

建設・産業機械用高性能鋼板 強靱性と溶接・加工性を両立させた 次世代型建設・産業機械用鋼板

High Performance Steel Plates for Construction and Industrial Machinery Use —New Steel Plates for Construction and Industrial Machinery Use, Having High Strength and Superior Toughness, Combined with Good Weldability and Formability—

室田 康宏 MUROTA Yasuhiro JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(係長)
阿部 隆 ABE Takashi JFE スチール 厚板セクター部 主任部員(副部長)・工博
橋本 正幸 HASHIMOTO Masayuki JFE スチール 東日本製鉄所 商品技術部厚板室 主任部員(副課長)

要旨

近年、建設・産業機械用鋼板に対し、低温靱性の確保による寒冷地での使用への配慮、溶接時の予熱低減など施工性の改善が要求されている。JFE スチールでは、上記ニーズに応え、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建設・産業機械用耐摩耗鋼板「JFE-EH360LE/EH500LE」ならびに 780 MPa 級高張力鋼板「JFE-HITEN780LE」を開発した。開発鋼は、溶接性を考慮して炭素当量 (C_{eq}) を低減した上で、適切な C 量、焼入れ性 (D_1) を確保することにより、高硬度化または高強度化を達成した。また、マイクロアロイング技術と加工熱処理・制御熱処理技術を活用し旧オーステナイト粒を微細化することにより -40 という低温度での靱性改善に成功した。

Abstract:

The requirements placed on the steel plates for construction and industry machinery use have diversified in recent years, as exemplified by low temperature toughness to enable use in cold districts and improved weldability by lowering preheating temperature for welding. In order to meet these requirements, JFE Steel has developed new abrasion resistance steel plates “JFE-EH360LE/EH500LE” and a new high strength steel plate “JFE-HITEN780LE” with good weldability and low temperature toughness guaranteed at -40°C . These steel plates developed have high hardness or high strength by selecting the optimum C content and hardenability (D_1), and reducing the carbon equivalent (C_{eq}) in consideration of weldability. The low temperature toughness of these developed steel plates has been improved by applying the technologies of microalloying, thermo-mechanical controlled process, and controlled heat treatment process to refine prior austenite grains.

1. はじめに

建設・産業機械などで使用される鋼板においては、鉱石や土砂などによって摩耗を受けることから耐摩耗性に優れること、構造物としての軽量化の観点から高強度であることが強く望まれている。たとえば、ダンプトラックの荷台、ショベルカーのバケットなどの部位で、耐摩耗性に優れることが要求される。このような用途では、耐摩耗性は鋼板の表面硬さと強い相関があるため¹⁾、高い表面硬さを有する耐摩耗鋼板が使用される。クレーンのブーム、アウトリガーなどの部位では、高強度であることが要求され

780 MPa 級の高張力鋼板が使用される場合が多い。

近年、これら建設・産業機械用鋼板に対する要求性能は多種・多様化している。たとえば、低温靱性の確保による寒冷地での使用に対する配慮、施工性改善のための溶接時の予熱低減などが求められる。また、曲げ加工性の改善も要求される場合が多い。

JFE スチールでは、上記ニーズに応え、溶接性に優れかつ -40 という低温での靱性を保証した耐摩耗鋼板「JFE-EH360LE/JFE-EH500LE」ならびに 780 MPa 級高張力鋼板「JFE-HITEN780LE」を開発した。

本報告では、これら建設・産業機械用高性能鋼板の開発経緯と開発鋼の性能について報告する。

2. 開発経緯

2.1 開発目標

建設・産業機械用耐摩耗鋼板および 780 MPa 級高張力鋼板の開発目標を Table 1 2 に示す。板厚は、耐摩耗鋼板高張力鋼板ともに実際の使用を考慮して最大 32 mm とし溶接性を考慮して炭素当量 (C_{eq}) を規格と板厚に応じて低減することとした。また、寒冷地での使用を考慮し、規格に応じて -40 °C のシャルピー吸収エネルギーを保証した。

2.2 高硬度化および高強度化のための製造指針

耐摩耗鋼板に関して、まず、鋼板の耐摩耗性の向上、つまり、鋼板の高硬度化についての検討を実施した。

鋼板の硬さは C 量と焼入れ熱処理後のマルテンサイト量で一義的に決定される²⁾。したがって、目標硬さを得るための C 量と焼入れ後にフルマルテンサイトとするための焼入性を同時に確保する成分設計が重要となる。

著者らは、フルマルテンサイト組織の硬さに及ぼす C 量の影響を調査した。供試鋼として、0.10–0.32 mass% の C 量を有する鋼板を用い、これら鋼板に焼入れを行い、フルマルテンサイト組織とした後に表面ブリネル硬さを測定した (Fig. 1)。耐摩耗鋼板の開発目標硬さである HBW : 361 以上、または、HBW : 477 以上を得るための最低 C 量はそれぞれ 0.14 mass%、0.26 mass% であることを確認した。

また、焼入性に関しては、その指標として用いられる焼入性指数 (以下 D_I , 式 (1)^{3,4)}) を用いて、開発目標最大板厚 32 mm において、安定してフルマルテンサイト組織とすることを前提に検討した。

Table 1 Target properties of new abrasion resistant steel plates “JFE-EH360LE/EH500LE”

Grade	Thickness (mm)	Surface hardness, HBW10/3000	C_{eq}^* (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

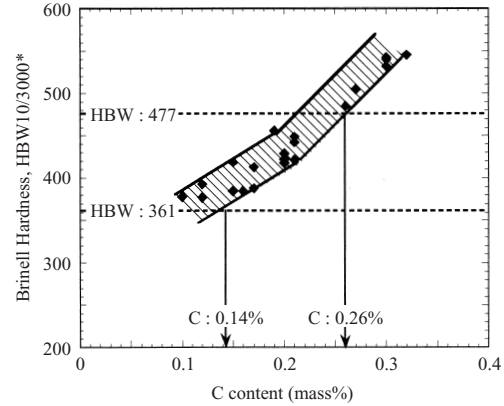
* $C_{eq} = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5$

Table 2 Target properties of new high strength steel plates “JFE-HITEN780LE”

Grade	Thickness (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	C_{eq}^* (mass%)
JFE-HITEN780LE	6–19	≥ 685	780–930	≤ 0.40
	19.1–32			≤ 0.43

Charpy absorbed energy value is guaranteed at -40°C

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



*With 10 mm ϕ ball subjected to a load of 3 000 kgf

Fig. 1 Effect of C content on surface hardness

$$D_I = D_{IC} \times MF_{Si} \times MF_{Mn} \times MF_{Cr} \times MF_{Mo} \times MF_{Ni} \times MF_V \times MF_B \times MF_{Cu} + 25.4 \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$D_{IC} = (C/10)^{1/2} \times (1.70 - 0.09N)$$

N : オーステナイト粒度番号

$$MF_{Si} = 0.70Si + 1$$

$$MF_{Mn} = 3.33Mn + 1$$

$$MF_{Cr} = 2.16Cr + 1$$

$$MF_{Mo} = 3.00Mo + 1$$

$$MF_{Ni} = 0.36Ni + 1$$

$$MF_V = 1.75V + 1$$

$$MF_B = 1.3 \text{ (B 添加のとき)}$$

$$= 1.0 \text{ (B 無添加のとき)}$$

$$MF_{Cu} = 0.35Cu + 1$$

C を 0.14–0.15 mass% 含み、Cr、Cu、Ni、Mo、V、Ti、B などの各種合金元素を適宜含んだ鋼材より、3 mm ϕ \times 10 mm の小型円柱状試験片を採取し、熱処理シミュレーター (フォーマスタ、富士電波工機 株) 製) を用いて Ar_3 点以上に加熱後 0.5–40 /s の冷却速度下で冷却しそれぞれの化学組成でフルマルテンサイト組織を得るための臨界冷却速度を調査した。この時、調査に用いた鋼材の D_I は 40–83 mm とした。

Fig. 2 に臨界冷却速度と D_I の関係を示す。開発目標最大板厚である 32 mm の冷却速度条件下で焼入れ後にフルマルテンサイト組織を得るためには $D_I \geq 45$ mm が必要であることを確認した。

したがって、耐摩耗鋼板の成分設計として、表面硬さ HBW : 361 以上または HBW : 477 以上の高硬度を得るためには、それぞれ C 量を 0.14 mass% 以上、0.26 mass% 以上とし、溶接性を考慮して炭素当量を低減した上で D_I を 45 mm 以上確保する必要がある。また、製造プロセスとして、耐摩耗鋼板のような高硬度鋼で発生しやすい遅れ破壊や焼割れを防止し、熱処理ひずみを軽減した鋼板を製造するためには、焼入れ時の冷却速度や冷却停止温度など

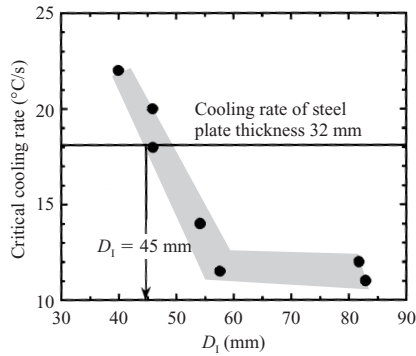


Fig. 2 Relationship between D_1 and critical cooling rate to obtain martensitic structure

を適切に制御する制御熱処理を適用することが有効である。

一方、高張力鋼板では、高強度と高溶接施工性を両立するためには、より低成分で高強度化を達成する必要がある。著者らは、引張強さに及ぼすC量の影響 D_1 の影響などを調査した結果、適切なC量 D_1 を選定し、さらにNb, Ti, Vなどの微量元素添加によるマイクロアロイング技術と当社が独自に開発実機化したオンライン加速冷却設備 (*Super-OLAC*⁵⁾)を導入したTMCPプロセスを適用することにより、780 MPa級の高強度と高溶接施工性と両立が可能であることを見出した。

2.3 低温靱性向上のための製造指針

マルテンサイト鋼において、靱性を支配する基本的な組織単位はパケットであり、パケットサイズは旧オーステナイト粒の微細化にともない小さくなることが知られている⁶⁾。本開発では Fig. 3に示すように、マイクロアロイング技術と加工熱処理技術の活用により、マルテンサイト鋼の旧オーステナイト粒の微細化に取り組んだ。

Nb, Ti, Vに代表されるマイクロアロイ元素は、固溶原子によるドラッグ効果、析出物によるピンニング効果を

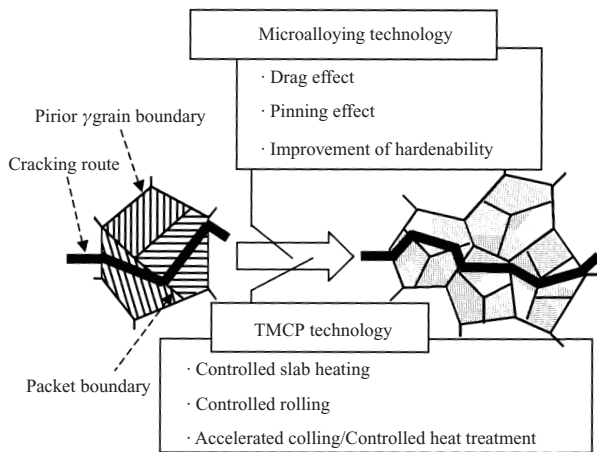


Fig. 3 Effects of microalloying and TMCP technology on refinement of packet size

通じてオーステナイト粒の微細化に寄与する。また、オーステナイト内へ固溶することで焼入性を向上させる効果も有している。これらの効果が得られる合金設計を行った上で、製造プロセスでは、スラブの加熱温度制御および制御圧延・制御熱処理によるオーステナイト粒の微細化を検討した。

Table 3に示す化学組成を有するマルテンサイト鋼の旧オーステナイト粒観察結果をPhoto 1に示す。上記オーステナイト粒微細化技術を活用することで従来40-50 μm 程度と粗大であった旧オーステナイト粒を約20 μm 以下まで微細化することに成功した。また Photo 1に示した旧オーステナイト粒径を有する鋼板のシャルピー衝撃試験における脆性破壊亀裂伝播経路をPhoto 2に示す。これらの観察試験片はシャルピー衝撃試験が可能な最低温度である-196で試験を実施し、故意に脆性破壊させた場合の破面の断面マイクロ組織写真である。開発鋼は、従来鋼と比較し、破面の凹凸が微細になっている。これは靱性を

Table 3 Chemical compositions of developed and conventional steels (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Others	C_{eq} *	D_1 (mm)
Developed steel	0.15	0.41	1.20	0.013	0.002	Nb, V, Ti, etc.	0.39	46
Conventional steel	0.15	0.34	1.44	0.020	0.006	Cr, Ti, B	0.45	48

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

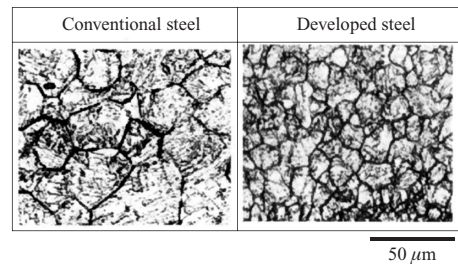


Photo 1 Prior austenite grains of developed and conventional steels

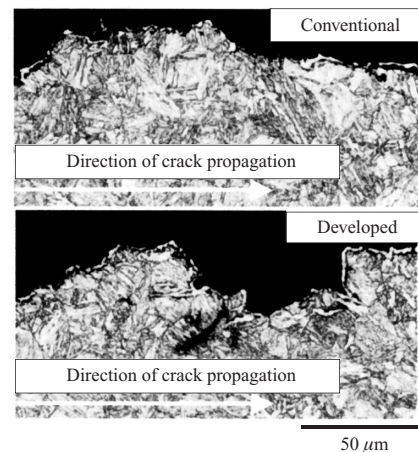


Photo 2 Cracking paths of developed and conventional steels

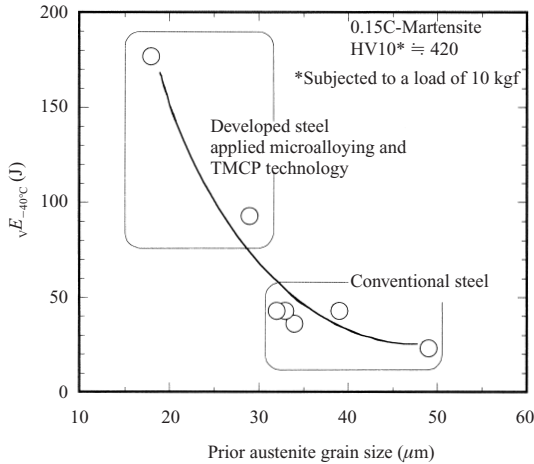


Fig. 4 Influence of prior austenite grain size on Charpy impact energy at -40°C

を支配する組織単位であるバケットサイズが小さくなっていることを示しており、この結果より、開発鋼は旧オーステナイト粒の微細化にともない、バケットの微細化が達成されていることが確認できる。Cを0.15 mass%含みマルテンサイト組織を有する鋼板を用い、旧オーステナイト粒径と低温靱性の関係を調査した結果を Fig. 4 に示す。いずれの鋼板もシャルピー衝撃試験片を採取した板厚中央部付近の硬さはHV10:420程度とほぼ一定であることを事前に確認している。Fig. 4 に示すように旧オーステナイト粒の微細化にともない、低温靱性は改善している。開発鋼では30 μm 以下の旧オーステナイト粒径が得られており、低温靱性が飛躍的に向上している。

3. 開発鋼板の性能

3.1 建設・産業機械用耐摩耗鋼板

「JFE-EH360LE/500LE」

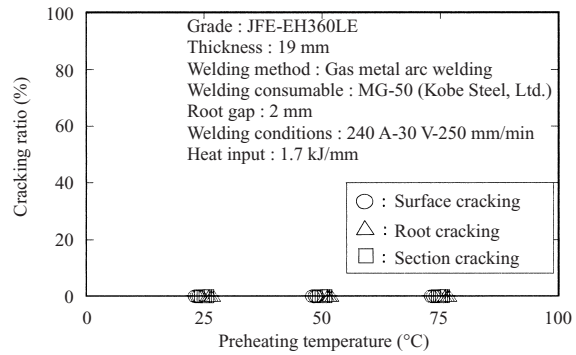
開発した耐摩耗鋼板「JFE-EH360LE」および「JFE-EH500LE」の代表的な化学組成を Table 4 に示す。硬度と溶接性のバランスを考慮して、最適C量 C_{eq} D_I 値を選定した。さらに旧オーステナイト粒の微細化を図るため、マイクロアロイ元素を添加した。開発鋼のy形溶接割れ試験結果を Fig. 5 に示す。「JFE-EH360LE」は、予熱温度25の条件においても割れが発生しておらず良好な溶接性を有している。また、「JFE-EH500LE」は、割れ停止温度が75と、現在使用されている最高グレードの硬さを有する耐摩耗鋼板としては、十分に良好な溶接性を有している。開発鋼の硬さおよび低温靱性を Fig. 6 に示す。開発鋼は従来鋼と同等の硬さを有しつつ、耐摩耗鋼としては極めて優れた低温靱性を有している。

「JFE-EH360LE」および「JFE-EH500LE」は、耐摩耗鋼としては世界初となる -40 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、耐衝撃損傷性の向上により、部材の長寿命化が可能となる。

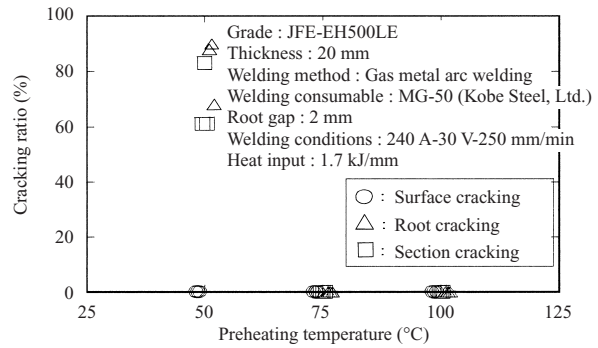
Table 4 Typical chemical compositions of JFE-EH360LE and JFE-EH500LE (mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Others	C_{eq} *
JFE-EH360LE	0.15	0.41	1.20	0.013	0.002	Nb, V, Ti, etc.	0.39
JFE-EH500LE	0.26	0.31	1.33	0.010	0.002	Nb, V, Ti, etc.	0.53

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



(a) JFE-EH360LE



(b) JFE-EH500LE

Fig. 5 y-groove cold cracking test results

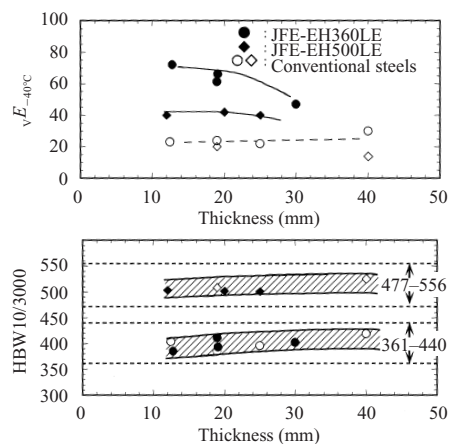


Fig. 6 Brinell hardness and Charpy impact test results of JFE-EH360LE and JFE-EH500LE

3.2 建設・産業機械用高張力鋼板

「JFE-HITEN780LE」

開発した高張力鋼板「JFE-HITEN780LE」の代表的な化

Table 5 Typical chemical composition of JFE-HITEN780LE

(mass%)						
C	Si	Mn	P	S	Others	C_{eq}^*
0.15	0.38	1.18	0.012	0.002	Nb, V, Ti, etc.	0.39

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

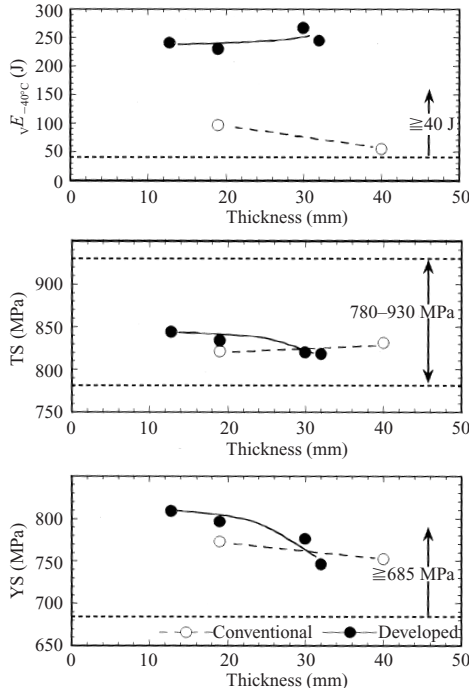


Fig. 7 Mechanical properties of JFE-HITEN780LE

Table 6 Bending test results of JFE-HITEN780LE (Bending radius: 1.5 t)

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

学組成を Table 5 に示す。本開発鋼は、マイクロアロイニング技術と Super-OLAC⁵⁾ に代表される加工熱処理・制御熱処理技術の活用により、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。

開発鋼の強度および低温靱性を Fig. 7 に示す。本開発鋼は安定した強度を有するとともに、従来鋼板を格段に上回る低温靱性が得られている。また Table 6 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 × 1.5 倍の曲げ半径で割れが生じておらず、優れた加工性をも兼ね備えている。さらに Fig. 8 に示すように y 形溶接割れ試験結果では、予熱温度 25 の条件においても割れが発生しておらず、良好な溶接性を有している。

本開発鋼は、建設・産業機械用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

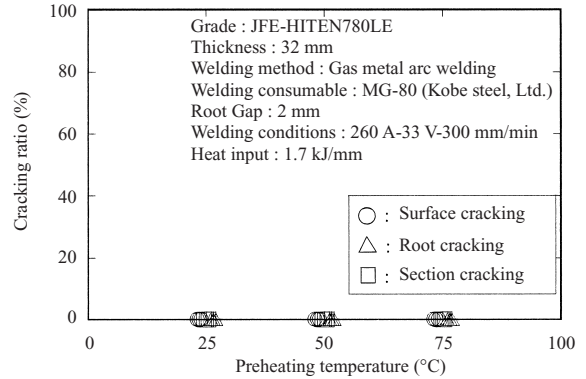


Fig. 8 y-groove cold cracking test result

なるほか、耐衝撃性や安全性の面からも優れた鋼板である。また、溶接性を考慮し、炭素当量を抑えた結果、予熱温度 25 においても割れない良好な溶接性を有しており、施工性に優れた鋼板である。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。

4. おわりに

建設・産業機械用の耐摩耗鋼板・高張力鋼板の分野では世界初となる -40 での靱性を保証した本開発鋼「JFE-EH360LE/EH500LE」および「JFE-HITEN780LE」(LE シリーズ)は、寒冷地での使用が可能となることに加え、耐衝撃性や安全性の面からも優れており、また、炭素当量 C_{eq} を抑えた結果、溶接性にも優れた商品である。

本開発鋼「LE シリーズ」は 2001 年 5 月の販売以来、北中南米、欧州、豪州などを中心とする世界の多数の建設・産業機械メーカー、加工メーカー、流通業者から高い評価をいただき、現在までにその受注量は累計で 30 000 t を越えている。

参考文献

1. 田中淳一ほか．日本鋼管技報．no. 55，1971，p. 53-62
2. 上野正勝ほか．鉄と鋼．vol. 74，1988，p. 910-917
3. Grossmann, M.A. Trans. Metall. Soc. AIME. vol. 150, 1942, p. 227-259.
4. ASTM A255. vol. 01. 05, 1991, p. 27-44.
5. 小俣一夫ほか．NKK 技報．no. 179，2002，p. 57-62
6. 牧正志ほか．鉄と鋼．vol. 67，1981，p. 852-866



室田 康宏



阿部 隆



橋本 正幸