



ミニ特集・3

高濃度窒素鋼の有効性とその応用

高窒素鋼の創製と諸特性 1

—物性、加工性及び機械的性質—

Fabrication of HNS and Its Properties 1

—Physical Properties, Formability and Mechanical Properties—

片田康行

Yasuyuki Katada

物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター
アリシエートディレクター

1 はじめに

鉄鋼に窒素 (N) を添加し耐食性や機械的性質を改善する研究は比較的早く、オーステナイト (γ) 相の安定化元素で、かつ稀少元素である Ni の代替元素として 1930 年代から欧州を中心に続けられてきた¹⁾。現在、代表的な用途の一つである高強度および非磁性が要求される発電機用モーター回転子の保持リング材として、高 Mn 高 N 添加 γ 系ステンレス鋼がある。

物質・材料研究機構では、1997 年から超鉄鋼プロジェクト研究 (STX-21) の一環として、N 添加による「耐海水性ステンレス鋼の開発」²⁻⁴⁾を進めている。この新素材の開発指針は、N 添加と素材の清浄化を図ることにより、Cr、Ni、Mo 等の合金元素を極端に増加させることなく、海水中で局部腐食の発生・成長の少ない優れた耐食材料を開発することである。そのため N 添加と素材の清浄化を同時に実現できる N_2 ガス加圧式 ESR (Electro-Slag Remelting) 装置を国内で初めて開発し、不純物混入の原因となる Mn を含まない高 N 添加ステンレス鋼の試験溶製に成功した。本報では、加圧式 ESR (P-ESR) 法による高 N 鋼 (HNS) の創製と、N 開発鋼の物性値、加工性および機械的性質について述べる。

2 加圧式 ESR 法による HNS の創製

加圧式 ESR 装置の基本仕様としては鋼塊重量：20 kg (Fe 換算)、Cu 製のつば、最大交流電流：3000A、 N_2 最大圧力：5 MPa である。その概要を Fig.1 に示した。HNS の基本系は、Fe-23%Cr-4%Ni-2%Mn-1%N 系である。同合金系の Thermo-Calc による計算状態図の一例を Fig.2 に示す。図に示すように、本合金系が γ 相単相であり、N 含有量が十分に高いと Ni フリー HNS の創製が可能になることがわかる。N 供給源として、FeCrN の粉末を焼結したものをを用いた。本

溶解で用いたフラックスは、主として CaF_2 で、操業開始前に全量を投入して実験を行った。また脱酸処理は、金属カルシウムワイヤーをあらかじめ一次電極に組み込んで行った。

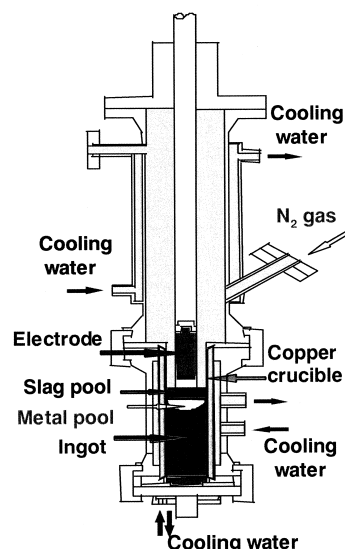
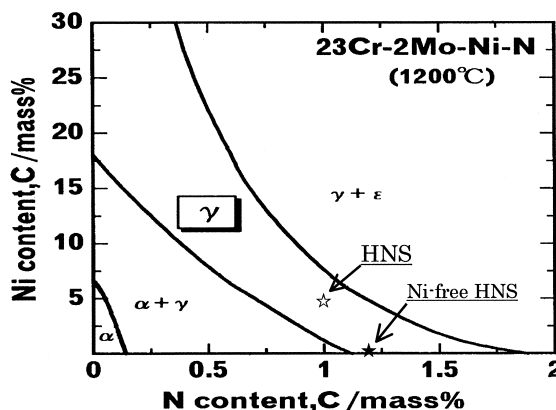
Fig.1 Schematic drawing of N_2 gas P-ESR system

Fig.2 Isothermal section at 1200°C of phase diagram in Fe-23Cr-2Mo-Ni-N system

3 HNSの諸特性⁵⁾

3.1 HNSの物性値

Table 1に、本開発材であるHNS (Fe-23%Cr-4%Ni-2%Mo-1%N) の比熱、熱拡散率、熱伝導度、線膨張係数およびヤング率の測定結果を示す。ここで特筆すべき点は、HNSのヤング率が通常の γ 系ステンレス鋼に比べて10%ほど高くなっているという点であろう。

3.2 HNSの加工性

炭素 (C) やNのような侵入型元素が固溶した場合、固溶強化により強度は高くなり、材質は硬くなる。本開発材であるHNSも同様にNの添加とともに強度は上昇し、硬くなる。しかしながら材質が脆くなってしまうかといえばそうではなく、適当な条件さえ選べば種々の加工が可能である。Fig.3にHNSの各種加工例を示す。図に示すように熱間圧延や冷間圧延のみならずかなり小径の細線加工も可能である。Fig.4は人間の毛髪の半分くらいの直径を有するHNS細線加工に成功した例である。これは不純物の低減化により初めて可能となった。

3.3 HNSの機械的性質

3.3.1 引張試験

Fig.5は、HNSの引張特性の温度依存性を調べたものである。供試材は23%Cr-4%Ni-1%Nで、鋼を溝ロール圧延により直径15.8 mmまで熱間加工後、1200℃で30 minの加熱後、水焼入れの溶体化処理をしたものである。引張試験片はJIS4号平滑丸棒試験片に準拠したものをを用いた。引張試験温度は500℃、400℃、300℃、200℃、100℃、室温 (RT)、-30~-40℃、-196℃の8条件で、各温度におけるn数は2とした。図より、溶体化処理材でも室温で

1000 MPa程度の高い引張強度を示しており、比較的広い温度範囲で高い引張強度を維持していることがわかる。また、伸び (EI) と絞り (RA) についても広い温度範囲で良好な変形挙動を示している。さらに、降伏比 (耐力 (PS) /引張強

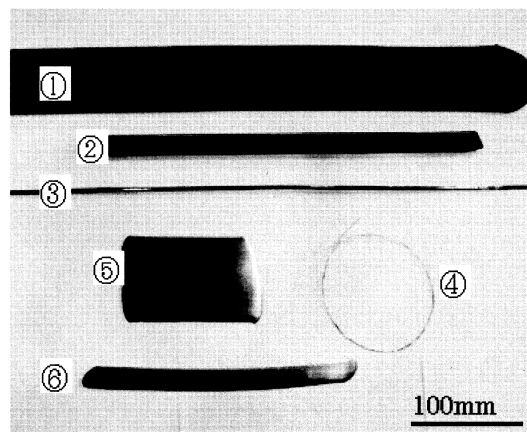


Fig.3 Various products of 23Cr-4Ni-2Mo-1N steel prepared by different techniques: ① plate by hot rolling, ② bar by hot rolling, ③ ④ wires by swaging, and ⑤⑥ plates by cold rolling.

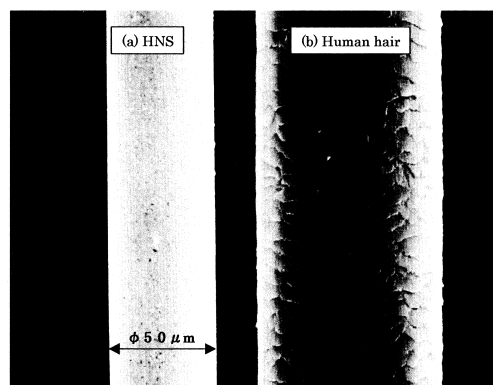


Fig.4 Wire of 23Cr-4Ni-2Mo-1N steel with a diameter of 50 μ m and human hair

Table 1 Physical properties of 23Cr-4Ni-2Mo-1N steel

Temp (°C)	Specific heat (J/kg·°C)	Thermal Diffusion (m ² /s)	Thermal conductivity (W/(m·°C))	Temp (°C)	Linear expansion coefficient (1/K)	Young's modulus (GPa)
23	4.68×10^2	3.57×10^{-6}	1.31×10^1	25	—	226
100	4.84×10^2	3.72×10^{-6}	1.41×10^1	30-100	15.4×10^{-6}	—
200	5.08×10^2	3.97×10^{-6}	1.58×10^1	30-200	16.0×10^{-6}	—
300	5.24×10^2	4.24×10^{-6}	1.74×10^1	30-300	16.2×10^{-6}	—
400	5.44×10^2	4.42×10^{-6}	1.88×10^1	30-400	16.6×10^{-6}	—
500	5.60×10^2	4.61×10^{-6}	2.02×10^1	30-500	17.1×10^{-6}	—
600	5.75×10^2	4.83×10^{-6}	2.17×10^1	30-600	17.2×10^{-6}	—
700	6.26×10^2	5.12×10^{-6}	2.51×10^1	30-700	17.5×10^{-6}	—
800	6.32×10^2	5.17×10^{-6}	2.55×10^1	30-800	17.2×10^{-6}	—
—	—	—	—	30-900	15.8×10^{-6}	—
—	—	—	—	30-1000	16.0×10^{-6}	—

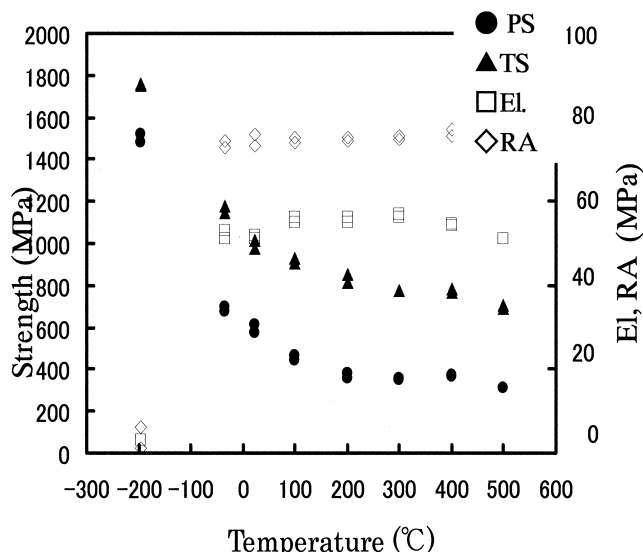


Fig.5 Temperature dependence of mechanical properties for 23Cr-4Ni-1N steel

度 (TS)) についても広い温度範囲で0.5～0.6の値を維持している。Fig.6は、HNSの荷重—伸び曲線について、500～-196℃の温度範囲で調べたものである。-196℃を除く、広い温度範囲について顕著な加工硬化と伸びを示している。HNSのこの顕著な加工硬化挙動を利用すると、引張強度で2000～2500 MPa級の高強度HNS素材の創製も可能であると期待される。

3.3.2 シャルピー衝撃試験

Fig.7は、HNSモデル材を用いて行ったシャルピー衝撃試験における、脆性破面率／横膨出量と試験温度の関係を示したものである。一般に γ 系ステンレス鋼は明瞭な遷移温度を示さないが、今回得られた高窒素鋼は γ 系であるにもかかわらず明瞭な遷移温度域を示すことがわかった。図より、脆性—延性遷移温度は約-50℃となっている。

4 おわりに

P-ESR法により、バルク材として高濃度の窒素添加鋼が入手できるようになり、その優れた特性が明らかになってきている。Nと同じ侵入型元素であるCの場合、添加量の増加につれて、強度は上昇するが脆くなってしまう。一方、Nの添加は高強度化のみならず、伸びや靱性を損なわず、耐食性も付与されるという興味深い性質を持っているが、HNSが γ 単相のステンレス鋼でありながら何故延性—脆性遷移挙動を示すかなど不明な点も多い。今後、HNSに関するさらなる理解を深めるとともに、HNSの実用化へ向けた新たな展開が期待される。

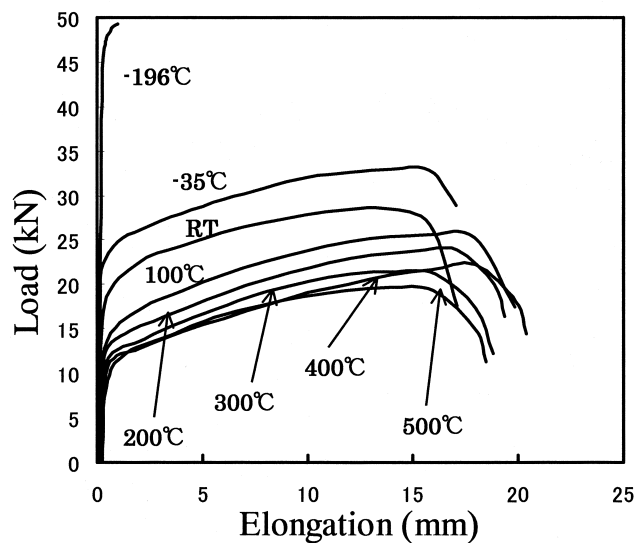


Fig.6 Load-elongation curves of 23Cr-4Ni-1N steel at various temperatures

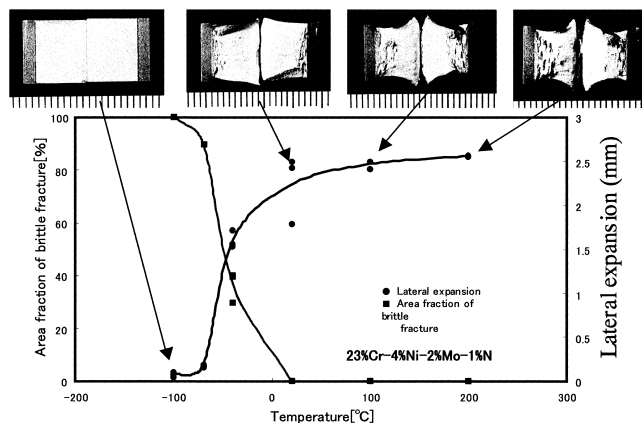


Fig.7 Results of impact test of the Charpy type for 23Cr-4Ni-1N steel

参考文献

- 1) 今井勇之進：鋼の物性と窒素，アグネ技術センター，東京，(1994)
- 2) Y. Katada et al.：Proc. First International Conference on Advanced Structural Steels (ICASS2002)，NIMS，Tsukuba，(2002)，317.
- 3) Y. Katada et al.：Proc. HNS2003，Schaffhausen，Switzerland，(2003)，189.
- 4) 片田康行：ふえらむ，7 (2002)，12.
- 5) 片田康行：第11回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集，日本機械学会，(2003)，51.

(2003年11月12日受付)