

# ボイラ用高強度 2 Cr 鋼 (HCM 2 S) の開発

## Development of High Strength 2% Cr Steel Tubes (HCM2S) for Boilers

榎木義淳/Yoshiatsu Sawaragi・総合技術研究所 鋼管・鋼材研究部 次長 工博

五十嵐正晃/Masaaki Igarashi・総合技術研究所 鋼管・鋼材研究部 主任研究員 工博

伊勢田敦朗/Atsuro Iseda・スミトメタル USA 本社 担当課長 工博

山本里巳/Satomi Yamamoto・関西製造所 特殊管技術室 参事

増山不二光/Fujimitsu Masuyama・三菱重工業(株) 長崎研究所 材料溶接研究室 主管 工博

### 要 約

ボイラ用Cr-Mo鋼管として従来最も多く使用されているSTBA 24 鋼に比べ、600°Cでの許容応力が1.8倍と高く、かつ、溶接時の予熱・後熱処理が不要な低炭素 2 Cr系新材質HCM 2 S鋼管(0.06 C-2.25 Cr-1.6 W-0.1 Mo-V, Nb, B)を開発した。

本鋼は焼もどしベイナイト単相組織であり、V, Nbの適量添加による析出強化効果活用とMoの代わりにWを積極活用することによりクリープ強度の向上を図っている。試作鋼管の諸特性はいずれも良好であることが確認され、T 23 の材料名でASME規格化されるとともに、本鋼の優れた性能は過熱器管としての2.5年間に亘る実缶試験で実証された。特に、本鋼は溶接時の予熱・後熱処理が不要のため、今後、従来のSTBA 24 鋼管に替わる経済型高強度ボイラ用鋼管として広く適用されることが期待される。

### Synopsis

A new high strength 0.06 C-2.25 Cr-1.6 W-V-Nb steel (HCM 2 S) has been developed for boiler applications. The new steel has extremely high creep rupture strength, approximately 1.8 times that of conventional 2.25 Cr-1 Mo steel (STBA 24). The weldability of this steel is much improved, making it superior to conventional Cr-Mo steels, and the steel needs no pre-weld or post-weld heat treatment. This steel has already been approved for ASME SA-213 as Code Case 2199. Furthermore, the new steel has been installed in the superheater of a utility power boiler and field tested since April, 1993.

### 1. 緒 言

近年、省エネルギーと環境対策の両面から、火力発電プラントにおいては、蒸気条件の超々臨界圧化の動きが活発化している。この場合の主蒸気管や熱交換器管には高温強度に優れるフェライト系耐熱鋼の適用が必要となり、火STBA 28/火STPA 28(ASME T 91/P 91, 9 Cr-1 Mo-V-Nb)<sup>1)</sup>を上回る高強度鋼として、HCM 12 A(ASME T 122/P 122)<sup>2)</sup>やNF 616(ASME T 92/P 92)<sup>3)</sup>のような9~12 Cr高強度フェライト系鋼が開発されている。

一方、Cr量が5%以下の低合金鋼に対しては、このような開発例は少なく、低合金鋼の中では最も高強度のSTBA 24/STPA 24鋼(2.25 Cr-1 Mo)が長年に渡って多く使用されている。そこで、従来の2.25% Cr鋼のクリープ強度を大幅に高め、かつ、溶接時の予熱や後熱処理の省

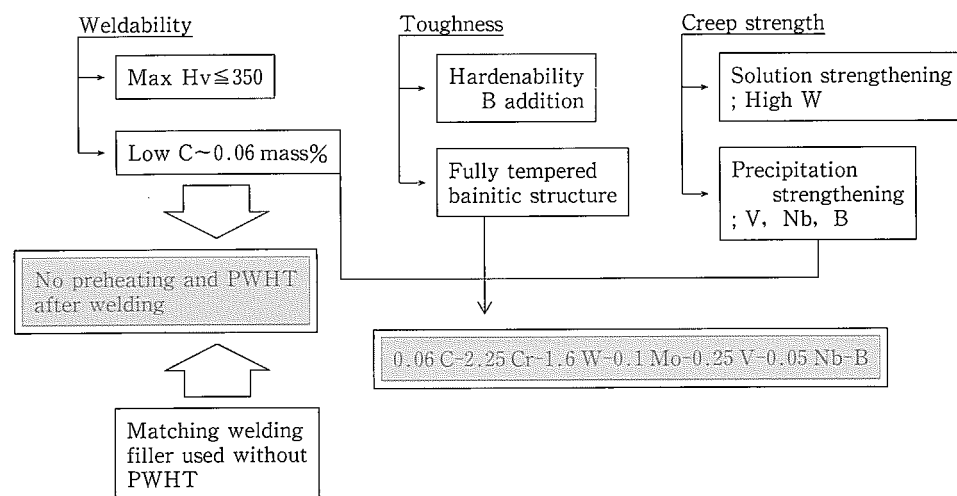
略が可能な新しい2.25% Cr鋼としてHCM 2 S鋼(0.06 C-2.25 Cr-1.6 W-0.1 Mo-V, Nb, B)を開発した。本鋼については、平成5年4月より、国内事業用火力発電ボイラの過熱器管として実缶試験を開始するとともに、平成7年6月には、ASME SA-213 T 23の材料名でSection I Code Case 2199として登録された。

ここでは、開発鋼の成分設計思想および試作鋼管の諸特性につき述べるとともに、2.5年までの実缶使用性能調査結果についても報告する。

## 2. 開発鋼 (HCM 2 S) の成分設計思想および仕様

### 2-1 成分設計思想

第 1 図に HCM 2 S 鋼の成分設計思想を示す。本鋼は低合金鋼の中で最も多く使用されている STBA 24 (2.25 Cr-1 Mo) 鋼の代替鋼という位置付けであり、2.25 % Cr を基本成分とした。C 量は、溶接時の予熱・後熱処理が不要で、溶接ままでの使用を可能にするため、従来の STBA 24 鋼より低めに設定した。クリープ強度については、V、Nb の適量添加による析出強化効果を活用するとともに、Mo の代わりに W を積極的に利用することにより高強度化を図った。微量の B は、クリープ強度の向上に加えて焼入性を向上しており、靱性確保の点から必要な焼もどしベイナイト単相組織安定化のために添加した。



第 1 図 HCM 2 S 鋼管の成分設計思想

Fig. 1 Development philosophy of HCM2S steel tube

第 1 表 HCM 2 S 鋼管の仕様

Table 1 Specification of HCM2S steel tube

#### 1. Chemical composition

(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Nb	sol. Al	B	N
HCM 2 S	0.04 -0.10	≤ 0.50	0.30 -0.60	≤ 0.030	≤ 0.010	1.90 -2.60	≤ 0.30	1.45 -1.75	0.20 -0.30	0.02 -0.08	≤ 0.030	≤ 0.0060	≤ 0.030

#### 2. Room temperature tensile properties

	Tensile strength (MPa)	0.2% proof stress (MPa)	*Elongation (%)
			Longitudinal
HCM 2 S	≥ 510	≥ 400	≥ 20

Note) Tubular specimen (JIS No.11) or strip specimen (JIS No.12)

### 2-2 HCM 2 S 鋼管の仕様

HCM 2 S 鋼管の化学成分および室温引張性質の仕様を第 1 表に示す。C 量は溶接性向上の点から 0.1 % 以下とし、W、Mo、V、Nb、B の添加量範囲はクリープ破断強度を考慮して設定した。

## 3. HCM 2 S 鋼管の諸特性

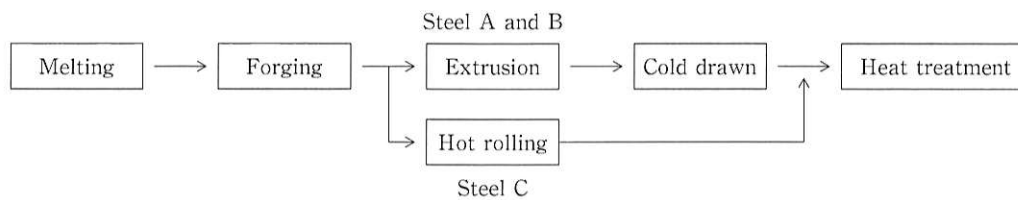
### 3-1 供試材

試作鋼管の化学成分を第 2 表に示す。いずれも仕様を満足している。組織は写真 1 に示すように、焼もどしベイナイト単相組織である。鋼管は第 2 図に示す製造工程で製作し、熱処理は 1 050℃ 焼ならし、780℃ 焼もどしを行った。

第2表 試作鋼管の化学成分

Table 2 Chemical compositions of materials tested

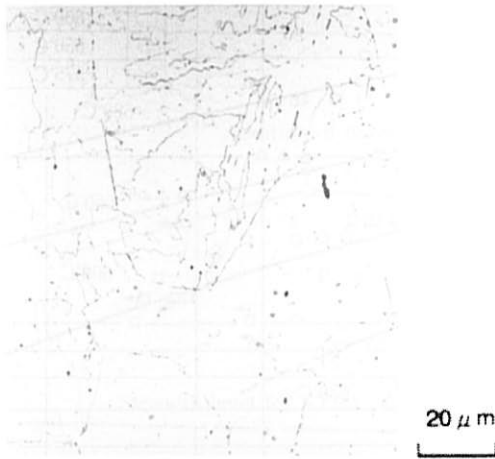
Steels	Size (mm)	Chemical composition (mass%)												
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Nb	sol. Al	B	N
A	$\phi 54.0 \times t 12$	0.06	0.20	0.46	0.014	0.001	2.18	0.09	1.54	0.25	0.05	0.001	0.0023	0.002
B	$\phi 54.0 \times t 12$	0.06	0.20	0.47	0.006	0.002	2.27	0.09	1.50	0.23	0.05	0.009	0.0039	0.008
C	$\phi 50.8 \times t 6$	0.06	0.22	0.48	0.006	0.002	2.25	0.09	1.55	0.23	0.05	0.005	0.0032	0.008
Specification		0.04~0.10	$\leq 0.50$	0.30~0.60	$\leq 0.030$	$\leq 0.010$	1.90~2.60	$\leq 0.30$	1.45~1.75	0.20~0.30	0.02~0.08	$\leq 0.030$	$\leq 0.0060$	$\leq 0.030$



Heat treatment : Normalizing and tempering

第2図 HCM2S 鋼管の製造工程

Fig. 2 Procedure for HCM2S steel tube production

写真1 HCM2S鋼管の光学顕微鏡組織  
Photo 1 Optical microstructure of HCM2S steel

### 3-2 室温での機械的性質

試作鋼管の室温での引張性質、シャルピー衝撃性質および硬さ測定結果を第3表に示す。引張性質はいずれも仕様を満足しており、衝撃特性も良好である。

### 3-3 高温強度特性

試作鋼管の高温引張特性を第3図に示す。各温度における引張強さおよび耐力は従来の STBA 24 鋼より高く、伸び、絞りについてはほぼ同等である。

クリープ破断強度については、第4図に示すように、最長 20 000 h 程度の長時間データが得られており、いずれの温度でも安定、かつ、高い強度を示している。第5図は本鋼の許容引張応力を従来鋼と比較したものであるが、従来

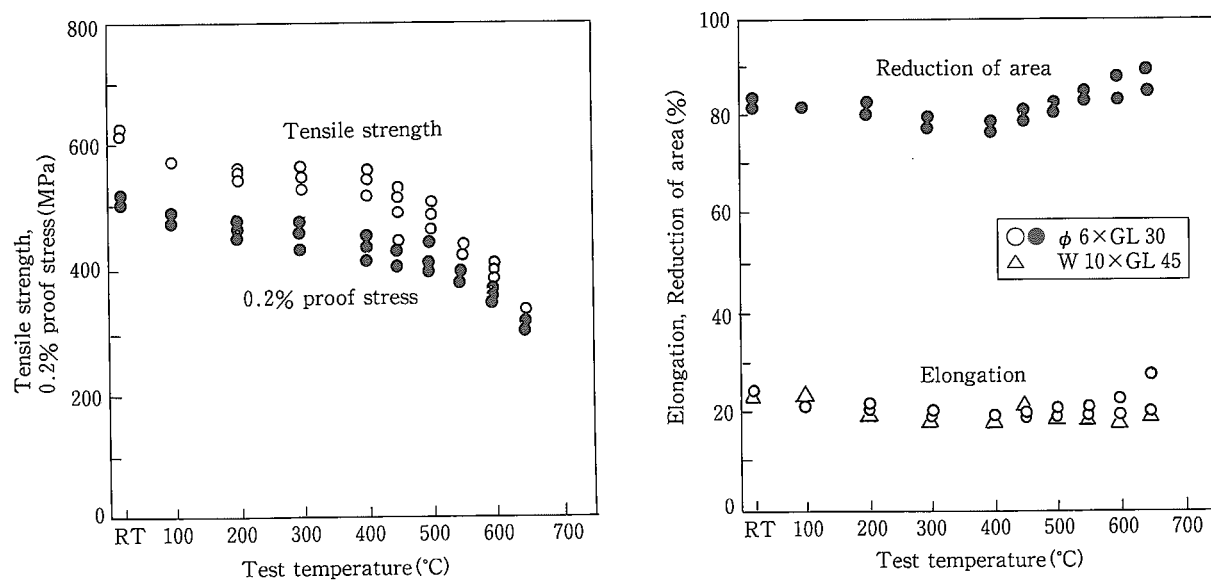
第3表 試作鋼管の室温機械的性質

Table 3 Mechanical properties at room temperature for HCM2S steel tubes

Steel	Size (mm)	Tensile properties <sup>(1)</sup>			Charpy impact value <sup>(2)</sup>		Hardness (HRB)
		Tensile strength (MPa)	0.2% proof stress (MPa)	Elongation (%)	Impact value at 0°C(J)	Brittle fracture (%)	
A	$\phi 54 \times t 12$	596	504	24	429 436 411	0 0 0	91.2
B	$\phi 54 \times t 12$	559	461	30	372 376 378	0 0 0	88.0
C	$\phi 50.8 \times t 6$	552	421	26	265 277 282	0 0 0	87.8
Specification		$\geq 510$	$\geq 400$	$\geq 20$	—	—	—

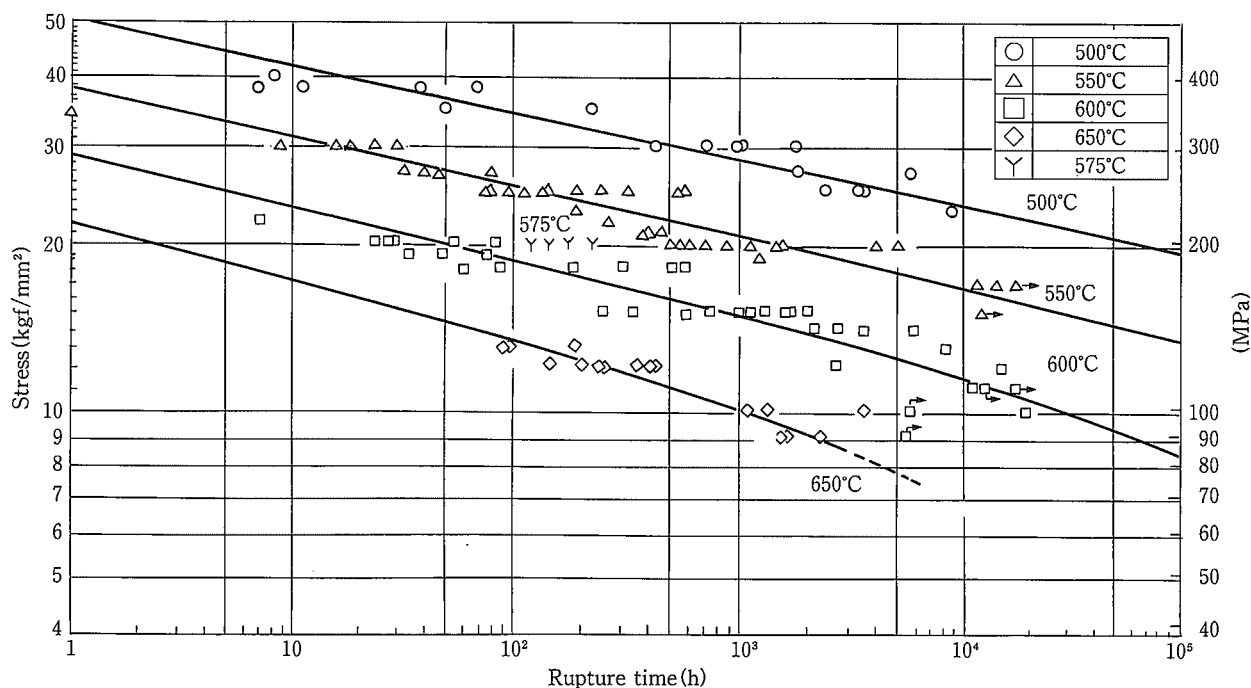
(1) Tensile test specimen :  $\phi 6 \times GL 30$  mm (JIS No.14 A)  
W  $10 \times GL 45$  mm (JIS No.14 B)

(2) Charpy impact test specimen :  $10 \times 10$ , 2 mm V-notched



第3図 HCM2S鋼管の高温引張特性

Fig. 3 Elevated temperature tensile properties for HCM2S steel tubes

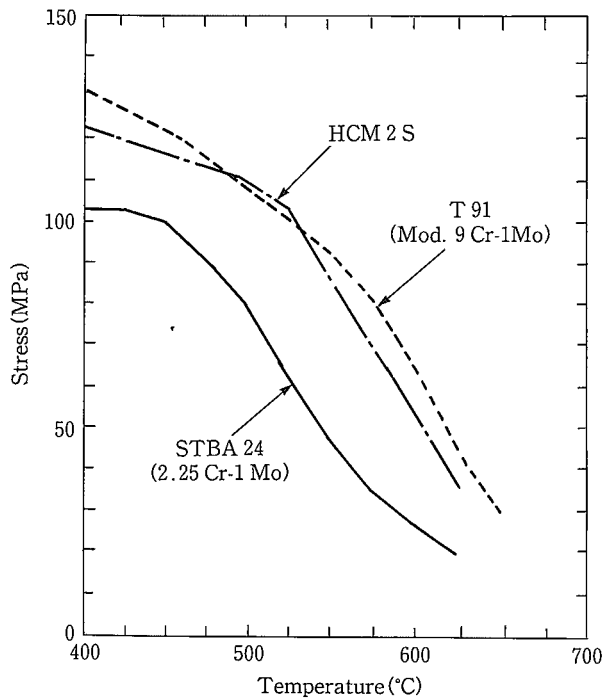


第4図 HCM2S鋼管のクリープ破断強度

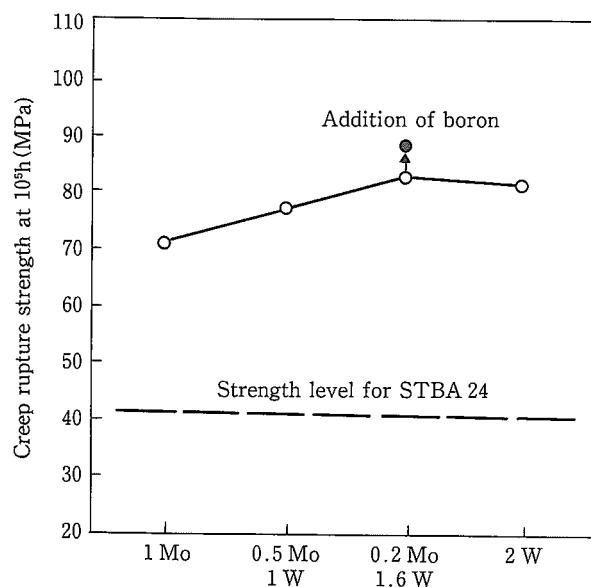
Fig. 4 Creep rupture strength properties for HCM2S steel tubes

鋼の STBA 24 鋼に比べると各温度で大幅に高く、600°C では 1.8 倍の許容応力を有している。この優れたクリープ破断強度は第 6 図に示すように、Mo の一部を W に置き換えることにより達成されたものである。Mo 添加鋼 (1 Mo) と W 添加鋼 (0.1 Mo-1.6 W) につき実施した第 7 図の高温長時間時効後の抽出残渣定量分析結果では、Mo 添加の場合は、Mo は比較的低温短時間時効で炭窒化物として析出し、固溶 Mo 量が比較的早期に減少するのに対し、W 添加鋼で

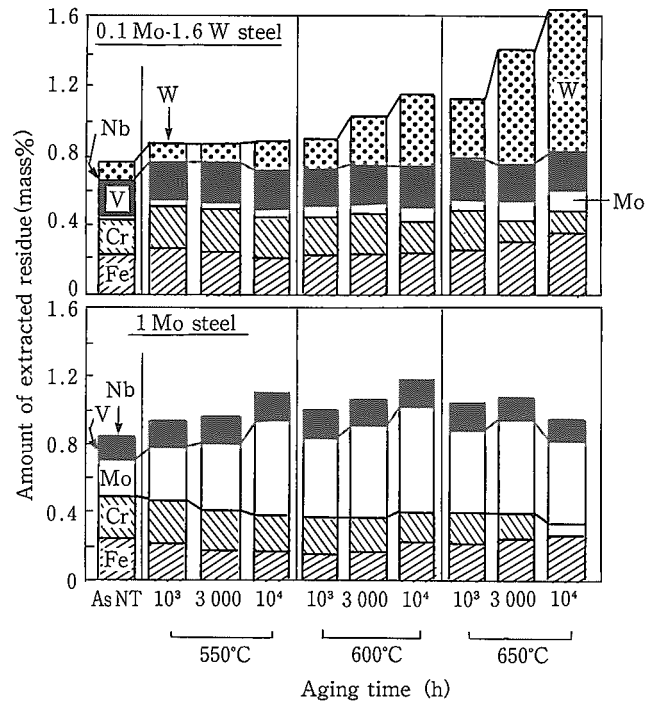
は炭窒化物として析出する W 量の増加速度が遅く、固溶 W 量の減少度合いが Mo の場合に比べて抑制される傾向が明確に認められる。すなわち、W 添加鋼では W による固溶強化効果が高温長時間側まで保たれ、かつ、 $M_{23}C_6$  から  $M_6$  C への変態が抑制されることが優れたクリープ破断強度を有する一因となっている。



第5図 HCM 2 S 鋼と従来鋼との許容引張応力比較  
Fig. 5 Comparison of allowable tensile stress between HCM2S steel and conventional steels



第6図 600°C×10<sup>5</sup>h外挿クリープ破断強度に及ぼすMo, W量の影響(Mo当量: Mo+0.5W=1%)  
Fig. 6 Effect of Mo and W on the 10<sup>5</sup>h extrapolated creep rupture strength at 600°C (Moeq.=Mo+0.5W is kept to 1%)

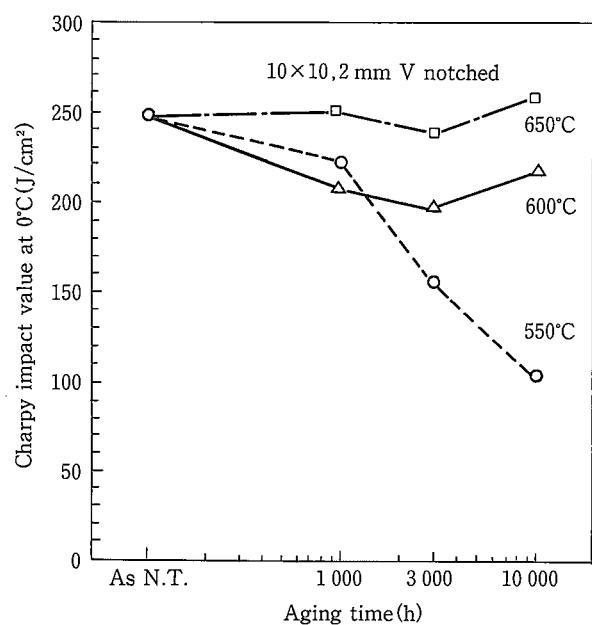


第7図 HCM 2 S 鋼(0.1%Mo-1.6%W)および1%Mo鋼の時効後抽出残渣量変化

Fig. 7 Change in the amount of extracted residues after aging for HCM2S (0.1%Mo-1.6%W) and 1%Mo steel

### 3-4 長時間加熱特性

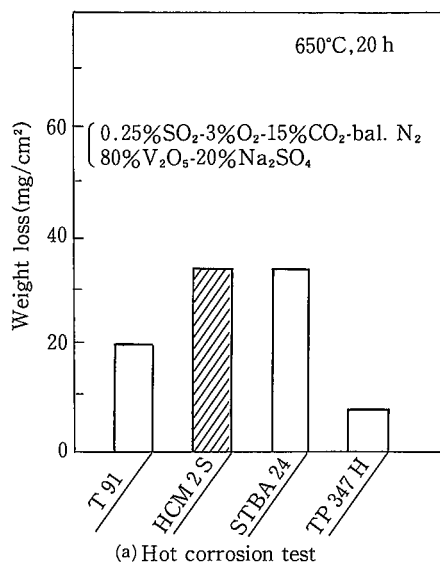
試作管の高温長時間時効後の0°Cにおけるシャルピー衝撃特性を第8図に示す。550°C時効では時効時間の増加にともない単調的に低下するが、10 000 h時効後でも100 J/cm<sup>2</sup>程度の高い値を保持しており、600°C以上の高温時効では、時効による靱性低下は極めて軽微である。



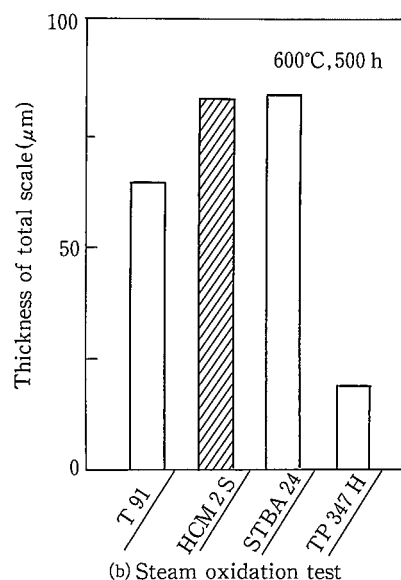
第8図 HCM 2 S 鋼管の長時間時効後衝撃特性  
Fig. 8 Charpy impact properties at 0°C after aging for HCM2S steel tube

### 3-5 耐水蒸気酸化特性および耐高温腐食特性

管内面の耐水蒸気酸化特性は、600°C の水蒸気中で 500 h 試験により評価した。また、管外面の耐高温腐食特性は合



成石炭灰を塗布し、650°C、20 h 試験により評価した。第 9 図に示すように、HCM 2 S 鋼の耐水蒸気酸化特性および耐高温腐食特性は同一 Cr 量の STBA 24 鋼と同等である。



第 9 図 HCM 2 S 鋼管と従来鋼との耐水蒸気酸化特性および耐高温腐食特性比較

Fig. 9 Comparison of steam oxidation and hot corrosion resistance between HCM2S and conventional steels

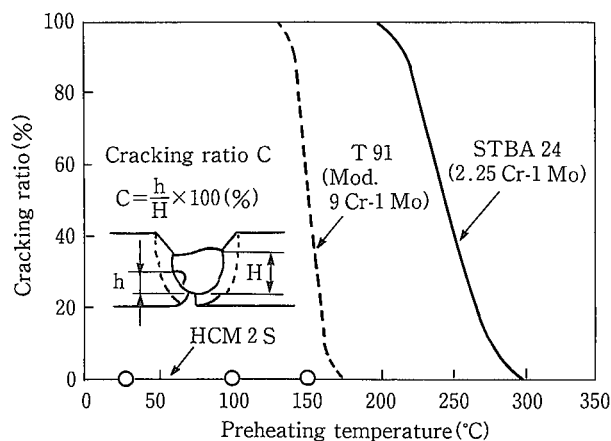
### 3-6 溶接性および溶接継手性能

HCM 2 S 鋼の溶接性の評価は Y 拘束溶接割れ試験にて行った。第 10 図に示すように、本鋼は C 量を 0.1 % 以下に抑制しているため、低温溶接割れ感受性は既存の STBA 24 や T 91 鋼に比べて極めて小さく、予熱なしでも低温割れが発生しないという優れた特徴を有している。

溶接時の予熱・後熱処理不要の GTAW および SMAW 共金系溶接材料も開発しており、その化学成分の代表例を第 4 表に示す。第 5 表に示す条件で溶接した GTAW および SMAW 溶接ままでの 20°C 衝撃値は、第 6 表に示すように、各々、200 J/cm²、40 J/cm² 程度で良好である。また、室温および 600°C における引張試験での破断位置は、第 7 表に示すようにいずれも母材である。溶接ままでの硬さ分布は、第 11 図に示すように、いずれも Hv 350 以下であり、このことは、予熱処理や後熱処理をせずに溶接ままで使用できることを示している。

第 12 図はこれらの溶材を用いて行った突き合わせ溶接継手の単軸クリープ破断試験結果を示したものである。いず

れも母材データバンド内に位置しており、大きな強度低下現象は認められない。



第 10 図 HCM 2 S 鋼管と従来鋼との Y 拘束溶接割れ試験結果比較

Fig. 10 Comparison of Y-groove weld cracking ratio between HCM2S and conventional steels

第 4 表 共金系溶接材料の化学成分例

Table 4 Chemical compositions of GTAW and SMAW filler metals

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	B	Al	N
Base metal	0.06	0.20	0.52	0.013	0.002	0.10	2.26	0.11	1.58	0.27	0.05	0.003	0.026	0.0074
GTAW	0.04	0.50	0.49	0.004	0.005	0.49	2.19	0.10	1.59	0.24	0.03	—	—	—
SMAW	0.06	0.32	0.79	0.004	0.002	1.00	2.24	0.10	1.56	0.30	0.40	—	—	—

Base metal : t 15 mm plate

PWHT : As welded, (715°C×30 min A.C)

(mass%)

第5表 GTAW, SMAW溶接継手の溶接条件

Table 5 Welding condition for GTAW and SMAW welded joints

Process	Filler (mm)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)	Preheating (°C)	Shielding gas
GTAW	ϕ 2.4	1 st	120	15	8	13.5	No (RT)	100%Ar
		2 nd -16 th	180	17	10	18.4	No (RT)	100%Ar

Process	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Preheating (°C)
SMAW	1 st	70	23	5-8	No (RT)
	2 nd -12 th	90	24	7-11	No (RT)

第6表 溶接継手の室温におけるシャルピー衝撃値

Table 6 Charpy impact properties at 20°C for GTAW and SMAW welded joints

Welding method	PWHT	Impact value (J/cm <sup>2</sup> )		
		0°C	20°C	40°C
GTAW	No (As-welded)	67, 120, 71 Ave. 86	125, 224, 299 Ave. 216	343, 244, 174 Ave. 254
Welding method	PWHT	Impact value (J/cm <sup>2</sup> )		
		0°C	20°C	
SMAW	No (As-welded)	34, 32, 40 Ave. 35	53, 32, 34 Ave. 40	
	715°C×30 min	62, 107, 110 Ave. 93	142, 213, 227 Ave. 194	

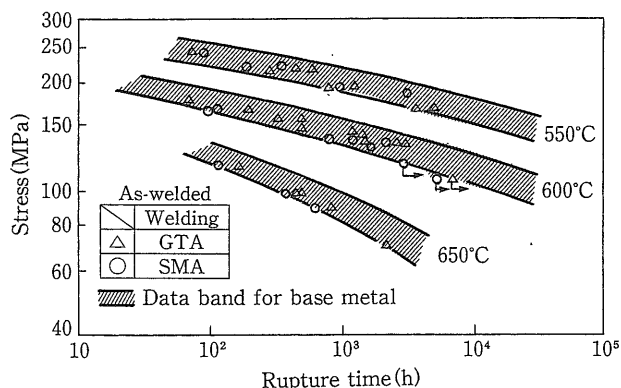
Test specimen : 10×10, 2 mm V-notched

第7表 溶接継手の高温引張特性

Table 7 Elevated temperature tensile properties for GTAW and SMAW welded joints

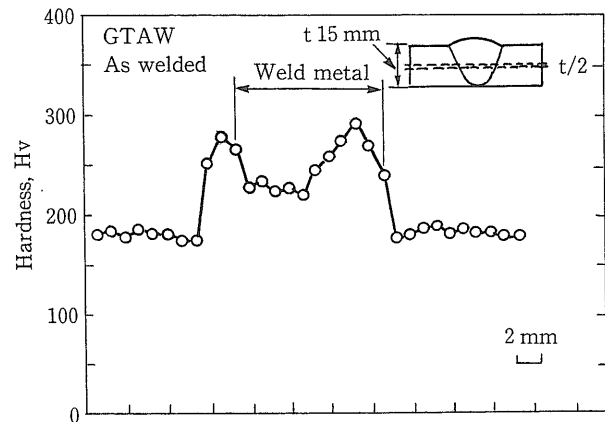
Welding method	PWHT	Room temperature		600°C	
		T.S. (MPa)	Rupture portion	T.S. (MPa)	Rupture portion
GTAW	As welded	577 570	B.M. B.M.	350 375	B.M. B.M.
SMAW	As welded	584	B.M.	362	B.M.
	715°C×1 h	550	B.M.	324	B.M.

B.M. : Base Metal

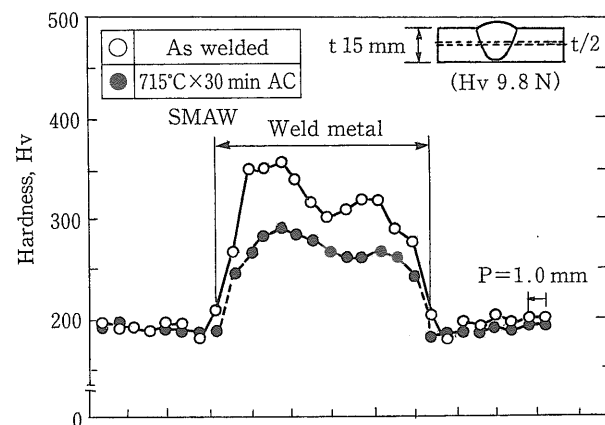


第12図 HCM 2 S鋼管溶接継手のクリープ破断強度

Fig. 12 Creep rupture strength properties of welded joints for HCM2S steel tubes



(a) GTAW



(b) SMAW

第11図 HCM 2 S鋼管溶接継手の硬さ分布

Fig. 11 Hardness distribution of welded joints for HCM2S steel tube

## 4. HCM 2 S 鋼管の実缶使用性能

HCM 2 S 鋼管については、平成 5 年 4 月から和歌山共同火力(株)3号ボイラにおいて、過熱器管として実缶試験を開始し、1年および2.5年経過時に抜管を行い、実缶使用後の性能調査を実施した。

### 4-1 実缶試験条件

実缶テストを行ったボイラの主仕様を第8表に示す。蒸気圧力は19 MPa、過熱器管出口蒸気温度および再熱器管出口蒸気温度は各々571°C、543°Cである。試験材としては、HCM 2 S 鋼に加えて、比較材として STBA 24 鋼を用い

第8表 ボイラの主仕様

Table 8 Operation condition of the boiler

・ Type	Forced circular type (156 MW)
・ Fuel	Mixture of blast furnace gas and oil
・ Pressure	19 MPa (S.H.), 4 MPa (R.H.)
・ Steam temperature	571°C (S.H. outlet), 543°C (R.H. outlet)

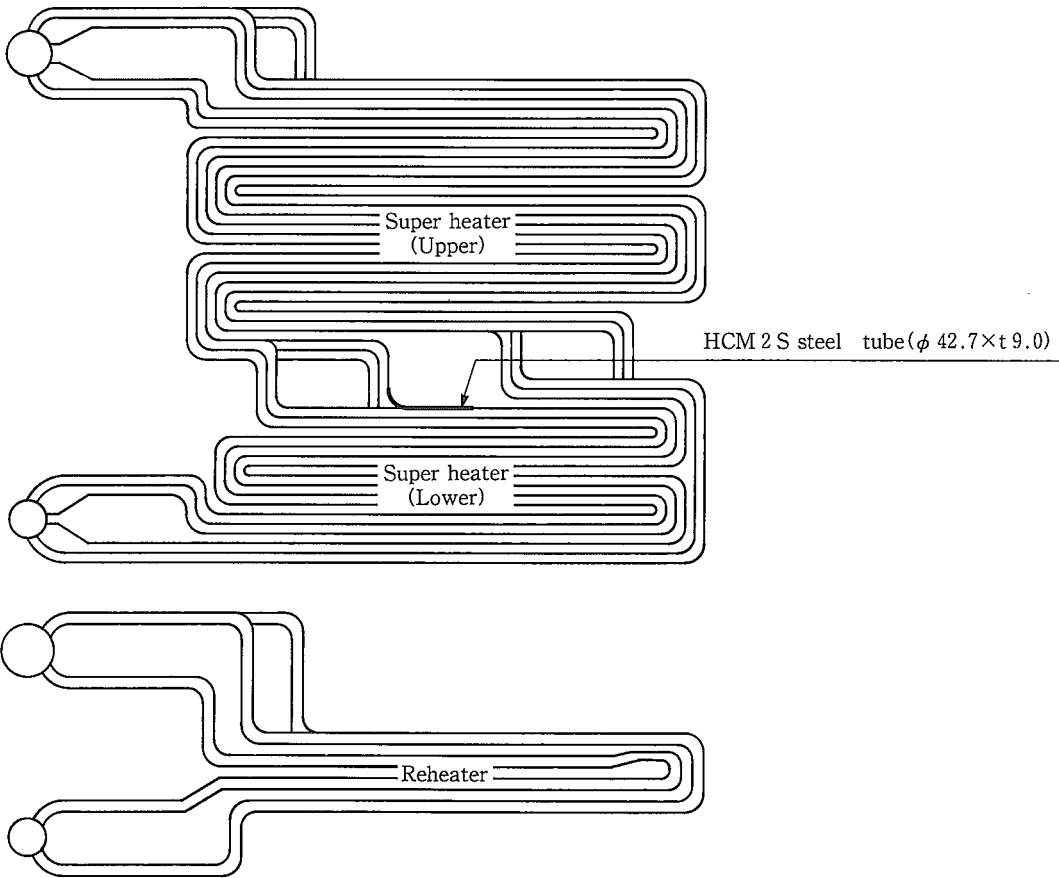
た、これらの試験材は第 13 図に示す過熱器管の位置に挿入した。

過熱器管の寸法は外径 38.1 mm、肉厚 6.0 mm であり、1 年および 2.5 年経過材の実運転時間は、各々、9 200 h、20 509 h である。

4-2 調査結果

4-2-1 化学成分

抜管した材料の化学成分分析結果を第 9 表に示す。いずれの管もそれぞれの規格、仕様を満足している。



第 13 図 供試管の挿入位置  
Fig. 13 Position of HCM2S steel tubes in the boiler

第 9 表 抜管材の化学成分分析結果  
Table 9 Chemical compositions of removed tubes

Service duration	(mass%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	W	N
1 year	0.05	0.19	0.48	0.016	0.001	2.23	0.13	0.24	0.057	1.67	0.006
2.5 years	0.06	0.19	0.48	0.021	0.001	2.25	0.13	0.26	0.05	1.66	0.006
Spec.	0.04 /0.10	≤ 0.50	0.10 /0.60	≤ 0.030	≤ 0.010	1.90 /2.60	0.05 /0.30	0.20 /0.30	0.02 /0.08	1.45 /1.75	≤ 0.030



## 4-2-2 外観状況

写真 2 に 2.5 年使用後 HCM 2 S 鋼過熱器管のスケール除去後の管外面状況を示す。高温腐食による減肉や肌荒れは全く見られず、試験期間中における管外面の腐食はほと

んどなく、第 14 図に示すように、外径変化や肉厚変化もほとんど見られない。

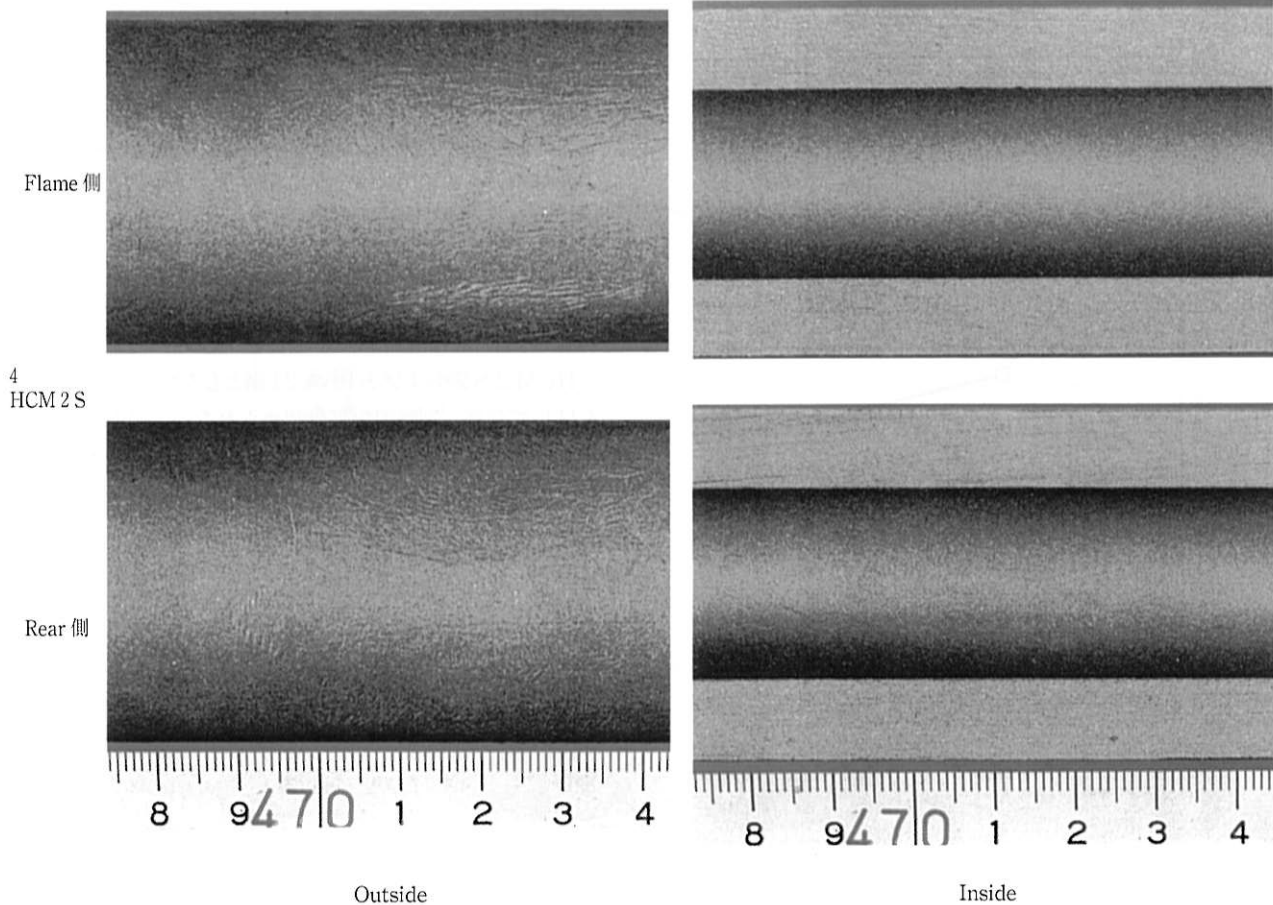
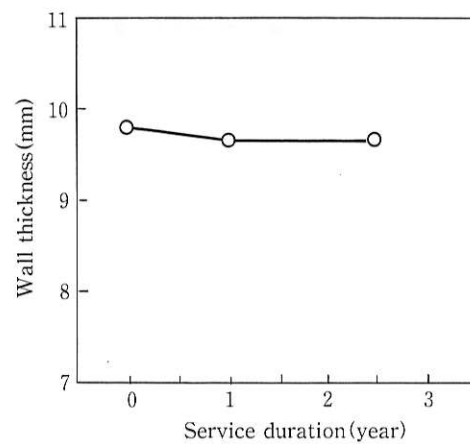
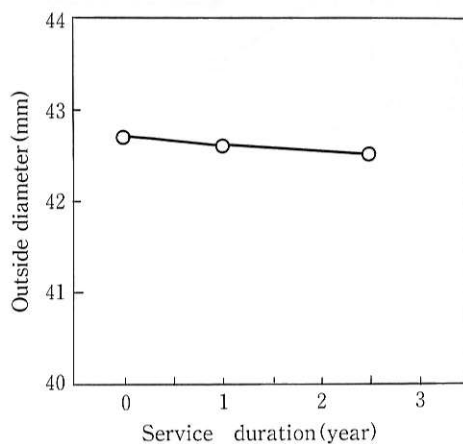


写真 2 2.5 年実缶使用材の外観状況

Photo 2 Appearance of 2.5 years service-exposed HCM2S steel tubes

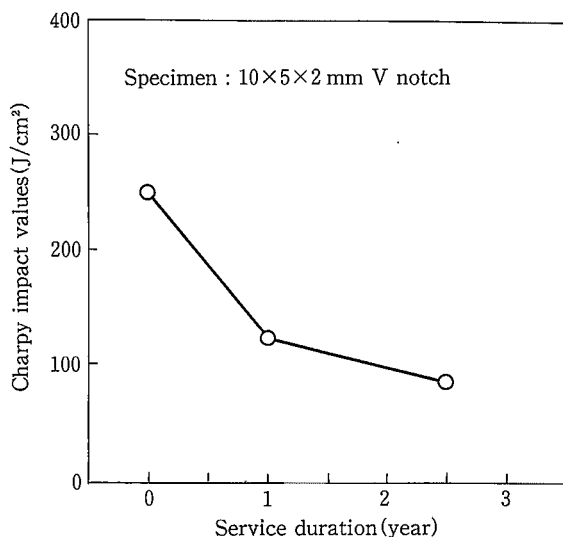


第 14 図 抜管材の外径、肉厚測定結果

Fig. 14 Results of outside diameter and wall thickness for removed HCM2S steel tubes

## 4-2-3 機械的性質

0°Cにおけるシャルピー衝撃試験結果を第15図に示す。1年使用により衝撃値は低下するが、その後の経時的変化は小さく、2.5年使用後でも80 J/cm<sup>2</sup>程度の高い値を保持している。



第15図 抜管材のシャルピー衝撃特性

Fig. 15 Charpy impact properties at 0°C for removed HCM2S steel tubes

室温および600°Cでの引張強さおよび耐力については、第16図に示すように実缶使用によりやや低下しているが、比較材のSTBA 24鋼に比べると高強度を保持している。

550°Cおよび600°Cにおける実缶使用材のクリープ破断強度は、第17図に示すように、いずれの温度においても新材の平均強度をほぼ満足しており、使用による強度低下傾向は特に認められない。

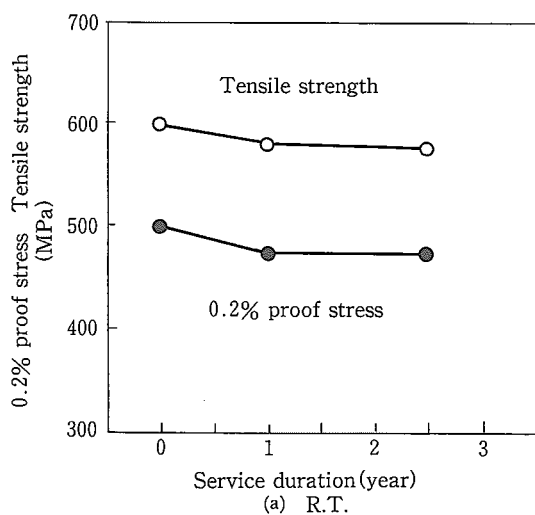
## 4-2-4 金属組織

2.5年実缶使用後の光学顕微鏡組織を写真3に示す。焼もどしベイナイト単相組織を呈しており、使用による光学顕微鏡組織上の変化は特に認められない。

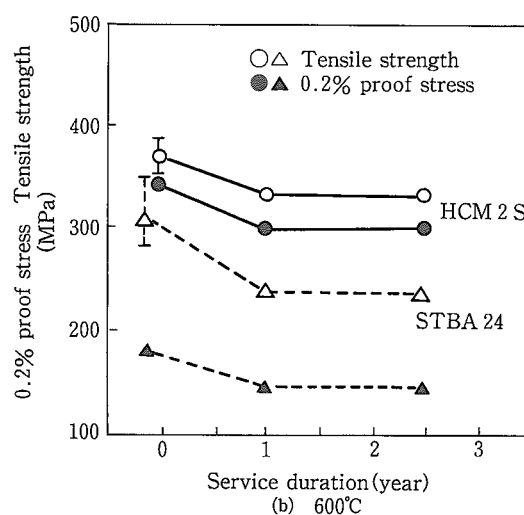
## 4-2-5 耐水蒸気酸化特性

管内面の水蒸気酸化スケールの光学顕微鏡組織例を写真4に、スケール厚さの測定結果を第18図に示す。

HCM 2 S鋼およびSTBA 24鋼ともスケールは二層構造を呈しており、剥離現象等は認められない。スケールの成長挙動やスケール厚さの差も特に見られず、HCM 2 S鋼の耐水蒸気酸化特性はSTBA 24鋼と同等であることが実缶評価により実証された。



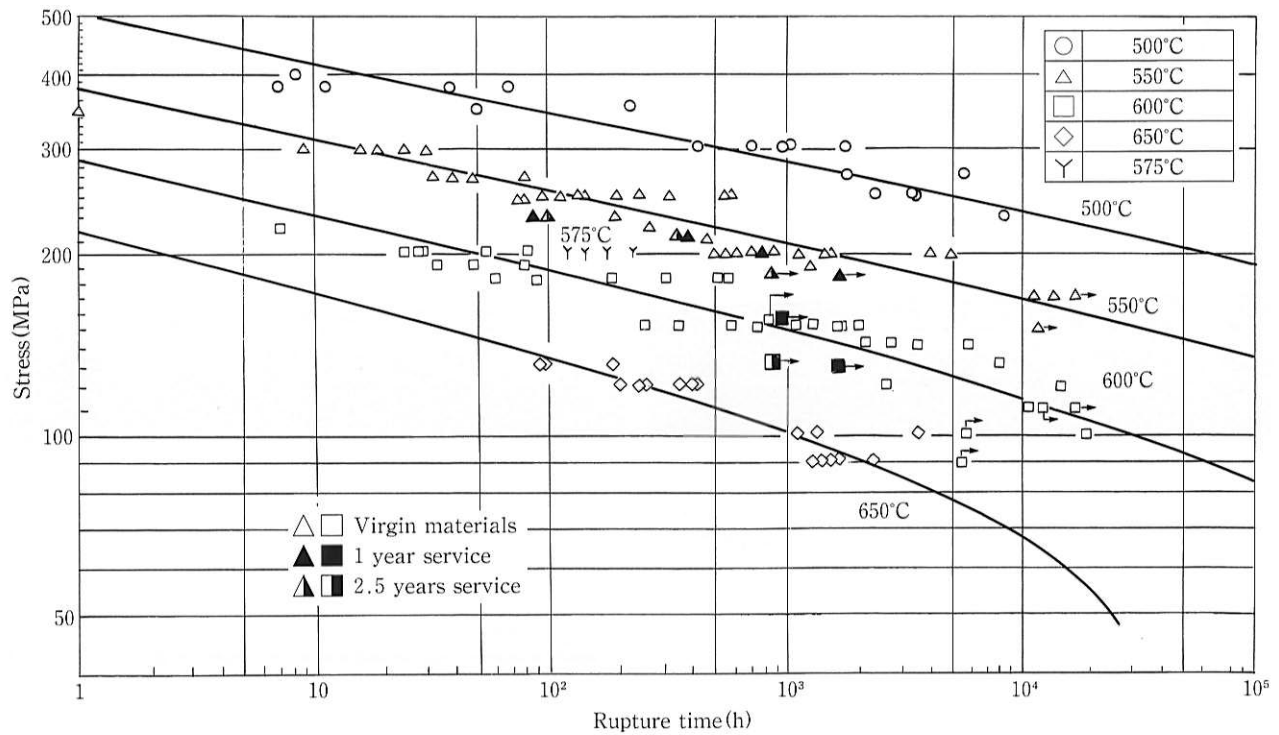
(a) R.T.



(b) 600°C

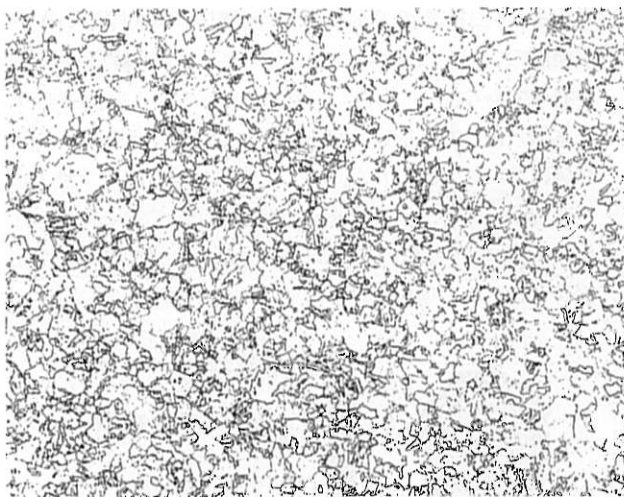
第16図 抜管材の室温および600°Cでの引張特性

Fig. 16 Tensile properties at room temperature and 600°C for removed tubes



第 17 図 抜管材のクリープ破断強度

Fig. 17 Creep rupture strength properties for removed HCM2S steel tubes

100  $\mu\text{m}$ 

4 : HCM2S

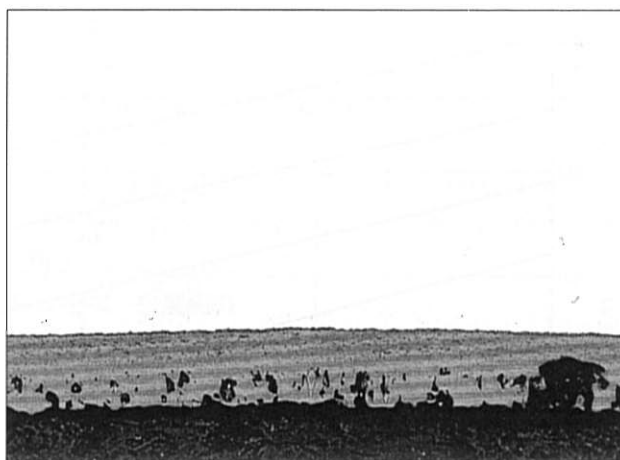
25  $\mu\text{m}$ 

写真 3 2.5 年実缶使用材の光学顕微鏡組織

Photo 3 Optical microstructure of 2.5 years service-exposed HCM2S steel tubes



HCM2S

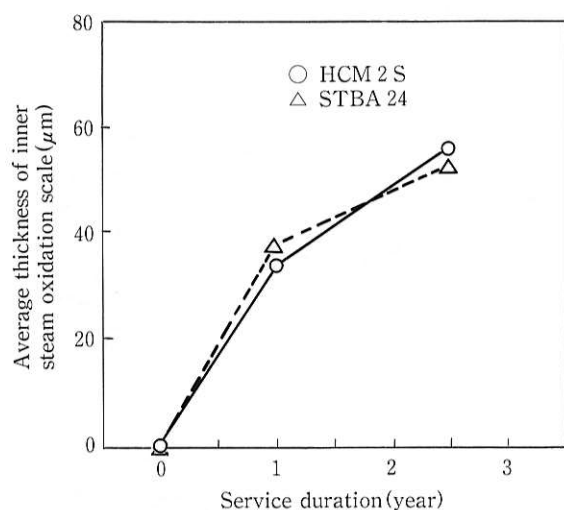


STBA24

100 μm

写真 4 2.5 年実缶使用材の水蒸気酸化スケール生成挙動

Photo 4 Steam oxidation scale of 2.5 years service-exposed HCM2S and STBA24 steel tubes



第 18 図 抜管材の水蒸気酸化スケール厚さ

Fig. 18 Thickness of steam oxidation scale for removed tubes

## 5. 結 言

ボイラチューブとして最も多く使用されている従来の STBA 24 鋼より高温強度と溶接性に優れた新しい 2.25 Cr 低合金鋼として、HCM 2 S 鋼管 (0.06 C-2.25 Cr-1.6 W-0.1 Mo-V-Nb-B) を開発した。

試作鋼管を含むクリープ破断試験では、20 000 h 以上の長時間データが得られており、T 23 の材料名で ASME 規格化された。本鋼の 600°C での許容引張応力は STBA 24 規格鋼の 1.8 倍であり、9 Cr 系鋼の T 91 鋼に近い高強度を有している。

本鋼の優れた性能は、過熱器管としての 2.5 年間の実缶試験において実証された。特に、本鋼は溶接時の予熱・後熱処理が不要で、溶接ままでの適用が可能であるため、今後、従来の STBA 24 鋼管に替わる経済型高強度ボイラ用鋼管として広く適用されることが期待される。



榎木義淳/Yoshiatsu Sawaragi

総合技術研究所 鋼管・鋼材研究部 次長  
工博

(問合せ先: 06(489)5727)

## 参考文献

- 1) V. K. Sikka, C. T. Ward and K. C. Thomas : ASM Int. Conf. Production, Fabrication, Properties and Applications of Ferritic Steels for High Temperature Applications, Warren, PA, Oct. 6-8 (1981)
- 2) 伊勢田, 名取, 榎木, 小川, 増山, 横山 : 火力原子力発電, 45(1994) p.900
- 3) 榎原, 榎本, 小川, 高橋, 藤田 : 火力原子力発電, 38(1987) p.841