

注目される シェールガスと鉄鋼製品

世界の天然ガス需要は2035年に2008年比62%増とある調査機関が予測している。シェールガスに代表される非在来型天然ガスの商業開発が進み、可採埋蔵量が急増したためだ。技術革新によって、これまで回収困難で生産能力に限界があったシェールガス開発を可能にした種々の技術を紹介する。

米国テキサス州のシェールガス開発風景

©Landov/アフロ

地下深く固い岩の微細な割れ目に眠るガス

米国のシェールガス生産量は拡大の一途をたどっている。2008年にはシェールガスを含む非在来型天然ガスの産出量が全天然ガス産出量の50%を超えた。シェールガス開発が原動力となり、米国は天然ガス生産量でロシアを抜き世界一となった。

米国から始まったシェールガス革命は、カナダやヨーロッパ、中国にも波及し、各国でシェールガスの地質評価が行われている。日本では、電力供給の約2割を占めていた原子力発電所の稼働可否が検討されるなか、シェールガスはエネルギー事情を大きく変える救世主となることが期待されている。

在来型の天然ガスは地下に穴を開けると自然に地上に噴き出してくるのに対し、非在来型天然ガスの代表格であるシェールガスは地下100～2,600mに眠る頁岩^{けつがん}という固い岩の微細な割れ目に閉じ込められており、地下に穴を開けても自然に噴出してこない。

微細な割れ目は 10^{-9} mというナノスケールである。隙間の断面積に換算すると 10^{-18} m²で、メタン分子10個分くらいの大きさに相当する。これほど狭い岩の隙間に閉じ込められ動けない状態にあるシェールガスを取り出すためには、道を大きく広げることが必要となる。

隙間を1万倍 (10^{-14} m²) に広げると、ガスが自然と流れる状



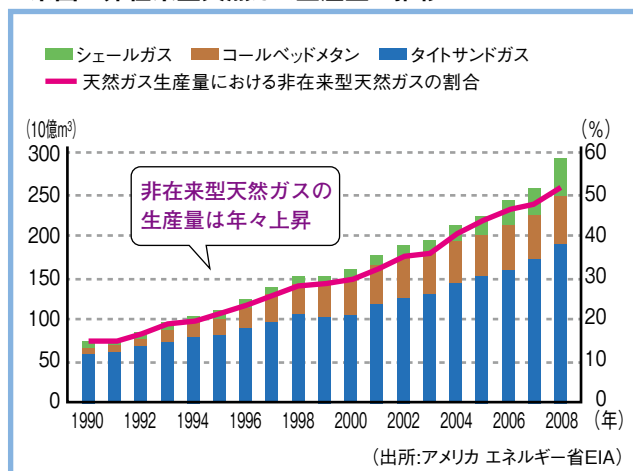
頁岩(シェール)は、書道で用いるすずりのような黒っぽい岩で、石油のもとになる。1億数千万年前のシダや藻などの植物の死骸が地下に堆積し、それに圧力が加かって温度が高くなると、有機物からガスが発生するが、そのガスが残留・吸着した状態にある。

態になり取り出せることが最近わかってきた。さらにナノレベルの狭い隙間では、ガスの圧力が低くなくても、分子1個1個が隙間の壁を跳ね返りながら進む「クヌーセン拡散」と呼ばれる自然現象が起きることもわかってきた。1990年頃までは全埋蔵量のうち数%しかガスを回収できないと考えられていたが、クヌーセン拡散の解明と開発技術の進歩によって、ガスの回収率は25%以上となり、2000年代に入り米国でシェールガスの商業生産が本格化した。

シェールガス開発を支える3大要素技術

シェールガス開発は技術主導型と言われている。開発を可能にした主要技術に水平坑井^{こうせい}、水圧破碎、マイクロサイスミックがある。次にこの3大要素技術の概要を紹介しよう。

■米国の非在来型天然ガス生産量の推移



■接触面積を増やす「水平坑井」

シェールガスの井戸は地下へ向かって真っ直ぐ掘り、シェール層に到達したら、地層に沿って徐々に横方向に掘り進めていく。鉛直に掘られた穴に鋼管を挿入するのだが、鋼管の下端に斜めを向いた治具を取り付けているため、治具に沿って横方向へ穴を掘り進めることができる仕組みになっている。

「水平坑井」は、1980年代後半から世界中の油田で生産量を伸ばすために使われてきた技術である。穴を横に曲げることで普通の井戸の掘削よりコストが2倍くらいかかるが、接触面積を増やすことで採掘量を3～5倍に増やすことができる。

米国でのシェールガスの開発は当初、メジャーではなく中堅企業中心の事業としてスタートし、1つの井戸当たりの生産量レベルは在来型に比べオーダーが1桁低い。そこで生産量を確保するため、1つの坑口位置から複数の水平部分を持つ井戸や、水平部分の長さが2kmを超える井戸も出現した。

■段階的に割れ目を作る「水圧破碎」

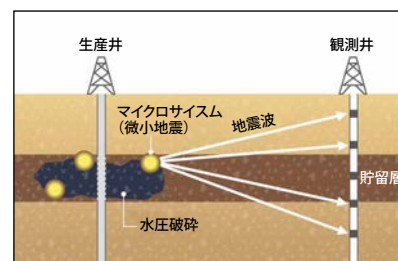
水平坑井によって地下深くのシェール層に到達できても、微細な隙間に閉じ込められているガスを取りだせなければ意味がない。

シェール層の微細な隙間に閉じ込められているガスを取り出すため、ガスが自然に流れやすくなるように道を大きく広げる技術が「水圧破碎」だ。水圧破碎とは500～1,000気圧という高圧力の水・酸・合成化合物から成る流体をシェールに当てて、断面積が10⁻¹⁴m²程度以上の割れ目をつくり、流体に混ぜた砂の粒子を圧入、保持して、圧力を除いた後も割れ目が閉じないようにする技術である。

シェールガスの割れ目の間隔は50～100mと言われている。それより狭い間隔で割れ目をつくると、割れ目と割れ目がつながって穴はそれ以上先に伸びないことが、岩石力学の見地から最近明らかになっている。従来は間隔を空けずに一気に割れ目をつくっていたが、現在では、ある程度間隔を空けて段階的に割れ目をつくる多段階水圧破碎の技術を開発することでガス回収率が高まっている。

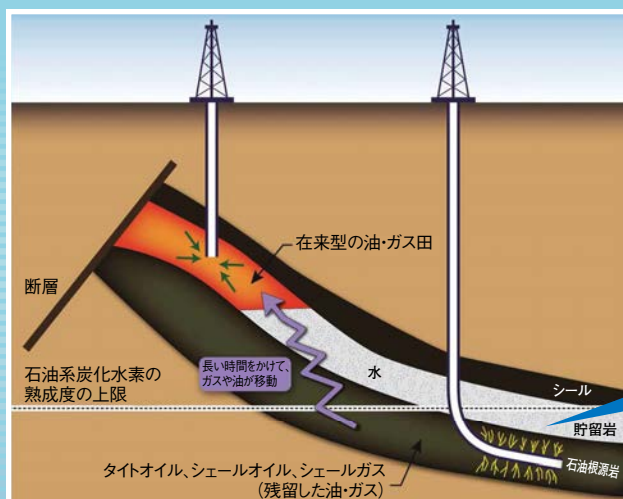
■割れ目のマッピングを可能にした「マイクロサイズミック」

さらに「マイクロサイズミック」というモニタリング技術が開発されると、シェールガスの採掘量が計算できるようになった。従来は、地上にいて圧力や流量などから地下の状態を類推していたものの、どのく



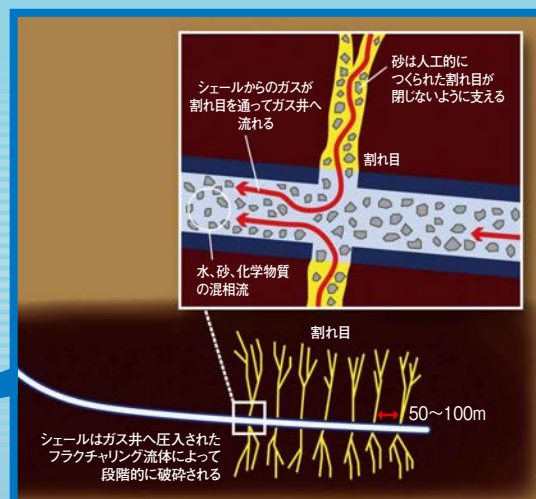
マイクロサイズミック技術のイメージ(出所:ICEP)

■非在来型の油とガスの起源と生産技術



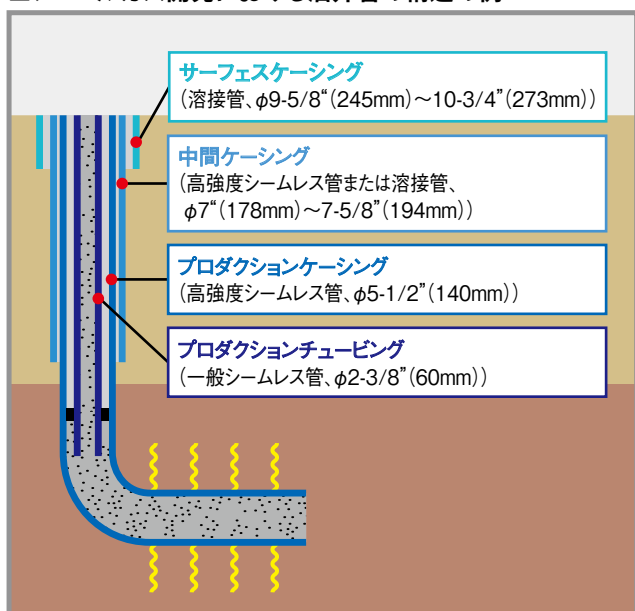
(出所:OGJ2012.5.7)

■水圧破碎におけるガスとフラクチャリング流体の動き



(出所:米国環境保護局EPA資料をもとに作成)

■シェールガス開発における油井管の構造の例



らの範囲に割れ目が広がっているのかを精度よく把握することができなかった。マイクロサイズミックとは、生産井の中で水圧破碎によって割れ目が形成されるときに発生する微小な地震波を観測し、観測井までの到達時間の差を解析して割れ目の広がり进行评估する技術であり、ガス回収の効率向上に必要な割れ目のマッピングを可能にした。作業には厳密さを要するが、2000年以降すでに6,000件を超す適用事例がある。

過酷な環境で使用される油井管

シェールガス開発では、さまざまな鉄鋼製品が使用される。井戸を掘削するドリルパイプ、地下のシェール層からシェールガスを採掘する油井管、ガスを輸送するラインパイプなど、多くの鉄鋼製品を経て、長い道のりの末に需要地にたどりつく。今回は、なかでも代表的な製品である油井管にスポットをあてる。

油井管は、地下のシェール層から地上までシェールガス運ぶ鋼管である。しかし1つの井戸に使われる鋼管は1層ではなく、3層のケーシングと1層のチュービングが重なった構造になっている。外側から、井戸枠となるサーフェスケージング、中間ケーシング、水圧破碎を行うプロダクションケーシング、発生したガスを井戸から運び出すためのプロダクションチュービングがある(図参照)。

掘削は、ドリルパイプの先端に取り付けたビット(掘削工具)を回転させて掘り進み、その後ドリルパイプを抜いてケーシングを継手でつなぎながら挿入していく。サーフェスケージングを入れた後、さらに内側をドリルパイプで掘削を進め中間ケーシングを挿入する。さらにドリルパイプの先端に水平坑用のボトムホールモータを付けた掘削ビットにより、シェール層に水平坑を掘り、そこにプロダクションケーシングを挿入する。プロダクションケーシ

ングが入りにくいので回しながら入れることもあるが、その際ケーシングにねじりトルクが発生するので、プロダクションケーシングの継手には耐トルク性能が要求される。プロダクションケーシングを使って水圧破碎をすることにより、シェール内からガスが発生してプロダクションケーシング内にたまり、それをプロダクションチュービングで井戸から運び出す。

鋼管は、シームレス管または溶接管が使われるが、特にプロダクションケーシングとプロダクションチュービングにはシームレス管が多く使われる。

シェールガス井で多く使われる鋼管に「HC付きP110鋼管」がある。110は降伏強度110ksi(758MPa)級、HCは耐コラプス強度(コラプス collapse:圧潰)が高いことを表している。降伏強度は110ksiと位置付けられているが、中には降伏強度を下限125ksi、上限140ksiというように強度レンジを狭め上限側に設定した製品もある。

P110は、標準規格の油井管として世界で長年使われてきた実績を持つが、米国シェールガス用にHC付きや強度狭差の特殊仕様付きが標準化している。HC付きP110鋼管が使われるのは、油井管の構造の中で、主にプロダクションケーシングと呼ばれる油井管である。

プロダクションケーシングは、油井管の中でも最も厳しい条件下で使用される。シェールガス井で水圧破碎を行う時には、プロダクションケーシングの内側から500~1,000気圧という高压で流体をシェールに当てて小さな割れ目を作る。プロダクションケーシングは、このような高い内圧に耐えられなければならない。

またガスの生産が始まると、今度はプロダクションケーシングの外側から内側に向かってシェールガスが入ってくる。この外圧にも耐えられなければならない。

このように内圧および外圧の両方に耐えられることが、プロダクションケーシングに要求される特性となっている。ここでは、直径5-1/2インチのシームレス管が多く使用されている。

プロダクションケーシングだけでなく、プロダクションケーシングを補強する中間ケーシングにもHC付きP110鋼管が使われる。高い内圧および外圧に耐えているプロダクションケーシングが、万一破損してしまった場合、そこからシェールガスが外に漏れ出し、中間ケーシングには大きな内圧がかかる。そのため、中間ケーシングも高い内圧に耐えられることが必要となる。ここに使用されるHC付きP110鋼管は、直径7~7-5/8インチ程度で、シームレス管または溶接管である。

一番内側にあるプロダクションチュービングは、プロダクションケーシングの内側にたまったガスを吸い上げる役割をする鋼管であり、管の内部でかかる圧力はそれほど高い必要はなく、一般的な強度のシームレス管が使用される。

シェールガス開発は、非在来型の天然ガス資源の可能性を

大深度井のニーズに応える高強度シームレス管

米国でのシェールガス井戸深さは地下3,000mぐらいまでだが、世界各地の在来型天然ガスの掘削では、4,500～10,000m深さといった超深井戸の開発が行われている。4,500mまでの比較的浅く掘削しやすい場所はすでに掘削され、資源も枯渇に向かっており、大深度*の掘削へのチャレンジが進んでいる。

大深度の地中は高温高圧環境であり、油井管にとっては極めて過酷な環境である。これに対応するため、高強度で耐食性にすぐれた油井管へのニーズが高まっている。このようなハイエンドクラスでは、世界トップクラスと言われる日本の油井管技術が不可欠である。最近開発された、大深度井に対応する製品の例を紹介する。

*大深度とは、概ね深さ4,500m以上をいう。

■高強度低合金耐サワー油井管

一般的に、 H_2S 圧力の高いサワー環境下では、鋼管の表面に露出した粗大介在物が腐食の起点となり硫化物応力割れが発生しやすいという問題があった。

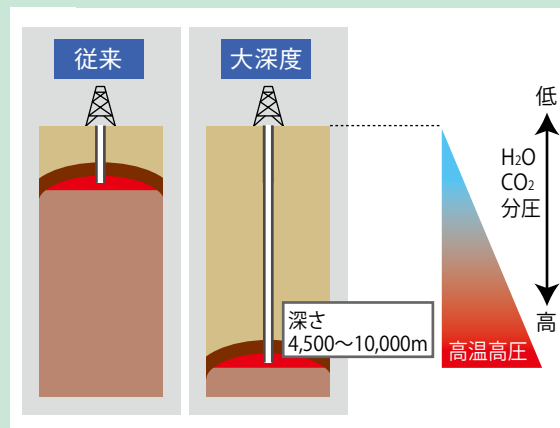
開発された125ksi級（降伏強度862MPa級）の高強度低合金油井管では、異種介在物との複合化による介在物を生成させ、これによって非金属介在物の成長を抑制して微細分散させることに成功した。すでに、北海、ノルウェー海、カスピ海の4～6km級の天然ガス井戸に適用されている。（2008年度全国発明表彰恩賜賞を受賞）

■高強度高合金油井管

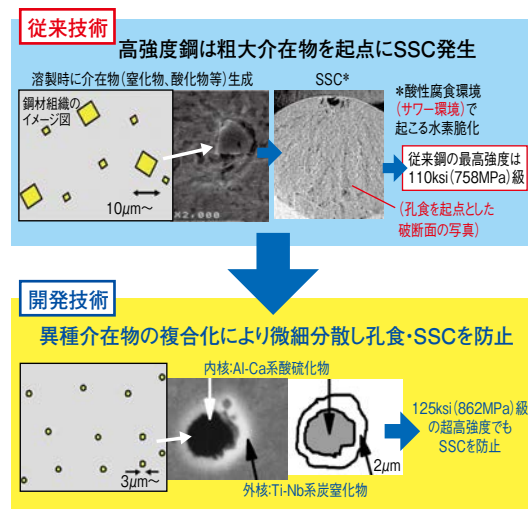
高圧の CO_2 および H_2S を含む環境では、高合金（2相系ステンレス鋼、析出強化型ステンレス鋼など）が使われてきたが、高温下での応力腐食割れや水素脆化割れのおそれがあった。

さきごろ140ksi級（降伏強度1000MPa級）という高強度の高合金油井管が開発された。この鋼管では、固溶強化元素であるNに着目し、材料の常温延性や耐食性を維持しながら高強度化が図られた。一方、N添加による高温下での延性低下を防ぐため、レアースメタルの添加により、耐応力腐食割れ性の向上を図ることができた。（2012年度大河内記念生産賞を受賞）

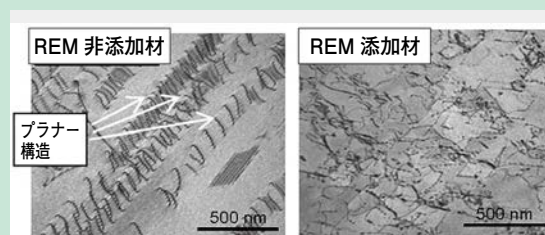
●従来の天然ガス井と大深度井の違い



●高強度低合金耐サワー油井管の介在物制御



●高強度高合金油井管の転位構造



レアースメタル(REM)非添加材(左)のプラナー構造では、変形が一部のすべり線に集中し耐食皮膜が破壊され、広い新生面が生成しやすい。添加材(右)では変形が起きても個々の新生面の面積は小さく、再不動態化しやすい。

広げたということで、大いに注目を集めている。アメリカで、シェールガス開発が始まったのは、実は数十年以上も前であるが、ここ数年で特に注目されるようになった。今後、世界各国で一斉にシェールガス開発が進む可能性がある。地形やサワー環境、その他の条件が異なり、現在は予想できないような技術的

な課題が明らかになるかもしれない。日本がこれまでに蓄積した油井管の技術力が、新しいエネルギーの開発や利用に大いに役立つことを期待したい。

●取材協力 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、新日鐵住金(株)
●文 杉山 香里