

新日本製鐵 八幡製鐵所 榊 本 弘 毅
 (現 光製鐵所) 吉 村 博 文

1. 開発の目的

高Mn系非磁性鋼に要求される特性は、超電導用材料の構造材まで対象に含めれば、(1)液体He温度(4°K)で非磁性であり、脆化しないこと、(2)強度が高いこと、(3)熱伝導度、熱膨張係数が小さいこと、(4)加工、熱処理に対して材質が安定していること等となる。一方、これらが満足されれば、低温用鋼としての用途も期待される。以上の点を高Mn系鋼の特性と用途という観点で示すとTable 1のようになる。著者らはこの内、低温用構造物、および極低温強磁場構造物への適用を目的として検討を行い、適正成分系として低C-25%Mn系鋼を選出した¹⁾²⁾。今回は、この鋼の現場試作材について上記観点から材質を調査し、その特徴を明らかにした。

Table 1. 高Mn系オーステナイト鋼の用途と利用される特性

主 な 用 途	利用される特性	
常 温 強 磁 場 構 造 物	磁気浮上推進軌道材 (形鋼, 鉄筋, ボルトなど)	非 磁 性
	電磁石保持材, 構造材 - 核融合実験炉, MHD発電	
	重電機器部材 - 渦流損失防止	
極 低 温 強 磁 場 構 造 物	超電導送電機器	高 靱 性
	超電導電磁石保持材, 構造材 - 核融合, MHD発電など (液体He温度)	
低 温 用 構 造 物	液化ガス用容器, 配管, 構造材 - LNGタンクなど(-162°C)	加 工 硬 化 耐 摩 耗 性
レ - ル	耐摩耗レール, クロッシング	
土 木 鉱 山 機 械	耐摩耗部品	

2. 試作工程と材質試験内容

2.1 目標性質と化学成分

目標性質は、常温で0.2%PS \geq 294MPa, TS \geq 686MPa, 77°Kのシャルピー試験吸収エネルギー, $vE \geq 49$ J, 77°K~300°Kの平均熱膨張率 $= 7 \times 10^{-6}/^{\circ}C$, 透磁率 ≤ 1.02 , とした。

Table 2. Chemical Composition (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb
Range	0.15~ 0.17	0.20~ 0.60	24.0~ 26.0	0.03 max.	0.01 max.	0.80~ 1.20	4.50~ 5.50	0.05~ 0.07
Ladle analysis	0.15	0.25	24.50	0.026	0.005	1.09	5.08	0.050

目標成分をTable 2に示した。これらの成分の内、Cは粒界析出による靱性の低下を防ぐため0.3%が上限となる。MnはNiなしで極低温、冷間加工でも安定なオーステナイトを得、また熱膨張係数を最小とするため、25%とした。Pは靱性を損なうため上限を0.03%とした。Crはオーステナイトの安定化のため2~5%が必要である。Niはオーステナイトの安定化と、溶接部の靱性の向上のため1%添加した。Nbは細粒化による強度上昇効果を有する。また熱間加工性向上のためCaを添加した。

2.2 試作工程

30トン電気炉→15トン鋼塊→均熱(1200°C)→分塊圧延→スラブ→再加熱(1200°C)→厚板圧延→厚板(板厚: 6, 13, 25, 40mm)。化学成分をTable 2に併記したが、目標範囲に入っている。

2.3 材質試験内容

材質試験は、日本溶接協会鋼種認定方法に準じて行い、さらに疲労試験、被削性試験、COD試験などを追加した。試験温度は、RT~77°K(液体窒素温度)であるが、一部は4°K(液体ヘリウム温度)でも試験した。素材は圧延ままの他に、溶体化、SR焼鈍、冷間加工も行って供試した。

3. 母材の強度と靱性

(1) 引張および衝撃性質: 母材の引張および衝撃試験結果をTable 3に示した。圧延まま材の0.2%PSはRTで

380MPa以上, 77°Kで770MPa以上, vE は77°Kで50J以上であり, 一応目標性質を満足している。板厚による強度の変化は, 圧延仕上温度の相違による。溶体化処理により, 0.2%PSは310MPaに低下するが吸収エネルギーは増加する。

(2) Deep Notch試験: 試験片(圧延まま材)の板厚=13および40mm, 長さ=500mm, 巾=400mm, センターノッチ長さ=160mmとし77°Kで試験した。結果はNet Stress 670MPa以上で完全延性破壊を生じた。

(3) COD試験: 圧延まま40mm材のCOD試験結果をFig.1に示した。77°Kの臨界COD値は20mm平削材で0.30mm, 原厚材で0.43mmであった。温度上昇によりCOD値は増大するが, その程度はあまり大きくない。

(4) 混成ESSO試験: 本Mn鋼(圧延まま, 板厚=13および40mm)を停止材とし, 試験片の巾=400又は500mm, 長さ=500mm, 温度=77°K, 応力=243~373MPaとした。脆性亀裂は本Mn鋼と発生材の境界溶接金属で停止した。

(5) NRL落重試験: 40mm材を板厚25mmに切削し, 77°Kで試験した。亀裂は発生せず, NDT温度は77°K以下となった。

4. 溶接性

(1) 熱間割れ性: バリストレイン試験では付加歪1%でも溶接金属に割れを生じた。

(2) 冷間割れ性: Table4に示すMo添加共金系溶接材料を用い, 斜めY形溶接割れ試験を行なった。板厚40mm予熱なしでも割れは生じなかった。ただし溶着金属にクレター割れが発生した。

(3) 手溶接継手性質: 40mm材について, Table4の溶接棒を用い, 入熱12KJ/cm, 予熱なし, 層間温度150℃以下で手溶接を行った。継手引張強さは約725MPa, WM破断であった。また77°Kの vE は, 溶接部を通じて64J以上であるが, 570℃×100分のSR焼鈍を行うと, WMの vE は94Jであるが, HAZでは33~46Jに低下しSR脆化を生じた。

(4) 潜弧溶接継手性質: 同じく入熱40KJ/cmで潜弧溶接を行なった。継手引張強さは720MPa, 77°Kの vE は溶接ままで65J以上であった。

(5) 熱サイクル再現材の靱性: 40mm材の溶接熱サイクル再現後の vE をFig.2に示した。本Mn鋼は溶接後の vE は

Table3. Tensile and Impact Properties of Low C-25Mn-5Cr-1Ni Steel

	Testing Temperature	Thickness (mm)	0.2% PS (MPa)	TS (MPa)	E ℓ (%)	Absorbed energy (J)	
						L	T
As-rolled	R T	13	475	767	58	148	111
		25	384	734	72	177	124
		40	388	737	56	165	177
	77°K	13	851	1439	35	75	52
		25	-	-	-	86	64
		40	775	1277	20	81	74
Solution treated at 930°K	R T, *77°K	13	352	693	69	*97	*78
		25	360	712	73	*104	*92
		40	311	712	61	*104	*103

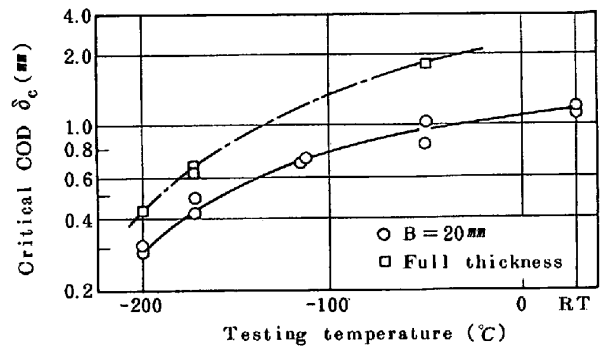


Fig.1. COD Test Results

Table4. Chemical Composition of Welding Wire

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
0.22	0.24	26.1	0.008	0.012	4.55	2.62	0.005

Testing condition
 A: As rolled
 B: 1100°K 30min, W.C.
 C: B+600°K 4hr, F.C.
 D: Synthetic HAZ eq. to 1.7KJ/cm
 E: D+600°K 4hr, F.C.

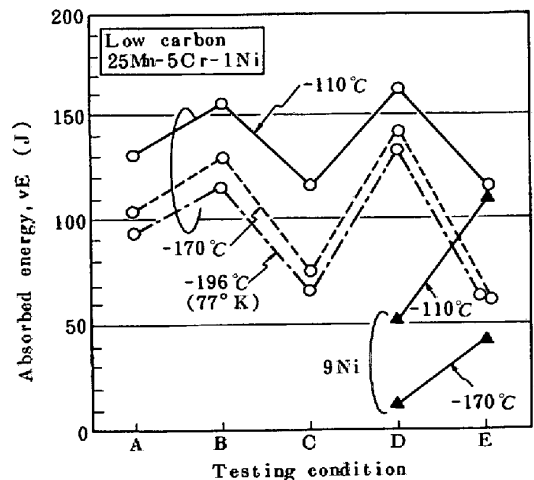


Fig.2. Charpy Test Value for Low Carbon 25Mn-5Cr-1Ni Steel and 9Ni Steel (T Direction)

77°Kで90 J以上であるが、600°C SRで9%Ni鋼と同じレベルまで低下する。

5. 冷間加工性

(1) 歪時効脆化：10%の引張加工を与えた後、250°Cで時効させたが-196°Cの vE は70 J以上であった。また25%までの冷間加工ではマルテンサイトは生成せず、オーステナイトは安定であった。後熱処理温度は、600°C以下ならば vE は50 J以上であるが、650~800°Cでは vE は約30 Jまで低下し、SR脆化を生ずる。

(2) 被削性：ハイスドリルによる穴あけ加工性試験結果をFig. 3に示した。ドリル先端角135°であるが、穴あけ性はSUS304より劣っていた。普通鋼と同様にドリル寿命は被削材の硬さの上昇につれて短くなる。

6. 物理的性質

透磁率は1.0015、77°K~RTの平均熱膨張率は $7.22 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ であった。

7. 液体ヘリウム温度における性質³⁾

13mm材を1050°Cで溶体化処理した後、母材および手溶接継手(Table 4の共金系材料、入熱=20 KJ/cm)について液体ヘリウム温度で引張および衝撃試験を行なった。母材の試験結果をFig. 4に示した。4°Kで0.2% PSは1010 MPa、TSは1800 MPa、 vE は25°Kで50 J (5mmサブサイズ)であった。溶接金属のPSは870 MPa、TSは1260 MPaで母材より低かった。溶接部の vE は19~27°Kで26 J (5mmサブサイズ)以上であった。また母材に10%の引張加工を与えた場合も vE は39 J (5mmサブサイズ)以上であった。いずれの場合も破面には、マルテンサイトは認められなかった。

8. 構造用鋼としての適応性

8.1 低温用構造物用鋼

Table 1に示した低温構造物用鋼には、たとえばLNGタンク用9%Ni鋼がある。9%Ni鋼の設計応力は、現在16.7 kg/mm² (164 MPa)であるが、本Mn鋼の場合、降伏強さを310 MPa以上、引張強さ690 MPa以上とすることは可能であってASMEの規定に基づいて設計応力を定めれば(1/4 TSまたは2/3 YS)、9%Ni鋼より強度的に有利となる。また77°Kで脆性破壊を発生せず、停止させる点でも9%Ni鋼より優れている。したがって、本Mn鋼は、低温用鋼として、9%Ni鋼に代って使用することが考えられる。

8.2 極低温強磁場構造物用鋼

本Mn鋼は、溶体化処理した場合、極低温(4~27°K)において、十分な強度と良好な靱性が得られた。一方、超電導電磁石保持

Cutting condition	
Depth of Hole	: 30 mm (blind)
Tool	: SKH9, 10 mm ϕ , point angle 135°
Speed	: 0.33 mm/rev
Cutting oil	: Spindle oil #60, 2 l/min
Tool life criterion	: Complete failure

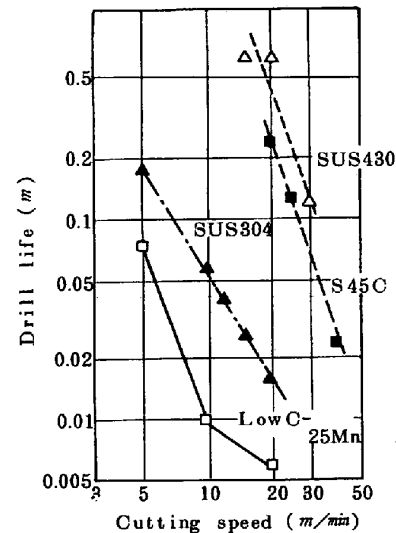


Fig. 3. Comparison of Drill Life

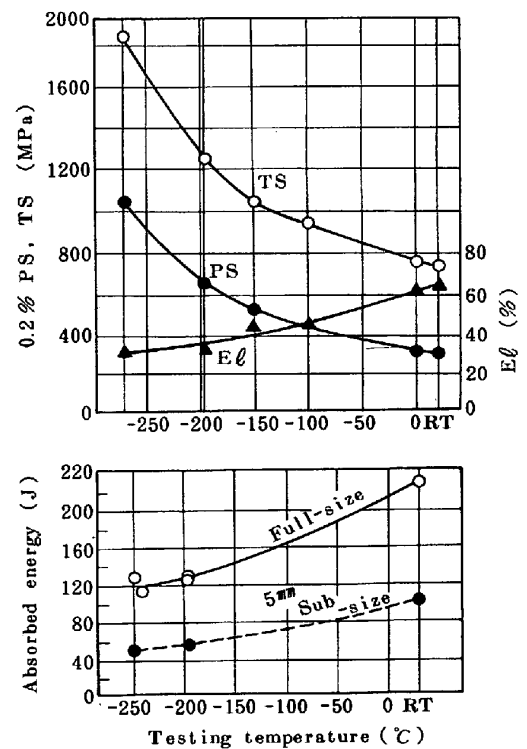


Fig. 4. Tensile and Impact Properties at Cryogenic Temperature

材としては、たとえば4°Kにおいて690MPa以上のPS，220MPa \sqrt{m} 以上の K_{IC} が要求されている。したがって本鋼は、強度面，靱性面から見て、極低温用鋼材として使用が可能と思われる。

8.3 問題点と要検討事項

溶接性の中で、熱間割れの防止と、適正溶接材料の開発，あるいは適正溶接方法の開発が必要である。また切削性等の被加工性の向上も望まれる。加工による靱性，透磁率の劣化は問題にならないため，このためのSRは不必要であり，逆にSRによる靱性の劣化を生ずるためSRは望ましくない。構造材としては，さらに疲労特性，特に使用温度における疲労亀裂伝播特性の調査が必要である。

9. 結 論

低C-25Mn-5Cr-1Ni系オーステナイト鋼を開発し，その特性を調査した。その結果，この鋼は溶接性，加工性に若干の改良点は残されるが，低温用鋼としては9%Niに代替し，また極低温用非磁性鋼としても使用される可能性のあることを明らかにした。

参考文献

- 1) 吉村 他，鉄と鋼 61(1975)3 321-330
- 2) 吉村 他，鉄と鋼 65(1979)9 1434-1439
- 3) 吉村 他，鉄と鋼 65(1979)6 681-686