

石油減耗期におけるエネルギー技術政策の制約と国際秩序への影響

山 本 達 也

1. はじめに

本論文では、現在の国際社会が直面しつつある「エネルギー問題」とは何かという点を中心に、公共政策（特にエネルギー技術政策）を論じるに際して前提となる「エネルギー環境」についての整理を行う。その上で、石油減耗期におけるエネルギー技術政策が課せられることになる制約条件を検討し、今後のエネルギー技術政策を取り巻く環境および国際秩序への影響について論じる。

エネルギーに関する技術の進展、および主要なエネルギー源の変遷は、国際社会の構造を規定する重要な要素として機能し、各時代の国際政治にも多大なる影響を及ぼしてきた。本論文では、こうした問題意識も踏まえつつ現在直面しているエネルギー環境およびエネルギー技術政策を論じるものであり、国際政治への示唆も意識した分析を試みたい。

「石油の今後」をめぐる議論は昔から繰り返し行われてきた。そこには、常に楽観論と悲観論が存在してきた。議論の中心は、可採埋蔵量という「量」をみる視点と、いつごろ枯渇してしまうのかという「枯渇論」であった。

枯渇までの年数に関しては、可採埋蔵量（R）をその年の生産量（P）で単純に割り算をした R/P が指標として用いられてきた。しかしながら、この指標はその年の時点での「静的」な状況を表しているに過ぎず、技術革新によって将来的に可採埋蔵量が増加することや、時間軸に沿って生産量が増減する「動的」な変化を捉えることができないことから、将来予測の指標として十分なものではない点が問題であった。

この点、最近では、「石油の今後」を議論するにあたっては「量」を分析することよりは「質」を分析すること、「枯渇」(running out) を問題視するよりは、生産ピークに伴う「減耗」(depletion) を問題視することの方がはるかに意味を持ち、エネルギー問題の本質を浮き上がらせることができるとする主張が繰り返されるようになってきている。いわゆる「石油ピーク」(peak oil) 論である¹。

こうした主張は、1950 年代より石油地質学者や地球物理学者の一部が繰り返し広げてきたものであるが、国家レベルの政策を立案するにあたって考慮されることはほとんどなかった。しかしながら、近年では、かつてこの議論を「無視」し続けてきた政府部門や民間部門の利害関係者が、公式に、また時には非公式に認めるケースが増えており、石油ピーク論を取り巻く状況

1 石油ピークに関する文献は、近年多数出版されるようになってきている。たとえば、以下の文献を参照されたい。Matthew R. Simmons, *Twilight in the Desert: The coming Saudi Oil Shock and the World Economy*, Jhon Wiley & Sons, 2005; David Strahan, *The Last Oil Shock: A Survival Guide to the Imminent Extinction of Petroleum Man*, John Murray Publishers, 2007（高遠裕子訳『地球最後のオイルショック』新潮社、2008 年）; Richard Heinberg, *Peak Everything: Waking Up to the Century of Decline in Earth's Resources*, Clairview Books, 2007; Richard Heinberg, *Blackout: Coal, Climate and the Last Energy Crisis*, New Society Publishers, 2009; Richard Heinberg, *The Party's Over: Oil, War and the Fate of Industrial Societies*, New Society Publishers, 2003; Peter Tertzakian, *A Thousand Barrels a Second: The Coming Oil Break Point and the Challenges Facing an Energy Dependent World*, McGraw-Hill, 2006（東方雅美・渡部典子訳『石油最後の 1 バレル』英治出版、2006 年）; Jeremy Leggett, *Half Gone: Oil, Gas, Hot Air and the Global Energy Crisis*, Portobello Books, 2005（益岡賢他訳『ピーク・オイル・パニック：迫る石油危機と代替エネルギーの可能性』作品社、2006 年）; James H. Kunstler, *The Long Emergency: Surviving the End of Oil, Climate Change, and Other Converging Catastrophes of the Twenty-First Century*, Grove Press, 2005.

は過去数年で大きく変わりつつある。

たとえば、ブラジルの国営石油会社ペトロbras (Petrobras) の CEO は、2009 年 12 月に行われたプレゼンテーションにおいて、今がまさに全世界の石油供給のピークだという認識を示している²。既存油田の減退分を補うだけで、今後、2 年ごとに新たなサウジアラビアを発見し続けなくてはならず、これは実質的に不可能だとする見解である。石油の供給に心配はないと言い続けてきた石油業界のトップがこうした認識を示すことは極めて珍しい。

また、これまで石油ピーク論をアジェンダに載せること自体に消極的だった各国政府の関係機関にも変化の兆候が現れ始めている。2010 年 3 月 22 日には、イギリスのエネルギー・気候変動大臣が石油ピークに対する政府の対応を話し合うための会議に出席した。この会議は、参加者はここで得た情報を自由に利用可能だが、発言者の特定をしてはならないという、いわゆる「チャタム・ハウス・ルール」(Chatham House Rules)のもとで行われたため、エネルギー・気候変動大臣の石油ピーク論に対する認識を知ることはできない。しかしながら、イギリスの『ガーディアン』紙は、こうした会議に大臣が出席したこと自体が「政府の重要な政策転換」であると報じている³。

同様に、アメリカ軍は、統合戦力軍 (US Joint Forces Command) による報告書『統合作戦環境報告』(*The Joint Operating Environment Report*) の中で、「2012 年までに石油生産の余剰能力は全くなり、2015 年には日産 1000 万バレルの供給不足に陥るだろう」とするエネルギー展望を示している⁴。石油の将来予測について極めて楽観的だったアメリカの政府機関がこうした報告書を出したことは、エネルギー関係者にとって驚きでもあった。

こうした状況を踏まえ、本論文では、まず、石油ピーク論を中心に国際社会が直面しつつあるエネルギー状況についての整理を行う。その上で、エネルギー技術政策論でこれまで見落とされながらも重要な評価指標となり得る EPR (Energy Profit Ratio) ないしは EROI (Energy Return on Investment) 概念の有用性について検討する。最後に、こうした指標の社会科学的インプリケーションを念頭におきつつ、エネルギー技術政策論に課せられた制約および国際秩序への影響について論じていきたい。

2, エネルギー環境の将来予測としての石油ピーク論

先進諸国がエネルギー政策を議論するにあたっては、国際エネルギー機関 (IEA) による報告書がしばしば参照される。伝統的に IEA は、アメリカのエネルギー省 (US Department of Energy) などと歩調を合わせる形で、将来のエネルギー供給に対して楽観的な立場を示してきた。

毎年秋に発行される IEA の年次報告書『世界エネルギー展望』(*World Energy Outlook*) でも、2030 年に向けての世界のエネルギー供給量は、需要増に呼応する形で右肩上がりに上昇していくという予測が発表され続けている。

しかしながら、世界のエネルギー専門家コミュニティの一部では、IEA 報告書の内容は政治

2 プレゼンテーション資料については、以下の URL からダウンロード可能。<http://www2.petrobras.com.br/ri/pdf/usp_01-12-09.pdf>

3 “Energy minister will hold summit to calm rising fears over peak oil,” *Guardian*, 21 March 2010. <<http://www.guardian.co.uk/business/2010/mar/21/peak-oil-summit>>

4 United States Joint Force Command Joint Futures Group, *The Joint Operating Environment Report 2010*, United States Joint Force Command, 2010, p.29.

的に脚色された「公式発表」に過ぎないと考えられている。この傾向は、現代文明の根幹を支えている石油の見積もりに関して特に顕著である。

IEA の発表に対して懐疑的な目を向けているのは、これまで欧米の石油メジャーなどで実際に油まみれになりながら石油探査を続けてきた石油地質学者に多い。その代表格が、テキサコ社、BP 社などの石油業界に身をおきながら 40 年以上にわたり油田を探索し続けてきたキャンベル（Colin Campbell）である。

キャンベルは、世界中の油田の状況を精査した結果として、在来型の石油の供給量は現在すでにピークを迎えていると主張している⁵。キャンベルは、仲間の研究者等と共に 2000 年に「石油ピーク研究協会」(The Association for the Study of Peak Oil and Gas : ASPO) を立ち上げ、エネルギー問題に関する調査・研究・情報発信を行っている。現在 ASPO は、スウェーデン、アイルランド、イタリア、スペイン、アメリカ、中国、南アフリカ、オーストラリアなど世界各国にそのネットワークを広げながら活動を行っている。

石油の問題というと、一般的には「枯渇」(running out) という視点から語られがちである。しかし、石油をはじめとするエネルギー問題の専門家の間では、「枯渇」についての議論はない。彼らの関心は、石油の供給ピークがいつ訪れるのか、すなわち「減耗」(depletion) がいつ始まるのかである。

過去人類は、需要分だけの石油を供給することが可能であった。需要の増加に合わせて供給も増加させてきた。しかし、減耗がはじまるとこの構造に変化が生じる。人類は初めて、需要分の石油を供給できないという事態に直面することになる。それゆえ、石油ピーク論では、真の問題は「枯渇」ではなく、「減耗」による需要と供給との乖離であることを強調している。

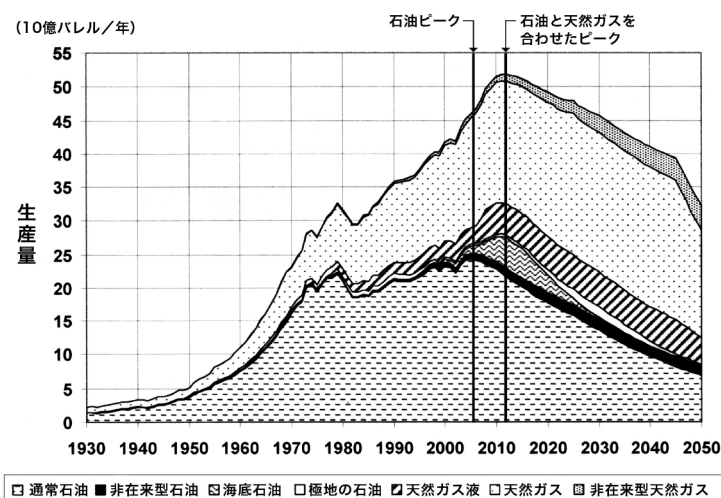
石油ピーク論は、当初、ハバート (M. King Hubbert) によるアメリカでの石油生産ピーク予測から始まった。シェル石油の研究所に勤務していた地質学者ハバートは、1956 年の論文で、米国の（アラスカ州およびハワイ州を除く北米 48 州の）石油生産量は 1970 年代前半にピークを迎えると予測した⁶。

彼の予測は発表当初、専門家を含め多くの人から強い批判にさらされたが、1980 年代に入り過去を振り返ると、米国の石油生産量のピークはハバートの予測通り 1970 年に起こっていたことが明らかとなった。つまり、米国では、1970 年以降どれだけの投資を行おうとも、どれだけの最新技術を駆使しようとも、1970 年当時以上の石油生産を行うことができなかったのである。

5 ASPO, "ASPO News Letter," No.100, April 2009. < http://aspoireland.files.wordpress.com/2009/12/newsletter100_200904.pdf>

6 ハバート理論については、石油ピークについて論じる多くの文献で言及されているが、中でも以下の文献が詳しい。Kenneth S. Deffeyes, *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*, Revised and Updated Paperback Edition, Princeton University Press, 2001.

図表 1：石油ピーク研究協会による石油・天然ガスの生産量見積



(出典) APSO, “APSO Newsletter”, No.100, April 2009 <http://aspoireland.files.wordpress.com/2009/12/newsletter100_200904.pdf> を基に一部筆者改変。

ハバートの理論では、油田から石油を取り出すにあたっては、その物理的・技術的制約から可採埋蔵量のほぼ半分を採掘した時点で生産のピークを迎えるとされ、その後、生産量は徐々に減退していくことになる。各油田からの石油の生産量は、ベル型のカーブを描くことになる。このカーブは、陸上油田、海底油田を問わず、世界中のすべての油田に該当する。

したがって、全世界の石油の生産量もいずれピークを迎え、その後は減耗期に突入することになる。地球上にある枯渇性資源は、その有限性によってベル型カーブの宿命から逃れることはできない。

ASPO の予測によると、世界の石油生産のピークは 2005 年であり、これに極地の石油や深海の石油、天然ガス液 (NGL)、さらに天然ガスを組み込み、すべての石油と天然ガスを加えたピークも、図表 1 が示すように 2011 年頃であるとしている⁷。つまり、現在既に通常石油のピークは過ぎているという見解である。

石油ピーク問題については、ASPO のみが論じているわけではない。米国のエネルギー省も IEA も、世界の石油生産にピークがあることは認めており、一部の強硬な反対派を除いて、「ピークがあるのかないのか」は論点となっていない。行われているのは、そのピークが「いつ」訪れるのか、という「時期」(when) をめぐる議論である。

最も楽観的な予測を示してきたのが、アメリカのエネルギー省および IEA であり、数年前までは全シナリオの平均として 2030 年頃を石油ピークとして見積もってきた。しかし、ここ数年の IEA は、予測を前倒しする傾向にあり、2010 年より早くに石油ピークが訪れるとする ASPO の見解に近づきつつあった。

とはいえ、見解に相違が生じているように見えるのは「公式発表」のみに着目した場合であり、IEA の研究者がメディアとのインタビューなどで示す見解は、実はキャンベルら石油ピーク論者と大差ない。

7 APSO, “APSO Newsletter”, No.76, 2007. <http://www.peakoil.ie/newsletter/en/pdf/newsletter76_200704.pdf>

たとえば、IEA による『世界エネルギー展望』の取りまとめ責任者であるビロル (Fatih Birol) は、『インディペンデント』紙のインタビューに応じ、「世界の主要油田はすでに生産ピークを過ぎており、世界全体での生産ピークも 10 年ほどで訪れるだろう」という見解を示している⁸。

また、「既存の油田における生産の減退率は 6.7% であり、仮に需要が緩やかであっても世界は現在の生産量を維持するためには、新たに 4 つのサウジアラビアを発見しなくてはならないし、2030 年までの間に（中国やインドなど新興国によって）予測される需要増に対応するためには 6 つのサウジアラビアが必要だ」とも述べている⁹。

他の IEA の研究者も、匿名を条件に『世界エネルギー展望』に掲載されている見解は「政治的圧力（アメリカからの圧力）によってゆがめられた」ものであり、実際は、石油ピーク論者が警告するように石油供給能力に関する見通しは極めて厳しいことを認めている¹⁰。

この報道をした『ガーディアン』紙によると、取材に応じた IEA 幹部は、「パニックを引き起こすことを怖れるため、アメリカは、既存の油田からの減退率を低く見積もり、新規油田の発見を過大に見積もることに影響的な役割を演じた」と告白している¹¹。また、IEA の公式見解として 2009 年版の『世界エネルギー展望』では、2030 年の世界の石油生産量を日産 1 億 600 万バレルと予測しているが、「多くの IEA の関係者は、日産 9000 万から 9500 万バレルですら不可能であると信じているものの、もしこうした計算を公表することになればパニックが広がるのではないかということを怖れている」とも述べている¹²。

もっとも、こうした議論には反論もある。仮に石油の供給が伸び悩めば、需要と供給の関係から石油の値段は上昇し、より多くの資金を採掘や新規油田の開発に回せるようになる。現在の石油価格では採算が合わない油田も稼働し始める。心配する必要はない。市場が解決してくれる。エコノミストを中心に、こうした主張を繰り返す人は多い。

しかしながら、過去の実績を見る限り、こうした考え方の裏付けを得ることはできない。アメリカでエネルギー関連の投資銀行を経営し、ブッシュ政権でエネルギー政策のアドバイザーも務めたシモンズ (Matthew R. Simmons) の試算によると、原油生産の上流部門への年間平均支出は、2000 年～04 年が 1150 億ドルであったのに対して、2004 年～08 年は 2850 億ドルと、原油価格の高騰にあわせる形で急増している¹³。

他方、2004 年以降の原油生産量は、日産 7300 万バレルの水準から伸びていない。2003 年～08 年にかけて、世界は約 1.5 兆ドルをつぎ込んだが、既存油田の減耗分を埋め、現状を維持するのが精一杯という状況である¹⁴。

「石油ピーク論争」は、1950 年代から断続的に続けられてきたものの、近年では、政府機関、石油業界などの楽観論者と、伝統的な石油ピーク論者との見解の差が急速に縮まっている。今

8 “Warning: Oil supplies are running out fast,” *Independent*, 3 August 2009. <<http://www.independent.co.uk/news/science/warning-oil-supplies-are-running-out-fast-1766585.html>>

9 *Ibid.*

10 “Key oil figures were distorted by US pressure, says whistleblower,” *Guardian*, 9 November 2009. <<http://www.guardian.co.uk/environment/2009/nov/09/peak-oil-international-energy-agency>>

11 *Ibid.*

12 *Ibid.*

13 Matthew R. Simmons, “Has Oil and Gas Collapse Sealed Fate of Peak Oil?,” <<http://www.simmonsco-intl.com/files/SPE%20Gulf%20Coast%20BW.pdf>>.

14 *Ibid.*

後のエネルギー政策およびエネルギー技術政策を展開していく上でのエネルギー環境に関する認識は、収束しつつあるこれらの議論を念頭に組み立てる必要があるといえよう。

3, エネルギー技術政策の評価手法としての EPR および EROI の有用性

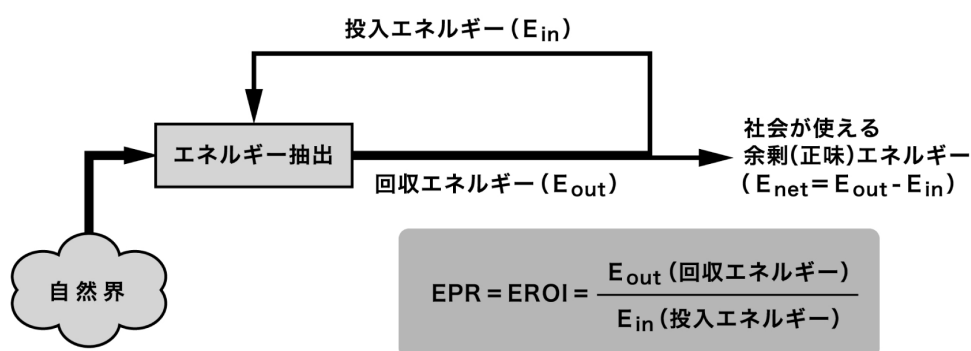
エネルギーの将来展望について、議論が収束しつつあるのは、「在来型」の石油を対象にしたものである。エネルギー関連政策を立案するにあたっては、議論の分かれる「非在来型」の石油に対する評価および、近年注目を集めるようになってきている「再生可能エネルギー」を中心とした代替エネルギー技術への評価を行う必要がある。

非在来型の石油とは、カナダのアルバータ州などにあるオイルサンドやアメリカやオーストラリアでみられるオイルシェールなどを指している。楽観論者は、既存油田（在来型石油）の減耗分を非在来型の石油が埋めていくことができると主張する。

たとえば、日本の石油連盟は、サウジアラビアに次ぐ原油の確認埋蔵量を誇る国としてカナダを挙げ、その量は 1752 億バレルに達すると発表している¹⁵。このうち、1704 億バレルは、アルバータ州のオイルサンドである。これは、イラン（1376 億バレル）、クウェート（1040 億バレル）、アラブ首長国連邦（978 億バレル）など湾岸諸国の確認埋蔵量をはるかに凌ぐ数字である¹⁶。

こうした統計の問題点は、資源を「量」のみの視点から捉えており、その「質」について考慮していない点にある。資源の質を測るための指標としては、EPR（Energy Profit Ratio）および EROI（Energy Return on Investment）と呼ばれる概念がある。

図表 2：EPR および EROI の概念図



（出典）”EROEI.COM” < <http://www.eroei.com/> > および、松島潤「低エネルギー社会におけるエネルギー事情はどうなるのか？」（シンポジウム「低エネルギー社会に向けて」におけるプレゼンテーション資料、2010年2月10日）を参考に一部筆者改変。

図表 2 は、EPR および EROI の概念図である。EPR も EROI も呼び方が異なるだけで、その考え方に違いはない（本論文では、以下、資源の質を評価する手法を表す言葉として EPR という用語で統一する）。

15 石油連盟『今日の石油産業 2010』石油連盟、2010、8 頁。<http://www.paj.gr.jp/statis/data/data/2010_all.pdf>

16 同書、8 頁。

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「作り出す」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、 $E_{out} - E_{in}$ で求められる。

EPR は、回収エネルギー ÷ 投入エネルギーという単純な割り算で求められ、単位のつかない数字で表される。問題は、EPR が 1 以下になる時である。1 リットルの石油を取り出すのに 10 リットル分の石油エネルギーが必要では（ $EPR = 0.1$ ）、ここで抽出された 1 リットルの石油にもはやエネルギーとしての価値はない。

エネルギー関連政策を考えるにあたって EPR 概念が重要であることは、油田から石油を取り出すためのプロセスからも確認できる。通常、油田開発はボーリングをして油井を設置する。若い油田であると内部の圧力によって石油が押し出され、勢いよく自噴する。これが 1 次回収である。

埋蔵量が減ってくると、徐々に内部の圧力が弱まり自噴の勢いも弱まる。圧力を高めるためには、海水などを押し込む必要があり、その圧力で埋蔵されている石油を取り出す。当然、産出される石油にも海水が混じっているため、産出後に海水を取り除くという作業も必要になる。これが 2 次回収である。

さらに、最近では 3 次回収として、水蒸気を注入しその圧力で石油を取り出す技術も実用化されているが、水蒸気を生成するためには大量のエネルギー（天然ガスと淡水）が必要となる。

つまり、初期の頃は、ほとんど穴を掘るだけのエネルギーで石油を手に入れることができたのに対して、油田の老朽化に伴い、同量の石油を取り出すために必要なエネルギー量も増えることになる。

図表 3：ラビットリミット



（出典）“The Rabbit Limit” <<http://www.holon.se/folke/kurs/logexp/rabbit.shtml>>

「ラビットリミット」(rabbit limit) という言葉がある¹⁷。ウサギ狩りをする時に「深追い」しすぎて、ウサギから得られるエネルギーよりも多くのエネルギーを消費してしまえば生命を維持することはできない。家で待つ妻がいる場合には EPR が 2 以上でなければ意味がない。大家族ならさらに大きな EPR が必要になる。

つまり、食料となり得るウサギが何羽残っているかという「量」が重要なのでない。そのウ

17 ラビットリミットに関しては、以下のウェブサイトを参照されたい。<<http://www.holon.se/folke/kurs/logexp/rabbit.shtml>>

サギがエネルギー効率的に捕まえるだけの意味を持っているのかどうかという「質」が重要だということを伝えるためのたとえ話である。

石油の場合も同様の考え方をを用いることができる。仮に9兆バレル、10兆バレルの石油が地中に眠っていたとしても、「深追い」し過ぎてEPRが1を切ってしまっただけでは意味がない。実際のところ、「ラビットリミット」的に意味のある石油は残り約1兆バレルと見積もられている¹⁸。1兆バレルとは、富士山を器に見立てて、その約10%強の量に過ぎない。

過去、人類は採掘しやすい石油から採掘してきた。後に残るものほど採掘が難しく、EPRの値も低くなる。アメリカでの経験によると、1930年代の初期の油田は、穴を掘るだけで勢いよく原油が噴き出したため、EPRは100以上であったが、1970年代にはEPR = 30程度に、現在ではEPR = 11 ~ 18程度にまで低下している¹⁹。

カナダのオイルサンドのEPRも極めて低い。オイルサンドから石油を抽出するためには、大量の水蒸気を必要とする。この生成には大量の水（それも貴重な淡水）と天然ガスなどのエネルギー源が使用される。EPRの値は、最良のケースでも1桁台であり、1.5程度という見積もりも発表されている²⁰。

オイルサンドは、露天掘りで行うため大規模な環境破壊を伴うとして反対する声も多い。この1.5という数字には、環境修復に必要なエネルギーは考慮されていない。環境修復までを含めると、1を切る可能性が高い。

同様に、EPRの手法を用いると、代替エネルギーのエネルギー効率に対する評価を行うことも可能となる。代替エネルギーに関しては、二次エネルギーである電力に対しての評価が盛んに行われている。

発電のEPR評価では、「すべてのプロセス」が考慮される。たとえば、日本で火力発電をする場合、原料のほとんどを遠い海外から輸入してくることになる。採掘し、運搬し、精製加工するためにはすべてのプロセスでエネルギーが必要である。発電所を建設するための原料を取り出し、建材として加工し、実際に建造し、経年後に廃棄するためにもエネルギーがかかる。運用中にもエネルギーを用いる。

EPRの評価は、これらをすべて「エネルギーを生み出すために必要なエネルギー」として考慮に入れた上で試算が試みられている。こうしたエネルギーをすべて厳密に集計することは極めて困難なため、得られる数字は評価者によってバラツキが生じるが、おおよその目安を把握することは可能である。

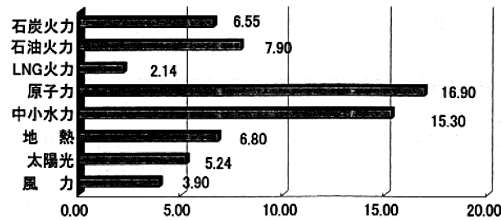
日本では電力中央研究所の天野がEPRの試算に積極的に取り組んでおり、一つの評価例として図表4のような結果を公表している。

18 可採埋蔵量についての見積もりは多くの石油地質学者の手によって行われている。評価にバラツキがあるものの、概ね2兆バレルという見解を示す研究結果が多い。そのうち、我々はすでに約1兆バレルを使用しているので、残りは約1兆バレルという計算になる。各研究者らの結果については、以下の文献に一覧が掲載されている。石井吉徳『石油ピークで食糧ピークが訪れる』日刊工業新聞社、2009年、5頁。

19 Charles A. S. Hall, et.al., "Peak Oil, EROI, Investments and the Economy in an Uncertain Future," in David Pimentel (ed.), *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks*, Springer, 2008, p.117.

20 オイルサンドのEPR見積もりについては、以下のウェブサイトを参照されたい。<<http://www.theoil drum.com/node/3839>>

図表 4：電源ごとの EPR 評価の例



(出典) 天野治『石油ピーク後のエネルギー：EPR から資源の有効活用を考える』愛智出版、2008 年、44 頁。

この試算でもっとも論争的なのは、「高 EPR として評価される原子力発電を積極的に推進すべきか否か」という原発をめぐる議論であろう。この試算にはいくつかの仮定が含まれている。原発をめぐる最大の争点の 1 つはその廃棄物の処理方法であるが、この試算では、ただ単純に地下 300 メートルに長期保管（処分）することを想定し、そのために必要な鉄やコンクリートの量のみを考慮して計算している。埋めて終わりという想定である。もし、異なる廃棄方法をとるならば、試算内容も変わってくる。

加えて、原発の場合、具体的な政策に落とし込むに際しては、政治的コストも勘案する必要がある。科学合理性はともかく、実際に地中に処分するとなれば、処分地の選定にあたって越えなくてはならない政治的ハードルは極めて高い。

こうした EPR 評価の数字はむしろ、原子力発電であっても「魔法の解決策」ではないという点を可視化して見せたという点で評価されるべきであろう。日本の場合、ウランの濃縮方法にエネルギー効率的な遠心分離法を半分程度取り入れているために 16.9 と比較的高い数字が示されているが、非効率なガス拡散法による濃縮を行っているアメリカの原発に対しては、4 程度という再生可能エネルギー以下の EPR 評価も発表されている²¹。

これまで、エネルギー政策およびエネルギー技術政策の議論において EPR を用いたエネルギーの「質」が考慮されることはなかった。しかしながら、石油減耗による「資源制約」というエネルギー環境を前提として受け入れるならば、「金銭的なコスト」のみならず「エネルギー的コスト」を勘案した政策立案が求められることになる。この点で、EPR 概念は極めて有用であり、今後、政策の立案や評価のプロセスに組み込んでいく必要があるといえよう。

4. EPR を用いたエネルギー政策論の社会科学的インプリケーション

現在の国際社会は、複数の地球規模の問題を同時に抱え込んでいる。本論文のテーマであるエネルギー問題も地球規模の問題の典型例であるが、その他にも環境問題、グローバル化した金融経済への対応など、各国の政府が取り組むべき政策的課題は多い。こうした問題に対して、近年では、イシューごとの個別対応ではなく、各イシューの相互連関を念頭に 1 つのパッケージとして対応しようとする動きが見られるようになった。

たとえば、アメリカのオバマ（Barack Obama）大統領は、エネルギー問題、環境問題、および経済成長の問題を解決するための政策的対応として、「グリーン・ニューディール」（green new deal）と呼ばれる政策案を打ち出した。この構想のもととなったイギリスのニュー・エコ

21 Cutler J. Cleveland, et al., “Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective,” *Science*, New Series, Vol.225, No.4665, pp.890-897.

ノミック財団（New Economic Foundation）の同名の報告書が、金融および税制の再規制と政府による再生可能エネルギーへの投資を求めていることに倣い²²、アメリカでも同様の方針からいくつかの政策目標が発表されている。

具体的には、「クリーンエネルギー産業に対して、今後10年間で1500億ドル以上の投資を行い、500万人の雇用創出をする」、「クリーン技術に関する研究開発費を2倍に増やす」、「2015年までに100万台のプラグインハイブリッドカーを普及させる」、「再生可能エネルギーによる電力量を2012年までに現行の10%増、2025年までに25%増に引き上げる」などである。環境分野を発展させることで雇用の確保と経済成長を目指し、脱石油社会を目指していこうとする試みである。

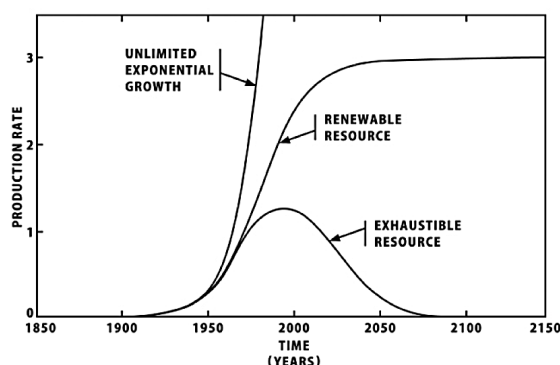
この動きを受け、国連環境計画（UNEP）は、再生可能エネルギーや自然保護により世界規模での経済回復と雇用創出を狙う「グローバル・グリーン・ニューディール」（global green new deal）計画を打ち出すようになった。また、ドイツ、フランス、イギリス、韓国なども同様の政策を発表している。

エネルギー政策論的に考えると、こうした一連の政策パッケージは、少なくとも2つの問題を抱えている。

第1に指摘される問題は、果たして石油減耗後の「資源制約下」で経済成長をし続けることが可能かという、経済的效果からの疑問である。「グリーン・ニューディール」のようなアプローチに対しては、前述のハバートが1976年の論文で既にその矛盾を指摘している。

図表5が示すように、この世の中の成長曲線は3つタイプに集約される。第1のタイプは、指数関数的無限成長（unlimited exponential growth）であり、マネーや経済指標であるGDPの世界である。第2のタイプは、再生可能資源（renewable resource）であり、ある一定のラインまでは成長するが、その限界以上は成長することがない。例えば、川の浄化作用や森林資源などが該当する。第3のタイプは、枯渇性資源（exhaustible resource）であり、あるところまでは成長するが、ピークを迎えた後に減退していく。これには再生不可能な資源、すなわち、石炭、石油といった化石燃料や、ウラン、リチウムなどの鉱物資源が該当する。

図表5：成長曲線の3つのタイプ



（出典）M. King Hubbert, "Exponential Growth as a Transient Phenomenon in Human History," (Paper presented at the World Wildlife Fund's Conference), 1976.

22 The Green New Deal Group, *A Green New Deal: Joined-up Policies to Solve the Triple Crunch of the Credit Crisis, Climate Change and High Oil Prices*, The New Economic Foundation, 2008.

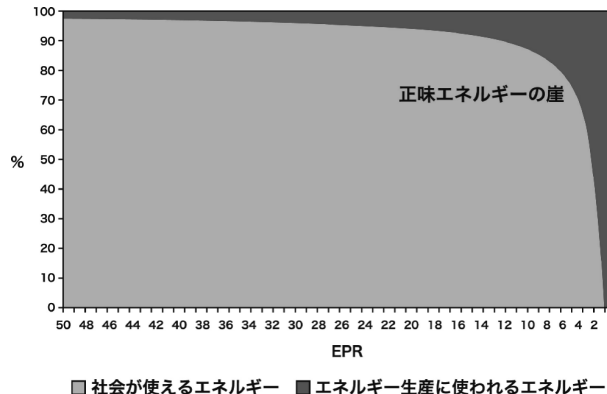
ハバートの指摘は、有限地球における指数関数的無限成長はどこかの段階で矛盾が表面化することになるというものであり、3つの曲線がいつまでも同調し続けることはなく、いつかは乖離し始めるということである。石油ピーク論者は、第3のタイプの典型例である石油生産がピークを迎えることで、全世界のエネルギー投入量もピークを迎え、第1のタイプの典型例である経済成長との間の矛盾が露呈することになることを懸念している。

今後のエネルギー政策論を展開する上でのもう1つの問題は、こうした議論にEPR的視点がまったく含まれていない点である。EPR的視点から特に問題なのは、全世界で使用されているエネルギーのEPRが経年ごとに低下傾向を示している点にある。この問題は、図表6が示すように、「正味エネルギーの崖」(the net energy cliff)として国際社会に影響を与えることになる。

図表6が示すように、EPRが50ということは、全体の2%をエネルギー採掘に使い、残りの98%を社会が使うということである。エネルギー採掘に必要な割合は、EPR = 40で2.5%、EPR = 30で3.3%、EPR = 20で5%と、はじめのうちはEPR低下のわりには大きな影響を受けない。

しかし、社会が使うことのできる余剰(正味)エネルギー(Enet)は、EPRが10を切るあたりから、急速に減少していく。エネルギー採掘に必要な割合は、EPR = 10で10%、EPR = 5で20%、EPR = 4で25%、EPR = 3で33%、EPR = 2で50%と、EPRが1小さくなるごとにその影響が増幅される。

図表6：正味エネルギーの崖 (The Net Energy Cliff)



(出典) Kurt Cobb "The Net Energy Cliff" < <http://www.energybulletin.net/node/46579> > を基に一部筆者改変。

ホール(Charles A. S. Hall)らの試算によると、全世界規模でのEPRの概算は、1992年時点でEPR = 26、1999年時点で上昇してEPR = 35、その後減少し2005年時点でEPR = 19と見積もられている²³。今後本格化する在来型石油の減耗を埋めるために、カナダのオイルサンドのような低EPR(EPR = 1.5程度)のエネルギーに頼る割合が増加することになると、世界全体のEPRはますます低下する。期待される再生可能エネルギーも、EPRの値が10を切るものが多い。文字通り、現在の国際社会はエネルギー的に見て「崖っ淵」に位置している。

ホールらは、2008年の論文でEPRの視点を組み込んだ経済モデルを作成しコンピュータを

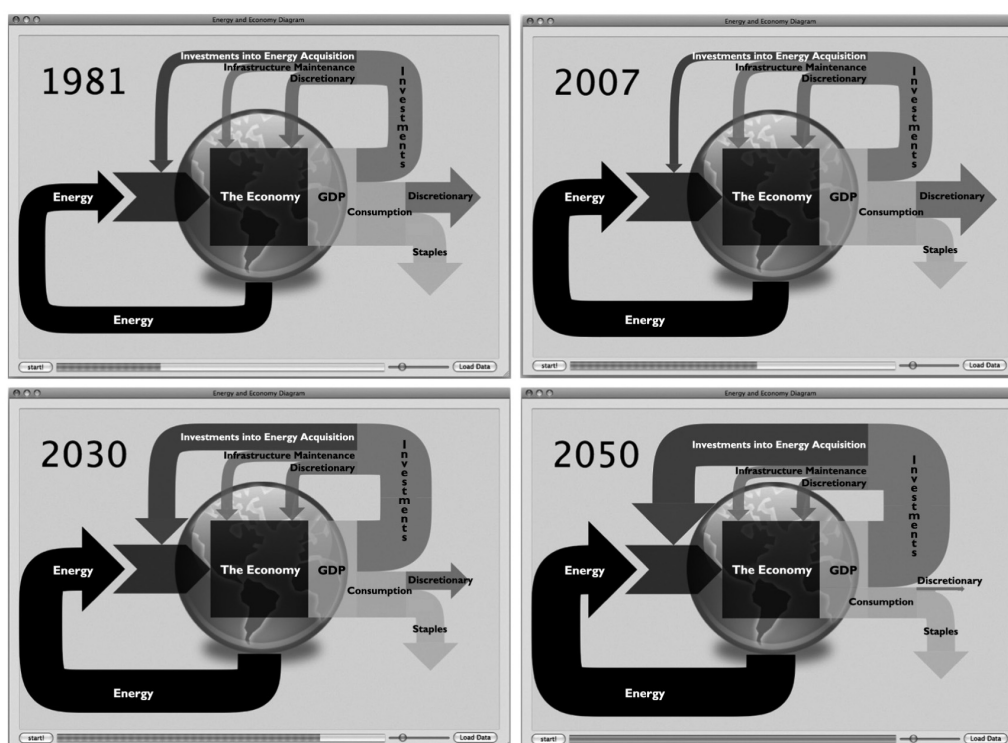
23 Charles A. S. Hall, et.al., *op.cit.*, 2008, p.117.

用いたシミュレーション結果を発表している。このモデルでは、2005 年までに全世界が辿ってきた EPR の値をもとに、2005 年時点で $EPR = 20$ 、2030 年時点で $EPR = 10$ 、2050 年時点で $EPR = 5$ 程度に減少することが想定されている²⁴。

シミュレーションの結果は、図表 7 が示す通りである。このモデルでは、GDP を投資と消費とに分割している。投資には、「エネルギー取得のための投資」、「既存インフラ維持のための投資」、「自由裁量によって使える投資」の 3 つのカテゴリーがある。消費には、「生活や生命を維持するための必需品の消費分」と「自由裁量によって使える消費分」が存在する。

このシミュレーションでは、経年ごとに、エネルギー取得のための投資が増大し、社会が自由裁量によって使える消費が極端に少なくなっていく様子が描き出されている。つまり、EPR を組み込んだエネルギー政策論が示唆することは、対策を先延ばしにすればするほど、「社会の自由裁量の幅」は狭まり、身動きがとれなくなる可能性が高いということに他ならない。

図表 7：EPR を組み込んだ経済モデルのシミュレーション結果（1981 年～2050 年）



(出典) Charles A. S. Hall, et.al., “Peak Oil, EROI, Investments and the Economy in an Uncertain Future,” in David Pimentel (ed.), *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks*, Springer, 2008, pp.125-126.

こうしたシミュレーション結果は、石油をベースとして築き上げてきた現代の社会システムの崩壊を想起させる。ファーガソン（Niall Ferguson）は歴史学者としての立場から、過去の帝国や現在のグローバル化した経済のような複雑系は、一粒の砂が砂山全体を崩壊させるように、

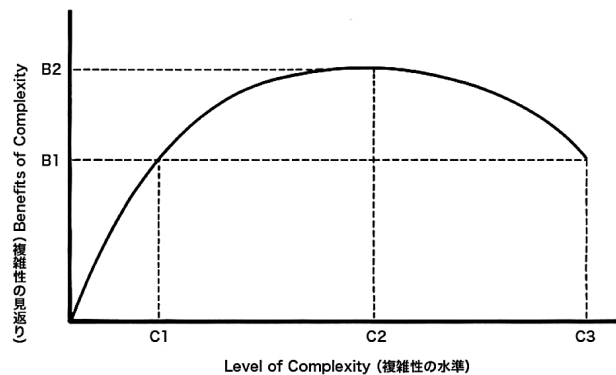
24 Ibid., pp.124-126.

非常に小さなきっかけで一気に崩壊へと向かう可能性があることを指摘している²⁵。世界的なEPRの低下が、ある時点で特定の社会の崩壊を引き起こすほどの決定的な影響を与える可能性も十分考えられる。

また、考古学者のテインター（Joseph A. Tainter）は、ローマ帝国などを含む既に崩壊した24の社会を分析することで興味深い考察を行っている²⁶。テインターによると、「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。

そして、「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。

図表 8：複雑性の増加に対する見返りの減少



（出典）Joseph A. Tainter, “Sustainability of Complex Societies,” *Futures*, Vol. 27, No. 4, 1995, p.400.

図表 8 が示すように、複雑性の増加は一定の利益を生むが、その利益はある時点でピークを迎える。その後も社会は、複雑性を増しながら問題解決を目指すものの、ピーク以降は複雑性が増すごとに事態はますます悪くなっていく。テインターは、この様子を「複雑性は利益を生むが、損失も与える。その破壊的な潜在能力は、社会経済の複雑性への出費の増大が利益を減じて、ついにはマイナスの見返りになった歴史的事例を顧みれば明らかである」として説明している。

つまり、過去の経験に照らし合わせる限り、「より複雑化させることで問題解決を求めようとするアプローチ」は限界にぶつかる可能性が高い。特に、投入する補助エネルギーが制約される世界では複雑化は問題解決から遠のく可能性が高い。こうした考察は、石油減耗による資源制約という国際環境の中で、いかなるエネルギー政策を展開していくのかというエネルギー政策の基本方針を考えるにあたっても、「より高度な技術がエネルギー問題を解決してくれるのか否か」という命題をエネルギー技術政策論の観点から検討するにあたっても考慮されるべき重要な視点であるといえよう。

25 Niall Ferguson, “Complexity and Collapse: Empires on the Edge of Chaos,” *Foreign Affairs*, Vol.89, No.2, 2010, pp.18-32.

26 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.

5, おわりに

本論文がみてきたように、石油減耗後の資源制約というエネルギー環境の下では、エネルギー政策ならびにエネルギー技術政策を論じるにあたって、EPR のようなエネルギーの「質」を評価する指標を政策の立案・評価時に組み込むことが重要である。

文明とは突き詰めれば「余剰エネルギー」のことである。図表 7 が示すように、世界で流通するエネルギーの EPR が低下することになると、「エネルギー取得のための投資」が増大し、「社会が自由裁量で使用できる消費分」はやせ細っていくことになる。

仮に石油減耗による「資源制約」という条件を無視できるならば、EPR 的に 1 を切るような技術であっても「より CO₂ の排出を抑えられる」であるとか、「有害な物質を排気することがない」といった価値を実現するために研究開発への投資を行うという選択もあり得る。

しかしながら、現実的には地球は有限であり、資源にも自然にも限りがある。石油減耗もいずれ顕在化することになるだろう。こうした状況で低 EPR の技術を現実社会に適応することは、社会の自由裁量エネルギーおよび富を急速に減じることにつながる。石油減耗期においてはエネルギー技術の選択に失敗すれば、社会の自由裁量の幅を狭め、石油後の社会を構築するだけの余裕も失うことになる。そうなれば、ファーガソンやテインターが指摘するような形で「社会の崩壊」が現実味を帯びてくることになるだろう。

本論文の最後として、石油減耗に伴うエネルギー問題からみた公共政策論的、国際関係論的な研究課題について触れておきたい。

第 1 の課題は、グローバル化論の再考である。スティーガー (Manfred B. Steger) がいうように、「既存の多くの国境や境界線の意義を失わせるほどのグローバルな相互連関とフローが、経済・政治・文化・環境の面で存在することの特徴とするような社会的状況²⁷⁾」が存在することは間違いない。この現象を、我々は一般的に「グローバル化」と呼んでいる。グローバル化と呼ばれる「現象」があることについての異論はないが、何がグローバル化という現象をもたらしているのかという「原因論」については、多くの見解が存在する。

たとえば、ギデنز (Anthony Giddens) は、グローバル化の根底には 1960 年代頃からの通信システム技術の進歩があり、それがグローバル化をもたらしているのだと論じている²⁸⁾。また、土屋は覇権安定論の文脈から 19 世紀のイギリス、20 世紀のアメリカに関する分析を行い、少なくとも直近の 2 つの覇権国にとっては、大海を越えて人やモノを運ぶ物流のネットワークである「トランスオセアニック・ネットワーク」と、トランスオセアニック・ネットワークを補完し、国際政治的な覇権を維持し、やがてパワーを失う覇権国のソフトランディングを可能とする「情報通信ネットワーク」の 2 つによって構成される「ネットワーク・パワー」が重要であったと論じている²⁹⁾。

石油減耗は輸送の問題を直撃することになる。現在の物流システムは、土屋のいう「エア・パワー」であっても「シー・パワー」であっても、常温で液体であるという石油の特徴を用いた内燃機関によって担保されている。

情報通信システムを維持するにあたってエネルギーが必要である。サーバーを 24 時間稼

27 Manfred B. Steger, *Globalization: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2003 (櫻井公人ら訳『グローバリゼーション』岩波書店、2005 年、9 頁)。

28 Anthony Giddens, *Runaway World: How Globalization is Reshaping Our Lives*, Profile Books, 1999 (佐和隆光訳『暴走する世界：グローバリゼーションは何をどう変えるのか』ダイヤモンド社、2001 年、28 頁)。

29 土屋大洋『ネットワーク・パワー：情報時代の国際政治』NTT 出版、2007 年、10-11 頁。

働させたり、サーバールームの温度を下げるために冷房も使われている。近年注目を浴びている「クラウド化」がより進行することになると、サーバーの数は今以上に増えていくことになる。

石油減耗期には、グローバル化を支えている物流ネットワークおよび情報通信ネットワークの双方に変化が生じる可能性がある。この視点を加えたグローバル化論の再考は、今後、国際関係論が取り組むべき課題だといえるだろう。

第2の課題は、国家のグランドストラテジーに関する研究である。過去、エネルギーシフトに成功した国が国際社会の中で影響力を拡大してきたように、この次に起こるエネルギーシフトでも成功した国はパワーを増し、失敗した国はパワーを失うことになるであろう。

かつて、「模倣+アルファ」という形で「エミュレーション・モデル」(emulation model)が有効に機能した時期があったが、次のエネルギーシフトに関するグランドストラテジーを構築するにあたっては、恐らくエミュレーション・モデルは機能しない³⁰。

石炭や石油のようにエネルギーが「高凝縮」された資源を利用するに際しては、同じエネルギー源を手に入れることができれば、他国を模倣してプラス・アルファを付け加えることで競争力を得ることが可能である。しかしながら、次世代のエネルギー源として注目されている再生可能エネルギーは、太陽光にしても、風力にしても、地熱にしても、「凝縮」の程度は低く、広範囲に分散しているのが特徴である。

熱力学の第2法則（エントロピーの法則）は、高エントロピー状態（拡散し、分散している状態）のものを低エントロピー状態（凝縮された状態）にするためには、必ずエネルギーの投入が必要だということを教えている。つまり、分散して存在するエネルギーをどこか1カ所に集めてきて再配分するというエネルギー・ネットワークの組み方は、凝縮に必要な投入エネルギーが増大するためEPRが低下する。分散しているエネルギーは、分散したままの状態で使用の方がEPR的にみて効率が良い。

より直接的な表現で言い換えるならば、再生可能エネルギーを利用するにあたっては、その土地その土地の自然の状態を徹底的に知りつくし、その土地にあったエネルギー供給システムを構築しなければEPRが低くなってしまうということである。低地で風が一定方向に吹きやすいオランダで風力発電が盛んに行われているからといって、風があまり吹かなかつたり、風向きが変わりやすいような地域でオランダの「模倣」をしたところで失敗することになるだろう。

自然を相手にする場合、自然条件の異なる他国の政策を模倣しようとしても、あまり意味を持たない。むしろ、それぞれの地域ごとに、その地域の自然を知りつくしたローカルな人びとによるボトムアップ型の政策形成アプローチの方がより効果的であろう。地方分権論も、同様の文脈を踏まえて再構築される必要がある。今後は、こうした視点も踏まえ、国家のグランドストラテジーのあり方を検討していくことも重要な研究課題となるだろう。

第3の課題は、ネットワークの組み替えに関する研究である。近代国民国家は、官僚制にしても、軍隊にしても、電力供給システムにしても、マスメディアという情報流通の形態をとってみても、基本的には中央集権型のツリー構造ネットワークをベースに構築されてきた。

中央集権型のツリー構造ネットワークによる秩序の維持というやり方は、放っておけば無秩

30 エミュレーション・モデルについては、たとえば、以下の文献を参照されたい。土屋大洋、同書；薬師寺泰蔵『テクノヘゲモニー：国は技術で興り、滅びる』中公新書、1989年；土屋大洋「国際的な政策の『模倣』過程：情報通信政策を例に」草野厚編『政策過程分析の最前線』慶應義塾大学出版会、2009年、109-137頁。

序化（高エントロピー化）してしまう状況に対して、エネルギーを投入することで秩序（低エントロピー状態）を作り出すというものである。この時のエネルギーは、初期の段階では石炭が、第二次世界大戦後は主に石油が担うことになった。近代国民国家の成立以降、軍事化、産業化の過程を経る中で³¹、最終エネルギー消費量は常に右肩上がりが増大してきた。

しかしながら、石油減耗が始まると投入できる絶対的なエネルギー量も減少する可能性が高い。第2の課題とも関連するが、減耗分を再生可能エネルギーで補うということは、分散型のエネルギーを利用するということと同義である。

このようなエネルギーを利用するためのネットワークは、中央集権型のネットワークでなく、自律・分散・協調型ネットワークとしての特徴を備えることになるだろう。ネットワークの構造も、ツリー構造ネットワークからグラフ構造ネットワークへと移行することになる。

こうしたネットワークの組み替えは、国家のガバメントおよびガバナンスのあり方、中央－地方関係など政治的にも少なからぬ影響を与えることになるだろう。ネットワークの組み替えに起因する政治的・社会的変化についても、今後の重要な研究課題として指摘することができる。

確かに、本論文で取り扱った石油減耗に起因するエネルギー問題は、不確定な要素がある。しかしながら、時間の経過による全世界でのEPRの低下など、既に事実として確認される現象も多い。少なくともEPRという概念を用いると、エネルギー政策やエネルギー技術政策を論じるに際して、これまで見落とされてきた新たな知見を提供することが可能となる。現状において、こうしたエネルギー認識に基づいた論考の多くは地球物理学者や石油地質学者など自然科学の研究者たちによって発表されているものの、今後は、国際関係論や公共政策論といった社会科学の分野でも真剣に取りあげるべき研究課題として検討していく必要があるだろう。

31 この点に関しては、以下の文献を参照されたい。公文俊平『情報文明論』NTT出版、1994年。