

技術論文

高純フェライト系ステンレス鋼線材：NSSC® 160Rの開発

Development of High Purity Ferritic Stainless Steel Wire Rod, NSSC® 160R

高野光司*
Koji TAKANO
柘植信二
Shinji TSUGE

森祐司
Yuji MORI

天藤雅之
Masayuki TENDO

多田好宣
Yoshinori TADA

抄 録

ステンレス鋼線材の分野で特性バランスに優れ、適用範囲が広い高純フェライト系ステンレス鋼線材の開発検討を行った。その結果、16%Cr-0.4%Nb-0.4%Cu-極低C, N, S系のNSSC 160Rを開発し、オーステナイト系ステンレス鋼線材に近い生産性を確認できた。NSSC 160Rは、①優れた耐食性、とりわけ溶接部および溶接熱影響部の耐粒界腐食性に優れ、部品の耐久性の向上にも有効、②優れた加工性、とりわけ冷間鍛造性を示すことから複雑形状の部品を冷間鍛造で一体成形が可能であり、製造工程の簡略化と生産性の向上に有効と考えられる。ねじ、強冷間鍛造用部品、溶接材料、金網、電解研磨部品、針金等、幅広く適用されている。

Abstract

NSSC developed the high purity ferritic stainless steel wire rod stabilized by Nb, NSSC 160R (16% Cr-0.4% Nb-0.4% Cu-super low C, N, S). NSSC 160R has superior properties and covers wide range of the applications. The wire of NSSC 160R has high productivity close to the austenitic stainless steel wire by optimizing the production conditions. NSSC 160R wire with high cold forgeability can be forged to complicated forms and it is very effective to abbreviation of the process and improvement of the productivity of the parts. NSSC 160R prevents intergranular corrosion at the welded parts and improves the durability, because NSSC 160R shows excellent intergranular corrosion resistance after heat patterns of welding. NSSC 160R wire rods are applied to various products widely, fasteners, strong cold forging parts, weld wires, wire nets, electrolytic polishing parts, wires and so on.

1. 緒 言

ステンレス鋼は、全世界で鋼板を中心に年間約2500万t生産され、耐食性、耐熱性、磁性、強度といった高機能を示すことから様々な製品で使用されている。この中でステンレス鋼棒線材は、ステンレス鋼全体の約10%弱の約150～200万t/年が鉄鋼メーカーにより生産され、2次加工メーカーによって、様々な加工(伸線加工、鍛造加工、切削加工、溶接等)を受け、部品(ねじ、シャフト、中空品、ばね等)に仕上がる。ステンレス鋼線材の主鋼種は、SUS304(18%Cr-8%Ni鋼)を中心とするオーステナイト系ステンレス鋼である(約8～9割)。

近年、地球温暖化等の環境問題が厳しくなり、自動車分野を中心に、製造工程の簡略化、耐久性の向上(長寿命化)

が強く求められるようになってきた。複雑形状の部品を生産性が高い冷間鍛造で生産できる材料、部品の耐久性に大きく影響する接合部の耐食性を向上できる材料を開発する意義は大きい。冷間鍛造性を飛躍的に向上させ、溶接部を含めた耐食性の向上には、高純フェライト系ステンレス鋼が最適である。

このことから、新日鐵住金ステンレスは、適用範囲の広い高純フェライト系ステンレス鋼線材：NSSC 160R(16%Cr-0.4%Nb-0.4%Cu-極低C, N, S)を開発することとした。なお、高純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と異なり強磁性を有することから、マグネット工具による部品の取り付けの作業性改善、磁気探知による部品の品質管理の強化にも有効である。

2. 開発鋼の考え方

開発鋼の目標特性は、

- 1) 耐食性：SUS304部品（用途毎）に必要とされている耐食性を有していること。溶接部の耐食性については、溶接熱影響により粒界腐食が生じないこと。
- 2) 冷間加工性：冷間鍛造時の荷重をSUS304の半分程度にし、鍛造機の負荷を低減するとともに、SUS304並の加工限界能を有し、複雑形状の冷間鍛造が可能なこと。
- 3) 製造性：線材～鋼線製造工程でSUS304に近い生産性を有すること

とした。これらの目標特性に対し、高純フェライト系ステンレス鋼で検討を行った。

高純フェライト系ステンレス鋼の特性に及ぼす各元素の影響については、多くの報告^{1,2)}があるが、特に、①溶接部および溶接熱影響部の鋭敏化を防止し、良好な耐粒界腐食性を維持するために、Nbを0.4%添加した²⁾。②冷間鍛造性と耐食性に悪影響を及ぼすC、Nと耐食性に悪影響を及ぼすSを極低化し、耐食性を向上させるためにCuを0.4%添加した¹⁾。③線材の製造性、パフォーマンスを考慮して合金設計を実施した。基本成分は、線材の製造性を考慮して16%Cr鋼をベースとした。

(1) NSSC 160Rの耐食性確保のポイント

高純フェライト系ステンレス鋼では、常温から融点までフェライト単相でC、Nの溶解度が小さく、鋼中の元素の拡散速度も大きい。そのため、C、N含有量を下げても高温からの冷却速度を大きくしても鋭敏化を避けることは難しく、Nbなどの安定化元素の添加によるC、Nの固定が必要である。Nbは、溶接時等の高温で鋼中に固溶しているC、Nと結合してNb炭窒化物を形成し、その後の冷却過程で粒界腐食の原因となる粒界のフィルム状Cr炭窒化物の生成（鋭敏化）を抑制する。

図1に、16%Cr鋼におけるNb添加と粒界の影響を示す。Nb添加有無で、1100℃から空冷した材料の炭窒化物の存在状況が大きく異なる。Nb無添加鋼では鋼中に固溶しているC、Nが、冷却時にCr炭窒化物として粒界にフィルム状に生成している。一方、Nb添加鋼ではC、NをNb炭窒化物として固定しているため粒界のCr炭窒化物は生成していない。鋼中に固溶するC、NをNb炭窒化物として固定するためには、(C+N)量の10倍以上のNb添加が必要である²⁾。

(2) NSSC 160Rの冷間加工性確保のポイント

高純フェライト系ステンレス鋼で冷間加工性を確保するには、(C+N)量を極力低減すると共にNb添加で固溶C、N量を低減させ、加工硬化を小さくする必要がある。一方、固溶C、Nと結合するNb添加量が多くなると粗大なNb炭窒化物が生成して冷間鍛造性が劣化するため、過剰なNb添加を抑制する必要がある。

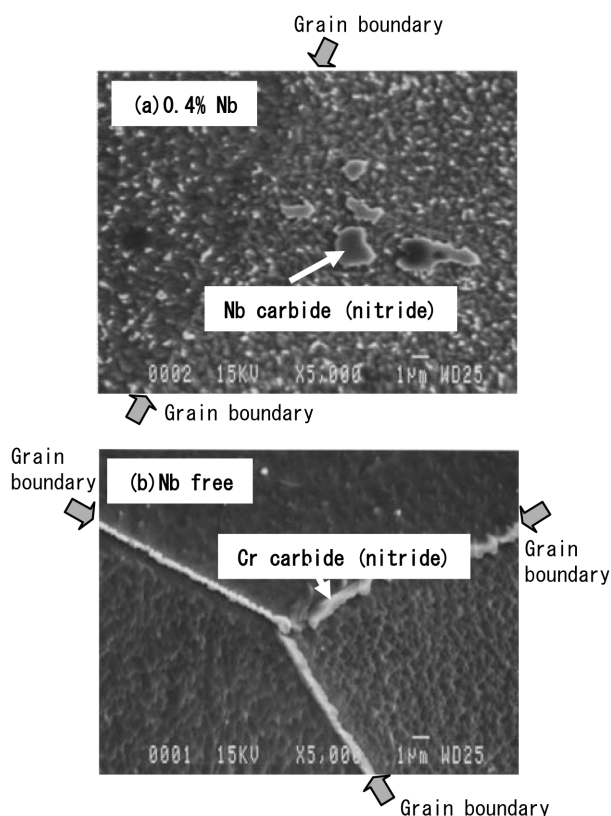


図1 16%Cr鋼におけるNb添加有と粒界の影響(1100℃, 空冷)

Effect of Nb content on the morphologies of carbide (nitride) in 16%Cr steels after the annealing (1100℃, air cool)

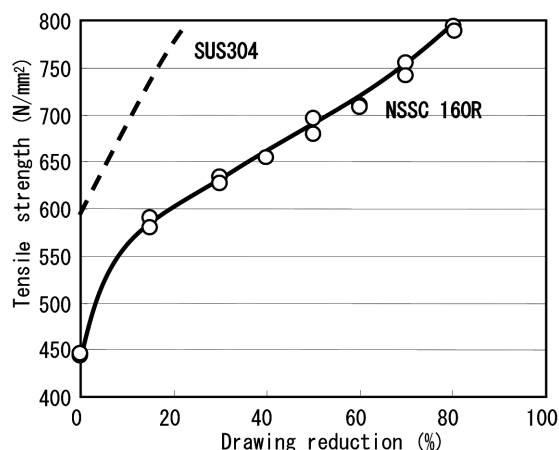


図2 NSSC 160R鋼線の伸線加工時の加工硬化特性
Work hardening properties of NSSC 160R wire on drawing

NSSC 160R線材の引張強さは約430N/mm²とSUS304線材の約550N/mm²に比べて低く、加工硬化がSUS304に比べ大幅に小さい(図2)。

(3) NSSC 160Rの製造性確保のポイント

鉄鋼メーカーの製鋼工場で熔解、精錬、鋼塊化されて線材工場で線材に熱間圧延され、その後、伸線メーカーで鋼線に伸線加工、焼鈍されて製造される。

高純フェライト系ステンレス鋼線材は、靱性が低い

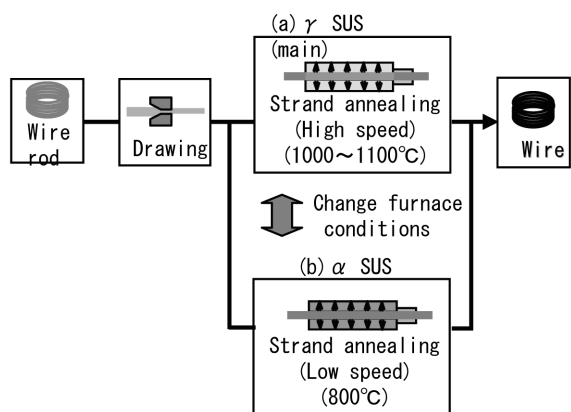


図3 代表的なオーステナイト系およびフェライト系ステンレス鋼線の伸線・ストランド焼鈍工程

Typical drawing and strand annealing processes of austenitic and ferritic stainless steels

表1 NSSC 160Rの代表的な化学成分 (mass%)
Typical chemical compositions of NSSC 160R

C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	N
0.01	0.3	0.3	0.002	-	16.2	-	0.4	0.4	0.01

伸線時に断線が発生し易い。断線なく安定した伸線加工性を確保するには、靱性に悪影響を及ぼすCr量を16%に抑制することが有効である。5.5mm~34mm径サイズの線材から安定した品質の鋼線が得られる。

伸線された鋼線は、図3に示すように、ストランド焼鈍が施される。オーステナイト系ステンレス鋼線では高温焼鈍(約1100°C)が施され、汎用のフェライト系ステンレス鋼線は低温焼鈍(約800°C:高温での相変態や鋭敏化を抑制するため)が施される。従って、汎用のフェライト系ステンレス鋼線をストランド焼鈍する場合、主流のオーステナイト系ステンレス鋼線の炉温からの温度の切り換えが生じる。一方、NSSC 160R鋼線は、Nb添加等により900°C以上の高温でも変態が生じず、前述したように高温からの急冷でも鋭敏化せずに整粒組織が得られる(オーステナイト系ステンレス鋼は、C、Nの溶解度が大きく、鋼中の拡散速度が小さいため高温からの冷却速度を大きくすると鋭敏化しない)。そのため、オーステナイト系ステンレス鋼線に近い温度域1000~1100°Cで高温高速のストランド焼鈍が可能である。

以上のことから、特性バランスに優れ、棒線分野で適用範囲の広い高純フェライト系ステンレス鋼線材として、16%Cr-0.4%Nb-0.4%Cu-極低C、N、S系(NSSC 160R)を開発した(表1)。

3. 特性と製品例

3.1 特性と利用加工技術

3.1.1 耐食性

図4に、各種材料の表面研磨仕上げ肌における孔食電位

[Pitting potential]
(Test conditions) JIS G 0577, 3.5%NaCl, Ar deaeration, 30°C

	Surface grinding	Pitting potential (mV vs Ag/AgCl, KCl)					
		-200	-100	0	+100	+200	+300
NSSC 160R	Mirror surface					■	
	#500					■	
SUS430	#500			■	■		
SUS304*	#500					■	

*SUSXM7 is included.

[Salt spray test]
(Test condition) 5%NaCl, 35°C, 1000h

	Surface grinding	Rust ranking					
		A	B	C	D	E	F
NSSC 160R	Mirror surface	■					
	#500	■	■				
SUS430	#500			■	■		
SUS304	#500	■	■				

図4 各種線材の研磨仕上げ肌の孔食電位と塩水噴霧後の発錆状況

Rusting circumstance after salt spray test and the pitting potentials of the materials

(JIS G 0577)と塩水噴霧試験(JIS Z 2371)後の発錆状況を示す。NSSC 160Rの耐食性は、SUS430よりも優れ、SUS304に近い。

自動車用等の部品は、溶接接合されることが多く溶接部の健全性が重要となる。図5に、各種材料を溶接材料としてSUH409鋼板を突き合わせてTIGおよびMIG溶接し、改良Strauss試験(硫酸:0.5%, 硫酸銅:5%)で溶接部の粒界腐食性の評価を示す。SUS430に、(c)Nbを含有しない極低(C+N)、(b)Nb/(C+N)=8.6の極低(C+N)では、粒界腐食が発生しているが、(a)Nb/(C+N)=約20のNSSC 160Rでは粒界腐食は見られない。NSSC 160Rの溶接金属は優れた耐粒界腐食性を示し、部品の耐久性を向上させるのに有効である。

3.1.2 冷間鍛造性

複雑形状の部品へ強冷間鍛造する際に、材料の基本的な変形特性を評価する必要がある。図6に、NSSC 160RおよびSUS304の円筒形試料を単純圧縮加工した場合の鍛造荷重(変形抵抗)を示す。NSSC 160Rは、bcc(体心立方格子)の結晶構造により加工硬化が非常に小さいため、鍛造荷重は、高加工率側でSUS304の約50%と小さいものと推定される。一方、図7に、平頭形状に強冷間鍛造した場合の限界割れ加工率を示す。NSSC 160Rは高冷間鍛造用のオーステナイト系ステンレス鋼:SUSXM7(17Cr9Ni-3Cu-低C、N系)と比較し同等以上の加工性を示す。

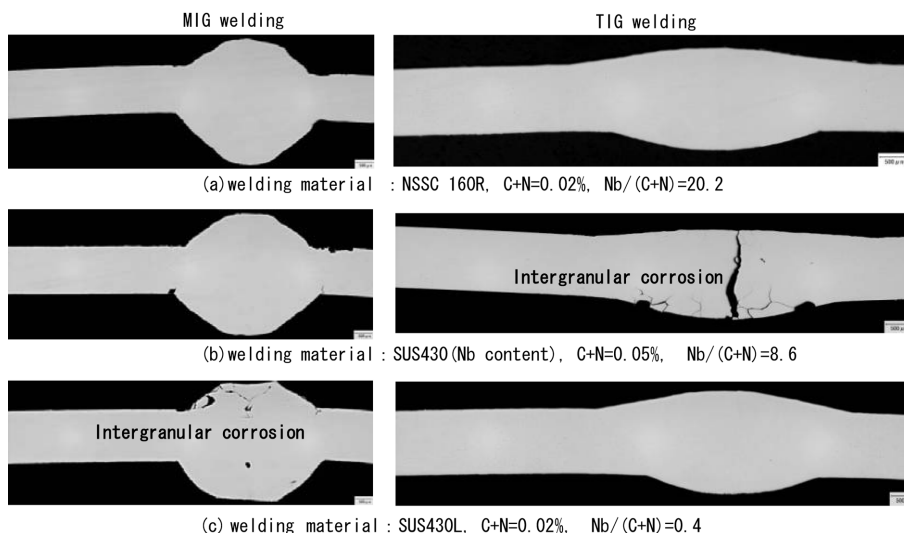


図5 SUH409鋼板の各種溶接材料を用いた突き合わせ溶接部(MIG, TIG)の粒界腐食試験(改良strauss試験, JIS G 0575, 硫酸:0.5%, 硫酸銅:5%)後の粒界腐食状況(断面埋め込み研磨面) Intergranular corrosion circumstance of the welds (MIG & TIG) after Intergranular corrosion test (modified Strauss test, JIS G 0575, H₂SO₄: 0.5%, CuSO₄: 5%)

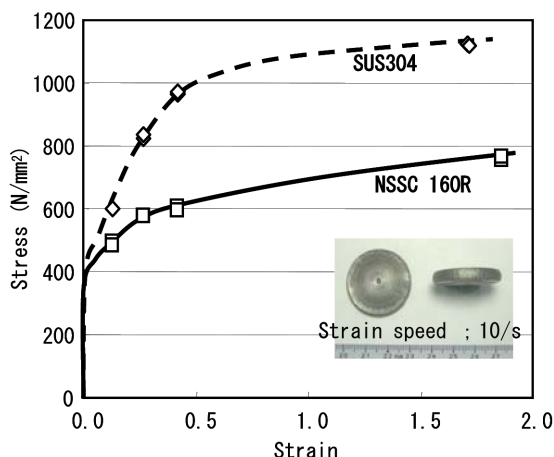


図6 NSSC 160RおよびSUS304(円筒形試料)の圧縮鍛造加工時の変形抵抗 Stress-strain curves of NSSC 160R and SUS304 on compression processing

3.1.3 その他(高温強度, 耐酸化性)

図8に各種材料の高温強度を示す。NSSC 160Rは高温強度に有効なNbが添加されていることから、約700℃以下ではオーステナイト系ステンレス鋼並以上の高温強度が得られる。また、図9に各種材料の高温での連続酸化試験時の酸化増量を示す。NSSC 160Rは高温までフェライト単相であり、緻密なCr系の酸化スケールが生成するため、特に約800℃以上の高温域では汎用SUS304よりも優れた耐酸化性を示す。以上のことから、NSSC 160Rは総合的に優れた耐熱性(高温強度, 耐酸化性)を有すると考えられる。

3.2 適用製品例

3.2.1 溶接用材料

NSSC 160Rは優れた溶接部の耐粒界腐食性を有すること

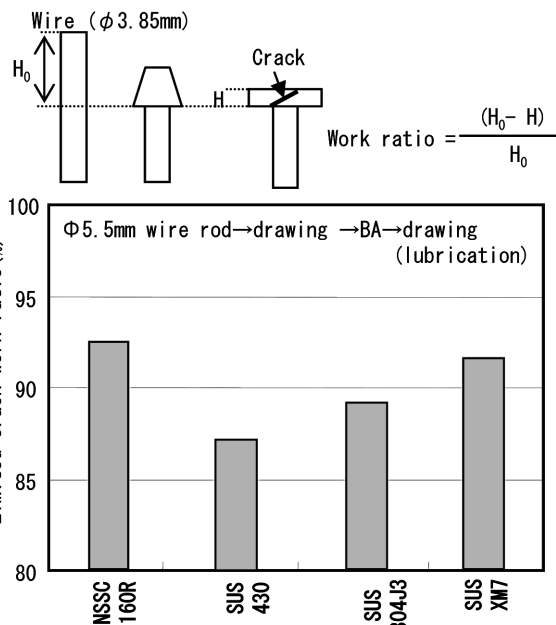


図7 各種鋼線の平頭形状への冷間鍛造時の加工割れが発生する限界割れ加工率

Limited crack work ratios of the steels on cold forging to the flat-head form

から、自動車の排気系部品等の溶接ワイヤーとして適用されている。但し、溶接時にガス雰囲気や油等の汚れからC, Nがピックアップすることがあるため、溶接用材料では、粒界腐食性に大きく影響を及ぼすNb/(C+N)を15以上としている。また、炭酸ガス溶接(MAG溶接)では、雰囲気中からのCのピックアップが大きいため、Ar(+O₂)ガスを使用したTIG, MIG溶接を推奨している。

3.2.2 冷間鍛造部品(高冷間鍛造部品, ねじ)

NSSC 160Rは優れた冷間鍛造性を有することから、従

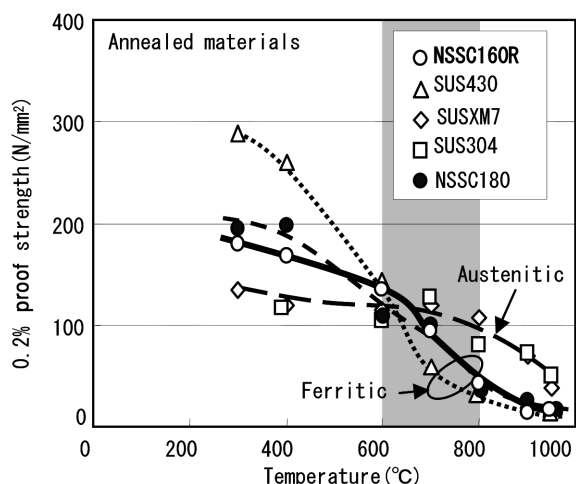


図8 各種材料の高温強度(0.2%耐力)

Effects of temperature on 0.2% proof strength of the materials

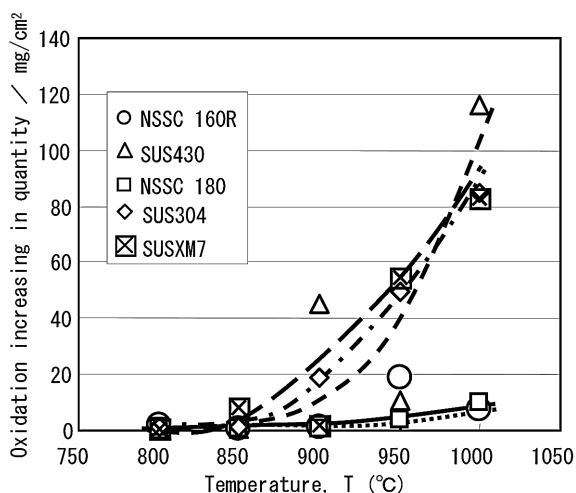


図9 各種材料(8mm径×25mm長さ、#600研磨仕上げ)の200h大気連続酸化試験における酸化増量

Oxidation increasing in quantity of the materials (8mm φ × 25mm length, surface #600 grinding) after oxidation. Test at T°C for 200h

来、切削加工して溶接で組み立てていた複雑形状の自動車用部品に対し、冷間鍛造による一体成形を試みた。その結果、(図10)、18mm径太径鋼線から強冷間鍛造(導入される推定最大加工歪みε:約3.5)し、軽切削加工で仕上げ(一体成形することが可能)ることが可能となり、実用化されている。複雑形状の自動車用部品に対し、冷間鍛造による一体成形を試み、部品製造工程での生産性を向上させたという点でNSSC 160Rは実績を上げている。

一方、NSSC 160Rは高冷間鍛造性に加え、フェライト系であることから磁性を有し、マグネット工具が使用できるねじとして締結作業性を大幅に改善できる。但し、ねじには造形上のばり状疵(隙間部)が多く発生するため、耐食性の確保にはばり状疵が発生しないようなねじ加工の適正化と図11に示すように最適なパシベーション処理(硝酸



図10 NSSC 160Rの自動車用の強冷間鍛造部品の外観(冷間鍛造のまま)

Appearance of NSSC 160R part for automobile cold forged in high degree of working



(a) Proper passivation (Non rust) (b) Improper passivation (Rusting)

図11 NSSC 160Rねじの塩水噴霧試験後の発錆に及ぼすパシベート処理の影響

Effect of passivation conditions on rust of NSSC 160R screws after salt spray test

浸漬等によりステンレス鋼表面の不動態被膜を強化する処理)を推奨している。

3.2.3 ワイヤー

NSSC 160Rは優れた耐食性と磁性を有することから食品用の金網として、衛生面に優れ、且つ、金網が脱落して食品に混入しても磁気探知で金属片を探知できるため品質管理上の安全性が高い等から、食品分野を中心に適用拡大中である。その他、優れた耐食性から家畜用の金網、雑貨用(電解研磨用)の籠、優れた軟質特性から果樹園用の針金、優れた耐熱性から耐熱金網、低熱膨張率特性からガラス用金網等種々の製品に適用拡大中である。

4. 結 言

ステンレス鋼線材の分野で特性バランスに優れ、適用範囲が広い高純フェライト系ステンレス鋼線材:NSSC 160R(16%Cr-0.4%Nb-0.4%Cu-極低C, N, S系)を開発した。製造条件の最適化によりオーステナイト系ステンレス鋼線材・鋼線に近い生産性を確認できた。NSSC 160R線材は、ねじ、強冷間鍛造用部品、溶接材料、各種金網、電解研磨部品、針金等、従来はオーステナイト系ステンレス鋼線材、めっき線などが使用されていた用途にも幅広く適用され、今後、更に用途拡大を図っていく。

参考文献

- 1) 山本, 芦浦: Boshoku Gijutsu. 37, 407(1998)
- 2) 秋山, 木谷, 御所窪, 横山, 平原, 星: 日本ステンレス技報. 21, 31(1986)



高野光司 Koji TAKANO
新日鐵住金ステンレス(株) 研究センター
製鋼・厚板・棒線研究部 上席研究員
山口県光市大字島田 3434 〒743-8550
TEL:(0833)71-5208



多田好宣 Yoshinori TADA
新日鐵住金ステンレス(株) 光製造所 生産
管理部 マネジャー



森 祐司 Yuji MORI
新日鐵住金ステンレス(株) 技術部 部長代
理 (現 商品開発部 担当部長)



柘植信二 Shinji TSUGE
新日鐵住金ステンレス(株) 研究センター
製鋼・厚板・棒線研究部 上席研究員



天藤雅之 Masayuki TENDO
新日鐵住金ステンレス(株) 商品技術部 部
長代理 (現 商品開発部 部長代理)