

技術論文

# 自動車用排気系ステンレス鋼 NSSC® EM-Tの開発

## Development of NSSC® EM-T Stainless Steel for Exhaust System of Automobiles

藤村 佳幸\* 岡 義洋 今川 一成 奥 学  
 Yoshitomo FUJIMURA Yoshihiro OKA Kazunari IMAKAWA Manabu OKU

### 抄 録

自動車用エキゾーストマニホールドはフェライト系ステンレス鋼が幅広く使用されている。近年、排ガス規制および燃費規制は厳しくなっており、理論空燃比燃焼やダウンサイジングによる軽量化等が自動車メーカー各社で検討されている。このことからエキゾーストマニホールド用材料に対して高耐熱化、薄肉化の要求が強くなっており、現状最上位鋼である Type444 系の耐熱温度以上の高耐熱性を有する材料が求められている。Type444 系より 70°C 高い耐熱温度を目標に各種検討を行い、W, Mo, Nb および Cu の適正添加量を見出し、新鋼種 NSSC EM-T (17Cr-1.5Cu-2.0Mo-1.3W-0.5Nb) を開発した。

### Abstract

Ferritic stainless steel is widely used for the exhaust manifolds of automobiles. In recent years, vehicle emission control and fuel economy regulations are becoming increasingly strict. For this reason, there is an increasing demand for high heat resistance and thin wall materials for exhaust manifolds, and there is a demand for materials with high heat resistance that is higher than the heat resistance temperature of Type 444 series, which is currently the highest grade steel. We conducted various studies aiming at a heat-resistant temperature 70°C higher than Type 444 series, and found the proper addition amounts of W, Mo, Nb and Cu, and found that the new steel grade NSSC EM-T (17Cr-1.5Cu-2.0Mo-1.3W-0.5Nb) was developed.

## 1. 緒 言

ステンレス鋼は優れた高温特性を有するため、プラント、自動車および各種燃焼機器等の耐熱用途で幅広く使用されている。とくに、フェライト系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼に比べ熱膨張係数が小さいことから熱疲労特性および酸化スケール密着性に優れており、加熱および冷却が繰り返される用途に適している。

自動車用エキゾーストマニホールド（以下エキマニと記す）にはフェライト系ステンレス鋼が幅広く使用されている。エキマニ用素材の鋳鉄からステンレス鋼板および鋼管への切り換え当初は SUS430J1L (19Cr-0.5Cu-0.4Nb) が適用されていたが、その後各社で様々な鋼種が開発された。日鉄ステンレス(株)での開発例として図 1 にエキマニ用鋼の鋼種レパートリーを示す。高成形性の 14mass%Cr（以下成分は mass% を略して表記する）をベースに Nb を添加した耐熱温度 830°C の Type429 系 (NSSC FH-Z, NSSC HR-1), Type429 系に対して省 Cr 化および省 Nb 化した NSSC HR-2

および NSSC 429NF, 18Cr をベースに Nb および Mo を添加した 880°C 対応の Type444 系 (NSSC 190EM, NSSC 444M1, NSSC EM-3, NSSC EM-2), および Type444 系に対し、省

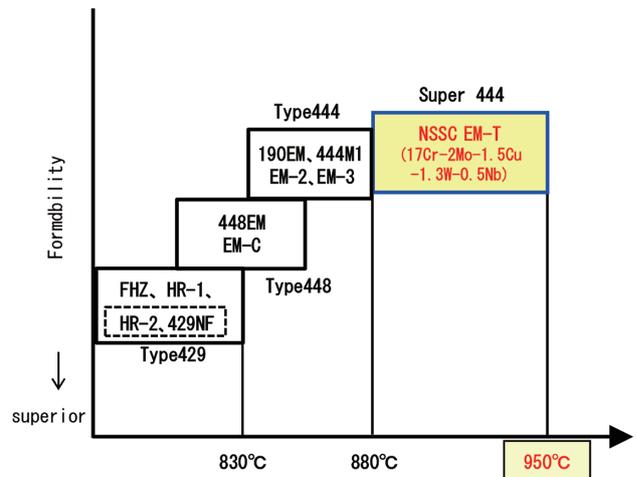


図 1 各鋼の耐熱温度  
Heat resistance temperature of each steel

\* 日鉄ステンレス(株) 研究センター 薄板・自動車材料研究部 主幹研究員 山口県周南市野村南町 4976 〒 746-8666

Mo 化する代わりに強化元素として Cu を添加した 850°C 対応の Type448 系 (NSSC 448EM, NSSC EM-C) をそれぞれ開発してきた<sup>1-5)</sup>。

一方、近年の地球温暖化防止の観点から自動車排ガス規制および燃費規制はますます厳しくなっている。国内における近年の燃費規制動向としては、2005 年の新長期規制および 2009 年のポスト新長期規制ではエンジンが暖機された暖機始動 (ホットスタート) とエンジンが冷えた状態で始動する冷機始動 (コールドスタート) を組み合わせたコンビン方式が適用されていたが、2018 年以降の規制はすべて冷機始動での試験となっている<sup>6)</sup>。そのため早期に暖機させて触媒性能を向上させることが重要となるため、エキマニの薄肉化等により対応している。また、NO<sub>x</sub>、HC および CO 等の排出量低減および燃費改善を目的とした理論空燃比燃焼 ( $\lambda=1$ ) や希薄燃焼 (リーンバーン)、エンジンのダウンサイジングによる軽量化が自動車メーカー各社で検討されている。これらのことからエキマニ用材料に対して、高耐熱化、薄肉化の要求が強くなっている。現状、自動車メーカーではそれぞれのエンジンの排ガス温度に適した材料を選定しているものの、一部の自動車メーカーについては今後さらに排ガス温度が上昇し、要求される耐熱限界温度は最大 950°C に達すると予測されている。そのため、現状のフェライト系ステンレス鋼の最上位鋼である Type444 系でも対応できないと考えられる。以上のことを背景として、Type444 系よりも耐熱性に優れたエキマニ用フェライト系ステンレス鋼の開発が望まれていた。

本稿では、エキマニ用フェライト系ステンレス鋼のさらなる高耐熱化の要望に対し、加工性を Type444 系並に確保し、製造性を損なわない低温靱性を確保しつつ、Type444 系以上の熱疲労特性、高温強度および耐高温酸化性を有する鋼の検討を行った。耐熱温度としては Type444 系の 880°C よりも 70°C 高い 950°C を目標に検討し、NSSC EM-T (17Cr-2.0Mo-1.5Cu-1.3W-0.5Nb) を開発した結果について述べる。

## 2. 目標特性

表 1 に目標特性を示す。最重要課題として熱疲労特性が挙げられ、具体的目標は① Type444 系の 200~880°C の熱疲労寿命に対し、開発鋼 (NSSC EM-T) の 200~950°C での熱疲労寿命がこれと同等以上を有することである。また、② 高温強度は使用される全温度域で Type444 系以上の 0.2% 耐力、③ 高温酸化は 950°C で異常酸化および酸化スケールの剥離を発生しないこと、④ Type444 系に相当する加工性を有すること、⑤ 熱間圧延焼鈍板の 0°C でのシャルピー衝撃値が 20 J/cm<sup>2</sup> 以上を有することを目標とした。

## 3. 合金設計思想

最重要課題である熱疲労寿命を達成するには、低温域か

表 1 目標特性  
Target characteristics

Items	Target characteristics
① Thermal fatigue characteristics	Number of identical damages repeated at 950°C (Type444 + 70°C)
② High temperature strength	Yield strength of 0.2% higher than Type444 in all temperature ranges
③ High-temperature oxidation	No abnormal oxidation and scale flaking at 950°C
④ Processability	Processability equivalent to Type444 (Total elongation, r value)
⑤ Low temperature toughness	The shear peak impact value of the hot rolled annealed sheet at 0°C is 20 J/cm <sup>2</sup> or more.

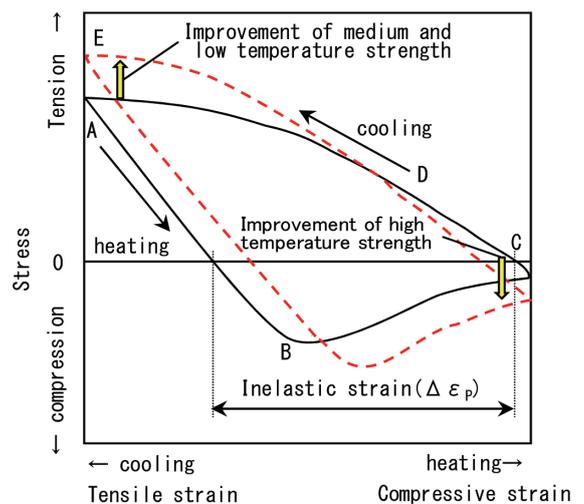


図 2 熱疲労試験における 1 サイクル中の応力 - ひずみ曲線の模式図

Schematic diagrams of stress-strain curve in thermal fatigue test

ら高温域での強度を上昇させることが有効となる。図 2 に熱疲労試験における応力 - ひずみ曲線の模式図を示す。熱サイクル中に発生する応力は弾性応力と塑性応力であり、図中 A→B→C→D→E の繰り返しにより熱疲労破壊が発生する。ここで、非弾性ひずみ範囲 (以下  $\Delta\epsilon_p$  と略記する) は、発生応力が 0 となる 2 点のひずみ差で定義され、熱疲労寿命を支配する重要な因子として知られている。すなわち、破損繰り返し数と  $\Delta\epsilon_p$  の両対数には、良好な直線関係があり<sup>7)</sup>、 $\Delta\epsilon_p$  が小さいほど熱疲労特性は向上する。そこで目標の熱疲労寿命を達成するために、開発鋼の 200~950°C での  $\Delta\epsilon_p$  を Type444 系の 200~880°C での  $\Delta\epsilon_p$  より小さくすることを目的に検討した。また、 $\Delta\epsilon_p$  を低減させるには、Type444<sup>5)</sup> と Type448<sup>2,3)</sup> で活用した 2 つの手法を同時に活用することを検討した。すなわち、Type444 の開発では主に Mo、Nb の固溶強化によって高温域の強度を上昇させ、加熱中の鋼板のバルジングや座屈を抑制させ、Type448 の開発では主に Cu、Nb の析出強化 (動的析出) によって中温域~低温域の強度を上昇させ冷却中の鋼板のネッキングを抑制させた。図 2 に  $\Delta\epsilon_p$  低減を達成するための考え方を赤破

線で示す。本開発では常温から高温までの全温度域について強度上昇させることで  $\Delta\epsilon_p$  の低減を図った。

高強度化を目的に強化元素を多量に添加すれば相応の強化量が得られると考えられるものの、素材コストおよび加工性が不利になると考えられる。これに加え、高合金化による靱性低下で実機付加工工程が増すことで製造コストの上昇要因となる可能性が考えられるため、強化元素の添加量を必要最低限に抑制させることが重要となる。そこで、常温から高温までの各温度における強度上昇に有効な元素の適正添加量把握を目的とし、各温度における各元素の強化量を調査し、NSSC EM-T の合金設計を行った。以下にその検討結果を示す。

## 4. 供試材および実験方法

### 4.1 供試材

表 2 に供試材の化学成分を示す。室温および高温強度に及ぼす Nb, Mo, Cu および W の影響を検討するために低 C, 低 N の 17~18Cr 鋼を基本成分とし、各元素の添加量を種々変動させてその影響を調査した。また、供試材の製造工程は、鋼塊を 1230℃ で 2h の溶体化処理を施した後に熱間圧延を行い、板厚が 4.5mm の熱間圧延板とし、その後 1050~1100℃ で均熱時間なしの焼鈍を施した。その後、冷間圧延により板厚 2.0mm とし、結晶粒径が JIS 結晶粒番号 6 番になるよう 1000~1100℃ で焼鈍を行い、各種試験に供した。

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 常温引張試験

試験片は JIS Z 2201 に準拠し 13B 号片を用い実験を行った。引張試験方法は JIS Z 2241 に準拠して標点間距離を 50mm とし、圧延方向が引張方向となるように試験片を作製した。引張速度は 0.2% 耐力までは 20MPa/s、以降は 40mm/min で行い、全伸びは突合せ法にて評価した。

#### 4.2.2 高温引張試験

高温引張試験は、JIS G 0567 に準拠して行った。試験片の平行部は板厚 2.0mm で、標点間の距離が 50mm の平板試験片を用い、昇温時間 15min で所定の温度に加熱後、均熱時間 15min とし引張試験を行った。この際、0.2% 耐力までは標点間のひずみ速度を  $5 \times 10^{-3}/s$ 、それ以降は試験機のクロスヘッド速度を 3.0mm/min とした。

表 2 供試材の化学成分  
Chemical composition of test material  
(mass%)

C	Si	Mn	Cr	Nb	Mo	W	Cu	Ti	N
0.01	0.3	1.0	17~18	0.01~0.9	0.01~3.2	0.01~2.7	0.01~2.0	0.1	0.01

### 4.2.3 熱疲労試験

熱疲労試験は丸棒およびパイプの 2 種類を用いて行った。丸棒試験片は直径を 10mm、標点間の長さを 15mm とした。また、パイプ試験片は外径 38.1mm×板厚 2mm の ERW 管を用い、標点間の長さを 15mm とした。なお、パイプ試験片は試験中のバルジング防止のために、標点間部の板厚が 1mm となるよう切削して試験に用いた。丸棒の試験条件は、上限温度 1000℃、下限温度は 200℃ とし、拘束率 20% の条件下で行った。ヒートサイクルは“昇温速度 3℃/s で 1000℃ まで昇温し 2min 保持した後、冷却速度 3℃/s で 200℃ まで冷却後 30s 保持”を 1 サイクルとして繰り返し行った。熱疲労寿命の判定は、10 サイクル目の 200℃ に到達時点での発生応力を初期応力値とし、その初期応力が 75% 以下となった時点とした。また、パイプの場合では、上限温度を 880℃ および 950℃ とし、その他の下限温度、拘束率、ヒートサイクルおよび熱疲労寿命の判定は丸棒と同条件で行った。

### 4.2.4 酸化試験

試験片には、2.0mm×25mmW×35mmI に加工したものを、全面をエメリーペーパーで #600 まで研磨後、アセトンで脱脂して試験に供した。連続酸化試験条件は 950℃ および 1000℃ の電気炉に 100h 大気中にて加熱し、加熱後の酸化増量を測定した。また、断続酸化試験条件は試験温度 950℃ で 5min 加熱、その後大気中で 5min 冷却を行うことを 1 サイクルとし、500 サイクルごとに酸化増量を測定し、最大 2000 サイクルまで行い評価した。

## 5. 合金元素の適正量把握

### 5.1 常温引張強度に及ぼす Nb, W, Mo の影響

図 3 に 18Cr ベース鋼における常温の 0.2% 耐力に及ぼす Nb, W および Mo の影響を示す。Nb は比較的微量の添加で強度が上昇し、0.7% 程度ではほぼピーク強度を示した。ま

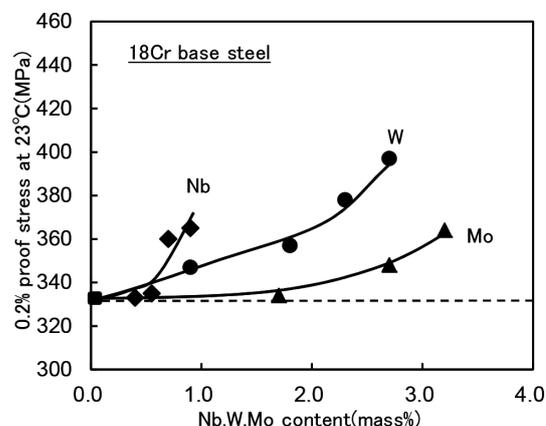


図 3 常温 0.2% 耐力に及ぼす Nb, W および Mo の影響  
Effect of Nb, W and Mo on 0.2% proof stress at normal temperature

た、W および Mo については添加量の増加に伴い強度はほぼ一定に上昇しており、いずれの元素も 2.5% 以上の添加量となってもピーク強度を示していない。また、添加量 1% あたりの強度上昇量で見ると、Nb は 40MPa、W は 20MPa および Mo は 10MPa 程度であり、Nb および W の効果が大きいことが分かった。

## 5.2 600～800℃ 0.2%耐力に及ぼす Cu の影響

600～800℃ 程度の中温度域の強化方法として Cu の析出強化が活用されている<sup>2,4)</sup>。図 4 に 17Cr-0.3Nb-0.15Ti 鋼の 600℃、700℃ および 800℃ での 0.2% 耐力に及ぼす Cu 量の影響を示す<sup>3)</sup>。600～800℃ のいずれの温度においても、Cu 添加量が 0.5% 以上になると大きく上昇する傾向を示す。この検討結果より、Cu を 0.5% 以上添加した場合の 0.2% 耐力の上昇値は、1% Cu あたり 600℃ で約 95MPa、700℃ で約 45MPa および 800℃ で約 20MPa でありこれらの温度域での強度上昇に有効であることが分かる。エキマニのような加熱冷却が繰り返されひずみが付与される環境下では、静的時効とは異なり析出した Cu 粒子は単純なオストワルド成長するのではなく、転位との相互作用により分断・固溶・再析出を繰り返し、微細形態を維持することが報告<sup>2,4)</sup>されており、中温度域の強度上昇の観点より有効利用できると考えられる。

## 5.3 950℃ 0.2%耐力に及ぼす Nb, Mo, W の影響

引張試験における高温での 0.2% 耐力値の上昇は熱疲労特性改善に有効であり、高温耐力に及ぼす合金元素の影響は種々検討されている<sup>8)</sup>ものの、950℃ の高温域での検討例は少ない。図 5 に 950℃ での 0.2% 耐力に及ぼす Nb, Mo および W の影響を示す。950℃ の場合、1% 程度の添加量では Nb, Mo および W の順に前者ほど改善効果が大きく、とくに Nb は比較的微量の添加で高温強度の上昇量が大きい傾向を示す。従来 Nb や Mo は固溶強化あるいは析出強化によって高温強度向上に寄与すると報告されているが、W

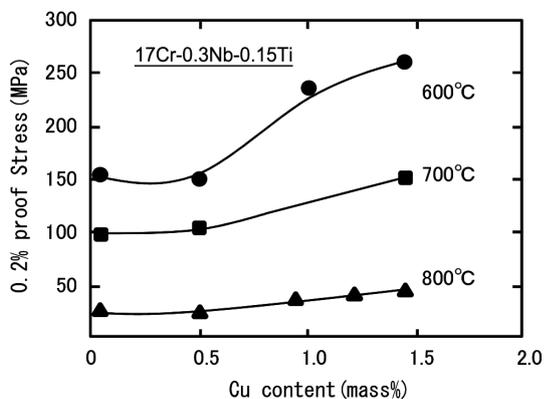


図 4 600, 700 および 800℃ の 0.2% 耐力に及ぼす Cu の影響<sup>3)</sup>  
Effect of Cu on 0.2% proof stress at 600, 700 and 800°C<sup>3)</sup>

についても同様に固溶強化あるいは析出強化と推察される。

## 5.4 低温靱性

常温から高温域を高強度化させるには前述したように Nb, Mo, W および Cu の添加が有効であり、これらの元素を複合添加させることがより効果的であることが示された。しかし、高合金化することで低温靱性が低下し、実機製造において不具合が発生する可能性が考えられる。過去の検討で Mo の過剰添加は靱性を劣化させることが明らかとなっている<sup>9)</sup>ものの、W については検討例がなく適正量を把握する必要があった。そこで、実機での製造性を損なわない W の適正添加量の把握を目的に検討を行った。図 6 に熱間圧延焼鈍板のシャルピー衝撃値に及ぼす W の影響を示す。W 添加量の増加に伴い衝撃値は低下するが、2.0% 以下の添加量であれば靱性の目標値である 20J/cm<sup>2</sup> 以上を満足することが判明した。

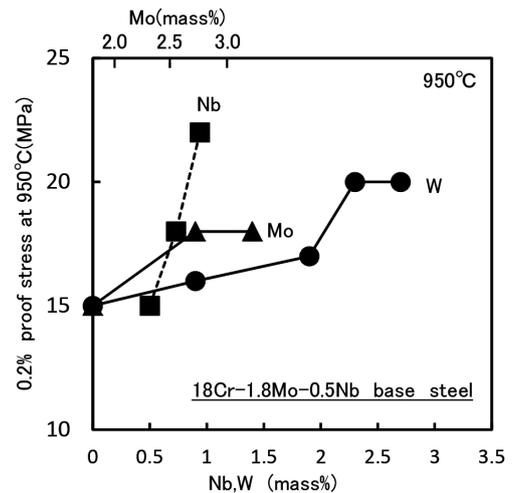


図 5 950℃ での 0.2% 耐力に及ぼす Nb, Mo および W の影響  
Effect of Nb, Mo and W on 0.2% proof stress at 950°C

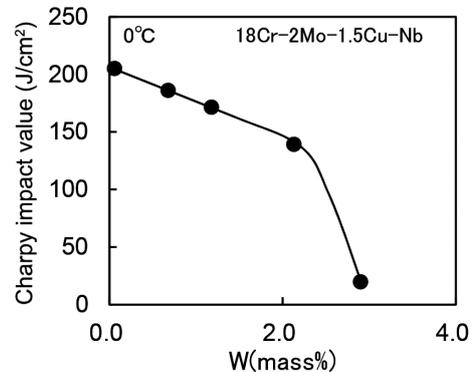


図 6 18Cr-2Mo-1.5Cu-Nb 鋼のシャルピー衝撃値に及ぼす W の影響  
Effect of W on Charpy impact value of 18Cr-2Mo-1.5Cu-Nb steel

## 5.5 熱疲労

図7に試験温度200～1000℃、拘束率20%での18Cr-2Mo-1.5Cu-1.6W-0.5Nb鋼およびType444の丸棒試験片を用いた10サイクル目の温度-応力曲線を示す。両鋼の応力変化を比較すると低温から中温域の引張応力側、高温域の圧縮応力側のいずれも18Cr-2Mo-1.5Cu-1.6W-0.5Nb鋼の方がType444よりも高くなっている。両鋼の $\Delta\epsilon_p$ を比較すると、Type444の $\Delta\epsilon_p$ は1.03であるのに対し、18Cr-2Mo-1.5Cu-1.6W-0.5Nb鋼では低温から高温域で高強度化させたことで $\Delta\epsilon_p$ は0.73を示し、著しく低減できることが分かった。これは、低温ではNbおよびWの固溶強化、中温域ではCuの析出強化および高温域ではNbおよびMoに加えWの固溶強化により全温度域で高強度化させた効果と推察される。また、この条件下での熱疲労寿命を測定した結果を図8に示す。従来鋼であるType444の熱疲労寿命は290サイクルであるのに対し、18Cr-2Mo-1.5Cu-1.6W-0.5Nb鋼は670サイクルと約1.5倍の熱疲労特性を有している。

以上の検討により、実機での製造性を低下させることな

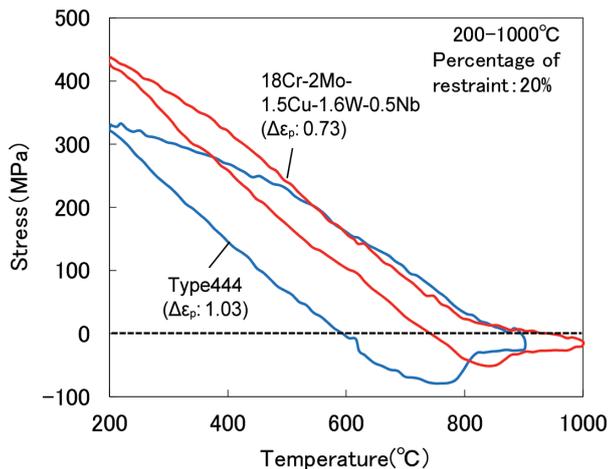


図7 熱疲労試験における10サイクル目の温度-応力曲線  
Temperature-stress curves at tenth cycle of thermal fatigue test

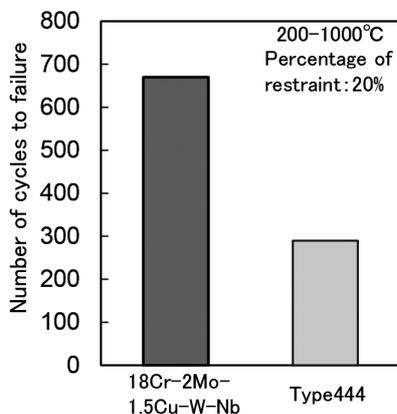


図8 各鋼の丸棒試験片を用いた熱疲労寿命  
Thermal fatigue life using round bar test pieces of each steel

く、最重要課題である熱疲労特性を満足可能なNb、Mo、CuおよびWの適正添加量を把握することができた。その結果、低温靱性および高耐熱性を兼ね備えた成分系としてNSSC EM-T (17Cr-1.5Cu-2.0Mo-1.3W-0.5Nb)を開発した。以下にその諸特性について述べる。

## 6. 開発鋼NSSC EM-Tの諸特性

### 6.1 代表成分および機械的性質

表3にNSSC EM-Tの代表成分を示す。また、比較鋼としてType444の代表成分も示す。この2鋼種について板厚2mmの実機製造鋼板を用い、機械的性質および各種耐熱性の比較を行った。表4にNSSC EM-Tの機械的性質を示す。NSSC EM-Tの0.2%耐力は比較鋼のType444よりも約100MPa、引張強さは約50MPa高くなっており、常温で高強度を示す。また、加工性の観点でみると引張試験の全伸びは30%以上、平均r値では1.0を確保できておりType444と比較し顕著な低下は認められない。

### 6.2 高周波電縫管の機械的性質

表5にNSSC EM-T高周波電縫管(外径38.1mm、板厚2.0mm)の焼鈍後の機械的性質を示す。NSSC EM-T造管材の0.2%耐力および引張強さは冷間圧延焼鈍板と同程度であり、Type444よりも高強度を示す。また、NSSC EM-Tの全伸びは45%を示しており、Type444の48%と比較し顕著に低下しない。

### 6.3 高温引張

図9にNSSC EM-TおよびType444の高温引張特性を示

表3 NSSC EM-TおよびType444の代表成分  
Examples chemical compositions of NSSC EM-T and Type444

Steel	(mass%)								
	C	Si	Mn	Cr	Nb	Mo	W	Cu	N
NSSC EM-T	0.01	0.3	0.8	17	0.5	2.0	1.3	1.5	0.01
Type444	0.01	0.2	1.0	18	0.6	2.0	—	0.1	0.01

表4 NSSC EM-Tの機械的性質  
Mechanical properties of NSSC EM-T (specimen: JIS13B, RD)

Steel	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	r-value
NSSC EM-T	434	560	31	1.0
Type444	350	520	32	1.1

表5 高周波電縫管の機械的性質(φ38.1mm×2mmt)  
Mechanical properties of ERW pipe (φ38.1mm×2mmt)

Steel	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Pipe expansion
NSSC EM-T	438	549	45	No cracks at 1.3D
Type444	376	519	48	No cracks at 1.3D

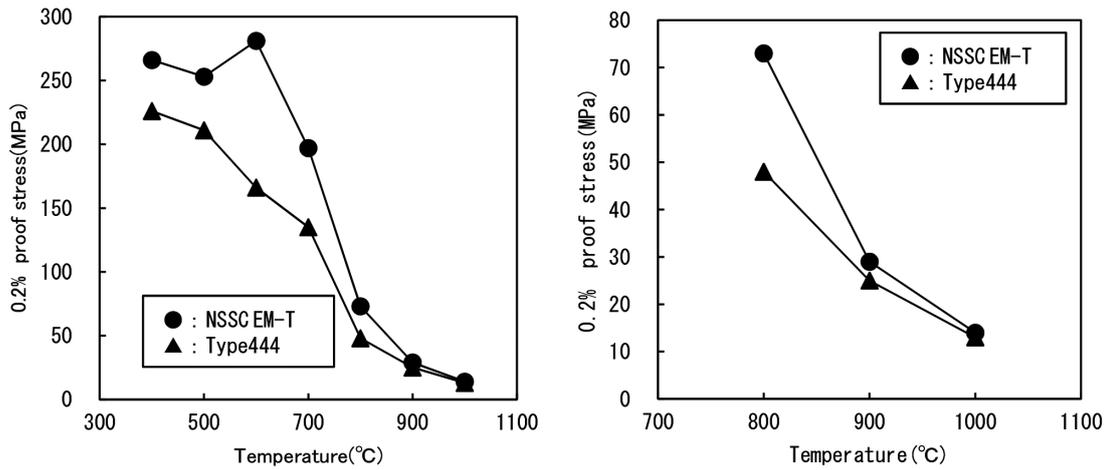


図9 NSSC EM-T および Type444 の高温引張特性  
Tensile properties at elevated temperatures of NSSC EM-T and Type444

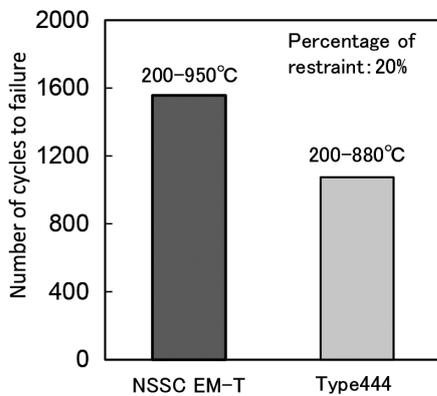


図10 NSSC EM-T のパイプ熱疲労寿命  
Thermal fatigue life using ERW pipes of NSSC EM-T

す。NSSC EM-T の 0.2%耐力は低温から高温域までのいずれの温度でも Type444 よりも高く、優れた高温強度を示す。また、NSSC EM-T の 600°Cでの強度がやや高くなっている主要因は前述したように Cu 粒子の析出強化と考えられる。

#### 6.4 熱疲労特性

図10にNSSC EM-T (200~950°C) および Type444 (200~880°C) の拘束率 20%におけるパイプの熱疲労試験結果を示す。NSSC EM-T の 200~950°Cの熱疲労寿命は1557サイクルを示し、比較鋼である Type444 の 200~880°Cでの熱疲労寿命の1075サイクルよりも優れることが分かった。以上の検討結果より、熱疲労特性の目標である Type444 の耐熱温度 880°Cから 70°C向上の 950°Cを満足していることが分かる。

#### 6.5 高温酸化

図11にNSSC EM-T および Type444 の 950°C および 1000°C×200hでの連続酸化試験結果を示す。950°C および 1000°Cのいずれの温度においても異常酸化または酸化スケールの剥離は認められない。図12にNSSC EM-T およ

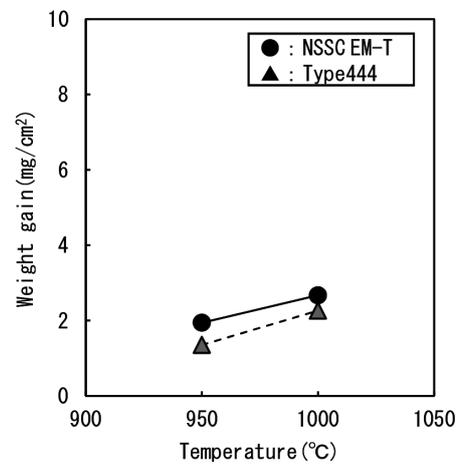


図11 連続酸化試験  
Continuous oxidation test of NSSC EM-T

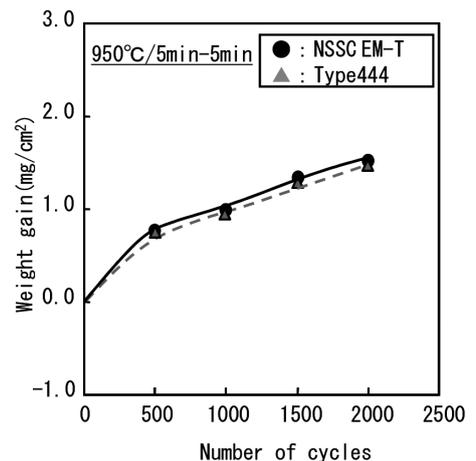


図12 断続酸化試験  
Cyclic oxidation test of NSSC EM-T

び Type444 の 950°Cでの断続酸化試験結果を示す。NSSC EM-T の 950°Cでの 5 min 加熱および 5 min 冷却における断続酸化では、2000サイクル時点で異常酸化または酸化減量に転じないことから加熱冷却の繰り返し環境下でも優れ

た耐高温酸化性を示すことができる。

## 7. 結 言

得られた結果は以下の通りである。

- (1) 常温引張での各元素の添加量 1%あたりの 0.2%耐力上昇量は、Nb および W で比較的效果が大きい。
- (2) 600～800℃の中温域での 0.2%耐力上昇には Cu を 1.0～1.5%添加が有効である。また 950℃の高温域では Nb および W の強化量が大きい。
- (3) 18Cr-2Mo-1.5Cu-Nb 鋼(熱間圧延焼鈍板)の低温靱性に及ぼす W の影響について検討した結果、W 添加量が 2.0%を超えると著しく靱性が低下する。
- (4) NSSC EM-T (200～950℃)の拘束率 20%におけるパイプの熱疲労寿命は、 $\Delta\epsilon_p$  の低減により比較鋼である Type444 の 200～880℃での熱疲労寿命よりも著しく改善される。
- (5) NSSC EM-T の鋼板および鋼管の常温での引張特性は、Type444 と比較し高強度を示すものの全伸びは顕著に低下しない。
- (6) NSSC EM-T の 950℃および 1000℃での連続または 950℃での断続酸化試験において、いずれも異常酸化またはスケールの剥離による酸化減量は発生せず、優れ

た高温酸化特性を示す。

以上の結果から、W, Nb, Mo および Cu の最適添加量は、Mo: 2.0%, Cu: 1.5%, W: 1.3%, Nb: 0.5%となり、開発鋼 NSSC EM-T の成分を 17Cr-2.0Mo-1.5Cu-1.3W-0.5Nb とした。本鋼は Type444 系の耐熱温度 880℃よりも 70℃向上させた 950℃に対応可能である。

## 参照文献

- 1) 奥学, 中村定幸, 平松直人, 植松美博: 日新製鋼技報. (74), 26 (1996)
- 2) 濱田純一, 林篤剛, 神野憲博, 小森唯志, 伊藤宏治, 福田望, 井上宜治: までりあ. 56 (1), 33 (2017)
- 3) 富田壮郎, 奥学: 日新製鋼技報. (90), 30 (2009)
- 4) 神野憲博, 濱田純一, 金子賢治: 鉄と鋼. 103, 539 (2017)
- 5) 奥学, 藤村佳幸, 中村定幸, 伊東健次郎, 名越敏郎, 植松美博: 日新製鋼技報. (80), 32 (2000)
- 6) 森川多津子: 自動車排ガス計測における走行モード. JARI Research Journal. (2019)
- 7) 平修二: 熱応力と熱疲労. 日刊工業新聞社, 1974
- 8) 奥学: 日本金属学会シンポジウム 自動車材料の高温特性研究の最先端, 2001, p.5
- 9) 奥学, 中村定幸, 植松美博: 日新製鋼技報. (71), 65 (1992)



藤村佳幸 Yoshitomo FUJIMURA  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 薄板・自動車材料研究部  
主幹研究員  
山口県周南市野村南町4976 〒746-8666



今川一成 Kazunari IMAKAWA  
日本製鉄(株)  
技術開発本部 鉄鋼研究所  
材料信頼性研究部 主幹研究員



岡 義洋 Yoshihiro OKA  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 厚板・棒線材料研究部  
研究員



奥 学 Manabu OKU  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 機能創製研究部  
部長 上席主幹研究員