

## 解説

### 建築用鋼材-3

# 建築構造用耐火鋼

## Fire-Resistant Steel for Steel Construction

渡部義之

新日本製鐵(株) 君津技術研究部  
主幹研究員

Yoshiyuki Watanabe

### 1 はじめに

『耐火鋼』とは、文字通り火災に耐える鋼材である。いったい、火災に耐えるとはどういうことであろうか。

鋼材は高温になると強度が低下する。これは、パイエルス・ポテンシャルや結晶欠陥(点欠陥としての固溶原子、体積欠陥としての析出物を含む)などのいわゆる内部応力場による転位の運動に対する障害・抵抗に対し、外力による仕事に加えて原子の熱振動のエネルギーも寄与するためである。一般に、350℃以上になると鋼材の降伏応力(耐力)は常温規格値の2/3以下に低下するとされている。したがって、鉄骨建築物が火災時に高温になると、構造上必要な耐力(長期許容応力度: 建物の自重を支持できる強度)を下回るケースがでてくる。そのため、建築基準法や関連告示等により、火災時の鋼材の許容温度を一律に350℃に規定するとともに、主として不特定多数の人が利用する共同住宅、百貨店、ホテルなどの建築物と市街地内の建築物においては、火災時に鋼材の温度が350℃を上回らないよう耐火被覆で鉄骨を保護することが義務付けられていた。

その後、建築物の超高層化、建築設計技術の高度化などを背景として、建設省(現国土交通省)総合技術開発プロジェクトの中で耐火設計の見直しが行われ、1987年3月、『新耐火設計法』が実用化された。従来の建築基準法等に基づく仕様書的な規定によるのではなく、建築物の火災条件、設計条件や使用材料の性能に応じて総合的に建築物の防災安全性を評価するというものである。これは、従来の鋼材の許容温度350℃に拘らず、火災時に長期許容応力度(常温耐力の2/3)が維持できれば、それを前提に耐火被覆の軽減ないしは無被覆での設計も可能になったことを意味しており、耐火鋼登場のお膳立てが整ったわけである。

本稿では、耐火鋼開発のベースとなった鋼の高温強度におよぼす合金元素、マイクロ組織の影響とそれらに基づいて転炉

溶製、厚板圧延された耐火鋼の特性について紹介する。

### 2 耐火鋼の保証温度

建築構造用耐火鋼は、高温耐力を向上させることで、耐火被覆の大幅な軽減や無被覆鉄骨構造の実現を目標として開発された新しい建築用鋼材である。

高温強度に優れた鋼材の研究は、耐熱鋼の分野を中心に、中高温压力容器、ボイラーチューブ等を対象として進められてきた。その使用条件は高温長時間が前提で、10万時間にもおよぶ長時間の耐クリープ特性が要求される。これに対し、耐火鋼では、図1に示すように建物の階数によって異なるが、法定(要求)耐火時間は高々3時間に過ぎない<sup>1)</sup>。一方で、耐火鋼といえどもあくまで建築構造用鋼であるため、常温時の強度はもちろん、耐震性(低降伏比)や溶接性等の基本特性を具備しなければならないことは言うまでもない。

一般に、火災温度は1,000℃程度とされ、耐火鋼が構造上必要な耐力(常温規格耐力の2/3)を維持できる温度、つまり許容温度を何℃に設定・保証するかは、経済合理性の観点から

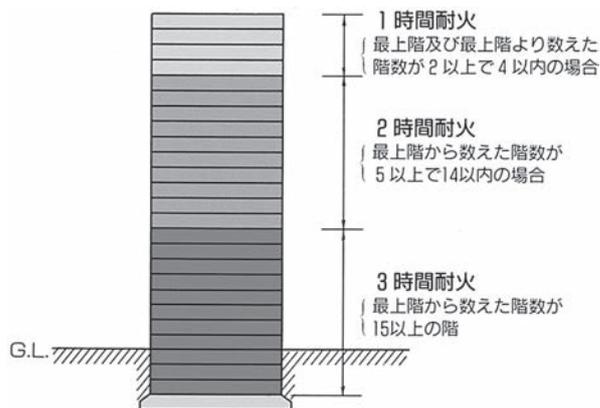


図1 建物の階数と要求耐火時間<sup>1)</sup>

きわめて重要なポイントである。現在、実用化されている耐火鋼<sup>2-6)</sup>は、600℃保証が一般的であるが、より高温保証も技術的な困難さは伴うものの、必ずしも不可能ではない。しかし、600℃超の高温域では耐力の低下が大きく、常温強度をはじめとした使用性能上の基本特性とのバランスもさることながら、特に高温での強度発現・維持のためにはおそらく相当程度の高合金化が不可避であり、耐火被覆コストとの比較において現状では経済合理性に合わないと思われる。

### 3 高温強度におよぼす合金元素の影響

耐火鋼の成分を考える上で、低合金耐熱鋼、なかでもボイラー用鋼としてのMo鋼、Cr-Mo鋼が起点となる。しかし、あくまで溶接性や製造コスト等は建築用鋼の枠内で考える必要があり、その意味では耐熱鋼のレベルダウンとしてではなく、建築用鋼のレベルアップという発想が求められる。

図2<sup>2)</sup>は、0.14%C-1.0%Mn-0.5%Cr-0.02%Nbをベース成分としてMo添加量を変化させた鋼の圧延ままでの強度の変化を示したものである。Mo量の増加に伴い、常温YSはやや低下する傾向を示すが、高温YSは直線的に増加し、結果として常温YSと600℃YSの比であるYS比は飛躍的に向上して

いる。また、図3<sup>2)</sup>は、0.1%C-0.9%Mnをベースとして、0.5%Mo、0.02%Nb単独および0.5%Mo-0.02%Nb複合添加した際の常温ならびに600℃耐力(YS)の変化を示したものである。MoもNbもそれぞれ単独添加で常温、600℃耐力を増加させるが、常温耐力に対する600℃耐力の向上代、いわゆるYS比ではMo添加の方が明らかに優位である。さらに注目すべきはMo-Nb複合添加で、特に、その600℃耐力はMo、Nb単独添加での向上代の和よりさらに大きい。

Mo-Nb複合添加により高温強度が向上する機構は、アトムプローブ電界イオン顕微鏡(AP-FIM)を用いたNb、Moの存在状態観察を通して明らかにされている<sup>7)</sup>。

写真1<sup>7)</sup>は、Nb単独添加鋼、Mo単独添加鋼およびMo-Nb複合添加鋼の電界イオン顕微鏡像を示したものである。Nb単独添加鋼ではNb(C, N) ( $\leq 5\text{nm}$ )が、Mo単独添加鋼では針状のMo<sub>2</sub>C、Moクラスターが観察された。またMo-Nb複合添加鋼ではNbC、Mo<sub>2</sub>C、Moクラスターがそれぞれ観察された。なお、Mo単独添加鋼、Mo-Nb複合添加鋼のいずれにおいてもMo析出物が確認されているが、添加したMoの大部分は固溶状態であることが明らかにされている。

図4<sup>7)</sup>は、Mo-Nb複合添加鋼におけるNb析出物のアトムプローブ解析結果を示したものである。Mo-Nb複合添加鋼中の析出物は単純なNbCではなく、NbCと地鉄のフェライト

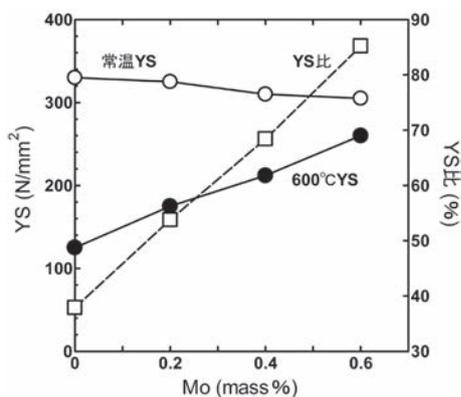


図2 圧延まま鋼板の引張特性におよぼすMo添加量の影響<sup>2)</sup>

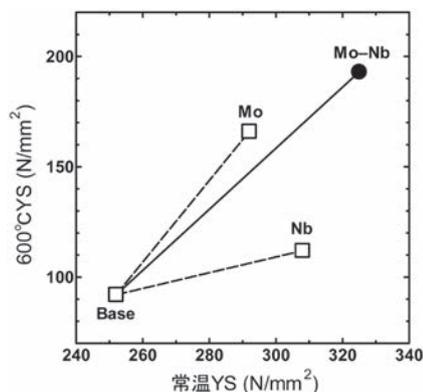


図3 圧延まま鋼板の引張特性におよぼすMo、Nb添加およびMo-Nb複合添加の影響<sup>2)</sup>

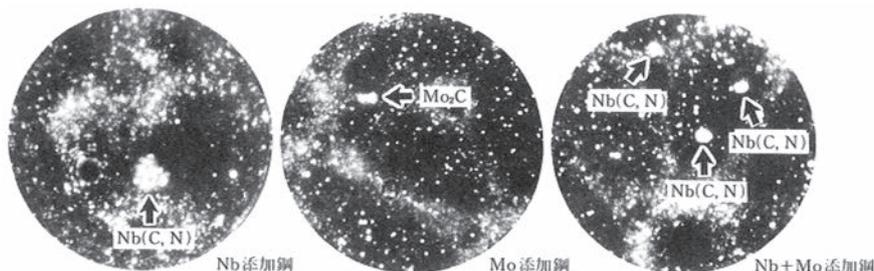


写真1 Nb鋼、Mo鋼、Mo-Nb複合添加鋼の電界イオン顕微鏡像<sup>7)</sup>

界面にMo偏析が認められる。このようなMoの偏析はNb単独添加鋼に比べNbCを高温で長時間にわたって微細に維持する作用を有し、高温耐力を向上させるものと考えられる。

## 4 高温強度におよぼす組織の影響

一般に、鋼成分によらずフェライト以外の硬質組織、特にベイナイト分率の増加は、常温、高温耐力を増加させ、YS比を向上させる。しかし、硬質組織分率が高くなると、常温強度や建築用鋼としてのYRの制御が困難となる。したがって、比較的硬質組織分率を低く抑えた、すなわち、フェライト主体組織とした上で、MoやMo-Nb複合添加により常温-高温強度バランスを適正化する必要がある。

図5<sup>2)</sup>は、鋼板のフェライト粒径と強度、YS比との関係を

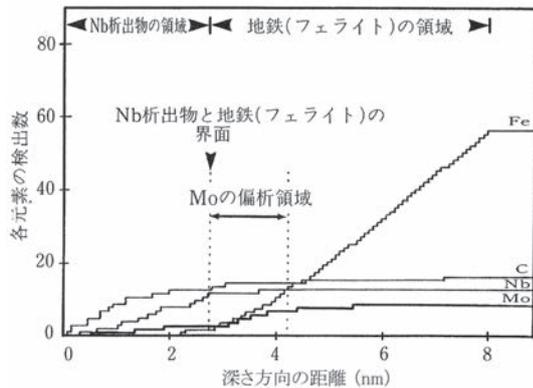


図4 Mo-Nb複合添加鋼のNb析出物のアトムプローブ分析ラダー処理図<sup>2)</sup>

示したものである。フェライト粒の粗粒化に伴い、常温耐力 (YS) は低下するが、高温耐力はむしろ増加し、YS比が向上する傾向にある。フェライトの粗粒化は、高温での粒界すべりを抑制し、高温強度を改善するものと一般的に考えられている。

上述した耐火鋼として好ましいフェライト主体のマイクロ組織を得るためには、その製造方法は自ずと制約される。一般に、加工熱処理 (TMCP) や調質処理は、鋼の性能を高める上で有効であるが、耐火鋼に限っては、特に引張強度400～490N/mm<sup>2</sup>鋼を前提とした場合、むしろ圧延ままのプロセスが望ましい。

ただし、圧延ままプロセスといっても、加熱・圧延条件の制御が不要というわけではない。図6、7<sup>2)</sup>は、0.1%C-1.0%Mn-0.5%Cr-0.48%Mo-0.02%Nb鋼を圧延ままプロセスで圧

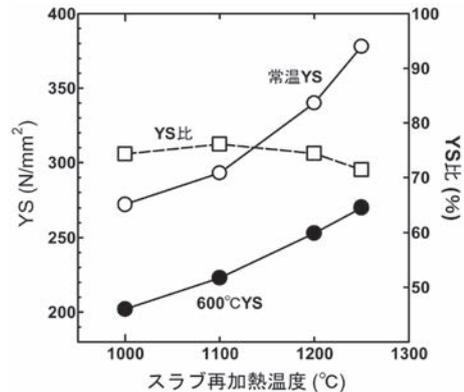


図6 圧延まま鋼板の引張特性におよぼすスラブ再加熱温度の影響<sup>2)</sup>

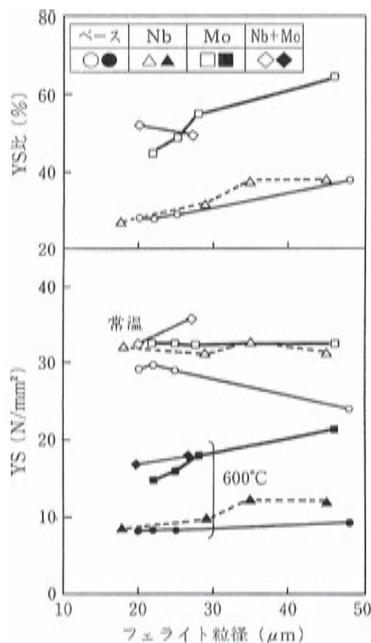


図5 フェライト粒径と強度、YS比との関係<sup>2)</sup>

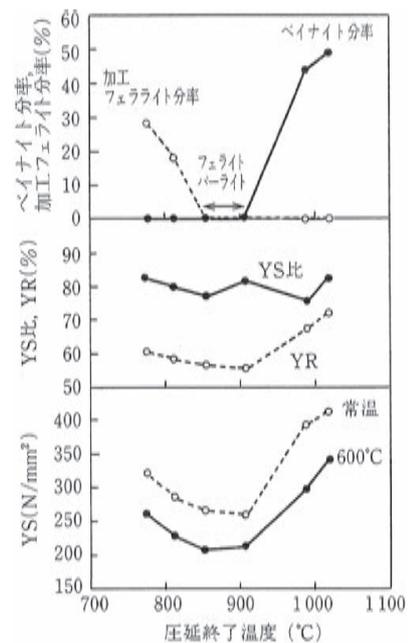


図7 圧延まま鋼板の引張特性、マイクロ組織におよぼす圧延終了温度の影響<sup>2)</sup>

延した際の強度、組織におよぼすスラブ再加熱温度および圧延終了温度の影響を示したものである。再加熱温度の高温化に伴い常温、高温強度ともに増加し、YS比はごくわずかに低下する。耐力の増加は、固溶Nbの増加、ベイナイト組織分率の増加やフェライトの粗大化等の効果の重畳によるものと考えられ、Nbの有効利用の観点から、高温加熱が好ましい。また、圧延終了温度の低下に伴い、常温、高温耐力は低下し、900℃付近で極小を示した後、増加する。これは圧延終了温度が900℃超の高温域ではオーステナイト粒が粗大となって焼入性が増大しベイナイト組織分率が增加するため、また850℃未満の低温域では(γ+α)二相域圧延となってフェライトが加工されるためと考えられる。

なお、いずれも常温ないし高温強度の代表的な傾向を示すものであり、鋼成分はもちろん板厚や要求される強度、靱性レベルに応じて適正化する必要があることは言うまでもなく、またTMCPの適用を否定するものではない。

## 5 耐火鋼の特性<sup>2)</sup>

実生産ラインで製造された引張強度490N/mm<sup>2</sup>級の建築用耐火鋼の諸特性を以下に紹介する。

### 5.1 鋼の化学成分と製造法

Cr添加のNb-Mo鋼を300ton転炉で溶製し、連続鋳造法で240mm厚のスラブとした。スラブは1000～1150℃で再加熱後、圧延終了温度900～930℃で板厚25、32および50mmに圧延した。

### 5.2 母材の基本特性

表1に母材の機械的性質を示す。常温強度、耐震性の尺度であるYR、衝撃特性も含め、建築構造用鋼材SN490の規格値を十分に満足している。

図8に強度の、図9に弾性係数の温度依存性を示す。耐火鋼は、一般鋼(SM490A)に比較し高温での強度低下が小さく、600℃でも常温耐力の2/3(217N/mm<sup>2</sup>)以上を維持できている。また、弾性係数も一般鋼では600℃を超えると急激に低下するが、耐火鋼は、一般鋼同様に温度が高くなるに伴い漸減するものの、700℃程度まで急激な低下はなく、700℃でも常温の70%程度を保持している。

図10に耐火鋼と一般鋼(SM490A)の600℃でのクリープ特性の比較を示す。一般鋼では、100N/mm<sup>2</sup>の低応力でも短時間で大きなクリープ歪みが生じるが、耐火鋼では付加応力200N/mm<sup>2</sup>でもクリープ歪みはかなり小さい。これは、耐火

表1 母材の機械的性質<sup>2)</sup>

板厚 (mm)	試験方向 <sup>*1</sup>	引張 (全厚 JIS 1号)				衝撃 vEo(J)
		YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	El <sup>*2</sup> (%)	YR(%)	
25	L	384	587	26	65	250
	T	368	588	22	62	168
32	L	349	569	22	61	294
	T	354	570	25	62	246
50	L	416	599	22	69	131
	T	383	584	24	66	107

\*1 L: 圧延方向, T: 圧延直角方向、\*2 El: 伸び

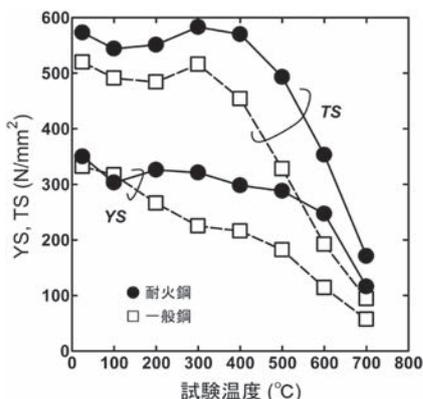


図8 強度の温度依存性<sup>2)</sup>

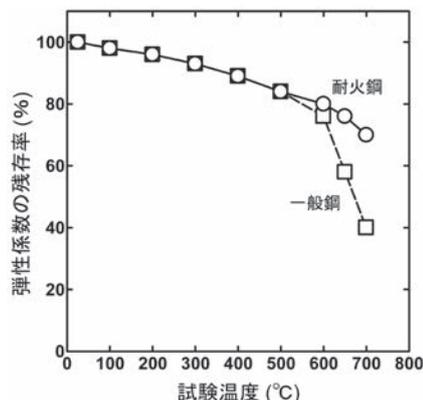


図9 弾性係数の温度依存性<sup>2)</sup>

鋼を使用すれば、火災時の構造物の変形を少なくすることができることを意味する。

### 5.3 溶接性および溶接継手性能

図11に耐火鋼のy形溶接割れ試験結果を示す。予熱温度75℃で割れは抑えられており、y形溶接割れ試験の拘束度の高さを考慮すると、実溶接施工においては実質的に予熱不要な程度に良好な溶接性を有している。これは、Mo、Crなどの合金元素が添加されつつも、C、Mn量が低減され、溶接性の指標である溶接割れ感受性組成 $P_{CM}$ が低く抑制されているためである。

表2に建築構造物で採用される各種溶接継手部の特性を示す。溶接継手性能は小入熱の手溶接(SMAW)、中入熱の潜弧溶接(SAW)、超大入熱のSES溶接継手を製作し、その機械的性質を調査した。当然ながら、耐火鋼では溶接金属も高温強度をもたせる必要があるので、溶接においては溶接金属の常

温、高温強度を考慮して適正な溶接材料を選定した。すべての溶接部において、常温、600℃における強度はともに十分であり、曲げ特性も良好である。また、溶接金属(WM)、溶接熱影響部(FL、HAZ)におけるシャルピー吸収エネルギーもSAWの溶接入熱4.5kJ/mmまで十分な値を示す。超大入熱のSESではやや低い値が見られるが、このレベルは従来鋼と同等である。

以上のような優れた特性を有する建築用耐火鋼は厚板のほか、H形鋼、薄板、鋼管等があり、さらに耐火鋼用の高力ボルトや各種溶接材料もすでに開発されている。

## 6 おわりに

耐火鋼は、一般鋼と比較して高温特性に優れることから、建物の柱や梁など主要構造部に使用することで、被覆を軽減あるいはなくすることができる新しい構造用鋼材である。ここ

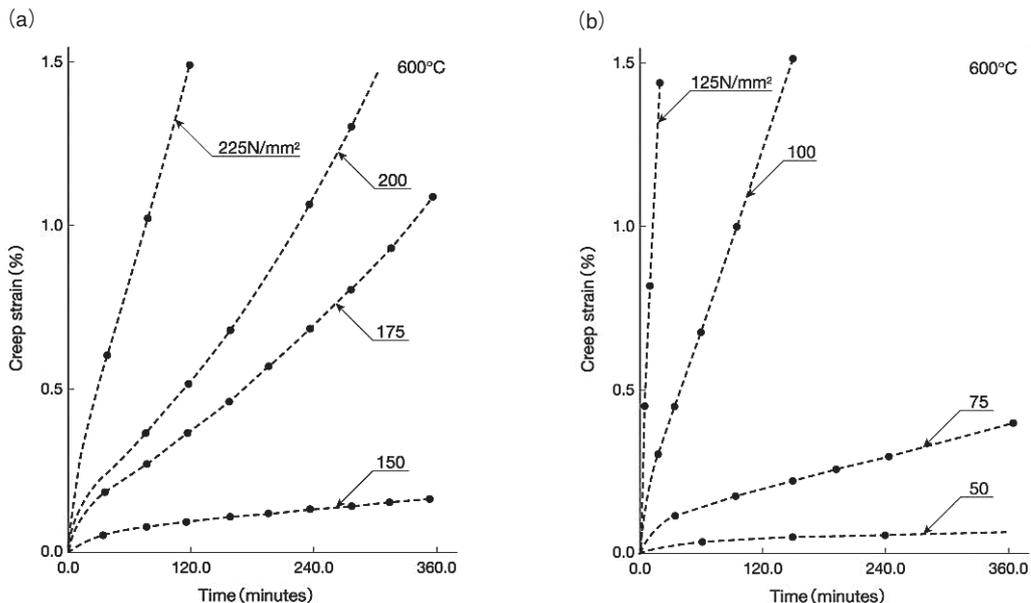


図10 耐火鋼 (a) と一般鋼 (b) のクリープ特性 (試験温度: 600℃)

#### 溶接条件

溶接法	SMAW
溶接棒	⊗L-50FR
棒径	φ4.0mm
電流	170A
電圧	25V
速度	15c.p.m
雰囲気	10℃, 80%
くり返し数	3~4回

※ 溶接棒乾燥: 350℃×1hr (拡散性水素量: 3.3cc/100g)  
 ※ 温度管理: 恒温、恒温室使用

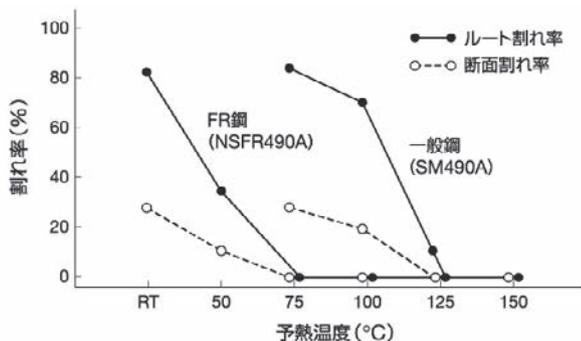


図11 y形溶接割れ試験結果<sup>2)</sup>

で改めて建築構造用耐火鋼の特長を示す。

○高温強度が通常の建築用鋼材（一般鋼）と比較して著しく高い

600℃での耐力（降伏強度、YS）が、常温規格値の2/3以上を保証する。耐力の常温規格値とは、長期許容応力度に相当する。火災と地震は同時に考慮しないことから、建物の自重を支持できる温度、すなわち長期許容応力度が火災時に必要な強度である。このような高温強度は、Moなどの添加元素の固溶やそれらの化合物の微細析出物が転位の運動を抑制する機構によって得られる。

○常温時の設計・施工は一般鋼と同じであり、建築用鋼材としてそのまま使用できる

常温時性能は、建築構造用圧延鋼材（JIS G 3136）の規格に合致する。また、一般鋼と同等の施工性（溶接性、切断性）を有する。

耐火鋼は一般鋼よりもはるかに高い鋼材許容温度を有するが、建築物への適用にあたっては高温時の部材（柱、梁）性能および架構変形の挙動を十分に検討し、火災時の安全性能を保証できる耐火設計技術と併せて使用することが必要である。

なお、耐火鋼の誕生秘話については、（社）日本鉄鋼協会編「わが国における厚板技術史」（2001年）に詳しい。興味のある方は参照されたい。

参考文献

- 1) 作本好文, 計良光一郎, 望月晴雄, 田原建洋, 萩原賢次 : 新日鉄技報, 344 (1992) , 31.
- 2) 千々岩力雄, 為広博, 吉田譲, 船戸和夫, 植森龍治, 堀井行彦 : 新日鉄技報, 348 (1993) , 55.
- 3) 鹿内伸夫, 和田肇, 石川博, 村木誠, 畠山耕太郎, 向井勝利 : NKK技報, 137 (1991) , 25.
- 4) 鎌田芳彦, 深田康人, 中里卓三, 平山博巳, 川野和雄, 緒方龍二 : 住友金属, 43-7 (1991) , 23.
- 5) 岩井清, 矢野和彦, 高嶋修嗣, 野村伸吾 : CAMP-ISIJ, 3 (1990) , 451.
- 6) 弟子丸慎一, 谷川治, 内田清, 山口忠政, 藤野博, 永易正光 : CAMP-ISIJ, 4 (1991) , 1952.
- 7) 植森龍治, 千々岩力雄, 為広博 : 新日鉄技報, 359 (1996) , 20.

(2011年11月2日受付)

表2 各種溶接継手の特性<sup>2)</sup>

溶接法	溶接材料	引張強度						曲げ (JIS Z 3124)		衝撃	
		試験温度	試験片	YS (N/mm <sup>2</sup> )	TS (N/mm <sup>2</sup> )	El (%)	破断位置	曲げ位置	判定	ノッチ位置	vE <sub>0</sub> (J)
SMAW X開先 3.5kJ/mm	溶接棒 N-OS	常温	継手1号	—	615	36	母材	表曲げ	良好	WM	96
		600℃	溶接金属引張	340	396	28	—	裏曲げ	良好	FL	195
			継手引張	266	359	35	—			HAZ	196
SAW X開先 4.5kJ/mm	Y-C YF-15K	常温	継手1号	—	619	35	溶接金属	表曲げ	良好	WM	102
		600℃	溶接金属引張	279	337	37	—	裏曲げ	良好	FL	130
			継手引張	275	349	20	—			HAZ	146
	Y-DM NF-16	常温	継手1号	—	631	32	母材	表曲げ	良好	WM	99
		600℃	溶接金属引張	356	422	32	—	裏曲げ	良好	FL	144
			継手引張	291	357	21	—			HAZ	112
SES I開先 70.9kJ/mm	Y-DM SES-15	常温	継手1号	—	638	11	母材	表曲げ	良好	WM	61
		600℃	溶接金属引張	353	431	30	—	裏曲げ	良好	FL	29
			継手引張	362	438	24	—			HAZ	34