

中国はシェールガスの開発技術を獲得できるか？： 中国語文献による調査

上野貴弘^{1*}、鄭方婷²、Jane Nakano³、星野優子¹

1: (財)電力中央研究所 社会経済研究所、2: 東京大学大学院法学政治学研究科、3: Center for Strategic and International Studies (CSIS; 米国)

[作成日 2012年1月17日]

要約

米国のシェールガスブームを契機に、中国においてもシェールガス開発への期待が高まっており、中国・国土資源部は2020年以降に生産が急拡大すると見通している。開発に成功すれば、中国のみならず、世界のエネルギー需給を大幅に緩和できる。

中国では、不利な規制、政策枠組みの不在、地質条件、パイプラインの制約、環境影響、そして技術力の不足が資源開発の障壁と言われているが、本稿では、「米国のシェールガス革命」を可能にした技術力に注目し、中国が開発技術を獲得できるかどうかを考察した。

シェールガス開発に必要とされる技術は、以前より石油・天然ガス開発に使われていた多数の技術の組み合わせであり、具体的には、水平坑井技術、水圧破碎技術、破碎による亀裂の観測・分析技術の複合である。開発地点ごとに技術を適切に組み合わせる最適化の専門的知見が、商業ベースでの生産を成り立たせるカギであり、米国では、30年に及ぶ経験蓄積に基づいて、技術の組み合わせが高度化してきた。

そこで、中国における技術の現状をみるために、中国語の技術文献を調査した。その結果、中国においても、既に、在来型の石油・天然ガス、および炭層メタンの開発で水平坑井や水圧破碎などの技術が用いられているが、シェールガス開発への適用にあたっては、個別技術の水準が不十分であることに加えて、技術を組み合わせる最適化する能力も不足していることが分かった。

この状況を踏まえて、中国は自主開発と技術移転を加速させており、この1年程度の動向を見ると、第12次5カ年計画における明確な推進、四川省における長距離の水平掘削と多段の水圧破碎の成功、水圧破碎技術を有するFrac Tech社への投資計画などプラスの動きが多く、技術の獲得に向けた期待が膨らんでいる。ただし、経験蓄積に基づく高度なファインチューニングという技術の特徴上、経験を積む時間が必要となり、短期間で技術を獲得できるかは不透明である。また、米国のシェールとの特性の違いが技術的に重大なネックとなる可能性もある。

* Corresponding author : t-ueno@criepi.denken.or.jp

■この論文は、<http://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/index.html> からダウンロードできます。

免責事項

本ディスカッション・ペーパー中，意見にかかる部分は筆者のものであり，
（財）電力中央研究所又はその他機関の見解を示すものではない。

Disclaimer

The views expressed in this paper are solely those of the author(s), and do not necessarily reflect the views of CRIEPI or other organizations.

1. はじめに

米国のシェールガスブームを契機に、中国においても、シェールガス開発への期待が高まっている。米国エネルギー省のエネルギー情報局が2011年4月に発表した「世界のシェールガス資源：米国外の14地域の初期評価」と題するレポートは、中国における技術的に回収可能な資源量を36兆立方メートル(1,275Tcf)と推定した(USEIA 2011)。これは、米国とカナダを合わせた資源量を上回る値である。

このような期待の高まりを受けて、中国・国土資源部は、2020年以降にシェールガスの生産が急拡大するとの見通しを示し、2020年に150億立方メートル(0.5Tcf)、2030年に1,100億立方メートル(3.9Tcf)に達するとしている(竹原 2011a)。さらに、最近では、現在作成中の第12次5カ年計画期におけるシェールガスの発展計画に、2015年は65億立方メートル(0.2Tcf)、2020年は800億立方メートル(2.8Tcf)という生産目標が盛り込まれると報道されている。また、2015年までに全国のシェールガス資源ポテンシャルの調査・評価を行い、原始埋蔵量1兆 m^3 (35.3Tcf)、可採埋蔵量2,000億 m^3 (7Tcf)を確認することも伝えられている(竹原 2011b)。

そもそも、シェールガスとは、非在来型天然ガスの一種で、頁岩(シェール)という薄くて層状に割れやすい堆積岩に含まれるガスである。岩石中での浸透性が低いために、従来は回収が難しかったが、後述する水平掘削や水圧破砕などの技術進歩によって、シェールの中を水平方向に掘り進んで、人工的に割れ目を発生させ、閉じ込められたガスを経済的に回収することが可能になった。

中国の天然ガス輸入は今後、急拡大すると見込まれているが、米国がそうであったように、シェールガスの開発が大規模に行われれば、輸入は大幅に抑制される。中国の天然ガス需要は、1990年から2009年にかけて年率平均10%で増加を続けてきたが、これに国内生産の増加は追いつかず、2007年には純輸入国となった。2009年時点での国内ガス需要に占める純輸入のシェアは5%弱であったが、今後、輸入への依存度は上昇することが予想される。2011年秋に発表されたIEAの世界エネルギー展望(WEO 2011)のNew Policyシナリオでは、2009年から2035年にかけて、中国の天然ガス需要は年率平均6.7%で増加し、世界の天然ガス需要に占める中国のシェアは、2009年の3.1%から2035年には10.7%に拡大するとみられている。この場合には、2035年時点での中国の天然ガスの輸入依存度は42%まで上昇し、輸入量は2,120億立方メートル(7.5Tcf)となる¹。このように、今後25年のうちに中国は世界の天然ガスの1割強を消費する天然ガス消費大国となることから、中国国内でのシェールガス開発の動向は、中国のみならず、世界の天然ガス需給にも大きな意味を持つことになる。図1は、WEO2011における中国の天然ガス需要の見通しと、中国政府による生産目標を比べたものである。政府の目標通りとなれば、2030年には、需要の約4分の1が国内で生産されたシェールガスで満たされることになる。

¹ これは、同年でのカタールの天然ガス生産量合計に匹敵する規模である。

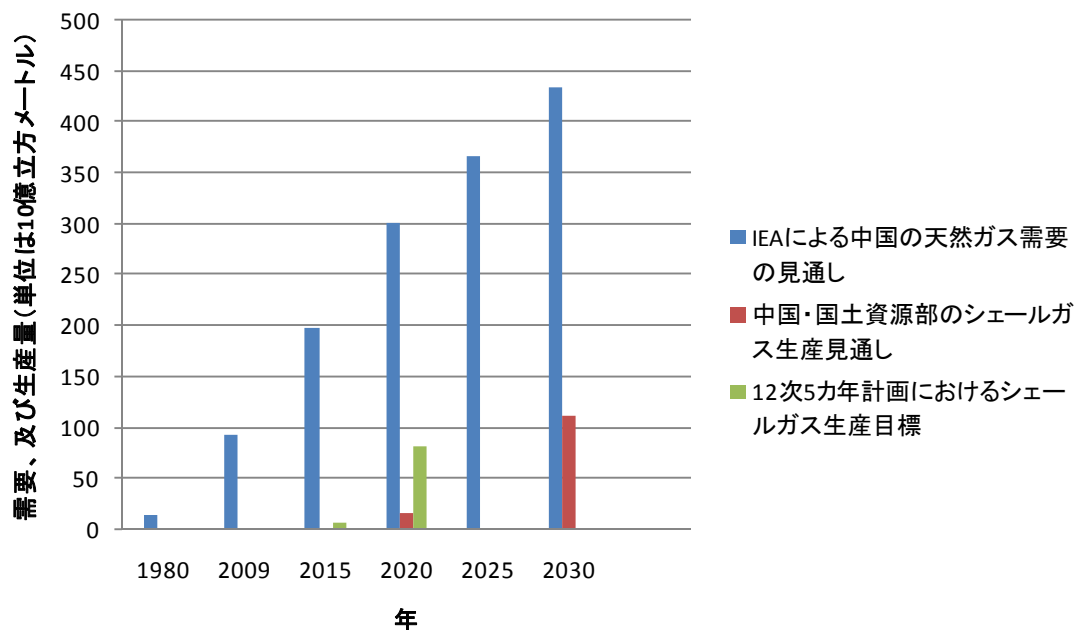


図1 WEO2011のNew Policy Scenarioにおける中国の天然ガス需要と
中国政府によるシェールガス生産量の見通し・目標の比較
出典：IEA(2011)、及び報道資料より著者作成

また、天然ガスの利用が石炭火力発電を代替するのであれば、地球温暖化対策への貢献にもなる²。WEO2011のNew Policyシナリオでは、中国の排出量は2020年以降、横ばいとなるが(図2)、天然ガスの利用拡大は、同シナリオにおける温室効果ガス排出量増加の抑制要因となっている。2011年12月に開催された国連気候変動枠組条約第17回締約国会議(COP17)では、2020年以降の新枠組みを交渉する「ダーバンプラットフォーム作業部会」の創設が合意されたが、シェールガスの利用可能性は、新枠組みに向けた中国の交渉ポジションに影響を与えるだろう。

² ただし、米国では、生産過程における排出・漏出を含むライフサイクルの排出量でみると、シェールガスは必ずしも低排出とは言えないとする研究が発表される一方(Howarth et al. 2011)、そうではないとする研究も発表されており(Jing 2011)、シェールガスの温室効果ガスフットプリントをめぐる論争が起こっている。

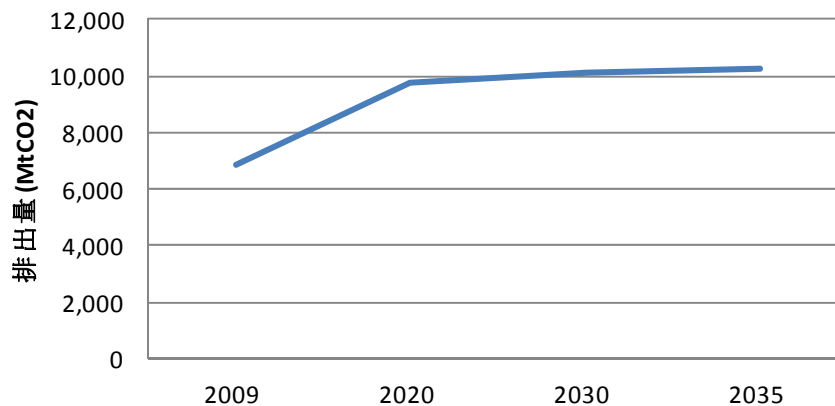


図2 WEO2011のNew Policyシナリオにおける中国のエネルギー起源CO₂排出量
出典：IEA(2011)

一方、シェールガスの開発には、いくつもの障壁が存在する。中国においては、不利な規制（課税、天然ガス価格）、政策枠組みの不在、地質条件、パイプラインの制約、環境影響（水質、水資源）、そして技術力の不足が潜在的な障壁となりうる³。

本稿では、これらの障壁の中から「技術力」に注目し、中国の技術力の現状、及び技術獲得に向けた取り組みを分析する。技術に注目するのは、伊原（2011a, b）が述べているように、米国のシェールガスブームは技術進歩によって可能になったためである。中国は多種多様な産業分野において、海外からの技術移転と自国による自主開発を組み合わせ、先端技術を吸収してきた⁴。非在来型資源のひとつであるシェールガスの開発技術についても、同様の仕組みが機能するののかという点が本稿の主たる関心である。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2.において、中国のシェールガスの特徴と開発の現状を整理し、3.では、シェールガスの開発技術を概観する。4.では、中国におけるシェールガスの開発技術の現状と自主開発動向を中国語文献に基づいて整理し、5.では、海外からの技術移転の取り組みを整理する。これらを踏まえて、6.において、中国が開発技術を獲得できるかを考察する。最後に、7.で結語を述べる。

2. 中国のシェールガスの特徴と開発の現状

2-1. 中国におけるシェールガスの分布と特徴

中国では、主に、四川盆地とタリム盆地がシェールガスの貯留地と言われており、その資源量は非常に大きいと考えられている。前述の通り、米国エネルギー省のエネルギー情報局（EIA）は、2011年に発表した「世界のシェールガス資源：米国外の14地域の初期評

³ 竹原（2010）は、中国におけるシェールガス開発の課題として、技術と知見、開発促進策、価格統制、水資源、パイプラインインフラを挙げている。

⁴ 温暖化対策技術の分野については、杉山・上野（2009）、及びTan and Seligsohn（2010）を参照。

価」と題するレポートで、中国（四川盆地とタリム盆地）における技術的に回収可能なシェールガスの資源量を 1,275Tef と評価した。これは、米国とカナダをあわせた北米地域の資源量である 1,250Tef を上回る量である（USEIA 2011）。

大きな資源量に期待がかかる一方、地質条件が米国よりも不利であると指摘されることが多い。たとえば、杜ほか（2011）は、米国のシェールと比べて、中国のシェールには、1)堆積時代が古い、2)熟成度が高い、3)貯留層が深い、4)保存条件が悪い、5)地形が複雑であるといった不利な条件があると述べている。具体的には、以下の通りである。

- 1) 中国南部の海成層シェールの堆積時代は主に早期古生代のカンブリア紀とシルル紀であり、米国よりも古い。米国でシェールガスが開発されている 5 つの主要な盆地では、シェールが形成された時代が遅く、主に古生代のデボン紀、ミシシッピ紀、及び中生代の白亜紀である
- 2) 中国の下部古生層における海成層のシェールの Ro 値（=熟成度）は 1.1~4.6%の間であり、現時点で既に成熟段階を過ぎており、シェールの有機物が大きく変化し過ぎている。米国の主要なシェールガスの貯留層の Ro 値は通常 0.4%~2.5%の間であり、ガス生成のピーク期にある
- 3) 米国で既に開発されたシェールガスの貯留層の深さは 1000~3500m の間である。一方、中国南部の海成層シェールでは、3000m 以浅の埋蔵深度であることは少なく、一部のシェールガス貯留層の深さは 5000m を上回ることがある
- 4) 中国では、下部古生層に属する海成層のシェールが、米国よりも大きな構造変動による変化を受けている。特に南方の揚子江プレートがそうであり、盆地周縁のシェール地層はせり出して露出し、盆地内部のシェールは断層によって切断され、ガスが大量に散逸しており、保存条件が不利である
- 5) 地表の条件も大きく異なっている。米国の Barnett シェールは主に地形が比較的平坦な場所に分布している。しかし、中国では、南部の海成層地区がシェールガスの貯留に最も有利と考えられているが、地形が複雑な山岳地帯である

2-2. 国有石油企業等による調査・掘削活動

四川盆地では、ペトロチャイナ（中国石油天然気）が資源評価と評価井の掘削を行っている⁵。同社は、2009年12月に威（Wei）201井の掘削を実施し、2010年9月10日には水圧破碎を行って、測定日において、 $1.08 \times 10^4 \text{m}^3$ の生産量を得たと報告されている。同坑井近くの威 201-H1 井では、2011年1月から4月にかけて、中国のシェールガスでは初めての水平掘削が行われ、総延長 2,823 メートル（水平坑井部 1,079 メートル）の坑井が掘削され、同年7月には11段の水圧破碎が行われた。また、同社は寧（Ning）201井でも水圧破碎を実施した（Li 2011, 唐ほか 2011, 叶ほか 2011, 竹原 2011a）⁶。

⁵ ペトロチャイナは中国石油集団（CNPC）の上場子会社である。

⁶ 水平掘削と水圧破碎については、3.を参照。

シノペック（中石化集団）は、貴州省の方深1井において、2010年5月10日に水圧破砕を実施し、成功したと報告されている。また、四川、安徽、湖南・湖北、河南で調査・評価井試掘を行っている（刘ほか 2011、竹原 2011a）。

2-3. 鉦区のオークション

2011年6月に、対象を中国企業に限定して、中国初の鉦区オークションが実施された。4か所の鉦区に対して6社の応札があり、このうちの2か所について、シノペックと河南煤氣（Henan Provincial Coal Seam Gas Development and Utilization Co.）が落札した。外資は入札への直接の参加資格を認められておらず、入札に参加可能な中国企業との提携によって開発に参加できる。

2-4. 海外企業の動向⁷

BP（British Petroleum）は貴州省の開里（Kaili）と江蘇省の黄橋（Huangqiao）の探鉦・開発についてシノペックと交渉中との報道がある。シェルは、2010年11月に四川盆地の富順（Fushun）－永川（Yongchuan）鉦区の資源評価について、ペトロチャイナと合意し、2010年12月から2011年4月にかけて、評価井2抗を掘削した。ConocoPhillipsは、2011年の早い段階で、ペトロチャイナと四川省成都の開発について交渉中と報道された（竹原 2011a）。

2-5. 開発促進政策

中国政府は、第12次5カ年計画（2011年～2015年）において、コールベッドメタンやシェールガスなど非在来型資源の開発を支援する方向性を明確に打ち出している。具体的には、シェールガスの生産に対して、1立方メートルあたり0.2元の補助金を導入すると報道されている。また、国家發展改革委員会が2011年5月13日に発表した「輸入奨励技術・製品目録」には、多段階水圧破砕や水平井掘削機器が含まれており、技術輸入のハードルを下げようとしている。さらに、シェールガスの技術開発は、第12次5カ年計画において、国家科学技術重要プロジェクトに指定されており、重点的なR&D支援が行われる見通しである。

3. シェールガス開発に必要とされる主要な技術

シェールガス開発では、おおまかに言うと、縦に掘り、横に掘り、水平方向に広がるシェールに水圧で割れ目を入れて、ガスを回収するという方法が採用される（図3）。この方法を実現するために数多くの技術が組み合わせられる。

⁷ 竹原（2011a）、及び各種報道資料に基づく。

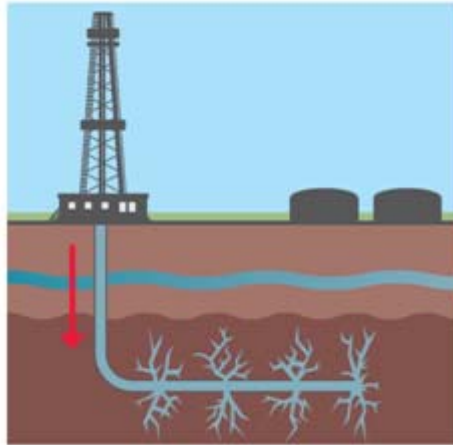


図3 シェールガス生産の概念図

適用される個々の技術は、在来型の石油・ガス資源、及び既に開発が進んだ非在来型の資源（コールベッドメタンなど）に用いられているものであり、目新しいものではない。ただし、シェールガスの開発には、個々の技術の中でも先進的な水準の設備（ハード面の技術）とノウハウ（ソフト面の技術）が必要となり、また技術を適切に組み合わせて、貯留層の割れ目から十分な量のガスを回収するための最適化がカギとなる。

3-1. 個別技術の概要

中国における技術の検討に先立って、以下では、シェールガス開発に用いられる個別技術の概要を述べる。開発段階にあわせて、(A)探鉱技術、(B)掘削技術、(C)坑井仕上げ技術、(D)貯留層改造技術の4つに分類し、各分類において、さらに技術を細分化する⁸。

(A)探鉱技術

(A-1) 反射法地震探査技術

人工震源で生じた地震波動が地下深部へ伝播していくときに各々の地層境界などで生じる反射波を利用して地質構造についての情報を得る手法である。直線に沿ってデータを得る二次元探査（2D）と帯状に密なデータが得られる三次元探査（3D）がある。

(A-2) その他の探鉱技術

物理検層（ゾンデと呼ばれる様々な検層器を坑内に降ろし、坑井の周りの地層の物理的性質を深さ方向に連続して測定する技術）、及び物理検層で得られたデータの分析と総合化も重要な技術である。

⁸ 以下の技術概要は、劉ほか（2009）、伊原（2011a, b）、山崎編（1997）、King（2010）、及び石油天然ガス・金属鉱物資源機構のウェブサイト上の石油・天然ガス用語辞典を参考にした。

(B)水平掘削技術

シェール層の内部を水平に掘り進める掘削方法である。その際に、下記の 4 つの技術がカギとなる。

- ・ ロータリー・ステアラブル・システム：ドリルを回転させながら、傾斜角を制御する技術
- ・ アンダーバランス掘削：掘削時に用いる泥水の比重を意図的に小さくして、坑井内の圧力を地層圧より小さく保ちながら掘削する技術。貯留層へのダメージを軽減できる
- ・ Logging While Drilling (LWD) & Measurement While Drilling (MWD)：ビット（＝岩石を破壊する錐の役目を果たすドリルの先端にある器具）の近くにセンサーを付けることにより、各種データをリアルタイムで計測して、地上に伝える技術
- ・ 多分岐型の水平坑井：図 4 に示されているように、ひとつの場所から複数の水平坑井を掘る技術。これによって、1 坑あたりの生産量が格段に向上する。Multi-well pad とも呼ばれる

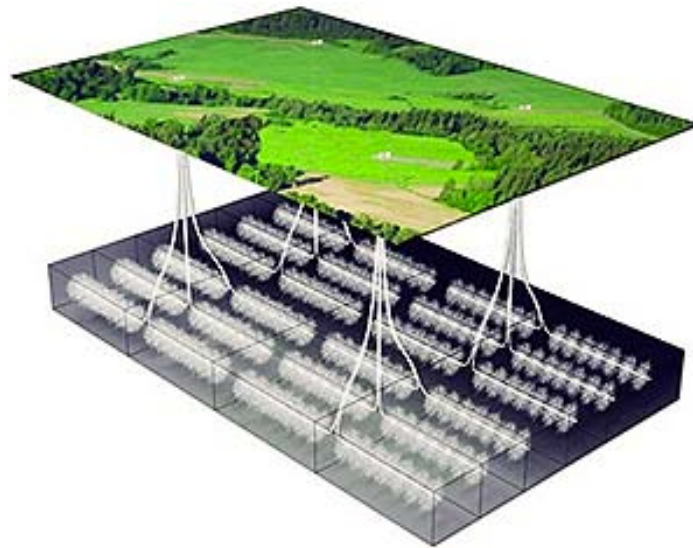


図 4 多分岐型の水平坑井

出典： Wood et al. 2011

(C)坑井仕上げ技術 (well completion)

坑井仕上げとは、坑井をセメントで固め、ケースを入れて地層から遮断する工程（セメンチング、およびケーシングという）、及びガスの流れを作るための穴や亀裂を作る工程を、各坑井の設計に応じて、適切に組み合わせたものである。以下の(D-1)で取り上げる水圧破砕を含む工程であるが、各種の破砕方式は(D-1)で扱い、ここでは、仕上げ形態の違いに注

目する。

(C-1) 仕上げ方式

シェールガスの水平坑井では、主に以下の3つの方式が採用される（刘ほか 2009）。

・ブリッジプラグによる仕上げ：ブリッジプラグと呼ばれる器具で水平坑井の各段を分離してから、穿孔と水圧破碎を行う方式である。ケーシングがなされた坑井に適用される。水平坑井で最も頻繁に使われている方法であるが、他の方法と比べて、作業に時間を要する

・水ジェット噴射による穿孔（せんこう）仕上げ：選択的に水ジェットを発生させて狙った位置に亀裂を作る水ジェット噴射（hydrajetting）技術を用いて、ケーシングに穿孔を行う方式である。この方法では、パッカーやブリッジプラグ（=ともに坑内の流体・気体の動きをコントロールするための器具）を設置する必要がないため、作業時間を短縮できる

・機械式仕上げ：裸坑（=ケーシングを行わない坑井）に対して、特殊なスライディングスリーブと膨張パッカーを用いて、多段階の水圧破碎を行う方式である。ボールを用いて、破碎を行う場所をコントロールする（図5）⁹

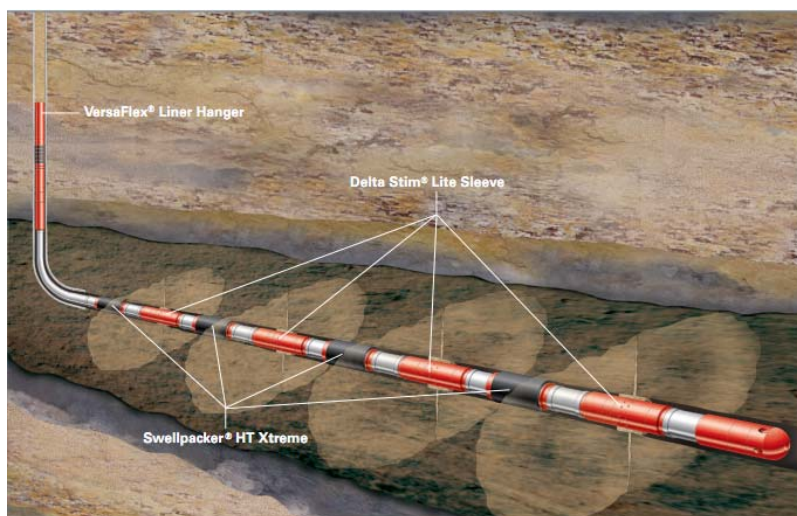


図5 機械式仕上げの一例（Halliburton社のDelta Stim）

出典： Halliburton (2009)

(C-2)セメンチング

シェールガスの生産では、発泡セメントが使われることが多い。発泡セメントは、低密度、低浸透率、高強度であり、貯留層に損害を与えにくい。米国オクラホマ州の Woodford

⁹ 刘ほか（2009）は、機械式仕上げの代表例として、Halliburton社のDelta Stimを指摘している。Delta Stimの仕組み、特にここで述べたスライディングスリーブ、膨張パッカー、ボールによるコントロールについては、下記の動画が参考になる。

<http://www.youtube.com/watch?v=UQi66uoOUEE>

シェールガス田では、発泡セメントを使うことによって、生産量が 23%増えた (Wylie et al. 2007)。

(D)貯留層改造技術

(D-1) 水圧破碎 (フラクチャリング) 技術

貯留層に水圧で割れ目を生じさせる技術であり、割れ目は低孔隙率、かつ低浸透率のシェールからガスを取り出すために不可欠である。水圧破碎には、さまざまなプロセス上の工夫と技術方式があり、シェールガスの開発では、これらを適切に組み合わせて、ガスの生産量が最大化するように計画・実施することが極めて重要である。ポイントは、複雑な割れ目を形成して (図 6)、シェール貯留層内の接触面積を増やすことである (King 2010)。

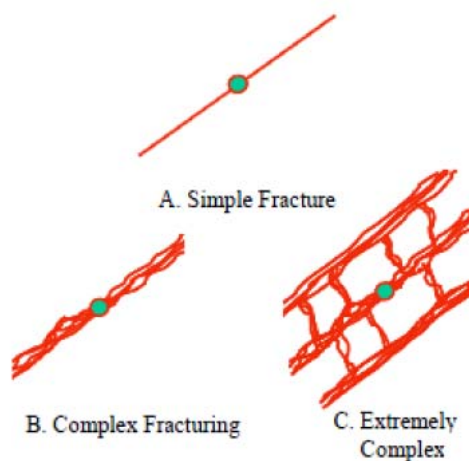


図 6 単純な割れ目と複雑な割れ目の模式図

出典： King (2010)

プロセス上の工夫については、シェールガス開発では、以下の多段階破碎、同時破碎、再破碎が用いられている。

- 多段階破碎：ひとつの水平坑井の中で多段階にわたって水圧破碎を行う方法であり、シェールガスの開発において基本となる方式である。C-1.で取り上げた3つの方式は全て多段階破碎に対応しているが、その中でも、機械式仕上げが最も先進的と言われている (刘ほか 2009)
- 同時破碎：2つ以上の坑井に対して、同時に水圧破碎を実施する方式。作業時間を大幅に短縮できるだけでなく、同時に破碎を行うことで、シェール内に発生する圧力が変化し、より複雑な割れ目を得ることが可能になる。ただし、同時破碎を成功させるためには、高いレベルの技術力・ノウハウが求められる (King 2010)

- ・ 再破碎：生産量が低減した坑井に対する再度の水圧破碎であり、生産量をかなり回復できる場合がある

技術方式については、スリックウォーター破碎の使用が一般的であり、スリックウォーター（水ベースの流体）に添加する化学物質の配合割合がカギとなる。

- ・ スリックウォーター破碎：水に少量の化学物質を添加したものを流体として用いる方法。コストが少なく、地層へのダメージも小さいため、シェールガス開発では広く用いられている。ただし、全ての場合に、スリックウォーター方式が有効とは限らず、ジェルを使うほうが良い場合もある。また、近年は、スリックウォーター方式とジェル方式を組み合わせるハイブリッド型が増えている（King 2010）
- ・ 添加剤の種類と配合割合：スリックウォーター破碎に際しては、水に、割れ目が閉じることを防ぐプロパント（支持剤）を混ぜ、さらに様々な化学物質を混ぜた流体が用いられるが、添加する化学物質とその配合割合は重要なノウハウである。表1は添加物質の種類と重量比の一例であるが、これらは地層条件や破碎の要件によって変わり、その微妙な調整が重要である。米国では水圧破碎に使われる流体に含まれる化学物質が水質を汚染するのではないかとの懸念がもたれ、最近では、環境影響に配慮するようになってきている（伊原 2011a）

表1 水圧破碎添加剤タイプ及びその作用

添加剤タイプ	代表的な化合物	作用	重量比 (%)
酸	塩酸	鉱物の溶解とフラクチャーの形成を補助する	0.11
抗菌剤	グルタルアルデヒド ⁶	腐食性物質を生成する細菌を除去する	0.001
解乳化剤	過硫酸アンモニウム	ゲル化剤に破裂を延期させる	0.009
抗腐食剤	ホルムアミド ⁶	套管の腐食を防止する	0.001
架橋剤	ホウ酸塩	温度上昇時においても破碎流体の粘度を保持する	0.006
配管摩擦抵抗低減剤	原油抽出物	破碎流体と套管の摩擦力を低減し、圧力損失を低下させる	0.080
ゲル	ケラチン又はヒト ⁶ ロキエチルセルロース	砂の運搬能力を高めるため、純水の濃度を増加させる	0.05
キレート化剤	クエン酸	金属酸化物の沈殿を抑制する	0.004
液状化防止剤	塩化カルウム	含砂流体を塩化物化し、流体と地層粘土の反応を防止する	0.05
pH調整剤	炭酸ナトリウム又は炭酸カルウム	架橋剤と同じく、その他成分の有効性を保持する	0.01
防汚剤	エチレングリコール	配管内の汚物付着を抑制する	0.04
界面活性剤	イソ ⁶ ロピ ⁶ ルアルコール	破碎流体の表面張力を減少させ返液率を高める	0.08
プロパント	珪砂、シカ	形成されたフラクチャーを支持する	8.95

出典：唐ほか（2010）（Chesapeake Energy（2010）, 及び Arthur et al. 2009 に基づく）

破砕の際に、高い水圧を発生させる方法として、以下の水ジェット噴射が用いられる。

- ・ 水ジェット噴射：C-1 の穿孔仕上げで紹介した方法。同技術は、ハリバートン社の技術者であった Surjaatmadja 氏らが開発したものであり、米国初の大規模シェールガス田である Barnett の開発で使用された

(D-2)水圧破砕によって発生する割れ目の観測・分析（微小地震観測、シミュレーション技術を含む）

シェールは地点ごとに物性と地質特性が大きく異なる。そのため、水圧破砕を地点ごとにファインチューニングする必要がある。また同一の坑井に対しても、水圧破砕中に層内の圧力分布が変わっていくため、リアルタイムに水圧破砕の内容（流量、添加剤の成分、破砕の開始点等）を調整する必要がある。こうしたチューニングを可能にするのが、水圧破砕によって発生する割れ目の観測・分析技術である。

- ・ 微小地震波法（マイクロサイスミック）：水圧破砕によって発生する割れ目を観測する際には、A-1 で取り上げた反射法地震探査技術に加えて、微小地震観測による観測が用いられる。微小地震波法（マイクロサイスミック）は、割れ目が発生した際に発生する微小な地震波を用いた観測方法である。これによって、水圧破砕の実施中に、発生した割れ目を観測することが可能になり（図7）、破砕方法をリアルタイムに微調整できるようになった。

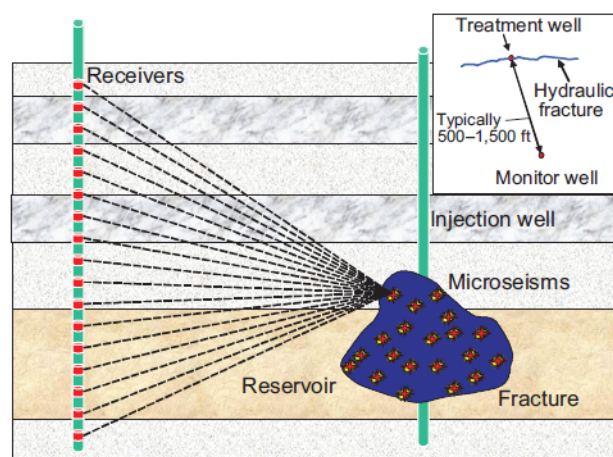


図7 微小地震波（microseism）を用いた割れ目（fracture）の観測

出典： Warpinski (2009)

- ・様々な分析・シミュレーション手法：水圧破砕の実施後に、微小地震波の観測データと傾斜計による観測データを用いて割れ目を詳細に分析できるようになった。米国のシェールガス開発では、三次元垂直地震断面法（3D VSP; 3D Vertical Seismic Profiling）と呼ばれる手法が用いられている。また、これらのデータを用いたシミュレーション技術には、Discrete Fracture Network（DFN）モデル等がある

3-2. 経験蓄積と高度な専門性の重要性

シェールガス開発では、坑井あたりの生産量が落ちやすいために、新たな坑井を繰り返し、掘削していく必要がある。こうした繰り返しの開発過程を通じて、経験を蓄積し、継続的に技術力を向上させることで、水平掘削の高度化と水圧破砕のファインチューニングが可能になり、生産量を高めることができる。実際に、米国ではこのようにして、開発技術が進化してきた¹⁰。

特に水圧破砕については、微小地震観測などの技術によって詳細な観測と分析を繰り返し行い、割れ目の発生メカニズムについての理解を深めることで、複雑な割れ目が発生するようにコントロールできるようになる。コントロールすべき要素は多岐にわたるが、King(2010)は、破砕の間隔・段数と開始点、流体とプロパントの選択、流体の注入速度などを指摘している。この制御能力が、経済的に成り立つレベルの生産量を確保するカギとなる。観測・分析のツールを導入すれば備わるものではなく、知識と経験に裏付けされた高度な専門性の蓄積が不可欠である。

このように、シェールガス開発では、設備面の技術だけではなく、経験蓄積に基づく専門性と高度な知見というソフト面の技術が極めて重要になる。

4. 中国における技術獲得状況と自主開発動向

4-1. 技術獲得状況

これらの技術について、中国における獲得状況を、中国語で書かれた最新（過去3年以内）のシェールガス開発を主題とする技術文献から探った。具体的には、タイトルにシェールガス（中国語では、頁岩気）を含む文献から、開発技術を扱ったものを取り上げた¹¹。

その結果は、表2の通りである。獲得状況と技術が不足している部分を分けて整理した。表にあるように、探鉱技術から貯留層改造技術まで、個々の技術は中国に存在している。これまでに、在来型の石油・天然ガス開発や非在来型のコールベッドメタンの開発などで

¹⁰ King (2010)は、30年にわたる水圧破砕技術の継続的な改善を詳細にまとめている。

¹¹ シェールガスを扱う文献は、開発が先行するコールベッドメタンを扱う文献に比べて、件数が非常に少ない（陳ほか 2010）。ただし、2010年以降は、文献数が急増しており、関心の高まりを受けて、今後は、さらに増えていくものと見込まれる。

適用されてきたためである。

しかし、シェールガスの開発には、こうした従来技術の中でも、より高度な発展型が必要とされており、こうした技術は立ち遅れていると評価されている。技術が不足している主な分野は、(1) 多分岐型の水平坑井、(2) 水平裸坑向けの増産用スライディングスリーブを用いる坑井仕上げと多段階破砕、(3) 水圧破砕における水ジェット噴射、(4) 水圧破砕に用いる流体、(5) 微小地震観測と 3D VSP (Vertical Seismic Profiling)、(6) 水圧破砕の効果予測・シミュレーションである。

特に、(5)と(6)の遅れは、開発に不可欠なファインチューニングを行うための技術基盤が確立されていないことを示している。そのため、要素となる個別技術は存在していても、現時点では、最適に組み合わせていくのは困難であると推測される

このような技術面の遅れを踏まえて、一気に開発に向かうのではなく、いくつかの段階を経て、経験を蓄積しながら開発を進める方向性が指摘されている¹²。

¹² 例えば、浅い坑井で経験を積んでから、深い坑井における本格開発に移行するなど (刘ほか 2009)。

表 2 中国におけるシェールガス開発技術の獲得状況と不足部分

	技術獲得状況	技術が不足している部分
(1)探鉱技術		
(1-1)反射法地震探査技術	<p>[罗・李 2011] 2009 年より、蜀南、富順—永川、長寧、および昭通にて 2 次元調査を、威遠と長寧にて 3 次元調査を実施した</p> <p>[李志栄ほか 2011] 四川盆地南部のシェールガス探索の実践を通じて、地球物理的な探査技術の研究を行い、中国の地質特性にあった地球物理的な探査評価方法を提示した</p>	[李志栄ほか 2011] いかにしてシェールガスに対して震探資料を利用するかが特に重要だが、今のところ、一通りの完成した技術構想と方法は存在しない
(1-2)その他の探鉱技術	[斉ほか 2011] これまでの経験に基づき、坑井の測定データを用いて、定性識別、割れ目の有効性識別、貯留層の物性パラメータの処理、及び優先すべき測定項目について、初歩的な検討を実施した	[斉ほか 2011] シェールガスの坑井測定の解釈評価技術は初歩段階にあり、多くの技術的な難題があると予想する
(2)水平掘削技術		
	<p>[刘ほか 2009] 水平坑井は国内の技術で完全に実現可能。2005 年以来、西南石油ガス田は LWD、ロータリー・ステアラブル・システム、FEMWD (Formation Evaluation Measurement While Drilling)などの先進設備を導入した。2007 年にはアンダーバランス掘削技術を応用して、広安 002-H1 井の掘削作業が完成し、水平坑井の長さは 2000 メートルを超過した</p> <p>[李武広ほか 2011] 国内の水平坑井掘削技術とインバランス掘削技術は比較的整備された状況である</p>	[李武広ほか 2011]長距離の多分岐型の水平坑井の技術が遅れている。また、多分岐型の水平坑井の制御メカニズムが不明瞭である

	[Li 2011] 2011年1月から4月にかけて、威 201-H1 井で中国のシェールガスでは初めての水平掘削が行われ、総延長 2,823メートル（水平坑井部 1,079メートル）の坑井を掘削した	
(3)坑井仕上げ技術		
(3-1)仕上げ方式	[刘ほか 2009] 穿孔仕上げ（チュービング搬送による穿孔、水ジェット噴射穿孔）、及び多機能チュービングストリング仕上げなどが国内の油ガス田で広範に応用されている	[刘ほか 2009] ハリバートン社の Delta Stim 技術のような水平裸坑向けの増産用スライディングスリーブを用いる坑井仕上げ・分段破碎の開発・導入を提案する
(3-2) セメンチング	[刘ほか 2009] 発泡セメントによる仕上げ技術は 1980 年代より一部の油ガス田で応用されて、現在、青海省花土溝鎮にある青海油田、新疆省にある吐哈油田の巴喀地域、山東省にある勝利油田の草橋地域、内蒙古自治区にある鄂爾多斯ガス田、河南油田の天然ガス井において比較的良好な効果を得ており、技術は成熟している	
(4)貯留層改造技術		
(4-1) 水圧破碎技術	[刘ほか 2009] 水圧破碎は国内の油田・ガス田の増産に広く使用されている。その中で、コイルドチュービングを用いた水ジェットと加砂による破碎は大慶、長慶、四川、吐哈等の油田で成功し、この基礎の上に発展した水平坑井に対する多段階型の破碎技術が比較成熟している。設備については、多くの油ガス田が国外から大型の破碎設備を輸入した。たとえば、四川井下会社は FC-2251-Q 型の破碎車、HQ2000 型の破碎車、FBRC100ARC 砂混合車、HR10M コイルドチュービング作業等の設備を導入。大慶油田は割れ目を転向させる再破	[刘ほか 2009] まず、破碎試験を単一分岐型の水平坑井で進め、一定の成功経験を蓄積したのちに、同時破碎技術等を試験すべきである [李武広ほか 2011] 現在、超緻密な貯留層に対する多段階の破碎技術に遅れがあり、貯留層を保護できる破碎流体の体系が未開発である [叶ほか 2011] プロパント最適化の研究はまだ初期段階である [唐ほか 2011] 水ジェット噴射技術が立ち遅れているた

	<p>砕技術の応用に成功</p> <p>[叶ほか 2011] 2010年に中国石油天然気集团公司（CNPC）は Wx 井の龍馬溪組と筈竹寺組（注：これらはシェールの種類の名称）に対して、大型の水圧破碎試験を実施し成功。水圧破碎に使われる技術の組み合わせについての初歩を形成した</p> <p>[唐ほか 2011] コールベッドメタンやタイトサンドガスなどの非在来型の天然ガス開発において、多段階破碎、スリックウォーター破碎、再破碎などの技術が広範に使用され、大量の経験を蓄積した。現段階で中国のシェールガスへの水圧破碎は、古い坑井に対する再破碎と新しい坑井に対するスリックウォーター破碎という 2 方面から着手可能である。後者について、2010年5月10日にシノペックの方探1井で破碎に成功し、同9月10日にペトロチャイナは威201井で破碎実施後、測定日における産出量として $1.08 \times 10^4 \text{m}^3$ を記録した</p> <p>[Li 2011] 2011年7月2日に、威201-H1井で11段の水圧破碎を実施し、多くの中国記録を達成した（破碎の段数、流体量、プロパント量、圧入速度、継続時間）</p>	<p>め、海外企業が提供する技術サービスに依存しており、コストが上昇している。水平坑井に対する国内の水ジェット噴射技術は未成熟である。同時破碎技術は海外のシェールガス開発で常に用いられる技術であり、2ヶ所（以上）の坑井に適用して同時に作業を行うものであるが、国内のシェールガス探査用の浅い坑井や初期開発の単一の坑井には適用できない</p>
<p>(4-2) 水圧破碎によって発生する割れ目の観測・分析技術</p>	<p>[付ほか 2011] シェールの破碎の特殊なモデルとシェールの敏感な特性に対して、シェールガス貯留層の破碎実験評価の重要な技術を探索して、特にシェールの脆さの特徴が割れ目に与える影響とシェールの岩石標本の敏感性の評価方法について、いくつかの認識を初歩的に獲得した</p>	<p>[李武広ほか 2011] 異なる地質条件下における水圧破碎による割れ目の分布特性が不明瞭であり、破碎方式の更なる進歩が必要</p> <p>[叶ほか 2011] 破碎メカニズム、効果予測、破碎のシミュレーションの研究はまだ初期段階であり、更なる研究開発</p>

	<p>[報道資料] 2011年7月2日に、威 201-H1 井で 11 段の水圧 破砕を実施した際に、微小地震観測を実施した</p>	<p>が必要である</p> <p>[付ほか 2011] 室内実験による評価と現場試験による分析・検証が大量に必要であり、特に、シェールへの破砕が形成する網目に対する前提条件、延伸メカニズム、制御メカニズムについて、今後、大量の研究が不可欠である</p> <p>[罗・李 2011] 坑井からの震探データ処理には、さまざまな技術が必要で、震探資料を処理する人員のレベルを底上げする必要がある。また、地震識別、総合予測、及び貯留層改造観測の全てが探索段階にある。これまでの技術的な基礎の上に、シェールガスの低孔隙率、低浸透率、微細な割れ目という特性に合った震探精細描写が緊急に必要である。割れ目の観測に有効な 3D VSP と微小地震観測について、坑井中の震探データの収集・処理・解釈技術の向上が喫緊の課題である</p>
--	--	--

出典：表中に掲載の文献に基づき著者作成

4-2. 自主開発動向

これらの立ち遅れた技術を補う方法には、自主開発、及び海外からの技術移転があるが、以下では前者の動向を整理する¹³。

現在、中国は、あらゆる技術分野で国産化・自主開発を目指しており、第11次5カ年計画（2006～2010年）と第12次5カ年計画（2011～2015年）では、その方針が明確に打ち出されている。シェールガスの開発技術も対象分野の1つである（竹原 2011c）。

4.1 で述べた（1）から（6）の遅れている分野の技術開発は、シェールガス開発のために行われているものが一部にはあるが、多くは、在来型の石油・天然ガスやコールベッドメタンなどの他の非在来型資源の開発への使用を目的に実施されている。

4-1 では、シェールガス開発を主題とした文献に基づいて、技術動向を探ったため、個別技術の詳細まではつかめなかった。そこで、以下では、これらの技術を主題とする中国語の技術文献を、シェールガス開発への適用に限定せずに、他の石油・天然ガス資源への適用例も含めて、幅広く収集して、その動向を探った。つまり、当該技術名をタイトルに含む論文を、シェールガスへの言及の有無に関わらず、収集した。その結果、上記（1）～（6）の技術分野について、下記のことになった。

(1) 多分岐型の水平坑井

近年、コールベッドメタンの開発に、この技術が幅広く適用されるようになった。2004年に正式に導入が開始され、2005年と2006年は探査段階で失敗も多かったが、2007年からは導入数が増加し、成功率も上昇し、2008年10月までに64か所の坑井で多分岐型の水平坑井の工事が行われた（姜ほか 2010）。また、当該技術を完全に掌握するため、中国石油集団油田掘削エンジニアリング研究院は、国内技術を用い、自主設計・自主組織によって、鄭平 01-1 井の多分岐の水平坑井の工事を実施した（田ほか 2010）

(2) 水平裸坑向けの増産用スライディングスリーブを用いる坑井仕上げ・分段破碎

水平裸坑向けの分段破碎は、低圧・低浸透の油ガス層の開発に重要な技術となっており、中国国内でも応用が始まった。しかし、重要な設備が海外企業の独占状態にあり、コストがかかるため、独自開発が進行している。中国石油集団（CNPC）の子会社である渤海钻探工程は、この工程の主要工具であるパッカーの技術開発（詹ほか 2011）やボールシートの技術開発（張ほか 2011）を行い、既に蘇里格ガス田に応用されている。同じく CNPC の子会社である川庆钻探工程有限公司も、同様の技術開発を行っている。

¹³ 技術移転については、5.で整理する。

(3)水圧破砕における水ジェット噴射

水ジェット噴射については、表 2 にあるように中国でも広範に適用されているが、外国企業のサービスに依存している点が問題とされていた。同技術をいくつかの中国の油ガス田に適用した事例においては、装置の耐久性などの問題点が指摘されている（呂 2010, 賈 2011）。中国石油大学は耐久性を向上させる技術開発を行い、コイルドチュービング（＝リール（ドラム）に巻かれた小径の連続的なパイプ等の一連の装置）を用いた現場試験を実施して、良好な結果を得たと報告されている（田ほか 2008）

(4)水圧破砕に用いる流体

破砕する対象によって、流体を変える必要があり、今のところシェールガス開発を対象とする流体を扱う文献はなかった。一方、低浸透の油田やコールベッドメタンについては、水圧破砕で用いる地層への傷害が少ないタイプの流体に関する研究報告があった（景&虞 2010、陶ほか 2011）

(5)微小地震観測と 3D VSP

シェールガス開発に対して、すでに掘削済みの観測井（Wx 井、Nx 井等）を使った微小地震観測データの収集・分析が始められているが、まだ初歩的な段階である（罗・李 2011, 付ほか 2011）。なお、従来の油田に対しても、大慶油田と長慶油田において、微小地震観測を用いて、水圧破砕による割れ目の分析・評価が行われている（王長江ほか 2008、王治中ほか 2006、刘ほか 2005）。

3D VSP については、分析手法の研究や実際の油田への適用などが行われている。2007 年に発表された論文では、東方地球物理会社、勝利油田、河南油田等は、3 次元 VSP 資料のデータ収集を行い、初歩的な成果を得たが、処理技術の制約を受けるため、3 次元 VSP 技術の応用価値を体現できていないと評価されていた（陈 2007）。その後も、いくつかの応用例が発表されている（例えば、郭ほか 2010）。

(6)水圧破砕の効果予測・シミュレーション

水圧破砕による亀裂を評価・分析する手法に、離散亀裂ネットワーク（DFN）モデルがあり、この手法に関する文献はいくつか存在し、実際の油田開発への応用例も報告されている（王 2008）。またこの手法を、中国国内のあるシェールガス層に適用して、水圧破砕の事前評価を行った研究もある（杜 2010）

このように、一部はシェールガス開発への適用を目指しているが、大半の技術開発は、他の石油・ガス資源の開発を狙ったものである。このことは、①立ち遅れている技術分野について、他の石油ガス資源のために開発された国内技術が多かれ少なかれ存在していること、そして、②これらの技術をシェールガス開発に転用できる可能性があることを示している¹⁴。

2.で述べたように、シェールガス関連の技術開発は、2011年に開始した第12次5カ年計画において、国家科学技術重要プロジェクトに指定されている。今後、他の資源のために開発されてきた技術をシェールガス開発に適用するための研究開発が加速するだろう。

5. 技術移転のための取り組み

自主開発路線を政策として強く打ち出す一方で、海外からの技術移転も進めようとしている。具体的な方法として、(1)中国の国内開発における海外石油会社との提携、(2)中国企業による北米のシェールガスへの投資、(3)米国の石油サービス会社への投資¹⁵、(4)設備の輸入障壁の除去、(5)米国政府との二国間協力、及び(6)海外文献の積極的な読み込みが行われている。

(1)中国の国内開発における海外石油会社との提携

2-4.で述べたように、ペトロチャイナやシノペックは、海外の石油会社と提携しており、海外企業の技術・ノウハウに接触するチャンネルとなる。ただし、2-3.で述べたように、現時点では、外資企業は鉱区の入札に参加できない。そのため、このチャンネルを通じた技術・ノウハウの大規模な移転は起こりにくいと推測される。

(2)中国企業による北米のシェールガスへの投資

国内の開発を進める一方で、国有石油企業、特に中国海洋石油総公司（CNOOC）は、開発が先行している北米のシェールガスへの投資を進めている。CNOOC は、Chesapeake

¹⁴ 他の種類の資源のために開発されたこれらの技術がどの程度の水準であるのかは、本稿では確認できなかった。今後、技術の専門家へのヒアリングや米国の文献等との比較を通じて検討したい。

¹⁵ 石油天然ガス・金属鉱物資源機構のウェブサイト上の石油・天然ガス用語辞典によると、石油サービス会社は、「石油の探鉱・開発に必要な作業および関係する技術は多岐にわたり、全工程の中の諸段階において多種の各専門会社が作業を請け負い技術を提供する。これらの会社はすべて石油開発会社に対してサービスする会社といえるが、これらのうち、物理探鉱請負会社、掘削請負会社、パイプライン建設請負会社、海洋建設請負会社などは業態としてもまとまっており、例えば **drilling contractor**、**offshore contractor** などと専門別の請負業者と呼ばれるが、それ以外の、付帯的で細分化された分野のサービスを提供する会社は総括して **oil field service company**（日本語では単に「サービス会社」と称される。その分野は例えば掘削泥水材料・調泥剤の供給と調泥、泥水検層、コア分析、各種検層、セメンチング、坑井仕上げ作業、産油テストと各種坑井測定、アシダイジング、フラクチャリング、各種ワイヤーライン作業、坑井改修作業、また坑井暴噴・火災の抑止・消火作業などである」と定義される。

社の Eagle Ford シェール（テキサス州）と Niobrara シェール（コロラド州、ワイオミング州）に出資し、それぞれ 33.3%の所有権を得た（出資額は 10.8 億ドル、及び 5.7 億ドル）（竹原 2011a）。一方、ペトロチャイナは、カナダの Encana 社が所有する Cutbank Ridge シェール（ブリティッシュ・コロンビア州、アルバータ州）に出資する合弁を模索したが、2011 年 7 月までに、本件は解消された（Troner 2011）。ごく最近では、シノペックが、2012 年 1 月 4 日に、米国 Devon Energy 社が所有する 5 か所のシェール鉱区について、33.3%の権益を得たと発表した。

海外シェールガスへの積極的な投資の目的は、技術を理解し、オペレーションの経験を積むことであると言われている（竹原 2011a、Troner 2011）。

(3)米国のサービス会社への投資

2011 年 12 月に、シノペックと CNOOC が、水圧破砕を手掛ける米国 Frac Tech 社の株式を 30%取得するために協議中であると報じられた。また、シノペックと Frac Tech が中国で合弁企業を設立することも同時に協議されているという。Frac Tech 社は水圧破砕を行う有力企業の 1 つである。その株式を得て、さらに中国で合弁を設立できれば、同社技術の中国への移転が加速するだろう。

(4)設備の輸入障壁の除去

2-5.で述べたように、2011 年に中国政府はシェールガスの開発に必要な機材を「輸入奨励技術・製品目録」に加えた。これにより、輸入を行いやすくなると予想される。

(5)米国政府との二国間協力

2009 年に米国でオバマ政権が発足すると、ポスト京都議定書やクリーンエネルギー協力が大きな関心事となり、ブッシュ政権時代から始まっていた取り組みを強化しながら、さまざまな分野で、中国との二国間協力イニシアティブが立ち上げられた。シェールガスはその 1 つである。2009 年 11 月の胡錦濤国家主席の訪米の際に、米中シェールガス資源イニシアティブが立ち上げられ、資源評価、技術協力、及び投資促進の面での協力が謳われた。

(6)海外文献の積極的な読み込み

石油・天然ガスの開発技術については、米国 The Society of Petroleum Engineers (SPE) などの有力学会とその専門誌があり、シェールガスの開発技術についても多数の文献が存在する。技術の全てが文献として形式知化されている訳ではないが、中国にとっては、重

要な情報源である。ペトロチャイナは、こうした海外文献をサーベイ・翻訳した文献を掲載する雑誌『国外石油工程』を発行していた¹⁶。海外文献から、知見を系統的に取り入れようとする熱心な姿勢をうかがえる。

6. 考察－中国は開発技術を獲得できるか？

4.と5.では、中国におけるシェールガスの開発技術の現状、自主開発の動向、そして技術移転の取り組みを見てきた。以下では、これらに基づいて、中国は開発技術を獲得できるかどうかを考察する。

6-1. ナショナル・イノベーションシステムと技術移転の観点からの情報整理

技術獲得の可能性を考察する準備として、Watson et al.(2011)が提示したナショナル・イノベーションシステムと技術移転の視点に基づいて、これまでの情報を整理する。この視点は、技術力を「新たな生産能力」と「技術能力の蓄積」の2つの側面から捉えて、それぞれを強化する手段として、「国内における技術能力の構築支援」、及び「技術移転」に注目するものである。移転される技術は、「資本財・サービス・設計」、「オペレーション&メンテナンスのスキルとノウハウ」、「技術の背後にある知見と専門性」の3つに細分化される。前2者は新たな生産能力の構築に、後1者は技術能力の蓄積に寄与する。海外からの技術移転と国内での支援を取り込んで、企業や研究機関等は国内の技術力を高めていくが、そのシステムを総体として、ナショナル・イノベーションシステムと呼ぶ(図8)。この枠組みを使うと現状をどのように捉えられるだろうか。

¹⁶ ただし、2009年以降は、翻訳を掲載していない。また2011年に『石油石化節能』誌と合併された。

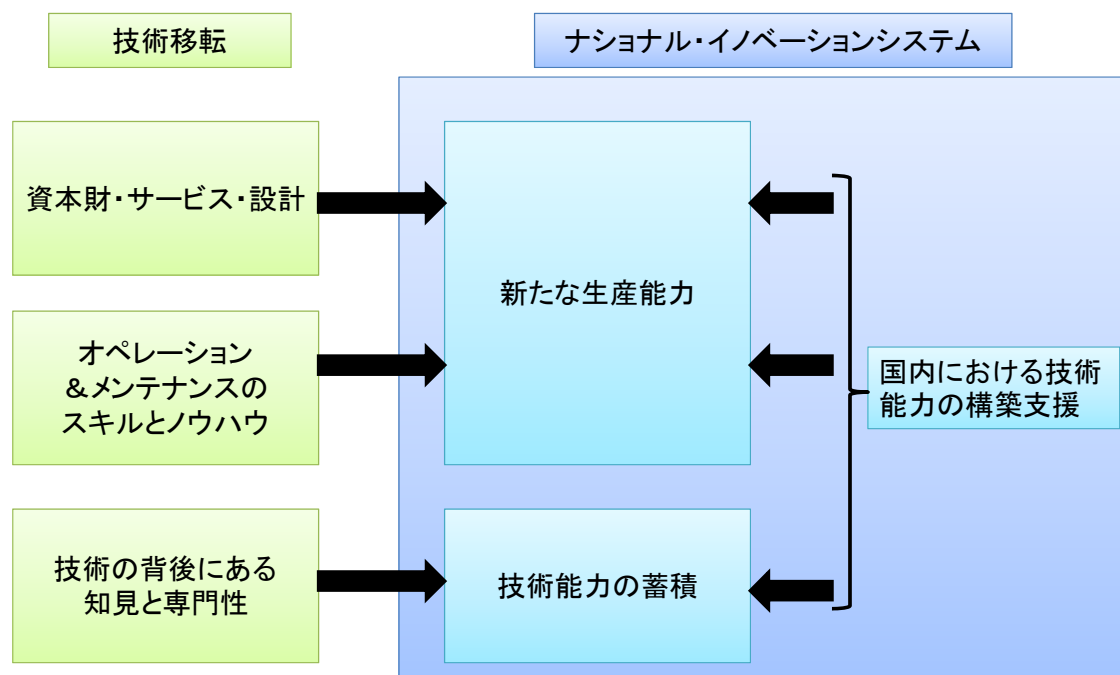


図8 技術移転と国内支援による技術獲得の視点

出典：Watson et al. (2011)

(1)新たな生産能力

まず、「新たな生産能力」から見ていこう。国内の支援については、第12次5カ年計画のもとで技術開発を集中的に行う方針が示されており、これから数年間で、他の石油・ガス資源における経験を転用しつつ、政府の支援のもとで集中的な自主開発が行われると見込まれる。また、政府の支援のもとで、四川盆地を中心に現地での試験・開発が促進されることから、その経験を通じて、国有石油会社やその子会社であるサービス会社のオペレーション&メンテナンスのノウハウも向上する。

資本財・サービス・設計の移転は、機材の輸入促進策や海外の石油会社との提携によって、海外から中国への機材とサービスのフローを生じさせようとしている。ただし、鉞区入札への外資参加を制限しているために、外資を通じたフローは限定的である。

オペレーション&メンテナンスのスキルとノウハウの移転については、国有石油企業が、米国のサービス会社との合弁や北米のシェールガスへの投資を通じて、中国への移転を図ろうとしている。北米のシェールガスへの投資については、中国企業が自社のエンジニアを現地に派遣できれば技術移転が加速するだろう。中国国内の開発における外資の石油会社との提携も移転のチャンネルとなりうるが、上記と同じ理由で、部分的なものに留まる。

(2)技術能力の蓄積

次に、「技術能力の蓄積」を見よう。国内の支援については、長年にわたる研究開発機関への公的支援がある。4.と5.ではあまり触れなかったが、中国には、国有石油企業とその子会社に加えて、中国石油大学や中国地質大学などの資源開発に強い高等教育機関があり、企業と教育機関が総体となって、中国の石油・天然ガス開発を支えている（陈ほか 2010）。4.で取り上げた中国語の技術文献も、国有企業の関係者や高等教育機関の専門家によって執筆されていた。政府は、これらの機関に対して、長年にわたって支援を行っており、技術国産化を可能とする専門性が蓄積してきている。今後もこの傾向は変わらない。

一方、技術の背後にある知見と専門性の移転については、海外文献の積極的な紹介を通じて、文献として形式知化された知見を取り込もうとしている。ただし、この方法では、暗黙知や営業秘密として秘匿されている知見にはアクセスできない。海外企業への投資や外資企業との提携を通じて、これらを獲得できるかが課題となる（図9）。

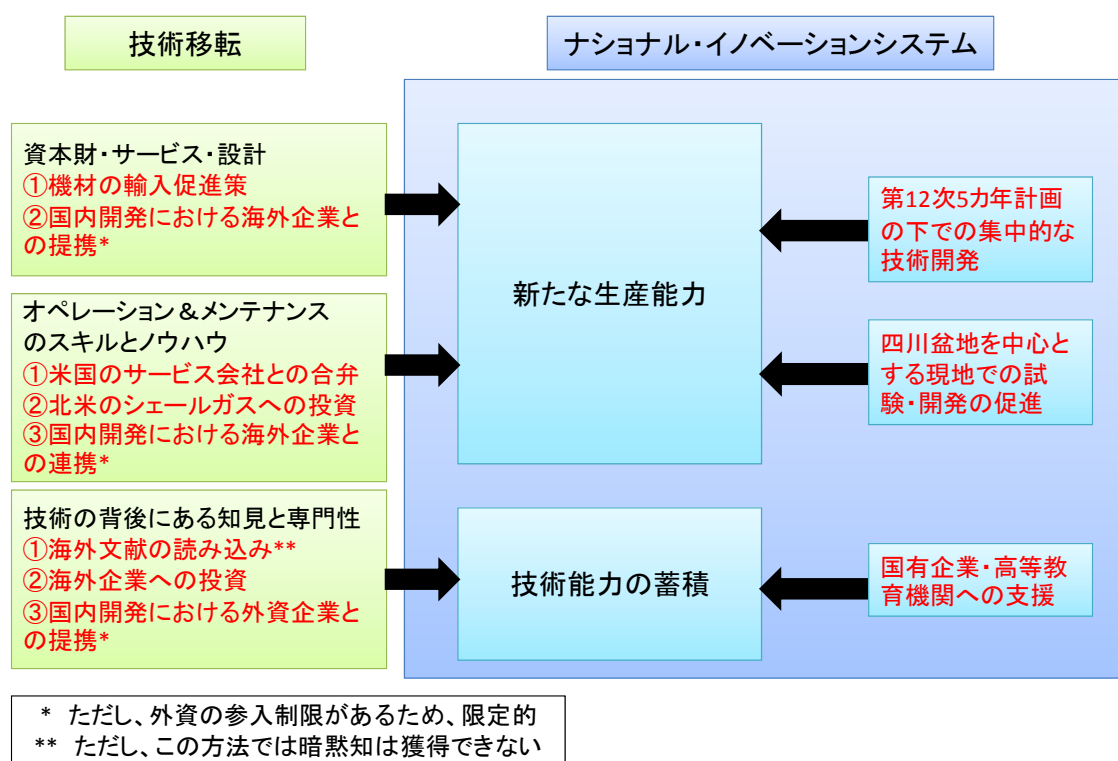


図9 シェールガス開発技術の国内支援と技術移転に関する情報整理

出典：著者作成

6-2. 技術獲得の可能性

このような現状の延長上で、今後、中国は、「新たな生産能力」と「技術能力の蓄積」を構築することができるだろうか。

(1)新たな生産能力

製造業の発展が著しい中国は、さまざまな産業分野で他国では考えられないスピードで生産能力を構築してきた。たとえば、著者が調査した事例では、高効率な石炭火力発電である超々臨界方式 (Ultra-Supercritical; USC) について、中国は、第 10 次 5 年計画のもとで 2001 年から R&D に着手し、海外メーカーからの技術移転を受けて、2006 年に初号機の運転を開始し、現在では世界最大の導入国になった。この過程で、国産化もほぼ完全に達成している。風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー分野や産業部門の省エネルギー設備についても同様であった (上野・杉山 2009、Tan and Seligsohn 2010)。

シェールガスの開発に必要な生産設備についても、水平掘削と水圧破碎はシェールガス以外の資源開発において既に中国で実施されており、関連の製造業も存在している。これらの技術のシェールガス開発への適用に対して、政府の集中的な R&D 支援が見込まれることから、上記 USC と同様に国産化が進むだろう。どうしても国産化できない設備やその基幹部品は輸入することもでき、中国政府は輸入奨励策を採り始めている¹⁷。設備を組み合わせるサービス提供するサービス会社も、国有石油会社の子会社として存在しており (CNPC の子会社である川慶鑽探工程有限公司など)、さらに米国のサービス会社への投資と合併設立も検討されていることから、生産能力を構築するのは困難ではないと予想する。

(2)技術能力の蓄積

では、「技術能力の蓄積」についてはどうであろうか。3-2.で述べたように、シェールガス開発には、設備面の技術だけではなく、経験蓄積に基づく高度な専門能力が極めて重要である。これが不十分であると、たとえ生産能力を構築できても、水平掘削や水圧破碎を最適化できず、生産量が制約されるリスクがある¹⁸。シェールは地点ごとに属性が大きく異なるため、生産方法を地点ごとにファインチューニングする必要があるが、2-1.で述べたように中国のシェールは米国とは特性が異なることから、米国で採用された方法がそのままでは使えず、独自の最適化が必要かもしれない。

米国では、こうした専門能力を構築するのに、約 30 年という長い時間を要した。その理由としては、時間をかけて蓄積される経験が重要であったこと、要素技術の開発に時間を要したこと、当初は投資が限定的であったことなどが考えられるが、中国では、どの程度

¹⁷ USC でも一部の基幹部品・材料は輸入に頼っている。

¹⁸ USC についても、設備の国産化と大規模導入は進んだが、運転・管理のなかで出てくるトラブルへの対応については、実際の経験に基づく特殊鋼への理解が必要であり、まだ十分な対処能力を有していないと見られている。

の時間を要するだろうか。専門能力の構築を加速する要因と減速させる要因を整理して考えてみよう。

まず、加速させる要因については、米国で蓄積された知見に立脚できるという「後発者の利益」が存在する。この恩恵は大きい。すでに海外文献の系統的な取り込みを通じて、米国の知見を積極的に取り入れている。高度な技術を有する **Frac Tech** 社への投資も米国の専門性に立脚する足がかりとなる。後発者の利益に加えて中国政府による集中的な支援も加速要因である。今後、政府支援のもとで、現地の試験・開発が進むことから、現場を通じた経験学習が加速すると見込まれる。また、技術開発に対しても政府支援が行われる¹⁹。こうした知見を専門分野として集約し、教育・研究を通じて拡散する高等教育機関（中国石油大学、中国地質大学等）が存在していることもプラスに働く。

一方、減速させる要因であるが、一般的にあって、専門能力は一朝一夕には構築されないという障壁がある。こうした一般的な側面に加えて、シェールガスについては、国内資源開発における外資の参入を制限していることから、外資企業からの専門的知見のフローに制約がかかる状況にある²⁰。また、シェールの物性や地質特性に違いがあるために、米国の知見に単純には立脚できず、中国への適応に時間がかかる可能性もある。

また、米国では、**Mitchell Energy** など多数の中小の事業者が当初はリスクであったシェールガスの開発を主導してきたが、中国では、中小の事業者の層が薄い。このことは、リスクな分野に入っていき主体が不足するという点でマイナスに働くかもしれないが、大手の国有石油会社が開発を主導することで、資源が集中的に投下されて、むしろ開発が加速する可能性もある。

(3) まとめ

以上のように、生産能力を築くだけであれば、短期間で実施可能と予想されるが、十分な生産量を確保するために不可欠な技術能力を短期間で構築できるかどうかについては、能力構築の加速要因と減速要因の両者が存在しており、予想し難い。数年で獲得するかもしれないし、10年以上の時間を要する可能性もある。加速要因を伸ばしつつ（例：政府支援の拡大）、減速要因を抑えることで（例：外資への開放）、時間を短縮できよう。

この1年程度の動向を見ると、第12次5カ年計画における明確な推進、威201-H1井における長距離の水平掘削と多段の水圧破碎の成功、**Frac Tech**社への投資計画など、プラス

¹⁹ 米国においても、長年にわたる政府の技術開発支援が重要であったと指摘されている（Shellenberger and Nordhaus 2011, The Breakthrough Institute 2011）。

²⁰ 同じ非在来型の資源でも、開発が先行するコールベッドメタンについては、中国は海外の資金を積極的に取り入れてきたこととは対照的である。

の動きが多く、技術の獲得に向けた期待が膨らんでいる。一方、米国のシェールとの特性の違いが技術的に重大なネックとなる可能性も否定しきれない。

7. 結語

中国におけるシェールガス開発への期待が高まっていることを踏まえ、本稿では、重要なファクターである開発技術について、中国における現状を調査した結果、中国においても、既に、在来型の石油・天然ガス、および炭層メタンの開発で水平抗井坑井や水圧破碎などの技術が用いられているが、シェールガス開発への適用にあたっては、個別技術の水準が不十分であることに加えて、技術を組み合わせる最適化する能力も不足していることが分かった。この状況を踏まえて、中国は自主開発と技術移転を加速させており、この1年程度の動向を見ると、第12次5カ年計画における明確な推進、四川省における長距離の水平掘削と多段の水圧破碎の成功、水圧破碎技術を有する **Frac Tech** 社への投資計画などプラスの動きが多く、技術の獲得に向けた期待が膨らんでいる。ただし、経験蓄積に基づく高度なファインチューニングという技術の特徴上、経験を積む時間が必要となり、短期間で技術を獲得できるかは不透明である。米国のシェールとの特性の違いが技術的に重大なネックとなる可能性も否定しきれない。

このように、中国が技術を早期に獲得できるかどうかは、現地では予測が困難であるが、その見通しをアップデートしていくには、何に注目すればよいだろうか。

ひとつには、中国語文献を使った自主開発動向のウォッチである。本稿では、技術調査の材料として、多数の中国語文献を用いたが、R&Dの成果が技術文献として素早く紹介されていることが分かった。今後、第12次5カ年計画のもとでR&Dが加速するため、技術文献の件数は急増する²¹。これらの文献を、米国SPEの文献等と比較することで、中国の技術レベルを評価することが可能だろう。また、米国とのシェールの特性の違いが技術的なボトルネックとなるかどうかも明らかになってくるだろう。

もうひとつは、外資からの技術吸収の取り組みである。著者が調べた石炭火力USCの事例では、自主開発にも一定の役割があったが、技術移転が非常に重要だった。外資の石油会社や海外のサービス会社からの技術移転を促進するような取り組み（たとえば鉦区入札の外資への開放、サービス会社への投資など）が採られるかどうかを見ることで、技術移転への本気度を評価できよう。

開発を加速させたいのであれば、自主開発と技術移転のバランスを、後者に大きく寄せ

²¹ 開発が先行するコールベッドメタンについては、シェールガスと比べて、技術的な文献数が非常に多い（陳ほか 2010）。今後、開発が進めば、シェールガスに関する文献の件数も同様に増えるだろう。

て、自主開発路線を縮小し、海外のサービス会社に全面的に頼るのも1つの方法である。竹原(2011b)は、国産化志向によって開発速度が緩慢になるおそれがあると指摘している。海外のサービス会社に依存すれば、技術開発に必要な時間を節約できるため、資源開発は加速するだろう。この方法では、中国企業の技術能力の構築には寄与しないかもしれないが、竹原(2011b)は、中国系の技術者が大手サービス企業に浸透し始めている点を指摘しており、外資企業に依存しても、中国人の技術能力の向上には資する可能性がある。

また、米国では、水圧破砕の際に使われる化学物質が地下水に与える環境影響への懸念が高まっている。中国では、まだこの問題が大きな関心事とはなっていないが、水資源の不足は深刻であるため、開発が本格化する際には問題とされるかもしれない。米国では、環境影響を軽減するための技術開発が行われているが(伊原 2011a)、中国でも同様の技術開発が必要になるかもしれない。本稿では、これらの環境技術を取り上げなかったが、見直しをアップデートする際には、これらの技術開発動向も見ることがある。

最後に、政策へのインプリケーションに触れておく。冒頭で述べたように、中国でシェールガスが大量に生産されるようになると世界の天然ガス需給を大幅に緩和する効果をもつが、その効果は天然ガスだけではなく、石油にも影響が及びうる。3.でみたように、シェールガス生産における技術進歩の多くは、石油・天然ガス開発に共通する先進技術を、地点ごとに最適な組み合わせで用いることで実現されてきたが、このことは、シェールガスに生産コストの低下をもたらした要因が、在来・非在来型を含めた石油・天然ガス資源開発にも広く共通して存在することを意味する。実際に米国では、同様の技術がシェールオイルにも適用され始めており(伊原 2011b)、中国でも同じことが起こる可能性はある²²。仮にこのような状況になった場合には、石油・天然ガスの供給量は大幅に増加し、将来の資源価格は、現在想定されているほどには高騰しないかもしれず、その際には、高い資源価格を前提としたエネルギー政策や温暖化対策を見直す必要が出てくるだろう。

参考文献

伊原賢(2011a)『シェールガス争奪戦—非在来型天然ガスがエネルギー市場を変える』日刊工業新聞社。

伊原賢(2011b)「非在来型の原油や天然ガスの生産にかかる技術トピック」石油天然ガス・金属鉱物資源機構。

上野貴弘、杉山大志(2009)「温暖化防止技術の国際技術移転—中国への技術移転の事例分析を通じて」電力中央研究所研究報告、Y08023。

²² ただし、浸透率が低い原油への適用は技術的なハードルが高い。

竹原美佳 (2010) 「中国におけるシェールガスの可能性」石油天然ガス・金属鉱物資源機構。

竹原美佳 (2011a) 「シェールガスの期待高まる中国—商業化に向けた官民の動き」石油天然ガス・金属鉱物資源機構。

竹原美佳 (2011b) 「期待と課題を抱える中国のシェールガス」石油天然ガス・金属鉱物資源機構。

竹原美佳 (2011c) 「中国第 12 次五カ年計画 (2011～2015 年) における石油・天然ガス関連政策」石油天然ガス・金属鉱物資源機構。

山崎豊彦編 (1997) 『オイルフィールド・エンジニアリング入門—石油・天然ガスを開発する』海文堂。

Arthur, J.D., B. Bohm, B. J. Coughlin, and M. Layne (2009), “Evaluating Implications of Hydraulic Fracturing in Shale Gas Reservoirs,” SPE121038.

Chesapeake Energy (2010), “Fact Sheet: Hydraulic Fracturing,” <http://www.chk.com/media/educational-library/fact-sheets/corporate/hydraulic_fracturing_fact_sheet.pdf>

Halliburton (2009), “First Delta Stim Completion System Deployed in the Eagle Ford Shale; Saves Customer \$1 Million,” <http://www.halliburton.com/public/cps/contents/Case_Histories/web/H07303_Eagle%20Ford.pdf>

Howarth, R.W., R. Santoro, and A. Ingraffea (2011), “Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations,” *Climatic Change*, 106, pp. 679-690.

Jiang, M., W. M. Griffin, C. Hendrickson, P. Jaramillo, J. VanBriesen, and A. Venkatesh (2011), “Life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas,” *Environmental Research Letters*, 6, pp.1-9.

King, G.E. (2010), “Thirty Years of Gas Shale Fracturing: What Have We Learned?,” SPE133456.

Li, L. (2011), “Status and Practices of Shale Gas Exploration and Development in Sichuan Basin,” Presentation at the The Eleventh U.S.-China Oil & Gas Industry Forum.

Rogner, H.H. (1997), “An Assessment of World Hydrocarbon Resources,” *Review of Energy And Environment*, 22, pp.217-262.

Wylie, G., R. Hyden, V. Parkey, B. Grieser, and R. Middaugh (2007), “Custom Technology Makes Shale Resources Profitable,” *Oil & Gas Journal*, 24: 41–49.

- Schellenberger, M. and T. Nordhaus (2011), "A Boom in Shale Gas? Credit the Feds," Washington Post.
- Tan, X. and D. Seligsohn (2010), *Scaling Up Low-Carbon Technology Deployment: Lessons from China*, Washington, DC: World Resources Institute.
- The Breakthrough Institute (2011), "History of the Shale Gas Revolution," <http://thebreakthrough.org/blog/2011/12/history_of_the_shale_gas_revolution.shtml>
- Troner, A. (2011), "China's Oil Sector: Trends and Uncertainties," in *The Rise of China and Its Energy Implications*, The James A. Baker III Institute for Public Policy of Rice University.
- USEIA(2011), *World shale gas resources: An initial assessment of 14 regions outside the United States*, Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Warpinski, N. (2009), "Microseismic Monitoring – Inside and Out," SPE 118537.
- Watson, J., B. Byrne, M. Stua, D. Ockwell, Z. Xiliang, Z. Da, Z. Tianhou, Z. Xiaofeng and O. Xumin (2011), *UK-China Collaborative Study on Low Carbon Technology Transfer Final Report*.
- 王长江, 姜汉桥, 张洪辉, 王晓红(2008)「水平井压裂裂缝监测的井下微地震技术」『特种油气藏』 15(3), pp.90-92.
- 王治中, 邓金根, 赵振峰, 慕立俊, 刘建安, 田红(2006)「井下微地震裂缝监测设计及压裂效果评价」『大庆石油地质与开发』 25(6), pp.76-78.
- 王建华 (2008)「DFN 模型裂缝建模新技术」『断块油气田』 15(6), pp.55-58.
- 田中兰, 乔磊, 苏义脑 (2010)「郑平 0 1-1 煤层气多分支水平井优化设计与实践」『石油钻采工艺』 32(2), pp.26-29.
- 田守增, 李根生, 黄中伟, 牛继磊, 夏强 (2008)「连续油管水力喷射压裂技术」『天然气工业』 28(8), pp. 61-63.
- 田守增, 李根生, 黄中伟, 沈忠厚 (2008)「水力喷射压裂机理与技术研究进展」『石油钻采工艺』 30(1), pp. 58-62.
- 付永强, 马发明, 曾立新, 余朝毅, 陈艳(2011)「页岩气藏储层压裂实验评价关键技术」『天然气工业』 31(4), pp. 51-54.
- 叶登胜, 尹丛彬, 蒋海, 方泽本, 李建忠(2011)「四川盆地南部页岩气藏大型水力压裂作业先导性试验」『天然气工业』 31(4), pp. 48-50.
- 刘永亮, 王振铎, 胥云, 张光伟, 陈作 (2008)「水平井储层改造新方法-水力喷射压裂技术」『钻

- 采工艺』31(1), pp.71-73.
- 刘红磊,熊炜,高应运,房启龙(2011)「方深1井页岩气藏特大型压裂技术」『石油钻探技术』39(4), pp.46-52.
- 刘红磊,熊炜,高应运,房启龙(2011)「方深B井页岩气藏特大型压裂技」39(3), pp.46-52.
- 刘志强,胡汉月,史兵言,刘海翔(2011)「煤层气多分支水平井技术探讨」『探矿工程(岩土钻掘工程)』38(6), pp.6-9.
- 刘建安,马红星,慕立俊,邱筱琳(2005)「井下微地震裂缝测试技术在长庆油田的应用」『油气井测试』14(2), pp.54-56.
- 刘洪林,王莉,王红岩,魏伟,孙爱(2009)「中国页岩气勘探开发适用技术探讨」『油气井测试』18(4), pp.68-71.
- 刘猛,董本京,张友义(2011)「水平井分段完井技术及完井管柱方案」『石油矿场机械』40(1), pp.28-32.
- 许建国,王峰,刘长宇,张应安,叶勤友,林海霞(2008)「水平井滑套分压工艺技术及应用」『钻采工艺』31(z1), pp.54-56.
- 齐宝权,杨小兵,张树东,曹蓁(2011)「应用测井资料评价四川盆地南部页岩气储层」『天然气工业』31(4), pp.44-47.
- 吕清河(2010)「水力喷射压裂技术在特殊井中的应用」『油气田地面工程』29(12), pp.100-101.
- 邢景宝(2011)「大牛地气田水平井分段压裂技术研究与应用」『钻采工艺』34(2), pp.25-28.
- 乔磊,申瑞臣,黄洪春,王开龙,鲜保安,鲍清英(2007)「煤层气多分支水平井钻井工艺研究」『石油学报』28(3), pp.112-115.
- 吴汉川(2008)「我国压裂设备现状及国产装备研发目标」『石油机械』36(9), pp.154-158.
- 吴健(2010)「四川盆地水平裸眼井段下入封隔器工艺探讨」『钻采工艺』33(5), pp.120-122.
- 吴斌,唐洪,张婷,张峰铭(2010)「两种新颖的离散裂缝建模方法探讨—DFN模型和DFM模型」『四川地质学报』30(4), pp.484-487.
- 李志荣,邓小江,杨晓,巫芙蓉,刘定锦,张红,谭荣彪,周跃宗(2011)「四川盆地南部页岩气地震勘探新进展」『天然气工业』31(4), pp.40-43.
- 李武广,杨胜来,殷丹丹,姜毅,郭瑾,孟虎(2011)「页岩气开发技术与策略综述」『天然气与石油』29(1), pp.34-37.
- 李艳春,刘雄明,徐俊芳(2009)「改进Barnett页岩增产效果的综合裂缝监测技术」『国外油田工程』25(1), pp.20-23.
- 陈林(2007)「三维VSP技术的应用与展望」『勘探地球物理进展』30(3), pp.162-167.
- 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,刘洪林,魏伟,罗跃,李伍,方俊华(2010)「中国页岩气研究现状与发展趋势」『石油学报』31(4), pp.689-694.

- 杜金虎, 杨华, 徐春春, 梁世军, 皮学军, 王红岩(2011)「关于中国页岩气勘探开发工作的思考」
『天然气工业』 31(5),pp.6-8.
- 杜林麟, 春兰, 王玉艳, 刘丽雯, 向斌(2010)「页岩储层水力压裂优化设计」『石油钻采工艺』
pp.130-132.
- 张绍雄, 张媛 (2010)「煤层气开发的多分支水平井钻井技术」『石油工业技术监督』 26(12), pp.
56-58.
- 张鹏, 程智远, 刘志斌, 韩永亮, 詹鸿运, 郑永哲(2011)「水平井裸眼分段压裂坐封球座的研制
与应用」『石油钻采工艺』 33(2), pp. 131-136/
- 罗蓉, 李青(2011)「页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨」『天然气工业』 31(4), pp.34-39.
- 姜文利, 叶建平, 乔德武 (2010)「煤层气多分支水平井的最新进展及发展趋势」『中国矿业』
19(1), pp. 101-103.
- 贾长贵, 李奎为, 刘敏慧 (2011)「水力喷射压裂技术」『油气田地面工程』 30(1), p. 89.
- 郭向宇, 凌云. 高军, 郭建民, 孙祥娥 (2010)「井地联合地震勘探技术研究」『石油物探』
49(5), pp.438-450.
- 陶涛, 林鑫, 方绪祥, 曹成, 张天林(2011)「煤层气井压裂伤害机理及低伤害压裂液研究」『重
庆科技学院学报(自然科学版)』 13(2), pp.21-23.
- 唐颖, 唐玄, 王广源, 张琴(2011)「页岩气开发水力压裂技术综述」『地质通报』 30, pp.393-399.
- 曹欣, 韩文哲, 高银锁, 兰建平 (2007)「水平井水力喷射压裂工艺技术」『科技创新导报』
pp.23-26.
- 景步宏, 虞建业 (2010)「耐高温低摩阻低伤害压裂液的研究」『钻采工艺』 33(3), pp. 101-105.
- 詹鸿运, 刘志斌, 程智远, 田文江, 张鹏, 韩永亮 (2011)「水平井分段压裂裸眼封隔器的研究与
应用」『石油钻采工艺』 33(1), pp. 123-125.
- 潘建华 (2010)「水力喷射压裂技术在筛管完井水平井上的应用」『石油地质与工程』 24(3), pp.
104-108.
- 魏新芳, 徐鑫, 余金陵, 冯德杰, 邹晓敏 (2010)「水平井分段完井工具的室内试验及现场应用」
『石油钻探技术』 38(2), pp. 55-57.