

エネルギー用鋼材

Steel Products for Energy Industries

正村 克身 MASAMURA Katsumi JFE スチール 鋼管セクター部 主幹職 (部長)・工学博士
大井 健次 OI Kenji JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (部長)・博士 (工学)

要旨

世界的なエネルギー需要の増加にともない、さまざまなエネルギーを開発、輸送および利用するためのインフラストラクチャーの建設が進められている。エネルギー利用効率の向上と機器プラント類の安全性を向上させるためには、優れた特性と高い信頼性を持つ鋼材の利用が欠かせない。本論文では、エネルギー産業においてどのような鋼材が使用されているか、またそこに使用される材料に求められる特性を紹介する。最後にこれらの分野における JFE スチールの対応状況を示す。

Abstract:

Improvements of infrastructure for energy industry, including development, production, transportation and utilization, are promoted in order to tackle the increase of energy demands in the world. Use of steel products with high quality and reliability are critical to improve the energy efficiency and assure the safety of equipment and facilities in energy industry. In this paper, steel products used in energy industry and required properties are described. Finally, the activities of JFE Steel in this business area are introduced.

1. 緒言

経済活動や個人の生活を支えるエネルギー消費量は、BRIC's に代表される中進国の経済発展と、世界的な人口増加により大幅に増加している。

増大するエネルギー需要に対応するためにさまざまなエネルギーを開発、輸送、利用するためにインフラストラクチャーの建設が現在も精力的に進められている。

石油や天然ガスに代表されるエネルギー資源を生産・利用するための施設プラントには、さまざまな形をした高度の性能と品質を要求される鋼材が多く使用されている。JFE スチールはエネルギー用鋼材の分野において最先端の材料技術と製造設備を駆使して、お客様の要望に応えるための材料の研究開発を推進している。

本論文では、エネルギーと鉄鋼製品の役割を明らかにするとともに、この分野における JFE スチールの取り組みを紹介する。

2. エネルギーの需要動向

表 1 に示すようにエネルギーは自然界に存在する 1 次エネルギーと、1 次エネルギーを使いやすいようにした 2 次エネルギーに分類される。

表 1 エネルギーの分類

Table 1 Type of energy

1 次エネルギー	化石エネルギー	石油 天然ガス 石炭
	再生可能エネルギー	水力 風力 地熱 バイオマス
	原子力	
2 次エネルギー	電力	
	燃料	ガソリン 灯油など

このうち 1 次エネルギーは石油・天然ガス・石炭に代表される化石燃料と水力・風力・地熱などの再生可能エネルギーおよび原子力に分類される。2 次エネルギーはこれらの 1 次エネルギーを変換した電力やガソリンや灯油などの燃料をいう。

米国 EIA (Energy Information Administration) の 2011 年のレポートによると、図 1 に示すように 2008 年から 2035 年の間でエネルギー需要量は 53% 増加すると見込まれている¹⁾。

このうち石油の消費は 30% (年率 1.0%)、天然ガスは 53% (年率 1.6%)、石炭は 47% (年率 1.4%) と大幅に増加する。

再生可能エネルギーは 2008 年から 2035 年にかけて年率 2.8% の増加が見込まれている。その比率は 15% に増加する。

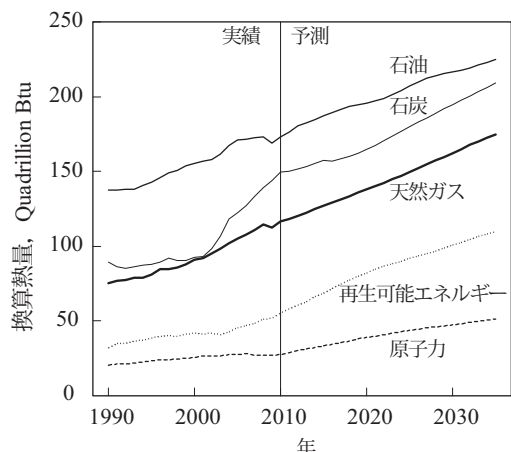


図1 エネルギー需要動向

Fig. 1 Consumption of energy

このように、再生可能エネルギーの使用量は大幅に増加し、エネルギー消費量全体に占める割合は増えていく。しかし、化石エネルギーは2035年においてもエネルギー消費量の80%を占め、その消費量は引き続き増加する。石油は2035年においてその比率は29%までに低下するが、最も使用される燃料である。

3. エネルギー供給と鉄鋼製品

3.1 石油・天然ガスの生産、輸送、利用プロセス

エネルギーを利用するためには、自然界に存在する資源の採取、生産地から消費地への輸送、発電設備や石油精製設備により使いやすい2次エネルギーに変換して利用される。

エネルギーの生産・輸送・利用システムにおいて使用される鉄鋼材料²⁾を海底油田・ガス田の例を中心に説明する。概略の工程と使用される鋼材の例を表2に示す。

(1) 開発

海洋における石油天然ガスの開発において使用される掘削リグは着底式と浮遊式に大別される。着底式のリグとしてはジャッキアップリグとサブマージブル式掘削リグがある。これら着底式掘削リグは浅い海域で用いられる。浮遊式のリグとしてはセミサブ式掘削リグとドリルシップがある。これらは、最大で3500m程度の深海まで掘削できる。

図2に着底式の例としてジャッキアップリグの概略の構造を示す。石油・天然ガスを海底から採取するための井戸を掘るためのドリルパイプ、掘った井戸が崩れることを防ぐケーシング、また井戸を掘るために使われる流体を循環するためのライザー管などが使用される。また、リグの本体には高強度の鋼板が使用される。

(2) 採取・生産

海上で石油・天然ガスの生産システムも固定式と浮

表2 海底油田、ガス田の生産、輸送、利用システムと鉄鋼製品

Table 2 Application of steel products for development and production system of sub sea wells for oil and gas

工程	機器・プラント	使用される鉄鋼製品
開発	掘削リグ	ドリルパイプ ケーシング、ライザー管 高張力鋼板 (海構材)
採取・生産	プラットフォーム	チュービング ケーシング ラインパイプ (フローライン、ギャザリング)
		高張力鋼板 (海溝材)
輸送	海上輸送 原油タンカー LNG (液化天然ガス) 船	造船用鋼材, 造船用耐食材料
	パイプライン	ラインパイプ ラインパイプ用原板
貯蔵	石油タンク ガスホルダー	高張力鋼板
精製プラント	プラント配管 加熱炉管	特殊管 (Cr-Mo 鋼)
	圧力容器	高張力鋼板 クラッド鋼板
発電	過熱器 配管	特殊管 (Cr-Mo 鋼)

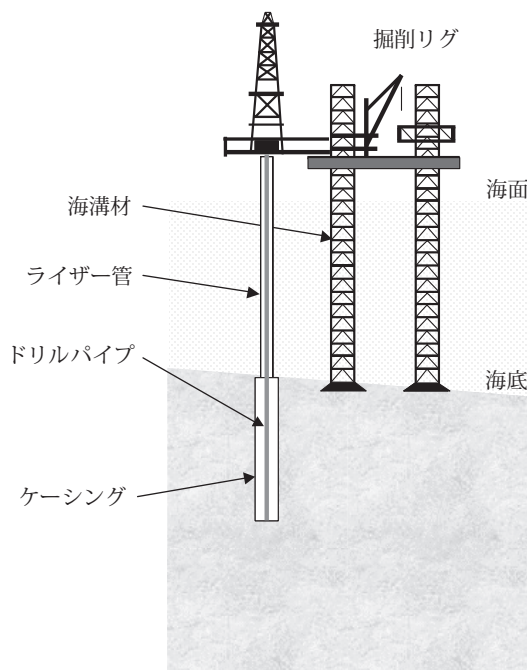


図2 ジャッキアップリグの概要と使用される鉄鋼材料

Fig. 2 Schematic drawing of jack up rig and steel products

遊式に分類される。固定式生産システムにはジャケット型、重力型 (GBS)、コンプライアントタワーなどが

ある。これらは比較的浅い海域で使用される。浮遊式の生産システムとしては、セミサブ型生産システム (FPS), 浮遊式生産貯蔵出荷システム (FPSO), 浮遊式貯蔵出荷システム (FSO), TLP (tension leg platform) および SPAR がある。これらは水深が 600 m 以上の深海で使用される。また、海洋構造物を使用しない海底生産システムも近年採用が増えている。

これらの生産システムにおいては生産井を構成するチュービング、ケーシングおよび生産された石油や天然ガスを輸送するラインパイプに加えてプラットフォーム本体に高強度の鋼材が使用される。北海などの寒冷地で使用される場合は厳しい低温靱性特性が求められる。

石油・天然ガスの非在来型資源としてオイルサンドやシェールガスがある。これらの採取においても鉄鋼材料は重要な役割を担っている。オイルサンドでは、地中の重質油の流動性を高めるためのスチームインジェクション用の鋼管や原油採取用の鋼管が使用される。シェールガスの採取は通常の天然ガス資源の採取と同様にチュービング、ケーシングが使用される。

(3) 輸送

石油や天然ガスは採取される場所と消費される場所が離れていることが多く長距離輸送する必要がある。

輸送手段としては原油タンカー、LNG 船 (LNG: 液化天然ガス) を使用する海上輸送と生産地と消費地をつなぐパイプラインがある。

原油タンカーや LNG 船に使用される材料は安全性を確保するために高い品質が要求される。特に溶接部の信頼性が重要である。原油タンカーにおいては原油に含まれる H₂S などの不純物による腐食を抑制するために原油タンクや配管に耐食性を求められることがある。

パイプラインは生産地から消費地に石油や天然ガスを輸送するためのものであり、文字どおり鋼管が使用される。

(4) 精製プラントおよび発電設備

火力発電プラントでは、発電の効率を高めるために高温強度や耐酸化特性を改善した高 Cr 合金鋼管・鋼板が使用されている。

各種配管には大量の鋼管が、ダクト・煙突・煙道材には、高 Cr 合金鋼板のほかに耐硫酸腐食鋼板、ステンレスクラッド鋼板やステンレス鋼板・鋼管が使用される。

また、復水器用にチタン合金やチタンクラッド鋼板も使用される。その他、付随設備として各種タンクが設置されるため、多量の厚板が使用されている。

水力発電プラント分野では、ペンストック (水圧鉄管) や、発電機廻りのケーシング・リム板などに高張力厚板が使用される。また、取水口および放水口ゲ-

トには、ステンレス鋼板やクラッド鋼板が使用される。

原子力発電プラント分野では、原子炉格納容器・原子炉圧力容器用に厚板が、格納容器内の配管およびタービン廻りの配管にステンレス鋼管・炭素鋼鋼管が使用される。また、復水器には、チタン合金やチタンクラッド鋼板が使用され、煙突にステンレスクラッド鋼板が使用される。その他汎用的に、低温蒸気配管用、一般配管用に多量の炭素鋼鋼管 (低合金鋼を含む) が使用される。

クリーンなエネルギーとして注目されている地熱発電においても、地中から蒸気・熱水を採取するためにケーシングや配管を使用する。

3.2 エネルギー用鋼材に要求される特性

このように、エネルギーの開発、生産、輸送および利用に関わるプラント機器類には鉄鋼材料が重要な役割を果たしている。これらの材料に要求される特性を紹介する (表 3)。

これらのプラントで求められるのは、建設コストおよび運転コストの低減である。コストを低減するひとつの手段が高強度材料の採用である。高強度材料を採用することによって、設備の大型化、運転条件の高圧化、高温化が実現できる。同時に使用材料の削減が可能となり、これにともなって設備の軽量化や設備工事の削減などが可能となる。

一方で、高いエネルギー密度を持つ石油や天然ガスを取り扱うために、材料に対して高度の安全性、信頼性が求められる。これは、設計条件に対して十分な安全性を確保するばかりではなく、自然災害や腐食など外的な要因に対しても十分な安全性を確保する必要があることを意味する。

(1) 石油・天然ガス生産井

石油の生産には、石油の井戸が壊れないように支えるケーシング、石油やガスを地上まで運ぶチュービング、井戸から石油の精製設備まで輸送するラインパイプなど多くの鋼管が使われている (図 3)。

石油・天然ガス開発における井戸の高深度化 (高温高圧化)、腐食性ガス含有井の増加、水平掘りなどの掘削技術の進歩にともない油井管に要求される性能は高度になっている。要求される主な特性は下記の 3 点である。

- (a) 高強度
- (b) 高耐食性

表 3 エネルギー用鋼材にもとめられるもの

Table 3 Requirement for Steel products in energy industry

経済性	建設コスト
	運転コスト
信頼性・安全性	腐食
	自然災害
	事故

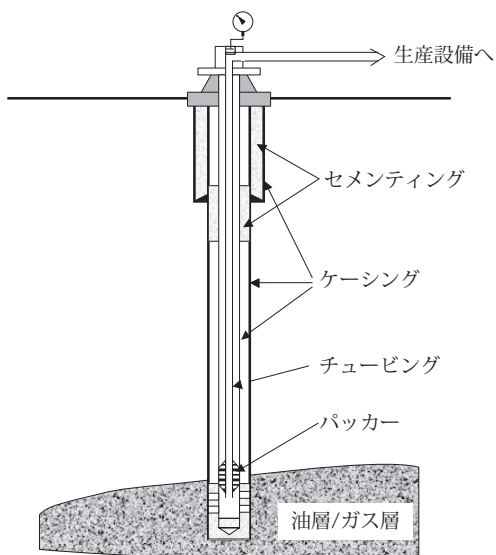


図3 石油・天然ガス生産井の構造

Fig. 3 Schematic drawing of oil and gas well

(c) ねじ継手性能

油井の深度が大きくなるに従い、チュービング・ケーシングの自重を支えるために高強度の材料が必要となっている。

高深度サワー油井・ガス井と呼ばれる高温高压でCO₂やH₂Sガスを大量に含む腐食性の厳しい井戸では、炭素鋼は、炭酸ガス腐食や応力腐食割れを生じて使用できない場合が多く、耐食材料が使用される。油井・ガス井における金属材料の腐食に与える因子を表4に示す。石油/ガスの井戸の腐食性は、石油やガスに不純物として含まれるH₂Sガス、CO₂、塩化物などの量で決まる。油井とガス井では、一般的にガス井の腐食性が厳しい。これは、油井の場合、油膜が鋼の表面に付着して防食的な作用を示すためである。また、腐食は常に水の存在するところで生じるので、水分量の多いガス井に腐食を生じやすい。井戸は深くなるほど地底の温度が高くなるので深い井戸ほど腐食が厳しい。

CO₂は肉厚の減少、H₂S、塩化物は割れの発生原因となる。腐食は、一般に温度の高い方が厳しい。

腐食性の観点からは石油・天然ガスの井戸は次のように分類される(表5)。

- (a) 60℃以上でCO₂主体の井戸
- (b) 60℃以上でH₂SガスとCO₂が共存する井戸

表4 油井ガス井の腐食に影響を与える因子

Table 4 Factor affecting corrosion in oil and gas wells

生産流体の組成	油/ガス比 水分量
腐食性物質の濃度	H ₂ S, CO ₂ , 塩化物量, pH など
生産量	流速
井戸の深さ	温度, 圧力

表5 油井・ガス井環境で生じる腐食

Table 5 Corrosion found in oil and gas environments

全面腐食および孔食	炭酸ガス腐食のもっとも一般的な形態。温度、流速などの影響を強く受ける。
硫化物応力腐食割れ(SSCC)	H ₂ Sが共存すると高強度鋼に割れを生ずる。
塩化物応力腐食割れ(SCC)	塩化物とH ₂ Sが存在するとステンレス鋼に割れを生じる。

(c) 100℃以下でH₂Sガスが主体の井戸

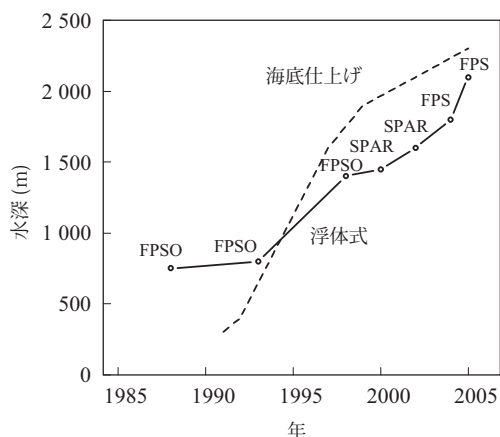
井戸の環境にCO₂が含まれると炭素鋼には激しい腐食が生じる。これを防止するためには、インヒビターあるいはステンレス鋼などの耐食材料が使用される。

H₂Sが存在する環境では、油井管のような高強度鋼では腐食により鋼中に水素が入り割れを生じることがある。これを硫化物応力腐食割れ(SSCC)と呼ぶ。これを防止するためには、CrやMoを添加した合金鋼を使用する。

H₂SとCO₂が存在する環境では、炭酸ガス腐食と硫化物応力腐食割れを防止するために、ステンレス鋼や高耐食合金を使用する。

(2) 海洋構造物

海洋で使用されるプラットフォームは、波力、海流や潮流による力、風力および地震荷重などの外力にさらされる。また、浮遊式のプラットフォームでは揺動による荷重も考慮する必要がある。1990年代以降に大深度開発が推進され、浮体式の生産システムでは水深2100m、海底仕上げで2200mまで達している。このような大深度の開発においては風力、波力などの影響が大きく、使用される材料に対して優れた特性と品質が求められる。図4に海底油田ガス田の水深の変化を



FPSO: 浮体式生産貯蔵出荷システム
 SPAR: 円筒形の浮体式石油生産設備
 FPS: セミサブ型生産システム

図4 海洋石油・天然ガス開発の水深の変化

Fig. 4 Change in water depth of sub sea wells for oil and gas

示す。

海洋構造物に使用される材料に要求される主な特性は強度、溶接性および低温靱性である。構造物が大型化することにより外力の影響も大きくなる。このため高強度の材料が要求される。現在では引張強さ 780 MN/mm² の高強度材も使用されている。

鉄鋼材料は非常に低い温度の環境で靱性を失うことが知られている。これを脆性破壊と呼ぶ。脆性破壊特性を評価するためにはシャルピー試験や DWTT 試験 (drop weight tear test) などの衝撃試験で求められる、延性-脆性遷移温度や使用条件を想定した温度における延性破面率や吸収エネルギーなどが使用される。また、CTOD (crack tip opening displacement) などの破壊力学的な評価が使用されることもある。

氷海域のような厳しい気象条件では、外気温が -60℃に達することがある。この地域の掘削では、冬には海面が凍結するために移動式ケーソンリグ MACR (mobile arctic caisson rig), ケーソン型人工島リグ CIDS (concrete island drilling system), シングル・スチール掘削ケーソン (single steel drilling caisson), 浮体型掘削ユニット (conical drilling unit) が使用される。MACR, CIDS に使用される厚板は船級規格のもので、-60℃での低温靱性が要求される。溶接には高効率の大入熱溶接が採用され、優れた溶接性が求められると同時に溶接部にも母材と同じ低温靱性が要求される。

(3) パイプライン

天然ガス輸送用パイプラインの建設コストおよび運転コスト削減のため、操業圧力の高圧化および大口径化が進められている。操業圧力の上昇と使用鋼材量の低減および現地溶接施工コスト削減を実現するためにラインパイプの高強度化に対する要求が高まっている。このため、近年 X80 グレードの高強度ラインパイプの適用例が増えている。ISO3183 および API5L (API: アメリカ石油協会) においても X90, X100, X120 の高強度ラインパイプが規格化された。API 規格に規定されている最高強度の材料の変遷を **図 5** に示す。

一方で、パイプラインは天然ガスや石油などの可燃物を輸送するために高度の安全性が求められている。**図 6** に米国の DOT (Department of Transportation) に報告された米国内のガス輸送ラインの損傷事例 769 件の損傷原因 (2002 年~2011 年) を示す。

材料に起因するものは全体の 6%と少なく、これらのほとんどは 1970 年代以前に建設されたものである。

最も多いのは工事にともなうものであり、次いで外面腐食、内面腐食に起因するものが多い。この中で注目すべきものは自然災害に起因するものが 15%を占めていることである。パイプラインの安全性を考える場合、材料、施工、機器などを管理するだけでは不十分

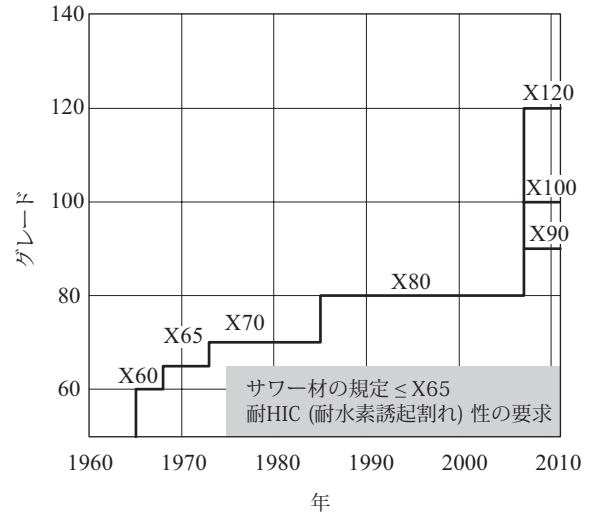


図 5 API (アメリカ石油協会) に規定されたラインパイプの強度の変遷

Fig. 5 Development of high strength line pipe in API spec. 5L (API: The American Petroleum Institute)

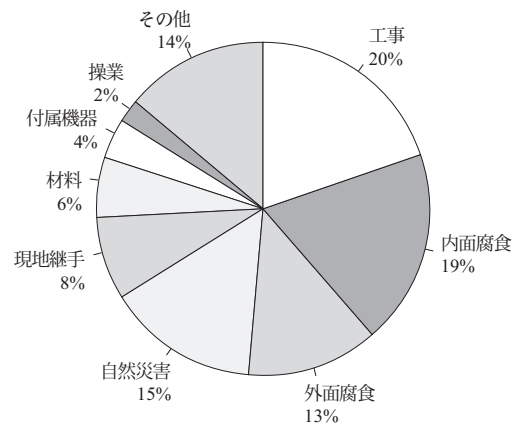


図 6 米国パイプラインの損傷原因 (DOT のデータに基づき作成)

Fig. 6 Causes of damages of gas pipe lines in U. S.

であり、他の工事にともなう損傷や自然災害の影響まで考慮する必要があることが分かる。

表 6 にパイプラインで生じる破壊の様式と影響する材料特性を示す。パイプラインの安全性を高めるために材料に対してさまざまな特性が求められている。これは、油井管、海洋構造物、発電設備などでも同様である。

延性破壊を避けるのは設計の基本であり、材料強度、降伏応力、伸びなどの基本的な材料特性と使用条件で決定される。

掘削リグやプラットフォームと同様にパイプラインも寒冷地に敷設されることがある。このとき重要な特性が低温靱性であり特に延性-靱性の遷移温度が重要である。

疲労破壊は、繰り返し荷重下での破壊であり、疲労

表6 パイプラインの破壊の様式と材料特性

Table 6 Relationship of failure mode of pipelines and material properties

破壊の様式	破壊に影響を与える材料特性	
延性破壊	降伏応力, 引張強度, 一様伸び 溶材との強度マッチング	
疲労破壊	疲労寿命 (SN, da/dN)	
脆性破壊	延性 / 脆性遷移温度 吸収エネルギー CTOD (き裂先端開口変位, K_{Ic} , δ_c , J_c)	
高速延性破壊 (バースト)	吸収エネルギー (シャルピー /DWTT (drop weight tear test))	
座屈	弾性座屈	
	圧縮	真円度, 板厚均一性
	曲げ	
	圧縮曲げ	一様伸び, 加工硬化特性
	引張曲げ	
圧潰	降伏強度 (YS), 真円度, 板厚の均一性	
腐食	硫化物応力腐食割れ (SSCC)	材料強度 / 硬さ
	水素誘起割れ (HIC)	硬さ / 介在物
	内面腐食	合金成分

寿命を評価することで回避される。

稼働中のパイプラインに何らかの外力によって損傷が生じて大規模な事故に至らないために必要なのが高速延性破壊特性である。これは、シャルピー試験やDWTT試験などの衝撃試験の吸収エネルギーが大きいほど亀裂が伝播しにくい。

地震や洪水などの地盤変動によって鋼管が座屈してガスの漏洩などに至らないようにパイプラインの変形特性が重要である。基本的には設計によって対策を立てるが、材料特性もパイプラインの座屈性能に大きな影響を与えることが知られている³⁾。海底管のように大きな外圧を受ける場合は圧壊が問題となる。

パイプラインも油井管と同様に腐食環境にさらされる。腐食性成分や水分が除去される前の生産流体を輸送するフローラインやギャザリングラインと呼ばれるパイプラインでは、CO₂腐食を防止することが大きな課題となっている。さらに、生産流体がH₂Sを含有していることも多く、H₂Sと水分が共存するような環境では鋼材に種々の割れが生じる危険のあることが知られている。割れの種類は応力の有無により以下のように分類される。

(a) HIC：水素誘起割れ (hydrogen induced cracking)

H₂Sと水分が共存する環境において外部応力のない状態で生じる割れで、鋼中の伸展した非金属介在物などを起点にして板面に並行に発生し、時間

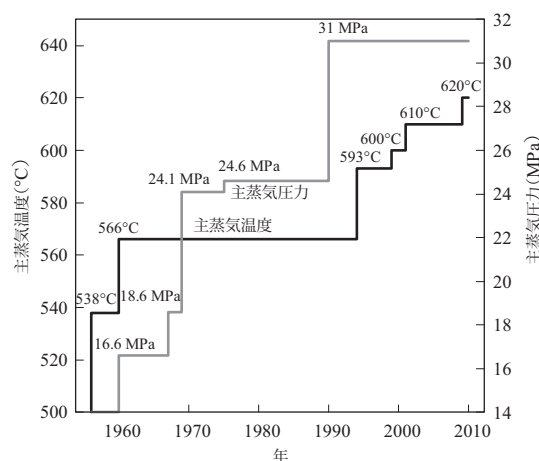


図7 日本における石炭火力発電設備の温度と圧力

Fig. 7 Change in steam temperature and pressure in coal fire generation system in Japan

の経過とともに直線状に伸展するか、またはステップ状に伸展する。

(b) ブリスター：ふくれ (blistering)

HICの一種で特に表面直下に生じる割れを区別してブリスターと称することがある。

(c) SSCC：硫化物応力腐食割れ (sulfide stress corrosion cracking)

H₂Sと水分が共存する環境下で、応力が存在する場合に生じる割れで、多くは表面または内部の欠陥などの応力集中箇所から発生し、応力軸に対して垂直方向に伸展する。この割れは溶接部などの硬さの高い部分に発生しやすいとされている。

(4) 精製プラントおよび発電設備

電力・化学工業などの各種プラントの重要な役割を果たすボイラ・熱交換器は大型化、高温・高圧化が進み、使用される鋼管もより高度な機能・品質が求められる。

火力発電ボイラでは発電効率の向上を目指して、蒸気条件の高温・高圧化が進められ、使用されるボイラ用鋼管も使用条件に応じた新材料の開発が行われてきた。図7に日本国内における石炭火力発電設備の蒸気温度と蒸気圧力の変遷を示す。

高温強度、特にクリープ特性、また高温腐食に対する耐食性が求められる。使用温度、仕様環境に応じてCr-Mo鋼、鋼、Cr鋼、ステンレス鋼などが使い分けられる。

4. JFE スチールのエネルギー用鋼材

4.1 鋼管

4.1.1 油井管

JFE スチールは耐食性を要求される用途において特徴あ

表7 JFE スチールの高耐食油井管および耐サワー油井管

Table 7 Corrosion resistance and sour grade tubing and casing of JFE Steel

特性	商品名
高耐食油井管	JFE-13Cr-80, JFE-13Cr-85 JFE-13Cr-95 JFE-HP1-13CR-95 JFE-HP1-13CR-110 JFE-HP2-13CR-95 JFE-HP2-13CR-110 JFE-UHP [®] -15CR-125
耐サワー油井管 SS: 割れ限界応力 ≥ 80% SMYS (SMYS: Specified minimum yield strength)	JFE-80S JFE-85S JFE-90S JFE-95S JFE-110S JFE-85SS JFE-90SS JFE-95SS JFE-110SS

る製品を製造販売している（表7）。ひとつは、CO₂が存在する環境で使用される高強度高耐食油井管であり、他は、H₂Sが存在する環境で使用される耐サワー油井管である。また、これらの高強度油井管に適合した特殊ねじを販売している。APIに規定されているグレードのほかにチュービング・ケーシング用の高機能油井管として、圧潰に耐えるハイコラプス油井管、低温環境で使用される低温用油井管の製造を行っている。

(1) 高強度高耐食油井管^{4,5)}

JFE スチールの油井管の特徴はマルテンサイト系ステンレスの特性を生かした高強度高耐食油井管のシリーズである。通常の13% Cr鋼に加えて、強度および耐食性を高めたJFE-HP1-13CRおよびJFE-HP2-13CR、また従来は二相ステンレス鋼が使用された環境に適用できるJFE-UHP[®]-15CRなどの使用環境に応じた多彩な品揃えがある。詳細は本特集号の記事を参照されたい。

(2) 特殊継手

高深度の油井・天然ガス井に使用される油井管を繋ぐねじ継手には高い継手強度と優れたシール性が要求される。JFE スチールは独自の継手としてFOX[®]とJFEBEAR[®]の二種類の商品を供給している⁶⁾。それぞれのネジの特徴を表8に示す。また、現地で継手を接続

表8 JFE スチールの特殊継手

Table 8 Premium joint of JFE Steel

継手	特徴
FOX [®]	メタルシールを採用し、APIに規定された継手より優れたシール性と耐焼き付性を有する。
JFEBEAR [®]	高深度のガス生産性に使用されるFOX [®] よりさらに高いシール性を有する。

する作業を行う時に使用する潤滑剤に含まれる環境負荷物質が環境に流出する可能性を低減するための、継手の潤滑システム「CLEAR RUN[®]」を適用している⁶⁾。

4.1.2 ラインパイプ

JFE スチールは鋼管製造プロセスとして継目無鋼管、UOE 鋼管⁷⁾、電縫鋼管^{8,9)}を有しており、用途、サイズレンジに応じて適切な材料を供給できる体制を有している鋼管の総合メーカーである。

中でも長大パイプラインに使用される高強度ラインパイプ、過酷な使用環境で使用される高変形鋼管（HIPER[®]）、従来の電縫鋼管に対して高い信頼性を有するマイティーシーム[®]電縫鋼管¹⁰⁾、腐食環境で使用されるマルテンサイト系ステンレス鋼ラインパイプ¹¹⁾など特徴ある商品を取り揃えている。

(1) 高変形鋼管 HIPER[®] (UOE)

パイプラインの建設は環境の厳しい地域へ拡大しており、特に、地震地帯や不連続凍土地帯などへ敷設されるラインパイプに対しては、地盤変動によるパイプの変形に対して局部座屈や円周溶接部からの破壊が生じないように十分な変形性能が必要とされている^{12,13)}。

(2) 高強度ラインパイプ

X80に代表される高強度ラインパイプにおいても、パイプラインの高圧輸送や鋼管の大径化にともない厚肉化が推進されている。

ラインパイプのさらなる高強度化への要求に対して、当社は2002年に世界で初めてCSA グレード690 (CSA:カナダ規格協会, API X100 グレード相当)の高強度ラインパイプの商用生産を行った。さらに、2004年にはカナダ北部の厳寒地において冬季敷設が行われ、高い溶接施工性と母材および溶接部性能が証明されている。

X100ラインパイプの適用はまだ限定されているが、材料開発と同様にパイプラインの設計技術や利用・評価技術の開発が盛んに進められており、今後の適用拡大が期待される¹⁴⁾。

(3) 耐サワーラインパイプ

油井環境と同様にパイプラインにおいてもH₂Sが存在する場合、水素誘起割れが生じる可能性がある。これを防止するために不純物、特に鋼中のSの量と形態を制御した耐サワーラインパイプが使用される。強度として、X65まで対応可能であるがX70などさらに強度の高い材料の開発を推進している。

(4) マイティーシーム[®]電縫鋼管

石油・天然ガスを生産し輸送する環境はますます厳しくなっている。JFE スチールはラインパイプ用電縫鋼管の素材製造技術およびシーム溶接部の非破壊検査技術の開発に注力し、電縫鋼管の信頼性を飛躍的に向上させた新しい電縫鋼管マイティーシーム[®]を開発し

た。このことにより電縫鋼管の特徴である高寸法精度、高靱性などを生かしたラインパイプの設計が可能となる¹⁰⁾。

(5) ラインパイプ用マルテンサイト系ステンレス (SML)

ラインパイプ用の耐食材料としてはこれまで二相ステンレス鋼などが用いられてきた。しかしながら、二相ステンレス鋼は、優れた耐食性を持つものの、材料コストが非常に高いこと、溶接入熱の管理が難しいこと、過防食に割れが生じやすいことが指摘されてきた。

マルテンサイト系ステンレス鋼^{13,15)}は、適度な耐CO₂腐食性を示し、二相ステンレス鋼に比べコストの低い材料である。

このような背景から、優れた製鋼技術によりCおよびNを低減することで溶接性を改善し、さらに、添加成分を調整することで、溶接性と耐食性に優れたラインパイプ用マルテンサイト系ステンレス継目無鋼管を開発した。

4.1.3 ボイラ・熱交換器用鋼管

JFE スチールは、高温強度、耐酸化性、溶接性の優れたフェライト系合金鋼管の開発・製造を行ってきている¹⁶⁾。

以下に代表的な商品を紹介する。

(1) 改良型 9% Cr-1% Mo 鋼管 (T91/P91 鋼管)

ASME SA213 および SA335 (ASME : The American Society of Mechanical Engineers) に規定される改良型 9% Cr-1% Mo 鋼管「T91/P91 鋼管」をマンネスマン圧延で製造・出荷している。

- (a) 高い外径・肉厚寸法精度をもつスーパーホット鋼管
- (b) 廃熱回収ボイラに多用される長さ約 22 m 程度の超長尺チューブ
- (c) 主蒸気管やヘッダ管に用いられる肉厚 50 mm 程度の極厚・中径鋼管などの特長を有している。

(2) W 添加 2.25% Cr 鋼管 (T23/P23 鋼管)

2001 年に ASME SA213 に T23 として規格登録された本材料は、多量の W を添加した 2.25% Cr-Nb-V 鋼であり、高い高温引張強度とクリープ強度を有する。JFE スチールは、高い高温強度、良好な溶接性と高い耐溶接熱影響部 (heat-affected zone) 割れ性を備えた低 C-低 Al-低 N 組成鋼材を開発し、廃熱回収ボイラの過熱器や再熱器に利用されている。

(3) W 添加 9% Cr 鋼管 (T92/P92 鋼管)

T91/P91 鋼管より優れた高温強度とクリープ強度を有する材料として、2004 年の ASME 規格に T92/P92 鋼管が登録された。本材料は、多量の W を含む 9%Cr-Nb-V 鋼であり、主蒸気管、過熱器および再熱器用に利用される。

表 9 JFE スチールの高張力鋼板 (JFE-HITEN)

Table 9 High strength steel plate of JFE Steel

強度水準	規格名	特長と主な用途
590 N/mm ²	JFE-HITEN590	橋梁、ペンストック、タンク、海洋構造物等用高張力鋼板 U2：耐溶接低温割れ性に優れた高施工型高張力鋼板 E：耐溶接低温割れ性に優れ、大入熱溶接の可能な高張力鋼板 S：建設機械、産業機械用非熱処理型高張力鋼板 SL：低温靱性（-40℃）に優れた上記と同じ用途の非熱処理型高張力鋼板
	JFE-HITEN610	
	JFE-HITEN570U2	
	JFE-HITEN590U2	
	JFE-HITEN610U2	
	JFE-HITEN570E	
	JFE-HITEN590E	
	JFE-HITEN610E	
690 N/mm ²	JFE-HITEN690 JFE-HITEN710	タンク、海洋構造物等用、Ni 無添加型の高張力鋼板
	JFE-HITEN690M JFE-HITEN710M	橋梁、ペンストック、タンク等用の低炭素当量、Ni 添加型高張力鋼板
	JFE-HITEN690S	添加元素を低減し、強度に主眼を置いた建設機械用非熱処理型高張力鋼板
780 N/mm ²	JFE-HITEN780M	橋梁、ペンストック、海洋構造物等用の Ni 添加型高張力鋼板
	JFE-HITEN780EX	橋梁用予熱低減型高性能高張力鋼板
	JFE-HITEN780S	添加元素を低減し、強度に主眼を置いた建設機械用高張力鋼板
	JFE-HITEN780LE	溶接性、低温靱性（-40℃）に優れた建設機械、産業機械用高張力鋼板
980 N/mm ²	JFE-HITEN980	強度、溶接性、靱性に優れたペンストック用高張力鋼板
	JFE-HITEN980S	建設機械、産業機械用高張力鋼板

4.2 厚板

4.2.1 高張力鋼板

高張力鋼板は建築、橋梁、産業機械などに使用されるが、エネルギー関連の設備にも使用される¹⁷⁾。JFE スチールの高張力鋼板を表 9 に示す。高張力鋼板は強度レベル、用途および溶接性および低温靱性などに対する要求特性によって使い分けられる。溶接部の靱性を向上させるための技術として EWEL[®]を開発した¹⁸⁾。

4.2.2 低温用鋼板

極寒地で使用される掘削リグや、プラットフォームでは安全性を確保するために厳しい低温靱性を要求される。このように厳しい低温特性を要求される構造物に対応するために、低温用鋼板がある (表 10)。

表 10 低温用鋼板

Table 10 Steel plate for low temperature application of JFE Steel

JFE 規格	特長
JFE-LT 1.5Ni-TM	低温用アルミキルド鋼は主に LPG 関連機器に広く用いる。液化ガスタンク用材料として脆性き裂の伝播停止特性が重視される。最新の TMCP (thermo-mechanical control process) 技術を適用することにより、優れた強度・靱性を示す。大入熱溶接対策 EWEL [®] の適用も可能。
JFE-LT415TM	従来降伏点 325, 355 N/mm ² 級鋼材が主に使用されていた低温タンクあるいは氷海域用海洋構造物の大型化に対応。TMCP 技術により高強度化・高靱性化を達成、優れた溶接性能を示す。大入熱溶接対策 EWEL [®] の適用も可能。
JFE-HITEN590L JFE-HITEN610L	液化石油ガス (LPG) あるいはエチレン用球形タンク、ジャッキアップリグなどに使用される代表的な高張力鋼板で、優れた低温靱性を示す。
JFE-HITEN590U2L JFE-HITEN610U2L	LPG あるいはエチレン用球形タンク、寒冷域で操業するジャッキアップリグなどの海洋構造物に適用。優れた靱性を示し、溶接時の予熱が大幅に低減できる。
JFE-HITEN690L JFE-HITEN710L JFE-HITEN780L	高価な合金元素を低減し、溶接性を考慮した低温用 690 N/mm ² 級および 780 N/mm ² 級高張力鋼。加圧式タンク、枕型タンクのほか、寒冷域で操業されるジャッキアップリグなどにも適している。
JFE-HITEN780FL	応力腐食割れを考慮し合金元素の Ni を無添加にしたタンク用 780 N/mm ² 級高張力鋼で、低温に晒される加圧型タンク等に使用される。また寒冷域で操業されるジャッキアップリグなどにも適している。
JFE-HITEN780ML	主に氷海域での操業も考慮したジャッキアップリグのレグあるいはコード材用に開発された 780 N/mm ² 級低温用鋼板で、溶接性を考慮しつつ板厚 200 mm まで優れた強度と低温靱性を示す。

掘削リグには、船級協会規格に基づいた、DH36, EH36, FH36 などの高降伏点鋼が多く使用される。中でもジャッキアップリグのレグおよびレグ廻りは高張力鋼が使用され、特にラックは極厚鋼板の HT80 が使用される。ジャッキアップリグは寒冷域にも航行、掘削するので -60℃ という厳しい低温靱性が要求される場合もある。JFE スチールは JFE-HITEN780ML を寒冷地用ラックおよびコード用に開発した。

生産プラットフォームではジャケットをはじめ、TLP (tension leg platform) のトップサイド、パイル、SPAR のトップサイドでは、API 2W 50 (降伏点 355 N/mm² 以上)、60 (同 410 N/mm² 以上) に代表される TMCP (thermo-mechanical control process) 型高張力鋼が使用される。これらの鋼材の溶接継手部には、使用環境温度における、厳格な破壊力学アプローチの一つである CTOD 値が要求され

る。

球形タンク・枕型タンク用途には低温用の JFE-HITEN 'L' シリーズがある。さらに低温で使用できる 2.5% Ni, 3.5% Ni, 9% Ni 系の低温用鋼板も取り揃えている。

4.2.3 耐水素誘起割れ鋼板

当社はこの分野に関しては球形タンク用高張力鋼板の SSCC の問題ならびに H₂S を含む天然ガス輸送パイプの HIC の問題に対して活発に研究をすすめ、H₂S の関与する環境への使用に適した材料耐水素誘起割れ鋼板 (JFE-AH1 および JFE-AH2) を提供している。

4.2.4 ステンレス鋼クラッド鋼板

クラッド厚鋼板は、炭素鋼または低合金鋼の鋼板 (母材) の片面または両面に、ステンレス鋼板など (合わせ材) を接合した複合鋼板である。クラッド厚鋼板は、構造部材として必要な強度をもつと同時に (母材部分)、耐熱性、耐食性などの機能も兼ね備え (合わせ材部分)、しかも、母材部分まで合わせ材と同一の材質で製造するのに比し安価であるという優れた特長をもっている。

このため、クラッド厚鋼板は、圧力容器、造船、海水淡水化装置など、種々の産業分野までに使用される。

クラッド鋼板の製造方法は種々あるが、当社では圧延方式により製造しており、

- (1) 優れた接合特性
- (2) 安定した性能
- (3) 広幅、長尺鋼板の製造が可能
- (4) 優れた寸法精度
- (5) 迅速、かつ確実な納期対応

などの特長をもち、幅広い分野で使用されている。

ダムにおいても放流管などにステンレス鋼およびクラッド鋼が使用される。また、石油の精製工程において耐食性に優れたクラッド鋼板が多く使用されている。

4.2.5 造船用鋼材

タンカー、コンテナ船、バルクキャリアなどの船舶の軽量化・高速化、建造能率の向上、長寿命化という多岐にわたる課題に JFE スチールは常に挑戦してきた。

造船用鋼板の歴史は、TMCP による溶接性が向上した高張力鋼の歴史である。TMCP のパイオニアとして JFE スチールは第 2 世代の TMCP 技術、Super-OLAC[®] を登場させた。造船に使用される高張力鋼板はほとんどこの技術を適用している。

LPG 船の完全冷却方式では -45 ~ -50℃ という低温で使用され、しかも溶接線が長く高効率の溶接が施される。鋼板には溶接熱影響部も含め、優れた靱性が求められる。JFE スチールでは EWEL[®] 技術により優れた溶接熱影響部の靱性を確保し、多くの LPG 船に採用されている。

原油タンカーにおいては原油タンク底板で激しい孔食を生じる場合がある。JFE スチールはこの腐食を防止するために、原油タンク用耐食鋼「JFE-SIP-OT」を開発した¹⁹⁾。

4.2.6 格納容器用鋼材

原子力発電では鋼製格納容器にSGV480 鋼あるいは高張力鋼 SPV490 が、压力容器では極厚で大単重の SQV2 が使用され、JFE スチールでは厳格な品質管理のもと、数々の製造実績がある。

5. 結言

エネルギーを利用するために各種の施設やプラントにおいて鋼材は重要な役割を果たしている。特に石油・天然ガスの開発、生産、輸送、利用の各段階において高度の特性と信頼性を有する鋼材はお客様から大きな信頼を得ている。

参考文献

- 1) International Energy Outlook 2011. U. S. Energy Information Administration.
- 2) 弟子丸慎一ほか。エネルギーの生産、輸送、貯蔵に使用される鋼材。JFE 技報。2003, no. 2, p. 51-62.
- 3) 鈴木信久ほか。高強度パイプラインの安全性評価。JFE 技報。no. 17, 2007, p. 14-19.
- 4) 木村光男ほか。耐食性に優れた油井管用高強度 Cr 鋼管。JFE 技報。2005, no. 9, p. 7-12.
- 5) 木村光男ほか。高深度油井・ガス井における腐食と高耐食油井管。JFE 技報。2007, no. 17, p. 42-46.
- 6) 高性能特殊ねじ継手付マルテンサイト系ステンレス鋼油井用鋼管「HP13CR」, 「UHP15CR」, 「JFEBEAR」, 「Clear-Run」。JFE 技報。2007, no. 17, p. 59-61.
- 7) 石川信行ほか。ラインパイプ用高性能 UOE 鋼管。JFE 技報。2005, no. 9, p. 19-24.
- 8) 小出竜男ほか。ラインパイプ用高強度高靱性 ERW 鋼管。JFE 技報。2005, no. 9, p. 13-18.
- 9) 中田博士ほか。低温靱性に優れた X80 電縫鋼管ラインパイプ。JFE 技

報。2007, no. 17, p. 37-41.

- 10) 井上智弘ほか。溶接部品質に優れたラインパイプ用電縫鋼管「マイティシーム®」の開発。JFE 技報。2011, no. 29, p. 17-21.
- 11) ラインパイプ用マルテンサイトステンレス鋼継目無鋼管。JFE 技報。2007, no. 17, p. 62.
- 12) 岡津光弘ほか。耐ひずみ事項特性に優れた高強度高変形ラインパイプの開発。JFE 技報。2007, no. 17, p. 20-15.
- 13) 鈴木信久ほか。高強度ラインパイプの変形性能。JFE 技報。2007, no. 17, p. 31-36.
- 14) 石川信行ほか。超高強度高変形ラインパイプの開発。JFE 技報。2007, no. 17, p. 26-30.
- 15) 宮田由紀夫ほか。ラインパイプ用マルテンサイト系ステンレス鋼継目無鋼管。JFE 技報。2005, no. 9, p. 13-18.
- 16) ラインパイプ用マルテンサイトステンレス鋼継目無鋼管。JFE 技報。2007, no. 17, p. 62.
- 17) 林謙次ほか。タンク・压力容器用高性能鋼板 - エネルギー産業を支える溶接性に優れた高靱性鋼板。JFE 技報。2004, no. 5, p. 56-62.
- 18) 一宮克行ほか。「JFE-EWEL®」技術を適用した大入熱溶接仕様 YP460 級鋼板。JFE 技報。no. 18, 2008, p. 13-17.
- 19) 猪原康人ほか。タンカー原油タンク用耐食鋼「JFE-SIP-OT」。JFE 技報。2008, no. 18, p. 53-56.



正村 克身



大井 健次