

建築構造用耐火590MPa級鋼

590MPa Class of Fire - Resistant Steel for Building Structural Use

水谷 泰^{*(1)} 石橋 清司^{*(2)} 吉井 健一^{*(3)} 渡部 義之^{*(3)}
 Yasushi MIZUTANI Kiyoshi ISHIBASHI Kenichi YOSHII Yoshiyuki WATANABE
 千々岩 力男^{*(4)} 吉田 譲^{*(5)}
 Rikio CHIJIWA Yuzuru YOSHIDA

抄 録

建築物の超高層化，大型化に伴い，建築構造用鋼材の高強度化が積極的に進められる中，高性能鋼の一つである耐火鋼についても高強度化のニーズが増大してきた。本報では，そのような社会的背景に応えるべく，高温強度に及ぼす合金元素や金属組織の影響についての基礎的な検討を行い，開発に成功した建築構造用耐火590MPa級鋼の基本性能について報告する。本開発鋼は，590MPa級強度に加えて，優れた高温特性を有するとともに，溶接熱影響部においても十分な靱性を備えている。

Abstract

The requirement for fire-resistant with higher strength has increasingly prevailed as high strength structural steels have been evolving in accordance with development of higher and larger scale of building. The effects of alloying elements and microstructure on high temperature-strength were studied and basic properties of newly developed 590MPa class of fire-resistant structural steels, which possess 590MPa class of tensile strength at room temperature, high resistivity against softening at 873K, and sufficient toughness in HAZ, were briefly described.

1. 緒 言

建築構造用耐火鋼材は，高温強度等の耐火性能を飛躍的に高めた鋼材であり，新日本製鐵では1988年に世界で初めて商品化した。現在では，自走式立体駐車場，アトリウム屋根架構，さらには体育館のようなスポーツ施設などに広く利用されている。本鋼材は，600 における降伏耐力として，常温規格最小降伏耐力の2 / 3 以上を有することを大きな特徴としている。そのため，本鋼の開発によって，従来の建築基準法で義務づけられていた鉄骨構造物への耐火被覆の軽減あるいは無被覆が可能となり，建築コストの大幅な削減，建築工期の短縮とともに，魅力ある建築デザインも実現されるようになった。一方，建築物のますますの高層化，大型化が進む中，新日本製鐵では建築構造用鋼材の高強度化を強力に推進してきた。

例えば，1996年に建設大臣一般認定を取得した590MPa級鋼(規格名：SA440，新日本製鐵商品名：BT-HT440)は，高層建築物や大スパン構造を中心に幅広く用いられている。このような一般の建築構造用鋼材の高強度化に対し，耐火鋼の場合はこれまで引張強度

520MPa級までの製造に留まっていた。しかし，近年の590MPa級鋼の使用拡大に伴い，590MPa級耐火鋼の社会ニーズが増大したことから，新日本製鐵ではこれまで培ってきた耐火鋼及び高強度鋼の製造技術及びノウハウを駆使し，常温における590MPa級の強度レベルと優れた高温性能を両立する画期的な建築構造用耐火590MPa級鋼(新日本製鐵商品名：BT-HT440-FR)を開発した。本報では，開発の考え方及び高温強度の発現機構に関する基礎的な検討結果をまず示し，次いで工場試作鋼の実用性能について簡単に紹介する。

2. 開発目標の設定

本開発においては，大臣認定品SA440(BT-HT440)鋼をベースとし，あくまでも高強度低降伏比(YR 80%)の特性を維持した上でさらに優れた高温強度特性を実現することを目標とした。したがって，化学成分規定や強度，靱性をはじめとする母材基本性能，溶接性はSA440鋼と同等であること(表1)に加えて，600 における降伏応力(0.2%オフセット耐力)が常温の規格最小降伏応力(440MPa)の2 / 3 以上であること，すなわち，295MPa以上を開発目標とした。

^{*(1)} 技術開発本部君津技術研究部 主任研究員
 千葉県君津市君津1 丁目299-1141 TEL0439-50-2542

^{*(2)} 君津製鐵所 厚板工場 厚板管理グループ

^{*(3)} 君津製鐵所 厚板工場 厚板管理グループ マネジャー

^{*(4)} 日鐵テクノリサーチ 君津事業部 技術主幹

^{*(5)} 厚板営業部 マネジャー

表1 一般BT-HT440鋼の規格
Specifications of BT-HT440 steels
Chemical compositions

Specification	Chemical Compositions (mass %)				
	C	Si	Mn	P	S
BT-HT440B	0.18	0.55	1.60	0.030	0.020
BT-HT440C				0.008	

P_{cm} (chemical composition for susceptibility of crack in welding)

Specification	Thickness(mm)	P _{cm} (%)
BT-HT440B	40	0.28
BT-HT440C	40 <	0.30

Mechanical properties

Specification	Thickness (mm)	YP or YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL* (%)	√E ₀ (J)	RAz (%)
BT-HT440B	19	440	590	80	20	Av. 47	-
BT-HT440C	100	540	740	(26)			25

* JIS Z 2201 No.4 test piece, No.5 test piece in parentheses
YP: yield point, YS: yield strength, TS: tensile strength, YR: yield ratio, EL: elongation, RAz: reduction of area

3. 低降伏比高強度鋼の製造法

高強度鋼において低降伏比(YR)とするためには、ベイナイト及びフェライトの混合組織とすることが有効であり、フェライトの体積分率を20%以上とすることにより、80%以下の低YRが安定的に達成可能との知見が得られている¹⁾。ベイナイトとフェライトの混合組織の造り込みには、DL(Direct Lamellarizing)・T(Tempering)法或いはDQ(Direct Quenching)・L-L法が用いられる。前者は、オンライン加速冷却設備にてAr₃点以下の温度域 / 2相域)から水冷を行い、後者は、オンライン加速冷却設備にてAr₃点以上の温度域 / 単相域)から直接焼入れ後、オフラインにてAc₁~Ac₃点の / 2相域)に加熱後水冷するL(Lamellarizing)処理を行う。前者では、オフラインL処理工程を省略できる長所があるのに対し、後者では、特にオンライン処理では板厚方向の温度偏差が大きい厚手材に対して組織制御の安定性が高い長所がある。本開発では厚手材の組織・材質安定性を重視し、DQ-L-T法を採用することとした。

4. 耐火鋼における高温強度の発現機構に関する検討

高温強度を出来る限り大きくしようとする場合に、まず高温強度の発現機構を定量的に明確化することは最も重要なことである。以下では、降伏強度の温度依存性について定式化を行うとともに、490MPa級の普通鋼と耐火鋼の高温強度を比較することにより、降伏強度の温度依存性についての定量的な解析を試み、高温強度の発現機構に関する基本的な考察結果について記述した。

4.1 降伏強度の温度依存性の定式化

一般に、塑性変形は、外部応力あるいは熱エネルギーにより活性化された転位が、粒界、転位、固溶元素、析出物等の抵抗を克服して、連続的に結晶中を運動することにより生じるものと理解されている。すなわち、材料の歪速度を転位運動により表現し、さらに、転位を運動させるのに必要な活性化エネルギーの外部応力及び温度に対する依存性を求めることができれば、歪速度、応力、温度の関係を表すことが可能となる。

鉄鋼材料のような金属結晶での剪断歪速度及び転位の運動速度は、それぞれ下式のように表される²⁾。

$$\dot{\gamma} = \rho b v \tag{1}$$

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{Q(\tau_{th}, T)}{kT}\right) \tag{2}$$

ここで、
 $\dot{\gamma}$: 剪断歪速度、 ρ : 変形に寄与する転位密度
 b : バーガースベクトル、 v : 転位の結晶中における平均速度
 したがって、剪断歪についても、 $\dot{\gamma}_0 = \rho b v_0$ より次式が成り立つ。

$$\dot{\gamma}(\tau_{th}, T) = \dot{\gamma}_0 \exp\left(-\frac{Q(\tau_{th}, T)}{kT}\right) \tag{3}$$

ここで、
 τ_{th} : 熱的(温度依存)応力(Thermal stress)または有効応力(Effective stress)
 T : 絶対温度(Temperature in Kelvin)
 $Q(\tau_{th}, T)$: 温度T(K)、熱的応力 τ_{th} が働く場合の活性化エネルギー(Activation energy)
 $\dot{\gamma}(\tau_{th}, T)$: 温度T(K)において、熱的応力が働く場合の剪断歪速度
 $\dot{\gamma}_0$: 熱的(内部)応力が0、すなわち短範囲抵抗が0となる領域での剪断歪速度~最大歪速度

ところで、短範囲抵抗に対する転位運動の活性化エネルギーの応力依存性に関して、下式のような現象論的な一般式が導出されている³⁾。

$$Q(\tau_{th}, T) = Q_c(T) \left[1 - \left(\frac{\tau_{th}}{\tau_0}\right)^p\right]^q \tag{4}$$

ここで、
 $Q_c(T)$: 温度T(K)における熱的応力 τ_{th} が0の場合の活性化エネルギー
 τ_0 : 温度0Kにおける熱的応力(最大内部応力)~活性化エネルギー $Q(\tau_{th}, 0)$ が0となる応力
 p, q : 活性化エネルギーのプロフィールを記述するパラメータ($p, q > 0$)
 簡単のため、剪断係数の温度依存性は微小であるとして無視するとともに、熱的応力 τ_{th} が0となる温度(K)を T_c として(3)式及び(4)式を整理すると、下式が得られる。

$$\tau = \tau_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{1/q}\right]^{1/p} + \tau_{ath} \tag{5}$$

$$T_c = \frac{Q_c(T)}{k \ln\left(\frac{\dot{\gamma}_0}{\dot{\gamma}(\tau_{th}, T)}\right)} \tag{6}$$

ここで、
 τ : 外部応力(External stress)
 τ_{ath} : 非熱的(温度依存)応力(Athermal stress)、または内部応力(Internal stress)

(5)、(6)式の p, q は、理論的に、種々の短範囲抵抗に対して、それぞれ、 $0 < p \leq 1, 1 \leq q \leq 2$ の範囲にあることが求められている²⁾。それぞれ、中央の値、 $p = 1/2, q = 3/2$ は全ての場合に対して十分な近似を与えると考えると、

$$\tau = \tau_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{2/3}\right]^2 + \tau_{ath} = \tau_0 \cdot f(T) + \tau_{ath} \tag{7}$$

となる。以上より、(7)式を用い、パラメータ $f(T) = \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{2/3}\right]^2$ に対する依存性を求めることにより、降伏応力の温度依存成分 (σ_{th}) と非温度依存成分 (σ_{ath}) の評価が可能となる。

4.2 耐火鋼及び普通鋼における熱的応力と非熱的応力に関する考察

490MPa級耐火鋼及び普通鋼(化学成分を表2に示す)について、YS比(=高温降伏強度/常温降伏強度)の温度に対する変化を常温~900 の範囲にて比較した結果を図1に示す。普通鋼では温度に対してほぼ線形にYS比が低下するのに対し、耐火鋼の場合は500~600 付近までYS比の低下の度合いが小さい。次に、(7)式を用いて、温度依存成分 (σ_{th}) と非温度依存成分 (σ_{ath}) を評価した結果を図2及び表3に示す。両鋼において、低温域 ($T > 0.1$) と高温域 ($T < 0.05$) でYSの温度に対する依存性が大きく変化する。この低温域と高温域の遷移温度は、普通鋼(約450 : $f(T) \approx 0.073$)と比較して、耐火鋼(約550 : $f(T) \approx 0.064$)でより高温側にシフトしており、さらに、耐火鋼では低温域における降伏強度比の温度依存性が小さく、非温度依存成分の影響が支配的である。

非温度依存成分は、転位のすべり運動に対する長範囲抵抗によって決定される。そのような長範囲抵抗源としては、第一に、粒界や転位林が考えられる。普通鋼でも低温域/高温域の遷移がみられること、普通鋼は炭窒化析出相を形成するNbやMo等の合金元素を含まないことから、高温で非温度依存成分が低下するのは、転位の上昇運動、合体消滅による回復、再結晶が進行し、転位密度の減少が著しくなるためと考えられる。低温域と高温域の降伏強度の温度依存性の変化が、転位密度の変化に起因するものとする、耐火鋼において、低温域/高温域の遷移温度が高温側に移動するのは、遷移温度近傍で転位回復が抑制されているためと言い換えることができる。

表2 耐火鋼及び普通鋼の化学成分
Chemical compositions (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Mo	Nb	P _{cm}	C _{eq}
NSFR490	0.11	0.24	1.12	0.007	0.002	0.02	0.51	0.02	0.20	0.43
SN490	0.16	0.30	1.30	0.008	0.003	0.03	-	-	0.24	0.39

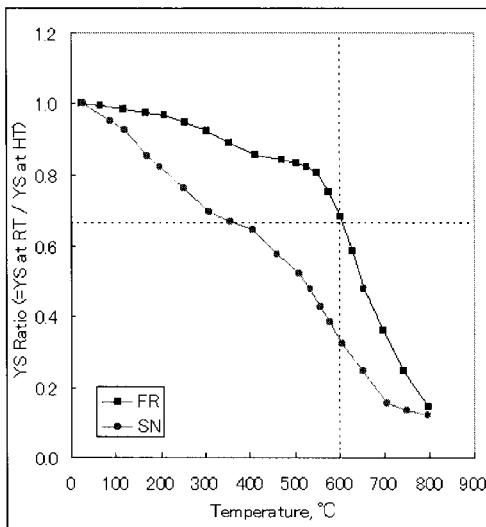
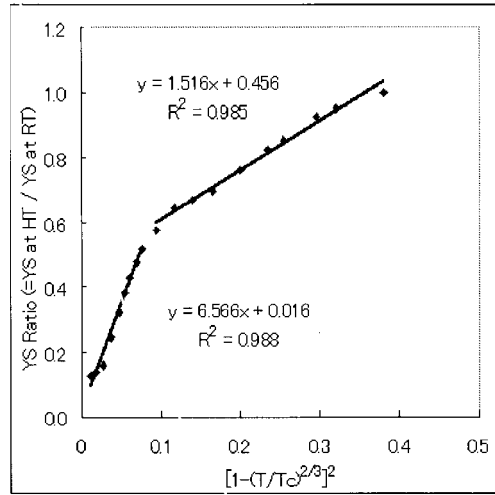
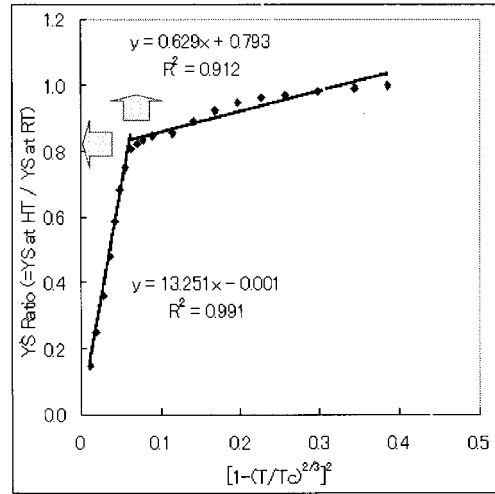


図1 普通鋼及び耐火鋼のYS比温度依存性
Temperature dependence of yield strength ratio in SN 490 and NSFR 490 steels



(a) SN490



(b) NSFR490

図2 普通鋼及び耐火鋼のYS比温度依存性の低温/高温域における変化
Determination of parameter of temperature dependence of yield strength

表3 YS比の温度依存性に関するパラメータ
Parameter of temperature dependence of YS ratio in SM 490 and NSFR 490

		SN 490	NSFR490
Critical temperature T _c ()		600	900
Transition Temperature ()		450	550
Low-temperature region	σ'	1.516	0.629
	σ_{ath}	0.546	0.7931
High-temperature region	σ'	6.566	3.251
	σ_{ath}	0.016	- 0.001

固溶Mo及びNbが、粒界移動とともに転位の上昇運動、回復を抑制する効果を有することは広く知られている。したがって、耐火鋼における低温域(降伏強度の温度依存性が低い領域)の高温側への拡大は、これら固溶原子による転位の回復抑制効果に起因するものと推定される。また、耐火鋼において、低温域での温度依存性が低下するのは、粒界や転位林に加えて更なる長範囲抵抗源が作用していることを示唆しており、その長範囲抵抗源として、分散析出物の整合/半整合歪による応力場が考えられる。整合/半整合析出物の分散強化の機構は、基本的に固溶体強化と同様であるが、整合/半整合析出相により生じる応力場は、固溶体により生じる応力場と比較

すると遥かに強力であり、転位運動に作用を及ぼす範囲も大きくなる。

耐火鋼では、Mo, Nb, V複合炭窒化物 (Nb, Mo, V)CN が整合 / 半整合析出していることが透過電子顕微鏡 (TEM) やアトムプローブ電界イオン顕微鏡 (AP-FIM) により確認されている⁴⁾。したがって、耐火鋼において低温領域にて非温度依存成分が増大するのは、整合 / 半整合歪に起因するミスフィット応力が転位運動に対して長範囲抵抗として作用するためと推定される。

4.3 複合炭窒化物の組成に関する検討

上述のように、Mo-Nb複合添加型耐火鋼において、高温強度の発現は、固溶Mo, Nbによる回復、転位密度低下の抑制及びMo, Nbの複合炭窒化物の析出に伴う整合 / 半整合歪の導入に起因し、転位運動に対する長範囲抵抗が550 までの温度範囲で著しく増大するためと推定された。したがって、鋼中のMo及びNbの存在状態、すなわち、固溶か又は析出のどちらの状態にあるかについて予測可能となれば、高温強度を最大化するための最適なMo, Nb添加量を決定する上で有益な指針となる。

その方法の一つとして、熱力学ソフトウェアThermoCalcを用いた平衡計算は有用であり、以下の章ではこれまで幾つか検討してきた内容について示す。なお、表2に示す490MPa級耐火鋼成分の600 における (Nb, Mo)CN の平衡組成を予測した場合に、TEMにより600 にて長時間安定後のMo, Nb複合炭窒化物の組成分析を実施した結果を比較したところ、平衡組成として予測されたMo / Nbの比率は、実験結果よりもやや高くなることが判明したことから、SSOLデータベース中のMoがNb, Mo, V複合炭窒化物 (MC) 相への固溶する場合の自由エネルギーを実験結果に適合するように修正し、以降の解析に用いた。

5. 添加Mo量の最適化及び適正ミクロ組織の検討

5.1 高温強度に及ぼす添加Mo量の影響

Moとともに、Nbも高温強度増大に対して有効な合金元素であるが、Moと比較するとNbはより高温で炭窒化物を生成することから粗大化し易く、添加Nb量を0.03wt.%以上とした場合には、とくに溶接熱影響部 (HAZ) 靱性を著しく劣化させる懸念がある。そこで、本開発鋼に関しては、Nb添加量を0.02 ~ 0.03wt.%に固定し、高温強度を達成するために必要最小限のMo添加量を特定することを試みた。

表4に示す範囲の化学成分及び常温 / 高温強度を有する実験室試

表4 Mo・Nb添加鋼化学成分範囲及び常温 / 高温強度
Chemical compositions of Mo/Nb added steels (mass%)

	C	Si	Mn	Mo	Nb	V	Ti	Al	P _{cm}	C _{eq}
Ave.	0.05	0.14	0.78	0.85	0.04	0.06	0.01	0.01	0.16	0.40
Max.	0.13	0.40	1.62	1.49	0.13	0.24	0.10	0.04	0.25	0.59
Min.	0.00	0.03	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10

Tensile properties at room temperature and 600

	RT Properties			YS at 600 (MPa)	YS Ratio (600 / RT) (%)
	YS(MPa)	TS(MPa)	YR(%)		
	325	490		217	
	445	610	80		
Ave.	388	527	73.5	279	72.5
Max.	570	706	96.8	425	92.1
Min.	207	354	58.5	128	34.3

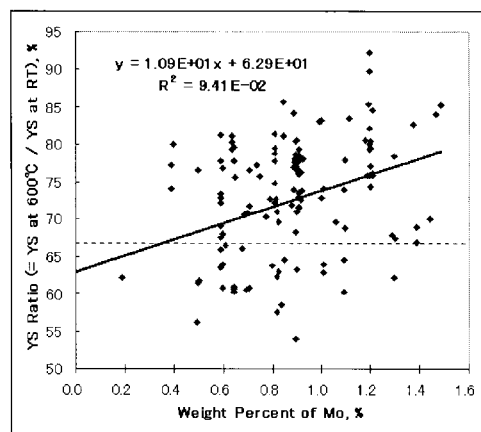


図3 600 でのYS比に及ぼす添加Mo量の影響
Effect of Mo content on YS ratio at 600

作鋼におけるMo添加量と600 でのYS比の関係を図3に示す。Mo添加量の増大に伴い高温YS比は上昇する傾向を示すが、そのばらつきは非常に大きく、600 YS比を安定的に2 / 3以上とするためには、一次的な評価として1.0wt.%超のMo添加が必要となることがわかる。そこで、成分の最適化に関しては、高温強度に対する影響因子のより詳細な解析を行う必要があると考えられた。

5.2 母材組織の影響

母材組織に関しては、高温での初期転位密度などのパラメータの点で影響が大きい。そこで、母材組織毎の高温YS比について、熱力学ソフトウェアThermoCalc及びSSOLを修正した熱力学データベースを活用し、MC平衡生成量にて整理した。結果を図4に示す。同程度のMo添加量にて比較した場合、高温YS比は、ベイナイト (B) あるいはベイナイト + 微量フェライト (F) 組織が最も高く、次いで、フェライト + 微量ベイナイト組織、フェライト + パーライト (P) 組織の順になっている。すなわち、高温強度を大きくするためには、ベイナイト組織の導入が最も有効であることが分かる。高転位密度を有する組織であるベイナイトが高温強度の増大及び安定化に対して有効であるとの結果は、“600 の高温強度が固溶Mo / Nbによる転位回復抑制機構に起因する”との前述の推定に合致するものであると考えられる。

さらに、建築用鋼としての低降伏比 (YR) を達成するためには、一定量のフェライト軟組織の導入が必要と考えられることから、ベ

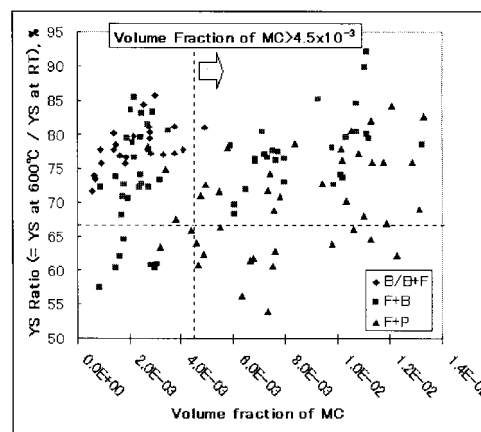


図4 600 / 700 でのYS比に及ぼすMC相体積分率の影響
YS ratio at 600 / 700 with various microstructure and volume fraction of MC

イナイト+微量フェライト組織あるいはフェライト+微量ベイナイト組織を用いるものとする、600におけるYS比を安定的に2/3以上とするためには、図4より、MC析出物量を 4.5×10^{-3} 程度確保する必要があることが分かる。

5.3 MC相分率及び固溶Moの影響

図5に前述の修正熱力学データベースを用いてThermoCalcにより算出された600におけるMC析出相準安定平衡生成量(体積分率)及びBCC相中の固溶Mo量と600でのYS比の関係を示す。MC析出相の体積分率増加とともに、固溶Mo量の増加に伴い、高温降伏強度

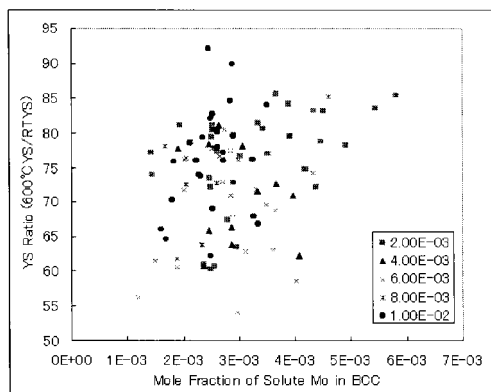


図5 600 でのYS比に及ぼす固溶Mo量及びMC相体積分率の影響
Effect of mole fraction of solute Mo and volume fraction of MC on YS ratio at 600

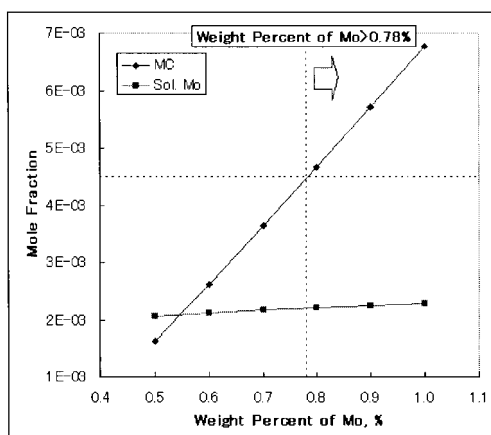


図6 MC相平衡生成量及び固溶Mo量と添加Mo量の関係
Mole fraction of MC and solute Mo as a function of weight percent of Mo

比が増加する。

5.4 添加Mo量とMC相分率及び固溶Moの関係

最後に、0.09C-1.25Mn-0.25Si-0.004N鋼において、添加Mo量を0.5~1.0wt%と変化させた場合の600でのMC相準安定生成量及びBCC相中の固溶Mo量をThermoCalcにより算出した結果を図6に示す。本結果より、添加Mo量の増加に伴い、MC相準安定生成量とBCC相中の固溶Mo量は単調に増加することが理解できる。図6より、前述のように、ベイナイト+微量フェライト組織あるいはフェライト+微量ベイナイト組織を前提とした場合に、MC析出相の準安定平衡生成量を600におけるYS比を安定的に2/3以上とするのに必要とされる 4.5×10^{-3} 超とするためには、添加Mo量として0.78wt%が下限であることが見出される。

6. 工場試作鋼の特性

6.1 化学成分及び製造プロセス条件

以上の検討内容に基づき、建築構造用590MPa級耐火鋼の開発の考え方を表5及び図7にまとめて示す。次いで、これらの指針に基づき工場にて製造した開発鋼の諸特性について紹介する。なお、開発鋼の製造履歴は次の通りである。すなわち、表6に示す化学成分の試作鋼を300t転炉で溶製し、連続鋳造法で240mm厚のスラブとした。1100~1150で再加熱後、圧延終了温度を900~950として板厚36, 60, 及び85mmに圧延した。さらに、加速冷却にてDQ(直接焼入れ)後、L(2相域熱処理)及びT(焼き戻し)処理を実施した。

6.2 母材の基本特性

写真1に母材の光学顕微鏡写真を示す。狙い通り、ベイナイト及びフェライトの混合組織が得られた。

表7に母材の機械的性質を示す。常温強度はSA440の規格値を十分に満足し、耐震性の尺度であるYRも80%と低い。また、0におけるシャルピー衝撃試験吸収エネルギーも100J以上と良好なレベルである。また、板厚方向の硬度についても、最高硬さHV230、板厚方向の偏差HV40程度であり問題のないレベルである。

6.3 溶接性及び溶接継手性能

図8に本開発590MPa級耐火鋼のy型溶接割れ試験結果を示す。y型溶接割れ試験においては、常温でも溶接割れは発生していない。また、溶接熱影響部の最高硬さについてもHV300程度と問題ないレベルであり、良好な溶接性を有している。これは、耐火鋼ではNb, Moが多量に複合添加されている一方で、C, Mn量が低減され、溶

表5 590MPa級耐火鋼開発の考え方
Concept of 590MPa class of fire resistant steel

Specifications		Target	Concept	Conventional 490MPa (NSFR490)
SA440	Strength	YS	Bainite / ferrite microstructure	Ferrite / pearlite microstructure
		TS		
	YR	80%		
	Toughness $\sqrt{E_0}$	47J		
	Elongation	20%		
YS at high temperature	600	295MPa (2/3 of Lower Limit of YS at RT [440MPa])	Retardation of dislocation recovery due to solute Mo or Nb, Coherent / semi-coherent dispersion strengthening due to carbo-nitride of Nb and Mo	Coherent / semi-coherent dispersion strengthening due to carbo-nitride of Nb and Mo
Weldability		Same as conventional SA440	Lower carbon content	Limitation of Nb and Mo amount
Robustness of production		Same as conventional SA440	DQ(direct quenching)-L(lamellarizing) -T(tempering)	Controlled rolling (CR)

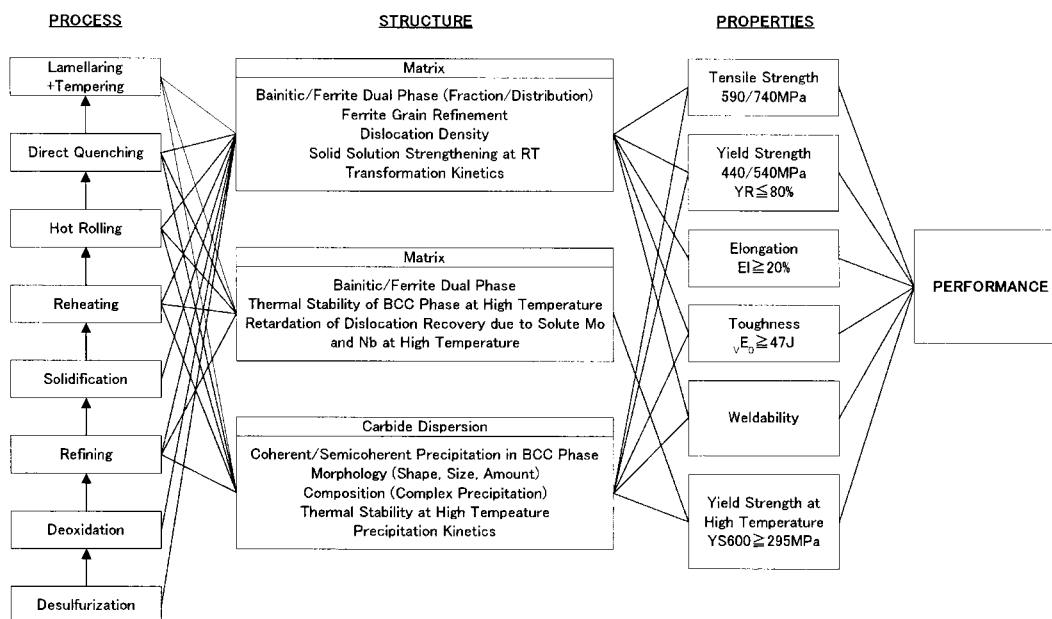


図7 耐火鋼における成分,プロセスの考え方
System chart of 590MPa fire resistant steel

表6 590MPa級耐火鋼の試作化学成分
Chemical compositions of 590MPa fire resistant steel (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	P _{cm}	C _{eq}
BT-HT440C-FR	0.09	0.28	1.24	0.006	0.0015	0.18	0.78	0.02	0.22	0.53

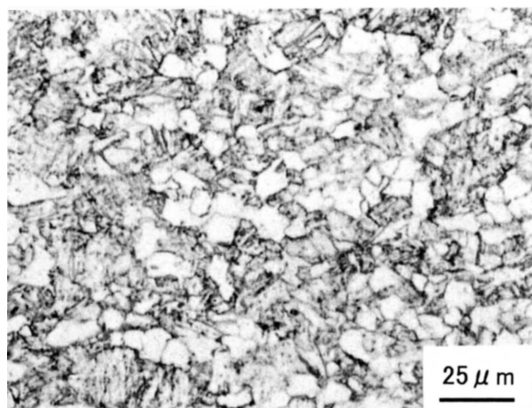


写真1 試作鋼のミクロ組織(60mm材・1/4厚)
Optical micrograph of tested steel (thickness:60mm, 1/4 thickness)

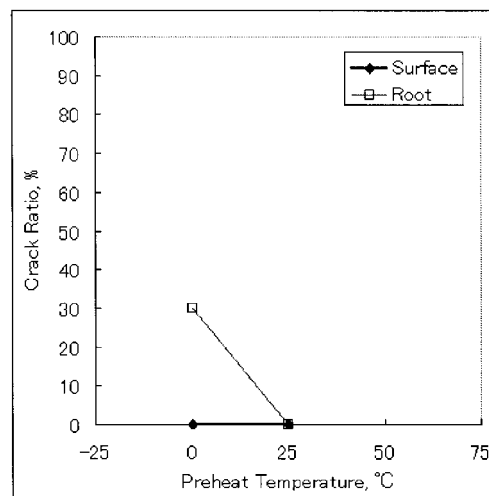


図8 斜めy型溶接割れ試験結果
y-slit restraint cracking test

表7 試作鋼の機械的性質
Mechanical properties of tested steels

Thickness (mm)	Direction L: Longitudinal T: Transverse	Tensile Test at RT (1/4t)				Tensile test at 600			Charpy Test	
		YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	YR (%)	YP(YS) (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	E_{v0} Min/Av (J)	T_{rs} (°C)
	Target	440/540	590/740	20	80	295	-	-	Av. 47	-
36	L	508	673	29	75	-	-	-	279/287	<-40
	T	520	687	29	76	323	417	33	268/279	<-40
60	L	472	652	30	72	-	-	-	266/279	<-40
	T	480	653	30	74	391	391	32	291/293	<-40
85	L	464	635	31	73	-	-	-	254/282	-29
	T	461	635	31	73	312	396	31	154/246	-29

表 8 溶接継手の特性
Properties of welded joint

Welding method	Welding material	Heat input (kJ/mm)	Tensile test					Charpy test	
			Temperature	Test piece	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	Notch position	E_{v0} (J)
SMAW	L-62 4.0mm	1.74-1.99	RT	Joint	596	658	23	WM	173
			600	Joint	341	417	20	FL	211
				WM	312	398	33	HAZ	230
SAW	Y-DM 4.8mm YF-15B	BP1:3.2 BP2-LP: 4.5	RT	Joint	571	692	19	WM	82
			600	Joint	364	431	22	FL	101
				WM	367	436	29	HAZ	83
	Y-DL・FR 6.4mm NB-52FRM	10.3-15.7	RT	Joint	510	620	19	WM	39
			600	Joint	303	376	23	FL	53
				WM	309	341	35	HAZ	52
	Y-DL・FR 6.4mm NSH60FRS	44.0	RT	Joint	515	651	20	WM	53
			600	Joint	390	448	19	FL	42
				WM	376	404	16	HAZ	49
SESNET	Y-CM・FR 2.4mm YF-15I	105.8	RT	Joint	502	650	14	WM	171
			600	Joint	347	437	12	FL	39
				WM	399	471	17	HAZ	30

接性の指標である溶接割れ感受性 P_{cm} が低く抑制されているためである。表 8 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SESNET継手を試作し、その機械的特性を確認した。全ての溶接部において、常温、600 における十分な強度を有している。また、溶接熱影響部 (FL, HAZ), 溶接金属 (WM) における 0 のシャルピー衝撃試験吸収エネルギーもSAWの溶接入熱量 44kJ/mmまでは十分なレベルを示した。超大入熱のSESNET条件においても従来一般鋼と同等のレベルである。

7. 結 言

降伏強度の温度依存性に関する定式化を行い、Mo-Nb複合添加型耐火鋼における高温強度の発現は、固溶Mo, Nbによる回復、転位密度低下の抑制及びMo, Nb, Vの複合炭化物の析出に伴う整合 / 半整合歪の導入に起因し、転位運動に対する長範囲抵抗が600 ま

での温度範囲で著しく増大することが明らかになった。この知見及び熱力学平衡計算に基づき、目標とする高温特性を安定的に発揮するために必要とされるMo量及びミクロ組織を決定し、590MPa級強度と高温性能を両立する建築構造用耐火590MPa級鋼の開発を行った。開発鋼は概略を示したように常温、高温での目標特性を十分に満足するものであり、耐火設計を可能とする鋼材である。なお、本鋼材は、東京汐留地区再開発プロジェクトとして建設された電通新社屋 (施主：(株)電通、設計：(株)大林組) のシースルーエレベーター架構 (4面ボックス中に適用：板厚80mm) に採用されている。

参照文献

- 1) 大橋守 ほか:製鉄研究 (334), 17 (1989)
- 2) 例えば Courtney, T. H. : Mechanical Behavior of Materials. 2nd Ed. McGraw-Hill, 2000
- 3) J. W. Christian and T. B. Massalski, Progress in Materials Science, vol. 19, 1975
- 4) 千々岩力雄 ほか:新日鉄技報 348, 55 (1993)