

石油涸渇と21世紀

- 石油資源の涸渇の時期の算定に係わる

不確定要因とアルゴリズム -

元林 義昌

Will Petroleum Resources Exhausted
in the Comming Century

- A Guide for Building the Forecast Model and the Algorism in
Estimating the Life Span of the Accessible Oil Resources -

Yoshimasa MOTOBAYASHI

Abstract

The objective of this study is to forecast the length of time until when all the accessible oil resources are exhausted so as to have a answer to the question related to the fate of industrialized nations which reads as how long can we enjoy the comfortable days consuming greate amount of oil resources with high rate of annual increase.

Almost all the recent reports on the forecast of oil production scenario are shaped as depletion model and were derived from the Hubbert's Logistic curve theory (propounded in 1956) which has been based on some statistic rule found in the history of annual discovery and production in each petroleum geological area. These forecasts can be made only when the initial ulitimate reserves in each area are given. And even the sophisticated Campbell's forecast technique of estimate of ultimate reeserves, which was built on the Laherrere's theory of parabola curve displayed in log-log size-rank of oilfields, is depending on the assumption of Fractal analogy of all the world sedimentary basins, which is not geologically confirmed.

Accordingly, in this study the forecast is attempted on the basis of and principles

mentioned as follow : (a) Oil resources shall include the exploitable part of the Tar oil resources and Shale oil resources as well as the Conventional oil (Crude oil and Natural gas resources). (b) In this estimate the forecast (magnitude and frequencies) of discoveries in new reserves is disregarded, as the oil discovery cannot be predicted even in the days when the sophisticated techniques are used in all phases of exploration activities. (c) Instead, the forecast and estimate of life span of resources are based on the future reserves which are yielded from the aggregated ultimate resources with deduction of the known cumulative production and annual production of crude oil and natural gas in 1993. (d) Ultimate resources of conventional oil resources are based upon the well known report presented at World Petroleum Conference 14th in 1994 by C.E.Masters groupe which are obtained by compiled geological deta processed by the Monte Carlo simulation technique and shows almost the same level among the past several versions. (e) As to the crude oil, promoted recovery factors (from the standing 25% to future 35%) are applied separately to the future finding reserves and even to those with the addition of the proved reserves on hand. (f) As to the Non-conventional oi (Tar oil and Shale oil resources) which are not produced in commercial size by now, variouse categories of reserves and resources are reported. The exploitable reserves are obtained by adjustment with the considerations of qualities of ore and mining condition of deposit layer so as to admit the production cost stays within the level of 4 times of crude oil which is understood to be marketable ones in the comming a half century. (g) For getting the most probable view on the starting the age of oil drain, the estimated life span is deducted by some several given annual growth rate of production, as the calculated life span is static one.

The Findings : The aggregated static life span is yielded as 120 years which is found to be reduced to only 61 years when production continues with annual 2 percent growth and 79 years when 1 percent growth. Actually oil would not drain suddenly in the year as calcurated. Due to the technical reason, the decline of production will start (which means the starting of the age of world oil shortage) 10 years before the calculated year of oil drain. Accordingly, under the moderate annual growth of production of oil resources as of between 1 and 2 percent, the age of world oil shortage is deemed to come in between 2044 and 2062 even with the most optimistic assumption that the enough amount of oil discovery be made always making up the amount of depletion of reserves on hand. And when 5 percent of annual growth in production maintained, world oil shortage will come by 2022.

要 旨

研究の目標は石油資源の涸渇するまでの残された時間（資源寿命）を算出するにある。ここで、

残存する資源の総量を R
基準となる年の年間の石油採取量を P
とすると資源寿命は R / P で求められる。

R については、対象となる資源の種類は原油だけでなく、すでに現在も大量に使われている天然ガス、さらには原油と同様の石油が抽出できるタール・オイル、小規模ながらガソリン同様の軽質油が抽出されてきたシェール・オイルなどの非在来型石油資源の埋蔵量も加えての計算となる。

原油と天然ガスについては、現在手持ちの確認可採埋蔵量の他にこれから発見されるであろう資源量の推定値も加える。

このために究極資源量についての報告が必要となる。

さらに、原油については将来、石油価格の上昇に伴う可採率の向上をも考慮に入れて埋蔵量の報告値と推定値を評価し直す必要がある。

その規模は25% 35%と考えられるので、1.4倍になる。

非在来型石油資源は、現在は生産コストの関係で商業規模での生産は行われていない、言わば石油資源の貧乏である。

これらは、地表近くに存在するのでほとんど全てが発見済みであり、その埋蔵量はかなり大きい、その大部分は採掘条件や生産コストからみて R の対象に入れることはできない。

P は現在、大量に利用されている原油と天然ガスの採取量であるが、これを今後も一定と見るのは適当でない。とは言っても、どのような増大を示すのかは、10年前とは違って、誰も予測ができないのが現状である。よって、いくつかの増加率を（仮定し）外挿して計算することにした。その結果は、恐ろしいほどの激しさでの寿命の割引となっている。

資源寿命の計算値（ R / P ）は資源涸渇を示す指数ではあるが、涸渇は決して突然に訪れるものではない。現実には、資源量が少なくなるにつれて生産能力の低下が始まる。技術的な理由から年産量は残存資源量の10%を超えられないことが分かっているので結局、涸渇の計算時点の10年前から世界は生産/供給が絶対的に需要を下回る石油不足の時代が始まる。

このようにして得られた利用可能の全石油資源量は、1993年の世界の石油消費の120年分と計算されるが、これも仮に今後の消費が年率1%で増加を続けると、世界は69年後の2062年には石油不足の時代に突入する。

はじめに

人類が石油資源を大量に消費するようになってから今日まで僅か60年ほどしか経っていないが、その間に人々は時折、石油不足や石油涸渇を心配してきた。ところが、この間に石油会社の公表する埋蔵量は、新規の油田の

発見が見られなくなった時期においても、増大・成長を記録しており、世界的な規模での石油不足によるエネルギー - 危機は、ついぞ訪れなかった。それだけでなく、1973年以來の二度の石油ショックによる一時的な原油価格の暴騰と市場の混乱を経験してから10年近くを経た今日、原油市場は供給能力の大幅な過

剩状態にあり価格の低位安定が定着している。

この“石油ショック”後、世界中の権威ある研究機関や石油会社は、石油を含めてのエネルギー・需給の長期見通しをかつての様な自信を以て語らなくなっている。この結果、世界の人々は現在、石油の資源的な涸渇の時代の到来がどの程度にさし迫ったものなのかについて全く意識しなくなってしまった。他方、先進各国の政府や産業界は国民経済の維持発展と資本の利潤追求の必要から、そして世界人口の多数を占めている“開発途上国”の政府は人々の貧困からの離脱を悲願として、自国経済の拡大発展に熱中している。

1972年に“ローマ・クラブ”の人々が警告として世に提示した“成長の限界”は、エネルギー・供給面でどの辺に存在するのか。人類は経済の成長と維持を支える石油資源が涸渇する危険な崖の位置が全く分からないままに、それに向かって霧の中を全力で疾走しているのである。将来、必ずやってくる石油資源への依存ができなくなる時代に備えてのエネルギー・供給の新たなシステムを転換するのに必要な時間的な余裕は、どの程度に我々に残されているのか。これこそが、エネルギー・問題の研究者にとって回答を示すべき最大の課題と心得え、このテーマへの探求の途を探ることにした。

第 I 章 資源寿命を推定する意味

1 研究の目的と世間の認識

本報告の目的は、石油資源の涸渇が訪れる時期を予測するのに有効な手法を確立し、われら人類が石油資源の大量消費を今後どの程度まで続けられるかを算定することにある。このような算定が必要とされる理由は、資源問題と地球環境保全が人類的な課題であるとの認識が広く定着している今日では、あらた

めて指摘する必要はない。それにもかかわらず、石油の大量消費が持続可能な期間についての定説としての正確な見通しは、今のところ全く示されていない。この結果、世上には長期の石油資源の見通しに関していくつかの混乱が生まれるに至った。見通しの算定に有効、適切な手法が確立していないことの原因は、以下の第 3 節で見るような多くの事情にあるとみてよい。

石油供給の将来に関する最も一般的な反応は、極度の楽観論ないしは思考放棄の姿勢である。石油資源の涸渇の警鐘は石油関係者により、ことあるごとになされてきた。しかし、石油価格の一時的な高騰や市場の混乱、局地的な石油供給の途絶などを別にすれば、地球規模の問題としての石油供給の恒常的な不足やこれによるエネルギー・危機は、これまでのところ、ついぞ一度も訪れたことはなかった。手持ち資源量の在庫の異常な低下は、危機的なレベルにいたる以前に常に回復されてきたのである。このことから人々は、石油資源量に関して石油産業関係者の提供する情報は、難解なもの、ないしは信頼性の低いものとして理解するようになり、石油危機の到来を「狼少年の話」と考えるようになったのである。他方、石油資源の有限性、減耗性は厳然たる事実であり、世界の石油消費が加速度的な増大を続けている現実からみて、石油資源の涸渇は意外に予測できない形で急速に現実のものとなっている可能性がある。

このような認識のギャップが生まれている最大の原因は、“地下資源量の把握が技術的に依然として困難である”ということにあるよりも、むしろ石油資源量が「確認可採埋蔵量」として統計の上で他の鉱物資源とは異なる方法で把握、記録されており、石油関係者がこのことを人々に十分に説明してこなかったことにあるのかもしれない。

もう一つの混乱の原因は、専門家による長期の石油資源の見通しには悲観論と極端な楽

観論、など様々のものがもた出されている
おり、これらの報告に対する判断の手がかり
がはっきりとしていないことにある。原油の
究極資源量の報告を例にとってみると、過去
十数年にわたり世界石油会議に報告を提出し
ており引用例の多い米国の地質調査所の
C.D.Masters博士グループの1994年の報告で
は、確率分布の中央値として2.27兆パーレル
(3,100億トン)を掲げている。

ところが、これに対してPetroconsultants社
の地質技師であるC.J.Campbellは、この算定
が楽観的すぎる過大なものと批判している。
彼によると、この計算の方法は多くの専門家
の見解の集約であり、その中には現在の確認
可採埋蔵量を基にして、これに未発見資源量
を推定して加えていることを指摘し、問題は
その際にOPEC諸国が政治的な水増し発表
した確認埋蔵量を使用していることにあり、
実際にはこれより約4分の1だけ少ない1.65
~1.7兆パーレル(2,250~2,320億トン)が妥
当な推定である、としている¹⁾。

その他方では極端な楽観論があるある。例
を挙げると、世界エネルギー会議が第16回東
京大会に向けて準備中の報告書では、未発見
資源量として産業的にみて開発の可能性の低
いシェール・オイル資源やタール・オイル資
源の膨大な原始埋蔵量をそのまま計上し、さ
らにまた開発の概然性の指摘しかない多くの
種類のメタン供給源を含めた結果、未発見の
石油資源として1兆6,900億トンと報告してい
る。この数値は、世界石油会議での報告のな
んとほぼ8倍に当たっている。

2 石油涸渇と石油危機

石油涸渇の到来を算定するからには、算定
の対象となる石油涸渇の事態をどのように規
定するかが問題になる。現実には石油涸渇は
決してある日、突然に訪れるものではない。
資源の減耗があるレベルを超えて進むと、ま

ず世界的な規模での恒常的な供給不足が始ま
り、それが価格の高騰や需要の減退を伴いな
がらも、急速に進行し遂には復元不能な地下
資源の採取不能の状態に陥ると考えられる。
そして、個々の油田でみられる生産能力の減
退曲線の経過を参考にすると、最初の供給の
異常事態が始まってから(もっとも、その時
点をはっきりと推定できるかどうかは分から
ないが)不足の規模が拡大して、その最終局
面である地下資源の完全な採取不能の状態へ
の到達するまでの時間は、ゆうに数十年に及
ぶと思われるのである。

石油涸渇が人類の経済活動、社会生活にと
って重大・深刻な事態の生起を意味すると理
解した場合、それは当然のこととして、資源
の完全な採取不能・停止の時点を目指すのは
なくて、世界的な規模での恒常的な供給不足
の異常事態の生起・到来の時点で捉えられる
べきものであろう。そこで問題は、“恒常的
な供給不足の異常事態”をどのように認識す
るかである。まず指摘しておきたいのは、こ
こで問題にする石油涸渇は、資源の涸渇であ
り、石油市場に時折、訪れる石油不足や石油
危機とは異なることである。このような石油
不足の原因は、理論的には大別して三つの類
型が考えられる。

第一の類型は、生産地帯や輸送ルートで発
生した異常事態が惹き起こす一時的な供給途
絶である。異常事態の原因は、戦争や内乱、
生産部門でのストライキ、破壊活動、天災や
巨大な規模での事故である。その原因となる
事態が解消し、さらに生産・輸送施設の修復
が行われ供給能力の回復による石油不足の解
消までに必要な時間は、個々のケースによ
って差があるが、異常事態が発生した以外の産
油地域からの増産や生産能力の追加投入が期
待されるので、これまでの体験を基に考えると
永くても二か月程度と見てよいだろう。この
永さは現在、各国で採られている石油備蓄
の取り崩しで充分に対応できる。

第二の類型は、原油や天然ガスの採掘・生産部門において個々の企業が採掘投資や設備投資を低下させたことが原因で生じた、世界全体の供給能力の不足が惹き起こす石油不足である。通常、石油会社が合理的に行動し市場原理が有効に機能する限り、供給能力の不足は危険な水準にまでに低下することはない。従って、これが単独で世界的な石油不足の原因となることはない。ただ、なんらかの理由で石油会社が世界各地に十分な生産余力を持つような投資を怠り、その結果、大産油地帯で発生した緊急事態に対応できるだけの世界規模の石油供給余力の不足が生まれた時に、1973年の第一次石油ショックの時に見られたように産油国のカルテル行為が行われ、これが石油不足の幻影をつくりだし、結果として原油価格の高騰状況を実現する可能性は高い。要するに第二の類型は、第一の類型である異常事態の出現を容易にする背景条件となるものである。

石油不足を惹き起こす以上のような異常な状態は、いずれも一過性のものである。これに対して、我々が問題にする石油不足の原因の第三の類型は、資源的にみて構造上の問題であり地球規模のマクロ・システムとして、また長期の考察を必要とするメガ・トレンドの資源渇涸に係わる石油不足なのである。

3 推定に係わる原理的な問題

A 石油資源側の問題

石油資源の寿命、すなわち石油の消費が持続可能な期間についての正確な見通しが得られない理由は、ひとつには埋蔵量や資源量の概念がかなり複雑な内容を持っており、その把握方法と正確さがカテゴリーごとに異なっていることにある。また、埋蔵量の扱い方も産油国ごとにまた研究者によっても差があることにも原因がある。これに関連して確認し

ておく必要のある原理的な問題点を以下に整理しておく。

(1) 原油は可採埋蔵量として把握される

原油の埋蔵量の統計に登場する数値は、すべて「確認可採埋蔵量」である。ここで可採であるという意味は、それが発見された石油資源の全量（原始埋蔵量）ではなくて、地上に採り出される（生産可能の）ベースで計算されている、ことである。このようなことになるのは、産油層と呼ばれる岩石層の中にしみ込んでいる原油は、その粘性のために全部を地表に取り出すことはできないことに起因する。採油の結果、地表に採り出された石油の量と地下の産油層の中の液体炭化水素の総量との比率は、可採率（回収率）と呼ばれている。可採率は、個性差が大きい各産油層ごとの物理的な特性と、それに応じて適用される採油方法（技術水準と原油価格などから決められる）によって様々な値を示す。その値は通常の油田では20 ± 5 パーセントの範囲内にある。特に条件の良い北油での超軽質原油で60パーセントを記録した例がある。

可採率（回収率）を向上させる高度の採油技術の採用は、それが原油価格との関係で採算が取れるかどうかにかかっている。原油価格が上昇すれば通常の自噴採油法やポンプ採油法、ガスリフト採油法による採油が不可能となった段階でも水攻法やガス圧入法と云った二次回収技術、さらには炭酸ガス圧入攻法、界面活性剤攻法による可採率（回収率）の向上が可能になる。従って原油市場で供給不足の状況が生まれて原油価格が上昇すれば、より高度、高コストの採油方法が可能となり、それにより可採率（回収率）は向上して結果として埋蔵量はその分だけ増大することになる。

(2) 確認埋蔵量とその評価替え

原油や天然ガスの埋蔵量（Reserves）の統

計に登場する数値はすべて石油企業の資産として確認ベースとして把握されたものの集計である。確認埋蔵量は個々の産油企業にとって設備投資計画の基準となり、かつ銀行の貸付の対象ともなり得る資産価値を意味している。このため確認可採埋蔵量は、地下の資源量に対する過大な設備投資による開発リスクを避ける必要から、現実さを重視した一定の鉱量基準に基づいて毎年、各産油層ごとに厳密に計算され各国政府の鉱山当局に報告される。

多くの場合、油田発見の当初に報告された確認埋蔵量は試掘によって確認された地質デ

ータを基にして計算されるが、その後、石油生産が開始され資金的な余裕ができると油田の拡がり確認の掘削が可能となる。また採油が始まると油層の様々の物理的性状や様々の測定値の変動（挙動）に関するデータが加わることで、多くの場合に上方修正の再評価がおこなわれる。このことは、埋蔵量資産の再評価が油田や新油層の発見が無いにも係わらず、埋蔵量が年々に“石油統計の上で、成長”する原因となるのである。

ここで、世界レベルで毎年の確認可採埋蔵量の統計を変動させる要因を整理し、表に示してみると以下ようになる。

第1表：確認可採埋蔵量の変動要因

	原因	特色・取り扱う上での注意事項
減少要因	A 採取・生産に伴う減耗	世界の石油消費によるものであるが、計算には生産量の統計値を使用する
増加要因	B 油田・ガス田の発見による確認埋蔵量の追加	テンポに規則性がないので予測不能
	C 既発見油田の探鉱評価作業の結果の確認埋蔵量の追加	油田周辺の推定埋蔵量の確認部分の取り込み
	D 油田の生産データに基づく確認埋蔵量の再評価	油田・ガス田の開発当初の10年間ほどの間に著しく見られる
	E 二次・三次回収法の実施の結果の確認埋蔵量の追加	原油価格が上昇すると可能となる

石油埋蔵量の概念は、以上で述べたようにかなり複雑な構造を持っているので、これを図に示しておく。

(3) 埋蔵量と資源量の関係

石油地質関係者やエネルギー - 問題の研究者が取り扱う未発見資源量や究極資源量などの数値は、控え目で現実さを身上として算定された確認埋蔵量（Reserves）とは異なり、地下の資源状況についての知見の蓄積によって

もたらされた将来、発見が期待され開発可能な資源量（Resource）である。この究極資源量や未発見資源量は、当然に見通しの樹て方により多くの数値が公表されることになる。

なお、未発見資源量に関連して石油資源問題の専門家の間では、現在の実用化されている技術と経済条見通しの下で、今後20年間に生産可能と見られる原油の可採量を実質埋蔵量（Active Resources）と定義し、今後20年以内には商業生産の見込みはないが、原油価格

第 1 図：石油埋蔵量の概念



が上昇すれば開発の対象となる油田や二次・三次回収技術による採取可能と算定された資源量は (Inactive Resources) として別途に報告することが必要であるとの認識が定着している²⁾。

(4) 非在来型石油資源の資源量の把握

後ほど説明する様に石油資源のなかに加えらるべき非在来型石油資源 (タール・オイル資源やシェール・オイル資源) は固体であり、いずれも地表近くに発見されている石油系炭化水素の貧鉱である。これらの資源から合成石油を生産する際には、石炭層や金属鉱床と同様に露天掘りか坑道掘りによる採掘が行われ、さらに石油分の抽出の精錬工程が必要となる。このことから、発熱量で原油等価換算の合成油ベースで表示されるその資源量の把握に当たっては、以下に挙げる様な流体資源である在来型石油資源とは異なる考慮が求められる。ところが、公表されている資源量の中には、このような採掘や精製に伴う条件への顧慮を全く欠いたままに、発見資源量そのものを掲げた過大な数値が多く見られ、

それらがそのまま期待可能な資源量と受け取られる危険がある。具体的には、以下の三点が問題となる³⁾。

(a) 採掘可能量の限定

この両資源ともに膨大な埋蔵量のほとんど全ては発見済みで、その存在が知られている。然しながら、合成石油が抽出可能なものは、それぞれの鉱床の存在状態や品質の面から見て、この中のごく一部分だけである。露天掘りには採掘の経済性から一定の条件が充たされねばならないし、坑道掘りの場合には坑道内に陥没防止のための柱部分を残すことから採掘率としての0.6が適用されなければならない。また、タール・オイル資源に関しては地下の鉱床内での抽出・精錬の技術があるが、シェール・オイルの地下精錬は不可能である。

(b) タール・オイル資源における抽出の際の採取率

熱水加工処理される鉱石からの鉱石トン当りの抽出可能量の品質限定区分が問題となる。これまでは、25Gal (100ℓ) /t以上の資源が開発可能とされてきたが、最近で

は精製技術の向上の可能を考慮にいれて、10Ga (40ℓ) /t以上の品質の資源量を対象として考えるようになってきている。

(c) シェール・オイルの採取率

合成油の抽出に当たっては大量のエネルギーが消費されるので、地球規模でのエネルギー・バランスを問題とする場合には、精製工程での自家消費の分を差し引かねばならない。積算に当たっては回収率の0.62が適用されることになる。

B 石油消費側の問題

これらの資源側の算定の問題の他に、資源量の減耗に当たる石油消費に関しても多くの原理的な問題がある。以下で二つの問題を指摘しておく。

(5) 消費予測が困難なこと

資源の費消・採取（生産）の算定に係わる困難は、毎年の消費の成長・拡大をどの程度に見積るか、ということにある。工業化社会の経済活動は中・長期的にみれば発展・成長を続けてはいるものの、その成長速度はかなりの幅で変動するものであり、従って世界の石油消費/生産量の動向は中・長期的には全く予測不能である。しかも、採取量の毎年の累積的な成長は資源涸渇への加速的な接近効果を及ぼすので、モデルとしての涸渇時期の算定に当たっての年間成長率の設定は結果を大きく左右することになる。

(6) 石油消費を制約する要因

以上に加えて、石油消費を大きく左右するもう一つの不確定要因がある。それは、化石燃料の使用が惹き起こす大気中の二酸化炭素濃度増大の確実な進行による地球上の生命環境の巨大な破壊を防止するための化石燃料の消費抑制の措置による石油消費への制約である。この制約は、地球の生命環境の維持にと

ってきわめて重要な措置ではあるが、国際的な措置として化石燃料の使用制限が実施される時点やその規模と影響その実現の見通しは今のところ全く樹てられないので、今回この研究報告においてはこれに係わる考察は全く行っていない。

4 計算モデルの前提と構造

この研究報告において採用した資源涸渇時期と石油不足時代への突入の算定のモデルの構造は、以下の様に整理される。

1 この研究報告が問題としている世界的な規模での恒常的な供給不足の異常事態の生起・到来の時点の推定は、資源涸渇が突然に訪れるとするモデルによる計算結果から導くことが理論的に可能である。この点は後ほど説明する。

2 資源の涸渇の推定は資源の寿命を計算するものであり、それは資源の手持量と年間の消費量との対比によって得られる。手順としては先ず、資源の消費の推移の時間展開を無視して、これを現在の水準が続くものとして計算した指標を計算し、次いで年間の消費が一定の伸びを続けるとして、いくつかの伸び率を外挿係数として扱って資源の割引計算を検討する。

これは、石油関係者が使用している「可採年数 (R/P)」と呼ぶ指標と類似した考えによるものである。この指標の「R」は手持ちの確認可採埋蔵量であり、「P」は年間の採取量を意味している。

3 この推計のモデルにおいて「R」は、現在の手持ちの確認可採埋蔵量の他に将来、発見されるであろう全ての資源量を加えた残存資源量を意味している。

4 計算の対象は、エネルギー・資源としての利用が確実視され、資源量の算定が可能な石油系炭化水素資源の全体を問題にする。

ここで「石油資源」には、原油だけでなく現在すでに大量に使用されている天然ガスと、合成石油の抽出方法が確立し近い将来に大量に商業生産の可能性が検討されているタール・オイル（瀝青油）資源とシェール・オイル（頁岩油）資源を含むものとする。

ただし、その巨大な抱蔵量が時折、話題になり、エネルギー源としての利用の可能性が指摘はされているが、近い将来に大量に商業生産の可能性が問題視されていない以下に掲げる非在来型メタン資源は含まない。

Gas Hydrate (メタン・ハイドレート)	地下深部の地殻付近に存在が予想されているシャーベット状のガス水和物
Coal Bed Degasification	地下深部で石炭や泥炭をガス化
Oil Shale Degasification	地下深部でオイル・シェールをガス化
Biomass Gas	燃料用に栽培された作物水棲や陸棲もの
Swamp Gas	熱帯・亜熱帯の沼沢地で発生する腐敗ガス
Tight Formation Gas	米国西部のTight sand
Geo-Pressured Zone Gas	米国ガルフコーストの異常高圧地下水

第 II 章 石油資源の把握と基礎データ

5 埋蔵量概念と可採率

石油涸渇の事態を把握する指標が可採年数（ R/P ）であるとなると、その算出の際の要素である埋蔵量をどのようにして把握するのか、が極めて重要な問題となる。ここで忘れてならないのは、石油会社が公表する埋蔵量の統計値は全て「確認可採埋蔵量」であるが毎年、見直されて成長するものであり、か

つまたその鉱量算定基準も国ごとに異なっていることである。世界的に有名で引用も多いいくつかの機関が毎年発表している原油や天然ガスの国別埋蔵量や生産量の間にも、統計の扱い方に若干の差が見られる。BP社や米国のWorld Oil誌の発表する原油の生産統計では、米国に多い軽質油油田やガス田で原油や天然ガスを採取する際に井戸元で天然ガスが断熱膨張して分離凝縮することで得られる天然ガソリン（NGL）を含めており、この結果1992年の世界の原油生産は他の統計よりも約10パーセント多く評価されている。

この研究報告で推計の基準年は、究極資源量の資料として第14回世界石油会議（1994年）に提出された報告の数値を利用したことから、それに合わせて1993年末に設定してある。従って世界の原油と天然ガスそれぞれの累積生産量と可採率埋蔵量の数値もこの報告に拠っている。またそれぞれの生産量は、BP社の統計を使用した。

次の問題は、世界レベルで将来の石油埋蔵量を論ずる場合、一体どの程度の可採率の上昇を考慮に入れればよいのかである。この報告の算定モデルでは、現在の世界の可採率の平均値を25パーセントと仮定し、近い将来に石油供給の不足の認識が一般化することから原油価格が上昇し、より高度の採油方法の適用が可能となり、さらに可採率が10パーセント追加可能であるとの仮定を採ることにした。これは可採埋蔵量にして実に1.4倍の上方修正を意味している。この推定は最近、我が国の専門家達が行った報告の内容とほぼ一致しており妥当なものと考えてよい⁴⁾。

6 石油発見をいかに予測するか

石油涸渇の予測は、一面では石油発見の予測とも深く係わっている。ところが、石油探鉱技術の著しい進歩にも係わらず、石油発見は依然として偶然に左右されるところが大き

い。それでも油田・ガス田の発見を統計的に把握する試みがいくつか見られる。最近の報告のなかで注目を集めたものにOccidental石油会社の探鉱部門のsenior adviserを永らく勤めていた地質技師L.F.Ivanhoeが1995年に発表した手法がある。それは、地質的な解釈や解析で同一の石油堆積環境にあると考えられている地質区ごとに、年間発見量曲線を生産量の年間変化や確認埋蔵量の年間変化の実績推移の曲線の形状比較しつつHubbert曲線と呼ばれる成長と減退のロジステック理論曲線と重ねることでその面積から発見量の総計を推定する方法である。彼は、米国以外にも産油国の原油埋蔵量基準が世界的に統一されていない世界全体についても精度は劣るが、この手法で原油供給能力の予測を行っている⁵⁾。

また、Petroconsultant社の地質技師のC.J.Campbellは、1991年にHubbert曲線を基に生産減退モデルを考案し、これを巨大油田に当てはめて、生産減退実績の履歴マッチングを行い減退率を推算することで産油国別に石油供給能力レートの将来予測の試みている⁶⁾。彼は、さらに統計的な手法を用いて究極資源量の一定の範囲内の可能性を求めることを試みている。それは、世界の石油資源が極度に巨大油田に集中している事実に着目して、発見された巨大油田を初期埋蔵量軸とそれらの規模順のシーケンスの対数目盛り軸を持つグラフの上でプロットングすることで整列線が得られることを基にして埋蔵量の累積分布関係を推定する方法である。彼は、これらの方法を用いて、いくつかの価格パスの設定にかかわらず、21世紀の初頭には世界の生産能力が天井に突き当たり、生産能力の減退が始まり以後急速に下落していく、との予測を発表している⁷⁾。さらにフランス国営石油研究所(IFP)のN.AlazardとL.Montadertは1993年に、このCampbellの地球規模の現象のフラクタル的な理解の統計的手法を応用して、342の巨大油田のデータから得られた地球規

模の在来型石油資源の究極資源量は、2.2兆バレル(3,000億トン)との報告している⁸⁾。

以上の推定は、いずれも既発見の地域における発見や生産の履歴を基とした生産能力の予測や究極資源量の推定である。問題は今後、発見が期待できる石油の限界量、つまり未知の地域を含めての究極資源量の把握である。

本格的に地球的な規模で原油や天然ガスの究極資源量を推定するとなると、それは現在、地球上に641あるとされている⁹⁾原油や天然ガスの究極資源量を地質区(堆積盆とも呼ばれる)ごとに地質学的、地化学的、堆積学的な知見と考察によらなければならない。ところが、この641の堆積盆のうち約70が深海域や両極地帯の接近不と調査不能のものであり、さらに125は未探査であるのが現状である¹⁰⁾。このことは、石油の究極資源量に関して堆積盆のうち約30パーセント近くがこの検討の対象から除かれることを意味しているのである。

結局、石油資源の地球規模での究極資源量を推定するには、地質評価の積み上げによる以外に途はない。石油地質の研究者たちは、これまで地球上の炭化水素資源の究極埋蔵量に関心を寄せており1940年代の後半以来、様々の推定値を発表している。(第1表参照)これらの原油と天然ガスの算定には、様々の手法が採られているが、いずれも可採量ベースで計算されている。原油についての推定の結果は1975年代の後半この方、その値がほぼ2兆バレル以上の範囲内に収斂している。この中で現在、専門家間で比較間的に信頼性の高いと見られ、ひろく引用されている数値は、1994年にノルウェーのスタヴァンゲルで開かれた第14回世界石油会議で米国の地質調査所のC.D.マスターズ達が行った報告である。これは、原油と天然ガスとについて1993年1月1日現在の世界各地の累積生産量、確認埋蔵量のほかに未発見資源量に関する報告をまとめた究極資源量に関する報告である。

未発見資源量に関しては、各種の報告を検討してその確率頻度を調べるモンテカルロのシミュレーションの手法がとられ、確率頻度95パーセントの低位値、確率頻度50パーセント

の中間値、確率頻度5パーセントの高位値が地域ごとにまとめられている。この研究報告の積算では、他の多くの引用の例と同じくその中間値を使用することとした。

第2表：世界の原油の究極資源量

発表年	報告者	(10^9 bls)	(10^9 ton)*
1975	ムーディー、ガイガー	2,000	2 7 3
1977	世界エネルギー会議	2,193	2 9 9
1978	米国C I A (Rand Corporation)	2,300	3 1 4
1979	ウッド	2,200	2 0 0
1979	ハルブッティ、ムーディー	2,128	2 9 0
1979	ルーダー	2,400	3 2 7
1980	世界エネルギー会議	2,574	3 5 1
1983	マスターズ他 第11回世界石油会議 中間値	1,718	2 3 4
1984	Chevron 社	2,000	2 7 3
1986	石油鉱業連盟の資源・技術評価WG	1,978	2 7 0
1988	マスターズ他 第12回世界石油会議 中間値	1,744	2 3 8
1991	マスターズ他 第13回世界石油会議 中間値	2,171	2 9 6
1994	マスターズ他 第14回世界石油会議 中間値	2,272	3 1 0

(資料出所) 石油公団 / 石油鉱業連盟：「石油の開発と備蓄 96・2」P.13

(* 換算) 原油 $1 \times 10^9 t = 7.33 \times 10^9$ bls

第3表：世界の天然ガスの究極資源量

発表年	報告者	(10^{12} C.Ft)	(10^9 ton)*
1976	グロスリング	11,200 ~ 28,000	2 8 5 ~ 7 1 4
1983	ハルブーティ	9,585	2 4 4
1986	石油鉱業連盟の資源・技術評価WG	10,256	2 6 2
1987	マスターズ他	9,280	2 3 6
1991	マスターズ他	10,512	2 6 8
1994	マスターズ他	11,568	2 9 5

(資料出所) 石油公団 / 石油鉱業連盟：「石油開発資料 1995」P.109

(換算) 天然ガス $1 \times 10^9 t = 39.2 \times 10^{12}$ C.Ft

結局、石油涸渇の時期を予測する作業において、油田・ガス田の発見を統計的に把握する困難さを回避するには、“石油発見のテンポを全て無視し、石油発見の究極の限界量だけを問題にする”ことが唯一の方策となる。すなわち、地質専門家が報告している原油と天然ガスの究極資源量から統計的に確実な累積生産量を控除した残存資源量を基にして推定を行うのである。ところが、この方式による予測には原理的な問題がある。それは、この様なやり方で石油の資源量を消費、資源の減耗との対比で論ずるとなると、手持ち資源量の水準の低下に合わせて“必要なときに必要なだけ石油が発見される”との仮定を設定することになる。この想定はかなり楽観的であり、現実の予測としては無理があることは否定できない。とは云っても、このモデルの下で算定した資源の寿命（減耗のテンポに応じていくつかのケースで算定される）の長さが充分にある場合のメガ・トレンドの予測としては、この様にして計算した資源の寿命はそれなりの意味がある。

残存資源量の推定に当たっては、基礎となる各国の統計の信頼性に就いての問題の指摘がある。それは、各地域ごとに究極資源量が地質学的な見地から始めから統一された基準と方式によって計算し直されている場合には、信頼性の問題は解消する。然しながら、マスターズ達が行った報告は、各国毎に確認埋蔵量を基としてこれに発見埋蔵量の予測値を加える方式で究極資源量が算出されている。このために1981年以降1988年にかけてOPEC諸国が相次いで行った大規模な確認埋蔵量の上方修正が信頼度の低い政治的な理由による報告であった疑いが濃厚である以上、この報告はかなり楽観的なものである、との指摘がある¹¹⁾。

なお、石油資源と云っても非在来型石油資源は地表近くに存在するものしか経済性が無いことや今後に大量の埋蔵量の発見が期待で

きないことから、究極資源量の推定は必要がない。

7 非在来型石油資源

タール・オイル（瀝青油）資源とシェール・オイル（頁岩油）資源は、石油系炭化水素が抽出される固体資源であり非在来型石油資源と呼ばれている。いずれも採掘から石油の抽出までのコストが原油に比べて可なり高くつくことから、今のところ商業的な生産には至っていない。非在来型石油資源は、液体資源である在来型石油資源とは異り鉱石の品質の差が大きく、また露天掘りや坑道掘りなどの地下からの鉱石の採取、石油成分の抽出さされる技術レベルとコストも様々なので、利用可能の資源量についてのデータは範囲の採り方で大きな差が出ることとなる。さらに採取した鉱石を精製して合成油を生産する際に大量の熱を必要とするので、この際のエネルギー・回収率が考慮されていない資源量の報告も多く見られるので取扱に注意が必要である。

A タール・オイル資源

地表近くに発見された軽質の石油分が逃げ去った含油層で、砂岩の中に多少の流動性を残した超重質油を含む「ヘビー・オイル」と砂岩が崩れ去りさらに石油分が失われて砂にタール状の石油が染み付いた「タール・サンド」（別名、「オイル・サンド」）に分けられるが、この区別は程度の差にしか過ぎない。

「タール・サンド」資源のうちカナダのアルバータ州のアサバスカスやコールドレークの資源が有望視されている。露天掘りが可能なものの条件は、被覆深度が150ft以下で被覆層厚/油層厚比が1以下、含油率が5 wt%とされている。採掘後、熱水と苛性ソーダを加えてタール状の石油を取り出

して精製する。そのときの変換効率は70%とされている。深度のある鉱床では高温・高圧のスチームの圧入して液状の重質油を汲み出す油層内回収法が採られるが熱効率が悪く回収率も低い。この場合の変換効率は20%とされている¹²⁾。

「ヘビー・オイル」のうち有望視されているのはベネズエラのオリノコ河畔の資源である。回収された固体に近い産出油に熱水と界面活性剤を加えて乳状(エマルジョン)にして重油の代用にする試みが進められている。

カナダとベネズエラのこの両者はタール・オイル資源発見資源量の95パーセントを占めている。この研究報告のモデルでは、回収と熱変換率についての言及のあることから手堅い資料と考えてよい地質学者Roadiferの1986年の報告にある合計3,800億バレル(518億トン)を採用したが、フランスの研究機関I F PのN.AlzardとL.Montadertの1983年の報告では5,400億バレル(736億トン)とされている¹³⁾。しかし、この差の218億トンは、このモデルの採用した石油資源全体の残存資源量の6,275億トンに対しては僅か3.4パーセントにしか過ぎない。

B シェール・オイル資源

油層や炭層の上部にある頁岩の中に炭化水素が取り込まれたもので、常圧下の乾留によってガソリンに似た軽質油が抽出される。オイル・シェール鉱床は世界中に広く分布しているが低品質のものが多く、利用可能と考えられる資源の大半は米国内にあるが、そこでも商業化の可能性の大きい露天掘りが可能なものは全体の15~20パーセントしかない。現在のところ油層内熱回収の技術は確立されていないため、坑道掘りでは層厚が3~4m以上、含油率が一定以上の資源が計算の対象とされており、そ

の回収可能量の計算には、存在量(可採埋蔵量に相当する)に採油率0.6(坑道掘りによる柱房率)を乗じた採掘量さらに乾留と精製のための熱回収率の0.62を適用することになる。

シェール・オイルは、発見された資源量は巨大であるが、生産可能な品質や採掘条件の範囲の採りかたで大きな差が出る資源である。この研究報告のモデルでは、品質の範囲を従来から米国内で生産計画が進められている25Gal(100ℓ)/t以上のものとはしないで、将来の技術レベルを考慮にいられた10Gal(40ℓ)/t以上のものとした。存在量の数値は、多くの報告を比較検討した結果、鉱石品位の限定がこの範囲のものと推定され、かつ米国以外の資源も含めての集計となっている第12回世界エネルギー会議(1983年)に提出された報告のうち可採埋蔵量相当量6,027億バレル(822億トン)を採用してある¹⁴⁾。

結局この研究報告では、人類に残された石油資源量の計算に使用した非在来型石油資源の発見量のうち経済的利用可能量は合わせて820億トンとなっている。

第Ⅲ章 石油涸渇の予測の計算

8 計上する資源のテゴリーの問題

石油資源の耐用命数の算定の基礎となる石油資源の埋蔵量の把握には、原理的にいくつかの検討が必要となる。

第一の問題は、石油資源として扱われる石油や天然ガス、それにタール・オイル資源、シェール・オイル資源などの非在来型石油資源をすべて完全に互換性のある同等の資源として取扱ってよいのか、ということである。原油と天然ガスの両者は大量に利用されていることから、これらを一体として取り扱う必

第4表：世界の非在来型石油の資源量（1993末）

	発見資源量		開発可能品位鉱量		採掘率・回収率適用量	
	10 ⁹ bls	10 ⁹ ton	10 ⁹ bls	10 ⁹ ton	10 ⁹ bls	10 ⁹ ton
瀝青油資源	1,616 c	2 2 0	540 d	7 3	380 e	5 2 +
頁岩油資源	4,200	5 7 2	602 g	8 2	224 h	3 0 +
	~ 4,400 f	~ 6 0 0				

（採用した数値の資料出所）

- c United Nation's Institute for Training and Research
 < 石油公団 / 石油鉱業連盟：「石油開発資料 1996」P.112 >
- d N.Alazard L.Montadert / IFP 1993 1 & 2
 Alberta 州のタール・サンド資源 可採埋蔵量 250 10⁹ bls
 Orinoco 流域の超重質油資源 可採埋蔵量 290 10⁹ bls
 < 石油公団：「石油の開発と備蓄 93・8」 P.32 >
- e Roadifer R.E.の将来の技術開発の進展を見込んだ推定
 Alberta 州の資源 1,602 × 10⁹ bls × 11 % = 180 × 10⁹ bls
 Orinoco 流域の資源 1,200 × 10⁹ bls × 16.7 % = 200.4 × 10⁹ bls
 合計 380.4 × 10⁹ bls 51.8 × 10⁹ t
 < 石油鉱業連盟：「石油系炭化水素資源に関するスタディ」 昭和61年12月
 p.42 ~ 43 >

- f N.Alazard による 膨大な量の低品位鉱石
 < 石油公団：「石油の開発と備蓄 93・8」 P.32 >
- g 第12回世界エネルギー - 会議（1983） 提出の Survey of Energy Resources 1983
 < 石油公団：石油開発資料1987 p.51 >
- h gの数値に採掘率（0.6）やエネルギー - 回収率（0.62）を乗じた値
 （参考 米国地質調査所（USGS）によると Green River Formationの原始埋蔵量は 300 ~ 350 × 10⁹ t であるが、回収可能量は、
 含油率 40 ℓ / t 層厚 3 m 以上とすると 100 ~ 130 10⁹ t
 含油率 120 ℓ / t 層厚 9 m 以上とすると 30 10⁹ t
 < 石油鉱業連盟：「石油系炭化水素資源に関するスタディ」 昭和61年12月
 p.45 >

要がある。ところが、資源の耐用命数算定の基礎となった確認可採埋蔵量の統計値と究極資源量の推定値は、その精度においてかなりの差のあるデータである。その結果、これら両者を加算した結果の数値は当然に概数値となり、またそれを基に算出した耐用命数にも、究極資源量の基礎データと同様な30パーセント程度の誤差は覚悟しなくてはならない¹⁵⁾。

非在来型石油資源が原油との関係についてさらに言及すると、両者に完全な互換性が備

わり市場で選択性のある状況が出現するのは、原油や天然ガスの損耗が進行して入手価格が高騰した時代になってからのことである。この場合、燃料油の転換に伴う利用設備の転換にかなりのリード・タイムが必要とされることになる。これらのことを考慮すると、予測のモデルをさらに精緻なものとして時系列の展開を試みようとする、どうしても非在来型石油資源の供給が不足し始める時期を推定する必要がある。そこで本モデルにおいて

も原油と天然ガスを合計した計算レベルと、これに非在来型石油資源を加えた長期的な視野での計算レベルを別々に樹てている。

第二の問題は、資源の損耗の進行による価格の高騰が可能にする可採率（回収率）の向上を、どの時期に計算に入れるかである。可採率が問題とされるのは、地下にある粘性のある流体資源においてであり、結局は原油だけがこれに該当する。しかし、この可採率の向上はモデルの上での資源量の評価を 1.4 倍にすることであり、その影響は大きい。また可採率の向上は資源の損耗が進んだ時点で認められるものであるが、資源の涸渇が急速に進むとなると、残存資源量のうちの現に手持

ちの確認可採埋蔵量についても可採率が向上することが考えられるので、この分の埋蔵量の増大も考慮に入れる必要がでてくる。そこで本報告のモデルにおいては、これらについて別々に計算レベルを設定することにした。

石油資源の寿命の計算に関して対象となる資源のカテゴリーは、原油と天然ガス、非在来型石油資源それぞれの残存資源量（確認埋蔵量 + 未発見資源量）の他に、原油の将来の可採率の向上分がある。計算に際しては、以下の第 5 表に記したようなこれらのカテゴリーの組み合わせた 7 種類の算定レベルが考えられる。

第 5 表：算定レベルと算定要素の組み合わせ

算定レベル	資源の種類	算入の範囲 未発見資源	可採率の向上	
			確認分	未発見分
レベル I	原油 + 天然ガス	含まず	なし	- -
レベル II	同上	含まず	あり	- -
レベル III	同上	含む	なし	なし
レベル IV	同上	含む	なし	あり
レベル V	同上	含む	あり	あり
レベル VI	全石油資源	含む	なし	あり
レベル VII	全石油資源	含む	あり	あり

ここで、レベル I からレベル V までの五つのレベルでは、在来型石油資源だけを対象にしたものである。そのうちレベル I とレベル II とは、現在の手持ちの確認埋蔵量だけを対象にしたものであり、長期的な資源寿命の検討としては余り意味がない。レベル III とレベル IV とは未発見の資源をも含めての手持ち資源（残存資源）についての計算を行っている。

対象範囲を非在来型石油資源にまで拡大したレベル VI とレベル VII は、当然に長期的視野の下での考察となるので、原油と天然ガスについては未発見の資源も含めての計算となっている。

9 耐用命数の計算

ここで石油涸渇の時期の予測に当り計算の

基礎となる資源量として採用した基礎データ以下の第6表に掲げておく。可採率（回収率）の向上分の計上に伴う残存資源量の計算過程は、モデルのレベルによっては判りにくい

で第7表に一覧表に示してある。また第2図は、この計算過程の理解を容易にするために埋蔵量のカテゴリーの関係を図解したものである。

第6表：算定の基礎データ（1993末）

カテゴリー	原典の数値	使用数値	資料出所
原油資源	(10^9 bls)	(10^9 t)	
究極資源量	2,272.5	310.0] World Petroleum Congress 14 (1993)
累積生産量	698.6	95.3] 石油開発資料 1996 p.92
確認埋蔵量	1,103.2	150.5]
残存資源量	1,573.9	214.7	BP Statistical Review W. Energy 1993
年間採取量		3.24	
天然ガス資源	(10^{12} C.Ft)	(10^9 t)	
究極資源量	11,568	295.1] World Petroleum Congress 14 (1993)
累積生産量	1,962.3 *	50.1] 石油開発資料 1996 p.111
確認埋蔵量	5,016	127.9	石油開発資料 1994 p.102 OGJ
残存資源量	9,657.7	245	
年間採取量	77.651	1.98	Oil and Gas Journal 1995 Dec. 25 石油開発資料 1996 p.105
瀝青油資源 生産可能量	(10^9 bls) 380	(10^9 t) 52	Roadifer R.E.の1986年の推計 (Canada180 + Orinoco 200 10^9 bls) <石油鉱業連盟 : 「石油系炭化水素資源に関するスタディ」昭和61年12月 p.42 ~ 43
頁岩油資源 生産可能量	(10^9 bls) † 224	(10^9 t) 30	第12回世界エネルギー - 会議 (1983) 提出の Survey of Energy Resources 1983 石油公団 : 石油開発資料 1987 p.51 による 確認可採埋蔵量 602 10^9 bls に採掘率 (0.6) とエネルギー - 回収率 (0.62) を乗じた値

* 1989年の数値 1,657.4 10^{12} C.Ft を基にして年産量を加算

第4表の註e参照

† 第4表の註h参照

(換算) 原油 $1 \text{ } 10^9 \text{ t} = 7.33 \text{ } 10^9 \text{ bls}$

(換算) 天然ガス $1 \text{ } 10^9 \text{ t} = 39.2 \text{ } 10^{12} \text{ C.Ft}$

第7表：可採率の向上に伴う埋蔵量増加分の計算手順

(単位：億トン 太字の数字は基礎データ)

	① 現在まで 累積生産量	② 現在の 確認埋蔵量	③ 究極 資源量	④ 未発見 ・期待量	②+④ 残存資源量	備 考
1 在来型石油資源				③ - ① - ②	③ - ①	
A 原油	953	1,505	3,100	642	2,147	年産量は 32.4
+	未発見・期待資源の可採率(回収率)が向上したとしての計算可採率が					
	953	1,505	+ 257 3,357	+ 257 899	2,404	25 35 % に向上
+	確認埋蔵量の可採率(回収率)も向上したとしてのケース					
	953	+ 602 2,107	+ 859 3,959	+ 257 899	3,006	年産量は 19.8
B 天然ガス	500	1,280	2,950	1,170	2,450	年産量は 52.2
C 原油+天然ガス	L(レベル)I 1,454	2,784	6,050	1,812	レベル III 4,596	年産量は 52.2
+	未発見・期待資源の可採率が向上したとしての計算				レベル IV	
	1,454	2,784	6,307	2,069	4,853	
+	確認埋蔵量の可採率も向上したとしてのケース				レベル V	
	1,454	L-II 3,386	6,909	2,069	5,455	
2 非在来型石油資源						年産量は 52.2
瀝青油		520			520	
頁岩油		300			300	
計		820			820	
3 石油資源合計		3,604	6,870	1,082	5,416	年産量は 52.2
+	未発見・期待資源の可採率が向上したとしての計算				レベル VI	
		3,604	7,125	1,339	5,673	
+	確認埋蔵量の可採率も向上したとしてのケース				レベル VII	
		4,206	7,728	1,339	6,275	

第2図：世界の石油資源の現況（1993年末）



このようにして得られた残存資源量は、使用したデータの究極資源量の基準年に合わせた1993年の世界の石油と天然ガスの採取量である51.2億トンに対する比率を求め、これが資源寿命の把握のための耐用命数（可採年数

と考えてよい）の指標となる。当然のことながら、この耐用命数は世界の石油消費が1993年の水準が続くと見た静態的な資源寿命である。以下の第8表は、計算レベルごとにまとめた算定結果である。

第8表：残存資源量の積算結果と可採年数

残存資源量の積算範囲（1993末）			レベルごとの積算範囲						
資源のカテゴリー	積算の構成要素		I	II	III	IV	V	VI	VII
	10 ⁹ t	10 ⁹ bls							
1 原油									
確認可採埋蔵量	150.5	1,103.2	×	×	×	×	×	×	×
未発見資源量	64.2	470.6			×	×	×	×	×
（可採率（回収率）増大分）									
確認可採埋蔵量	60.2	441.3		×			×		×
未発見埋蔵量	25.7	188.2				×	×	×	×
2 天然ガス									
確認可採埋蔵量	128.0	938.2	×	×	×	×	×	×	×
未発見資源量	117.0	857.6			×	×	×	×	×
3 非在来型石油資源	82 +	601 +						×	×

各レベルごとの積算結果と可採年数

積算のレベル		10 ⁹ t	10 ⁹ bls	可採年数 (R/P)
確認	I	278.4	2,040	5 3
	II †	338.6	2,482	6 5
含む 未発見	III	459.6	3,369	8 8
	IV †	485.3	3,557	9 3
	V ‡	545.5	4,000	1 0 5
含む非 在来型	VI †	567.3	4,158	1 0 8
	VII ‡	627.5	4,600	1 2 0

†：原油について 残存・未発見資源の可採率が向上したとして計算したケース

‡：原油について 確認埋蔵量の可採率も向上したとして計算したケース

P：1993年の原油と天然ガスの年産量 5.22 10⁹t (38.26 10⁹bls)

10 算定値の読み方

以上で算定した資源の静態的な耐用命数では、世界の石油消費が1993年の水準が維持され続けるとした場合の計算であり現実には、このようなことはありえない。世界経済の発展成長に伴い石油消費の成長が見込まれるのである。もしここで長期的な石油資源の需要

の変化が予測できれば、ことは簡単なように思われる。然しながら、第7表に示された耐用命数の算定値を見る限り考察のタイム・スパンは半世紀近くの長さとなるので、石油消費の成長を一義的に設定することは無謀である。そこで考察のステップ2として、いくつかの成長率を想定しての耐用命数の割引計算を行って見た¹⁶⁾。

第9表：残存資源の年間伸び率で割り引いた計算寿命（R/P）

(1993末)

カテゴリー	0%	0.5%	1%	2%	3%	5%	7%
1 原油+天然ガス							
(確認埋蔵量の分だけの計算)							
Level I	5.3	4.7	4.2	3.6	3.2	2.6	2.2
Level II †	6.5	5.6	5.0	4.2	3.6	2.9	2.5
(残存資源量の計算)							
Level III	8.8	7.3	6.3	5.1	4.3	3.4	2.9
Level IV †	9.3	7.6	6.6	5.3	4.5	3.5	2.9
Level V ‡	10.5	8.4	7.2	5.7	4.8	3.7	3.1
2 非在来型石油資源							
瀝青油	1.0	9	9	9	8	8	7
頁岩油	5	4	4	4	4	4	4
1 + 2 石油資源合計 (非在来型を含めた残存資源量の計算)							
Level VI †	10.8	8.6	7.3	5.8	4.8	3.8	3.1
Level VII ‡	12.0	9.4	7.9	6.1	5.1	3.9	3.3

(註) 原油と天然ガスの年間生産(採取・減耗)は、52.2億トン

†：原油について残存・期待資源の可採率が向上したとして計算したケース

‡：原油について確認埋蔵量の可採率も向上したとして計算したケース

[計算式]

R = 現在の確認埋蔵量

P = 現在の年間採油量

可採年数 R/P、

N

年間の消費の伸び率

k とすると、

計算寿命(n)は、等比数列の和の公式から誘導して次の式で与えられる

$$n = \log [N (k - 1) + 1] / \log k$$

石油資源の耐用命数を激減させるものは、消費の増大が続くことによる資源の幾何級数的な損耗だけではない。流体資源を地下から採取している油田やガス田においては、物理的な理由から採油速度には限界があり、このために損耗が進み老朽化した油田やガス田の生産能力は次第に低下してゆく。各産油層ごとの採油速度の限界は、年間量にして残存の可採埋蔵量の10パーセント以下である。この制限速度を超える採油の強行は、たちまちにして油田やガス田に回復不能の荒廃をもたらし、結果としての可採率（回収率）は極度な低下を記録することになる。このことは、永くとも可採年数（ R/P ）が10までに低下した以降には、各油田やガス田の生産力は維持できないことを意味する。世界規模での石油資源は、その耐用命数より10年短い期間にしかならず、現在規模の年間生産量を保証していないのである¹⁷⁾。

この研究報告の結論として第9表に示した計算結果は、消費の幾何級数的な増加がいかにより資源の損耗を急速化するかを物語る驚愕的な数値を示している。即ち、これによると石油と天然ガスについては、その究極資源量の限度まで新しい新油田やガス田が資源が順調に発見されつづけ、さらにタール・オイルとシェール・オイルの経済性のある資源量も目一杯に計上した最も楽観的なケースでの計算であるレベルⅦでは、手持ち資源量は計算寿命で120年分ある。然しながら、この時間も仮に毎年の石油消費の伸びが僅か2パーセントであっても、その寿命は61年しかない。さらに悪いことに現実に世界の石油不足は、その10年前から始まるのである。そしてもし今後、年率5パーセントの消費増加が続くとなると、世界は確実に $39 - 10 = 29$ 年後には構造的な石油不足の時代へ突入することを物語っている。このことは1993年から起算すると、年率2パーセントの増加であれば2044年に、もしそれが5パーセントであれば2022年

のことである。

あとがき

1972年にローマ・クラブの賢人達は、人類の生産と消費活動の成長が地球の生命環境や資源にもたらす破壊的な効果の深刻さを憂えて“成長の限界”と題する報告を世界に提示し、人類の危機への警鐘を鳴らしただけでなく、人類的な危機を回避するための必要な行動に促す研究を世界に呼びかけている¹⁸⁾。このためか今日、世界の人は環境問題と資源の重要性について多くを語るようになり、各分野で調査や対策が始められようとしている。

しかし、ローマ・クラブの報告がもっとも重視したのは人類の生産と消費活動に“成長の限界”があること、そして我々がゼロ成長下で生きていく経済と政治システムを早急に国際的規模で作り上げる必要であるという根源的な課題の提起にあった筈である。さればこそ、この報告は世界の多くの産業人や指導者達にとって厄介な嫌な問題を提示するものとして忌避されただけでなく危険視され、その主張は無視されてきたのであった。その結果、今や人々はキリスト教徒やモスLEM、ユダヤ教徒たちが信じる“世界の終末”よりも身近で切実な現実である“成長の限界”の存在を忘れ去っている。

この“成長の限界”は図らずも最初に石油資源の消費の限界の形で人類の前に立ち現れているのである。そして、そのもたらす危機の規模と様相とは、かつてローマ・クラブの賢人達とその最初の報告書に描いたものよりも遥かに大きな深刻さを持っている。石油が涸渇すればこれに替わるエネルギー源の主力が原子力以外には有り得ないことは明らかである。しかし、現在の原子力発電技術は、軍用原子炉技術の延長線上にスケール・アップして構築されており、廃棄物管理を含めた安

全性のシステムが完成していないまま実用化されている。早晚、新しい技術システムが開発されなければならないのだが、これには巨大な資金と長い時間が必要である。それが石油の涸渇の前、正確に言えば世界の石油供給における回復不能の構造的な不足が始まる以前に間に合うかどうか。この研究報告によると、それは極めてデリケートな状況にある。

註

- 1) 東京大学工学系研究科地球システム工学専攻の藤田和夫教授は、同様の疑念から1982年から1989年までの間のOPEC諸国の埋蔵量の上方修正について考察を行っている。石油鉱業連盟：石油開発時報 No.109 1996.5 P.3 ~ P.6
- 2) 石油鉱業連盟：石油開発時報 No.108 (1996.2) P.15
- 3) 石油鉱業連盟：石油系炭化水素資源に関するスタディ (石油鉱連・技術評価ワーキンググループ報告書) 昭和61年12月 P.38 ~ P.47および関連付属資料 VI、VII
- 4) 石油鉱業連盟：石油開発時報 No.108 (1996.2) P.10
- 5) 石油鉱業連盟：石油開発時報 No.108 (1996.2) P.5 & P.16 ~ P.18
石油公団：石油の開発と備蓄 '96-2 P.7 ~ P.8
- 6) M.King Hubbert : " Nuclear Energy and the Fossil Fuels " American Petroleum Institute Drilling and Production Practice. Proc., Spring Meeting, San Antonio, Texas (1956) P.7-P.25
- 7) 石油鉱業連盟：石油開発時報 No.109 (1996.5) P.8 ~ P.19
- 8) 石油公団：石油の開発と備蓄 '93-8 P.28 ~ P.30
- 9) 石油鉱業連盟：石油開発時報 No.108 (1996.2) P.9
- 10) 石油公団：石油の開発と備蓄 '83-6 P.28
- 11) 石油鉱業連盟：石油開発時報 No.109 (1996.5) P.3 ~ P.8
- 12) 石油鉱業連盟：石油系炭化水素資源に関するスタディ

- (石油鉱連・技術評価ワーキンググループ報告書) 昭和61年12月 P.38 ~ P.39
- 13) 石油公団：石油の開発と備蓄 '98-6 P.32
 - 14) 石油公団・石油鉱業連盟：石油開発資料 1986 P.112
 - 15) 第14回世界石油会議でマスターズ達が行った報告では、石油の未発見資源量の推定に確率頻度95パーセントの高位値としては0.392兆バレルを、確率頻度50パーセントの中間値としては0.470兆バレルを、確率頻度5パーセントの低位値としては1.005兆バレルを挙げ、このそれぞれに累積発見量の1.801兆バレルを加えたものを究極資源量の推定値としている
 - 16) 耐用命数の割引計算に使用した算定の数理公式は、等比数列の和を求める公式から誘導される。

R = 現在の確認埋蔵量 P = 現在の年間採油量

可採年数 R / P 、 N

年間の消費の伸び率 k

とすると、

計算寿命 (n) は、次の式で与えられる

[計算式の誘導]

$$n \text{ 年間の累積生産量 } R = P \times \sum_{m=0}^{n-1} k^m$$

等比数列の和の公式から

$$R = P \times (k^n - 1) / (k - 1)$$

$$(k - 1) R / P + 1 = k^n$$

両辺の対数をとると

$$\log [N (k - 1) + 1] = n \log k$$

$$n = \log [N (k - 1) + 1] / \log k$$

- 17) 油田における採油速度の限界についてはAR.Flowerが雑誌Scientific Americaに掲載した「世界の石油供給動向」の中で説明している (日経サイエンス1978年5月号 Vol.8 No.5 P.8 ~ P.17) 参照
- 18) " THE LIMIT TO GROWTH - A Report for THE CLUB OF ROME'S Project on the Predicament of Mankind - "