

シェールガス革命がもたらしたエネルギー勢力図の再編

Reorganization of the energy power balance driven by technology innovation on shale gas development

須藤 繁¹

Shigeru SUDO

増田 優²

Masaru MASUDA

要 旨 : シェールガスは、頁岩の岩盤に封じ込められた非在来型資源の一つで、1990年代までは経済的に掘り出すことが困難とされてきたが、水平掘り、水圧破砕を中心とする近年の石油産業上流部門の技術革新を背景に米国を中心に開発が進められ、2000年以後、大きく生産を伸ばしている。

シェールガスの開発は、既存のガス供給国間の利害関係、さらに消費国との関係を微妙に変えつつあり、その地政学的な意義としては、米国のLNG輸入計画の大幅廃棄に伴うLNG国際需給環境の緩和、欧州ガス輸入国の選択肢の拡大、即ち、ロシアの政治力の低下、中国の資源外交の変化の可能性、中東・北アフリカガスへの相対的依存度低下が挙げられる。さらに、シェールガス開発技術が今後世界各地のシェールオイル開発に本格的に適用されれば、石油地政学のパラダイムを大きく変える可能性がある。

Abstract : Shale gas is one of the non-conventional resources which deposits in shale rock deep underground and thought to be difficult to recover commercially until 1990s. However, in the background of the technology innovation in upstream sector of oil industry in recent years, shale gas development has been advanced in the United States and its production in the U.S. has skyrocketed from virtually nothing in 2000 to 20 percent of the U.S. natural gas supply in 2010.

Shale gas development is changing delicately not only the interest among the existing gas supply countries but also a relation with the consuming countries. Following points such as the possible change in international LNG supply and demand balance due to large abandonment of a U.S. LNG import plan, increase of the options for European gas importing countries and the fall of the political power of Russia, the possibility of China energy resources policy change and decrease of oil and gas dependency on Middle East oil can be pointed out from geopolitical point of view.

キーワード : 非在来型ガス、シェールガス、水平掘り、水圧破砕、石油地政学

Keywords : Non-conventional Gas, Shale Gas, Horizontal Drilling, Fracking, Geopolitics

¹ 須藤 繁 帝京平成大学 現代ライフ学部 経営マネジメント学科 教授
〒170-8445 東京都豊島区東池袋 2-51-4 shigeru.sudo@nifty.com

² 増田 優 お茶の水女子大学大学院教授 ライフワールド・ウォッチセンター長
masuda.masaru@ocha.ac.jp

2011.12.5 受付, 2012.6.13 受理

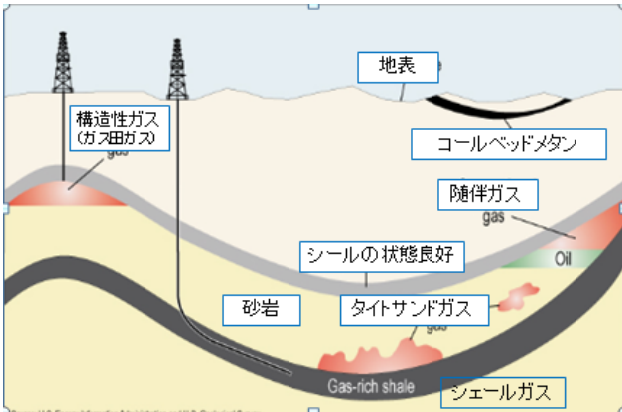
社会技術革新学会第5回学術総会(2011.9.28)にて発表

1. はじめに

近年、米国を中心にシェールガス開発が積極的に行われている。シェールガスとは頁岩の岩盤に封じ込められた非在来型資源の一つで、これまで経済的に掘り出すことが困難とされてきた。

図1に示すとおり、これまでのガス資源は構造性ガス（ガス田ガス）、油田の随伴ガスといった在来型ガスが専らだったが、近年米国を中心に急速に新しい形態のガス（非在来型ガス）が生産されるようになった。同図が示すように、炭層ガス（コールベッドメタン）、タイトサンドガス、シェールガスが非在来型ガスに該当し、中でもシェールガスは米国で大幅に生産を伸ばし、今後さらに生産を伸ばすとみられている。

図2にみるとおり、米国の天然ガス生産量は、1990年代以後2002年まで微増し、その後わずかに減少した。その間、絶対量はさほど変化しなかったものの、その内訳は大きく変化した。2000年には僅かに2%に過ぎなかったシェールガスの割合は2010年には20%に達するに至った。



非在来型天然ガス	一般的定義(主成分)
タイトサンドガス	浸透率0.1md未満の砂岩に含まれるメタンを主成分とする天然ガス
コールベッドメタン	石炭層に吸着したメタン
シェールガス	浸透率が0.001md未満の泥岩の一種である頁岩(シェール)に含まれるメタンを主成分とする天然ガス

注: 1 md(ミリダルシー) = $9.87 \times 10^{-16} \text{ m}^2$

図1：非在来型ガスの概念図

出所：米国エネルギー省エネルギー情報局（DOE/EIA）資料より作成。

シェールガス開発の本格化は、米国内のガス需給のみならず、国際ガス需給、さらにはエネルギー地政学を様々な点で変えつつある。シェールガス革命と称される所以であるが、本稿では、まず、シェールガス革命の背景とその展開、次に同開発のエネルギー情勢に及ぼしている影響をまとめた後、シェールガス開発が直面している課題とその石油地政学的な意義を考察する。

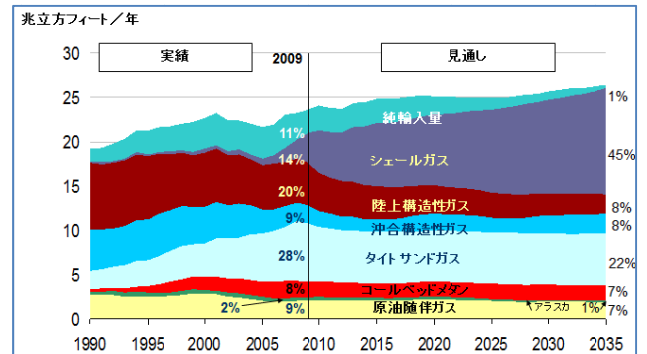


図2：米国のガス生産実績と見通し

出所：米国エネルギー省エネルギー情報局
“Annual Energy Outlook, 2011年版”

2. シェールガス革命の背景とその展開

2.1 石油上流部門における革新技術の適用

米国でベンチャー企業がシェールガス開発に参入した背景には、石油価格の高騰もさることながら、1980年代後半以後に確立された石油産業上流部門の技術革新の影響が大きい。表1は1980年代以後の石油産業上流部門における主な技術革新を列挙したものであるが、シェールガス開発では水平掘りと水圧破碎（フラッキング）という岩盤に割れ目を入れる技術の貢献が大きい。

表1：1980年代以後における石油産業上流部門での主な技術革新

1. 第3次元地震探査
2. 水平掘り
3. 高精度油層シミュレーション
4. 大偏距傾斜掘り
5. 大水深海底坑口仕上げ装置
6. 海底生産システム
7. 浮体式生産貯蔵積出システム
(FPSO: Floating Production Storage and Offloading System)
8. 水圧破碎

水平掘りは、図3に概念を示したとおり、1000メートル、2000メートルと掘った途中から井戸を角度を自在に曲げて掘ることを可能とした技術である。また、水圧破碎技術はスーパーコンピュータの利用による岩層内圧力分布の把握、注入水の挙動シミュレーション、注入剤の選択、プロパント（割れ目を一定の状態に保つ石材）の利用等の要素技術の集積からなるものであるが、これによる実際の岩盤の破壊のイメージを図4に示した。

これらの技術の適用により頁岩の岩盤に沿って対象鉱区を区切り、区画毎に数百気圧の圧力をかけ岩盤に割れ目を作り、ガスを取り出すことが可能となった。

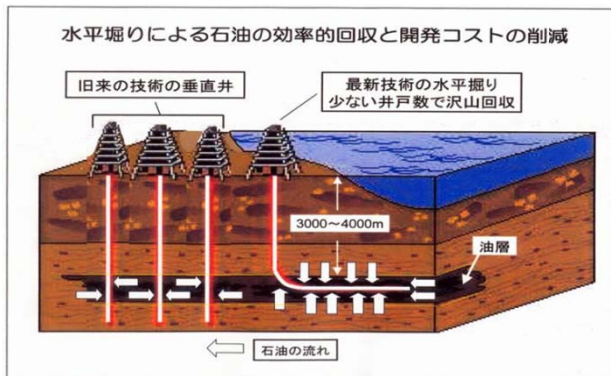


図3:水平掘りのイメージ

出所：月刊出光（2000年6月号）

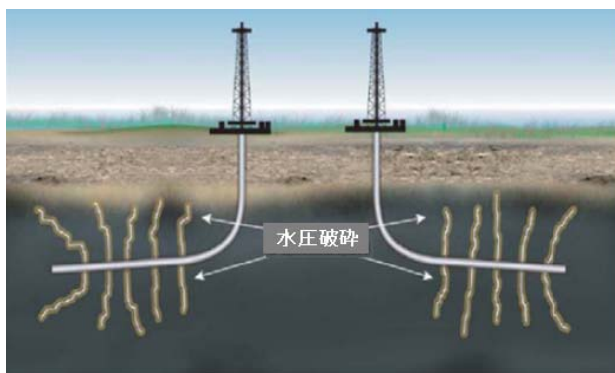


図4：水圧破碎のイメージ

出所：米国エネルギー省エネルギー情報局

2.2 技術の集積と他分野への適用の試み

米国の石油産業は、既存油田・ガス田の生産減を補うため、1980年代から二次回収・三次回収に徹底

的に取り組む中で、コンピュータ関連技術の発達に合わせて限界油田生産や油層管理に関し様々な試みに取り組んだ。

しかしながら岩盤を割ることに關しては、蓄積技術の適用は在来型資源を対象とした操業の延長でなく様々な試行錯誤の結果であった。その意味で、EOR技術³、コンピュータ解析・油層解析技術のシェールガス開発（岩盤破壊）への適用は技術の非連続な展開であり、在来型資源開発で培った技術を非在来型資源に適用してみようというポリシーを思い付いたことがこの非連続性を作り出す原動力であった。

こうしたポリシーイノベーションがもたらされたことに関しては、以下の要素が指摘できる。まず、第一にそれまでの地道な操業により生産・油層管理に關し卓越した技術（ツール）が集積されたこと、第二に在来型石油・ガス資源が枯渇しつつあるという危機感を持ちつつ原油価格が高騰していることをチャンスとしてとらえたこと、第三に在来型ガスとは別の形で非在来型天然ガスが賦存しているかも知れないという科学的な想定に対する真摯な取り組み等の要素である。

大きな技術革新を起爆剤とする産業や社会の大きな変革は、一般的にこうした要素がない限り確保されない。したがって、米国石油産業が二次回収・三次回収に徹底的に取り組む技術を磨かず、また国家安全保障（ナショナルセキュリティー）の概念が希薄で危機感に乏しく、さらに科学的な真摯な態度を持ち合わせない産業人集団に担われていたならば、こうしたポリシーイノベーションはもたらされなかった。

水平掘りに關しては、考え出された技術というよりは、実際の探査・開発活動で井戸を掘った際に硬い岩盤に遭遇して結果として井戸が曲がり、あるいは水流の關係でビッドの挙動が一律でなくなり結果的に井戸が曲がってしまった経験を逆手にとり、その曲がりの力学を応用して産まれた技術である。まさに、ひとつの技術を徹底的に極めた成果である。

³ Enhanced Oil Recovery（原油増進回収法）

石油産業のように自然界に働きかけて取り組む産業の技術には、経験をベースにした工学の要素が大きく、地道な操業の蓄積が次なるイノベーションを培うという側面がある。

また、1980～90年代にDOE（エネルギー省）と地質調査所（US Geological Survey）が行った徹底的な地質調査もこうした動きを底支えた。こうした地道な作業の結果として集積された膨大な地質情報が科学的な想定を蓋然性を高め、ベンチャー企業に対して大きな可能性を開くことにつながった。まさに、政府機関が行うべき王道ある。この点に関して日本は逆に、産業技術総合研究所の一部に地質調査所を編入してしまうという失敗を演じた。

要は、新しい技術やビジネスを創り出す契機は、いつでもどこでもあるということであり、結果の違いは、これを掴むか否か、その準備と意思の差である。

2.3 シェールガス開発におけるベンチャー企業と石油会社の役割分担

米国におけるシェールガス開発を振り返ると、まず初めに成功したのはテキサス州バーネットシェールを手掛けたミッチェルエナジー社及び同社を2002年に買収したデボン社である。デボン社はバーネットシェールにおける最大の生産者となっている。バーネットシェールでは他にチェサピーク社とXTOエナジー社やエンカナ社等も開発に取り組んでいる。バーネットシェールにおけるシェールガス生産量は2000年の2億立方フィート/日から急増して、2010年には50億立方フィート/日を超えた。その後、2005～2006年にアーカンソー州のファイエットビル及び北東部のマーセラスでシェールガスの賦存が確認され、さらに2007年にはルイジアナ州のヘイネスビスでシェールガスの賦存が確認された。

2011年現在開発が進んでいるのは、米国ではバーネット、ファイエットビル、マーセラス、ヘイネスビスの4地域のシェールガスであり、同地域のポテンシャルと操業会社を表2に示す。

表2：米国の主要シェールガス田の概要

シェールガス田	概要	主な事業者	可採埋蔵量
バーネット (Barnett) テキサス州	1981年発見 面積5,000平方マイル 深度6,500～8,500フィート 層厚100～600フィート	デボン XTOエナジー チェサピーク EOGリソース エンカナ	44兆立方フィート
ファイエットビル (Fayetteville) アーカンソー州	2005年確認 面積9,000平方マイル 深度1,000～7,000フィート 層厚20～200フィート	サウスウエスト エンカナ ヘトリフォーク	41.6兆立方フィート
マーセラス (Marcellus) 北東部	2006年確認 面積95,000平方マイル 深度4,000～8,500フィート 層厚50～200フィート	チェサピーク アトラスエナジー レンツリソース	262兆立方フィート
ハイネスビル (Haynesville) テキサス州 ルイジアナ州	2007年確認 面積9,000平方マイル 深度10,500～13,500フィート 層厚200～300フィート	アハッチ・エンカナ EOGリソース ネクセン	251兆立方フィート

出所：DOE “Shale Gas Primer 2009”より筆者作成

次に石油会社の規模の視点から見ると、2008年以後、大手石油会社の参入という点が注目される。時系列に振り返ってみると、2007年にシェールがエンカナ社とパートナーシップを結んだことを皮切りに、2008年にBPがチェサピークのウッドフォードシェールを36.5億ドルで買収、2009年にフランスのトータル（現トータルフィナエルフ）がチェサピーク社のバーネットシェールの権益の25%等を22.5億ドルで買収した。それに加えて最大の動きは、2010年にエクソンモービルがベンチャー企業では大手のXTOエナジー社を人材・ノウハウを含め410億ドルで買収したことである。

大手石油会社の中には、コノコフィリップスのように自らシェールガス事業に乗り出した石油会社がある他、マラソン社のようにオイルシェール開発に乗り出した会社もある。

このように、まずベンチャー企業が事業の開拓を手掛け、そのあとでその事業を石油会社が引き継ぐことでシェールガス開発が本格化した流れが跡付けられ、両者が果たした役割分担が明確に窺われる。

米国のベンチャービジネスの意義は、半ば好奇心の赴くまま科学的知見が指し示す可能性を追求し、可能性が開け株価がピークを打つ前に売り抜けるといふことにある。彼らは環境対策、製品安全対策などの産業の基盤整備に対する関心は低く、それらは

大手企業が行えばいいという考え方で、大きな枠組みでの社会的分業に徹している。

一般的にベンチャーは攻めるに強く大手企業は守りに固い。一つの製品を開発するには様々な安全性の確認など地道で長時間を要する作業を行わなければならない。こうしたことはベンチャー企業が得意とするところではなく、大手企業が責任を持って進めるべき分野であるともいえよう。シェールガス開発は両者の役割分担が明確に行われた好例である。

2.4 シェールオイルへの適用の技術的側面

水平掘りと水圧破碎の技術的組み合わせは、将来的にはシェールオイル開発にも適用可能である。もちろんシェールオイルは液体であるので、シェールガス程容易には回収できないが、基本的には、水平掘りと水圧破碎という二つの技術が適用できる。

水圧破碎においては注入水には腐食防止剤、プロパントを沈積させないための高粘性のゲル化剤等を添加するが、詳細は公表されていない。破碎した頁岩層の隙間を維持するために封入するプロパントは基本的には砂粒であるが、形状・粒度の詳細は、各社のノウハウに係る事項である。

米国ではシェールガス開発はベンチャー系企業を中心に着手されたが、シェールオイル開発はバッケンシェール（モンタナ・ノースダコタ州）の開発を手掛けるヘスやマラソン等の中小・中堅石油会社を中心である。米国石油会社では現在、中堅企業は収益性の改善を目的にシェールガスからシェールオイルへ投資先をシフトさせる事例が多く、これらの会社は企業の枠を超えて技術的知見や工夫を共有している。

3. シェールガス開発の 国際エネルギー情勢への影響

本項では、シェールガス開発の国際エネルギー情勢への影響を考える。シェールガスの登場は既存のガス供給国間の利害関係、さらに消費国との関係を

微妙に変えつつある。

シェールガス登場の地政学的な意義としては、米国のLNG輸入計画の大幅廃棄に伴うLNG国際需給環境の緩和、欧州ガス輸入国の選択肢の拡大、すなわちロシアの政治力の低下、中国の資源外交の変化の可能性、そして中東・北アフリカガスへの相対的依存度低下が挙げられる。

3.1 米国の天然ガス供給力の増大とLNG需給環境の変化

既に図2でみたとおり、米国はガス需要の増加を北米での供給増だけでは充足できず、2009年には消費量の11%を純輸入量で賄った。その時点では将来の需要を充足するには海外市場からのLNG調達は不可避とみられ、全米各地にLNG輸入ターミナルの建設が計画された。現実にはガス不足は生じなかったものの、需要増が続けば不足も起こり得た。

しかしながら、特に2000年以後、米国の天然ガス産業は劇的に変化した。2.1項で見たとおり、そこには頁岩の岩盤層に賦存するガスの回収を可能とした水平掘りや水圧破碎技術を嚆矢とする技術革新がある。こうして創造された技術の新たな活用により需要を上回る新規供給源が開発されたので、米国における天然ガス需給の緩和がもたらされた。

米国の天然ガス需給は、生ガス(パイプラインガス)⁴の生産減を補うため2002年以前には年間500万トン以下だったLNGの輸入量が、2003年に1,050万トン、2004年1,300万トンに増加した。こうした輸入増を背景に2004年策定の年次エネルギー見通し⁵では、米国の2025年のLNG輸入量は1億トン以上に増加すると見積もられた。輸入増に対応するため、各地で大幅なLNG輸入基地建設計画が立てられた。

2004年時点のLNGの輸入基地は、表3に示す4カ所であったが、2005年時点では既存基地の拡張に

⁴ パイプラインで井戸元から消費地に供給されるガス。パイプラインガスともいう。

⁵ DOE/EIA “Energy Outlook, 2004”
[http://www.eia.gov/forecasts/archive/aeo04/pdf/0383\(2004\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/archive/aeo04/pdf/0383(2004).pdf)

加えて、58カ所もの新規基地建設が計画された。しかしながら、その後本格化したシェールガス生産はこれらの建設計画の大方を中断もしくは無期延期にした。

表3：米国のLNG輸入基地（2004年現在）

基地名	所在地	受入能力 (万トン)	供給元
Everett	マサチューセッツ	530	アルジェリア、トリニダッド ⁶
Cove Point	メリーランド ⁶	760	ナイジェリア、トリニダッド ⁶
Elba Island	ジョージア	330	トリニダッド ⁶
Lake Charles	ルイジアナ	480	アルジェリア、UAE、トリニダッド ⁶ 、カタール、ナイジェリア、オマーン

出所：DOE 資料より筆者作成。

米国のLNG輸入を当て込んで中東・アフリカ諸国（カタール、ナイジェリア、トリニダッドトバゴなど）はLNG生産量能力を大幅に拡張したが、米国との契約に至らなかったため大量のLNGが長期契約以外の形態で取引されるようになった。

LNGの生産能力は2011年末現在で約25,000万トンの規模に達した。2005年以後に投資が決定された案件には、2005年のカタールの4,500万トン、2006年のペルーの450万トン、2007年の豪州（ウッドサイド社）430万トンやアンゴラ520万トン、2008年のアルジェリア450万トン、2009年の豪州（Gorgonプロジェクト、1,500万トン）やパプアニューギニア（670万トン）、2010年の豪州（ブリティッシュガス、850万トン）が数えられた。これらのプロジェクトが立ち上がった結果、LNG輸出国の中で最大の生産能力を持つことになったのがカタールである。カタールのLNG生産能力は2008年末で3,000万トンであったが、2009～2010年に大型プロジェクトを相次いで稼働させた結果、2011年には年産7,700万トンの生産態勢を確立した。

3.2 欧州ガス輸入国の選択肢の拡大

(1) 欧州のLNG輸入動向

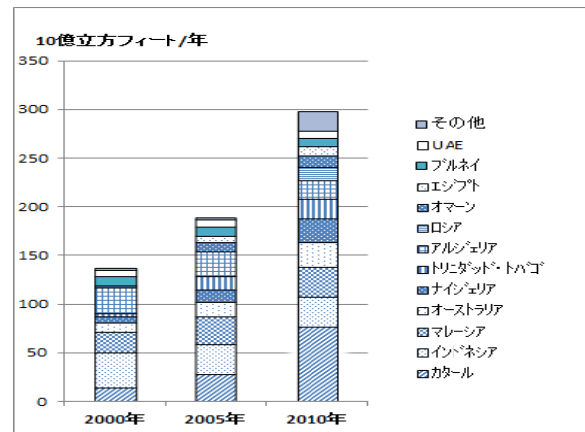
各国で積極的なLNG開発が進められた結果世界のLNG需給は緩和し、行先を失ったLNGはスポ

ット市場に流れ、主に欧州市場で売買されている。図5はBP統計より作成したLNG輸出入量の2000年、2005年と2010年の比較である。これによれば、欧州のLNG輸入量は2005年の年間476億立方フィートから2010年には同878億立方フィートに増加した。増加率は84.4%で、LNGの最大の需要地であるアジア・太平洋の45.2%や世界平均の57.6%を大きく上回った。これはスポット取引の増加を反映している。

また同統計からLNGの国別輸出货量をみると、カタールは2005年から2010年の間に輸出货量を2.8倍に伸ばし世界最大のLNG輸出国になった。

シェールガス開発の本格化と軌を一にして起きたことは、LNG取引の買い手市場化の中で欧州のガス・電力会社は一時ロシアからの長期契約ガスの引き取りを止めてスポットLNGに切り替えたことである⁶。国際取引上は契約違反になるこうした対応に対して、ロシアは長期契約顧客との関係を損なうべきでないとの判断から、価格方式を一部改定し長期契約顧客を繋ぎ止めようとせざるを得なかった。

(1) 国別輸出货量



⁶ 21世紀に入ると、LNG市場でも短期のスポット取引の割合が増えてきた。2000年時点では3%ほどであったが、2007年にはスポット取引の割合は20%に増加した。さらに、余剰LNG生産を背景とする市場の流動化により、輸出先を決めないでLNGを購入し、購入後顧客を探すというビジネスも出てきた。2008年時点では、こうした取引は大西洋市場では取引全体の4割にも達しているといわれる。アジア市場では長期契約が中心であり、そうした取引は6%にとどまっている。

(2) 地域別輸入量

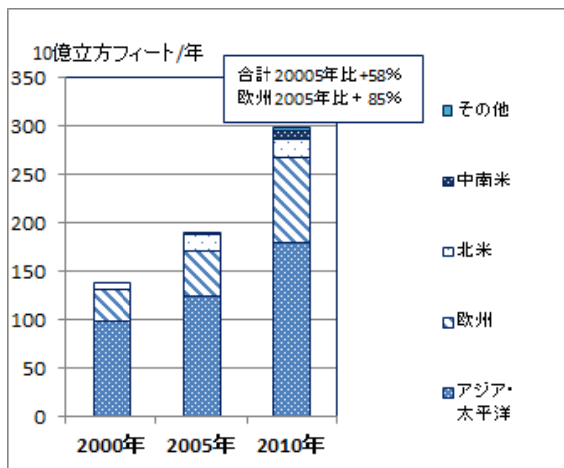


図5: LNG輸出入量の推移
出所: BP 統計各年版

世界のガス市場には、大きく米国市場、欧州市場、アジア市場がある。各市場で取引基準となるのは、米国はパイプラインガスのヘンリーハブ渡し価格であり、欧州は石油製品価格に連動したパイプラインガスと同ガスと競合するLNG、アジアは原油価格に連動するLNGの価格である。これらの3市場における価格は、各市場が抱える需給条件、気象条件等によりそれぞれ独自に変動している。BP統計により、その推移をみると、表4のとおりとなる。

LNGの価格動向に関しては、東日本大震災後の原子力発電所停止の影響から日本では前年比で10%以上LNG輸入が増えており、2011年の東アジア向けのスポットLNG価格は上昇気味であった。東アジアのスポット価格指標と英国市場価格(NBP)の差は、2011年3月まで2ドル/百万Btuであったが、3月の原発事故以後は両市場間の価格差は拡大し、2011年12月には8ドル程になった。

表4: 天然ガスの市場別価格
単位: 米ドル/百万Btu

		2010年	2011年
パイプラインガス	米国	4.38	4.11
	欧州	7.61	10.27
LNG	米国	4.79	5.44
	欧州	6.85	9.4
	日本	11.02	15.19

出所: IEA "Energy Price and Taxes"

(2) 輸入国の選択肢拡大の地政学的意味

中・長期的な影響に関しては、シェールガス開発は米国内だけの展開に止まらない。米国以外では、中国、カナダ、メキシコ、ポーランドで大きな賦存が確認されている。米国で開発された技術が適用されれば、数年の内にそれらの地域のシェールガスは天然ガス市場に供給されるとみられる。

欧州における最大規模のシェールガス層はポーランドで発見された。これにはシェブロンやエクソンモービル等の米国石油会社の協力が大きい。今世紀に入り東欧諸国に対するロシアの天然ガス供給停止問題は世界の注目を浴びたが、ポーランドでシェールガスが本格的に開発されればロシアの地位の相対的低下は避けられない。

ポーランド等の欧州外縁地域におけるシェールガスの開発はEU各国の対ロシア発言力の増大につながる。ドイツをはじめEUは現在天然ガス供給の3割をロシアに依存しているが、需要家がLNG調達を選択肢を増やすことは買い手としての交渉力を相対的に高める。ポーランドやドイツのシェールガス開発は、欧州諸国にとって対ロシアカードを一枚増やすことを意味する。

3.3 中国の資源外交変化の可能性

LNG需給の国際的緩和及びシェールガスの開発は、アジアでは中国とロシアの関係を成熟に向かわせる要素となる。ロシアは欧州ガス輸入国の選択肢拡大の動きに直面しているため、販路の確保に向けて東方(中国)へ一定程度のシフトを進めなければならなくなっている。

東シベリアガス田開発及び中国向けパイプラインの建設はこうした文脈で考えることが可能であり、中国とロシアはエネルギー戦略において基本的に相互補完関係に立ち得る。ロシアは2009年2月に中国に20年間にわたり石油を供給するとともに総額250億ドルの融資を申し出た。そして両国は2009年4月に石油・天然ガス・原子力・電力分野における協定を定めた政府間協定に調印したが、これにより石油パイプライン建設や石油取引に関する包括的な協定

が直ちに発効し、同契約も正式に発効した。

2011年6月16日のメドベージェフ大統領と胡錦濤国家主席による首脳会談においては、両国は経済協力で基本合意に達したものの、天然ガス問題では合意を得ることができなかった。両国は2009年にロシアが中国に680億 m^3 のガスを供給するとの基本合意を成立させているものの、価格面では最終合意に至っていない。

こうした展開をみていると中国はロシアの足元を見ていると評価せざるを得ない。ロシアは欧州顧客の低価格攻勢に遭遇し、中国にも欧州並みの価格を提示しているが、中国はトルクメニスタンやウズベキスタンからの供給を視野に入れ、ロシアにより安い価格の提示を求めている。

天然ガス交渉が当面中国主導になるとみられるのは、ロシアとのガス交渉で主導的な立場に立つこともさることながら、シェールオイル開発で一層の存在感を発揮するとみられるからでもある。

すなわち2011年7月に発表された米国ベーカー研究所の報告によれば、中国には6.5兆立米のシェールガスが賦存している（図6参照）。

このようにシェールガス開発は中国の資源外交のスタンスを一変させる可能性がある。端的に言えば、「資源買い漁り路線」から「自国資源開発」あるいは「国際ルールに則った技術保有会社の誘致と地道な合弁事業の組成」を骨子とする資源戦略への移行に加え、対ロシアガスへのスタンスを一層強化する可能性も大きい。

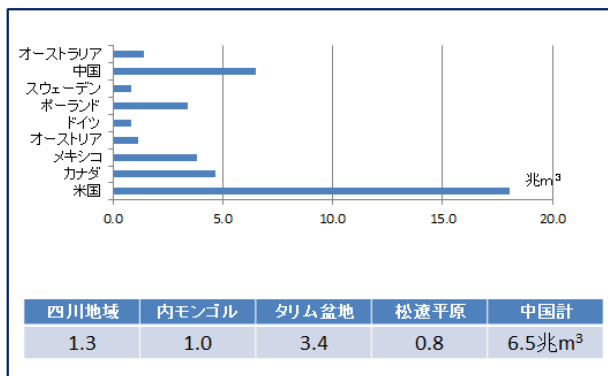


図6：シェールガスの回収可能量

出所：米国ベーカー研究所レポート（2011年7月）

4. シェールガス開発の課題

4.1 環境保全の動き

米国では農地におけるシェールガス田開発では農業用水へのガス・油分の混入が問題となり得るが、これまでのところ水圧破碎に用いられる注入水は完全に分離されており、農地としての利用や土地の売買の上で大きな問題は報告されていない。

しかしながら、シェールガス開発が進むにつれ、シェールガス開発に伴う環境問題が人々の関心を集めるようになった。米国でシェールガス開発に反対の立場をとる人々が挙げる問題点は、以下に要約できる。

まず、大量の地下水が水圧破碎には使用されることである。水圧破碎では大量の水の確保が課題となる。河川水その他、バーネットシェールガス開発では空港の水供給設備から供給を受けた。消火用水を利用する事例も報告されている。

注入水の水処理に関しては、水圧破碎後に地上に戻る水であるフローバックの問題が顕在化している。フローバックの主な処理方法は、公共水面への排水、工業用水としての利用、枯渇油井、ガス油井、帯水層への圧入、水圧破碎への循環的適用が該当する。この内、公共水面への排水と工業用水としての利用に関しては州の規制を満足する排水処理が必要であり、今後多くの州で規制が強化されることが予想される。

現在規制の導入を検討している州はニューヨーク州である。同州は2010年7月に飲料水用として良質な水源の確保を優先する対処方針案を発表した。「飲料水汚染防止に向けた規制（案）」は、ニューヨーク市及びシラキューズ水源地、飲料水用帯水層、環境保護区等での地表掘削を禁止すると共に、汚染防止対策の強化策としてガス流体の流出を防ぐためのケーシング・雨水管理・フローバック水の取扱い基準の強化、水圧破碎に用いる化学品の提出義務を課している。

また連邦レベルでも、環境保護庁（EPA）が、

水圧破碎と帯水層の関係性の有無を2014年までに検討するとして他、エネルギー省は専門家委員会を設置して注入薬品名の公表に動いている。

テキサス州、ワイオミング州、アーカンソー州は、添加薬品の公表に関し法制化に動いている。表5に示す通り2011年9月現在、州、連邦レベルで法律と関連規制の整備が進められている。

テキサス州の経緯をみると、2011年3月下院州議会に提出されたテキサス州法案（HB 3328）は、6月にペリー州知事の署名を経て9月に発効した。そして同法は、「石油会社は、規制当局（鉄道委員会）に対し、掘削仕上げの報告時に合わせて各井戸の薬品構成を提出することを義務付ける。また、ウェブサイトでも一般公開することを義務付ける。ただし、機密事項に該当するものは除外する」と規定している。

次に、水圧破碎で使用する圧入水により地下水が汚染される可能性があること、さらに開発が進むにつれて水圧破碎後に地上に戻る水の排水に伴う環境汚染が懸念されるようになった。したがって、シェールガスの開発業者にとり水圧破碎と帯水層汚染の因果関係の解明は避けられない課題となった。

水圧破碎に用いられる流体は、水、プロパント、化学物質を混合されたものである。したがって、シェールガス開発は、同時に水の処理など環境対策を伴うものでなければならない。

表5：法整備と関連規制の現状（2011年9月）

	関係省庁、州	規制内容
連邦レベル	環境保護庁(EPA)	水圧破碎と帯水層の関係の有無を分析(2014年まで)
	エネルギー省(DOE)	添加物質の公表方法、公表範囲を検討
	内務省(DOI)	連邦保有地における開発のあり方、対応策を検討
州レベル	テキサス州	添加物質の公表に関し法制化
	ワイオミング州	
	アーカンソー州	
	ルイジアナ州	添加物質を法制化を検討中
	モンタナ州	
ニューヨーク州	2011年7月までガス井掘削を禁止。同措置は2012年6月まで延長。	

出所：石油専門各誌より作成

浅部の帯水層や水源汚染への懸念から、ニューヨーク州は、2010年8月シェールガス開発のためのガス井掘削を一時停止する措置を講じた。この措置は2011年7月まで適用された後、2012年6月1日まで延期された。

4.2 注入化学物質の公開

シェールガス開発は地下水の汚染に必ずつながるというものではないにせよ、シェールガス開発によって住民の環境意識の高まりは逆風を形成しつつある。注入される化学物質の成分は公開対象とされる方向にあるが、他方企業によっては企業秘密を盾に公表を拒む例もみられる。

石油専門誌によれば、混合される化学物質の事例として、セメントや鉱物の溶解を目的とする塩酸、バクテリアによる腐食防止を目的とする殺生物剤、注入水の粘性を低下させプロパントの残存分を増加させる過硫酸アンモニウム、腐食防止剤、温度上昇時の粘性維持を目的とする架橋剤、摩擦損失低減を目的とする摩擦低減剤等が示されている。主な添加物質のタイプを表6にまとめた。

表6：水圧破碎における注入物質と注入目的

添加物の種類	添加目的	物質	混合割合の一例
プロパント	フラクチャー支持	砂	5~9%
酸	セメントや鉱物の溶解	塩酸	0.1%
ケル化剤	プロパント随伴性向上	非公開	0.05%
殺生物剤	バクテリアによる腐食防止	エタノール	0.01~0.05%
架橋剤	温度上昇時の粘性維持	ホウ酸塩	0.01%
摩擦低減剤	摩擦損失低減	ホリアクリルアミド*	0.08%
鉄分制御	金属酸化物の沈殿防止	クエン酸	0.004%
スケール防止剤	スケール付着防止	エチレングリコール	0.043%

出所：<http://www.energyindependenth.org/frac-fluid.pdf>より作成

4.3 取り組むべき環境対策

本稿でシェールガス開発を取り上げた理由は、米国の石油・ガス産業のダイナミズムをエネルギー確保に意味ある動きとして評価しているからである。米国のこれらの産業は日本の石油・ガス産業がまだに獲得できていないダイナミズムを有している。

このダイナミズムは現在、地下水汚染という新たな課題に直面している。既述の通り一部の州は、水圧破碎の適用禁止や注入化学物質成分の公表等の方

向に動いている。これは試練ではなく、産業として取り組むべき当然の対策である。その結果コストの問題が発生するが、そうしたコスト競争・経済性の問題が克服できなければ、シェールガスは地下に回収不能資源として残置されるだけであろう。

「頁岩からエネルギーを (EnergyFromShale.org)」という名称の産業団体が、「シェールオイル開発を巡る議論には二つの立場しかない。問題は、石油・天然資源がほしいか、あるいは石油・天然資源の開発はまったく不要とするか、という点である」として二者択一を迫っているが、この論の立て方は公正でない。また、そうした風潮は日本の石油産業関連機関あるいはシェールガス開発を支持する専門家に、多かれ少なかれ見られることには自戒を込めて留意しておかねばならない。問題の要は、シェールオイル開発自体の必要性ではなく、安全で、環境対策を万全に講じた上でのシェールオイル開発をいかに進めるかということである。

その点に関してポール・クルーグマンは2011年11月7日付けのニューヨークタイムズ⁷の紙上でその点に関し、経済学者らしい観点で、「水圧破碎法の特別扱いは、自由市場の原則をばかにした行為であると指摘しておきたい。水圧破碎法を推す政治家たちは補助金には反対だと主張しているが、ある産業が他に犠牲を強いているのにその補償を行わなくていいとするのは実質的に多額の補助金を与えるのと同じことである。彼らは、政府が勝者を決めるのには反対だと口では言いながらこの産業の勝利を求めているからこそ、特別扱いを要求しているのである」と書いている。

米国にこうした乱暴なロビー活動が存在するか否か、日本からは窺い知れないが、想像することは可能だろう。

しかしながら、そうした要素を加味してもなおかつ、米国の石油・ガス産業には健全なダイナミズムが見られる。ここでいう健全なダイナミズムとは大

きくはイノベーションに対する真摯な姿勢、ベンチャーと石油会社の機能分担からなる。中核事業領域における地道な努力に裏打ちされたベンチャーの挑戦と石油会社のフォローアップ及び最終事業化といった機能分担が、全体として揺るぎない成果を確保するという構造である。

エクソンモービルは、シェールガス開発で第二の地位にあったベンチャー企業であるXTOエナジー社を買収したが、それは成果を掠め取ったわけではなく、両者は単に機能を分担しただけである。他方、大手石油会社の中でもシェルはベンチャーに近い戦略をとり、またヘス社やマラソン社はそれぞれの事業規模に応じたポートフォリオを設定してオイルシェール開発を手掛けようとしている。

5. シェールガス開発の影響の石油地政学的側面

5.1 非OPEC石油の生産増

シェールガス開発で蓄積された技術革新がオイルシェールに及んだ場合の石油地政学上の影響はどう評価されるか。

既に北米ではシェールガス開発技術をコンデンサート成分に相当するシェールオイルへ適用することは一つの潮流になっており、シェールオイル生産量は2010年の38万B/Dから2016年には170万B/Dに達すると産業界はみている(表7参照)。

表7：米国シェールオイルの生産見通し
(単位：千B/D)

	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
Williston Basin(バッケン他)	270	400	580	730	800	840	880
バーネット	20	20	30	40	50	50	50
イーグル・フォード	30	100	140	200	260	340	390
モンテレー	10	10	10	20	30	40	50
ニオブララ	30	40	60	70	90	100	120
ユチカ	0	0	0	0	10	50	90
その他シェールオイル	20	50	50	80	80	110	120
シェールオイル計	380	620	870	1,140	1,320	1,530	1,700
原油・コンデンサート	5,090	5,040	4,910	4,750	4,630	4,750	4,920
液体燃料生産量計	5,470	5,660	5,780	5,890	5,950	6,280	6,620

出所：IEA「月次石油市場報告(2011年12月号)」より作成。

⁷ “Here comes the Sun” Paul Krugman, The New York Times, 2011年11月6日付け

米国の動きを受けて各国でシェールガス開発が起ることが予想される。また、技術的にはシェールオイル回収はシェールガス回収よりも難しいが、石油はガス（LNG）に比べて大掛かりなインフラの整備が必要ないという事情を考慮すれば、途上国においてはシェールガス開発よりもシェールオイル開発の方が立ち上がりやすいという要素もある。シェールガス開発技術が、今後世界各地のシェールオイル開発に本格的に適用されれば、石油地政学のパラダイムは大きく変わり得る。

そのことを2011年における石油産業動向から跡付けてみる。2011年6月に発表されたIEAの中期石油・ガス見通しをみると、2010～16年の非OPEC諸国の石油生産量は年平均50万B/D、期間合計で340万B/D増加するとみられている。図7のとおり、その内、270万B/Dが米国とカナダでもたらされ、120万B/Dがブラジルとコロンビアからもたらされる⁸。また、プロセスゲイン・バイオ燃料は90万B/D増加し、これらは、北海の減産を補う。一方、上流部門投資の継続や限界油田の操業継続はOPEC以外の中東産油国の減産幅を最大50万B/Dに抑えることに寄与する。

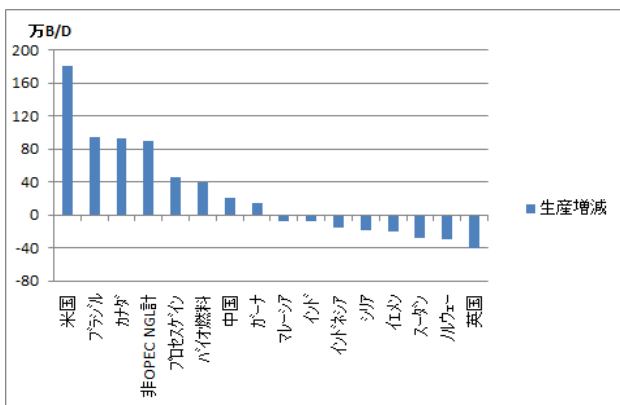


図7：主要非OPEC産油国の原油生産増減 (2010年と2016年の比較)

出所：IEA「月次石油市場報告（2011年12月号）」より作成。

⁸ 非OPEC全体としては、北海（英国、ノルウェー）、スーダン、イエメン等で減産が見込まれるので、合計340万B/Dの増産に止まる。

こうした全体的な絵の中で、米国の石油生産動向をみると米国の石油生産量は、2011年の781万B/Dから2016年までに約20%増加して960万B/Dになる。非在来型石油の生産見通しは上方修正される基調にあるが、このことは原油／ガスの現行価格差が石油比率の大きい鉱区の開発を優先させる一因をなすためである。シェールオイルやガスの開発はコンデンセートの増産につながる。これらの増産分はガス処理用や石油化学用として用いられる他、カナダのオイルサンドの希釈剤に用いられる。

既にみたとおりシェールオイル開発の米国の石油需給バランスへの影響としては、非在来型石油生産量は2010年の38万B/Dから2016年には170万B/Dに増加する。非在来型石油の石油生産総量に占める割合は2010年の6.9%から2016年には25.7%に増加する。その最大の貢献は、88万B/Dのバッケンシェールを含むウィリントン堆積盆地と39万B/Dのイーグルフォードである。

5.2 米国エネルギー外交の復権

2011年夏以来国際外交誌で、「米国はエネルギー外交のリーダーに返り咲く（世界のエネルギー供給の中心は米州（南北アメリカ大陸）に移行）」という文脈での論考が目にとまるようになった。それらの論考の主旨⁹は、シェールガスやオイルサンド等の非在来型資源に関して、米国には2兆バレルを超える非在来型ガス・石油資源が賦存するが、これに対して中東・北アフリカ地域に賦存する在来型炭化水素資源は1.2兆バレル程に過ぎないとの事実認識を示した後、この半世紀の間は世界的なエネルギー供給の中心は中東だったが、今やこの構図は変わろうとしている。2020年までに世界のエネルギー供給の中心はおそらく米州に移行していくとの展望を示した後、非在来型資源の台頭が国際政治に与える影響について筆者と同じ論考と認識を主に以下のとおり指摘している。

i) エネルギーを必要としている中国は、米州にお

⁹ 参考文献6) 参照。

けるエネルギー資源のポテンシャルを認め、米国と同様カナダや南米に数十億ドルもの投資をしている。

- ii) 体制変革運動が広がっている中東と北アフリカ諸国では、米国の非在来型資源開発の動きが同地域に残存する独裁者の政治姿勢に影響を与えている。即ち、シェールガス、シェールオイルの出現による石油・ガス価格の上昇圧力の緩和は、当該地域の為政者が石油収入のばら撒きにより国民の不満を抑えることができなくなることを意味する。
- iii) イラン、ロシア、ベネズエラ等の産油国は、米国のガス生産増を目の当たりにし動揺し始めている。米国の資源余剰は、資源輸入国にとって供給源を増やし、資源生産国の高圧的なエネルギー外交の行使を困難にしている。
- iv) 資源大国に圧力をかける先兵を務めるのは米国のエネルギー産業である。欧州諸国や中国が、米国の資源メジャーから必要な技術援助を受けて、自国内の非在来型資源を採掘することで、ロシアや湾岸諸国に迎合する必要がなくなる。

5.3 湾岸産油国の産油能力拡張計画への影響

サウジアラムコのファリーフCEOが、2011年11月にシェールガス革命の影響に関して初めて発言した¹⁰。発言の要点は二つあった。一つは、詳細評価を行うことは時期尚早としつつも、新たな石油供給源の出現は、競争者の出現としてよりは、石油時代を長引かせるものとして歓迎されるという点である。今一つは、新石油供給源の出現はイラク石油開発の本格化と相俟って、サウジの原油生産能力の拡張計画を後ろ倒しするだろうという点である。

このことのエネルギー安全保障上の含意は大きい。これまで世界の石油緊急時対応はOPEC加盟国、就中、サウジアラビアの余剰能力に依拠するところが大きく、サウジアラビアはこの視点から産油能力の拡張を手掛けてきた。しかし、2011年の展開は非

在来型石油開発の予想を上回る進展、イラクの石油開発の本格化はサウジアラビアを産油能力拡張計画の見直しに向かわせたということである。

IEA月次石油市場報告12月号より、OPECの余剰産油能力を国別にみていると、表8のとおりとなる。これを踏まえて2015年までの展望を、

- ① 2015年までの対OPEC石油需要増 250万B/D、
- ② 生産を伸ばすと見られる国としてイラク 150万B/D、リビア 80万B/D、アンゴラ 24万B/D、ナイジェリア 19万B/D

等の前提により試算してみると、サウジアラビアの需要は伸びず拡張計画のスピードを鈍化したとしてもOPEC全体としては463万B/Dの余剰能力を維持し、その内、207万B/Dはサウジアラビアが保持するバランスとなる。

表8：OPEC加盟国別余剰生産能力の規模
(単位：百万B/D)

	2011年(IEA石油市場報告)			2015年(試算)		
	産油能力	11月生産量(A)	余剰能力	産油能力	生産見込(B)	余剰能力
アルジェリア	133	129	4	136	129	7
アンゴラ	196	169	27	242	199	43
エクアドル	52	50	2	48	50	-2
イラン	370	355	15	312	310	2
イラク	276	272	4	425	422	3
クウェート	286	267	19	275	267	8
リビア	44	55	11	174	155	19
ナイジェリア	271	210	61	226	225	1
カタール	102	82	20	97	82	15
サウジアラビア	1,204	975	229	1,182	975	207
UAE	272	252	20	332	252	80
ベネズエラ	261	253	8	292	253	39
OPEC11カ国 (イラクを除く)	3,191	2,797	394	3,357	2,897	460
OPEC計	3,467	3,069	398	3,782	3,319	463

注：2015年時点の対OPEC石油需要の増加を250万B/D(3,069万B/D→3,319万B/D)と見込み、国別生産量増加見込みは2015年の生産量見込み量(B)と2011年11月生産実績(A)の差より試算すると、不足分はサウジアラビアの余剰能力(207万B/D)で埋め合わせされる。

出所：IEA「月次石油市場報告(2011年12月号)」より作成。

6. おわりに

数年来の米国石油産業関係者の高揚感、シェールガス革命によりもたらされたものである。こうした高揚感、1990年代初めの興隆期に示されたニューヨーク商品取引所(NYMEX)関係者のマインドに通じるものがある。

¹⁰http://www.tradearabia.com/news/OGN_208356.html

1960～80年代の石油価格決定の歴史を跡付けると、1960年代は国際石油カルテルの時代であり米国大手石油会社が石油価格を決めていた。その後、1970年代のOPECによる石油価格支配権の確立があり、1980年代を通じて石油価格は下がったものの価格決定権を回復するのは1990年代のNYMEXの成功まで待たねばならなかった。

様々な石油産業文献をみると、1993年になるとNYMEXの成功を正面から受けとめ、その高揚感を謳い上げる論文が目に残るようになった。

近年の米国エネルギー産業関係者の高揚感は、1993年当時のこのムードに近いと感じるのである。

さて、この半世紀の間、世界的なエネルギー供給の中心は中東であった。この事実は地政学的に大きな意味を持っていたが、今やこの構図は変わろうとしている。米国には2兆バレルを超える非在来型ガス・石油資源、カナダには2.4兆バレルのオイルサンド、さらに南米には2兆バレルの超重質油が賦存すると推定されるのに対し、中東・北アフリカ地域に賦存する在来型炭化水素資源は1.2兆バレル程に過ぎない。

既述の通り、水平掘りや水圧破碎技術の適用により米国のシェールガス生産量はこの10年間で事実上ゼロの状態から同国天然ガス総供給量の20%を占めるまでに急増した。シェールガス生産量は、2040年までに同5割に達するとの見通しも見られる。シェールガス生産の急成長の結果、米国のガス生産者は供給確保の問題から解放された反面、皮肉なことに今や供給余剰分に関し顧客を見出すことに頭を悩ますことになった。

関係者の中には、米国は再びエネルギー外交のリーダーの地位に帰り咲くだろうと指摘する者も現れた。現実には米国がエネルギー外交のリーダーの地位に帰り咲くのは容易なことではない。しかし、少なくとも、米国のリーダーとしてオバマ大統領はエネルギー戦略の策定に真摯に取り組んでいる。

2009年1月にオバマ大統領は、「我々の石油まみれの生活様式が我々の敵を利している」と述べ、米国

民に対してガソリン漬けの生活態度の是正を求めた。具体的には経済の再生及び再生エネルギーの促進を重視する一方で、国内ガス開発を支援し始めた。さらに、中国やポーランドとの二国間協力にシェールガス開発協力を盛り込み、多国間でもシェールガス開発に関する国際フォーラムを開催して技術協力を主導しようとしている。

米国エネルギー会社はオバマ政権の後押しを受けて、世界的に新たな展開にみせていることに留意しておく必要がある。

3・11東日本大震災を経験し、日本はエネルギー政策の抜本的見直しを迫られている。世界で胎動しつつある大きな潮流を見据えたエネルギー戦略の再構築が急がれるのみならず、これを先導する産業界のダイナミズムの発揮が期待される。

参考文献

- 1) 「技術革新がもたらしたエネルギー革命」(須藤)、社会技術革新学会第5回学術総会(2011年9月28日) 予稿集
- 2) DOE“Shale gas primer 2009”
- 3) Shale Gas and U.S. National Security, The James A. Baker III Institute, 2011年7月
- 4) 「世界の天然ガス埋蔵量の急増」伊原賢, JOGMEC (2011年8月11日)
<http://oilgas-info.jogmec.go.jp/>
- 5) “Here comes the Sun” Paul Krugman, The New York Times, 2011年11月6日
- 6) “The Americas, Not the Middle East, will be the world capital of energy” Amy M. Jaffe, Foreign Policy, 2011年9月
- 7) “Saudi sees threat of shale oil revolution”
http://www.tradearabia.com/news/OGN_208356.html
- 8) “Medium-Term Oil & Gas Markets”, IEA, 2011年7月
- 9) “Oil Market Report”, IEA, 2011年12月号