
高 Mn 非磁性鋼の開発

Development of High Manganese Non-magnetic Steels

佐々木 晃史(Terufumi Sasaki) 渡辺 健次(Kenji Watanabe) 野原 清彦(Kiyohiko Nohara) 小野 寛(Yutaka Ono) 近藤 信行(Nobuyuki Kondo) 佐々木 徹(Toru Sasaki) 佐藤 周三(Shuzo Sato) 一瀬 功(Isao Ichise)

要旨：

広範な需要・用途に適用しうる新しい高 Mn 非磁性鋼を開発することを目的として、基本成分としての C および Mn が透磁率、熱膨張係数ならびに機械的性質に及ぼす影響を調べた。また本鋼の現場製造技術を確立し、工程材の諸特性を把握するため、真空誘導炉溶製した 5t 鋼塊から H 形鋼、丸棒、異形棒鋼を現場工程で製造した。その結果、いずれの製品においても優れた特性が得られることが確かめられた。さらに実製品への応用例として連続鋳造機電磁攪拌装置付属のピンチロール用非磁性材をとりあげ、前述の現場工程材とあわせて低温（-196℃）から高温にわたる機械的・物理的性質ならびに溶接継手性能などについて論述した。

Synopsis：

In order to develop new high manganese non-magnetic steels that can be employed to extensive applications ranging from cryogenic to elevated temperatures, effects of C and Mn on magnetic permeability, thermal expansion coefficient and mechanical properties are investigated. It is found that the relation between thermal expansion coefficient, β , $10((-6)^{\circ}\text{C}(-1))$ and both C and Mn is expressed by the following linear regression equation: β , $(10(-6)^{\circ}\text{C})=17.66 + 3.82\text{C}(\%) - 0.22\text{Mn}(\%)$ Good mechanical properties are exhibited in the wide range of Mn contents between 18 and 30% at room temperature, while there is a tendency that this optimum range of Mn content is reduced at cryogenic temperatures. Then, H-shapes, round bars and deformed bars are manufactured at the workshops using 5t vacuum melted ingots, aiming to establish production process and to study physical and mechanical properties, machinability and weldability of the products. As a result, it is shown that any of these products have excellent properties as non-magnetic steels. In addition, the manufacture of non-magnetic pinch rolls attached to the electro-magnetic stirring equipment on a continuous casting machine is described in detail as one of practical applications of high manganese non-magnetic steels.

本文は次のページから閲覧できます。

高Mn非磁性鋼の開発

Development of High Manganese Non-magnetic Steels

佐々木 晃 史*
Terufumi Sasaki

渡 辺 健 次**
Kenji Watanabe

野 原 清 彦***
Kiyohiko Nohara

小 野 寛****
Yutaka Ono

近 藤 信 行*****
Nobuyuki Kondo

佐々木 徹*****
Toru Sasaki

佐 藤 周 三*****
Shuzo Sato

一 瀬 功*****
Isao Ichise

Synopsis:

In order to develop new high manganese non-magnetic steels that can be employed to extensive applications ranging from cryogenic to elevated temperatures, effects of C and Mn on magnetic permeability, thermal expansion coefficient and mechanical properties are investigated.

It is found that the relation between thermal expansion coefficient, β , ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) and both C and Mn is expressed by the following linear regression equation:

$$\beta (10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}) = 17.66 + 3.82 \text{ C } (\%) - 0.22 \text{ Mn } (\%)$$

Good mechanical properties are exhibited in the wide range of Mn contents between 18 and 30% at room temperature, while there is a tendency that this optimum range of Mn content is reduced at cryogenic temperatures.

Then, H-shapes, round bars and deformed bars are manufactured at the workshops using 5t vacuum melted ingots, aiming to establish production process and to study physical and mechanical properties, machinability and weldability of the products. As a result, it is shown that any of these products have excellent properties as non-magnetic steels.

In addition, the manufacture of non-magnetic pinch rolls attached to the electro-magnetic stirring equipment on a continuous casting machine is described in detail as one of the practical applications of high manganese non-magnetic steels.

1. 緒 言

高 Mn 鋼は従来ハドフィールド (Hadfield) 鋼と呼ばれ、耐摩耗鋼としてよく知られている^{1,2)}。他方、この鋼はオーステナイト系ステンレス鋼と

ともに非磁性鋼としても使用される。近年核融合発電実験施設 (JT-60) の建設ならびに将来計画案の発表や、国鉄の超電導磁気浮上式鉄道の開発実験などを契機にして、構造用鋼としての高 Mn 非磁性鋼への期待が急速に高まっている³⁾。その理由として以下の事情が挙げられよう。①加工や熱

* 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員・理博
*** 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員・工博
***** 技術研究所水島研究室主任研究員
***** 水島製鉄所鍛鍛部鍛錬課課長

** 技術研究所特殊鋼研究室
**** 技術研究所特殊鋼研究室室長
***** 水島製鉄所管理部主査 (副部長待遇)

(昭和56年2月27日原稿受付)

性状態の高 Mn 鋼を得るには、 γ 相もしくは $\gamma + \delta$ 相が、種々の使用条件すなわち加工、熱処理、溶接などに対し十分安定となる成分系でなければならない。

次に、水靱処理前の溶体化温度の、水靱処理後の磁性に対する影響を調べた結果を Fig.2 に示す。

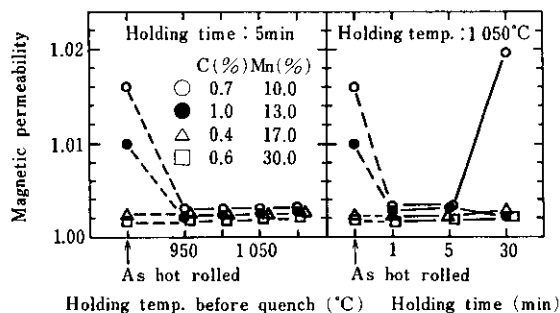


Fig. 2 Effect of solution annealing temperature and holding time on magnetic permeability after water quench

α - γ 相境界近傍の組成の場合、 γ 相が十分安定でないため熱延のままの状態では透磁率が高い。しかし図示の温度で溶体化・水靱処理すると透磁率は低下する。一方、保持時間の影響をみると図に示すように γ 相が不安定な組成 (○印) では、長時間の熱処理で透磁率が上昇する。ところが γ 相が安定な領域の組成では熱処理条件によらず透磁率は低値に安定している。Fig.3 は同じく透磁率

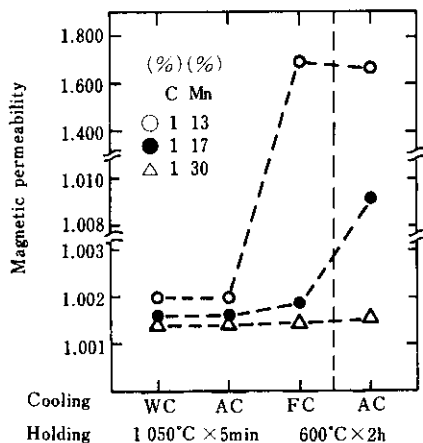


Fig. 3 Effect of cooling condition after solution annealing on magnetic permeability

に及ぼす溶体化処理後の冷却条件の影響を示したもので、1 C-13Mn および 1 C-17Mn では冷却速度が遅いと μ は増大するが、1 C-30Mn では冷却速度の影響はみられず、 $\mu \approx 1.002$ で一定している。このように、従来の標準 13Mn 鋼 (1 C-13Mn) は磁氣的に不安定であり、安定な非磁性材料を得るにはさらに高 Mn 組成とする必要がある。

2.3.2 熱膨張係数

高 Mn 鋼はオーステナイト組織を有し熱膨張係数 β が大きいという特徴がある。Fig.4 に 0 ~ 100 °C での平均熱膨張係数に及ぼす C および Mn の

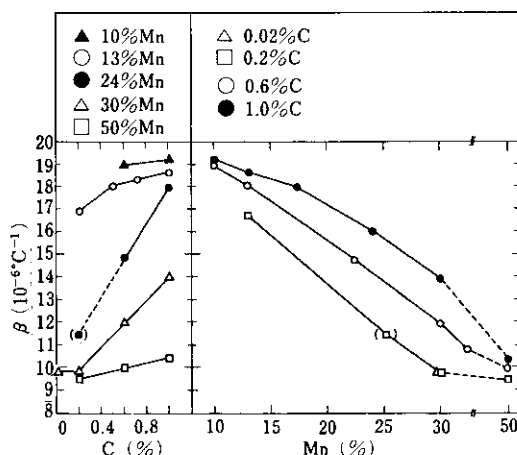


Fig. 4 Effect of C and Mn on thermal expansion coefficient, β , of high manganese steels

影響を示す。その特徴は以下のようである。① C 濃度の減少に伴い熱膨張係数は低下する。② この減少率は Mn 10 ~ 13 % および 50 % 付近では小さくその中間の組成では大きい。③ Mn 濃度の増加により熱膨張係数は減少する。④ その減少率は Mn = 30 ~ 50 % ではそれ以下の組成の場合より小さい。この結果から熱膨張係数 β ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$) と C および Mn 量の関係は次のような線型回帰式で表わすことができる。

$$\beta = 17.66 + 3.82C(\%) - 0.22Mn(\%)$$

なおこの回帰式の寄与率は 85 % である。ここで実用上注目すべき点は低 C - 高 Mn 組成にすることにより、熱膨張係数が普通鋼の程度以下に低減できることである。

このような熱膨張の特質は磁性と密接に結びついており、高Mn鋼が磁氣的には反強磁性を示し非磁性鋼となることに関係している。反強磁性⇔常磁性の転移温度であるネール温度(T_N)と0~100°Cの平均の β との関係をいくつかの高Mn鋼についてFig.5に示す。両者の間にはよい対応があり、 T_N の上昇とともに β が低下する。このことはインバー(Invar)合金の膨張率が極めて小さい⁸⁻¹⁰⁾ことで知られているのと同じ理由による。すなわちネール温度(またはキューリー温度)以下の温

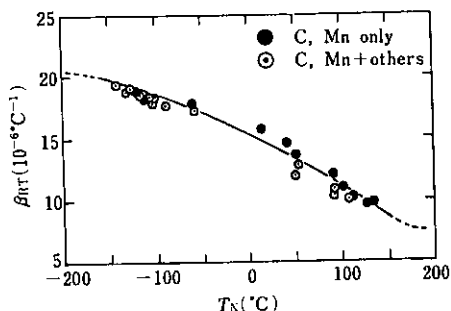


Fig. 5 Relation between Neel temperature, T_N , and thermal expansion coefficient, β

度では、自発体積磁歪と呼ばれる、磁氣的原因による膨張が温度の低下とともに増大するため、通常の格子振動による体積変化が打ち消されて、熱膨張が見掛け上小さくなるのである。

一方、水靱温度、冷却条件および時効処理条件などの熱膨張に対する影響はごくわずかで実際上ほとんど問題とならない。

2.3.3 機械的性質

Fig.6に室温における結果を示した。その特徴は以下のである。①1%までの範囲では、Cの増加によりどのMn濃度でも強度、伸びとも上昇する。靱性はMn濃度により挙動が異なり、13Mn鋼ではCの増加により向上し、50Mn鋼では逆の傾向を示し、24~30Mn鋼ではあまりCに依存しない。②他方、10~18%Mnの範囲では、一般にMnが増加すると強度、伸び、靱性とも上昇するが、18~30%Mnではいずれの性質もほとんど一定値を保ち、さらに高Mnになるとむしろ材質が劣化する傾向を示す。このように室温での特性のみを考慮すると、CおよびMnの組成バランスとして広範な適正成分範囲を採用できる。

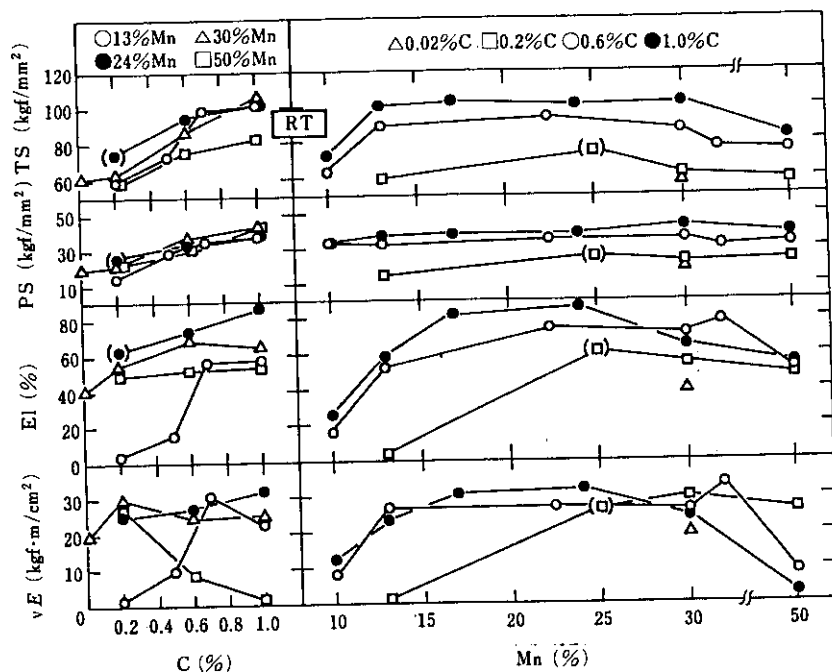


Fig. 6 Effect of C and Mn on mechanical properties of high manganese steels at room temperature

一方、Fig.7 は -196°C での結果を示したものでその特徴は以下のである。①Cの増加により強度が上昇するが、低温の場合その程度は Mn 濃度の影響を強く受ける。②C一定のとき、Mn 組成が 10~25% の範囲では Mn の増加とともに強度、伸び、靱性とも上昇するが、それ以上ではむしろ低下するという特徴がある。このことから、低温の機械的性質を考慮すると、室温の場合に比べて特に Mn に対して適正成分範囲がより狭い範囲に限定される¹¹⁾ことがわかる。

このように高 Mn 非磁性鋼の機械的特性は特に Mn 濃度によって特徴づけられているので、種々の使用目的に応じて適正な Mn 組成範囲を選択するべきである。

数種の高 Mn 非磁性鋼の室温以下の機械的性質を低温用鋼の代表的鋼種であるステンレス鋼と比較して示したのが Fig.8 である。1C-13Mn 鋼は室温での強度と靱性は良好であるが低温において靱性、延性の低下が著しくかつ強度も低下する。一方、A 鋼 B 鋼とも低温において延性および靱性の低下がわずかであり、しかも耐力が増加すると

いう特徴を有する^{11,12)}。B 鋼は温度のいかに問わず強度が高くかつ低温でも延性および靱性ともに良好である。

開発基礎実験で得られたこのような結果は以下に報告する現場工程による高 Mn 非磁性鋼製品の製造実験において活用された。

3. 高 Mn 非磁性鋼の製品化ならびに応用例

3.1 高 Mn 非磁性鋼の製品化とその特性

先に述べた開発基礎実験で得られた結果を参考にしながら、高 Mn 非磁性鋼製品の現場製造実験を遂行した。当社は従来から 13Mn 鋼の製造を行っており、H 形鋼や異形棒鋼の納入実績もある。

ここでは、

- (1) 13%以上の Mn を含有する高 Mn 鋼の現場製造技術の確立
 - (2) 高 Mn 鋼の種々の製品形状への適用
 - (3) 現場工程材の製品特性の把握
- などを具体的目標として実験を行った。

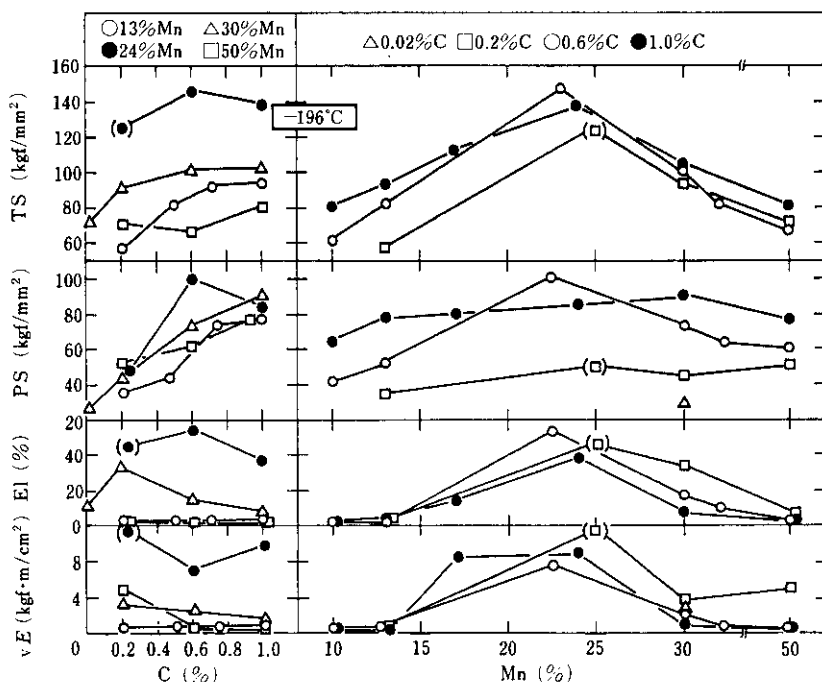


Fig.7 Effect of C and Mn on mechanical properties of high manganese steels at -196°C

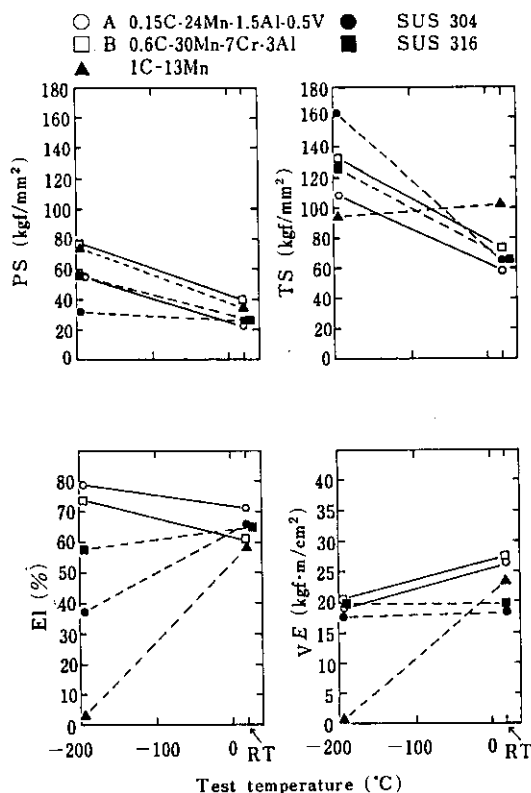


Fig. 8 Temperature dependences of mechanical properties of high manganese non-magnetic steels and stainless steels

実験材の化学成分と製品サイズを Table 1 に示す。H 形鋼については長尺になること、異形棒鋼についてはコンクリートとともに用いられることからいずれも熱膨張係数を普通鋼程度に下げることがある。そのため先の 2・3・2 で述べた結果をふま

えて、表に示したような高 Mn 組成の 24Mn-5Cr 鋼と 30Mn 鋼を選定した。また丸棒と板材についてはボルト、ナット類の製造実験を行うことを兼ねている。この製品では熱膨張係数について考慮する必要がないため前述の鋼種以外の 17Mn-3Cr 鋼を選定した。これらの鋼種を 5t 真空誘導炉で溶解後、以下に示す現場工程で H 形鋼、丸棒、異形棒鋼、板材などを製造した。その際、これら各製品の製造にあたり

- (1) 融点が低く加熱時にバーニングが起りやすい
 - (2) 熱伝導率が小さい
 - (3) 熱間変形抵抗が大きい
 - (4) 熱膨張率が大きい
- などの材料特性を考慮して加熱圧延条件を設定した。すなわち

H 形鋼：分塊圧延 大形圧延
 $120 \times 400 \times 470 \rightarrow H512 \times 212 \times 22 \times 22$

丸 棒 }
 異形棒鋼 }

分塊圧延 鋼片圧延 棒鋼圧延 線材圧延

$180 \times 200 \rightarrow \begin{cases} 115 \square \rightarrow 80\phi \\ 115 \square \rightarrow 16\phi \\ 115 \square \rightarrow D25 \\ 80 \square \end{cases} \rightarrow \begin{cases} D13 \\ 5.5\phi \end{cases}$

(単位：mm)

これらの高 Mn 鋼は変形抵抗が大きいことが特徴であるが、いずれも既存の設備で製造できた。

上記工程にて製造された各製品 (as rolled) の代表的位置における +200 ~ -196°C の範囲の引張

Table 1 Details of 5t vacuum melted high manganese steel ingots

Product	Designation	Chemical compositions (wt.%)						Product size (mm)
		C	Si	Mn	P	S	Cr	
H-Shape	24Mn-5Cr* (Steel HA)	0.48	0.55	24.7	0.020	0.007	5.70	512×212×22×22
	0.6C-30Mn (Steel HB)	0.59	0.56	30.5	0.013	0.006	—	"
Round bar	17Mn-3Cr**	0.48	0.46	16.7	0.020	0.006	3.1	5.5φ, 16φ, 80φ
Performed bar	24Mn-5Cr*	0.49	0.48	24.3	0.017	0.008	5.38	D13, D25

** Equivalent to DIN-X40MnCr23

** Equivalent to DIN-X40MnCr18

試験結果を Fig. 9, 10 に示す。どの製品も -196°C の低温でもある程度の延性を有しており、特に高 Mn 組成の鋼種は優れた延性と高強度を具備して

いる。Fig. 11 には as-rolled 材の V ノッチシャルピー試験による吸収エネルギーの温度依存性を示す。同一鋼種でも製品間で吸収エネルギーに差が

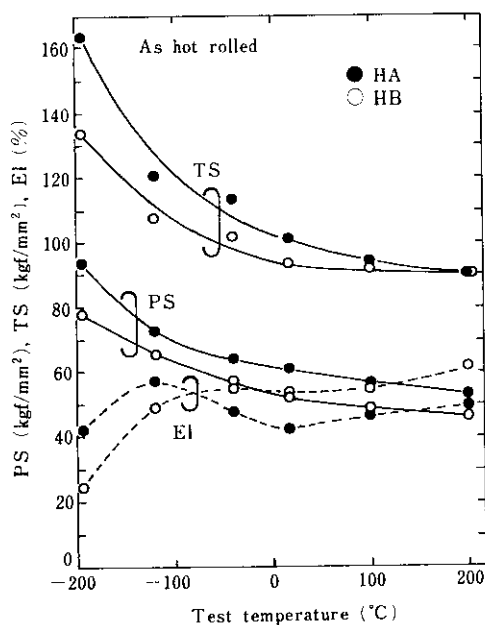


Fig. 9 Tensile properties of H-shapes as a function of test temperature between -196°C and 200°C

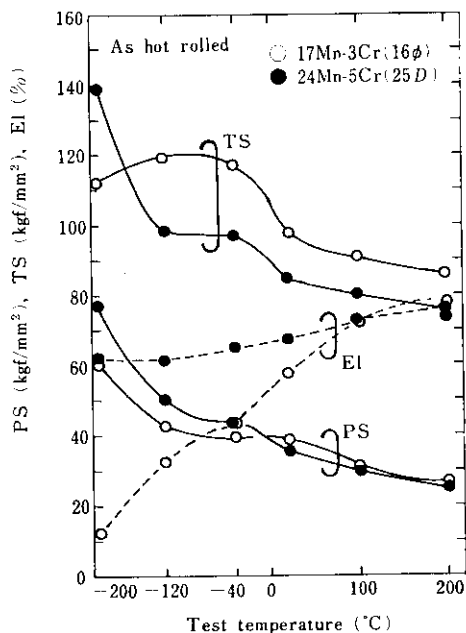


Fig. 10 Tensile properties of round bar and deformed bar as a function of test temperature between -196°C and 200°C

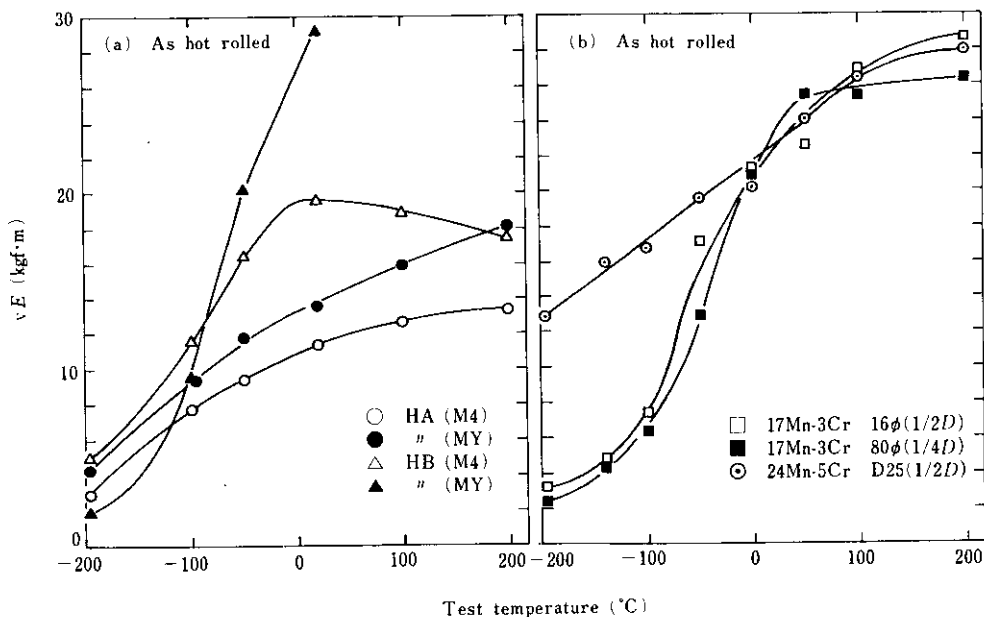


Fig. 11 Charpy impact energy of H-shapes (a), and round bar and deformed bar (b) as a function of test temperature between -196°C and 200°C

あることが注目される。これは熱間加工条件の相違に起因する効果が大きいためと考えられる。

Table 2 に各製品の代表的位置の特性値を示した。いずれも非磁性鋼として優れた特性を確保できた。H 形 A 鋼ならびに B 鋼の製品位置による特性値の変化を Fig. 12 に示す。T, M, B はそれぞれ鋼塊 Top, Middle, Bottom 相当部を意味し、X, Y などに関しては Fig. 13 にその位置を示した。T4, B4, MX, M4 などの各部位での強度上昇が

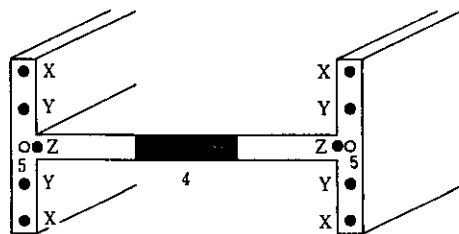


Fig. 13 Illustration of H-shape showing various specimen positions

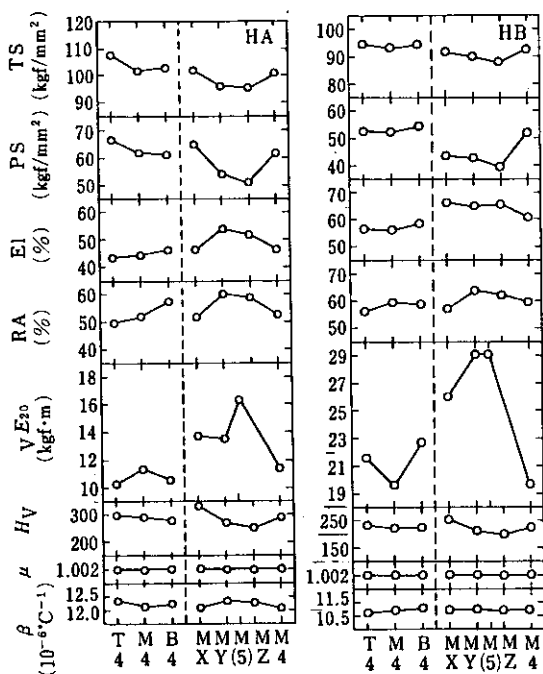


Fig. 12 Variation in properties of H-shapes with specimens at various positions

大きい。Photo. 1 に各位置の光顕組織を示す。強度上昇が大きい前記各部位では、再結晶が不十分で微細組織を呈し、圧延時の残留歪が大きい。Fig. 14 には種々異なる製品サイズからなる丸棒(17Mn-3Cr) および異形棒鋼 (24Mn-5Cr) の中心位置での引張試験結果を示す。いずれもサイズが小さいほうが高強度を示す傾向がある。これは H 形鋼と同様に圧延時の残留歪が大きいためと考えられる。

なお 24Mn-5Cr 鋼製異形棒鋼のガス圧接試験結果についてはここでは触れないが、13Mn 鋼の場合¹³⁾と同じくガス圧接が実用的に行えることが確かめられている。

3.2 高Mn非磁性鋼の応用例—連続用非磁性ロール

高 Mn 非磁性鋼の応用として、連続製造機電磁攪拌装置付属のロール材に適用した例について述べる。

連続材の組織の均一化および中心偏析の低減を目的として、連続機の付属設備に電磁攪拌装置が

Table 2 Properties of high manganese steels shown in Table 1

Product	Designation	Position tested	Physical properties		Mechanical properties			
			μ^*	$\beta^{**}(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	PS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	vE_{20} (kgf·m)
H-Shape	24Mn-5Cr	flange 1/4	1.002	12.2	55	96	54	13.5
	(Steel HA)	web 1/2	1.002	12.1	62	101	46	11.3
	0.6C-30Mn	flange 1/4	1.002	11.0	44	90	66	29.1
	(Steel HB)	web 1/2	1.002	11.0	52	92	61	19.6
Round bar	17Mn-3Cr	16 ϕ 1/2 D	1.002	14.9	39	97	57	21.8
Deformed bar	24Mn-5Cr	D 251/2 D	1.002	11.9	35	85	67	21.5

- * Magnetic permeability
- ** Thermal expansion coefficient

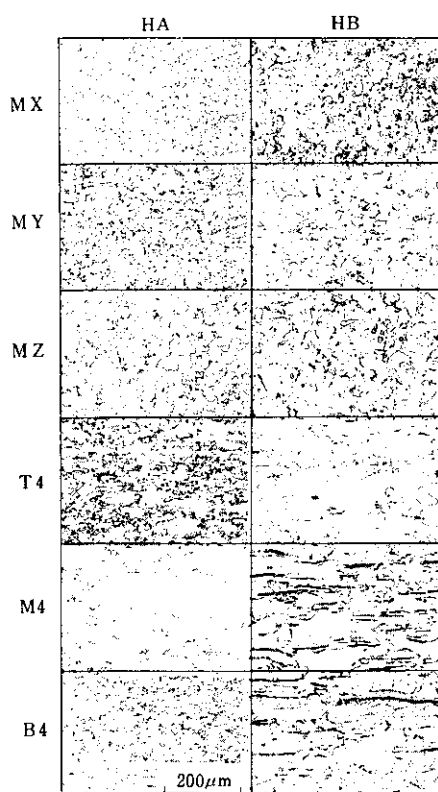


Photo. 1 Microstructures of H-shapes at each portion shown in Fig. 13

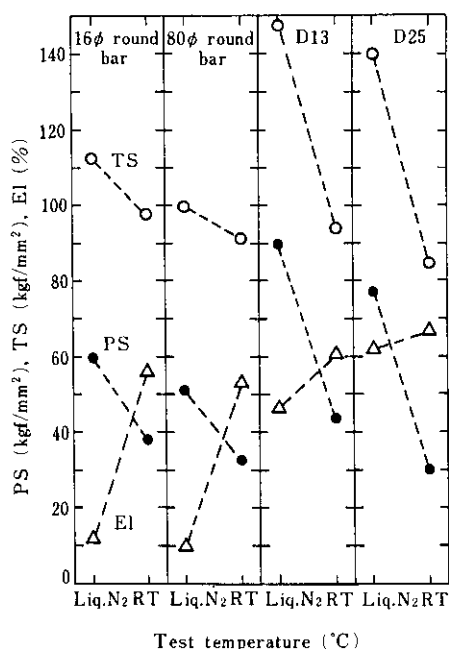


Fig. 14 Effect of product size on mechanical properties of round bar and deformed bar

備え付けられるようになりつつあるが、その付設ロール材には磁場の乱れを防止するため非磁性材を用いる必要がある。これに高 Mn 非磁性鋼を初めて適用することになった。

3-2-1 規格と成分設計

ロール素材の棒鋼を当社が製造し、ロールの製作・加工は外注によった。素材の製造にあたって目標とした機械的性質および透磁率の規格は Table 3 のとおりである。そして次の諸要因を考慮して

Table 3 Specification of non-magnetic EMS rolls for continuous casting

Temperature	PS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	νE (kgf·m)	μ
RT	≥ 40	≥ 80	≥ 15	≤ 1.1
(200°C)	(≥ 33)	(≥ 66)	—	
(400°C)	(≥ 30)	(≥ 61)	—	
(600°C)	(≥ 27)	(≥ 55)	—	

() : Preferable range

材料の成分設計を行った。

- (1) 成分と強度の関係
- (2) 高温強度および高温摩耗
- (3) γ 相の磁氣的安定性および熱膨張
- (4) 添加元素の析出硬化
- (5) 被削性（機械加工性）および溶接性
- (6) 製造性（鋼塊割れ、熱間加工性）
- (7) 特許および材料コスト

これら各要因に対する検討は、前章に述べた実験用小型鋼塊による開発基礎実験で得られた結果を参考にして行われた。ここで要因(1)を検討するために使用した 0.5C-13Mn 鋼における成分 1wt. %あたりの強度変化のデータを Table 4 に示す。

以上を勘案した結果決定した成分組成ならびに予想強度を Table 5 に示す。すなわち従来の高 Mn 鋼 1C-13Mn (Hadfield 鋼) に比べて、低 C-高 Mn の V 添加（固溶および析出硬化のため）鋼である。

3-2-2 製造および試験結果

(1) 製造工程

製造工程は次のとおりである。

溶解・精錬 → 分塊 →
(EF-LRF(脱ガス)) [340×350]

Table 4 Change in strength of high manganese standard steel by addition of each element by 1 wt. %

Source	Proof strength (kgf/mm ²)							Tensile strength (kgf/mm ²)						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo
Own results	~15	~1	~0	~3	(~0)	~12	~4	(15~30)	(~0)	~0	~2.5	(~0)	(~0)	—
Irvine et al. ¹⁴⁾	36.2	—	—	0.4	—	1.9	1.5	55.1	—	—	0	—	0	1.9
Handbook for alloy Steel (in Japanese) ¹⁵⁾	~7	~1	~0	~2	~0	~8	~4	—	—	—	1.5	—	—	—
Sawa ³⁾	—	—	0	~3	0	~10	~3	—	—	0	~2	0	~14	~2
Kato et al. ¹⁶⁾	16.2	—	—	2.0	—	11.0	3.1	29.5	—	—	1.2	—	10.3	1.9
Used value estimated from above	10	1	0	2	0	10	3	~20	(0)	0	1.5	0	~10	2

Standard steel (0.5C-0.5Si-13Mn): PS: 29kgf/mm², TS: 85kgf/mm²**Table 5** Recommended chemical composition for non-magnetic EMS roll and its estimated strength at room temperature

Chemical composition (%)									PS	TS
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	N	(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)
0.6	0.5	18	≤0.02	≤0.03	5.5	1.0	0.5	0.02	43	88

大形圧延 → 溶体化・水靱処理 →
 [240~290φ] (1080℃×6hWQ)
 材料試験 → 機械加工 → 溶接・仕上加工
 200φ(55φ内孔) (外 注)
 270φ(150φ内孔)
 → 連铸ショップ
 (単位: mm)

(2) レードル分析・欠陥検査

Table 6 に 2 チャージそれぞれのレードル分析値を示す。鋼塊トップ、ミドル、ボトム相当部について地底試験を行った結果、いずれも無欠陥であった。また超音波探傷試験およびカラーチェックの結果、中心部 20~60φの範囲にザク状欠陥が検出されたが、240φロールは 55φの、290φロールは 150φの穴あけ加工で除去されるため障害にはならなかった。

(3) 確性試験結果

透磁率 μ は as-rolled 材もしくは溶体化処理材で 1.002~1.012 である。ただしガス切断面では 1.08 であった。いずれも **Table 3** に示す規格 ($\mu \leq 1.1$) を満足している。室温の平均熱膨張係数は $(14.5 \sim 15.2) \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ である。溶体化 (1080℃×6h) 水靱処理後の室温での引張りおよび衝撃試験の結果を 240φの場合について **Table 7** に示す。常温での機械的性質は **Table 3** の規格を満足しており **Table 5** に示した予想強度ともよく一致している。なお高温強度の耐力は **Table 3** の参考値より下まわっている。

3-2-3 使用状況と今後の方針

高 Mn 非磁性ロールとして 220φおよび 270φの 2 種類のロールを使用しているが、220φロールに偏心が生じた。この原因の一つとして高温強度(耐力)の不足が推定されたので析出時効処理(820℃

Table 6 Chemical analysis of non-magnetic EMS roll having nominal composition of 18Mn-5.5Cr (%)

No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	N	Note
1	0.56	0.46	17.70	0.017	0.002	5.32	0.96	0.51	0.0310	for 220mmφ roll
2	0.58	0.50	17.90	0.016	0.002	5.50	0.97	0.49	0.0433	for 270mmφ roll

Table 7 Mechanical properties of non-magnetic EMS roll (240mm ϕ) having nominal composition of 18Mn-5.5Cr after solution heat treated at 1080°C for 6h followed by water cool

Temp. (°C)	Position tested	PS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	RA (%)	νE_{20} (kgf·m)
RT	Surface	46	89	68	56	20.2
	D/4	43	87	67	56	20.7
200	Surface	32.1	82.4	82	57	
	D/4	31.1	83.0	82	60	
300	Surface	31.5	68.4	75	74	
	D/4	30.8	67.8	71	74	
400	Surface	27.6	60.8	57	76	
	D/4	27.1	61.1	61	78	
500	Surface	20.6	55.9	46	73	
	D/4	20.3	55.5	50	72	

Table 8 Mechanical properties of non-magnetic EMS roll (240mm ϕ) having nominal composition of 18Mn-5.5Cr after age-hardening treatment (1080°C×6h W.C.→820°C×8h F.C.)

Temp. (°C)	Position tested	PS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	RA (%)	νE_{20} (kgf·m)
RT	Surface	53	83.0	16	17	2.1
	D/4	49	82.0	16	16	2.5
200	Surface	49	82.7	26	33	
	D/4	46.5	78.3	22	36	
300	Surface	42.5	73.0	30	35	
	D/4	43.1	73.6	31	36	
400	Surface	38.2	66.4	39	56	
	D/4	36.3	65.8	38	53	
500	Surface	30.4	57.6	34	66	
	D/4	31.1	57.5	34	62	
600	Surface	27.5	46.3	31	69	
	D/4	27.1	47.2	28	62	
700	Surface	26.9	35.1	26	50	
	D/4	25.9	34.9	32	53	

×8h・炉冷)を施した。その結果をTable 8に示す。それによると室温から700°C付近までの全温度域で耐力は約10kgf/mm²程度上昇しており、こ

の熱処理効果(耐力上昇および残留歪の除去)と水冷の強化によってロールの曲りは大幅に低下した。一方、270 ϕ ロールには曲りの問題は生じていない。

通常の高Mn鋼を高温用途に使用する場合、材質面での要注意点として、

- (1) 熱膨張係数が大きい
- (2) 熱伝導が悪い
- (3) 高温強度(耐力)が十分でない
- (4) 耐クリープ強度が十分でない
- (5) 高温耐腐食性が劣る

などがあげられる^{15,17)}。非磁性ロール使用時に特に重要な(3)と(5)について現在改良実験を行っており、その成果が得られつつある。

非磁性ロールの例で示すような高温での使用例が端緒となって高Mn非磁性鋼が幅広く高温用途にも利用されることを期待する。

4. 高Mn非磁性鋼の各種材質試験

3.1および3.2で述べた各鋼種(24Mn-5Cr, 0.6C-30Mn, 17Mn-3Cr, 18Mn-5.5Cr)はいずれも、高Mn非磁性鋼の代表的鋼種でもあるので、これらに対して、開発・研究の一環としてそれぞれ以下に述べる材質試験を行った。

4.1 溶体化処理後の物理的・機械的性質

Table 9に物理的性質の一覧表を示した。熱伝導率が小さいのが高Mn鋼の特徴である。Fig. 15に溶体化処理後の引張試験結果を示す。24Mn-5Cr, 30Mn鋼の場合いずれもas-rolled材に比べて耐力、引張強さが約20~30kgf/mm²程度減少する。Fig. 16には溶体化処理後のVノッチシャルピー試験による吸収エネルギーを示す。24Mn-5Cr鋼では溶体化水靱処理によりas-rolled材に比べて、靱性が著しく改善されているのが特徴である。

4.2 冷間圧延による特性の変化

各鋼種に対して溶体化水靱処理後、冷間圧延率を10~40%に変化させて引張試験や透磁率の測定を行った。室温における結果をFig. 17に示す。耐力、引張強さ、硬度は冷間圧延率の増加に伴い上昇し伸びは減少する。磁化率(χ)はHA鋼とHB

Table 9 Physical properties of high manganese non-magnetic steels along with low carbon steel and austenitic stainless steel

Product	H-shape	H-shape	Steel bar	Deformed steel bar	CC-EMS roll	Low carbon steel	Austenitic stainless steel (SUS304)
Designation	24Mn-5Cr (Steel HA)	0.6C-30Mn (Steel HB)	17Mn-3Cr	24Mn-5Cr	18Mn-5.5Cr		
Magnetic permeability, μ	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002	>230	1.02
Thermal expansion coefficient, $\beta \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{-1}$	12.2	11.0	14.9	11.9	15.0	12.6	17.3
Young's modulus (10^4 kgf/mm^2)	1.82	1.73	1.73	—	1.93	2.11	1.97
Density (g/cm^3)	7.73	7.73	7.77	—	7.76	7.85	8.03
Thermal conductivity ($\text{cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	0.039	0.032	0.036	—	0.040	0.145	0.039
Electrical resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	77.8	84.8	68.3	—	74.2	13.0	72

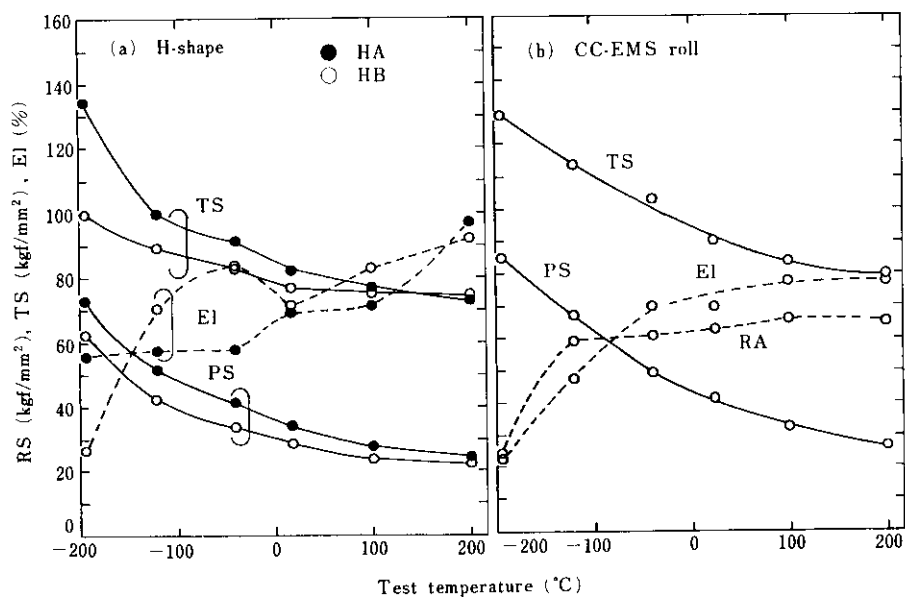


Fig. 15 Temperature dependence of tensile properties of H-shapes (a), and CC-EMS roll (b), solution annealed and then water cooled

鋼では変化せず、CC鋼では冷間圧延率が20%を越すと増大する。Fig. 18には -196°C での引張試験結果を示す。室温の場合と比較して強度は相対的に大きい、伸びは全般的に小さい。いずれの試験温度でも圧延率の増加に伴いそれぞれ著しい

加工硬化を示しており、鋼種間であまり差がない。

4.3 時効処理の影響

高Mn鋼の非磁性状態の安定性はオーステナイト相の安定度に依存している。高Mn鋼を高温で

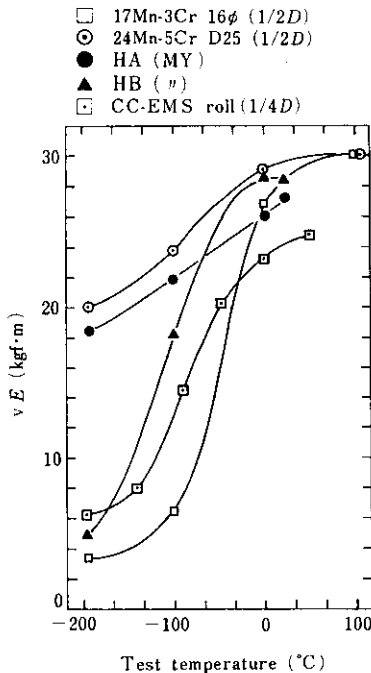


Fig. 16 Charpy impact energy of various high manganese steels solution annealed and then water cooled

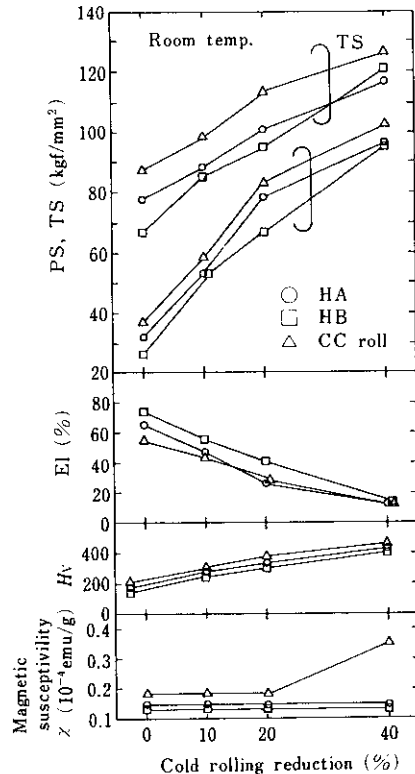


Fig. 17 Effect of cold rolling on mechanical and magnetic properties of various products at room temperature

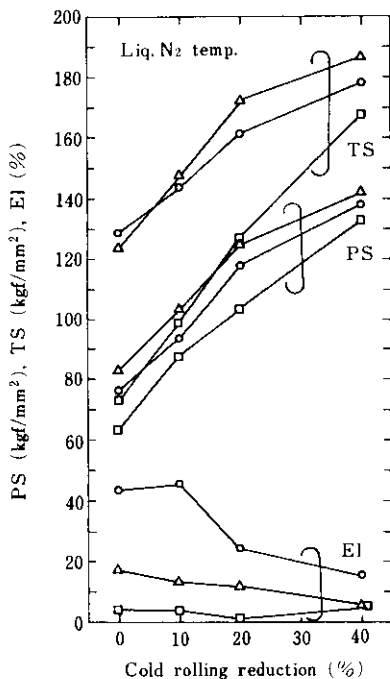


Fig. 18 Effect of cold rolling on mechanical properties of various products at -196°C (Liq. N_2 temp.)

熱処理することにより炭化物やパーライトの析出による磁化の増加が予想される¹⁸⁾ので、これらの熱的安定性をみるために $550\sim 1050^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で 30min $\sim$ 80h の熱処理を行い、その後組織観察ならびに硬度および磁化の測定を行った。硬度・光顕試料 (10mm ϕ) および磁化測定試料 (5mm ϕ) はいずれも薄板にくるんで熱処理を行い、表面の酸化を防止するように努めた。熱処理後の表面層は若干酸化されていたので表面をペーパー研磨仕上げをした後に磁化測定を行った。

Fig. 19 に硬度の変化を、Fig. 20 に 1T での磁化 (σ) の変化を示す。HA 鋼と HB 鋼は時効硬化元素を含んでおらず熱処理による硬度変化はほとんど現われない。一方 V を添加した CC 鋼では $750\sim 850^{\circ}\text{C}$ の間にノーズを有する析出曲線が現われる。

磁化測定の結果では 10h 以内の熱処理に対して、各試料ともほとんど変化はみられない。30h 以降の熱処理に対しては 650°C 以上の温度で値が増加

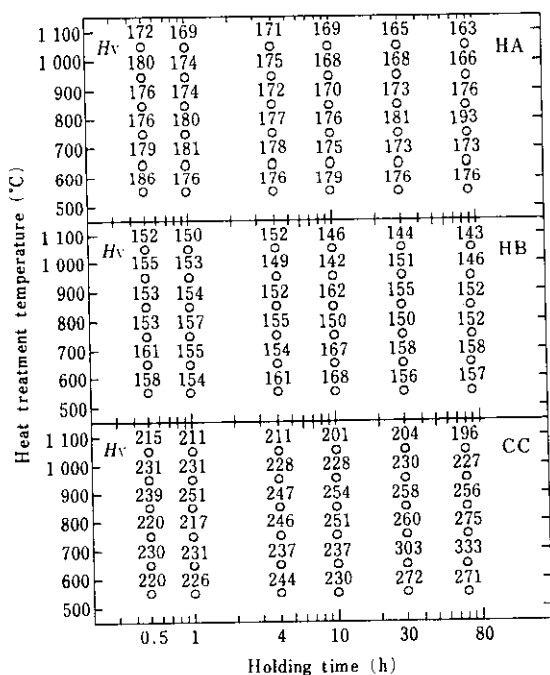


Fig. 19 Effect of isothermal heat treatment on hardness of high manganese steels

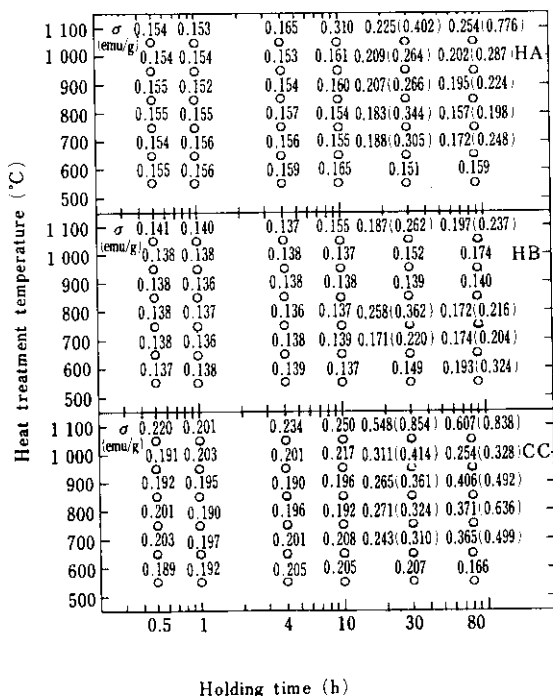


Fig. 20 Effect of isothermal heat treatment on magnetization (σ) of high manganese steels

する傾向がみられる。各鋼とも熱処理後の表面層の除去が不十分な場合、磁化は大きな値として観察された(図にはそのときの値を()内に示した)。しかし HA 鋼と HB 鋼では、表面研磨が十分行われれば磁化は低値に安定しており、熱処理による磁化への影響は実用上問題はない。他方 CC ロール鋼は前の 2 鋼種に比べて若干大きい値を示すが、700°C 付近までの温度での使用においては問題はない。

4.4 高温引張試験結果

高 Mn 鋼の高温強度に関するデータはあまり報告されていない。HA, HB, CC ロールの 3 鋼種の溶体化水靱処理後の試験結果を Fig. 21 に示す。

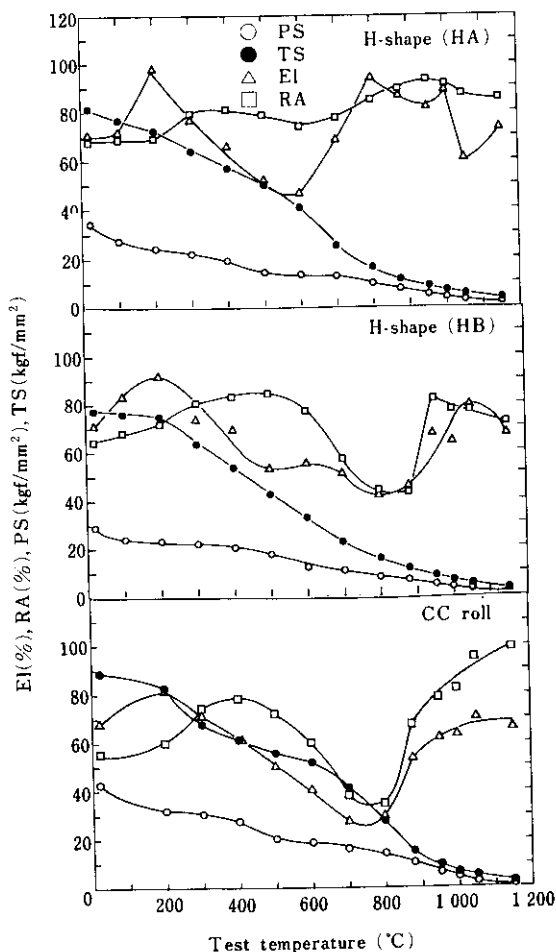


Fig. 21 Change in tensile properties of H-shapes and CC-EMS roll in the region of elevated temperatures

一般に高 Mn 鋼の高温強度はステンレス鋼や耐熱鋼にくらべると低いと見なされているが、ここに示した 3 鋼種の例からもわかるように高温強度(特に耐力)は成分系で大きく異なり、適切な成分系を選べば高 Mn 鋼を高温用途にも適用できることが示唆された。

4-5 被削性

高 Mn 非磁性鋼は加工硬化能が大きく耐摩耗性に優れているため切削加工が困難な材料である。このことが機械的・物理的特性に優れた面を有するにもかかわらず本鋼の用途が制約される理由の一つに挙げられる。そこで被削性改良実験の一環として現場製造材による長手旋削性試験およびドリル穿孔性試験を行った。

Fig. 22 は 13Mn, 17Mn-3Cr, 18Mn-5.5Cr (-1 Ni-0.5V), 24Mn-5Cr, SUS304 各鋼の as-rolled 材の(ただし 18Mn-5.5Cr は溶体化処理材をも加えた)長手旋削性試験を、送り 0.3mm/rev., 工具寿命判定 V_B (フランク摩耗) = 0.1mm で行ったと

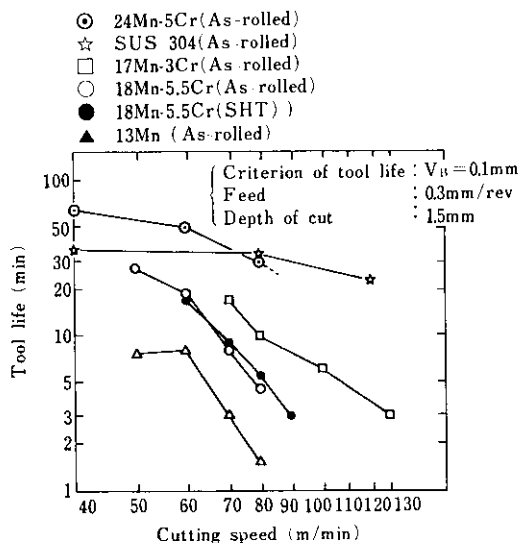


Fig. 22 Tool life curves in turnign of high manganese steels

きの V (切削速度) - T (工具寿命) 線図である。切削性の良好なものから並べると、

SUS304 $\geq$ 24Mn-5Cr $>$ 17Mn-3Cr $>$ 18Mn-5.5Cr (溶体化処理材) $\geq$ 18Mn-5.5Cr (as-rolled) $>$ 13Mn

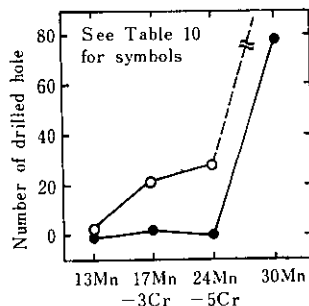


Fig. 23 Drill life curves in boring of high manganese steels

となる。Fig. 23 は 13Mn, 17Mn-3Cr, 24Mn-5Cr および 30Mn 各鋼種の as-rolled 材のドリル穿孔性試験結果である。10 ϕ $\times$ 15mm 深さのめくら孔をあけ、切削不能となるまでの個数を計測した。用いた機械はラジアルボール盤で切削油を使用した。工具と穿孔条件は Table 10 のようである。穿孔性の良好なものから並べると

30Mn $>$ 24Mn-5Cr $>$ 17Mn-3Cr $>$ 13Mn

となり前述の長手旋削試験結果と同一の傾向となっている。30Mn 鋼はハイスドリル(SKH9)による穴あけが可能であることが注目される。

Table 10 Cutting conditions for drilling test

	Tool	Point angle	Feed	Cutting speed
●	SKH9 10mm ϕ	135°	0.05mm/rev	4.4m/min
○	K 20 10mm ϕ	135°	0.025	14.1

Depth of hole: 15mm (blind)

Judgement of drill life: Drill failure

4-6 高 Mn 非磁性鋼の溶接継手性能

高 Mn 非磁性鋼の溶接性能を把握するため溶接継手試験を行った。この場合同材継手のはかに S M-50 との異材継手試験も行った。母材、溶接材料、溶接条件および継手性能試験結果を Table 11 に示す。溶接後の X 線割れ検査や組織観察において割れは観察されず、またサイドベンド試験結果からも溶接状況は良好であることが確められた。同材継手の透磁率の上昇はほとんどみられなかった。他方、SM-50 との異材継手の透磁率の上昇は Fig. 24 に示すように溶接部のごく近傍に限ら

Table 11 Base metal, welding condition and mechanical properties and magnetic permeability of weld joints

Steel	Nominal composition of base metal	Weld joints with same material				Weld joints with SM50		
		μ	PS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	$\sqrt{E_{20}}$ (kgf·m)	PS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	$\sqrt{E_{20}}$ (kgf·m)
HA	0.5C-24Mn-5Cr	1.006	63	85	13.5	34	53	14.8
CC	0.6C-18Mn-5.5Cr-1Ni-0.5V	1.006	49	85	13.8	33	53	13.3
D	0.15C-24Mn-5Cr-1.5Al-0.3V	1.007	33	63	14.2	34	53	15.3

Welding method	Manual	Groove preparation (mm)	
Welding material	MC-16		
Plate thickness	22mm		
Location of V-notch	Weld metal		

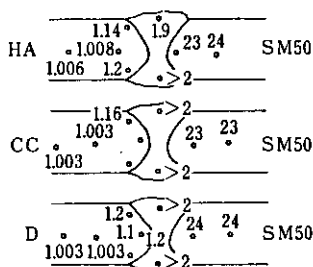


Fig. 24 Magnetic permeability on weld joints of high manganese steels

れており実用上問題はない。なお、この場合の透磁率はマグネトスコープによる簡易非破壊測定法により求めた。Fig. 25 には同材ならびに SM-50 との異材継手部の引張試験結果をまとめて示した。同材継手の耐力は母材のそれよりも増加しており、引張強度は D 鋼のみ変化せず他は母材より低下している。このとき破断位置は HA 鋼, CC ロール鋼の室温以上の試験ではすべて溶接金属中央部で生じ, D 鋼ではすべて母材側で生じた。他方, 異材継手の場合, HA 鋼と CC ロール鋼の強度は SM-50 の強度に依存しており室温から 400°C までの温度範囲では耐力の減少は少なく, いずれも PS ≥ 30kgf/mm² である。D 鋼の場合は温度上昇とともに耐力が減少するが 400°C までは PS ≥ 20kgf/mm² となっている。そして破断位置は HA 鋼と CC 鋼ではすべて SM-50 側で, また D 鋼では 200°C, 400°C 以外の試験温度において SM-50 側で生じた。Fig. 26 にノッチ位置を溶接金属中央部に設けたときの

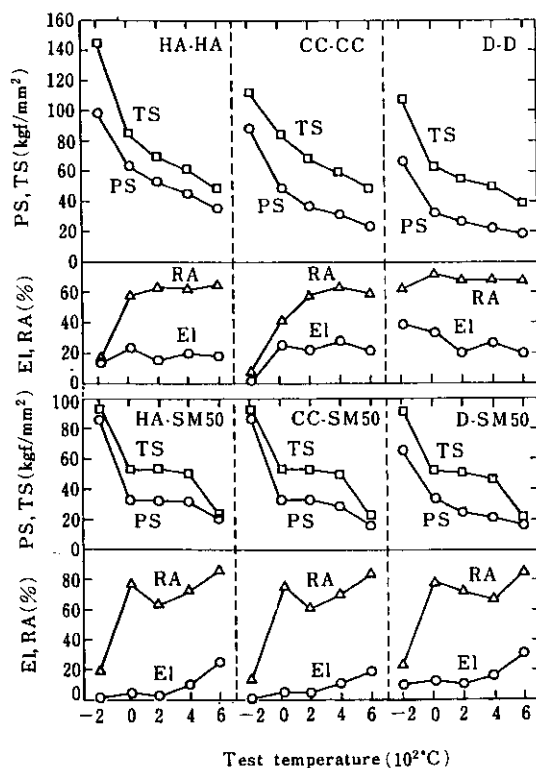


Fig. 25 Tensile properties of weld joints of high manganese steels at various temperatures

異材継手のシャルピー衝撃試験による吸収エネルギーの測定結果を示す。どの鋼種の場合も室温で 13~15kgf·m 程度の値を示し, 溶接棒“MC-16”の溶接金属の衝撃値そのものを示していると考えられる。

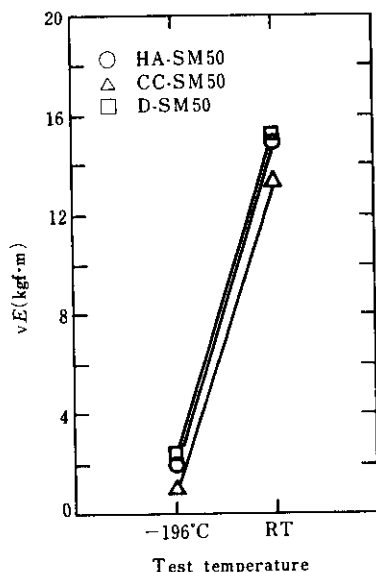


Fig. 26 Charpy impact energy of weld joints of high manganese steels at -196°C and room temperature

このように高 Mn 鋼は同材継手のほか普通鋼との異材継手を行って使用することができる。なお

溶接試験についてはこの試験以外にも詳しい試験が行われている。

5. 結 言

高 Mn 非磁性鋼の熱膨張や磁性などの物理的性質ならびに機械的性質に対する、基本成分である C および Mn の影響を調べ、広範な需要・用途に適用しうる成分系からなる新鋼種を開発した。

そして現場製造技術の確立および工程材の諸特性を把握するために 5t 鋼塊を溶製して H 形鋼、丸棒、異形棒鋼を現場工程で製造し、良好な特性が得られることを確かめた。さらに高 Mn 非磁性鋼の実製品への応用例として連続铸造機の電磁攪拌装置付属のピンチロール材をとりあげ、前述の現場工程材とあわせて製品試験結果ならびに低温 (-196°C) から高温にわたる機械的・物理的性質および溶接継手性能などについて論述した。

以上から高 Mn 非磁性鋼は優れた諸性質を有し、今後種々の用途に適用範囲が拡大されてゆくものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編：新版鉄鋼便覧，(1962)，1455〔丸善〕
- 2) 橋浦広吉：日本金属学会報，16 (1977) 10，681
- 3) 沢 繁樹：日本金属学会報，18 (1979) 8，573
- 4) 斉藤利生：日本金属学会誌，27 (1963) 8，376
- 5) H. Shumann：Neue Hütte，17 (1972) 10，605
- 6) 高田 寿：特殊鋼，28 (1979) 5，8
- 7) 近角ほか編集：磁性体ハンドブック，(1975)，397〔朝倉書店〕
- 8) 近角，溝口：固体物理，3 (1968) 2，67
- 9) 斎藤，藤森：日本金属学会報，7 (1968) 5，263
- 10) 近角ほか編集：磁性体ハンドブック，(1975)，341〔朝倉書店〕
- 11) 佐々木，渡辺，野原，近藤，小野，佐藤，一瀬：鉄と鋼，67 (1981) 2，A81
- 12) 佐々木，渡辺，野原，小野，大橋：鉄と鋼，66 (1980) 4，S351
- 13) 滝沢，菊川：日本建築学会大会梗概集，(1980，9)，演習番号1106
- 14) K.J. Irvine, T. Gladman, and F.B. Pickering：JISI，207 (1969) 7，1017
- 15) 電気製鋼研究会編：特殊鋼便覧 (1969)，12章〔理工学社〕
- 16) 加藤，藤倉，川崎，石田：鉄と鋼，65 (1979)，S372
- 17) ASM編：Metals Handbook，1 (1961)，834
- 18) 今井，斉藤：鉄と鋼，46 (1960) 6，665