

EROI 指標が示す国際的なエネルギー危機と 再生可能エネルギーをめぐる公共政策への示唆

山本 達也

要旨

原油をめぐる国際的なエネルギー環境の構造的変化は、エネルギー政策全般に広範な影響を与える。したがって、再生可能エネルギー関連政策も、こうしたエネルギー環境の構造変化を踏まえた上で論じられる必要がある。EROI (Energy Return on Investment) に関する近年の研究は、全世界における原油生産の EROI の平均が 15 程度にまで落ち込んでいると推定している。EROI の視点から見た閾値 (threshold) は、概ね $EROI = 10$ の地点にある。この値を境として、余剰エネルギー量 ($E_{out} - E_{in}$) が指数関数的に減少する「正味エネルギーの崖 (net energy cliff)」が生じるためである。

この点、米国におけるタイトオイルの EROI は、 $EROI < 10$ のものが多い。近年の技術革新により数値を改善させているが、再生可能エネルギーの多くは、 $EROI = 10$ 前後の値を示している。再生可能エネルギーへのシフトは、重要な政策課題であるとはいえ、これらは原油生産への継続的な投資がなくては成り立たない。

政策には、政策的対応で克服できる課題とそうでない課題とがある。地球を取り巻く物理的法則を、政策によって操作することはできない。資源制約を可視化する指標としては、EROI が有用である。この先のエネルギー政策を立案するにあたっては、EROI 指標を組み込んだ政策判断をしていく必要があると思われる。

The International Energy Crisis as Indicated by EROI and Implications for Public Policy on Renewable Energy

Tatsuya YAMAMOTO

Abstract

Structural changes in the international energy environment surrounding crude oil have a wide range of implications for general energy policy. Therefore, policies related to renewable energy also need to be discussed in light of these structural changes in the energy environment. Recent studies on energy return on investment (EROI) have shown that the average EROI of crude oil production worldwide has fallen to around 15. The threshold in terms of EROI appears roughly around an EROI of 10, where the amount of net energy ($E_{out} - E_{in}$) decreases exponentially: the so-called "net energy cliff."

In this regard, the EROI of tight oil in the United States often has an EROI of less than 10. However, recent technological innovations, and most renewable energy sources also have an EROI of less than 10. While the shift to renewable energy is

an important policy issue, it is impossible without continued investment in crude oil production.

Some policy challenges can be overcome through policy responses; however, others cannot. Policy cannot manipulate the physical laws surrounding the Earth. The EROI, a useful indicator for visualizing resource constraints, should be incorporated into policy decisions when planning future energy policies.

1. はじめに

本稿のテーマは、EROI (Energy Return on Investment) 指標を用いて行われた一連の研究がどのような形で「国際社会が直面するエネルギーをめぐる危機」を具体的な数値と共に描き出しているのかを明らかにすることで、エネルギー関連の公共政策を考えるうえでの EROI 指標の有効性を検討すると共に、この先の再生可能エネルギーに関する公共政策への示唆を導き出そうとすることにある。

現代社会が使用しているエネルギーは、石油、天然ガス、石炭、原子力、水力、風力、潮力、太陽光、地熱など多岐にわたるが、それぞれが取りあげられる文脈によって独立して論じられることが多い。石油や天然ガスなどの 1 次エネルギーと、電力などの 2 次エネルギーとを区別して論じるという独立性もあるが、同じ電力を論じるに際しても発電方式に着目し再生可能資源による発電と非再生可能資源による発電とを分けて論じるという独立性もある。さらに、再生可能エネルギーによる発電の中でも、風力だけとか太陽光だけといった形で議論する対象を絞るということもしばしば行われている。

もちろん、このこと自体が問題だというわけではない。むしろ、対象を厳密に定義してから議論するというのは科学の方法論として標準的な作法であると同時に、こうした専門性こそが研究の発展を可能としてきたとも言える。

他方、数あるエネルギーを束ね、同一の軸で論じることの有用性もある。換言すれば、異なるエネルギーを同一の単位で比較することで見えてくる知見である。異なる発電方式から得られる電力を「単位量あたりの価格」という視点から、その価値を評価するという試みもあれば、そのエネルギーが持っている仕事量を「J (ジュール)」という形で統一可能な単位に変換することによって、価値の評価を行うことも可能である。

本稿が取りあげる EROI 指標も、これらと同様に複数の異なるエネルギー源について同一軸で議論するための視座を与えてくれるタイプの指標であり、それぞれのエネルギーが持っている「価値」を評価することに貢献するものである。この指標が特に有用であるのは、資源の「物理的な有限性」という制約を考慮に入れた上で、異なるエネルギー源とエネルギーシステム全体の「効率」を測定する尺度として機能する。

この地球上で形成された社会は、どの社会も使用可能なエネルギー量（余剰エネルギー量）に限りがあった。どのような社会も、余剰エネルギーの範囲内でしか文明的な営みを形成することはできない。ローマ帝国などを含む既に崩壊した 24 の社会を分析した考古学者のテインター（Joseph A. Tainter）は、この点について、人類が文明の到達範囲を拡大し、最終的にはその社会が利用可能なエネルギーを越えたインフラを構築するという傾向があることを示している¹。テインターの研究が明らかにしたのは、「社会という問題解決のためのシステムは、長期間、複雑性とコストを増しながら発展し、やがてシステムは補助的なエネルギーの増加を必要とするようになるか、あるいは崩壊する」ということであり、文明の崩壊（社会の持続可能性）に当該社会が使える余剰エネルギーの有限性が影響を与えていることを示唆するものであった²。

現代社会も、例外ではない。化石燃料の使用をはじめて以来、人類が使用するエネルギー量は指数関数的な増大を示してきたが、枯渇性資源の産出をめぐるのは必ず産出ピークが訪れるという物理的な制約から逃れることができないため、いずれかのタイミングで頭打ちになることが約束されている。問題は、それが「いつなのか」ということになる。ローマクラブによる『成長の限界 (*The Limits to Growth*)』が発表されたのは 1972 年のことであったが³、近年にいたるまでの間、現実問題として資源の有限性が現在のエネルギー政策の課題として認識される機会は少なかった。

資源楽観論の代表的存在であったのが、国際エネルギー機関（IEA）である。IEA は、年次報告書として発行している『世界エネルギー展望 (*World Energy Outlook*)』において、一貫してエネルギーの供給見通しについて楽観的な予測を示し続けてきた。その方針が転換されたのは、2010 年度版の『世界エネルギー展望』においてであった⁴。

この年の報告書では、はじめて「原油生産は 2020 年まで日産 6800 ～ 6900 万バレルあたりで波打ちながら横ばいで推移していくであろうが、2006 年の日産 7000 万バレルを回復することはないだろう」との記述が記載され、「2006 年が在来型油田からの原油産出ピーク」であった可能性があるとの認識が示された⁵。その後、米国のタイトオイル（tight oil）に代表されるような非在来型油田からの原油供給が増加したことから、総原油供給

1 Joseph A. Tainter, “Sustainability of Complex Societies,” *Futures*, Vol. 27, No. 4, 1995, pp.397-407. なお、詳細については、以下の文献もあわせて参照されたい。Joseph A. Tainter, *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge University Press, 1988.

2 *Ibid.*

3 Donella H. Meadows, et.al., *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, 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、1972 年）。

4 IEA による政策転換については、以下の拙書を参照されたい。山本達也『革命と騒乱のエジプト：ソーシャルメディアとピーク・オイルの政治学』慶應義塾大学出版会、2014 年、108-112 頁。

5 International Energy Agency, *World Energy Outlook 2010*, International Energy Agency, 2010, p.48.

量をめぐる状況に変化が見られるが、2010 年代を通して IEA は、投資が滞ることになると原油供給に問題が起きる可能性を指摘し続けている⁶。

こうした原油をめぐる国際的なエネルギー環境の構造的変化は、本稿が示唆を導き出すとする再生可能エネルギー政策にも大きな影響を与える。IEA の年次報告書にも見られるように、資源の有限性という変数が現実味を帯び始めている現在、電力供給システムそのものを支えるエネルギー環境の構造的な変化を概観し、その「異変」の中で電力の安定供給を維持するという政策目標をどう達成するのかという示唆を得ていく必要がある。「資源制約」が現実化しはじめている状況下では、再生可能エネルギー関連政策も、国際的なエネルギー環境の構造変化を踏まえた上で論じられなければ意味をなさない。

こうした問題意識に基づき、以下、本稿では、第 2 節において EROI 指標の概念と歴史的展開についてのレビューを行う。第 3 節では、EROI 指標を用いることでエネルギーをめぐる国際的な環境にどのような変化が起きているのかを検討すると共に、同指標を用いつつ近年技術進歩が著しい非在来型の原油生産の評価を行う。第 4 節では、国際的なエネルギー環境の変化が、再生可能資源へのエネルギーシフトの議論にどのような影響を与え得るかについて検討する。最後に、結論として、エネルギーをめぐる公共政策の議論に EROI 指標も検討に加える必要性を示した上で、電力をめぐる「危機」に対処する上での政治的な示唆を導出したい。

2. EROI 指標の歴史的展開とその有効性

EROI 指標自体は、どのようなエネルギーに対しても適用可能な概念であるが、本稿ではこの概念の有効性を検討するにあたって、原油を主な事例として取りあげる⁷。その理由は、第 2 次世界大戦後に社会の根幹を支えるエネルギー源が石炭から石油へとシフトして以来、社会を形成する上でのベースとなるエネルギー源としての地位を占め続けているためである。エネルギー密度が高く、常温で液体という物理的特性は、石炭や天然ガスに比べても運搬が容易であり、グローバルな物流や移動を支える航空機や自動車の内燃機関の燃料ともなっている。また、石炭など他の化石燃料の採掘、道路建設、発電所の建設、再生可能エネルギーを生み出す装置の生産などに際しても、石油が不可欠である。石油に

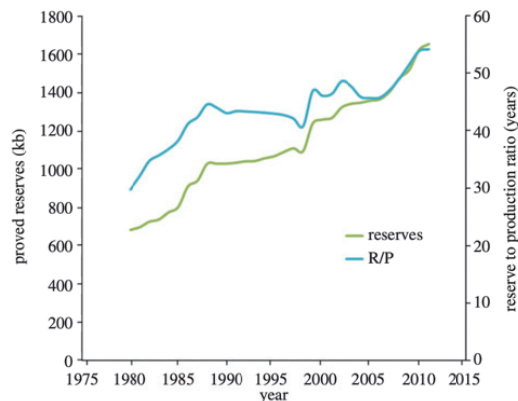
6 たとえば、2018 年度版の『世界エネルギー展望』では、米国のタイトオイルが成長ペースを維持できない場合や在来型の原油承認がスムーズに進まない場合には、2020 年代半ばに供給不足に陥る可能性を警告している。International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, 2018, pp.156-160.

7 EROI の概念そのものはシンプルであるが、実際に値を算出しようとすると、考慮すべき変数が多くすべてを厳密に把握できないこともあって、「概算」とならざるを得ないという限界や課題もある。ただし、概算であっても全体の傾向をつかむ上では十分な精度を担保することができている。政策論への応用に際しては、こうした限界や課題も考慮に入れる必要がある。

依存せず、その他のエネルギーを単独で生み出すことは極めて難しい状況にある。

実際のところ、歴史的に見て EROI という概念が開発され発展してきたのは、原油を中心としたエネルギー分析の分野であった。資源の有限性という視点から原油供給の将来見通しを予測するにあたっては、従来、R/P 比 (Reserves to Production Ratio) が指標として使われることが多かった。R/P 比は、確認埋蔵量 (Reserves) をその年の生産量 (Production) で除した値として求められ、可採年数を示す指標として用いられている。

図表 1：原油埋蔵量および R/P 比の推移



出典：Richard G. Miller and Steven R. Sorrell, “The Future of Oil Supply,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 372, Issue 2006, 2014, p.9. (データソースは、BP 社による統計資料)

かねてから原油の「枯渇」についての懸念は表明され続けてきたが、R/P 比が極端に悪くなるということとはなかった。それどころか、図表 1 が示すように、R/P 比は年を追うごとに増大している。新しい技術等によって、確認埋蔵量自体が増大しているためである。単純に「量」に注目する限り、原油の有限性に注意を払う必要性は低いように見える。

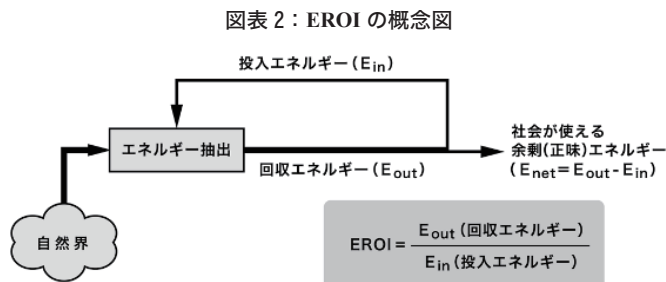
しかしながら、これは原油生産の現場の感覚とは乖離している。初期の陸上油田は、穴を掘れば地中から轟音と共に原油が噴き出してきたが (1 次回収)、時間の経過と共に自噴しなくなる。そうなった油田は、人為的に海水を送り込み、その時の圧力によって原油を回収する (2 次回収)。近年では、水蒸気を注入して、その圧力で原油を地中から原油を取り出す方法も用いられているが (3 次回収)、水蒸気を生成する過程では貴重な淡水と天然ガスが用いられることになる。また、最近では、海底油田、それも深海底の油田にまで手を伸ばすようになっている。

初期の原油生産よりも、近年の原油生産の方が「難しく」なっている。この難しさは、採掘の金銭的コストとして跳ね返ってくる。技術の進歩によって、これまで採掘不能だった原油を取り出すことができるようになったとはいえ、そうした油田を稼働させ続けるには油価が採掘コスト以上であることが条件となる。

実際、エネルギーをめぐる公共政策においては、埋蔵量や可採年数などの「量」に関する指標、新しい技術の実用可能性など技術動向のレビュー、採掘コストや油価など経済的な指標をもとに論じられることが多い。こうした状況に対して、ホール（Charles A. S. Hall）は、価格シグナルは、（地下に）豊富に眠っている燃料が地質学的または政治的な要素で取り出せなくなる可能性による影響を十分に織り込んだものではないため、将来のエネルギー供給を予測する上でそれほど明確な指針とはなっていないと論じる⁸。

そうした問題意識から、よりエネルギー動向の将来予測に寄与するとして提唱されたのが、EROI 指標である。R/P 比が、エネルギーの量を示し、価格がマーケットによる期待値を反映しているのに対し、EROI が示しているのは、エネルギーの「質」である。

人類が手にしている技術は、エネルギーを「取り出す」技術であって、未だエネルギーを「生み出す」技術は手にしていない。エネルギーは、自然界から抽出する必要がある。この時、抽出されたエネルギー（回収エネルギー）が E_{out} である。しかしながら、エネルギーを取り出すにもエネルギーが必要である。これが、投入エネルギー（ E_{in} ）であり、実際に社会が使うことのできる余剰（正味）エネルギー（ E_{net} ）は、「回収エネルギー（ E_{out} ）－投入エネルギー（ E_{in} ）」で求められる。これを示したのが、図表 2 である。



出典：“eroei.net” <<http://eroei.net>> (accessed on May 17, 2020) を参考に筆者作成。

図表 2 が示すように、EROI は、「 E_{out} （回収エネルギー）÷ E_{in} （投入エネルギー）」として求められ、単位のつかない数字で表される。「量」に着目してみるならば、地球上には大量の原油が眠っている。採掘可能な技術があり、プロジェクトを遂行するための経済的条件が整えば、それらにアクセスすることが可能かもしれないが、社会にとってエネルギー源として寄与するかどうかは別問題である。

そこに立ちただかるのが、EROI の壁である。一般的にこうした「深追い」は、より多くの投入エネルギー（ E_{in} ）を必要とする。そして、 $EROI = 1$ よりも小さな値になる時には、

8 Charles A. S. Hall, Stephen Balogh and David J. R. Murphy, “What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?,” *Energies*, Vol.2, No.1, 2009, p.26.

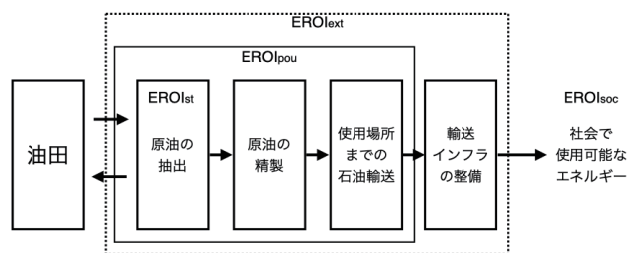
そのエネルギーにはエネルギーとしての価値がなくなる。エネルギー生産に必要なエネルギーの方が、取り出されるエネルギーよりも多く必要だということは、社会に余剰エネルギーを生み出さないばかりか、貴重な余剰エネルギーを「無駄遣い」していることになる。

このような非合理的なことは、マーケットメカニズムが許さないと考えるかもしれないが、新しい技術の発明や新しいアイデアに市場が過度な期待をすると、こうした現象が起きることがある。典型的な事例は、一時期ブームとなったバイオエタノールである。

トウモロコシ由来のバイオエタノールについての EROI を分析したマーフィー (David J. Murphy) らの研究によると、全米 1287 郡のバイオエタノールの平均 EROI は 1.01 であった⁹。また、米国の交通システムのインフラ構造を維持するためには、EROI が 3 以上のエネルギー源が必要であるため、トウモロコシ由来のバイオエタノールはエネルギー補助金なしでは存続し得ないし、米国交通システムのエネルギー事情を悪化させる存在であるとも指摘している¹⁰。こうした分析結果は、バイオエタノールへの補助金支出をめぐる政策判断にとって有益な視座を提供し得る。

図表 2 が示す EROI は、そのエネルギーを「地表に取り出すところ」までに限定して算出したものである。純粋な資源工学の視点からは有用であるかもしれないが、実社会での政策を検討する上では、より実態に即した分析が求められる。社会がそのエネルギーを使用するためには、エネルギーを精製し、運搬する必要も生じる。これらすべてのプロセスでエネルギーの投入が必要であることに加え、輸送のインフラを維持管理するためにもエネルギーは必要である。こうしたニーズに応え、EROI の研究者たちは、複数の EROI をバリエーションとして設定し、研究を発展させてきた。

図表 3：さまざまなタイプの EROI 分析とその境界線



出典：Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.142 を参考に筆者作成。

9 David J. Murphy, et.al., “New Perspectives on the Energy Return on (Energy) Investment (EROI) of Corn Ethanol,” *Environment Development and Sustainability*, Vol.13, 2011, pp.179-202.

10 *Ibid.*, p.194.

ホールらは、異なる境界で区切り、複数の EROI のタイプがあることを示している¹¹⁾。これらは、どの文脈でエネルギーが持っている価値を検討するかによって使い分けることになる。それぞれの EROI の概略、考え方は以下の通りである。

EROI_{st} (Standard EROI) :

標準的な EROI。投入エネルギー (Ein) の算出は、生産の現場で直接使用されるエネルギーに加え、それらの装置を製造するために必要な間接エネルギーを加える。労働力や金融サービス等に関連するエネルギーは含まれない。

EROI_{pou} (Point of Use EROI) :

燃料の精製と輸送に伴うコストを追加的に含む、より包括的な EROI。分析の境界が拡大されることにより、EROI_{st} に比べて、EROI の数値は低下することになる。

EROI_{ext} (Extended EROI) :

この拡張された分析枠組では、エネルギーを得るために必要なエネルギーのみならず、単位エネルギーを使用するために必要なエネルギーも考慮される。ここでは、たとえば、トラックを運転するために必要なインフラを維持整備するエネルギーなどが考慮されることになる。

EROI_{soc} (Societal EROI) :

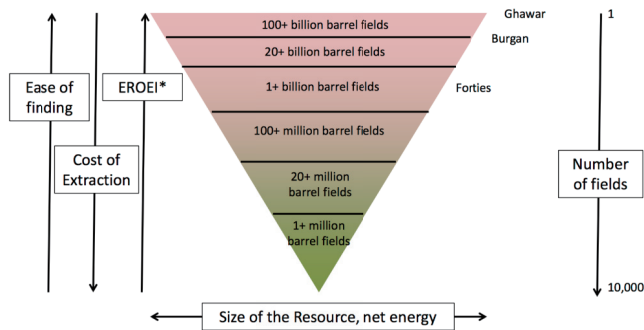
社会的 EROI は、当該エネルギーから得られる利益と、それを得るためのすべてのコストを合計することで求められる全体的な EROI である。ただし、社会的 EROI を算出するために必要なエネルギーコストすべてを測定することは極めて困難であるため、この EROI の算出については研究の発展途上である。

3. EROI 指標を用いた国際的なエネルギー環境分析

前述のように、EROI 指標を用いたエネルギー分析は、主に原油生産を中心に行われてきた経緯があり、数多くの研究成果が提出されるようになっている。原油生産に関しては、一般的に、「資源の三角形 (resource triangle)」によって説明される。

11 Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, pp.142-143.

図表 4：在来型油田の状況を示す資源の三角形



出典：Gareth Roberts, “The Resource Triangle” (Power Point Slides presented at Net Energy Analysis Workshop on April 1, 2015 at Stanford University)
http://gcep.stanford.edu/pdfs/events/workshops/Roberts_The%20Resource%20Triangle%20April%202015.pdf
 (accessed on May 18, 2020) をもとに一部筆者改変。

図表 4 は、在来型油田の特徴を示している。サウジアラビアのガワール油田やクウェートのブルガン油田のような巨大油田は利用できる正味エネルギー量（Enet）も多いが、油田の数は極めて少ない。EROI（図中では EROEI となっているが、同じ概念である）の値も高く、採掘コストも安い。最近発見されているような規模の小さな油田は、数は多いが、使える正味エネルギー量は少ない。EROI の値も低く、採掘コストも高い。

発見されている油田の規模（究極可採埋蔵量）についての研究によると、調査対象となった 4 万を超える鉱区のうち究極可採埋蔵量が 5 億バレルを超えるのは 370 鉱区で、数としては全体の 1% 以下に過ぎないが、累積発見量の 4 分の 3 を占めている¹²。また、究極可採埋蔵量が 1 億バレルを超えるのは 1300 鉱区あり、これは全体の 3% に過ぎないが、累積発見量の 94% を占めている。つまり、近年発見されるような相対的に小さな油田は、39,000 鉱区ほどあっても、原油生産に寄与する割合は全体の 6% 未満に過ぎないということになる¹³。

こうした状況に、EROI 指標をかぶせると、発見の古い大油田の持つ社会的な価値がより浮き彫りになる。なぜなら、社会にとってのエネルギー生産の価値とは、その社会がどのくらいのエネルギーを正味使えるかという正味エネルギー（Enet）の量が重要であり、同じだけの量を生産したとしても EROI の高い原油の方が正味エネルギーの量が多いためである。正味エネルギーの計算式は、以下の形となるため、同じ 100 バレルを生産（Eout）したとしても EROI=100 の鉱区の Enet = 99 バレルとなるのに対して、EROI=2 の鉱区の場合は Enet=50 バレルにしかない。

12 Steve Sorrell, et.al., “Shaping the Global Oil Peak: A Review of the Evidence on Field Sizes, Reserve Growth, Decline Rates and Depletion Rates,” *Energy*, Vol.37, 2012, p.710.

13 *Ibid.*, p.710.

$$E_{net} = E_{out} * (1 - \frac{1}{EROI})$$

図表 5：各石油会社の収入、生産量、EROI

Oil company name [N or P O or B]	Revenues [10^9 \$]	Production (oil & gas) [b/y]	EROI [D I]
01. Saudi Aramco [N O]	478.00	4,079,118,750.00	52.29
02. Sinopec [N O]	455.50	471,910,000.00	1.67
03. China National Petroleum [N O]	428.62	1,369,142,168.99	NA
04. PetroChina [N O]	367.98	1,493,900,000.00	3.63
05. Exxon Mobil [P O]	268.90	2,147,860,750.00	7.59
06. Shell [P O]	265.00	1,095,000,000.00	7.75 6.88
07. Kuwait Petroleum [N O]	251.94	1,058,500,000.00	19.86
08. BP [P O]	222.80	1,196,105,000.00	11.23 9.74
09. Total SA [P O]	212.00	856,655,000.00	10.81
10. Lukoil [P O]	144.17	890,000,000.00	5.83
11. Eni [P O]	131.82	932,856,050.00	10.43
12. Valero [P B]	130.84	NA	NA
13. Petrobras [N B]	130.00 ^a	1,018,350,000.00	5.65
14. Chevron [P O]	129.90	1,283,971,450.00	9.70
15. PDVSA (Venezuela) [N O]	128.44	1,373,611,800.00	NA
16. Pemex [N O]	117.50	1,017,620,000.00	7.88
17. National Iranian Oil [N O]	110.00 ^b	1,624,250,000.00	1.30
18. Gazprom [N O]	106.30	2,905,775,054.29	11.65
19. Petronas [P O]	100.74	894,862,500.00	7.93
20. CNOOC [N O]	98.53	719,973,411.17	11.20
21. Marathon Petr. [P B]	97.81	465,353,100.00	11.38 8.41
22. PTT (Thailand) [N O]	93.55	241,060,000.00	24.95 24.89
23. Rosneft [N O]	91.72	2,258,218,368.75	21.14 13.12
24. JX Holdings [P B]	90.67	49,006,000.00	2.68
25. Engie [P B]	89.64	209,779,126.80	NA
26. Statoil [N O]	82.48	1,073,000,000.00	28.37
27. Indian Oil Corporation [N B]	81.55	422,016,571.42	3.70
28. Sonatrach [N O]	76.10 ^c	370,059,300.00	22.56
29. Reliance Industries [P B]	73.10	17,220,213.80	28.58
30. Pertamina [N O]	70.65	219,636,100.00	8.04
Total	5126.25	31,754,810,715.23	16.79 ^d

N national company, P private company, O core business: oil & gas extraction, B core business: refinery or/ and other business, D direct emissions, I indirect, NA not available data

^aRevenue in 2013

^bRevenue in 2012

^cRevenue in 2012

^dWeighted mean for all companies

出典：Luciano Celi, et.al., “A New Approach to Calculating the “Corporate” EROI,” *BioPhysical Economics and Resource Quality*, Vol.3, No.15, 2018, p.2.

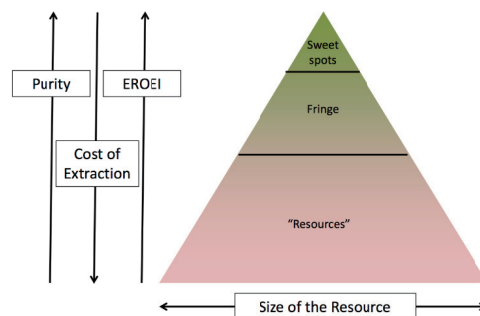
各油田の EROI 算出（この場合は、EROIst の算出）に関する研究は数多く提出されているが、近年行われた包括的な研究としては、セリ（Luciano Celi）らによるものがある¹⁴。この研究では、図表 5 が示すような形で、企業ごとの EROI が推定されている。

図表 5 が示すように、抱える油田の規模や性質によって、サウジアラムコのように EROI = 52.29 というケースから、エクソンモービルの EROI=7.59 やシェルの EROI=7.75、中国のシノペックのように EROI=1.67 というケースまでバラツキがある。単純に加重平均した世界の推計値は、EROI=16.79 である。

14 Luciano Celi, et.al., “A New Approach to Calculating the “Corporate” EROI,” *BioPhysical Economics and Resource Quality*, Vol.3, No.15, 2018, pp.1-28.

原油と天然ガスをめぐる全世界の EROI 推計は、他の研究でも概ね似た値を示している。4 つの論文が示す 36 の値の平均は、概ね $EROI = 20$ であるという報告もある¹⁵。こうした議論のポイントは、年を経るごとに全世界の EROI が減少傾向にあるという点にある。在来型油田の多くが生産ピークをすでに過ぎており、減衰分を EROI の値の低い小規模油田が補っているためである。1995 年の時点で $EROI = 30$ であったのに対して、2006 年には $EROI = 18$ だという見積もりもある¹⁶。また、米国の原油生産に関して、1970 年代が $EROI=25$ であったのに対して、2007 年には $EROI = 10$ 程度まで低下しているという研究もある¹⁷。

図表 6：非在来型油田の状況を示す資源の三角形

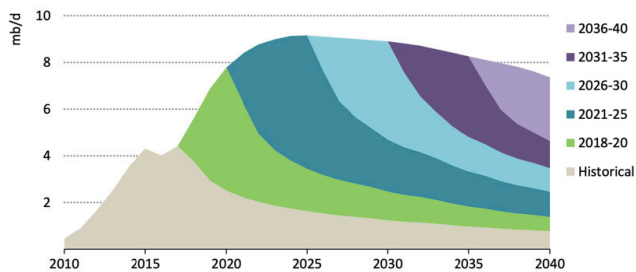


出典：Gareth Roberts, “The Resource Triangle” (Power Point Slides presented at Net Energy Analysis Workshop on April 1, 2015 at Stanford University)
 <http://gcep.stanford.edu/pdfs/events/workshops/Roberts_The%20Resource%20Triangle%20April%202015.pdf>
 (accessed on May 18, 2020) をもとに一部筆者改変。

減衰する在来型油田からの産出量を補うとして期待されているのが、米国のタイトオイルに代表されるような非在来型油田の存在である。ところが、図表 6 が示すように、EROI の値が高く、採掘コストも安く、かつ純度も高い「スウィートスポット」は限られている。その他、EROI の値が低く、採掘コストも高く、純度も低い原油であれば地下に大量にあるが、これらが実際に採掘されるかの保証はない。

- 15 Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.143.
- 16 Nathan Gagnon, et.al., “A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production,” *Energies*, Vol.2, 2009, pp.490-503.
- 17 Megan C. Guilford, et.al., “A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production,” *Sustainability*, Vol.3, 2011, pp.1866-1887.

図表 7：米国におけるタイトオイル生産の見通し



出典：International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, 2018, p.158.

図表 7 は、IEA の政策シナリオが示す米国のタイトオイル生産の見通しである。タイトオイルの油井は、生産開始からすぐに生産量のピークを迎え、その後、急激に生産量が減少した後、低レベルの生産量が長く続くという特徴がある。そのため、減衰分を補うには、新規油田の開発と掘削を継続的に続けていく必要がある。IEA によると、米国で 2017 年に完成した 8500 本のタイトオイル井のうち 70% 近くは既存の油田の減衰を補うために必要とされたものであり、継続的な開発が滞ると供給量が減り始めると指摘している¹⁸。

採掘可能な技術があったとしても、投資が滞れば新規開発を行うことができない。そのためには、経済的な利益を生み出すのに十分な油価が必要となる。この点、油価と EROI との関係を分析した研究は、両者の間に負の相関関係がある（EROI の小さい原油ほど、採掘に必要な金銭のコストが大きい）ことを明らかにしている¹⁹。米国のタイトオイルの EROI については複数の見積もりがあるが、いずれも一桁台（EROI < 10）に過ぎない²⁰。

つまり、米国のタイトオイルの生産を安定的に続けるためには、高い油価を維持し続けた上で、継続した投資を滞らせないことが条件となる。そんな中、起きたのが新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）のパンデミックである。先進国が軒並みロックダウン政策を採る中、油価は歴史的な下落を記録した。大きな影響を受けたのが、米国のタイトオイル生産企業であった。2020 年の 4 月 1 日には、米国のバッケン鉱区で最大のタイトオイル生産業者であったホワイティング社が、連邦破産法第 11 条の適用を申請し経営破綻して

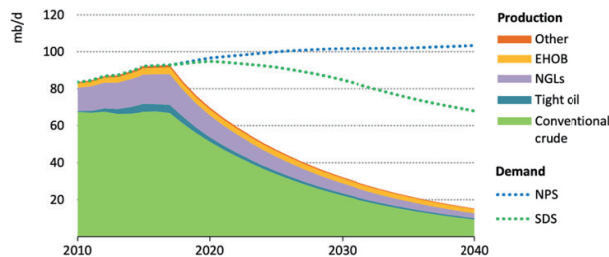
18 International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, 2018, pp.157-158.

19 David J. Murphy, “The Implications of the Declining Energy Return on Investment of Oil Production,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol.372, Issue 2006, 2014, pp.6-7.

20 Jessica G. Lambert, et.al., *EROI of Global Energy Resources: Status, Trends and Social Implications*, SUNY Environmental Science & Forestry and Next Generation Energy Initiative Inc., 2013; Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.143.

いる²¹。急激な原油価格の下落が破綻の引き金を引いたことは間違いないが、ここ数年、米国のタイトオイル業界をめぐっては、リターンの悪さから投資家が不満を募らせていた²²。2018 年以降、破綻する企業が相次いでいたというのが実情で、そこに新型コロナウイルスの影響が加わった。

図表 8：原油生産の自然減衰率と IEA の政策シナリオにおける原油需要予測



NPS (New Policy Scenario) = IEA が提唱するエネルギー政策に沿ったシナリオ

SDS (Sustainable Development Scenario) = 国連 SDGs の目標をエネルギー部門が達成するためのシナリオ

出典：International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, 2018, p.159.

図表 8 は、原油生産の自然減衰率と IEA が示す政策シナリオに必要な原油需要を示した図である。自然減衰率とは、現在生産を行っているすべての油田で設備投資をただちに停止した場合に生じる生産量の減少率である。IEA の試算によると、2025 年までの自然減衰率は年 8% 以上であり、SDS (Sustainable Development Scenario：持続可能な開発シナリオ) ですら大きく下回ることになる。つまり、再生可能エネルギーへの移行など国連の SDGs (Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標) を実現させるにも原油生産は不可欠であり、そのためにはかなり積極的な原油開発の上流部門への投資が不可欠だということを意味する²³。エネルギーシフトも「原油頼み」だという指摘である。

EROI の値が大きく、採掘しやすいイージーオイルは、過去のものになっている。在来型油田の多くはすでに生産ピークを過ぎており、減衰分を小規模で EROI の小さい油田か、タイトオイルのような非在来型の油田が補っているのが実情である。EROI の小さい油田の開発、操業には、相対的に高い油価が求められるが、高すぎる油価は経済を圧迫し、経

21 Arathy S. Nair, “U.S. shale company Whiting becomes first major bankruptcy of oil-price crash,” *Reuters*, April 1, 2020. <<https://www.reuters.com/article/us-whiting-petrol-bankruptcy/us-shale-company-whiting-becomes-first-major-bankruptcy-of-oil-price-crash-idUSKBN21J5KS>> (accessed on May 18, 2020)

22 *Ibid.*

23 International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, 2018, pp.158-159.

済成長を鈍化させる²⁴。技術的、経済的、政策的に、既存油田からの自然減衰と、引き続き求められることになる原油需要とのギャップを埋めることができないと、エネルギー供給の「危機」を誘発しかねず、それは、電力をはじめとする他のエネルギー供給にも多大な影響を与えることになる。

4. EROI の視点を交えたエネルギーシフトへの考察

イージーオイル時代が過去のものとなり、ポスト・イージーオイル時代に突入したということは、それだけ原油の安定供給に対して圧力がかかってくることを意味する。そんな中、気候変動への懸念や、国連の SDGs への取り組みという側面もあって、化石燃料への依存度を減らし、再生可能エネルギーの導入を増やそうとする動きが、世界的に見られる。電力供給の分野では、「脱原発」の動きもある。

EROI 指標は、原油生産にのみ適用可能な概念ではない。エネルギーの種類を問わず、同じ考え方を援用して結果の算出をすることが可能である。「資源の有限性」を考慮に入れるということは、使用可能な正味（余剰）エネルギー（Enet）に限りがあることを認めるということでもある。現代社会における基礎的なエネルギーとなっている原油生産の現場で、経年ごとに EROI の値が減少し続けているということは、同じ量のエネルギー生産（Eout）をしていたのでは、正味エネルギー（Enet）が減少していくことを意味する。

既存油田からの減衰分は、非在来型油田を含む、より EROI の低い（採掘にかかる金銭的成本も高い）油田から埋め合わせる必要がある。採掘可能な技術があつたとしても、市場経済のメカニズムの中で継続的な投資が得られないと、新規油田開発は減速してしまう。そのためには、相対的に高い油価が維持される必要があるが、高い油価は経済成長にマイナスの圧力をかけることになる²⁵。また、米国のタイトオイル業界に見られるように、EROI の低い原油開発への投資リスクは常につきまとう。

したがって、地中に眠る確認埋蔵量がいくら膨大にあつたとしても、それらを取り出し、社会がエネルギーとして活用するのは簡単ではない。ポスト・イージーオイル時代は、社会が使用可能な正味エネルギーを簡単に増やせないばかりか、経済状況や投資環境によっては、簡単に減少してしまう。

このような国際的なエネルギー環境の構造的変化（イージーオイル時代の終焉）を勘案した上で、エネルギー関連政策を議論するに際しては EROI 指標による評価が重要な判断材料となり得る。なぜなら、EROI の低いエネルギーへの依存度を高めるということは、

24 David J. Murphy, "The Implications of the Declining Energy Return on Investment of Oil Production," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol.372, Issue 2006, 2014, p.16.

25 *Ibid.*, pp.1-19.

貴重な正味エネルギーの多くをエネルギー生産に費やさなくてはいけないことを意味し、結果として当該社会がエネルギー生産以外に使えるエネルギー量を減じてしまうからである。

エネルギー政策は、国家の存立にも関わる重要事項であるため、単純な市場原理だけで動くわけではない。前述したように、米国におけるトウモロコシ由来のバイオエタノールは、EROI が限りなく 1 に近いので、(社会に新しいエネルギーを何ら供給していないという意味で) この燃料のエネルギーとしての価値はほとんどない。とはいえ、エネルギーとは別次元の政治的な思惑によって、補助金を使いながら業界を温存するという「政治的選択」が行われる余地は常に残る。

しかしながら、そのような政策の遂行は、ある種の「余裕」がある時に限られる。この「余裕」には、国家財政上の余裕に加え、エネルギー量的な余裕も含まれる。イージーオイル時代のように、EROI の高い原油が大量に、かつ安価で手に入る環境では、資源の有限性や正味エネルギーの総量をそれほど意識する必要がなかった。高い経済成長率も維持しており、財政上の余裕もあった。ポスト・イージーオイル時代では、これまでのような前提は成り立ちにくい。

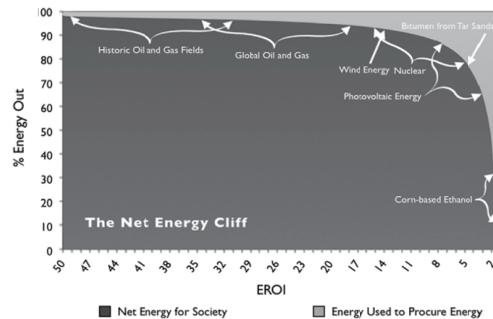
こうした問題意識もあって、原油以外のエネルギーに対する EROI 分析が試みられるようになった。この点、日本では、初期の EROI に関する研究は、電力中央研究所を中心に原子力工学の研究者たちによって活発に行われた²⁶。当時の試算では、原子力発電 (EROI=17.4)、中小水力発電 (EROI = 15.3)、石油火力発電 (EROI = 7.9)、地熱発電 (EROI=6.8)、石炭火力発電 (EROI = 6.55)、液化天然ガス火力発電 (EROI = 2.14)、太陽光発電 (EROI = 0.98) と見積もられており、原子力発電の有用性を示唆する報道も見られた²⁷。当時は、二酸化炭素削減の観点からも原子力発電の利点が主張されることもあったが、2011 年に起きた福島第一原子力発電所の事故以降、状況は一変している。

図表 9 は、異なるエネルギーの EROI を社会が利用可能な正味エネルギーに着目しながら示した図である。この図が示すように、正味エネルギーは、EROI = 10 あたりを境界として非線形の動きをする。このカーブは、一般的に「正味エネルギーの崖 (Net Energy Cliff)」として知られている。EROI が 10 を下回るようになると、EROI = 10 で 90%、EROI = 5 で 80%、EROI = 4 で 75%、EROI = 3 で 67%、EROI = 2 で 50% という形で、正味エネルギーの量は急速に減少することになる。

26 たとえば、以下の文献を参照されたい。天野治『石油ピーク後のエネルギー：EPR（エネルギー収支比）から資源の有効利用を考える』愛智出版、2008 年；天野治他『軽水炉型原子力発電所での使用済燃料リサイクルのエネルギー収支分析』電力中央研究所研究報告書（報告書番号 L09002）、2009 年。日本では、EPR (Energy Profit Ratio) という用語が使われてきたが、概念としては EROI と同一のものである。近年では、日本でも EROI の用語が使われるケースが多い。

27 「エネルギーの理科 5：EPR」『日本経済新聞』（2006 年 7 月 2 日、朝刊）。

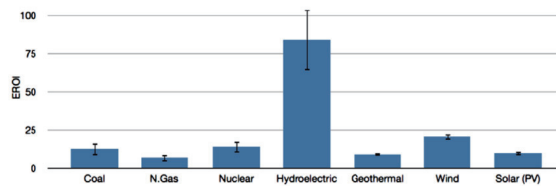
図表 9：「正味エネルギーの崖」と各エネルギーの EROI 推定値



出典：Jessica G. Lambert, et.al., “Energy, EROI and Quality of Life,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.154.

したがって、エネルギーシフトを考える上では、EROI が 10 を上回ることができるかどうかは 1 つのポイントとなる。この点、図表 9 が示すように、米国のタイトオイル、風力発電、原子力発電、太陽光発電などの「代替エネルギー」は、EROI の値が 10 前後のところに位置する。このうち再生可能エネルギーは、近年の技術革新によって、EROI の値を上昇させている。当然のことながら、今後の技術動向によって、EROI も変わり得る。

図表 10：発電システムに関する EROI の既発表データの平均値



出典：Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.143.

ホールらが、関連する研究をまとめて、電力生産に関する EROI の平均値をとった結果は、図表 10 のようになっている。原子力発電の EROI の平均（15 の論文で示された 33 の平均）は、EROI = 14 であり²⁸、これまでの研究と比べて大きな変化は見られない。対して、風力発電の EROI は 18 ～ 20 程度、太陽光発電の EROI が 10 程度、地熱発電の EROI が 9 程度であり、既存発電システムと比べても遜色のないレベルにまで達している²⁹。極めて EROI の値が大きかったのが、水力発電であり、平均 84 という結果となっている³⁰。この

28 Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.143.

29 *Ibid.*, pp.143-144.

30 *Ibid.*, p.143.

先のエネルギー政策を検討するにあたって、特に中小水力発電は検討の価値があると思われる。

また、近年、「エネルギーの地産地消」も注目されているが、EROI の視点から見れば、一般的にエネルギーの地産地消は EROI の値を押し上げる効果がある。特に、化石燃料のようにエネルギーが凝集しておらず、エネルギー密度が低い再生可能エネルギーを使用する場合は、地産地消は理にかなっていると考えられる。

石油ベースの社会からのエネルギーシフトということでは、別の視点からも 10 程度の EROI が 1 つの「境界線」の目安だとする考え方がある。「最小 EROI (Minimum EROI)」という概念である。第 2 節で紹介した、EROI_{ext} (Extended EROI) とも関係する。ホールらの試算によると、採掘された原油が実際に社会で使われるまでに必要なエネルギーを考慮に入れると、産出された原油の約 64% は、精製、輸送、道路等のインフラの維持整備に必要であるという³¹。つまり、EROI_{ext} = 3 がないと交通機関や関連システムを動かすのが困難となり、それを担保するためには標準的な EROI に換算して EROI = 10 程度なくてはならない。

単体で EROI が 10 以上ないエネルギーは、相対的に EROI の高い石油経済からの補助金なくしては存続が難しく、その意味において「代替」エネルギーとはなりにくい。ただし、EROI_{ext} = 3 というのは、むき出しの文明の「最小 EROI」に過ぎず、実際には芸術、医療、教育などを成り立たせることを「社会が最低限望む」のであれば、より高い EROI が求められることになる³²。

確かに再生可能エネルギーに関する技術進歩は著しいものがあり、この先のエネルギー政策を考える上で重要な役割を果たすことになると期待される。通常、再生可能エネルギーへの移行を計画するに際しては、政治的（政策的）制約、経済的制約、技術的制約等が検討され、エネルギー的制約（EROI 的な視点）が考慮されることは少ない。しかしながら、再生可能エネルギーを使って再生可能エネルギーを増やしていくことは難しいのであって、引き続き化石燃料を必要とするという視点を無視してはならない。

こうした問題意識も考慮し、キャピヤン・ペレス (Inigo Capellan-Perez) らは、電力の再生可能エネルギー比率を 2060 年までに 50% にしたケース、75% にしたケース、100% にしたケースごとにシミュレーションを行っている³³。どのシナリオも、全体の EROI を低下させるが、特に再生可能エネルギー 100% を目指すシナリオでは、移行途中で +35%

31 Charles A. S. hall, et.al., "What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?," *Energies*, Vol.2, No.1, 2009, p.41.

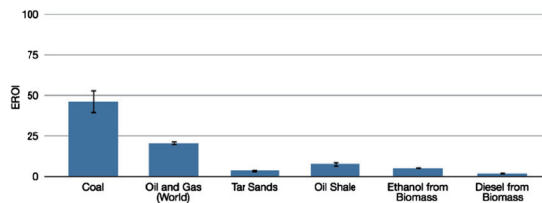
32 *Ibid.*, p.45.

33 Inigo Capellan-Perez, et.al., "Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and Material Requirements in Scenarios of Global Transition to Renewable *Energies*," *Energy Strategy Reviews*, Vol.26, 2019, pp.1-26.

の 1 次エネルギー増加を必要にすると結論づけている³⁴。また、必要な鉱物資源も増大し、特にテルル (tellurium)、イリジウム (indium)、スズ (tin)、銀 (silver)、ガリウム (gallium) については、累積抽出需要が現在の埋蔵量の 100%を超えてしまうという³⁵。

より低い EROI のエネルギーへとエネルギーシフトするためには、そのエネルギーの持つ EROI よりも高い EROI の資源に頼らざるを得ない。再生可能エネルギーの割合をどの程度のするのかという点については、複数の視点から議論の余地があると思われるが、どのような移行であっても、化石燃料への継続的な投資が積極的に必要であるというのは見落とされがちな視点である。

図表 11：熱エネルギーに関する EROI の既発表データの平均値



出典：Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.143.

図表 11 は、熱エネルギーのエネルギー源に関する各種 EROI 研究の平均値を示した図である。この中で、比較的高い値を示しているのが石炭である。17 の論文が示す、72 の炭鉱における平均 EROI は、約 46 であった³⁶。米国のケースでは、1950 年代半ばの石炭の EROI が約 80 と高かったところから、1980 年代半ばにかけて EROI = 30 程度まで低下したが、1990 年代までに再び EROI = 80 程度まで回復したという研究も報告されている³⁷。EROI だけを考えれば世界が再び石炭への依存度を高める可能性は高いが、採掘プロセスでの事故、大気汚染等、エネルギー源としての石炭には問題点も多い。そこにどのような規制の網をかぶせるのかというのは政策の問題であり、石炭をどのように扱うのかは、今後のエネルギー政策を考える上での重要な論点となるであろう。

国際的なエネルギー環境の構造的変化は、安定的な電力供給システムにとっても多大な影響を及ぼすと考えられる。長期的には再生可能エネルギーの割合を増やしていくという解を目指していくということになるのかもしれないが、化石燃料と単純なトレードオフの関係にあるわけではない。この先、既存のエネルギー源とのバランスを考慮しながらエネ

34 *Ibid.*, pp.17-18.

35 *Ibid.*, p.18.

36 Charles A. S. Hall, et.al., “EROI of Different Fuels and the Implications for Society,” *Energy Policy*, Vol.64, 2014, p.143.

37 *Ibid.*, p.143.

ルギー政策を検討するに際しては、EROI の視点からの評価も積極的に考慮すべきだと考える。

5. 結論

政策には、制約がつきまとう。財政状況による予算的制約、時間的制約、人的資源に関わる制約、技術的制約、情報の非対称性や不完全性に起因する制約などさまざまである。当然のことながら、制約の範囲内でしか政策は立案・実施することができない。したがって、政策的に解決可能な問題と、解決が難しい問題とがある。

本稿が取りあげた EROI は、エネルギーに関する地球物理的な制約が反映された指標である。エネルギーに関しては、エネルギー保存の法則（熱力学の第一法則）やエントロピーの法則（熱力学の第二法則）が知られており、地球上のあらゆるエネルギーはこれらの法則を逸脱しない。また、現在人類が手にしている技術は、「自然界からエネルギーを取り出す技術」であって、「エネルギーを生み出す技術」は手にしていない。

改めて指摘するまでもなく、政策によって物理法則を乗り越えることはできない。エネルギーに関しては、地球物理的制約の中でしか利用することはできないが、エネルギーに関する政策が、こうした物理的な制約を勘案することは少なかった。その必要がほとんどなかったからである。

前述のように、EROI の視点から見た閾値（threshold）は、概ね $EROI = 10$ の地点にある。EROI が 10 を越えている状況での正味エネルギー量（ E_{net} ）は、 $EROI = 10$ の時に産出されたエネルギー（ E_{out} ）の 90%、 $EROI = 20$ では 95%、 $EROI = 30$ では 97%、 $EROI = 40$ で 98%、初期の陸上油田のように $EROI = 100$ で 99%と、エネルギーを生み出すためのエネルギー（ E_{in} ）をほとんど意識する必要がない。ところが、EROI が 10 を切るようになると、数値が 1 下がるだけで、エネルギーを生み出すために必要なエネルギーが指数関数的に増大する。

原油生産の現場において、生産ピークを過ぎた油田の EROI が、年を経るごとに低下することは避けられない。また、過去人類は、技術的に採掘のしやすい油田（概して EROI が高い）から手をつけ、技術的に採掘の難しい油田（概して EROI が低い）については後回しにしてきた。近年の著しい技術進歩によって、そうした油田からの原油生産が可能となっているが、それらは生産コストも高く、EROI も相対的に低い。

2020 年段階での全世界の EROI 平均は、各種見積もりによると、 $EROI = 15$ 程度だと推定される。一部の油田を除いて、既存油田の多くは産出ピークを過ぎており、減衰分を米国のタイトオイルなど非在来型油田からの原油が補っている。こうした油田の EROI は 10 以下のものが多い。投資リスクも広く認識されており、資金の集まりにくい状況も続いている。

結局のところ、人類が利用可能だと思われる原油の約 3 分の 2 は、中東地域に偏在しており、これらの油田の EROI は、現在でも比較的高いと推定されている³⁸。また、原油輸入のほぼすべてを輸入に頼っている日本は、その約 9 割を同地域に依存している。2011 年の「アラブの春」以降、この地域の政治環境は依然不安定なままである。中東の産油国が混乱するようなことがあると、EROI の高い原油の供給が滞る可能性がある。この地域の安定は、日本のエネルギー安全保障上、極めて重要であるが、この点については本稿の範囲を超える。

原油の供給チェーンに大きな圧力がかかっている中、比較的高い EROI を維持しているのが石炭である。ただし、石炭は、採掘に伴う事故や大気汚染など、エネルギー源としての問題も多い。また、原油需要の 5 割超は輸送・運輸部門で発生しており³⁹、現代社会における人やモノの移動は常温で液体という性質を持つ石油に最適化されている。常温で固体という物理的特性を持つ石炭が、そのまま代替することはできない。

石炭の液化技術も研究が進んでいるが、プラントの建設をはじめ追加的なエネルギーが必要となり、EROI の低下は否めない。電気自動車の普及も見られるが、IEA の予測でも、2040 年の電気自動車のシェアは 15%程度にとどまっており、そう簡単に他のエネルギーに代替できるものではない⁴⁰。いずれにせよ、供給チェーンに圧力がかかっている原油に代替するエネルギー源としての「石炭問題」は、国際的なレベルでも国内的なレベルでもエネルギー政策を検討する上で重要な議題になるであろう。

今後の電力政策を考える上では、こうした国際的なエネルギー環境も考慮に入れる必要がある。イージーオイル時代の電力供給に比べて、ポスト・イージーオイル時代の電力供給では、考慮しなくてはいけない制約条件が増えることになる。

近年、著しい技術革新が見られるとはいえ、再生可能エネルギーの EROI は、閾値である EROI = 10 前後にある。また、再生可能エネルギーを使って、再生可能エネルギーを生み出すのに必要な装置や工場などの建設はできないため、電力の「エネルギーシフト」を行う上でも、引き続き原油依存は続く。

キャピヤン・ペレスらが指摘するように、「IEA、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)、各国政府によるものなど政策提言に使用されるほとんどのモデルは、再生可能エネルギー発電施設の建設や維持運営に必要な投入エネルギー、ならびにそれらのエネルギーシステム全体への影響を無視」している現状がある⁴¹。資源的制約を背景に、

38 Luciano Celi, et.al., “A New Approach to Calculating the “Corporate” EROI,” *BioPhysical Economics and Resource Quality*, Vol.3, No.15, 2018, p.2.

39 International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, International Energy Agency, 2018, p.140.

40 International Energy Agency, *World Energy Outlook 2019*, International Energy Agency, 2019, p.137.

41 Inigo Capellan-Perez, et.al., “Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and Material Requirements in Scenarios of Global Transition to Renewable Energies,” *Energy Strategy Reviews*, Vol.26, 2019, p.18.

再生可能エネルギーの積極的導入が模索されているが、EROI に関する一連の研究が示唆しているのは、「エネルギーシフト」そのものに資源的制約が足かせとしてのしかかるというものである。

キャピヤン・ペレスらも主張するように、「再生可能エネルギーへの移行を計画する際、通常、関連する制約条件は政治的・経済的制約条件（政治的意思や金銭的投資）のみと仮定されているが、システム全体の EROI の見積りもまた、政策の評価をする際に考慮すべき要素」となる⁴²。同時に、テルル、イリジウム、スズ、銀、ガリウムなどの鉱物資源についてもその「有限性」から、入手可能性に問題が起きる可能性がある。

『成長の限界』が発表されてから、半世紀が経過しようとしている。これまでエネルギー政策の展開にあたって、「地球の有限性」が具体的な制約として政策の遂行を阻む可能性があることを考慮する必要は少なかった。

ところが、イージーオイル時代が過去のものとなり、既存油田からの減衰分を補っている非在来型油田や、再生可能エネルギーの多くは、「EROI = 10 の壁」を意識せざるを得ないようなエネルギー効率しか有していない。中東の既存油田からの原油は依然として相対的に高い EROI を保っているものの、全世界平均では EROI = 15 程度にまで下がってきている。ポスト・イージーオイル時代のエネルギー政策を考える上では、エネルギーの量のみならず、質にも注目する必要がある。そのための指標が、EROI である。

この種の認識変化は、先進国政府の多くで受け入れがたいものとして映るであろう。一般的にエネルギーの投入量と経済成長との間には正の相関関係があることが知られており、エネルギーに追加的コストがかかるようになると経済に悪影響を及ぼしかねない⁴³。資源の有限性やエネルギーの有限性を認めた上で、それを前提とした政策を立案するのではなく、「エネルギーの有限性を乗り越え」ようとする政策を目指す可能性が高い。ただし、それが成功する可能性は極めて低い。政策によって、地球の物理的法則を変えることはできないからである。

こうしたパターンは、「はじめに」で引用したティンターの研究結果を想起させる。ティンターの考察によると、「文化的複雑性の歴史は、人類の問題解決の歴史」であり、「歴史を通して、人類が直面したストレスと挑戦は往々にしてより複雑になる戦略によって解決されてきた」という⁴⁴。過去、人類は何らかの問題にぶつかると、「複雑化」させることで問題解決を図ろうとしてきた。エネルギーの生産と使用も、より単純な技術、システムから、より複雑な技術、システムへと移行している。より高度な技術、より複雑なシステムに解決策を求めようとするのは、今に限ったことではない。

42 Ibid., p.18.

43 David J. Murphy, "The Implications of the Declining Energy Return on Investment of Oil Production," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol.372, Issue 2006, 2014, pp.1-19.

44 Joseph A. Tainter, "Sustainability of Complex Societies," *Futures*, Vol. 27, No. 4, 1995, pp.397-407.

ただし、そのことの帰結として、テインターは以下のような指摘もする。すなわち、「どのような社会も持続可能性を高めるために、はじめはリターンの大きな投資からはじめるが、そのうち費用対効果の低い方法で対処しなくてはならなくなる。ある地点で、複雑化によるリターンがプラスの方向でなく、マイナスの方向に働くようになる。これが問題解決の当事者が直面する長期的な課題であるが、過去の文明のパターンは、このまま放置されると最終的には、非効率な問題解決をもたらし、経済の停滞を招き、最悪の場合は崩壊する」というものである⁴⁵。ポスト・イージーオイル時代が現実のものとなった今、エネルギーの質に着目する EROI の視点をエネルギーをめぐる公共政策に取り込めるか否かは、当該社会の持続可能性を左右することになると思われる。

45 Joseph A. Tainter, “Social Complexity and Sustainability,” *Ecological Complexity*, Vol.3, 2006, p.94.