構造用素材として優れたコストパフォーマンスを持つ 省合金型二相ステンレス鋼(NSSC®2120)の開発

及川雄介¹⁾ 柘植信二²⁾ 江目文則³⁾
本村 洋⁴⁾ 井上裕滋^{**}

1. はじめに

近年我が国においては、様々な自然災害の発生が相次ぎ、これに備えた社会資本の充実、即ち「国土強靱化」のためのインフラ整備が全国で進行している。構造用素材としてのステンレス鋼は、耐食性に関して、メンテナンスに関わるコストを大幅に抑えることができる非常に優れた特性を有する反面、SUS304等の既存鋼ではニッケル等の高価な原料を大量に必要とするため、初期投資が高く限定的な使用に留まっていた。

著者らは、構造用素材として優れたコストパフォーマンスを持つ省合金型二相ステンレス鋼 NSSC®2120^{*}(21Cr-2Ni-3Mn-1Cu-0.2N)を開発した。本鋼は SUS304 並みの耐食性を有し SUS304 よりニッケル含有量が少ないことに加え、高い強度を活かして薄肉化による軽量化を図れることから、二重の意味でレアメタル使用量の低減が可能である。

本稿では NSSC®2120 の開発経緯と諸特性および実用例について紹介する。

2. NSSC®2120 の開発経緯

(1) 二相ステンレス鋼の概要と課題

二相ステンレス鋼は、常温でオーステナイト相とフェライト相の二相組織を持ち、高強度(高耐力)でニッケルの含有量が少ない特長があり、レアメタル節減の観点から近年注目が高まっている材料である。ただ、SUS329J3L(22Cr-5Ni-

3Mo-0.18N)に代表される従来の二相ステンレス鋼は、汎用オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316L より耐孔食性の高い材料であり、高価なモリブデンを多く含有することから合金コストが高く、ケミカルタンカーのような特に高い耐食性を要する限定的な用途に使われてきた。それに対し省合金型(リーニ)二相ステンレス鋼は、耐食性を SUS304, SUS316L 並みとした上で、ニッケルおよびモリブデンの一部をクロム、マンガン、窒素に置き換えている鋼種である。SUS316L 相当材としては ASTM で規定された UNS S32304^{**}(23Cr-4Ni-0.15N), SUS304 相当材としては同じく UNS S32101(21Cr-1.5Ni-5Mn-0.22N)等がある。

省合金型二相ステンレス鋼のうち SUS304 相当材は、SUS304 以下の合金コストでかつ高強度であるが、①溶接継手の特性、例えば耐食性の低下が特に大入熱の溶接の場合に大きい、②製造が難しく、合金コストの低減分を製造コスト上昇分が上回る等の課題が有り、構造用鋼としてそのまま適用することは難しかった。以下、それぞれの課題を如何に克服し、新材料の開発に至ったかを述べる。

(2) 溶接部特性低下を抑制した省合金型二相ステンレス鋼の開発

二相ステンレス鋼において窒素は、耐孔食性指標 PREN (Pitting Resistance Equivalent Number : $\text{Cr} + 3.3\text{Mo} + 16\text{N}$) の向上、オーステナイト相の増加等のために積極的に添加される重要な元素である。更に、安価な元素であることから、省合金型ではモリブデン、ニッケルの一部を代替すべく積極的に添加されており、0.20%以上添加されている鋼種も開発されている。一方、以下の通り溶接部の特性低下を引き起こす元素でもある。

一般の二相ステンレス鋼溶接部の特性低下は次のような機構で起こる⁽¹⁾。溶体化状態の母材では窒素はほとんどがオーステナイト相中に分配している。二相ステンレス鋼は融点近

* 新日鐵住金ステンレス株式会社；

1) 研究センター 主任研究員 2) 研究センター長

3) 商品開発部 マネジャー 4) 光製造所 製鋼技術室 部長代理

** 新日鐵住金株式会社 鉄鋼研究所接合研究部；上席主幹研究員

Development of Lean Duplex Stainless Steel that is Cost-effective as a Material for Structure; Yusuke Oikawa, Shinji Tsuge,

Fuminori Gohnome, Hiroshi Motomura and Yuji Inoue

(*Nippon Steel and Sumikin Stainless Steel Corporation.

**Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation)

2015年10月30日受理[doi:10.2320/materia.55.70]

[†] ASTM 規格 : S82122 (A240) JIS 規格 : SUS821L1 (G4304, G4305)

^{**} JIS 規格 : SUS323L (G4304, G4305)

図1 S32101における孔食発生位置の特徴。

傍の高温ではフェライト単相になることから、溶接時の加熱によってオーステナイト相は減少または消失し、フェライト相中の固溶窒素量が増加する。その後の冷却時には、急冷される過程でオーステナイト相は元の量まで戻らず、フェライト相中に過飽和に固溶した窒素の一部がクロム窒化物となり析出することで特性低下を引き起こす。

省合金型二相ステンレス鋼の場合、窒素を多く添加していることに加え、クロム、モリブデン、ニッケルの節減により窒素の固溶限が低下し、さらにクロム窒化物が析出しやすくなっている。従来のSUS304代替省合金型二相ステンレス鋼は入熱の上限が1.5 MJ/mと小入熱溶接のみ可能であった⁽²⁾。NSSC®2120では以下の取り組みにより入熱の上限を大幅に拡大した。

まず、著者らは省合金型二相ステンレス鋼の溶接部組織を詳細観察し、以下の知見を得た。従来の二相ステンレス鋼において適正な溶加材を適用した場合、特性低下が顕著となる位置は、一旦フェライト単相加熱温度まで加熱され最も窒化物が析出する溶融線の最近傍であることから、これまでは、特性低下抑制のためには、当該部位のオーステナイト相再析出を促進すべく、できるだけ窒素を高めたほうが良いとされてきた⁽¹⁾⁽³⁾。しかしながら省合金型においては、窒素が過剰に添加された場合、溶融線最近傍より外側の、最高加熱温度でも二相が維持され窒化物析出量が比較的少ない領域でより耐食性が低下することわかった⁽⁴⁾(図1参照)。これは、溶融線最近傍では粒界のほとんどがフェライト/オーステナイト粒界となり、クロム窒化物はフェライト粒内に微細析出するのに対し、二相加熱域では残存しているフェライト/フェライト粒界にフィルム状に析出するため、生じるクロム欠乏層のサイズがより大きいことが影響したものと推定される。二相加熱域では溶接熱影響によるオーステナイト相の変化は少なく、対策には窒化物の析出駆動力そのものを抑制する必要がある。

そこでNSSC®2120では以下のような成分設計を行った。ポイントは、上述の通り①クロム窒化物の析出駆動力を抑制すること、②フェライト単相加熱域のオーステナイト析出量は確保することである。①については、窒素の低減が有効であるのは勿論であるが、それだけでなく他の元素の相互作用やオーステナイト相率も影響することから、Thermo-Calc®による状態図計算により、平衡的にクロム窒化物が析出する

図2 母材と再現熱サイクル材の孔食電位に及ぼす平衡析出温度の影響⁽⁴⁾。

上限温度である窒化物平衡析出温度を算出し、これを低めると大入熱溶接を模擬した熱影響部の耐食性が向上することを見出した(図2参照)。そこで孔食電位0.25 V以上に対応する析出温度約1203 K以下を狙った成分設計を行った⁽⁵⁾。②については、窒素以外のオーステナイト安定元素であるニッケル、マンガン、銅の調整によりオーステナイト相の比率を高め、結果、NSSC®2120の成分系導出に至った。

(3) 安定的生産体制の確立

省合金型二相ステンレス鋼は、①高窒素含有による铸件への気泡発生、②高温強度が低いことによる加熱、圧延、熱処理時の鋼板曲がりおよび疵発生、③逆に室温での強度が高いことによる形状矯正不良、④脱スケール性の不良等の製造課題が有り、疵取り等の工程の付加のため、製造開始当初は高製造コストが課題であった。これに対し、铸造条件の全面見直しや各熱間工程での条件最適化、高性能レベラー、高能率酸洗設備の導入等により、汎用ステンレス鋼レベルの生産性を実現した。

3. NSSC®2120の諸特性

図3にNSSC®2120の母材とフラックスワイヤを用いたマグ溶接(FCAW)およびS32101の推奨入熱量上限を超えた3.5 MJ/mのサブマージーク溶接(SAW)継手の臨界孔食温度評価結果をS32101, SUS304と比較して示す。溶接部も含め、SUS304以上の耐食性が得られている。また耐硫酸性や耐SCC性にも優れている⁽⁶⁾。図4に10 mm厚板を素材とした溶接継手について、靱性を評価した結果を示す。NSSC®2120の靱性低下は比較的少ない。

4. 実用例

NSSC®2120は①304と同等以下の素材コストに加え、②高強度を活用した軽量化設計や③溶接作業性も良好であることから、水インフラなど土木分野の素材として、ライフサイクルコストで最も優位な素材と認知されつつあり、ステンレス鋼の需要創出に貢献している。厚板の適用例から水門、お

図3 溶接部耐食性評価結果.

図4 溶接熱影響部靱性評価結果⁽⁴⁾.

図5 用途例(浮上式フラップゲート).

図6 用途例(ソーラーパネル架台).

よび薄板の適用例からソーラーパネル架台について述べる。

(1) 水門

本鋼及び S32304 は、ステンレス鋼材として初めて、国土交通省の新技术情報提供システム NETIS に登録された。従来の普通鋼＋塗装の構造物を置き換えることでメンテナンス負荷の軽減が可能となり、ステンレス鋼の採用事例が増加しつつある。

SUS304 (設計強度 205 N/mm²) の場合、一般構造用鋼 SS400 (235 N/mm²) などからの置換の際、強度が不足するため厚肉設計する必要があり、鋼材単価と重量増加の二重のコストアップとなる上、基本設計を抜本的に見直すことにより設計費用も割高となる。

本鋼の強度 (400 N/mm²) は、SS400 など設計された構造物に適用しても、強度が上回るため単純な置換が出来るだけでなく、更に軽量化と重量削減も可能である。特に、東日本大震災以降、水門の設計基準がより大型化していることから軽量化への需要がより増大しており、復興工事に大量使用されるなど、全国のインフラ施設で採用の動きが広がっている(図5)。

(2) ソーラーパネル架台

太陽光発電パネルを支持する架台へ、高強度かつ腐食減量分を付加する必要の無い NSSC[®]2120 を適用することにより部材を軽量化出来、組立施工性を大幅に向上出来た(図6)。当該架台は第15回ステンレス協会賞(2013年度)を受賞している。

5. 特 許

本開発に関わる特許を国内外に24件出願しており、基本特許の特許第5345070号をはじめ9件が登録されている。

文 献

- (1) 幸 英昭, 東 茂樹, 小川和博, 工藤越夫, 西 旭夫: 住友金属, **42**(1990), 272-288.
- (2) B. Holmberg, M. Liljas and F. Häag: Duplex 2007 Int. Conf. & Expo.
- (3) R. -I. Hsieh, H. -Y. Liou and Y. -T. Pan: J. Mater. Eng. Perform., **10**(2001), 526-536.
- (4) 及川雄介, 柘植信二, 梶村治彦, 井上裕滋: 溶接学会誌, **82**(2013), 435-438.
- (5) S. Tsuge, Y. Oikawa, H. Kajimura, H. Inoue and R. Matsuhashi: 7th European Stainless Steel Conference Science & Market, (2011).
- (6) M. Anto, M. Wada, K. Onishi and K. Fujita: 材料と環境 2015 講演集, 143-144.