

## 技術報告

鋼管鉄塔用 60 kgf/mm<sup>2</sup> 鋼の開発と耐溶融亜鉛  
ぜい化の検討

武田鉄治郎\*・金谷 研\*・山戸一成\*・永露清次\*<sup>2</sup>  
茶野善作\*<sup>3</sup>・金沢正午\*<sup>4</sup>・広木光雄\*<sup>4</sup>・家沢 徹\*<sup>5</sup>

Development of 60 kgf/mm<sup>2</sup> Steel for Power-transmission Pipe Tower  
and Its Resistance to Liquid Zinc Embrittlement

Tetsujiro TAKEDA, Ken KANAYA, Kazunari YAMATO, Kiyotsugu EIRO,  
Zensaku CHANO, Shogo KANAZAWA, Teruo HIROKI, and Tooru IEZAWA

## Synopsis:

There are many recently constructed power-transmission steel towers that are larger in size than ordinary ones. Higher strength steel is considered necessary for the large size tower to reduce its weight. Besides usual mechanical properties, the steel must have the resistance to zinc coating-induced cracking (ZIC) due to liquid metal embrittlement (LME).

1) Testing methods are developed to evaluate the ZIC susceptibility quantitatively. 2) Index for the ZIC susceptibility ( $S_{LM}^{L0}$ ) is expressed as a function of chemical composition of steel. If the value of  $S_{LM}^{L0}$  is larger than 42%, the ZIC would not occur. 3) New 60 kg/mm<sup>2</sup> steels are developed as plate, UO pipe and ERW pipe for the use of a power-transmission tower. The steels show the excellent resistance properties to the ZIC and mechanical properties including buckling properties of pipes.

## 1. 緒 言

送電向け鋼管鉄塔用鋼材は 40 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の時代を経て現在は、鋼管は 55 kg/mm<sup>2</sup> 鋼、ガセットプレート等の鋼板は 50 kg/mm<sup>2</sup> 鋼が主体であるが、最近の鉄塔大型化の傾向に伴いつその軽量化が必然の要望となっており適切な高強度鋼の適用を考えなければならない。

送電鉄塔用鋼材には強度、じん性、座屈耐力、疲労、溶接性のほか、特に耐溶融 Zn ぜい化が重要な特性として要求される。これは、鉄塔の構造部材は溶接組立後溶融 Zn めつきが行われるためである。

すなわち、溶融 Zn ぜい化は溶融 Zn めつき時に、主に隅肉溶接熱影響部 (HAZ) の粗粒域に生ずる粒界ぜい化で、従来から知られている液体金属ぜい化 (LME) にもとづく現象である。このぜい化は Zn 浴中での粒界われとして検出される場合がありこの例を Photo. 1 に示す。溶融 Zn われに関しては、現象論的にはかなりの理解と整理が行われており、例えば、実際のめつき作業において浸せき速度をはやくし、発生する熱応力を低く

おさえてわれを防止している<sup>1)</sup>。しかし、その冶金要因についてはほとんど解明されていないのが現状である。

これは、LME が液体金属-固体金属の組み合わせでぜい化が生じたり生じなかつたり極めて多様な現象を示しただ統一的な解釈ができず、また Zn-Fe 系に限つても鋼種間のわれ感受性の差を詳細かつ定量的に判定する試験法が従来検討されていなかつたことも原因である。

本研究では、軽量化を目的とした鉄塔用高強度鋼の開発にあたり新たに定量的にわずかな溶融 Zn われ感受性の差をも評価できる試験法を検討し、溶融 Zn われにおよぼす合金元素の影響を明らかにした。さらに、これにもとづき耐溶融 Zn われ性にすぐれた 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼、すなわち、鉄塔がさらに大型化され溶融 Zn めつき時の熱応力が増大した場合でも十分 Zn われが防止され、かつ鉄塔重量の軽量化ができる 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼管と鋼板、の開発を行つた。

開発強度目標を 60 kg/mm<sup>2</sup> とした理由は、各種の検討を行つた結果、70 kg/mm<sup>2</sup>、80 kg/mm<sup>2</sup> 鋼では耐溶融 Zn ぜい化の対策および鉄塔製作の経済面から時期尚早

昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 7 月 11 日受付 (Received July 11, 1983)

\* 新日本製鉄(株)第二技術研究所 (R & D Laboratories - II, Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagamihara 229)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>4</sup> (株)巴組鐵工所 工博 (Tomoe-gumi Iron Works, Ltd., 3-4-5 Toyosu Koto-ku 135)

\*<sup>5</sup> (株)巴組鐵工所 (Tomoe-gumi Iron Works, Ltd.)

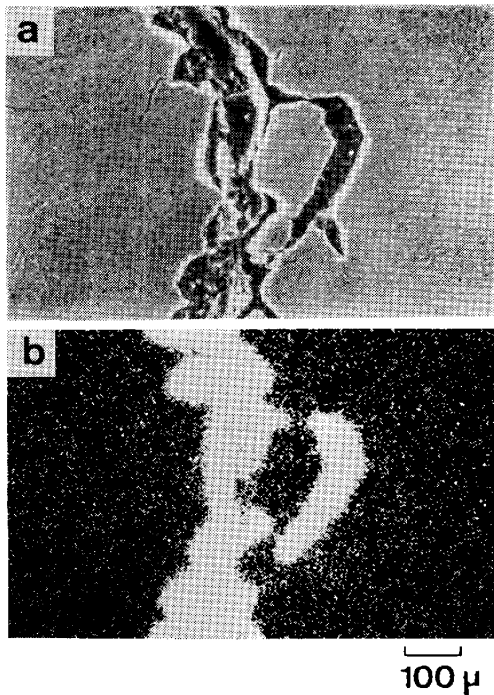


Photo. 1. Typical example of zinc coating-induced crack observed in the coarse grained region of HAZ. Secondary electron image (a) and zinc characteristic X-ray image (b).

と判断されたためである。

## 2. 溶融 Zn われ感受性試験法<sup>†</sup>

溶融 Zn われは次の条件下で発生する。①主に、溶接によつて急熱急冷された HAZ の組織であること ②溶融 Zn めつき時 (450~470°C) に応力集中 (熱応力や溶接残留応力による) があること ③溶融 Zn が接触していること、である。鋼の溶融 Zn われ感受性の評価法としてこれらの条件を再現することを目的として以下の方法を考案した。④切り欠き付き丸棒引張試験法<sup>2)</sup> (Notched Bar Tensile Test, NBT 法), ⑤拘束継手試験法<sup>2)</sup>, ⑥十字隅肉溶接継手除荷試験法<sup>3)</sup>, ⑦Zn 浴中母材引張試験法<sup>3)</sup> の 4 種である。④の方法は定量的にわれ感受性を評価するもので、拘束型熱サイクル再現装置により行うので一般的な方法ではないが、成分検討など冶金要因の検討が可能である。⑤の方法は特殊な試験装置を必要とせず、簡単に現場で実施できる方法である。⑥, ⑦の方法は Zn 浴中で試験ができる引張装置を要し必ずしも一般的な方法ではないが、実態に即した試験法である。以上、冶金的検討法として④, 実際の Zn われ感受性の評価方法として⑤, ⑥および⑦の 3 方法を併用することにした。

NBT 法の試験要領を Fig. 1 に示す。丸棒試験片を

<sup>†</sup> これについては別の機会にさらに詳細な検討結果を報告する予定である。

製作し、最高加熱温度 1400°C、800→500°C 冷却時間 8s の熱サイクルにより HAZ (標準 HAZ) を再現させた後円周切り欠きを加工する。その後、切り欠き部に Zn を電着<sup>†2</sup>させ Zn めつき時の温度・応力サイクルを拘束型熱サイクル再現装置により付与させる。得られるデータは破断時間と破断応力で Fig. 2 にその例を示す。この図のたて軸は 470°C における Zn の有無による破断応力の比 ( $S_{LM}^{†3}$ ) で、塑性変形を伴わない Zn による強度の低下度合、すなわち Zn によるぜい化度合を示している。従つて、この図で曲線が上方にある鋼ほどわれ感受性が低いことを意味している。以後、実際のめつき作業も考慮して 400s のときの破断応力比  $S_{LM}^{†3}$  をもつて溶融 Zn われ感受性とし、この大小により鋼種間の比較を行うことにする。

次に、実際のめつき作業でのわれの発生・非発生の限界値を明らかにするため、実作業に対して最も厳しい場合を想定した拘束継手試験法 (Fig. 3) との対応を行った。これは試験ビードをおいた後拘束ビードで試験ビー

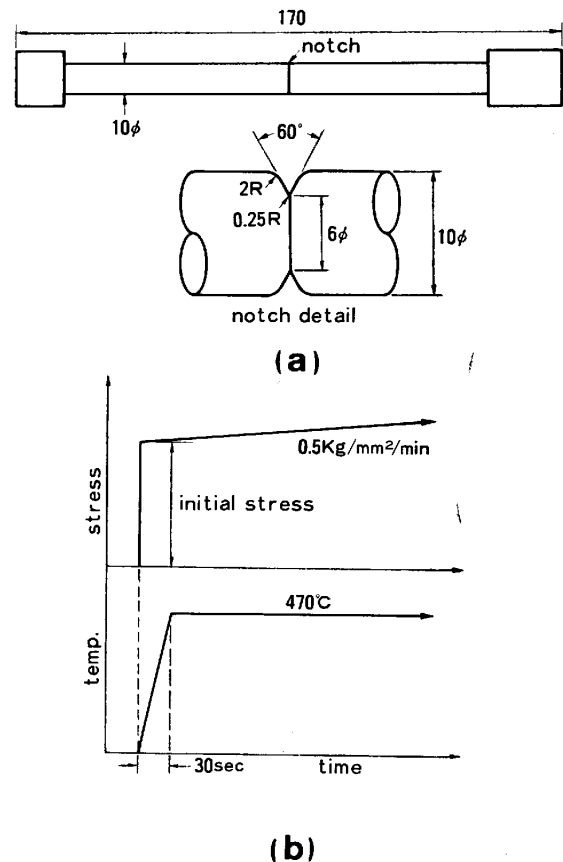


Fig. 1. Details of Notched Bar Tensile (NBT) test method. Specimen details (a) and stress-temperature diagram (b).

<sup>†2</sup> この断面積では溶融 Zn 中に浸せきしなくても電着した Zn 量でぜい化に対して十分な Zn 量であることを確認した。

<sup>†3</sup> Susceptibility to Liquid Metal Embrittlement

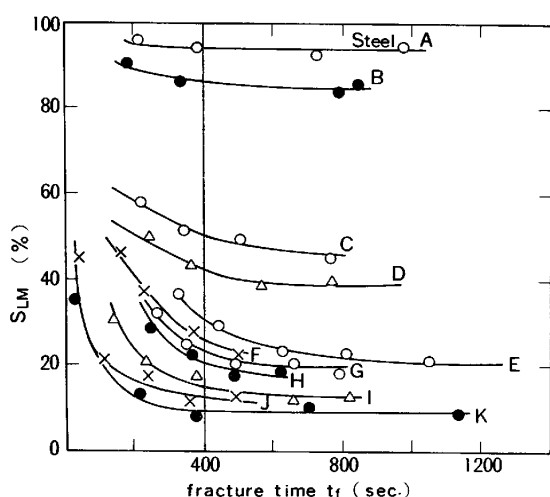


Fig. 2. Relation between fracture time and fracture stress of various steels obtained by NBT test.  $S_{LM} = 100 \times (\text{Fracture stress of zinc coated specimen} / \text{Fracture stress of non coated specimen})$ .

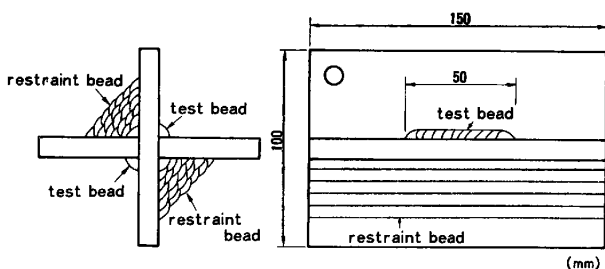


Fig. 3. Details of restraint type weldment test specimen.

ド部に曲げ残留応力を付与させ、これを Zn 浴に浸せきして試験ビードトウ部 (応力集中係数  $K_t = 2.0$ ) にわれが発生するか否かを判定する方法である。管径が大きいことを予想した  $60 \text{ kg/mm}^2$  鋼の場合は発生熱応力が高いので (後述) 拘束パス数が 20 (母材降伏強度の約 100% の残留応力)、管径が現状の  $55 \text{ kg/mm}^2$  鋼の場合は発生熱応力が高いので (後述) 拘束パス数が 10 (母材の降伏強度の約 80% の残留応力) で各々われが発生するか否かを見るものである。

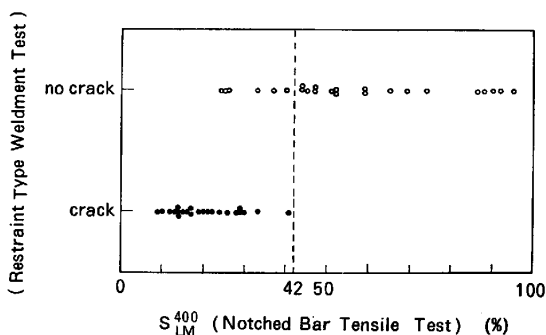


Fig. 4. Relation between NBT test results and restraint type weldment test results.

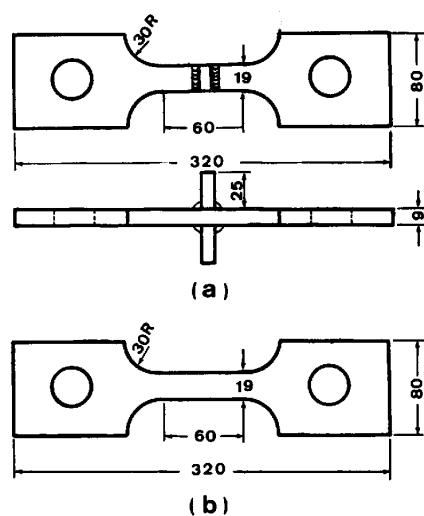


Fig. 5. Details of specimen. Unloading test of fillet weldment (a) and tensile test of base material (b).

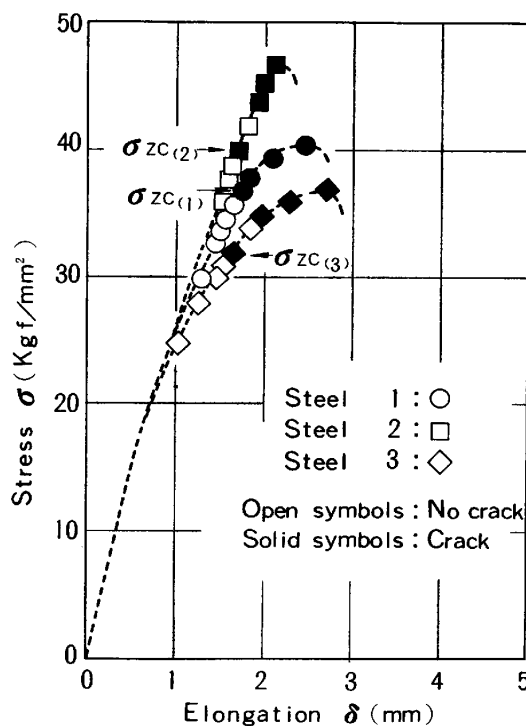


Fig. 6. Example of test results obtained by the unloading test of fillet weldment in molten zinc.

数多くの少量溶解鋼と市販鋼につき NBT 法と拘束パス数 20 の拘束継手試験法でわれ感受性を調べ、両者の対応を示したのが Fig. 4 である。この図から  $S_{LM}^{400}$  の値が 42% 以上のときには継手でわれが発生しないことがわかる。これより、われ発生・非発生の限界値を  $S_{LM}^{400} = 42\%$  とすることができる。

Fig. 5 に (a), (b) 法の試験片を示す。前者 (Fig. 5(a)) は Zn 浴中で隅肉溶接部のトウ部にき裂が発生するときの応力、すなわちき裂発生限界応力  $\sigma_{zc}$  を測定する方法

である。Fig. 6 に  $\sigma_{zc}$  を求めた試験結果の 1 例を示す (各荷重から除荷してわれの有無を検査する)。実際に鋼管を現状の実生産における最大速度で Zn 浴に浸せきしたときに発生する熱応力について計算および実測を行った結果、鋼管径が 914 mm $\phi$  (現状の最大径) 以上のときには最大 20 kg/mm<sup>2</sup>、鋼管径が 914 mm $\phi$  以下のときには最大 17 kg/mm<sup>2</sup> であった<sup>3)</sup>。従つて、将来の大型鉄塔にも用いる 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼および、現有サイズ鉄塔までの 55 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の判定基準としての  $\sigma_{zc}$  は熱応力と溶接残留応力の加算あるいは Zn 浴中への浸せきを途中で一度とめる (熱応力が増大する) 等の作業上の問題も考慮して、各々約 2 倍の 40 および 35 kg/mm<sup>2</sup> とするものである。④ (Fig. 5(b)) の方法は熔融 Zn 中での伸び、絞りにより判定基準を設けたものである。この方法による現有 55 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の伸び、絞りは各々 10~30%、15~30% であるので、55 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の場合は伸び 10% 以上、絞り 15% 以上、60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の場合は 55 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の平均値である伸び 20% 以上、絞り 25% 以上を判定基準とするものである。もちろん、実際のわれは大部分が溶接部から発生するので、母材の Zn 浴中での伸び、絞りは HAZ から発生したわれが母材へ大きく進展するか否かのひとつの目安として規定したもので絶対値としての根拠はまだ明確化していない。

### 3. 熔融 Zn われ感受性指数 ( $S_{LM}^{400}$ ) の算定

前項で述べたように NBT 法では破断時間 400 s のときの破断応力比 ( $S_{LM}^{400}$ ) で各鋼種間の熔融 Zn われ感受性の比較ができること、われの非発生・発生の限界値は  $S_{LM}^{400} = 42\%$  であることを示した。

熔融 Zn われは主に HAZ に発生するので熔融 Zn われ感受性は母材組織のいかにかわらなく合金元素の影響を直接的に受ける。従つて、鋼材開発のうえでは  $S_{LM}^{400}$  と合金元素の相関を把握することがその基本となると考えた。

$S_{LM}^{400}$  と合金元素の関係を示す式としてはじめに (1) 式を得た<sup>4)</sup> ( $S_{LM}^{400}$ (I) と表す)。

$$S_{LM}^{400}(I) = 93 - 8800C(C - 0.1) - 63Si - 38Mn + 340V \dots\dots\dots (1)$$

これは、強度が 50~60 kg/mm<sup>2</sup> の鋼を対象にしておりその適用成分範囲は比較的広い。その後、非調質 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼として考えられる 実用成分系を中心に対象成

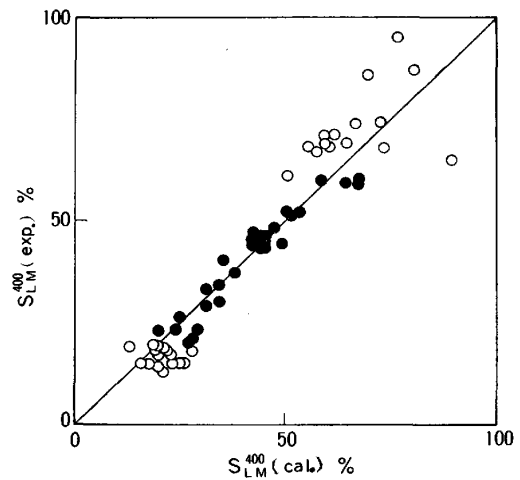


Fig. 7. Relation between the  $S_{LM}^{400}$  values measured by NBT test and the values calculated from  $S_{LM}^{400}$ (II).

分範囲を絞り合金元素と  $S_{LM}^{400}$  の関係を求め (2) 式を得た ( $S_{LM}^{400}$ (II) と表す)。

$$\left. \begin{aligned} S_{LM}^{400}(II) &= 279 - 667C - 25Si - 105Mn \\ &\quad + 345S - 122Cr - 72Mo - 230V \\ &\quad - 273Nb - 130Ti - 6000B \\ &\quad (\text{ただし, } 1.2\% \leq Mn < 1.5\%) \\ S_{LM}^{400}(II) &= 166 - 667C - 25Si - 30Mn \\ &\quad + 345S - 122Cr - 72Mo - 230V \\ &\quad - 273Nb - 130Ti - 6000B \\ &\quad (\text{ただし, } 1.5\% \leq Mn \leq 1.8\%) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

この式は約 100 チャージの実験室溶解鋼の NBT 試験結果を重回帰計算によつて得たものである。Table 1 に  $S_{LM}^{400}$ (II) の適用成分範囲を示す。Fig. 7 には上記式による推定値と実験値の相関を示す。従つて、この式にもとづいて  $S_{LM}^{400}(II) \geq 42\%$  になるように成分設計を行えば耐熔融 Zn われ性にすぐれた鋼の基本成分系の検討ができる。なお、(2) 式は実用鋼から考えて  $S_{LM}^{400}$  が 20~60% の範囲での精度を重視して重回帰を行ったもので、従つて Fig. 7 はこの範囲で実測値と推定値との相関がよい。図中、 $S_{LM}^{400}$ (exp.) 値が 20~60% を●印で、20% 以下、60% 以上を○印で各々示した。

### 4. 鋼管鉄塔用 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の開発

耐熔融 Zn われ性にすぐれた非調質 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼を開発するために、 $S_{LM}^{400}$  による成分検討および前述の各種試験法による耐熔融 Zn われ性について十分な確認を行

Table 1. Range of chemical composition (wt%).

C	Si	Mn	P S	Cu	Ni	Cr	Mo	V Nb	Ti	Al	B
0.04~0.12	≤0.40	1.20~1.80	≤0.040	≤0.50	≤0.80	≤0.30	≤0.30	≤0.09	≤0.030	0.015~0.070	≤0.0010
Nb+V+Ti ≤ 0.15											

Table 2. Zinc coating-induced cracking susceptibilities.

Steel	Chemical composition (wt%)						Ceq. (WES)	$S_{LM}^{400}$ (II)	Methods						Criteria for usual size pipe			Criteria for large size pipe		
	C	Mn	Nb	V	Ti	(1)* <sup>1</sup>			(2)* <sup>2</sup>		(3)* <sup>3</sup>		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)		
									$\sigma_{zc}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	10 pass	20 pass	$\delta_z$ (%)							$\varphi_z$ (%)	$\sigma_{zc} \geq 35$ kg/mm <sup>2</sup>
STK55	0.14	1.26	0.04	—	—	0.36	—	38	NC	C	21	22	○	○	○	●	●	●		
HT60 (I)	0.10	1.68	—	0.01	0.081	0.38	(34)* <sup>4</sup>	38	NC	C	21	26	○	○	○	●	●	○		
HT60 (II)	0.03	1.83	0.04	—	0.025	0.34	(57)* <sup>4</sup>	42	NC	C	25	51	○	○	○	○	○	○		
New HT60	0.08	1.54	0.03	0.07	0.005	0.36	42	43	NC	NC	28	45	○	○	○	○	○	○		

\*<sup>1</sup> Unloading test of fillet weldment, \*<sup>2</sup> Restraint type weldment test, \*<sup>3</sup> Tensile test of base material, \*<sup>4</sup> Titanium is out of the range of Eq. (2), \*<sup>5</sup> Carbon and manganese are out of the range of Eq. (2).  
NC...no crack, C...crack, ○...clear, ●...not clear

Table 3. Chemical compositions of plate and pipes (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al	Ceq.	$S_{LM}^{400}$ (II)
plate and UO pipe	0.065	0.22	1.63	0.023	0.003	0.015	0.08	0.017	0.031	0.35	45
ERW pipe	0.08	0.24	1.33	0.022	0.004	0.039	0.05	0.021	0.030	0.31	56

つた。以下その順序に従って述べる。

#### 4.1 実験室溶解材による予備検討

NBT 法により真空 100 kg 溶解材を用い成分検討を行った。成分検討は耐溶融 Zn われ性の観点からと、当然非調質 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼として所定の強度、じん性を確保するように考慮して行った。種々検討の結果、最終的な成分系として Nb-V-Ti 系が最適である結果が得られた。この成分系の少量溶解材の耐溶融 Zn われ性の試験結果と市販の 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼、55 kg/mm<sup>2</sup> 鋼の試験結果の各々の代表例を Table 2 に示す。

現有鋼管サイズ (914 mmφ 以下) を想定した場合、STK55 を含む従来鋼はいずれの試験法にも合格している。これら市販鋼は現有サイズ鋼管の場合は溶融 Zn われは発生しないことを意味しており種々検討改良を行った実際のめつき作業での経験と一致している。大径管サイズ (914 mmφ 以上) を想定した場合、従来鋼はいずれかの試験法で不合格になっており耐溶融 Zn われ性は十分とはいえない。

少量溶解による新 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼は現有サイズ、大型サイズのいずれの場合もすべての試験に合格しており、すぐれた耐溶融 Zn われ性を有していることがわかる。

以上のように、耐溶融 Zn われ性にすぐれた 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼として Nb-V-Ti 系の成分系が適している結果を得、この成分系を実炉溶解し鋼板、鋼管の製造を行った。

#### 4.2 実炉溶解材の特性

前項までに得られた結果にもとずいて鋼板 (16 mmt), UO 鋼管 (609.6 mmφ × 16 mm<sup>t</sup>) 用に 1 チャージ, ERW 鋼管 (267.4 mmφ × 7 mm<sup>t</sup>) 用に 1 チャージ, 計 2 チャージ溶解した。Table 3 に化学組成および Ceq.,  $S_{LM}^{400}$  を示す。

#### 4.2.1 鋼板の特性

鋼板は CR 圧延により 16 mm<sup>t</sup> に仕上げた。Photo. 2 に示すように組織は細粒フェライト・パーライトである。まず、NBT 法および他の各試験法によつて耐溶融 Zn われ性を確認した。Fig. 8 に NBT 試験結果を示す。 $S_{LM}^{400}$  の実測値は 48 であり Table 3 の  $S_{LM}^{400}$  の計算値 45 とほぼ一致している。Table 4 に同じく他の 3 試験法の結果を各々示す。現有サイズ鋼管に対する判定基準はもちろん、大型サイズ鋼管の判定基準も満足しており本鋼材の溶融 Zn われ性は良好である。

機械的性質は Table 5 に示すように 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼として満足すべきものである。その他、疲労特性、溶接継手性能も問題なく、斜め y われ試験結果も室温でわれ停止し満足すべき溶接性を有している。

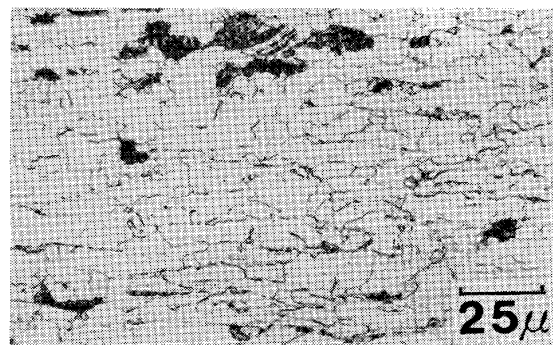


Photo. 2. Microstructure of plate (1/4 t).

Table 4. Zinc coating-induced cracking susceptibilities.

method	Restraint type weldment test (20 pass)	Unloading test of fillet weldment	Tensile test of base material
criteria	no crack	$\sigma_{zc} \geq 40$ kg/mm <sup>2</sup>	$\delta_z \geq 20\%$ $\varphi_z \geq 25\%$
results	no crack	$\sigma_{zc} = 46$ kg/mm <sup>2</sup>	$\delta_z = 31\%$ $\varphi_z = 72\%$

Table 5. Mechanical properties of plate.

	Tensile properties* <sup>1</sup>				Toughness* <sup>2</sup>			Bending* <sup>3</sup>
	Y.P (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S (kg/mm <sup>2</sup> )	Y.R (%)	El. (%)	vE-20 (kg-m)	vEo (kg-m)	vTrs (°C)	R=1.5 t
aim	≥45	60~75	—	≥20		vE-5≥4.8	—	180°, no crack good
L	54.6	62.5	87	34	15.7	18.1	<-80	
C	58.5	66.5	88	30	7.2	8.7	-68	

\*<sup>1</sup> JIS Z2201 No. 5 specimen, \*<sup>2</sup> JIS Z2202 No. 1 specimen, \*<sup>3</sup> JIS Z2204 No. 4 specimen

Table 6. Mechanical properties of pipes.

	Tensile properties* <sup>1</sup>				Toughness* <sup>2</sup>	
	Y.P (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S (kg/mm <sup>2</sup> )	Y.R (%)	El. (%)	vEo (kg-m)	vTrs (°C)
UO pipe	57.2	67.5	85	24	18.6	<-80
ERW pipe	51.9	62.9	83	28	9.2* <sup>3</sup>	<-80

\*<sup>1</sup> JIS Z2201 No. 5 specimen (Transverse direction)  
 \*<sup>2</sup> JIS Z2202 No. 1 specimen (Longitudinal direction)  
 \*<sup>3</sup> 1/2 size specimen ( " " )

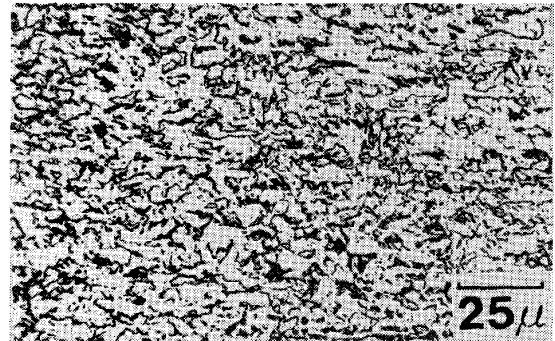


Photo. 3. Microstructure of ERW pipe (1/4 t).

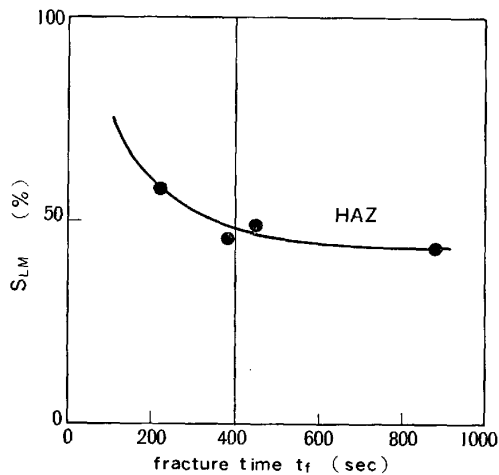


Fig. 8. Relation between the fracture time and the fracture stress obtained by NBT test of the newly developed 60 kg/mm<sup>2</sup> steel.

4.2.2 UO および ERW 鋼管の特性

UO 鋼管素材は鋼板と同一チャージであり耐溶融 Zn われ性は鋼板の結果がそのまま適用できる。ERW 鋼管は管径が小さいので溶融 Zn われは問題とならない場合が多いが、 $SLM \geq 42\%$  を満足するように合金成分設計を行い耐溶融 Zn われ性には十分注意を払った (Table 3)。

Table 6 には鋼管母材の機械的性質を、Photo. 3 には ERW 鋼管の母材マイクロ組織を示す。UO 鋼管のシーム部の機械的性質、ERW 鋼管のへん平試験結果も十分満足すべき結果であった。その他、疲労特性についても 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼管として十分な性能であった。

次に、鉄塔用鋼管部材として最も重要な特性のひとつである座屈性能を 3000 t たて型試験機により調査した。

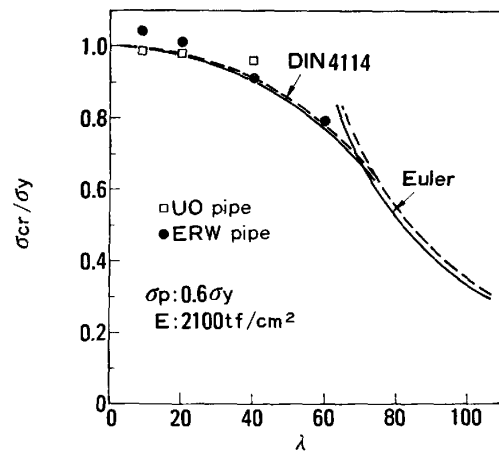


Fig. 9. Relation between  $\sigma_{cr}/\sigma_y$  and  $\lambda$ .  $\sigma_{cr}$ : buckling stress,  $\sigma_y$ : yield stress,  $\lambda$ : slenderness ratio.

UO 鋼管は細長比 ( $\lambda$ ) が 9, 20, 40 について、ERW 鋼管は  $\lambda$  が 9, 20, 40, 60 について中心圧縮による座屈試験を行った。試験体は Zn めつきを施したもので試験体両端の治具は、 $\lambda=9$  のときには固定式、その他の場合は一平面内の回転自由方式で行った。Fig. 9 に結果を示す。図中左側は非弾性座屈域の DIN 4114<sup>†4</sup> の曲線、右側は弾性座屈域のオイラー<sup>†5</sup> の曲線である。また、実線は UO 鋼管、破線は ERW 鋼管の理論曲線である。実験点と理論推定式とよく一致しており 60 kg/mm<sup>2</sup> 鋼管の座屈耐力特性としては満足すべき結果が得られた。

<sup>†4</sup>  $\sigma_{cr} = \pi^2 E \{1 - (\sigma_{cr} - \sigma_p) / (\sigma_y - \sigma_p)\} / \lambda^2$   
<sup>†5</sup>  $\sigma_{cr} = \pi^2 E / \lambda^2$

## 5. 結 言

送電用鋼管鉄塔の大型化に伴つて要望される鉄塔の軽量化を目的とし、鋼材の面から従来の  $55 \text{ kg/mm}^2$  鋼管と  $50 \text{ kg/mm}^2$  鋼板の高強度化を計り鉄塔用  $60 \text{ kg/mm}^2$  鋼の開発を行つた。

送電鉄塔の大型化および鋼材の高強度化によつて生ずる重要な問題は溶接熱影響部の溶融 Zn われの防止である。このため鋼材の溶融 Zn われ感受性の定量的評価が可能な試験法および現場で比較的容易に実施できる評価試験法を検討した。さらに、溶融 Zn われ発生の限界値とその合金元素との相関性を明らかにし耐溶融 Zn われ性に良好な成分系の検討を実験室的につみ重ねた。その結果を現場に移し、鋼板 ( $16 \text{ mm}^t$ )、UO 鋼管 ( $609.6 \text{ mm}\phi \times 16 \text{ mm}^t$ )、ERW 鋼管 ( $267.4 \text{ mm}\phi \times 7 \text{ mm}^t$ ) の製造を行い、いずれも耐溶融 Zn われ性と一般的機械的

性能、さらに鋼管の座屈性能も  $60 \text{ kg/mm}^2$  鋼として満足できる鋼が得られた。

最後に、本研究に対し終始御指導をいただいた東京工業大学藤本盛久教授、東京電力(株)山岸啓利課長に深く御礼申し上げます。また、熱心に御協力をいただいた新日本製鐵(株)と(株)巴組鐵工所の関係各位に深謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 菊池昌利, 家沢 徹: 日本造船学会論文集, 149 (1981), p. 298
- 2) 武田鉄治郎, 栗飯原周二, 山戸一成, 権藤 永: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1264
- 3) 金沢正午, 菊池昌利, 家沢 徹, 杉崎六朗: 鉄と鋼, 69 (1983), S 681
- 4) 武田鉄治郎, 栗飯原周二, 山戸一成, 権藤 永: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1265