

カタールガスの洋上施設
世界屈指の大ガス田、ペルシャ湾「ノース
フィールド・ガス田」から天然ガスが生産さ
れている。(資料提供:三井物産(株))

天然ガス開発を支える 高耐食油井管

世界のエネルギー需要は、液体(石油)から気体(ガス)へ移行していると言われている。近年、天然ガスはクリーンエネルギーとして注目され、大型の開発プロジェクトが多数進行するなか、開発地域は従来の比較的開発が容易な地域から、より開発難易度の高い地域へ目が向けられるようになってきている。これに伴い、使用される材料はますます過酷な環境におかれ、新たな材料開発によって性能が高められた油井管が開発を支えている。

世界が注目するクリーンエネルギー

2009年4月、カタールで液化天然ガス生産設備「カタールガスII-トレインI」が竣工した。話題を集めているのがその規模で、同設備は780万トン/年という世界最大の液化能力を有し、今後増設するプラントが完成すれば、カタールは7,700万トン/年を供給する世界最大のLNG生産国となる。

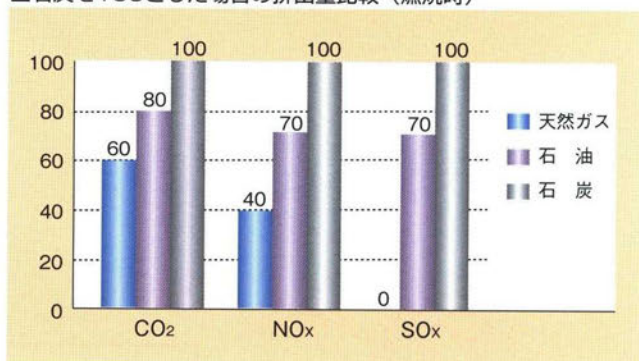
カタールの他にも、大型プロジェクトの開発が複数進行しており、例えばインドネシア「タンゲーLNG」(生産能力760万トン/年)、ロシア「サハリンII」(第1トレイン:480万トン/年)、イエメン「イエメンLNG」(第1トレイン:345万トン/年)等があり、その動向が注目されている。

世界のLNG需給は2008年半ばまで逼迫状況であったが、世界不況の影響を受けて、現在需要は低迷している。しかし需要低迷は短期的と見られており、長期的には天然ガス需要は増加傾向にあると考えられている。

天然ガスが注目されているのは、その環境特性が優れているためである。天然ガスはメタン(CH_4)を主成分とする可燃性ガスで、化石燃料の中で最も燃焼時の CO_2 、 NO_x 、 SO_x の排出量

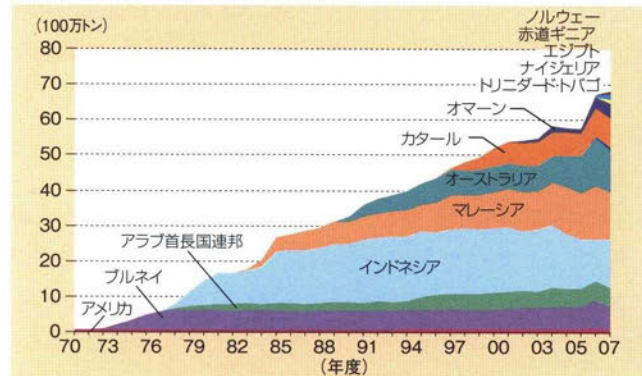
が少ない。その理由は、石油や石炭に比べ分子中の炭素原子の割合が少ないため CO_2 排出量が少ないからであり、 NO_x については窒素成分がほとんどないうえに燃焼制御が容易であるからである。 SO_x はもともと硫黄分が少ないうえに、液化の際に硫黄分や不純物が簡単に取り除けるため燃焼による発生はほとんどないからである。さらに燃焼時だけでなく掘削から貯蔵・輸送等の各段階の排出量を含めたライフサイクルにおいても、天然ガスは化石燃料中最も CO_2 の排出量が少ないことが知られている。

■石炭を100とした場合の排出量比較(燃焼時)



「エネルギー白書2008」資源エネルギー庁より

■日本のLNG供給国別輸入量の推移



「エネルギー白書2009」資源エネルギー庁より

可採年数は石油の41年に対し、天然ガスは60年以上と試算されており、現在でも新しいガス田が次々と発見されている。我が国においては1次エネルギー供給における天然ガスの比率が高まっており、2007年度、世界のLNG取引量の約40%を日本は輸入している。

開発の目はより深く、より遠くへ

これまで、天然ガスの開発地域は消費地の近傍またはパイプラインへの接続が可能なガス田等に限られていたが、従来開発の目が向けられなかった地域の開発が進められるようになってきている。背景には、遠距離国際パイプラインの建設が進んだことや掘削・採掘技術の向上、天然ガス需要の増加、さらには既存ガス田の生産減退が目立ってきたこと等が影響している。

天然ガスが集積するところを天然ガス鉱床と呼ぶが、これは在来型鉱床と非在来型鉱床に分けられ、在来型は既存の開発技術や経済条件等で採算性があると判断されたガス田を指す。天然ガスの種類としては遊離性ガスや油溶解性ガス等がある。一方、非在来型は生産が困難で経済性が劣るとされる鉱床を示す。種類としてはコールベッドメタン、タイトガス、シェールガス、メタンハイドレートなどがある。

現在、世界の天然ガスの大部分が在来型から生産されているが、将来の在来型資源の減少に伴い、非在来型は今後資源価値が向上していくと予測されており、米国では採掘技術の進歩に伴い、非在来型開発への参入の動きが目立っている。開発地域は、従来のような陸地、浅海地域は減少しており、今後大規模発見が期待できる深海や、未探鉱地域が残る東・西アフリカ、東シベリア地域、また東南アジアの中小規模ガス田の開発が活発化すると考えられている。

このような開発動向を受けて、極地や寒冷地、海洋であれば水深へと、より厳しい環境で天然ガスが掘削されるようになってきている。特に海洋での開発は、1947年に始まった当初は水深が

世界で進行する大型プロジェクトの例

カタール

カタールガスプロジェクト



カタールの天然ガス埋蔵量はロシア、イランに次いで世界第3位。ペルシア湾に位置する世界最大の単一構造的ガス田「ノースフィールド・ガス田」から天然ガスを生産している。LNG生産能力を今後7,700万トン/年以上へ増強する予定。供給先は当初、日本、韓国向けに始まったが、能力増強後は英国等の欧州市場、米国市場向けへの比率が高まる見込み。

●プロジェクトの概要

プロジェクト名	生産能力 (万トン/年)	稼働時期	プロジェクト名	生産能力 (万トン/年)	稼働時期
Qatargas I -1	300	1997	RasGas I -1	330	1999
-2	320	1997	-2	330	1999
-3	270	1997	RasGas II -3	470	2004
能力増強	80	2005	-4	470	2005
Qatargas II -1	780	2009/4	-5	470	2007
-2	780	2009	RasGas III -6	780	2009
Qatargas III -1	780	2010初	-7	780	2009
Qatargas IV -1	780	2010末			
合計				7,720	

インドネシア

タンダーLNGプロジェクト



インドネシア共和国東部のパプア州で開発が進められている。「タンダー」は1996年に当時の大統領スハルトにより命名されたもので、「強い、強靱な」という意。プロジェクトには多数の日本企業がパートナーとして参画している。2基の液化設備の建設が進められており、完成時には日本の年間天然ガス消費量の約1/8に相当する生産能力を持つ。

●プロジェクトの概要

LNG生産能力	760万トン/年(380万トン/年×2基)
稼働開始予定	2009年
ガス供給者	BP(パートナーに新日石、MIベラウ、KGベラウ等の日本企業)
LNG輸先	中国(CNOOC)、韓国(Posco/K Power)、メキシコ(Sempra社)、東北電力

資料提供: (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)

60m程度であったが、近年では浮遊式生産システム等の技術の確立によって水深2,700m以上での生産も開始されている。

また掘削の深度も大深度となっている。掘削の深度を地面からの深さ(陸地)、海底からの深さ(海洋油井)で示すと、陸地・海洋ともに最近では6,000m以上の深度での掘削も行われるようになってきている。

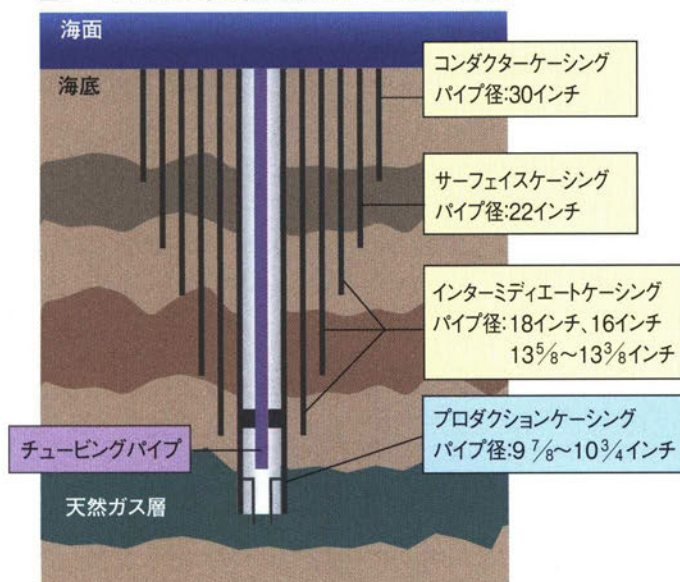
大深度で行われる天然ガスの掘削

石油が地下2,000～3,000mの地層に多く存在しているのに対し、天然ガスはそれより深部に存在している場合が多く、地温160℃以上、地下4,000m以上の深い地層の高圧地殻内に大型ガス田が存在している可能性が高いと言われている。そのためより深い地層での掘削が行われている。

■世界の大型プロジェクトの環境



■ケーシングパイプ径の配置例(4,000m超大深度の場合)



※インチ(inch)=2.54cm。この分野ではインチで示すのが一般的。

その天然ガスの掘削方法は、ビットをドリルパイプの先端に取り付け、荷重と回転を与えることで地下を掘り進むロータリー掘削が主流となっている。掘削装置は掘削リグとも呼ばれ、主に櫓状の構造物、パイプ類の懸垂を行う巻上装置、流体循環用ポンプ、噴出防止装置、発電機等で構成される。

一定区間の掘削が進むと、地層が露出している坑壁の崩壊を防ぐためにケーシングパイプが設置される。深度が深くなるにつれ地層圧力が変化するため、異なる地層圧力を持つ地層間を遮断するために複数のケーシングパイプを設置する必要がある。圧力や温度条件、掘削上の障害等を予測し、目的深度まで達成するよう坑径と各ケーシングパイプのサイズや強度、設置深度などが選定される。ケーシングパイプ径は深度が増すほど段階的に小さいものが使用され、外側からそれぞれコンダクターケーシング、サーフェイスケーシング、インターミディエートケーシングと呼ばれ、最も内側にはプロダクションケーシングが設置される。一度設置されればケーシングパイプは坑壁とセメントで固定され、交換されずに長期間使用される。

最後にガスを地上に導くため、坑内にチュービングパイプが設置される。チュービングパイプは内側が高温、高圧のガスに曝され、また地域によってはガス中に高 H_2S 、 CO_2 が含まれる場合もある。

ケーシングパイプやチュービングパイプの接続にはねじ継手が用いられ、あらかじめ管端にねじを設けたパイプが、管同士あるいはカップリングを介して締結される。近年では過酷な環境が増えていることから、このねじ継手にもパイプ本体とほぼ同等の気密性や機械的強度が必要になってきており、標準継手(API規格品)ではなく、より高性能、高品質なものが求められるようになっている。これらの特殊ねじ継手はプレミアムジョイントと呼ばれ、要求される仕様や性能に合わせた製品が開発されている。



パイプはリグ上で1本ごとねじ締結され地中深く降ろされる。例えば4,000m級の井戸であれば、最も内側のプロダクションケーシングパイプは、1本12mのパイプが330本以上締結される。



特殊ねじ継手

資料提供:住友金属工業(株)

激しい腐食環境におかれる油井管

ガスの生産で使用されるケーシングパイプやチュービングパイプは油井管と呼ばれ、信頼性の高い継目無鋼管が使用されている。油井管は井戸元から地中深く吊り降ろされるため、地表部の油井管は管の自重に耐える必要があり、地層深部では地層圧に耐えなければならない。そのため高い強度が求められる。

また地層によって、油井管は厳しい腐食環境におかれる。深度が増すほど高温・高圧となり、地下4,000mを超えると160～180℃、さらに深い場合200℃以上になる場合もある。さらに地層によってはCO₂またはH₂Sを含む場合もある。近年では過酷環境の開発が活発化していることから、CO₂分圧およびH₂S分圧が最大で数10MPaに達する天然ガス田も存在している。

ガス中にCO₂が含まれる場合、CO₂は水に溶けて酸性の炭酸(H₂CO₃)となり、油井管の全面腐食や選択腐食等を起こす場合がある。特に選択腐食はその進行速度が速く、パイプの穴あき事故につながるなど、問題となっている。

またH₂Sが含まれる場合、硫化物応力割れ(Sulfide Stress Cracking, SSC)が発生する場合がある。SSCは水素脆性破壊の一種であり、通常腐食で発生した水素は大部分が水素ガスとなり放散されるが、H₂Sが存在するとその触媒作用によって鋼表面に発生した水素が鋼中へ侵入し、応力の高い部分に集まって割れが起こる。SSCによってH₂Sが漏れると重大な事故に結びつく。H₂Sが溶け込んだ強い酸性を持つ地質環境をサワー環境と呼ぶが、耐サワー性の向上は油井管にとって大きな課題となっている。

油井管は使用される環境に適した品種が用いられている。特に管の内側がガスに曝されるチュービングパイプは、CO₂を含まない場合は低合金鋼等が使用されるが、CO₂を含む場合、炭酸ガ

ス腐食に有効なCrを添加した13Crマルテンサイト系ステンレス鋼(13Cr鋼)が使用されている。CO₂環境にH₂Sが微量含まれる場合は、13Cr鋼では十分な耐SSC性を備えていないため、Mo添加によって耐SSC性を向上させた改良型13Cr鋼が開発されている。さらにCO₂環境で高温の場合は22Cr系2相ステンレス鋼等が、高CO₂・高H₂S・高温環境の場合はNi基高合金と、それぞれ使い分けられている。

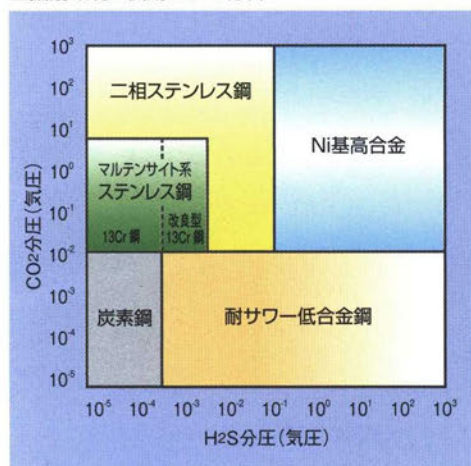
大深度の掘削を可能にする高耐食油井管

一方、ケーシングパイプは炭素鋼や耐サワー低合金鋼が使用されている。ケーシングパイプはチュービングパイプのようにガスに直接曝されることはないが、一度設置されると交換されずに長期間使用されるため、最も内側に配置されるプロダクションケーシングは、耐食性が重視される。

大深度のガス田ではより高い強度が必要となるが、低合金鋼は高強度鋼であるほどH₂S環境ではSSCが起りやすくなる。これは一般に高強度鋼は水素トラップサイトが多く、水素脆化感受性が高いためである。これまでは組織を焼入れ焼き戻しにより焼き戻しマルテンサイトとしたり、結晶粒の微細化等で耐サワー低合金鋼の高強度化が図られてきた。

しかしこのような材料開発によっても、耐サワー低合金鋼のいっそうの高強度化は難しく、強度は758MPa(110ksi)が限界であった。そのためサワー環境における掘削深度は、これまで約4,000mに制限されてきた。しかし最近になって、約4,000m以上の掘削を可能とする862MPa(125ksi)級の高強度耐サワー低合金油井管が開発されている。これはSSCが鋼中の粗大介在物を起点に発生することを明らかにし、微量元素添加で異種介在物と複合化させ、介在物を微細分散化している。さらにナノサイズ炭化物に

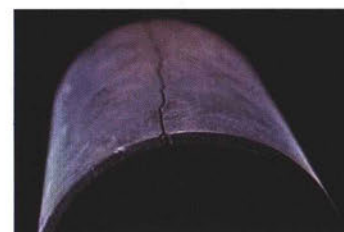
■掘削環境と使用される材料



■介在物複合体の電子顕微鏡写真



資料提供:住友金属工業(株)



注目される国産エネルギー

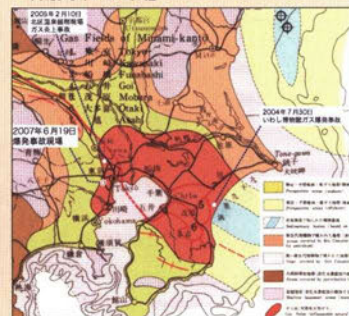
世界でもユニークな水溶性ガスの開発

わずかであるが、国内でも北海道や秋田、新潟、千葉などで天然ガスの生産が行われている。そのうち17%は水溶性ガスであり、水溶性ガスの生産は世界でも例が少ない。水溶性ガスとは地層水中に溶存状態で賦存しているガスのことである。日本では千葉を中心に、茨城、埼玉、東京、神奈川県下にまたがる広大な「南関東ガス田」が広がっている。南関東ガス田から産出される天然ガスはメタンが約99%を占め、一酸化炭素や硫黄等を含まない。また南関東ガス田では水溶性ガスが地層水(かん水)とともに産出されるが、かん水にはヨウ素が豊富に含まれ、その濃度は海水の2,000倍となっている。これだけのヨウ素が天然に濃縮されている地域は世界でも珍しく、日本は世界第2位の生産国となっている。



天然ガスとともに産出されるヨード(ヨウ素) (資料提供: 関東天然瓦斯開発(株))

●世界でも有数な水溶性天然ガス田「南関東ガス田」



(独)産業技術総合研究所地質調査総合センターHPより

メタンハイドレート資源への期待

次世代の国産エネルギーとして期待されているのがメタンハイドレートである。メタンハイドレートとは水分子の結晶構造の中にメタン分子が取り込まれた氷状の固体物質のことである。多量のメタンを含み、例えば1m³のメタンハイドレートから約160~170m³のメタンガスを得ることができる。メタンハイドレートは低温かつ高圧下で存在し、この条件を満たす極地の永久凍土の下や大深度の海底下で存在することが知られている。メタンハイドレートの研究は始まったばかりであり、資源量等は明確になっていないが、日本の周辺海域でも海底地層内に相当量のメタンハイドレートが存在することが見込まれている。(独)産業技術総合研究所の資料によれば、日本のメタンハイドレート資源量は7.35兆m³のガス相当量があると推測している。これは日本が消費する天然ガスの約96年分に当たる。

2001年7月には経済産業省が「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」を発表し、2002年度に「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」が発足している。2007年3月に発表された評価結果では、東海沖~熊野灘の東部南海トラフ海域で、メタンガス換算として約1.1兆m³の原始資源量があることがわかっている。

メタンハイドレート ▶ の燃焼



砂質メタンハイドレートのコア ▼



メタンハイドレートはしばしば「燃える氷」と表現されるが、これは火を近づけると水に囲まれているメタンが燃えるためである。物理化学的には氷ではない。(資料提供: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム)

よる強化や粒界炭化物の形態制御等の組織制御によって、耐SSC性と強度を向上させている。この油井管は北海のガス田におけるプロダクションケーシングに採用され、サワー環境における深度4,000~6,500mの掘削を実現している(詳細は連携記事を参照)。

現在進行中の世界最大のLNGプロジェクト「カタールガス」のガス田には、高濃度のH₂Sが含まれているという。最近のガス田は、材料にとってますます厳しい環境となっている。しかしながら、近年一般グレードの油井管は他国製品が勢いを増す一方で、高腐食環境では信頼性が重視され、日本の高耐食油井管が多用されている。油井管は開発に深く関わる材料であり、その性能はガス田の開発に影響を及ぼす。過酷環境における開発では、その環境にあわせた材料が新たに開発される場合もある。今後天然ガスの開発地域はより過酷な環境へと移行していくこ

とが予測されており、特に耐食性はいっそうの向上が必要となっている。これまで足を踏み入れなかった領域へ天然ガス開発が進み始めるなか、日本の高耐食油井管が果たすべき役割は大きい。



●取材協力 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、住友金属工業(株)
●文 藤井 美穂