

「近未来石油枯渇論」の誤謬と埋蔵量・可採年数・ 総資源量の真実

—文明縮小論はなぜ不適切なのか？—

妹尾 裕彦

千葉大学・教育学部

The mistake of 'oil depletion in near future' and the truth of reserves,
R/P ratio and total petroleum-initially-in-place:
Why is the 'retrenchment of civilization' inadequate for us?

SEO, Yasuhiko

Faculty of Education, Chiba University, Japan

「近未来石油枯渇論」は石油および石油開発に関する基本的知識を欠いた誤謬であり、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」は非常に多い。また、石油採掘量の増加に貢献しているイノベーションを概観すれば、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」がさらに伸びる余地が十二分にあることがわかる。「近未来石油枯渇論」に基づいた文明縮小という選択は、単に不要だけでなく、未来人に対して不遜であり、しかも倫理的にも大きな問題を孕んでいる。化石燃料に依存した現代文明は今後も長らく存続し続けられるが、そのためにはイノベーションが肝要である。

キーワード：石油 (petroleum) 埋蔵量 (reserves) 可採年数 (R/P ratio)
総資源量 (total petroleum-initially-in-place)

はじめに

エネルギーをめぐる議論には、しばしば初歩的な誤解が見られる。2011年3月の福島第一原子力発電所事故以来、わが国ではエネルギーに対する関心が高まっているが、エネルギーをめぐる誤解はむしろ悪化しているように思われる。そうした誤解の典型例として、エネルギーと電力を混同した議論を挙げることができる。電力についての議論を以ってエネルギーを議論したつもりになっているのが、この種の議論の特徴である。

しかし、エネルギーと電力とはイコールではない。エネルギーとは、熱源・動力源のことであって、そこには薪、風力、水力、太陽光、地熱、化石燃料（石炭・石油・天然ガス）、原子力などが含まれる。これら熱源・動力源は一次エネルギーであるのに対して、電力は二次エネルギーである。電力は、一次エネルギーとは異なって自然界には存在しておらず、一次エネルギーをベースに、電気という形態に人為的に転換されたものに過ぎない。

世界の一次エネルギーの消費量は、2011年時点において、石油換算で121億3,100万トンとなっており、その内訳は、石油が41億3,600万トン（34.1%）、石炭が37億7,600万トン（31.1%）、天然ガスが27億8,700万トン（23.0%）、原子力が6億7,400万トン（5.6%）、水力が

3億トン（2.5%）等となっている。つまり、一次エネルギー消費量のうち88.2%を化石燃料に拠っているものであり、その主軸は石油である。また、エネルギーの利用に際してはロスがあり、一次エネルギーのすべてを利用できるわけではないが、こうしたロスを除いた世界の最終エネルギー消費量は、2011年時点において、石油換算で80億500万トンとなっている。そして、このうち電力化されて消費された割合を示す「電力化率」は、わずか19.8%に過ぎない。なお、同年の日本の電力化率は世界平均よりすこし高く、25.7%となっている（以上のデータは、日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編[2014:228-234, 240, 246]による）。

ところで、化石燃料とは、一般企業や個人が、熱源・動力源として直接的に用いることのできる——たとえば暖房や給湯、あるいは自動車の燃料などの形で——エネルギーである。しかし原子力については、一般企業や個人がこれを直接的に利用することはできない。原子力とは、原則として、電力会社が電力という二次エネルギーに転換することによってしか利用しえない、という特徴をもったエネルギーである¹。

このことは、次のことを意味している。すなわち、仮に世界中のすべての電力を原子力だけで賄ったとしても、最終エネルギー消費に占める原子力の割合は、電力化率を超えることができない、ということである（原子力を、「水力」や「風力」に置き換えても同じ）。つまり現代文明を支えている主たるエネルギーとは、化石燃料以外の何物でもないのであって、原子力や再生可能エネル

連絡先著者：妹尾裕彦

ギーでは断じてない。そして、いったん電力に転換することによってしか利用しえない原子力や水力といったエネルギーは、実際にはすべての電力を賄っているわけではなく、ごく一部を賄っているに過ぎない。したがって、これらはエネルギー源としては、いずれもきわめて周辺的な存在であるに過ぎない。

このように捉えれば、たとえば「日本においてエネルギーは、国家と電力会社によって独占的に管理・供給されてきた」(山川[2014:1])といった言明は、まったく正しくないことが了解されるであろう。もちろん、現代文明を支えるエネルギーの軸である化石燃料が、「国家と電力会社によって独占的に管理・供給されてきた」という事実はどこにも存在しないからである。この言明は、エネルギーと電力の区別をつけられないまま両者を混同してしまっていることを、露呈しているのである。

エネルギーをめぐる議論には、こうした初歩的な誤解が多い。また、エネルギーにおける化石燃料の圧倒的な存在感と優位性については、幾ら強調してもし過ぎということはない。本稿は、この化石燃料のうち最も大きな役割を果たしている石油が近未来に枯渇するという議論(以下では、こうした議論を「近未来石油枯渇論」と称する)がなぜ誤解であるかを明らかにした上で、石油資源の未来についての正しい考え方を示し、さらに「近未来石油枯渇論」をベースにした文明縮小論の不適切さを論じるものである。

I. 石油の埋蔵量・可採年数・総資源量とはどのような概念か

「世界の石油の可採年数は、あと〇年」という数値を

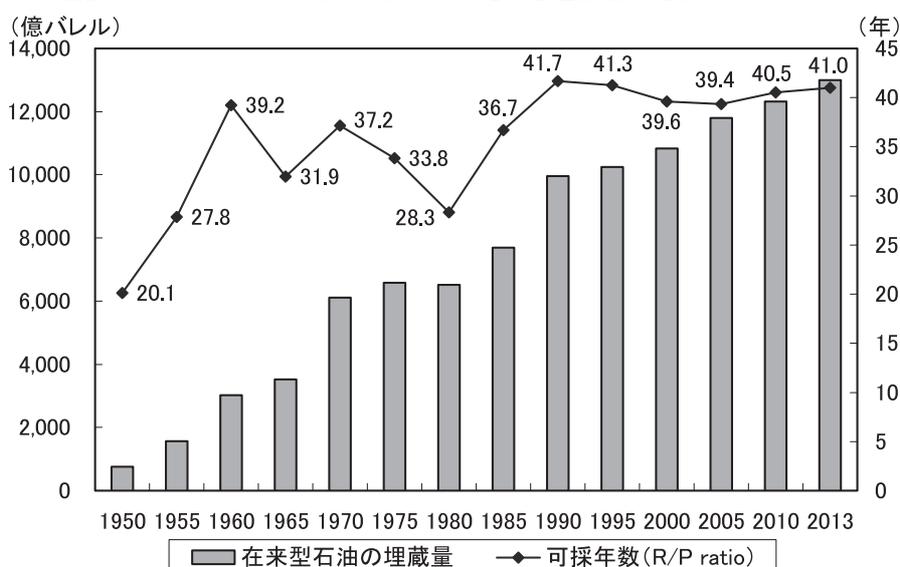
見聞きして、近未来に石油が枯渇すると考えている人は多い²。他方で、この数値を見聞きしてから〇年が経過してもなお石油が枯渇していないことや、「あと〇年」という数値が一向に低下していないことに疑問を覚える人も、少なからず存在する。

図表1は、世界の石油の可採年数(R/P比: Reserves-to-Production ratioまたはR/P ratioのこと)と埋蔵量の推移を示したものであるが、可採年数は1980年代に伸びたあと、過去20年以上に渡って40年前後でほとんど変化していない。このような推移を踏まえれば、可採年数が減少しないことに疑問を持つ人がいても不思議ではない。しかし、石油の枯渇可能性に関する懸念や、可採年数の安定性に関する疑問は、埋蔵量や可採年数といった概念の根本的な理解不足に起因していることが大半である。

そもそも、石油の「埋蔵量」とは、地球に埋まっている石油資源の総量を示す概念ではない。地球に埋まっている石油資源の総量を表すうえで最も適切な概念は、「総資源量」³である。では、埋蔵量とは一体いかなる概念なのか。総資源量と埋蔵量とは、どのような関係にあるのか。可採年数とは何であり、なぜ可採年数は安定的なのか。以下ではまず、こうした論点を解きほぐしていく。

埋蔵量は石油資源に関する基本的な概念の一つであるが、その定義については長らくの間、統一されていなかった。このため、この概念の定義の標準化を図る試みが進められてきた。1997年には、米国の石油技術者学会(SPE)が、世界石油会議(WPC)と共同で、埋蔵量の定義に関する統一見解を発表した。また2000年にはSPE, WPC, および米国石油地質学者協会(AAPG)の三者が共同で、石油資源の分類システムを開発した。

図表1：世界の石油の可採年数(R/P比)と埋蔵量の推移(1950-2013)



(注1) 1975年以前についてはPennWell社のデータから、1980年以降についてはBP (British Petroleum) 社のデータから作成しているため、厳密には接続しない。なおPennWell社のデータによる1980年の可採年数(R/P比)は、29.8年である。

(注2) BP社のデータからの作成にあたっては、カナダのオイルサンドとベネズエラのオリノコベルトの埋蔵量を除外している。

(出所) PennWell[1972:238-240][1976:12-13][1984:326][1988:349, 356][2001:274], BP[2014b]から一部を筆者が計算して作成。

図表2：石油の総資源量と埋蔵量との関係

| | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|---|-----|
| 総資源量 | 商業性を有する 既発見資源量 | 既生産量または累計生産量 | | | プロジェクトの 状況 | ↑ 商 業 開 発 機 会 の 増 加 ↓ | |
| | | 埋蔵量 | | | | | 生産中 |
| | | 1p 確認埋蔵量 proved | 2p 推定埋蔵量 probable | 3p 予想埋蔵量 possible | | | 開発中 |
| | 条件付資源量 | | | 認可・契約 手続き中 | | | |
| | 1c | 2c | 3c | 開発検討中 | | | |
| | 不可採資源量 | | | 開発延期中 | | | |
| 未発見資源量 | 期待資源量 | | | 開発対象外 | | | |
| | 悲観的見積 | 最適見積 | 楽観的見積 | | | | |
| | 不可採資源量 | | | | | | |
| ← 確 実 性 の 度 合 い → | | | | | | | |

(出所) 関口[2007:75]を筆者が改変して作成。

さらにSPEは、WPC、AAPG、および石油評価技術者協会（SPEE）の支援をうけて、新たな埋蔵量の定義と分類基準の策定を進め、2007年3月に「石油資源量のマネジメントシステム」を公表した（関口[2007:73-74]）。そこで示された埋蔵量と総資源量との関係を図解したのが、図表2である。

図表2について、まず縦軸から説明する。地球上にあると評価時点で見積もられている石油資源の総量が「総資源量」であり、これは「既発見資源量」と「未発見資源量」に大別される。このうち既発見資源量は、「商業性を有する」資源と、「商業性に劣る」資源とに区別される。このうち前者は、「既生産量または累計生産量」と、今後採掘予定の「埋蔵量」に細分され、後者は、現時点で諸条件が満たされておらず商業化の目処が立っていない「条件付資源量」と、そもそも技術的に採掘できないと見られている「不可採資源量」に細分される。また、未発見資源量についても、今後の採掘が可能になると期待しうる「期待資源量」と、そもそも技術的に採掘できないと見られている「不可採資源量」とに細分される。

次に、横軸について説明する。地球上に存在している油田の総量は、試掘や地震探査などによって得られたデータに基づいて、地質学的・油層工学的に推計されるが、この推計の確からしさによって、上述の埋蔵量は3つのカテゴリーに分けられる。

このうち「確認埋蔵量」(proved reserves)とは、推計の確からしさが90%以上の場合である。つまり、ほぼ確実に存在が見込める量であり、高い精度で確定している量とも言える。次に「推定埋蔵量」(probable reserves)とは、推計の確からしさが50%以上の場合である。最後の「予想埋蔵量」(possible reserves)とは、推計の確か

らしさが10%以上の場合であり、かなり精度が落ちる。そして通常、埋蔵量とは、このうち確認埋蔵量のことだけを指しており、推定埋蔵量や予想埋蔵量は含まれないのである。

さて、確認埋蔵量とは、固定的なものではない。というのも、確認埋蔵量としてカウントされている石油は、常に生産され消費され続けているが、他方で、確認埋蔵量に新たに区分される石油が多くあるからである。その最もわかりやすい例は、新規の油田発見であろうが、これ以外にも大きく二つのパターンが存在する。

その第一は、推定埋蔵量や予想埋蔵量にとどまっていた石油が、確認埋蔵量にカウントされるようになることである。石油の生産が進む過程においては、当初の推計よりも多く石油が埋蔵されていると判明することが一般的である。これは、生産の過程で各種のデータが充実することで、推計の確からしが高まるためであるが、見方によっては、「推計の確からしさが90%以上」という確認埋蔵量の定義が、もともとかなり保守的だと言えるかもしれない⁴。また第二に、商業性に劣るとされていた条件付資源量から、商業性を有する埋蔵量に格上げされて、新たに確認埋蔵量としてカウントされる場合もある。このように、時間の経過のなかで、推定埋蔵量や予想埋蔵量から、あるいは条件付資源量から、確認埋蔵量に入っていく見込みの量のことを、「埋蔵量成長」(reserves growth)と呼ぶ。

ここで、商業性を有する埋蔵量と、商業性に劣る条件付資源量との区分について、詳述しておこう。両者の区分に影響を与える要因としては、①原油価格、②採掘技術、③油田が存在する国の税制、④市場の有無、などがある。まず①についてであるが、油田のなかには採掘コストが高くつくものがある。こうした油田を採掘する際

に、原油価格が安価だと、赤字になってしまう。したがって採掘コストの高い油田は、原油価格が一定以下であれば開発対象になりえないが、原油価格が上昇すると開発対象になりえる。このように原油価格は、商業性の有無に大きな影響を与える。次に②についてであるが、油田のなかには、採掘に高度な技術を要するために、ある時点では商業的にはペイしないものがある。しかしこれも、技術的なブレイクスルーによって採掘コストが低下すると、採算が取れるようになることがある。

さらに③については、産油国によって税制や税率は異なるため、石油から得られる利益も左右されることを指摘できる。担税コストが高つくために採掘が見送られる油田であっても、政策転換によって担税コストが低下すれば、開発対象になることもある。最後に④についてであるが、そもそも石油を採掘しても売れる見込みがなければ（あるいは、供給過剰となってしまうのであれば）、生産しても意味がない。どれほど有望な油田であっても、販路がなければ開発対象にはなりえない。

このように、ある評価時点では商業性に劣る油田であっても、何らかの変化によって商業性を有するようになれば、条件付資源量から埋蔵量に格上げされるわけである。もちろん、逆に格下げされることもありうる。

では、商業性の有無はどのように判定されるのか。図表2の右側には、油田開発プロジェクトの状況が記されている。このうち「開発中」(Approved for Development)とは、「すべての認可を取得済みで資金計画が決定され、かつ開発が実行段階にある」という意味である(関口[2007:76])。これに対して「契約・認可手続き中」(Justified for Development)とは、「合理的に想定した将来の商業条件での開発に問題がなく、かつ必要とする認可や契約が確実に得られる見通し」という段階のことを意味しており、また「合理的に想定した将来」とは「5年」が目処とされている、という(関口[2007:76])。つまり5年以内に「開発中」に移行する見込みのないプロジェクトは、「契約・認可手続き中」ではなくなって、商業性のある埋蔵量にはカウントされない。このように、埋蔵量というものは先天的に定まっているものではなく、その時々諸条件に影響されながら、人為的、社会的、経済的に定まるものである。

以上のように、確認埋蔵量としてカウントされている石油は、一方では常に生産されて減少しつつも、他方では常に推定埋蔵量や予想埋蔵量、あるいは条件付資源量から補充されている。したがって確認埋蔵量とは、《現在生産中または近い将来に商業生産が開始される予定で、なおかつ確実に産出を見込める量》の意であって、比喩的に言えば、「在庫」のようなものだと言って良い⁵⁾。

このことから、可採年数(R/P比)が安定的である理由も明らかとなる。「可採年数(R/P比)＝確認埋蔵量/年間生産量」であるが、石油の需要量には限度がある以上、企業はむやみに確認埋蔵量となる「契約・認可手続き中」の油田開発プロジェクトを増やすわけがない。もしもむやみに増やしたら、近い将来にその石油が地上に出てくることになるが、需要がなければ行き場を失うし、場合によっては油価の低落を招いて赤字になってしまうからだ。これは、企業が在庫をむやみに積み増ししない

のと同じことである。在庫は多すぎても少なすぎても良くないのであり、適正規模でなければならない。可採年数が大きく上下動せず安定的なものも当然かつ適切であって、むしろ極端に変動するほうがおかしいのである。

可採年数とは、石油資源の寿命を意味する概念ではない。したがって、これを以って、「石油はあと〇年で枯渇する」と捉えるのは、誤解以外の何物でもない(このため、以下では可採年数という言葉を用いず、「R/P比」という言葉を用いる)⁶⁾。

II. 「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」をどう捉えるか

石油資源の寿命を考える上で、埋蔵量という概念はほとんど何の役にも立たない。石油資源の寿命を考えるには、まず、確認埋蔵量以外の部分に目を向けることから始めなければならない。

日本の石油鉱業連盟は、1986年以来、おおむね5年に一度のペースで、世界の石油・天然ガス等の資源に関する量的評価を行ってきた。その最新版である第6回の「石鉱連資源評価スタディ」(2010年末時点)の成果は、石油鉱業連盟編[2012]としてまとめられているが、このスタディのワーキング・グループの座長を務めた藤田は、2010年末時点での世界の在来型石油の確認埋蔵量・埋蔵量成長・未発見資源量の値を、図表3のように報告している。ただし、ここで言う「未発見資源量」とは、図表2で示された「未発見資源量」とは異なり、2025年までに発見され商業的に生産可能と見なされる量のことであり(詳細は、第4節を参照)。

これによれば、2010年末時点での世界の石油の確認埋蔵量は1兆2,018億バレル、埋蔵量成長は4,095億バレル、未発見資源量は5,215億バレルであり、合計すると2兆1,328億バレルである(1バレル＝159リットル)。なお、2010年の全石油の生産量は約293億バレル(藤田[2012:13])なので、合計のR/P比は72.8(年)、となる⁷⁾。

こうした数値を見て、「やはり2083年頃には石油は枯渇するのではないかとか、「石油は21世紀中に使えなくなるに違いない」と思う人は多い。だが、これも誤解である。なぜなら、上記のデータは「在来型石油」に限定されており、地球上に存在するすべての石油に関するデータではないからだ。

そもそも、地球上に存在する石油は、在来型石油と非在来型石油の二つに大別される。在来型石油とは、現在

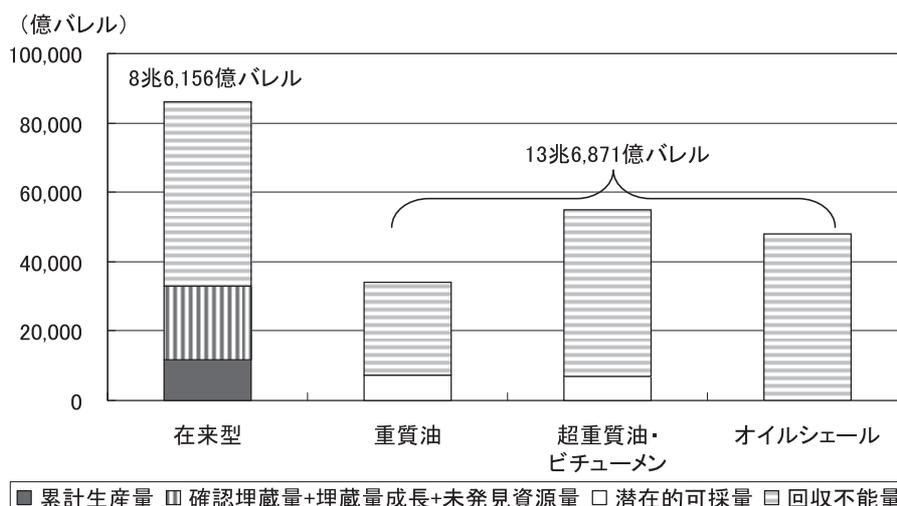
図表3：在来型石油の確認埋蔵量・埋蔵量成長・未発見資源量(2010年末時点)

| | 量 | 増減率 |
|--------|-------------|--------|
| 確認埋蔵量 | 1兆2,018億バレル | 7.9% |
| 埋蔵量成長 | 4,095億バレル | -16.7% |
| 未発見資源量 | 5,215億バレル | 26.4% |
| 合計 | 2兆1,328億バレル | 5.7% |

(注) 増減率は、前回評価時(2005年末時点)との比較。

(出所) 藤田[2012:13]より一部を筆者が計算して作成。

図表4：在来型石油と非在来型石油の総資源量とその内訳



(出所) 藤田[2012:13, 15, 35]より筆者が作成。

の汎用的な採掘・回収技術や操業施設によって商業的に生産される石油であり、自噴またはポンプで生産可能である。当然、一定以上の流動性のある石油である。これに対して非在来型石油とは、粘性が高く流動性に乏しい石油である（油層内で半固体状になっていることもある）ため、在来型石油とは異なる採掘・回収技術が必要となる。具体的には、重質油、超重質油、およびオイルシェール（図表5のケロジェンの段階に留まっているもの）がこれに該当し、有名なものとしては、ベネズエラのオリノコタル（重質油・超重質油）や、カナダのオイルサンド（超重質油）が挙げられる。そして、これまで確認埋蔵量・埋蔵量成長・未発見資源量としてカウントされてきた石油は、在来型石油のみであって、非在来型石油についてはカウントされていないのである⁸。では、在来型石油と非在来型石油は、それぞれ地球上にどれほど存在していると考えられているのだろうか。

図表4は、「石鉱連資源評価スタディ」(2010年末時点)で報告されている在来型石油と非在来型石油の総資源量を、内訳を含めて示したものである。まず在来型石油については、このスタディでは総資源量を8兆6,156億バレルとしている。内訳は、これまで人類が既に生産した累計生産量が1兆1,689億バレルであるのに対して、確認埋蔵量と埋蔵量成長と未発見資源量を合わせた量が2兆1,328億バレルである。また累計生産量と確認埋蔵量と埋蔵量成長と未発見資源量を合算したものを究極可採埋蔵量と称するが、これは3兆3,017億バレルとなり、総資源量全体の38%を占める⁹。他方で、回収不能量は5兆3,139億バレルとなっており、全体の62%と過半を占めている。

次に非在来型石油については、このスタディでは総資源量を13兆6,871億バレルとしている。内訳は、重質油が3兆3,960億バレル、超重質油・ビチューメンが5兆5,050億バレル、オイルシェールが4兆7,861億バレルである。なお、これらの究極可採埋蔵量は算出されていないが、期待される潜在的な可採量として、Rogner *et al.* [2000:140-141]の記述内容をおおむね踏襲しながら、重質油で7,174億バレル、超重質油・ビチューメンで7,124億

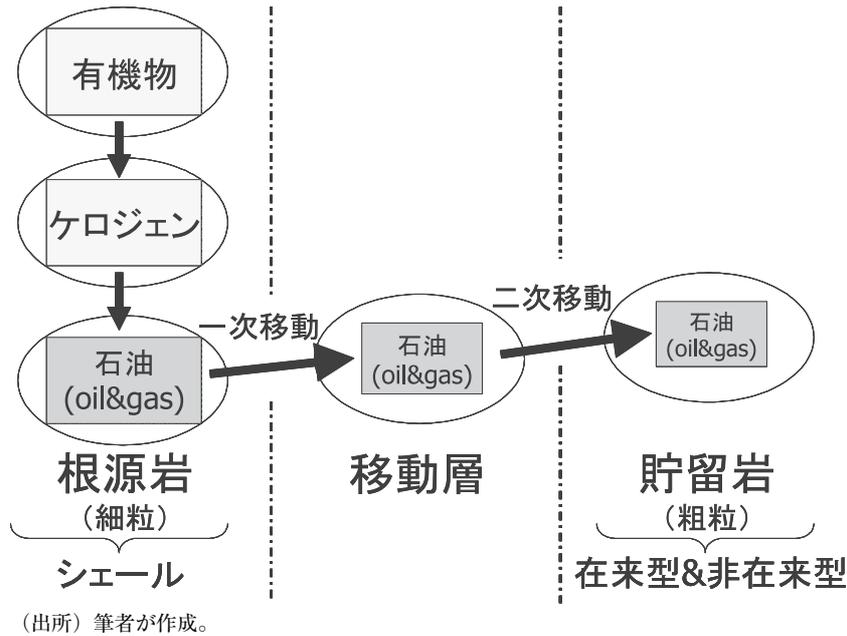
バレル、合計して1兆4,298億バレルとしている¹⁰。ただしオイルシェールについては、回収のプロセスが複雑なうえ、これまでの回収の事例が極めて限られていることから、期待される潜在的な可採量についての評価は避けられている。

このように、在来型に非在来型を加えた石油の総資源量は、22兆3,027億バレルとなり、膨大な量があることがわかる。また、在来型石油で今後の採掘が見込まれる量（確認埋蔵量+埋蔵量成長+未発見資源量）の2兆1,328億バレルと、非在来型石油で期待される潜在的な可採量の1兆4,298億バレルとを合わせると、3兆5,626億バレルとなり、R/P比は121.6（年）となる。したがって、少なくとも現在の消費ペースで考える限り、21世紀に石油が枯渇するとは考えられないことになる。だが、議論はこれだけでは終わらない。というのも、地球上の石油は、まだこれで全てではないからだ。

シェールオイルと呼ばれる石油がある。米国を中心に2008年頃から急速に進展しているシェール革命によって、シェール層から産出されている石油のことであるが、このシェールオイルは、図表4のどこにもカウントされているのだろうか？ じつはどこにもカウントされていないのであり、しかしこれを無視して地球上の石油の総資源量を考えることはできない。ただしその前に、やや迂遠となるが石油生成の仕組みを簡単に把握しておこう。

石油は、主に中生代（ジュラ期・白亜紀）～新生代（第三紀）に堆積した藻や植物などの有機物の遺骸が変質したものであり、この有機物が堆積した岩石が「根源岩」である（この根源岩は、泥岩や頁岩（シェール）などの粒の細かい岩石が多い）。さて、堆積した有機物は、まず埋没の初期に「ケロジェン」に変質し、さらにこれが地下という高温下で徐々に石油に変質していく。そして根源岩中の油含有量が上昇すると、石油は根源岩の外に排出されて、移動層（carrier bed）へ移動していく。これを一次移動と称するが、すべての石油が排出されるわけではなく、何割かは根源岩に残留する。また、一次移動した石油は最終的に「貯留岩」に到達して、油の集積を作る。これを二次移動と称し、貯留岩は砂岩や炭酸

図表5：石油生成のプロセス



塩岩などの粒の粗い岩石である。なお、根源岩から排出された油がすべて貯留岩に到達するわけではなく、移動中のロスもある。

さて、これまで論じてきた在来型石油と非在来型石油はともに、貯留岩に到達した石油であるのに対して、シェールオイルとは、根源岩に残留した石油なのである。以上を図解でまとめたのが図表5である¹⁾。

シェールオイルは、近年になって新規に発見されたものではなく、その存在はかねてより知られていた。ただし、この生産を大規模かつ商業的に行なう方法が見つかっておらず、それが可能になると殆ど考えられていなかった。こうした背景もあって、石油の総資源量の検討から、いわば除外されていたのである。ところが、シェール開発の父とも言うべきジョージ・ミッチェルが編み出した革新的なイノベーションによって、21世紀に入ってから急速に回収が進み始めたのは周知のとおりである。

では、その総資源量はどの程度か。これについては未だ不透明な部分も多いが、ここでは、奥井[2012]の推計を取り上げたい。奥井の研究成果は、以下のようにまとめられる。①データの揃っている世界の約80の堆積盆地での石油生成量を計算した結果は、約120兆バレルとなり、また幾つかの油田で石油生成量と原始埋蔵量（総資源量）の比を計算すると、ばらつきがあるものの最大で約10%となっているので、在来型の原油の原始埋蔵量（総資源量）は約12兆バレルに達する可能性がある。②データの揃っていない堆積盆地もあるため、世界の石油生成量は約120兆バレルより多い可能性もある。③根源岩からの一次移動については、岩の性質によって0～80%まで変化するため、仮に平均50%とすると、根源岩には約60兆バレルが残留していることになる。これが「シェールオイル&ガス」であり、現在の技術によるシェールオイルの回収率は数%なので、仮に5%とすると回収可能量は約3兆バレルとなるが、これには現在の

図表6：人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量

| | |
|--------------------|-------------|
| 在来型石油で今後の採掘が見込まれる量 | 2兆1,328億バレル |
| 非在来型石油で期待される潜在的採量 | 1兆4,298億バレル |
| シェールにおける暫定的な回収可能量 | 3兆バレル |
| 合計 | 6兆5,626億バレル |

(出所) 藤田[2012:13, 35]および奥井[2012:138]から、筆者が作成。

技術で開発の難しい海洋のものも含まれている。

シェール層からの採掘はまだ始まったばかりであり、操業のオペレーションに関しても事例が豊富に積みあがっているわけではないため、回収率一つとっても在来型と比較すると、さほど定かではない。とはいえ、シェール層に膨大な量の化石燃料が眠っていることは確実である。

また上記の推計に基づけば、在来型石油で今後の採掘が見込まれる量（確認埋蔵量+埋蔵量成長+未発見資源量）と、非在来型石油（重質油+超重質油・ビチューメン）で期待される潜在的採量と、シェールにおけるこの暫定的な回収可能量とを全て合算すると、6兆5,626億バレルとなり、R/P比は一挙に224.0（年）となる。本稿では、これらを「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」と一括したい（図表6）。

シェール層の開発の進展は、しばしばシェール革命と呼ばれている。それは、これまで、「人類が採掘可能な石油は、在来型であれ非在来型であれ貯留岩にほぼ限られる」と考えられていたものが、根源岩というこれまで採掘可能になるとは考えられていなかったところの膨大な資源を利用しうる可能性が現実化し、人類が使用できる化石燃料の総量が激増する見込みが出てきたからである。つまり、シェール革命の革命たる所以は、革新的なイノベーションが出現したことよりも、これによって人類の前にまったく新しい膨大な資源開発のフロンティア

が出現したという点に求められるのである¹²。

Ⅲ. 石油探掘量の増加に貢献するさまざまなイノベーション

次に、石油の探鉱・掘削・生産に関わる近年のイノベーションのうち、石油探掘量の増加にポジティブな影響を与えているものを幾つか取り上げて、その内容や経緯を確認しておきたい。いずれもやや教科書的な説明になるが、こうしたイノベーションを把握しておかないと、人類の石油開発の進化を適切に理解することができないからである。

まず、生産中の油田からより効率よく石油を回収することを可能にしているイノベーションを取り上げる。次いで、油田の新規の発見や、採掘を新規に可能にしたイノベーションを取り上げる。

(1) 回収率の向上

石油というものは、油田にある量のすべてを採掘できるわけではない。油田に眠っている量のうち実際に採掘できる量の割合を回収率と呼ぶが、その値は在来型石油の世界平均で現在のところ35%強とされている。しかし、この回収率は時代によって大きく異なり、20世紀初頭のアメリカでは、わずか2~3%程度に過ぎなかったという。ここでは、回収率の向上のさまざまな手法を、確認しておきたい。

油田は、採掘の当初は自噴するのが通常であり、この自噴と人工的な採油法（ポンプ採油法など）とをあわせて「一次回収」と呼ぶが、一次回収による回収率はそれほど高くなく、10~30%程度とされている（数%に留まる場合もある）。そこで、この回収率を高めるため技術、すなわち「二次回収」ならびに「三次回収」の手法が開発されてきた。

二次回収の手法としては、水攻法とガス圧入法とがある。いずれも油層圧力の減退を補うために水やガスを圧入することによって、油層内の石油を生産井に追い遣ることで回収率を高める、というものである。一次回収と二次回収とをあわせて在来型回収法と呼び、ここまでで回収率は40~50%程度にまで高まる。これに対して三次回収とは、圧力以外の要因で回収率を高める方法であり、EOR（Enhanced Oil Recovery：増進回収法）とも呼ばれる。具体的には、熱攻法（油層内に水蒸気や火で熱を加えることで、石油の粘性を下げ流動性を高める）、ガス攻法（油層内に炭酸ガスを注入して石油に溶かすことで、石油を膨張させる）、ケミカル攻法（化学薬剤を用いて、原油の流動特性や、原油と貯留岩との間の毛細管圧力を変化させる）などがある。いずれも二次回収とは異なって、圧力以外の要因に働きかけることによって回収率を高めるという点で共通している。三次回収によって、回収率は60~70%程度まで高まるとされる。

EORの技術は必ずしも新しいわけではなく、なかには半世紀以上の歴史を持つものもある。ただし、EORの実施には相応のコストがかかること、またEORの適用は一次回収・二次回収の後となることもあって、これが実施されている地域は北米に多く、中東では僅少と

なっている。中東では一次回収の域に留まっている油田が多く、まだ三次回収にまで進む必要性が生じていないためである。

このように、当初は自噴頼みだった石油生産であるが、ポンプの利用を経て、回収率を高めるさまざまな手法の開発の結果、その回収率は少しずつ高まってきており、今後も向上が見込まれている。このため、2030年までに50%以上まで上がるだろう、と指摘されている（Maugeri [2009:63]）。

(2) 油田の新規の発見や、採掘を新規に可能にしたイノベーション

油田の新規の発見や、採掘を新規に可能にしたイノベーションとして取り上げるべき第一は、三次元地震探査と呼ばれる手法である。これは、まず油田があると考えられる場所で人工的に地震を起こしてその地震の波動データを収集し、次いで収集したデータをスーパーコンピュータで解析することで地層を立体的に画像化する、というものである。これによって、地層構造を詳細に把握することが可能になったため、油田発見の確率が向上した。

三次元地震探査が陸上で初めて実施されたのは1972年であるが、当時のごく限定的な実施にとどまっていた。しかも探鉱よりも試掘後の開発の段階で主に用いられていた。これの実施が本格化したのは1980年代になってからのことであり、1980年代末には探鉱段階でも積極的に利用されるようになった（倉澤[1994:76, 79]）。この三次元地震探査の普及には、石油開発を取り巻く諸条件の変化が関わっているのだが、この技術の黎明期に存在していたソフトウェアや計算機の制約が徐々になくなってきたことも、見逃せない。

人間は地下を直接見ることはできないから、かつての石油開発は千三つとも称されるほど博打的な性質を帯びていた。だが、この手法によって地下の構造を把握できるようになったため、博打的な性質は薄れた。なお、四次元地震探査法というものもあり、これは掘削前のみならず、生産開始後にも地震探査を行なうことで、生産の前後での油層内の油の動きを比較するものである。つまり四次元とは、三次元地震探査に時間軸を加えたものであり、これによってオペレーションを最適化し、生産性を向上させることも可能になっている。

第二は、坑井を曲げる傾斜坑井である。これには、坑井を途中で分岐させる「マルチラテラル坑井」や、坑井を途中でほぼ水平にする「水平坑井」といった応用形もある。油田掘削の基本形態は垂直坑井であるが、この傾斜坑井技術の発展によって、沿岸部の油田であれば海上から掘削せずとも陸上から掘削することが可能になった。サハリンでは、深さと水平到達距離ともに11,000mを超える世界記録が達成されている（Website[1]）。また、坑井を途中で分岐させることで、油層毎にリグ（掘削装置）を設置する必要がなくなったため、より低コストで効率的に開発できるようになったことも、大きな意義の一つである。さらに、水平に掘削することで、貯留層との接触体積を大きく取れるため、生産量を向上させることができるという意義もある。なお、水平坑井の歴史は

図表7：海底油田の生産設備



(注) 右から順に、FPSO、TLP、Spar、セミサブマーシブル（以上、浮体式プラットフォーム）、および固定式プラットフォーム。

(出所) 三井海洋開発株式会社HP。

少なくとも1929年まで遡ることができるが、これが広まり始めたのは1980年代のことである（伊原[2009:1-2]）。

第三は、大水深・超大水深での生産を可能にしているさまざまな浮体式の生産設備である。世界の石油産出量のうち海底油田からの産出の割合は、1970年時点では1割にも満たなかったが、現在は4割近くにまで達したとされている（伊原[2014:2]）。図表7は、主な海底油田生産設備の図解である。

海底油田の生産設備は、「固定式」と「浮体式」とに大別できる。世界で最初に海底油田から生産が開始されたのは1947年11月のことであったが、その水深はわずか6メートルに過ぎなかった¹³（PennWell[1980:28]）。この海底からの採掘が本格化したのは1960年代末からのことであるが、当時はまだ固定式が用いられてきた。しかし、固定式では水深400m程度が限界であり、これ以上の水深には適用不可能となる。そこで、大水深・超大水深での生産を可能にするために、新たな生産設備として浮体式が編み出され、この形式による石油生産は1990年代以降に本格化した。

浮体式の生産設備には、FPSO、TLP、Spar、セミサブマーシブルなどさまざまなものがあり、それぞれの油田の特徴や条件などに即して、最適な方式が選択されている。また、当初の適用は水深数百m程度にとどまっていたが、1,000m超、1,500m超、2,000m超と徐々に広がっており、今日、世界最深の油田は水深2,600mとなっている（伊原[2014:7]）。海底油田の開発技術は、1990年代以降に大きく進歩しており、こうした進歩こそが、石油産出量に占める海底油田からの産出の割合の増加に貢献している。

第四に、非在来型石油のオイルサンドの生産方法についても、触れておきたい。オイルサンドからの石油の回収方法には、「露天掘り」と「油層内回収法」の二つがある。このうち露天掘りは、ショベルで採掘した砂を機械にかけて、砂に含まれているビチューメンと呼ばれる油分を抽出するものであり、1バレルのビチューメンを得るのに、約2トンの砂が必要とされる。露天掘りの技術的・経済的な限界は地下80m程度であり、これ以下については、油層内回収法が一般的となる。なお、露天掘

りによる採掘が済んだ後には、地表に再生措置が施されるものの、環境破壊を懸念する声はある。

油層内回収法としては、CSS（Cyclic Steam Stimulation）法と、SAGD（Steam Assisted Gravity Drainage）法の二つがある。いずれも、油層内に蒸気を注入し、超重質油の粘性を下げ流動性を高めることで、坑井からビチューメンを回収する方法であるが、近年一般的になっているのはSAGD法である。これは、2本の油井を約5m間隔で水平に掘削し（この水平区間は最大で1,000mに達する）、上の水平井から高温高压の水蒸気を注入すると、油層内で熱せられたビチューメンは流動性が高まって下に滴り落ちるので、これを下の水平井で温水と共に回収する、という仕組みである。SAGD法は、日系のJapan Canada Oil Sands Limited（JACOS）によって1978年に設立されたカナダオイルサンド株式会社（CANOS）が、長年の試行錯誤と研究開発の末に編み出した生産手法であり、1999年に試験生産が開始され、2003年に商業生産に入った新しい生産手法である（齊藤[2011]）。このSAGD法は、露天掘りのように地表を剥がないため、地表環境への影響は道路や施設の設置など最小限で済むほか、回収率も在来型石油よりもはるかに高く、5～7割程度が見込まれている。

なお、生産されたビチューメンは、常温では粘度が高く流動性のない超重質油であるため、パイプラインでは出荷できない。そこで、①軽質油で希釈する、②アップグレーディング、すなわち加工を施して軽質原油に改質する、といった工程を経て出荷されている。

以上のようなイノベーションは、いずれも30～40年前には存在していなかったか、あったとしても極めて萌芽的なレベルに留まっていた。また、これらの多くは、その出現後も進歩を遂げてきた。これらは、この数十年の間に出現・進歩したさまざまな石油探鉱・掘削・生産技術の一部に過ぎないものの、こうした諸々のイノベーションの積み重ねと組み合わせによって、石油採掘量の着実な増加が図られてきたのである。

IV. 「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」はまだ伸びる余地が大いにある

通俗的な理解に反して、地球上にはすさまじく膨大な量の石油資源がある。また「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」も、相当量に上る。だが、この「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」は、第2節で見たよりもさらに伸びる可能性が十二分にある。以下では、その根拠を示そう。

(1) 回収率向上の巨大なインパクト

第3節で、回収率を向上させる手法を概観した。かりに新規に油田を発見しなくても、この回収率を高めるだけで、究極可採埋蔵量は大幅に増加しうる。たとえば、在来型石油の回収率の世界平均は現在35%強だが、もしこれが倍加して70%になれば、在来型石油の究極可採埋蔵量は6兆309億バレルにも達しうる。累計生産量を差し引いても、まだ4兆8,620億バレルが見込めることになるので、図表6で示した「人類にとって利用可能と見

込みうる石油の総量」はこれで9兆2,918億バレルにまで増加し、R/P比は317.2（年）に跳ね上がる。

回収率70%という数値は、高く見積もりすぎであろうか。世界的に有名な石油企業の一つであるシェブロン社は、将来的に回収率を80%にまで高めることができると考えていることからすれば（Website[2]）、この値が荒唐無稽だとは言えないように思われる。

(2) 「非在来型石油で期待される潜在的可採量」の数値は、保守的ではなからうか？

第2節（特に図表4）において、最新の「石鉱連資源評価スタディ」（2010年末時点）が、非在来型石油のうち、重質油の総資源量を3兆3,960億バレル、超重質油・ピチューメンの総資源量を5兆5,050億バレルとしていることを述べた。また期待される潜在的可採量については、Rogner *et al.* [2000:140-141]の記述内容をおおむね踏襲しながら、重質油で7,174億バレル、超重質油・ピチューメンで7,124億バレルとしていることを紹介した。

しかし、Rogner *et al.* [2000:140-141]では、重質油の総資源量を2兆3,099億バレル、超重質油・ピチューメンの総資源量を4兆796億バレルとしており¹⁴、そのうえで、期待される潜在的可採量として、重質油で7,174億バレル、超重質油・ピチューメンで7,124億バレルとしている。つまり回収率は、重質油で31.1%、超重質油・ピチューメンで17.5%となっているわけであるが、「石鉱連資源評価スタディ」（2010年末時点）ではこの回収率を「妥当な値だと思われる」としている（藤田[2012:35]）。

他方で、重質油の総資源量が3兆3,960億バレル、超重質油・ピチューメンの総資源量が5兆5,050億バレルという数値は、Rogner *et al.* [2000:140-141]の記述内容ではなく、より新しい研究成果であるMeyer, Attanasi, and Freeman[2007:17]に、「石鉱連資源評価スタディ」（2010年末時点）が依拠したものなのである。そうであるならば、このMeyer, Attanasi, and Freeman[2007]で示された総資源量に、上記の回収率を乗じることによって、期待される潜在的可採量を算出するほうが適切であるように思える。そこでその値を算出すると、重質油で期待される潜在的可採量は（7,174億バレルではなく）1兆561億バレル、超重質油・ピチューメンで期待される潜在的可採量は（7,124億バレルではなく）9,634億バレル、合計すると2兆195億バレルとなる。

したがって、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」（図表6）のうち、非在来型石油（重質油+超重質油・ピチューメン）で期待される潜在的可採量を、この2兆195億バレルに改め、また在来型石油については前項（1）で示した補正値を踏襲するならば、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」は9兆8,815億バレルとなり、そのR/P比は337.3（年）となる。

(3) シェールの資源の見積もりは、保守的ではなからうか？

第2節において、奥井[2012]による推計を取り上げた。その内容を改めて簡単に述べるならば、データの揃っている世界の約80の堆積盆地での石油生成量を計算した結

図表8：人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量（補正後）

| | |
|--------------------|--------------|
| 在来型石油で今後の採掘が見込まれる量 | 4兆8,620億バレル |
| 非在来型石油で期待される潜在的可採量 | 2兆195億バレル |
| シェールにおける暫定的な回収可能量 | 6兆バレル |
| 合計 | 12兆8,815億バレル |

（出所）藤田[2012:15, 35]および奥井[2012:138]をふまえて、筆者が計算して作成。

果は約120兆バレルであり、また根源岩から排出されない石油の割合を50%とすると、約60兆バレルがここに残留している、そしてシェールオイルの回収率を5%とすると回収可能量は約3兆バレルとなる、とされていた。

しかし、これには現在の技術で開発の難しい海洋のものも含まれているとはいえ、回収率が今後も5%で推移するとは考えにくい。そこで、イノベーションによって回収率が10%になるとすれば、これだけで約6兆バレルを見込めることになる。

したがって、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」（図表6）のうち、シェールにおける暫定的な回収可能量を、この6兆バレルに改め、また在来型石油については前項（1）で示した補正値を踏襲し、非在来型石油については前項（2）で示した補正値を踏襲するならば、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」は12兆8,815億バレルとなり（図表8）、そのR/P比は439.6（年）となる¹⁵。

(4) 限定されている埋蔵量成長と未発見資源量

第2節で紹介した埋蔵量成長と未発見資源量は、「石鉱連資源評価スタディ」（2010年末時点）が示したものであるが、石油鉱業連盟がこの数値を算出するにあたって依拠した基礎資料の一つが、USGS[2000]である。さて、このUSGS[2000]では、埋蔵量成長や未発見資源量を算出するにあたって、①対象期間は1996～2025年、②世界937の地質区のうち406地質区を対象とする、という条件を設定している（USGS[2000:IN-5, IN-6, RH-3]）。

つまり、USGS[2000]で示された埋蔵量成長や未発見資源量は、限定された時空間で得られる見込みの量に過ぎないのであって、人類に残された埋蔵量成長や未発見資源量のすべてではない。もとより、「石鉱連資源評価スタディ」（2010年末時点）では、USGS[2000]での限定条件を踏襲しているわけではなく、空間的には世界937の地質区を対象とするように拡張されているのだが、時間的には2025年までとなっていることに変わりはない（吾妻[2012]）。

埋蔵量成長と未発見資源量は、いずれ発見されるだろう石油資源のすべてではないことに留意したい。

(5) 探査の進んでいない堆積盆地の存在

イタリア炭化水素公社（ENI）の役員を務めたマウゲーリによれば、地球上の堆積盆地——石油が賦存するとされる——のうち、現代的技術によって徹底的に探査されたのはわずか1/3に過ぎない、という（Maugeri[2009:59]）。

これまでに探査がもっとも濃密に実施されてきたのが、石油産業発祥の地・米国であることは言うまでもない。他方で、国土やその沿海が堆積盆地に位置していながら探査が進んでいない地域は、途上国に多い。

もっとも、このように探査の進んでいない地域にどれほどの資源が眠っており、どれほどの量が回収可能であるかを記述することは、本稿の課題を大きく超えている。ここでは前項同様に、新たな油田発見の可能性が世界各地に残されていることを確認しておくに留まらざるをえない。

(6) 予想される批判

ここまで、「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」の多さを強調してきたが、こうした主張に対する批判の一つとして、「残されている石油の少なからぬ部分は自噴不可能であり、そのエネルギー収支（EPR）はこれまでの在来型石油に比べて低い」というものがある。EPR（Energy Profit Ratio）¹⁶とは、あるエネルギーを得るために要するエネルギー1単位によってどれだけのエネルギーを得られるかを示す値であり、大きいほど効率が良い。またEPRの値が1未満だと、そのエネルギーを入手しようとすればするほど逆にエネルギーが失われることになる。したがって、この批判のポイントは、問題は量ではなく質なのだ、という点にある。

わが国におけるこうした主張の例として、ここでは石井[2006]を取り上げよう。彼は、オイルサンドのEPRは1.5程度に過ぎず、またオイルシェールも資源としての価値は低い、とする（石井[2006:118-119]）。その上で、彼は次のように述べる。

「石油の資源量は究極的には約2兆バレルと見られている。その半分を人類は既に使ってしまった。これが石油ピーク論の原点となる。だが楽観的な人々、組織人などはそうは思わない。例えば、アメリカの地質調査所・USGSなどは、埋蔵量は3兆バレルという。またエネルギー専門家なども、オイルサンド、オイルシェールまで入れると9兆バレルの石油があると主張する。（中略）

そこで推定埋蔵量2兆バレルと9兆バレルだが、これには本質的な違いはない。その答えは『資源の質』をどう考えるかの問題である。（中略）繰り返すが、資源の『量』のみで考えると、9兆バレルとなる」（石井[2006:148-149]）。

まず、冒頭にある「石油の資源量」というのは、誤解を招きやすい表現である。文脈から考えるに、「石油の埋蔵量」とすべきであろう。それはともかく、石井のような石油悲観論者（あるいはいわゆるピークオイル論者）には、USGS[2000]が示すような埋蔵量成長や未発見資源量の増加をほとんど考慮しないという特徴があるが、これはフェアではない。たしかにEOR（増進回収法）では、一次回収と比べるとEPRが低くなるのは事実だが、オイルサンドなどと比べると大きいと見られているからである。

次に、オイルシェールについては資源としての価値が

低いという指摘はその通りであるが、「石鉱連資源評価スタディ」（2010年末時点）でも本稿でも、これを「期待される潜在的採量」としてカウントするようなことはしていない。またオイルサンドのEPRであるが、最新の研究成果によれば4～7程度とされており（上田[2012:73-74]）、1.5程度に過ぎないという石井の主張は過小評価でないかとの疑問を禁じえない¹⁷。最後に、シェールオイルについては、石井は言及していないが、これは石井書の発刊時期からして言及できなくて当然である。なお、シェールオイルのEPRについては、いまだ開発の黎明期であるためあまり詳らかになっていないが、3～4程度という計算例がある、という（上田[2012:74]）。

まとめると、たしかに在来型であれ非在来型であれ、自噴不可能な石油のEPRが低いのは事実である。また、石油楽観論者は一般的にEPRについては言及しない傾向にあるため、この点は改められて良いだろう。しかし、EPRを考慮しても、石井のように人類が使える石油の埋蔵量を2兆バレルと見なすのは、悲観的に過ぎる。また、EPRが低いのなら少しずつでも向上させるイノベーションが進んでいく、という反批判もありうるだろう。オイルサンドのEPRの値が、石井と最新の研究成果とで食い違っているのも、イノベーションの進展が一因ではないかと推察される。もちろん、「そうしたイノベーションを以ってしても道は開けない」というさらなる反論もありうるだろうが、イノベーションの長期的な見方については次節で言及したい。

V. 「近未来石油枯渇論」に基づいた文明縮小論は正しいか？

多くの人々は、近未来石油枯渇論にさしたる疑問を挟むことなくこれを受け入れているが、その理由は、大抵の場合、可採年数や埋蔵量という概念を誤解していることにある。しかし、可採年数や埋蔵量、あるいは究極可採埋蔵量の値を見て、近未来に石油が枯渇すると考えるのは、石油および石油開発の本質を理解していないのである。

もし石油資源の限界を論じるのならば、本稿が示してきたように、せめて「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」を見定める程度の努力は払う必要があるのであって、こうした努力なしに石油資源の限界を論じることは、適切ではないだろう。そして「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」は、近未来石油枯渇論を寄せ付けないほど大きいことから、少なくとも21世紀の間に、人類が石油資源の枯渇に直面することはないし、石油資源の不足で世界が崩壊することもまずない¹⁸。

もっとも、人々が近未来石油枯渇論を受け入れてしまうこと自体は、たいした問題ではない。ただし、可採年数や埋蔵量という概念への誤解に基づいて近未来石油枯渇論を無批判に受け入れたのちに、「石油はまもなく（あるいは21世紀中に）枯渇するのだから、今から文明を縮小させていこう」といった主張が出てくると、見過ごせない問題が生じるように思われる。

たしかに現状のペースで石油を利用していけば、いつかは需要を賄えなくなる。だがそれは、「300～400年程

度先」と考えるのが妥当であろう。にもかかわらず、今から文明を縮小させようと訴えるということは、あたかも1650年の時点で「このまま〇〇が増えていくと、300年後の1950年には□□が不足してしまうから、今から文明を縮小させよう」と訴えるということと似ている。こうした主張の何が問題なのだろうか。以下では、3つの点を指摘しておきたい。

(1) 第一の問題点：前提条件の変化を考慮しない

その第一は、こうした主張が予測時点における前提条件（技術水準や、社会的・経済的状况など）で固定的に思考しており、その後の300年間に起こりうる前提条件そのものの変化の可能性を考慮しようとしないことである。本稿の第3節では、石油採掘量の増加に貢献するイノベーションを幾つか取り上げたが、これらはいずれも、30～40年前には存在していなかったか、あるいは存在していたとしても萌芽的な段階に留まっていた。同じように30～40年後には、現在の我々が思いもよらないイノベーションが生み出されることによって、現時点では採掘不可能な油田であっても採掘が可能になっているであろうし、回収率も今よりももっと向上しているはずである。わずか30～40年でもこれだけ長足の進歩を遂げているのだから、300年もあればその進歩が凄まじいものになることは間違いない。石油の商業的採掘が始まったのは今から150年余前の1859年のことであり、今から300年前には、石油の商業的採掘どころか、石炭の商業的採掘さえごく僅かであった。今から300年後に、経済社会やエネルギー利用がどのように量的・質的に変化していくかなど、誰も的確に把握などできない。

このことは、主として薪をエネルギー源として利用していた1715年の人類が、300年後の2015年の世界として、自動車も、飛行機も、高層ビルも、内視鏡検査も、ロボットも、インターネットも、この地球上に70億人が住むことも、あるいは主たるエネルギー源が石油となりそれを水深2,600mもの深海から採掘することも、どれ一つとして予想どころか想像さえできなかったことを考えれば、わかるだろう。ある時点で存在していない技術が、300年間のなかで、いつ出現し、どのように発展し、それに伴って社会がどのように変わっていくかということを考えることは、原理的に不可能である。1650年の時点での「このまま〇〇が増えていくと、300年後の1950年には□□が不足してしまうから、今から文明を縮小させよう」という訴えが滑稽であったことは、今日の人間にとっては自明のことであるが、300年後に備えて今から文明を縮小させようという今日の訴えも、同じことであろう。

しかし、なお次のような反論が予想される。すなわち、「1650年の時点では、持続可能性を考慮する必要はなかったが、2015年の現在においては持続可能性を考慮しなければならないのであって、1650年と同一視できない」と。しかし、このような「今回ばかりは違う」(This time is different) 論——今までは文明の縮小は必要なかったが今後は文明の縮小が不可避だとする議論——は、1975年にも、1985年にも、1995年にも存在しており、しかも一貫して、現実によって裏切られ続けてきた。

「今回ばかりは違う」論の特徴のひとつは、その時々最新の社会的・経済的变化を持ち出して、いかにも説得力があるかのように装う点にある。たとえば、「1975年や1985年の時点では中国やインドは貧困に喘いでおり、石油を浪費する自動車はほとんど普及していなかったが、今日は違う。自動車が急速に普及しており、このペースで自動車が増えていくと世界は持たない」といった類の議論は、その典型であろう。

こうした批判には、次のような反批判がなされるべきであろう。第一に、たしかに自動車が普及しているのは事実だが、燃費向上の効果を見逃すべきではない。1台あたりの走行距離を不変とすれば、自動車数が3倍になっても、燃費も3倍になれば、自動車が消費する石油の総量は変わらない。こうした想定はやや極端に見えるかもしれないが、ある時点ではまったく不可能とされていたことが、やがて現実化し普及していくという事例は、人類の歴史において横溢している¹⁹。第二に、たしかに自動車が普及しているのは事実だが、自動車の燃料が今後も石油であり続けるかどうかはわからない。こう述べると、電気自動車や燃料電池自動車を思い浮かべる者が多いだろうが、ここでは天然ガス自動車への転換が進んでいく可能性が提起されていることを指摘しておきたい（伊原[2012:121-123]）。ガソリンで動く自動車が普及するようになってからまだ100年程度であるが、この先100年後にも自動車がガソリンで動いているとは限らないのである。さらに付言すれば、自動車がこの先も主要な移動手段であり続けるかどうかはわからないし、これが普及し続けるかどうかはわからない。

いずれにしても、予測時点における前提条件（技術水準や、社会的・経済的状况など）が永続すると思えばいけないのであり、イノベーションの可能性を考慮しなければならない。文明縮小論には、予防的な意味が込められているのかもしれないが、今後も十分に起こりうると見込まれるイノベーションによって前提条件そのものが変わっていく資源問題を、予防的に考えることは、不適切なはずである。

(2) 第二の問題点：「未来人は現代人より愚か」

この反批判から、文明縮小論という主張が抱えている問題点の二つ目が浮き彫りになる。予測時点における前提条件で固定的に思考し、文明を縮小させていこうと訴えるということは、「この先に、イノベーションは起こらない」あるいは「イノベーションは起こるかもしれないが、それで困難を打破することはできない」と捉えているのと同義である。

しかし、第3節で石油開発に即して、わずか数十年前にはほとんど誰も想像できなかったイノベーションが次々と現れていることを見てきたが、数十年後も同じように、現在の我々が思いもよらないイノベーションが溢れているはずであって、今後は現在の我々が思いもよらないイノベーションが生み出されることが突然なくなる、などと考えるべき合理的な理由は見当たらない。何よりも、人類はこれまで膨大なイノベーションによってさまざまな制約や困難を解決・打破してきたにもかかわらず、今後はそうしたイノベーションが起こらないと看

做すということは、「現代の人間は過去の人間よりも優秀であるが、未来の人間は現代の人間ほどには優秀ではない」と言っているに等しく、傲慢のそしりを免れそうにない。

通常、近未来の石油枯渇に警鐘を鳴らしながら文明縮小論を唱える者はラディカルな進歩主義者だと見なされており、逆に近未来の石油枯渇を信じず文明縮小論を退けようとする者は、旧来の生活を変えようとせず近代的価値観に毒された保守主義者だと見なされているようである。だが、こうした分類はおそらく正しくない。これまでの人類が不断に進化させ続けてきたイノベーションを徹底させることで文明縮小論を退けようとするほうが進歩主義的なのであって、予測時点における前提条件で固定的に思考し続ける文明縮小論者のほうが、じつのところ旧来の伝統に囚われた保守主義者だと言えるのではなかろうか（奥田[2005:148]）。

(3) 第三の問題点：現世代中心的

文明縮小論の問題点の第三は、倫理的なことがらに関わる。かりに百歩譲って文明縮小を図るべきだとして、それに取り掛かるべきタイミングは、なぜ現在なのか。石油が「まもなく」枯渇するのならばともかく、「300～400年程度先」と見込まれるにもかかわらず、縮小への転換点は、なぜ22世紀や23世紀ではなく、即時なのか。枯渇のタイミングが「300～400年程度先」であるのなら、文明縮小をいつからどのように図っていくべきかを決定するタイミングは100年後でも遅くないはずであり、後世の世代に決定を委ねるほうが適切だろう。

文明縮小論の厄介な点は、一見すると未来世代に対して深い責任を果たそうとしているように見えながら、じつのところ未来世代が本来もっているべき自己決定権を奪いかねないところにある。人類は、知性と創造力を発揮して、生活改善や貧困削減に取り組み、また自由・人権・尊厳といった価値を発展させようと努めてきたが、このように知性と創造力に基づいて世界をより良く変えていこうと努力することは、人間の基本的な権利の一つのはずである。にもかかわらず、文明縮小論は、未来世代が知性と創造力にもとづいたイノベーションによって、さまざまな制約や困難を解決・打破しながら生活の質を向上させていこうとする可能性を、閉ざそうとする。未来人のこうした権利を現代人が奪おうとするのは、倫理的に正当化されるのだろうか。そもそも、30～40年後のことであれば、直接関わる現世代に決定権があるだろうが、300～400年程度先のためと称して文明縮小に動く権利が現世代にあるとは思われない。

それでは、資源に関してわれわれが未来世代に果たすべき責任とは、どのようなものであろうか。この点に関して、コリアーは次のように述べている。

「資源開発が持続不能だからと言って、開発してはいけないということにはならない。再生不能な資源を持続的に使おうとしたら、利用率をゼロにするしかない。だがまったく利用しないなら、そもそも存在しないのと同じことになる。（中略）地球を巨大な博物館とみなし、自然をガラスケースに入れて保

存する義務はないが、天然資源を略奪しないことは私たちの責任である。なぜなら、人工物を所有するように天然資源を所有することはできないからだ。将来世代に対する倫理的な義務は、資源と同等の価値を持つ別の資産を将来世代に残すことによって果たすことができる」（Collier[2010:98-99=2012:114-115]）。

資源に関して責任ある態度とは、それをまったく使わないことでもなければ、その収入を浪費することでもなく、資源から得られる収入を適切に用いて将来世代に同等の資産を残すことである。そしてイノベーションへ積極的に投資することも、同等の資産を残すことの一環なのである。

おわりに

本稿では、「近未来石油枯渇論」が誤りであることを確認し、また「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」を見定めつつ、「近未来石油枯渇論」を下敷きにした文明縮小という選択が不適切であることを論じてきた。しかし、このように述べたからといって、石油が無尽蔵にあるとか、石油を浪費してもかまわないというわけではない。石油は非再生可能エネルギーであって、これを浪費して良いわけがないのは、改めて言うまでもないほど当然のことであろう。石油のノーブルユース化は必須であるし、回収率の向上や、エネルギー効率を高めるイノベーションも必須である。ただし、人類はそれをずっとやってきたし、今後もそれを続けていこう。われわれが行なうべきことは、そうしたイノベーションの徹底であり、それしかない。イノベーションに背を向けて今から文明縮小を図ろうというのは、適切な選択とは言えない。

人々が化石燃料の先行きを危惧するのは、人類の歴史において石油が初めてというわけではない。かつてNo.1エネルギーの地位を占めていた石炭に関しては、19世紀の経済学者であったウィリアム・スタンレー・ジェヴォンズのように、このままの消費ペースが続けば炭坑が深くなって採掘費用が高騰する結果、現在の経済成長を持続させることは不可能になる、と警鐘を鳴らす者がいた（奥田[2005:143]）。20世紀の後半になると、かの有名なローマ・クラブのレポート『成長の限界』が1972年に刊行され、ここでは石油や天然ガスが1990年代～2000年代には枯渇するとされたが（Meadows *et al.* [1972:58=1972:45]）、この予測ももちろん外れた。

外れた理由は簡単で、本稿が論じてきたように、「このまま〇〇が増えていく」という前提条件も、確認埋蔵量も、イノベーションによって不断变化し続けるからである。ロンボルグが述べたように、『成長の限界』の著者たちは、人間がイノベーションを成し遂げていく能力を見落としていたのである（Lomborg[2012:30]）。こうした人間の能力を考慮しないまま、わずか百年強のスパンで持続可能性を悲観的に見た『成長の限界』には、看過しえない問題が多すぎたと言わねばならない。だがこの点が自覚されない限り、今後もエネルギー悲観論が

提示されては現実によって裏切られ続けるという展開が、繰り返されるであろう。

エネルギー悲観論の未来については以上のとおりだが、ではエネルギーそのものの未来はどうだろうか。石油が豊富に存在するからと言って、石油がNo. 1エネルギーの座であり続けるとは限らない。近年、化石燃料のなかでもっとも消費が伸びているのは天然ガスである。これは、化石燃料のなかでもっともクリーンであるうえに、石油よりも探査や採掘が進んでいないこともあってR/P比が石油よりも大きく、しかも相対的に安価なので、今後さらに活用されていくことは間違いない。また、石炭の利用も根強く存在しており、この確認埋蔵量も膨大である。石炭は最もクリーンではない化石燃料だが、安価なため、とくに途上国で発電用としての利用が増えていくとみられている。

こうしたなかで、2020年までに（天然ガスではなく）石炭がNo. 1エネルギーの座に約半世紀ぶりに返り咲く可能性が、取りざたされている。たとえばBPによると、2020年には石炭の生産量は石油換算で43億8,200万トン（一次エネルギー生産の29.8%）となり、石油の43億6,730万トン（同29.7%）を僅かに上回る、という（BP [2014a]）。さらに、石油の需要はまもなくピークアウトするというラディカルな予測もあり、イギリスの*Economist* 誌のように、石油を「過去の燃料」と称する動きさえ出てきているほどである（“Yesterday’s Fuel: The Future of Oil,” *The Economist*, August 3, 2013）。「人類にとって利用可能と見込みうる石油の総量」が多いからといって、石油時代が続くとは限らない。むしろ膨大な量の石油が地球上に残されたまま別の化石燃料がエネルギーの主役の座につく、という可能性もありうる。そして石油時代の終わりは、人類の終わりを意味しない。

いずれにせよ、化石燃料の時代は今後も長く存続しうる。また、石油がNo. 1エネルギー源としての地位から滑り落ちたとしても、少なくとも当分の間は、依然として重要なエネルギー源の一つであり続ける²⁰。さらに、石油がNo. 1エネルギー源ではなくなったとしても、そのことは、現代経済における石油セクターの重要性の低下を必ずしも意味しない。なぜならば、単位エネルギーあたりの価格は、石炭や天然ガスよりも石油のほうが高いためである。では、現代世界経済における石油セクターの重要性とは、いったいどれほどのものか。これを詳述することを、今後の課題としたい。

注

- 1 電力に転換しない例外的な利用形態として、原子力船（潜水艦、空母、砕氷船などの諸形態をすべて含む）や核兵器などがある。しかしこうした利用形態は、ほぼ無視してよい。
- 2 ここで「近未来」とはどの程度の期間を指すのかを、明確にしておくべきだろう。本稿では、20世紀後半以降に石油の可採年数（R/P比）として示されてきた期間（おおむね30数年～40数年）を「近未来」と捉える。したがって「近未来石油枯渇論」とは、「30数年～40数年後に石油が枯渇する」という考え方のことである。

3 「原始埋蔵量」や「総原始資源量」とも呼ばれる。英語ではtotal petroleum-initially-in-placeなので、これらのほうが適切かもしれないが、埋蔵量という概念を用いるべきではないという考え方もあるため、本稿では原則として「総資源量」と表記する。

4 多くの石油企業は、油田の権益をよく売買しているが、その際の油田のポテンシャルの評価が、確認埋蔵量ではなく推定埋蔵量に基づいているという事実は、確認埋蔵量の定義がかなり保守的であることを示唆していると言えよう。

5 日本人であれば「埋蔵量」=「地球上に埋蔵されている（石油）資源の総量」と捉えてしまうのは当然であって、こうした誤解を責めることはできそうにない。問われるべきはむしろ、reservesに「埋蔵量」という不適切な訳語が当てられていることのほうであろう。たとえばreserved seatとは「予約席」や「指定席」の意味であるように、reserveの本義は「特定の主体が予めおさえておく」という点にある。よって筆者としては、reservesの訳語としては「採掘予定量」が適切である、と主張しておきたい。

6 reservesを「埋蔵量」とする訳語が不適切であるのと同様に、Reserves-to-Production ratioまたはR/P ratioに「可採年数」という訳語を当てるのも、不適切であろう。これについてはこなれた訳語を見出しにくい、強いて言えば「在庫年数」が適切であろうか。いずれにしても、こうした不適切な訳語が石油資源の将来を悲観する全国的勘違いの根源になっていることを鑑みれば、この不適切な訳語が、いつ、誰によって提唱され、どのように普及・定着してきたのかも、検証されてよいだろう。

7 R/P比のRはreservesを意味しているから、埋蔵量成長や未発見資源量を含めた量に関してR/P比という言葉を用いるのは、厳密に言えば問題がある。ただし、ほかに適切な用語が見当たらないので、本稿ではreserves以外を含めた量に関して、この言葉を用いたい。

8 これまで非在来型石油が確認埋蔵量・埋蔵量成長・未発見資源量にカウントされてこなかったのは、採掘コストが高かったため商業性のある石油資源としては捉えられていなかったことが主因である。しかし、高かった採掘コストの低下と2003年以降の原油価格の高騰を背景として、オリノコータルやオイルサンドの商業的生産が本格化してきたこともあって、BPなどは近年、カナダやベネズエラの非在来型石油を確認埋蔵量にカウントするようになってきている。ただし、石油鉱業連盟の2010年末評価は、まだこの立場をとっておらず、上掲数値に非在来型石油はカウントされていない。

9 究極可採埋蔵量を構成しているのは、①累計生産量、②確認埋蔵量、③埋蔵量成長、④未発見資源量であるが、その主軸は①と②であり、また①は、②が実際に生産されることで増えていくから、究極可採埋蔵量に影響する最も重要な要素は②である。つまり究極可採埋蔵量は、確認埋蔵量の増加につられて増えていく仕組みになっている。

実際に、石油の究極可採埋蔵量の推移を見ると、

1940年代の半ばまでは約0.4~0.6兆バレルとする評価が一般的であったが、1940年代末には1兆バレル超とする評価が出始め、1960年代に入ると2兆バレル超とする評価が出るようになり、1990年代に入ると3兆バレル超とする評価が出てきた。そして2009年には、4.73兆バレルとする評価が出てきている（本村[2012:87-88]）。このような「上方修正」も、図表1に示したように、確認埋蔵量が1950~2010年にかけて16倍以上に増加してきたことをふまえれば、何ら驚くに値しない。究極可採埋蔵量とは、人類が利用できる究極的に見込みうる石油量のことでないことに留意が必要である。

10 この値は、藤田[2012:35]に記されており、データの出所について藤田は、「国際連合の機関UNDPレポート（前回の石鉱連スタディ2005報告書p.160参照）」（原文ママ）としている（藤田[2012:35]）。そこで「前回の石鉱連スタディ2005報告書」である石油鉱業連盟編[2007]のpp.159-160を参照すると、p.159に文末注が付されており、その文末注の内容の記載箇所である同書のp.279において、文献名として「UNDP, 1999: Energy Resources. In World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability, Part II Chapter 5, 135-171, <http://stone.undp.org/undpweb/seed/wea/pdfs/chapter5.pdf>」と記されている。このURLについては、本稿執筆の2014年7月16日時点でアクセス不能だが、同名の書物がUNDPから2000年に刊行されており（おそらく同じ内容と思われる）、またこの書物の「Part II Chapter 5」のp.135には、著者名としてHans-Holger Rognerらの名前が列挙されている。したがって、この文献については、Rogner *et al.* [2000]と記するのが適切であると思われる。このため本稿では、藤田[2012]での記載の仕方にかかわらず、このように表記する。

11 「シェールオイル」という言葉は、すこし厄介である。本稿ではこれをシェール開発によって採掘されるオイルと捉えるが、他方では、オイルシェールから採掘されるオイルが「シェールオイル」と称されてきたという経緯もあり、両者の混同が起きやすい。このため、本稿で言う「シェールオイル」は「タイトオイル」と呼称すべきだという見解もあるが、他方ではシェール開発が盛んになってきたことをうけて、オイルシェールから採掘されるオイルを「ケロジェンオイル」と称すべきだという見解も出てきている。また、本稿の言う「シェールオイル」が在来型か非在来型かについても、両論がある（高橋[2011]）。

12 シェール開発に関しては、(1) 地下の帯水層が汚染される、(2) シェール開発によって地震が多発する、といった批判がある。これらについてコメントしておく。

まず(1)であるが、帯水層は通常、地下数十~300m程度に位置する（たとえば、世界最大のオガララ帯水層では地下30~120m程度である）が、シェール層の多くは2,000m以下であり、しかも帯水層とシェール層との間には浸透性のない地層があるので、シェール開発による水圧破碎（フラッキングまたはフラク

チャリングとも称される）によって地下の帯水層が汚染されるとは、考えにくい。にもかかわらず、シェール開発により帯水層の汚染が疑われる事例が散在している理由は、シェール層に到達するための抗井が帯水層を貫く際に、抗井とその内枠であるケーシングとの間のセメンチング（セメントによる閉塞）に問題があるためだと考えられている。つまり、水圧破碎の問題ではなく、採掘のオペレーションの問題だということであり、セメンチングを適切に行わない業者は、規制される必要がある。

次に(2)であるが、これは二つの次元に分けて考えるべきである。まず、水圧破碎そのものによる地震の規模はきわめて小さく、人間が体感できるレベルのものはないとされる。他方で、アメリカのオクラホマ州では数年前からのシェール開発の開始後に地震が多発しているが、これはシェール開発に使った廃水を専用井戸に廃棄してきたところ、廃水が岩盤の間を広がって潤滑油のような役目を果たして断層を動かしていることが原因だとする研究成果が出ている（Keranen *et al.* [2014], 『日本経済新聞』2014年7月4日朝刊）。ただしこれも、水圧破碎の問題ではなく、廃水処理というオペレーションの問題である。

以上から、シェール開発が問題含みなのは事実だが、その原因は、今のところセメンチングや廃水処理の不備——経験の浅い開発初期ならではの一部業者の錬度不足——によるとみられているので、シェール開発が全面的にストップするとは考えにくい。むしろこうした問題を引き起こさないように開発が進化していくように思われる。

なお、欧州ではフランスがシェール開発に最も批判的であるが、この国は世界に冠たる原子力大国であって、「化石燃料の将来展望が明るくなると、その分だけ脱原子力化が進んでしまっている」という企業や人々の割合が高いことを念頭に置かねばならない。他方で、イギリスは欧州でもシェール開発に積極的であるが、この国が欧州随一の石油採掘国であり、石油採掘にかかわる企業や人々が多いことからすると、これも納得しやすい。

13 これは、米国のKerr-McGee Oil Industries Inc.によってメキシコ湾で成し遂げられた。同社は後にKerr-McGee Corporationとなり、2006年には米国のアナダルコ社に買収された。

14 厳密に言うと、Rogner *et al.* [2000:140-141]の数値はギガトンで表示されており、しかも一部にミスプリントが疑われている。そこで、「石鉱連資源評価スタディ」でこの数値が取り上げられるにあたっては、ミスプリントの疑われる箇所が補正され、またバレルに換算されている。重質油の総資源量 = 2兆3,099億バレル、超重質油・ビチューメンの総資源量 = 4兆796億バレルという数値は、「石鉱連資源評価スタディ」がこうした補正と換算を経て求めたものである。注10も参照のこと。

15 幾島によれば、「地質学的に天然ガスおよび原油は頁岩に含まれており、この量を100とすると頁岩から20が周りの地層ににじみだして、にじみだした20のう

- ち2が背斜トラップに天然ガスおよび原油として貯留されている。従って、80の天然ガスおよび原油は未だ頁岩に残存された状態にある」という(幾島[2013:4])。この見解に沿うならば、貯留岩に到達した天然ガスおよび原油の40倍が一次移動せずに根源岩に残っていることになる。こうなると、天然ガスおよび原油は事実上ほぼ無限に存在すると言わねばならない。ただし、一次移動の比率を20%とする幾島の見解は、これを50%としている奥井[2012]とは、かなり懸隔がある。
- 16 EROI (Energy Return on Investment) と称されることもある。
- 17 石井が述べているオイルサンドの開発方法は露天掘りに限定されており(石井[2006:37-38, 119-120, 215]), SAGD法をはじめとする油層内回収法については考慮されていない。第3節で見たようにSAGD法の商業生産の開始は2003年だったので、石井書の執筆時点では、まだSAGD法のEPRが詳らかになっていなかった可能性が高い。
- 18 ただし、探鉱・開発投資が進まず供給が滞るという可能性は、常に存在し続けている。その意味で、よく言われるように、「リスクは地下ではなく地上にある」という指摘は正しい。むやみに悲観的になって、石油開発が滞り、供給が細るほうが問題だとも言える。
- 19 「自動車の燃費が3倍になることは絶対にありえない」と思う人は、第一次石油危機直前のアメリカでは、自動車の燃費がガソリン1リットルあたり2~3kmだったことを思い出すと良い。当時のアメリカ人で、40年後にこれが数倍になっていると予想した人は、はたしてどれだけ存在していたのだろうか。
- 20 石油は常温で流体であるがゆえに、他の化石燃料よりも扱いやすいという優れた特徴がある。このため、特に交通・輸送用燃料では石油が使われやすい。

文 献

- 吾妻高志 (2012) 「2010年末時点における在来型石油・天然ガスの究極可採資源量評価」石油鉱業連盟編『石鉱連資源評価スタディ2012年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2010年末評価：(第六回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟, 141-158.
- BP (2014a) *BP energy outlook 2035, excel tables*, BP: <http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/Energy-Economics/BP_Energy_Outlook_2035_Summary_Tables_2014.xls>, accessed on August 2, 2014.
- BP (2014b) *BP statistical review of world energy 2014, historical data workbook*, BP: <http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/Energy-Economics/statistical-review-2014/BP-Statistical_Review_of_world_energy_2014_workbook.xlsx>, accessed on August 2, 2014.
- Collier, Paul (2010) *The plundered planet: How to reconcile prosperity with nature*, London: Allen Lane. = (2012) 村井章子(訳)『収奪の星：天然資源と貧困削減の経済学』みすず書房.
- 藤田和男 (2012) 「石鉱連の資源評価スタディの意義と

- 経緯, 今回の資源量評価のまとめ」石油鉱業連盟編『石鉱連資源評価スタディ2012年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2010年末評価：(第六回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟, 1-46.
- 伊原賢 (2009) 「水平坑井：うまく使えば、回収率向上の万能薬」JOGMEC石油・天然ガス資源情報：<http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/2/2242/0902_out_horizontal_well_trend.pdf>, accessed on August 2, 2014.
- (2012) 『シェールガス革命とは何か：エネルギー救世主が未来を変える』東洋経済新報社.
- (2014) 「大水深石油開発のトレンド：概説」JOGMEC石油・天然ガス資源情報：<http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/5/5275/1406_out_deepwater_trend.pdf>, accessed on August 2, 2014.
- 幾島嘉浩 (2013) 「シェールガス・オイルとは」幾島賢治・八木宏(監)『シェールガスの開発と化学プロセス』シーエムシー, 3-13.
- 石井吉徳 (2006) 『石油最終争奪戦：世界を震撼させる「ピークオイル」の真実』日刊工業新聞社.
- Keranen, K. M., M. Weingarten, G. A. Abers, B. A. Bekins, and S. Ge (2014) “Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection,” *Science*, (345)6195:448-451. DOI: 10.1126/science.1255802.
- 倉澤由和 (1994) 「3次元地震探査法：石油の探鉱・開発における有効なリスク軽減法」『石油の開発と備蓄』27(5):76-102.
- Lomborg, Bjørn (2012) “Environmental alarmism, then and now: The Club of Rome’s problem; and ours,” *Foreign Affairs*, 91(4):24-40.
- Maugeri, Leonardo (2009) “Squeezing more oil from the ground,” *Scientific American*, 301(4):56-63.
- Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, and William W. Behrens III (1972) *The limits to growth: A report for the Club of Rome’s project on the predicament of mankind*, New York: Universe Books. = (1972) 大来佐武郎(監訳)『成長の限界：ローマ・クラブ「人類の危機」レポート』ダイヤモンド社.
- Meyer, Richard F., Emil D. Attanasi, and Philip A. Freeman (2007) “Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1084,” USGS: <<http://pubs.usgs.gov/of/2007/1084/OF2007-1084v1.pdf>>, accessed on August 2, 2014.
- 本村真澄 (2012) 「21世紀も続く炭化水素の時代：資源量予測と中長期ピークオイル論」石油鉱業連盟編『石鉱連資源評価スタディ2012年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2010年末評価：(第六回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟, 83-94.
- 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編 (2014) 『EDMCエネルギー・経済統計要覧2014』省エネルギーセンター.

- 奥田栄 (2005) 「資源枯渇のリスク評価とその問題点」『社会・経済システム』(26):143-149.
- 奥井明彦 (2012) 「形成過程から見た石油資源の組成、分類および資源量」石油鉱業連盟編『石鉱連資源評価スタディ2012年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2010年末評価；(第六回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟, 121-140.
- PennWell (various years) *International petroleum encyclopedia*, Tulsa: Petroleum Pub.
- Rogner, Hans-Holger, Fritz Barthel, Maritess Cabrera, Andre Faaij, Marc Giroux, David Hall, Vladimir Kagramanian, Serguei Kononov, Thierry Lefevre, Roberto Moreira, R. Nötstaller, Peter Odell, and Martin Taylor (2000) “Energy resources,” in UNDP (ed.) *World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability*, New York: UNDP, 135-171.
- 齊藤満 (2011) 「SAGD法の先駆者としてオイルサンド開発を推進するCANOS」『石油・天然ガスレビュー』45(3):1-16.
- 関口嘉一 (2007) 「石油系資源に係わる用語および資源量・埋蔵量の定義と問題点」石油鉱業連盟編『石鉱連資源評価スタディ2007年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2005年末評価；(第五回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟, 71-84.
- 石油鉱業連盟編 (2007) 『石鉱連資源評価スタディ2007年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2005年末評価；(第五回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟.
- 石油鉱業連盟編 (2012) 『石鉱連資源評価スタディ2012年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2010年末評価；(第六回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟.
- 高橋力裕 (2011) 「“シェールオイル”は在来型か、非在来型か？」JX日鉱日石リサーチ研究レポート：〈http://www.rs.jx-group.co.jp/library/files/20111227_02_write.pdf〉, accessed on August 2, 2014.
- 上田善紹 (2012) 「資源・エネルギーのEROI (Energy Return on Investment)と石油・天然ガスの位置づけ」石油鉱業連盟編『石鉱連資源評価スタディ2012年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する2010年末評価；(第六回石鉱連資源評価ワーキング・グループ報告書)』石油鉱業連盟, 71-82.
- USGS (2000) *World petroleum assessment: 2000 world assessment data (DDS60)*, USGS: 〈<http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060/>〉, accessed on August 2, 2014.
- 山川俊和 (2014) 「日本における『地域からのエネルギー転換』の現状と課題：地域内経済循環の論点を中心に」『関門地域共同研究』(25):1-14.

Website

- Website[1] ExxonMobil, “Sakhalin-1 project drills world’s longest extended-reach well” (〈<http://news.exxonmobil.com/press-release/sakhalin-1-project-drills-worlds-longest-extended-reach-well>〉), accessed on August 2, 2014).
- Website[2] *New York Times*, March 5, 2007, “Oil innovations pump new life into old wells” (〈<http://www.nytimes.com/2007/03/05/business/05oil1.html?page-wanted=all>〉), accessed on August 2, 2014).

[謝辞] 図表7については、三井海洋開発株式会社から掲載の許可ならびに画像データの提供を受けた。ここに記して感謝する。

* 本稿は、科学研究費助成事業・若手研究 (B) 「破綻国家における平和構築と国家建設に資する一次産品のグローバル・ガバナンス」(研究課題番号：24730138, 研究代表者：妹尾裕彦) による研究成果の一部である。