

## 建設・産業機械，プラント用鋼材

### Steel Products for Construction, Industrial Machinery and Plant

林 謙次	HAYASHI Kenji	JFE スチール	スチール研究所	厚板・形鋼研究部	主任研究員(副課長)
小関 智也	KOSEKI Tomoya	JFE スチール	知多製造所	商品技術部	主任部員(副部長)
小川 隆生	OGAWA Takao	JFE スチール	棒線セクター部		主任部員(副部長)
池田 倫正	IKEDA Rinsei	JFE スチール	スチール研究所	接合・強度研究部	主任研究員(課長)
畠山耕太郎	HATAKEYAMA Kotaro	JFE スチール	厚板セクター部		主任部員(部長)

#### 要旨

建設，産業機械分野では，軽量化のニーズから，最も高張力鋼の使用が進んでいる。JFE スチールでは，左記分野向けに独自性に富んだ鋼板，棒鋼，溶接材料を開発，製造している。また，火力発電プラント分野では，高効率発電に適応する材料が求められており，高温強度や耐酸化特性を改善した火力発電ボイラー用高 Cr 合金鋼管を開発，製造している。これらの商品は市場より高い評価を受け，生産量を伸ばしている。本章では，上記商品の商品設計の考え方ならびに特性について，紹介する。

#### Abstract:

In the field of construction and industrial machinery, the use of extremely high strength steel is promoted in view of the needs for reducing weights. JFE Steel has been developing and manufacturing steel plates, steel bars and welding materials having properties suitable specifically for the above-mentioned fields. In the field of power generation plant, materials applicable to highly efficient power generation is required. High Cr alloy steel pipes having improved high-temperature strength and resistance to oxidation have been developing and manufacturing for the heat recovery steam generator. With high appreciation in the market, the production amounts of these products have been increasing. In this paper, the product design and the properties are discussed.

#### 1. はじめに

クレーン，ダンパー，パワーシャベルなどの建設機械では，軽量化のニーズから，最も高張力鋼の使用が進んでいる。JFE スチールでは，上記分野向けに独自性に富んだ鋼板，棒鋼，溶接材料を開発，製造している。また，火力発電プラント分野では，高効率発電に適応する材料が求められている。JFE スチールでは，火力発電ボイラー用として，高温強度や耐酸化特性を改善した高 Cr 合金鋼管を開発，製造している。

本章では，上記商品の商品設計の考え方ならびに特性について，紹介する。

#### 2. 厚板

##### 2.1 建設・産業機械用新高張力鋼 「JFE-HITEN780LE」

建設・産業機械などで使用される鋼板においては，構造物としての軽量化の観点から高強度化のニーズが強い。たとえば，クレーンのブームやアウトリガーなどの部位には，780 MPa 級の引張強度を有する高張力鋼板が使用される場合が多い。近年，これら建設・産業機械用高張力鋼板に対する要求性能は多種・多様化しており，低温靱性の確保による寒冷地での使用の配慮，溶接時の予熱低減による施工性の改善などが挙げられる。また，曲げ加工性の改善も求められる場合が多い。しかも，これらの要求性能を満足させながら経済性を確保することが大前提となっている。

Table 1 Specifications of JFE-HITEN780LE

Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	vE <sub>-40</sub> (J)	C <sub>eq</sub> <sup>L*</sup> (mass%)
6 -19	≥685	780-930	≥40	≤0.40
19.1-32				≤0.43

$$*C_{eq}^L = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

Table 2 Typical Chemical composition of JFE-HITEN780LE (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Others	C <sub>eq</sub> <sup>L</sup>
0.15	0.38	1.18	0.012	0.002	Nb, V, Ti, etc.	0.39

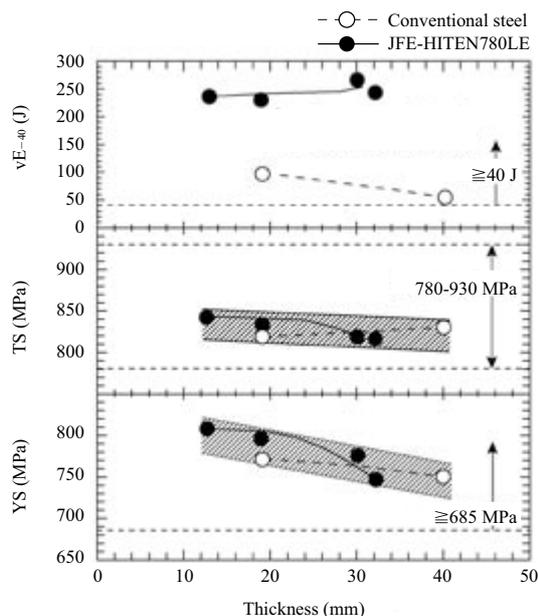


Fig. 1 Mechanical properties of JFE-HITEN780LE

当社では上記ニーズに応え、従来商品より溶接性を向上させ、さらに -40 という低温度での靱性を保証した 780 MPa 級鋼板「JFE-HITEN780LE」を開発・商品化している。

JFE-HITEN780LE の規格を Table 1 に示す。板厚は実際の使用を考慮して最大 32 mm とし、溶接性を考慮して板厚に応じて炭素当量 (C<sub>eq</sub><sup>L</sup>) の最大値を 0.40 あるいは 0.43 % としている。また、寒冷地での使用に配慮し、-40 でのシャルピー吸収エネルギーを保証している。

開発鋼板の化学組成を Table 2 に示す。本開発商品では、マイクロアロイング技術と Super-OLAC (online accelerated cooling) に代表される加工熱処理・制御熱処理技術の活用/融合により、780 MPa 級高張力鋼板の低温靱性を飛躍的に向上させている。

本鋼板の強度および低温靱性を Fig. 1 に示す。本鋼板は 780 MPa 級として十分な強度を有するとともに、従来の鋼板を格段に上回る低温靱性が得られている。また、Table 3 に示すように、より厳しい 200 mm 幅の曲げ試験においても、板厚の 1.5 倍の曲げ半径で割れは生じておらず、優れた加工性をも兼ね備えている。

Table 3 Bending test results of JFE-HITEN780LE (Bending radius : 1.5 t)

Thickness (mm)	Specimen size, t × w (mm)	Direction	Result
12.8	(Full thickness) × 38	L	Good
		C	Good
	(Full thickness) × 200	C	Good
32.0	(Full thickness) × 38	L	Good
		C	Good
	(Full thickness) × 200	C	Good

本鋼板は、建設・産業機械用高張力鋼板分野で世界初となる -40 での靱性を保証しており、寒冷地での使用が可能となるほか、耐衝撃性や安全性の面からも優れた商品である。また、溶接性を考慮して炭素当量を抑えた結果、CO<sub>2</sub> 溶接で余熱温度を 25 以下まで下げることができ、施工性にも優れた商品である。さらに、曲げ加工性にも優れることから、広い部品用途での使用が可能となる。

## 2.2 新耐磨耗鋼「JFE-EH シリーズ」

建設機械であるダンプカーの荷台やショベルカーのパケットなどの部位には、鉱石や土砂などによって磨耗を受けることから耐磨耗性に優れることが強く望まれている。この場合、耐磨耗性は鋼板の表面硬度と相関があるため、高い表面硬度を有する耐磨耗鋼板が使用される。

近年、これらの耐磨耗鋼板に対し、低温靱性や溶接施工性の改善が求められている。当社では、これらのニーズに応え、経済性に優れ、かつ、従来商品よりも溶接性を向上させ、さらに、-40 という低温度での靱性を保証した耐磨耗鋼板 JFE-EH360LE および JFE-EH500LE を開発している。

JFE-EH360LE および JFE-EH500LE の規格を Table 4 に示す。JFE-HITEN780LE と同様に、板厚は実際の使用を考慮して最大 32 mm までとし、炭素当量を低減し、-40 での吸収エネルギー値を保証している。

開発した鋼板の化学組成を Table 5 に示す。硬度と溶接性のバランスを考慮して、最適な C 量、炭素当量、焼入れ性を選定した。さらに旧オーステナイト粒を微細化するためマイクロアロイを添加した。開発鋼板の硬度、低温靱性を Fig. 2 に示す。開発鋼板は従来鋼板と同等の硬度を有しつつ、耐磨耗鋼板としては極めて優れた低温靱性を有していることが分かる。

Table 4 Specifications of JFE-EH360LE and 500LE

Grade	Thickness (mm)	HBW (10/3 000)	C <sub>eq</sub> <sup>L*</sup> (mass%)
JFE-EH360LE	6 -19	361-440	≤0.40
	19.1-32		≤0.43
JFE-EH500LE	6 -19	477-556	≤0.55
	19.1-32		≤0.58

Charpy absorbed energy value is guaranteed at -40°C

$$*C_{eq}^L = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

Table 5 Typical chemical composition of JFE-EH360LE and EH500LE (mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Others	C <sub>eq</sub> <sup>L*</sup>
EH360LE	0.15	0.41	1.20	0.013	0.002	Nb,V,Ti,etc.	0.39
EH500LE	0.26	0.31	1.33	0.010	0.002	Nb,V,Ti,etc.	0.53

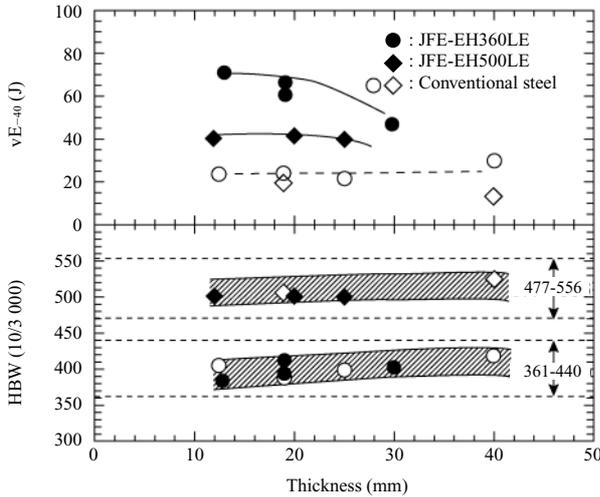


Fig.2 Brinell hardness test results and Charpy impact test results of JFE-EH360LE and EH500LE

JFE-EH360LE および JFE-500LE は、耐磨耗鋼としては世界初となる -40 での靱性を保証しており、JFE-HITEN780LE と同様に寒冷地での使用が可能となる。

### 3. 鋼管

#### 3.1 火力ボイラ用スーパー 9Cr 鋼管

高効率発電のための高温用ボイラには、高温強度・耐酸化特性に優れた改良型 9Cr-1Mo 鋼管 (ASME SA213 T91 および SA335 P91, スーパー 9Cr 鋼と略称) が多用される。

1980 年後半のマンネスマン圧延法での鋼管製造以来、(1) 高い外径・肉厚寸法精度をもつ高寸法精度鋼管 (スーパーホット鋼管) の開発 (Table 6)、(2) 環境に優しく高い発電効率をもつ廃熱回収ボイラ (heat recovery steam generator) に適用される長さ 22 m 程度の超長尺チューブの製造開発、(3) 主蒸気管やヘッダー管に使用される中径の 35 mm ~ 50 mm 極厚鋼管の製造開発、(4) NDI 全面品質保証体制の整備など常に時代の要求に応える製品としての改良が加えられ、出荷実績も着実に増加するに至っている (Fig. 3)。

Table 6 Permissible variation

Tolerance of outside diameter (mm)			
ASME 450		Super hot	
OD	Tolerance	OD	Tolerance
≦101.6	+0.4	≦50.8	±0.25
	-0.8	≦76.8	±0.30
		≦101.6	±0.40

Tolerance of wall thickness			
OD (mm)	Wall thickness (mm)	SA450 (%)	Super hot (%)
≦101.6	≦2.4	0/+40	0/+35
	≦3.8	0/+35	0/+28
	≦4.6	0/+33	0/+24
	4.6<	0/+28	0/+22

ASME450 : Standard specification for general requirements for carbon, ferritic alloy, and austenitic alloy steel tubes  
 Super hot : Hot-finished seamless tube with narrow dimensional tolerance

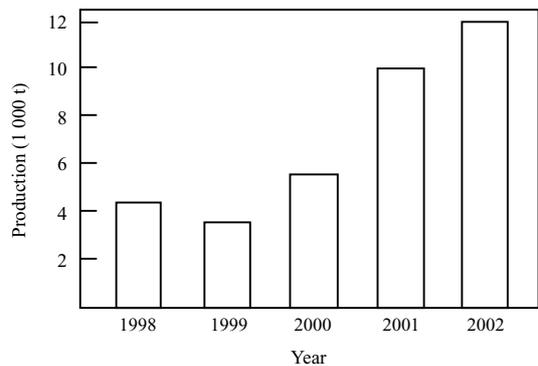


Fig.3 Supply trend of modified 9Cr steel pipe

#### 3.2 W 添加 2.25% Cr 鋼管

ボイラ鋼管の新鋼種として、2001 年に W 添加 2.25% Cr 鋼が ASME 規格に登録 (ASME SA213 T23) された (Table 7)。本材料は、多量の W を添加した 2.25% Cr-Nb-V 鋼であり、従来の 2.25% Cr-1% Mo 鋼に比べ、著しく高温強度特性が改善された材料である。

- JFE スチールは、1980 年台に本鋼の化学組成の特許を取得し、90 年台に工程生産化検討を開始し、現在徐々に出荷実績が伸びている。JFE スチール製の本鋼管の特長は、
- (1) 低 C とすることで予熱・後熱処理不要となる良好な溶接性を具備
  - (2) 低 C - 低 N とすることで良好な溶接熱影響部の耐割れ

Table 7 Chemical composition of T23 (mass%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V	Nb	W	B	N	Al
0.04-0.10	0.10-0.60	Max. 0.030	Max. 0.010	Max. 0.50	1.90-2.60	0.20-0.30	0.20-0.30	0.02-0.08	1.45-1.74	5-60 ppm	Max. 0.030	Max. 0.030

Table 8 Tensile properties

	T23		T22	
	YS (MPa)	TS (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)
Spec.(RT)	≧400	≧510	≧205	≧415
RT	505	613	286	495
400°C	434	558	280	498
550°C	403	455	249	395
600°C	354	401	199	298

性を確保

(3) Al 量の極限までの低減による良好な高温長時間クリープ特性の確保

がある。熱伝導度や線膨張率などの各種物性値は従来型の 2.25%Cr-1%Mo 鋼と同程度で、常・高温引張強さ (Table 8) と高温クリープ強度が高いという特徴を持つため、従来鋼管と同じ部位に適用する場合は、使用鋼管の薄肉・軽量化がはかられ、溶接コスト，鋼材購入費，施工運搬コスト削減など大きな経済効果が期待できる。

JFE スチールの高 Cr 合金鋼管は、素材の溶製，熱間圧延法および品質保証システムにそれぞれ特長と優位性を持った製造ラインから生産され、信頼性の高い高品質製品である。

4. 産業機械用非調質棒鋼・線材

4.1 直接切削用高強度非調質鋼

近年炭素鋼，合金鋼の熱処理を省略できる非調質鋼が広く用いられている。ここでは SCM440 の焼入・焼戻し材の代替として開発した 900 MPa 級直接切削用非調質鋼 NH48MV について紹介する。主な用途は太径の丸棒を使用する射出成形機やダイキャストのタイバー，スクリュー，シリンダーや変速機の出力軸，各種シャフトである。高強度を得るために，Mn, Cr をマトリックス中に固溶させることによる強化と V の炭窒化物をマトリックス中に微細析出させることによる強化を併用している。化学組成の例を Table 9 に示す。

機械的性質は Table 10 に示すように，棒鋼径によらず引張強さは 930 ~ 990 MPa を示し，硬さ (HB) は 270 ~ 280 と安定している。これは Fig. 4 に示すように，焼入・焼戻し材は棒鋼断面の内部では機械的特性が低下するのに対し，開発鋼は棒鋼断面内で均一である特性による。衝撃値は太径になるほど若干の低下があるが，100 mm 棒

Table 9 Chemical composition of NH48MV

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0.46-0.50	0.10-0.30	1.30-1.60	≦0.020	0.020-0.050	Added	Added

Table 10 Mechanical properties of NH48MV (60-190 mm)

YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	Hardness (HB)	Impact energy (J/cm <sup>2</sup> )
610-670	930-990	16-22	270-284	40-64

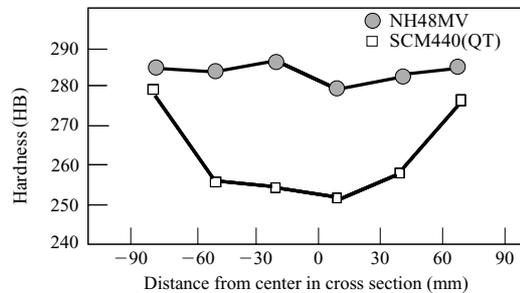


Fig.4 Hardness distribution in 190 mm bar

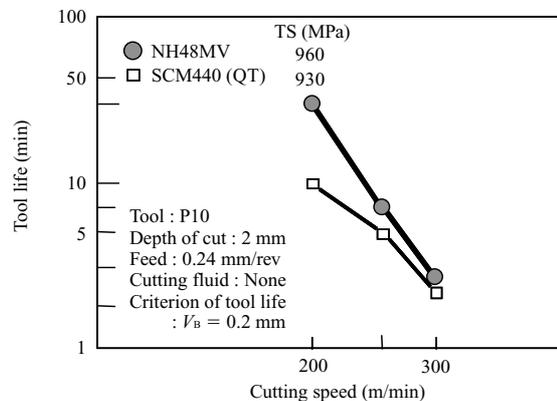


Fig.5 Result of tool life test in cutting

鋼で約 60 J/cm<sup>2</sup> を確保している。被削性は Fig. 5 に示すように，SCM440 の焼入・焼戻し材に比べて向上している。

4.2 ベイナイト系熱間鍛造用非調質鋼

機械構造用炭素鋼および合金鋼は焼入・焼戻しを施して製品化されるが，省資源，省コスト，省エネルギーの観点から熱処理工程を省略できる非調質鋼への切替が進んでいる。本鋼は熱間鍛造空冷ままでベイナイト組織を有し，C 低減による高靱性化，Mn, Cr, V による高強度化，Ti による結晶粒微細化を図ったものである。Table 11 に化学組成例を，Table 12 に機械的性質例を示す。本鋼は建設機械などの機械部品 (シャフト類) に適用されている。

4.3 TQF 棒鋼

本鋼は 棒鋼仕上圧延後水冷装置で直接焼入 (加速冷却) し，水冷装置通過後，内部の保有熱の自己焼戻しにより表面部は焼戻しマルテンサイト，内部は微細なフェライト・パーライト組織を形成し，高い強度と靱性を兼ね備えている。本鋼はお客様による高周波焼入加熱時にオーステナイ

Table 11 Examples of chemical composition of bainitic microalloyed steels

Steel	(mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	V
TBH800	0.18	0.29	1.78	0.016	0.025	0.59	Added	Added
TBH900	0.25	0.20	1.89	0.016	0.058	0.59	Added	Added

Table 12 Examples of mechanical properties of bainitic microalloyed steels

Steel	Size	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)	Hardness, HB	Charpy impact value, vE <sub>20</sub> (J/cm <sup>2</sup> )
TBH800	60 mm	566	820	21	51	247	78
TBH900	60 mm	683	930	18	49	287	64

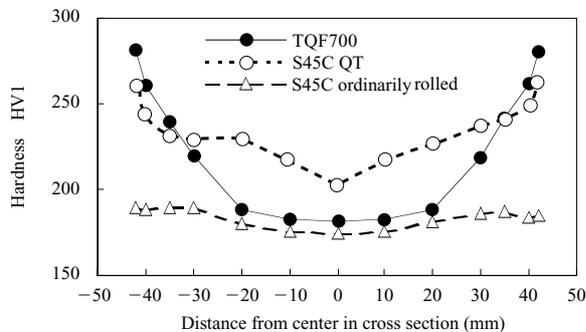


Fig. 6 Example of hardness distribution in 85 mm bars

ト化が短時間で均一になされ，硬化層深さや硬さのパラッキの少ない特長を有しており，耐久性も良好である。Fig. 6 に TQF 棒鋼の断面硬さ分布例を示す。本鋼は建設機械（パワーショベル，ブルドーザー）用ピストンロッドあるいはピン，シャフト類に適用されている。

### 5. 低スパッタ溶接技術

近年，ガスシールドアーク溶接の自動化および高能率が急速に進んでおり，溶接時に発生するスパッタに対してもその低減が強く求められている。このニーズに対応するため，スパッタ発生を極力抑制した各種溶接ワイヤを開発した。Table 13 に一覧を示すが，いずれのワイヤについても伸線過程でワイヤ内部に K を添加する JFE 独自の製造技術が適用されている。

ガスシールドアーク溶接方法は，低コスト・高能率な溶接である CO<sub>2</sub> アーク溶接法と高品質な溶接が可能である MAG 溶接法に大別されるが，溶接ワイヤ KC-50DH および KC-55G は CO<sub>2</sub> アーク溶接に用いられる。K 添加によ

Table 13 Low spatter welding wires

JIS Z3312	Shielding gas	Strength	Brand name
YGW-11	CO <sub>2</sub>	490 MPa	KC-50DH
YGW-18	CO <sub>2</sub>	540 MPa	KC-55G
YGW-15	Ar-20%CO <sub>2</sub>	490 MPa	KM-50SH
YGW-17	Ar-20%CO <sub>2</sub>	420 MPa	KM-50S

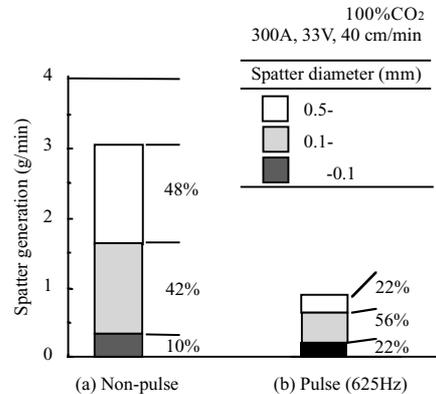


Fig. 7 Spatter generation in non-pulse and pulse CO<sub>2</sub> arc welding

り溶接アークプラズマの電位傾度を緩和することで，溶滴（溶接アーク熱によって形成されるワイヤ先端の溶融部）下部へのアーク集中を抑制し，スパッタ発生量を低減した。KM-50SH は MAG 溶接に用いられるが，K 添加により溶滴移行のスプレー化を促進することで低スパッタ化を実現した。さらに，パルス MAG 溶接に用いられる KM-50S では，K 添加に加えて溶滴の表面張力と粘性を低下させることでスパッタレス化を達成している。

CO<sub>2</sub> アーク溶接では，Fig. 7 に示すようにスパッタ発生量を約 70% 低減できる高周波パルス溶接法を開発している。ワイヤの化学組成の最適化および溶接電流の高周波パルス化によって懸垂溶滴に振動を生じさせ，さらに，パルスピーク期間に強いアークピンチ力を加えて移行溶滴を微細化することで，極低スパッタ化を達成している。

### 6. おわりに

上述した商品はどれも，需要家のニーズにマッチしたそのユニークな商品設計，高性能・高品質により国内外の市場から高い評価を受け，生産量を伸ばしている。一口に建設・産業機械，プラント分野と言っても，その対象は広く，そのニーズもさまざまである。JFE スチールは，最新鋭設備の活用と高い品質管理体制により，今後も，市場のさまざまなニーズに即応し，独自性に富んだ商品開発を推進する考えである。



林 謙次



小関 智也



小川 隆生



池田 倫正



畠山耕太郎