の世界の石油確認埋蔵量

表2 石油の可採資源量 (WPC1987) (1984年末現在)

地 域	累 産 量	既知埋蔵量	既 発 見 量	未 発 見 量			究極資源量
				小	中間値	大	
北 米	159.1	83.4	242.5	55.7	90.4	197.1	332.9
ソ 連	85.7	81.0	166.7	46.0	77.0	187.0	247.2
中 東	142.3	420.9	563.1	62.0	98.0	199.0	661.1
そ の 他	136.9	209.9	346.8	98.7	159.6	342.9	502.8
世 界 計	524.0	795.2	1319.1	262	425	926	1744

(注) 世界計には南極(未発見のみ)を含む。

の推定値は7,000億バレル(約950億トン)であって、同年の生産量203億バレル(約27.5億トン)の34.5年分に当る。

この34.5年分という数字はよく引合いに出されるが、同時によく誤解される。「10年前にも20年前にもあと30年と言われていた。石油屋の言うことは信用できない」とよく言われるがこれは誤解である。上述のように、石油の確認埋蔵量は年々新たに発見されるのであるから、ある時点での確認埋蔵量が資源の残量を意味するものではないのである。それでは「未発見量」をも含めた資源量はどのように見られているのか。最近(1987年)の世界石油会議(WPC)における報告によれば表2のようである。

表2を見て気がつくのは、未発見量についての見解には大きな幅があることである。また表2に示されている1984年末の既知埋蔵量(Identified Reserves)は、上述したOGJ誌による確認埋蔵量(Proved Reserves)よりかなり大きい。これは、WPCで発表される埋蔵量は、石油地質専門家集団が、個々の既発見油田について、未確認部分までを含めて全体像を推定し、それらを集計したもので、いわゆる「確認プラス推定(P+P)」の埋蔵量であることと、それらの個々の油田のP+P埋蔵量の全量を、その油田を最初に発見した年の発見量として計上しているからである。

このような方法論は大きな油田が何時発見されたかを忠実に示しているので一応もつとも思われるが、現実にはひとつの油田の埋蔵量は、発見後数年間にわたって掘さく井数が増えるにつれて増大していく中で当初の推定値は最終的には拡大修正されることが多いので、どうしても最近年の発見油田ほど過小評価されているという弊がある。これに対してOGJの方はひとつの油田の埋蔵量は油田発見年には小さく、年とともに井戸数が増えて確認範囲が広がるにつれてその年の確認量がその年の発見量として計上するというやり方なので、図-1の左半部のように、WPCの値に対し

てあと追いつめるようになるが、行きつく先は同じである。

いずれの方法にしる、年々の発見が累積されて行きつく先である「究極資源量」については、1940年代以来、多くの専門家や機関が見解を発表してきたが、1950年代から60年代にかけては中東・北アフリカ・西シベリア等で未曾有の巨大油田の発見があいつぎ、また石油開発が海域にまで拡大されることになった影響で、究極可採資源量についての見方も大きく拡大されたが、70年代から80年代にかけてはほとんど横這いとなり、どうやら1.7~2.1兆バレルという範囲を指向して収斂しつつあるように思われる。

この数値は可採量であるので、当然、将来の技術進歩による究極的な可採率の向上をどう見るかという問題がある。表2の第12回WPCの報告では新技術(Enhanced Oil Recovery (EOR)=増進回収法)による平均究極可採率の向上は定量的な評定が不可能として現状の加重平均可採率34%をそのまま用いて最確値1.7兆バレルとしているのに対して、第10回世界エネルギー会議(1977年)で27機関のアンケート結果として発表された最確値2.2兆バレルの場合は究極可採率の見方は平均40%となっている。この問題は「経済的可採性」の範囲、ないしは石油資源と非在来型炭化水素との境界に関係する。

いずれにしても、1986年末までの累産量0.54兆バレルに、確認埋蔵量0.7兆バレルあるいは確認プ

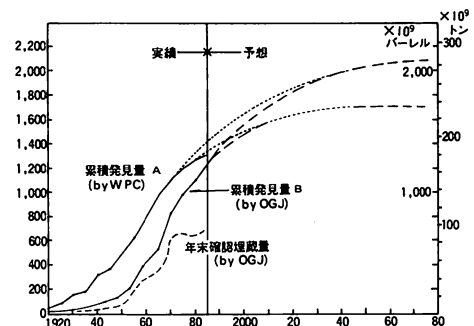


図-1 世界の石油資源発見量の推移

ス推定埋蔵量0.8兆バレルを加えて1.24兆ないし1.34兆バレルが既発見という現実の上に残る未発見量可採資源量は0.4ないし0.8兆バレルとの見方が定着しつつあることは、近年、新巨大油田発見の傾向がひと頃ほどでなくなり、確認埋蔵量も伸びが止まってきたことと符合しており、石油資源もようやく峠が見えてきたと言えよう。具体的には、最近の年産量200億バレルを梃にして測ると確認埋蔵量は約35年分で、これに未発見量を加えた推定究極残存可採量は60~80年分ということである。

上り坂にある天然ガス資源

先述したように天然ガスは、その生成においても鉱床のあり方においても石油と同類であるので、その埋蔵量や資源量の評価の方法もほぼ同様である。ただしガスは原油に比してはるかに流動性が高いので可採率は高く70%以上を見込むことができる。

一方、ガスは一般に貯蔵ができず、パイプラインによらねば輸送できないために、地域によっては、油井から原油に伴って産出されるガス (Associated Gas) は有効に利用されずに大気中に放散焼却されているという状況のために、国によっては天然ガスの埋蔵量の集計に、油層内に溶存しているガスは含めず、ガス田の埋蔵量だけを計上している国もある。このような状況の下で、天然ガスについても、World Oil 誌と Oil and Gas Journal 誌が毎年末の世界の確認埋蔵量を発表しており、また4年に1度の世界石油会議においては、確認プラス推定埋蔵量と究極可採資源量に関する報文が発表される。(表3)

これまで各機関や専門家が発表してきた究極可採資源量についての見解は石油の場合以上に振れ幅が大きいが最近の傾向では260~330兆 m^3 の範囲を指向しているように見える。これは石油換算1.6~2.1兆バレルに当る。すなわち天然ガスは究極可採量において石油とはほぼ同水準の資源と考えられている。

これに対して毎年末までの累積発見量 (累産量+年

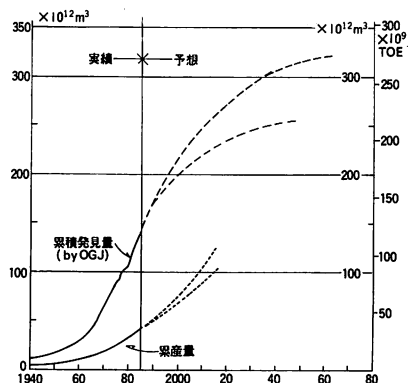


図-2 世界の天然ガス発見量の推移

末確認埋蔵量)の推移は図-2の左半部のように、1985年末の既発見量は究極可採量推定値の40~50%程度で、石油の場合の60~70%に比べて低く、現実に最近も新埋蔵発見の傾向に衰えは見られない。また既発見量のうち既産出量も29%で、石油の場合の44%に比べて低く、確認埋蔵量は年産量の56年分もある。これらのことは、天然ガスの開発利用が石油に比べておくれられており、今後の拡大の余地が大きいことを示している。

巨大だが経済可採量は不明の非在来型石油資源

非在来型石油資源とは、従来は商業開発の対象とされていないが、技術の進歩と価格の上昇とで将来開発される可能性が考えられる資源とされているが、そのうちヘビオイル (重質原油)の中にはすでに採取が行われており、在来の石油資源 (表2)の中に含まれているものもある。

世界石油会議においては、油の比重が10°ないし20°APIのものはヘビオイル、10°以下は超 (エキストラ)ヘビオイル、そのうち常温での粘度が10,000 cp 以上のものをピチューメンと定義して扱っている。ピチューメンを含有する砂層がオイルサンドまたはタールサンドと言われるものである。第12回世界石油会議 (1987年)で報告された非在来型石油資源に関する調査結果は、表4、表5のようである。いずれも、技術的可採率は

表3 世界の天然ガス資源量 (WPC1987) (1984年末現在) (単位:兆立方メートル)

地域	累産量	既知埋蔵量	既発見量	未発見量			究極資源量
				小	中間値	大	
北米	707.9	494.1	1202.0	447.7	696.8	1364.0	1898.8
ソ連	234.0	1284.1	1518.1	839.5	1373.1	2567.6	2891.2
中東	23.1	1186.9	1210.0	645.0	939.0	1856.0	2149.0
その他	208.1	942.9	1151.0	718.2	1190.5	2803.2	2341.5
世界計	1173.1	3908.0	5081.1	2650.4	4199.4	8590.8	9280.5

表4 ヘビオイル/超ヘビオイル/ビチューメン可採量⁽¹⁾④ヘビオイル/超ヘビオイル⁽²⁾

(10億バレル)

⑥ビチューメン⁽³⁾

国	累産量	既知埋蔵量	既発見量	未発見量	究極資源量	国	既発見量
ベネズエラ	(3.9)	285.1	289.0	22.5	311.5	カナダ	308
ソ連	(5.2)	108.7	113.9	20.9	134.8	ソ連	117
その他	(25.2)	82.3	107.7	51.4	159.1	その他	11
世界計	34.3 (34)	476.1 (209)	510.6 (243)	94.8 (95)	605.4 (338)	世界計	436

(注) (1)原子鉱量に技術的可採率を乗じた量。(2)はヘビオイル量で内数、ヘビオイルは比重10°~20°API、超ヘビオイルは比重10°API以上。(3)粘度10,000 cp以上。

表5 シェールオイル資源量(10億バレル)

地域	既知鉱量
北米 ²⁾	2,200
南米 ³⁾	800
欧州	76
アフリカ	100
アジア・太平洋	105
世界計	3,281

(注) (1)出典：第12回世界石油会議(原典はDuncun & Swamson 1965) (2)主としてアメリカ、(3)主としてブラジル、(4)原典以後の主な追加情報として次がある。ソ連500、オーストラリア17、中国40、モロッコ30(×10⁹バレル)

考慮した可採資源量として表示してあるので、よく言われる原始鉱量よりもよほど小さくなっている。

従来から開発採取されている原油の中にも20°APIより重い重質油があるので、表4④のうちのヘビオイルの累産量343億バレルならびにこれを含め既発見量のうちの660億バレルは表2の通常石油資源と重複している。ほぼこの量が現時点で商業可採量と考えられている量である。

表4の既発見量ならびに究極可採資源量の約半分を占めているのはベネズエラのオリノコ地区である。その一部はヘビオイルに属し、一部で蒸気注入法による採取も行われ、60億バレルは商業可採量として確認されているが、大部分は超ヘビオイルに属し、重金属等の不純物含量も多い。これの開発採取が将来どのような規模で実現するのかはまだ不明である。

オリノコと双壁をなす巨大鉱床がカナダのビチューメン(オイルサンド油)資源で、表4⑥で世界の既知ビチューメンの7割を占めている。これはアルバータ州の4カ所の巨大鉱床に分布しているが、そのうち250フィートよりも浅い部分では露天掘りで砂ごと採掘して熱湯で油を分離する方法がとれ、この方法での有効油回収率は80%であり、現在20万バレル/日を超す採取が行われている。深い部分ではヘビオイルと同様、

井戸によって蒸気注入法などの加熱回収法によるほかに、その可採率は15~20%で、また650フィート以上深いことが条件となる。これについては現在2カ所で計8万バレル/日が稼行されているほか、数十カ所で実験が行われているが、その可採性は場所によって異なる油の粘度に大きく左右されるので、表4⑥の技術可採資源量のうちどれだけが果して商業可採量となるのかは、まだ不明である。

オイルシェールは乾留するとケロジェンから油が生成される。実験室で測定される原石トン当り油生成量(F/A値)に対して実用プラントでの回収率は70~90%であるが、F/A値はそれぞれの鉱床の原鉱石に固有の値であり、シェールオイル採取事業の経済性は原鉱石のF/A値によって大きく左右されるのは明らかである。現在中国およびソ連で旧式小規模の乾留装置が稼働している以外、大規模高性能の乾留プロセスはなお実験段階で、シェールオイル回収事業の経済性はまだ確立されていないが、一応F/A値が25ガロン/トン以上で深度300フィート以浅に2~3フィート以上の厚さのあるシェール層および10~25ガロン/トンで露天掘り可能な深度で25フィート以上の厚さのあるシェールという基準で調査した資源量は表5のようであるという。米国コロラドを筆頭に巨大な量があるが、このうちどれだけが商業的可採量となるのかは今のところ不明である。

価格論ぬきの資源論は誤解のもと

上述したように、石炭についてはまず資源制約は考える必要がないことからするとエネルギー資源量問題は石油の問題である。事実、エネルギー資源論はオイルショック以来真剣に議論されるようになった。

オイルショック以来の油高騰で石炭は相対的に安いエネルギーとなり、その消費はたしかに増えたが、現実には石炭に置き換わったのは発電燃料と鉄鋼・セメント等一部の産業用の重油だけで、大部分の工場の燃料

は石炭に換わりはせず、石油消費の減退は83年をもって底を打ち、わずかながらふたたび増えはじめた。原子力や水力は発電以外には使えず、石炭も一般の工場燃料に使うにも無理があるし、発電用も環境上制約される。発電の原子力依存は今後強まるだろうが発電用燃料はOECD地域ではすでに石油の8%程度にまで減少している。最終エネルギー需要の中の電力のシェアは今後も増大し続けるであろうが、約半分が輸送・交通用、40%強が産業・民生用に使われている石油製品の需要はわずかながらも増えていくと見られている。

他の化石燃料のうち、現在の油価水準と技術とで石油需要を代替できるのは天然ガスだけである。ただしもちろん輸送・交通用燃料としての代替は当面ほとんど期待できない。現在、世界の天然ガス消費は総エネルギーの約20%で、最近10数年そのシェアは変っていないが、これは米国の天然ガス生産が減退し、かつて34%のシェアであったのが25%にまで落ちたからであって、それ以外の地域では急速に増大中である。この面ではエネルギーの10%分しか天然ガスを導入していないわが国の今後の責任は大きい。

最近の世界の各機関によるエネルギー需給長期見通しにおいては天然ガスの供給増を一応見込んだ上でもなお石油消費はわずかながら増え続けると見られている。かりに横這いと見ると、推定されている究極可採量約2兆バレルから既産出量を差引いた1.4兆バレルは約67年分ということであるが、流体力学的に産出する石油は図-3のように2020年頃から減退していくことになる。現在研究開発中のEORによる究極増量については0.1兆とか0.2兆とか極端には0.8兆という見方もあるが、2兆バレルにはEORによる増量分も一応見込まれており、極端な量を見込んでその戦力化は油価次第で、後述の非在来型石油資源の話と同じことになってくる。

在来型の石油資源の採取コストが1ドル/バレル以下から20ドルくらいまで混在しているのと同様に、EORのコストも15ドルくらいから40ドルくらいまでの

幅がある。同じように、在来石油が枯渇してもヘビオイルやビチューメンやシェールオイルの巨大資源があるさ、と言って見ても、そのコストはヘビオイルやビチューメンで10数ドル/バレルから大部分は20ドル以上、上の方は40ドル、50ドルあるいはそれ以上、シェールオイルは30ドル前後から上は60ドルあるいはそれ以上といったような具合である。

コストの高い蒸気注入によるビチューメンの採取やオイルシェールの乾留などの実用化の目途を得るまでにはパイロットからデモンストレーションまで10年といった長いリードタイムと巨額の開発投資が必要であるが、1986年以降の油価低落につれて米国のオイルシェール実験プロジェクトは軒並み中止となってしまった。こうして見ると非在来型炭化水素資源はその物理的資源量ではなく、油価の推移との関係でどれだけの量が戦列に加われるかが問題となるのである。

そこで油価の推移が円滑に行くかどうかだが、問題はコストの安い在来石油資源がきわめて偏在しており、究極残存量の6割近くがOPEC地域に集中していることである。現在は過去数年の油価の変調の結果生じた買手市場の下で元来資源量の少ない高コストの非OPECがフル生産をし、低コストのOPECの生産が抑制されているという逆調にあり、これが当分続くと考えられているが、その結果2000年の時点では究極残存資源のOPEC偏在度はいっそう高まると考えられる。

低コストの資源を大量に持つOPECと、高コストの非在来資源を大量に持ち、その戦力化を期待する消費国との間で油価について何等かの合意なしに市場まかせで果して油価は安定円滑に推移するものであろうか。

(後記) OGJ誌の87年末号は、同年末の世界の確認埋蔵量を前年末よりも一挙に27%増やし、8873億バレルとした。前述したようにOGJ誌の発表する埋蔵量は時に誤りもあり後年訂正もあり必ずしも正確ではないのだが、今回はOPEC諸国のうちイラン・イラク・UAE・ベネズエラの4国が格段に埋蔵量を増やしたことによる。これはOPEC内の生産割当を有利にするためと解されている。これらの国ではこの1年間に新たに大きな発見があったとの報道はない。ベネズエラの場合はオリノコへのヘビオイルの一部を石油埋蔵量に繰り入れたものであり、他の3国も推定・予想量(究極量の内数)を確認に繰り入れた形であり、上記本文の結論を変えるものではない。

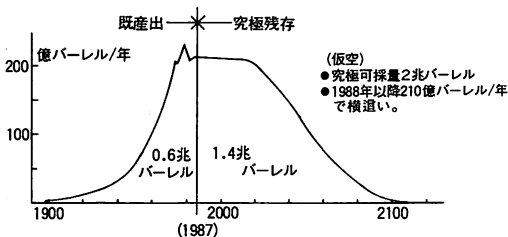


図-3 超長期石油生産推移(実績と試算)