

省合金二相ステンレス鋼シリーズ NSSC 2120[®], NSSC[®] 2351の開発

Development of New Lean Duplex Stainless Steel Series NSSC 2120[®], NSSC[®] 2351

及川 雄介*
Yusuke OIKAWA

柘植 信二
Shinji TSUGE

江目 文則
Fuminori GOHNO

抄 録

省合金二相ステンレス鋼を大入熱溶接する場合に溶接熱影響部におけるCr窒化物析出起因の耐食性低下が顕著である課題があった。これに対し、Cr窒化物の析出駆動力を状態図計算で求められる指標であるCr₂N析出開始温度を低くすることで低減する一方、溶接部のオーステナイト再析出量を母材のフェライト量低減により確保する二本立ての成分設計を行うことにより、それぞれSUS304、SUS316Lを代替可能な独自二相ステンレス鋼NSSC 2120、NSSC 2351を開発した。高強度、軽量化可能、省資源の特長を活かし、ダム部材、水門等の構造材をはじめとした広い分野に適用されつつある。

Abstract

For lean duplex stainless steels, there was a problem that with high heat input welding their corrosion resistance was significantly reduced due to the precipitation of chromium nitride in the heat affected zone. Against this problem, we developed original duplex stainless steels named NSSC 2120 and NSSC 2351 that can replace SUS304 and SUS316L respectively, using the composition design from two points of view, which are to reduce the precipitation driving force for chromium nitrides by lowering the Cr₂N precipitation start temperature which is an index required for phase diagram calculation and to maintain the amount of austenite in the welds by reducing ferrite amount of base metal. Utilizing the features of high strength, light weight, and resource saving, they are being applied to a wide range of fields including structural materials such as dam facilities and water gates.

1. 緒 言

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両方の金属組織を有し、ステンレス鋼のほとんどを占めるオーステナイト系、フェライト系ステンレス鋼とは異なる特性を持つステンレス鋼である。オーステナイト系よりNi含有量が低くかつ高強度であるという特長を持ち、省資源の観点から注目が高まっている材料である。

従来の二相ステンレス鋼 (SUS329J3L: 22%Cr-5%Ni-3%Mo-0.15%N, SUS329J4L: 25%Cr-6%Ni-3%Mo-0.15%N) は高耐食オーステナイト系汎用鋼 SUS316L より更に耐孔食性の高い材料であり、高価なMoを多く含有することから合金コストが高く、ケミカルタンカータンク材のような特に高い耐食性を必要とする限定的な用途に使われてきた。これに対し近年、オーステナイト系汎用鋼のSUS304やSUS316Lの置き換えを企図した省合金二相ステンレ

鋼が開発され、種々の用途に使用されてきている。

日鉄ステンレス(株)は、SUS304とSUS316Lをそれぞれ代替可能な省合金二相ステンレス鋼シリーズNSSC 2120 (21%Cr-2%Ni-3%Mn-1%Cu-0.17%N) およびNSSC 2351 (23%Cr-5%Ni-1%Mo-0.17%N)を開発した。両鋼はいずれも、二相ステンレス鋼、特に省合金二相ステンレス鋼の大きな課題である溶接熱影響部の耐食性低下を極力低減する成分設計により、溶接部も含めた耐孔食性をSUS304、SUS316L並み以上としたものである。

また、この二相ステンレス鋼の、高耐食、高強度、省資源という優れた特性を活かし、土木分野の構造用部材への適用に成功した。現在、ダム構造材、水門等の水インフラやソーラーパネル架台等の種々の分野に広く適用されてきており、ステンレス鋼の新たな需要創出を進めつつある。

本報では、省合金二相ステンレス鋼NSSC 2120、NSSC 2351の概要、諸特性および新規市場への適用事例につい

* 日鉄ステンレス(株) 研究センター 厚板・棒線材料研究部 主幹研究員 山口県光市島田3434 〒743-8550

て述べる。

2. 省合金二相ステンレス鋼の概要と従来鋼の課題

2.1 省合金二相ステンレス鋼の概要

二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼よりフェライト安定化元素 (Cr, Mo 等) を増やし、オーステナイト安定化元素 (Ni, N 等) を減らすことによって常温でオーステナイト相とフェライト相が共存する成分としている。

従来の二相ステンレス鋼 SUS329J3L, SUS329J4L は、ステンレス鋼の耐孔食性を示す成分指標 PREN (Pitting Resistance Equivalent Number : $Cr+3.3Mo+16N$) がそれぞれ約 35, 38 であり、SUS316L の約 25 と比べて大幅に高く、高耐食ではあるが高合金コストの鋼種であった。それに対し、1980 年代半ば～2000 年代に欧米で省合金二相ステンレス鋼が開発された。これらは耐食性を SUS304, SUS316L 並みに抑える代わりに、高価な Ni および Mo を Cr, Mn, N に置き換えて低合金コスト化した鋼種である。例えば、SUS316L 相当材としては ASTM で規定された UNS S32304 (JIS SUS323L : 23Cr-4Ni-0.1N)¹⁾、SUS304 相当材としては同じく UNS S32101 (21Cr-1.5Ni-5Mn-0.22N)²⁾ 等がある。これら省合金二相ステンレス鋼については、特に 2004 年頃からの合金高騰のもとで、オーステナイト系ステンレス鋼より低 Ni, Mo であることから相対的に割安になったことをきっかけに、世界のステンレスメーカーが種々の鋼種を開発した。しかし、省合金二相ステンレス鋼のうち特に SUS304 代替鋼では、二相ステンレス鋼の課題である溶接熱影響部の耐食性低下が特に大入熱の溶接の場合に非常に顕著となること、製造が難しく製造コストが上昇するため合金コスト低減分が相殺される等の課題があり、実際の適用は少ないレベルにとどまっていた。

2.2 二相ステンレス鋼における溶接熱影響部特性低下メカニズム

二相ステンレス鋼において N は、PREN の向上、オーステナイト相の安定化、強度向上等のために積極的に添加される重要な元素である。特に、後述の通り、溶接部のオーステナイト相を確保するために非常に有効であり、現在、ほとんどの鋼種で添加されている。更に、安価な元素であることから、省合金型では Mo, Ni の一部を代替すべくより積極的に添加されており、SUS304 代替鋼では 0.20% 以上添加されている鋼種が多い。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。

二相ステンレス鋼の溶接熱影響部の特性低下は一般に以下に示すような機構で起こる³⁾。N はオーステナイト相には多く固溶するが、フェライト相には常温ではごく少量しか固溶できない。二相ステンレス鋼の母材では N はほとんどがオーステナイト相中に分配している。一方、二相ステンレス鋼は融点近傍の高温ではオーステナイト相が消失し

フェライト単相になる。従って溶接が行われると、溶接熱影響部のうち溶融線近傍ではオーステナイト相が消失または減少し、それに伴い N はフェライト相に多量に固溶する。溶接後の冷却は急冷となるから、オーステナイト相は再析出するものの元の量まで戻らないため、フェライト相中に N が過飽和の状態で残り、N の固溶限が低下する約 900℃ 以下で Cr 窒化物として析出し、それによって韌性或耐食性の低下を引き起こす。

2.3 省合金二相ステンレス鋼従来鋼の課題

この課題に対する対策として従来行われてきたのは、N を多く添加することで、オーステナイト相の再析出を速め、これに N を吸収させることによりフェライト相中の過飽和 N 量を低下させ窒化物の析出を抑制させるという一見パラドックス的な方法である⁴⁾。N は他のオーステナイト安定化元素より拡散速度が圧倒的に大きいため、急冷でも N だけは移動してオーステナイト相を形成することができる。

この方法は SUS329J3L 等の従来型では効果を発揮し、溶接部の耐食性低下は大きくはなかった。しかしながら、SUS304 代替鋼 S32101 の場合、従来の二相ステンレス鋼より更に N を多く添加していることに加え、Ni の節減により N の固溶限自体が低下するため、Cr 窒化物がより析出しやすくなっている。結果、適正溶接入熱の上限が 1.5～2MJ/m (15～20kJ/cm) 程度とされており⁵⁾、SUS329J3L の 2.5～3.5MJ/m (25～35kJ/cm) より低い。構造用材では数～数十 mm 厚の厚板を何か所も溶接する必要があり、パス数の増大につながる低入熱溶接は作業性を損なうと言える。

3. 構造用素材として優れた特性を有する省合金二相ステンレス鋼 NSSC 2120 の開発

3.1 成分設計

上記課題に対し、NSSC 2120 では二つの新たな考え方を導入することにより、溶接入熱の上限を大幅に拡大しうる新たな省合金二相ステンレス鋼を実現した。第一に、溶接熱影響部の Cr 窒化物低減対策として、前述の N 増量によるオーステナイト相再析出促進に代えて、オーステナイト再析出量は確保しつつ Cr 窒化物の析出駆動力そのものを抑制する二本立てとしたこと、第二に、Cr 窒化物析出駆動力の指標として、鋼の成分を用いて状態図計算で求める Cr₂N 析出開始温度を導入したことである。

図 1⁶⁾ に S32101 の溶接部に塩化第二鉄浸漬試験を行い、生じた孔食の発生位置を観察した結果を示す。SUS329J3L 等では、溶加材を使用して溶接した場合、溶接熱影響部のうち溶融線の最近傍で最も耐食性が低下する。この位置は、融点直下のフェライト単相温度域に一旦加熱され、N がフェライト相に全て固溶し、更にオーステナイト相再析出量も最も少なくなることから、Cr 窒化物が最も多く析出する位置である。それに対し S32101 では、より外側の、フェライ

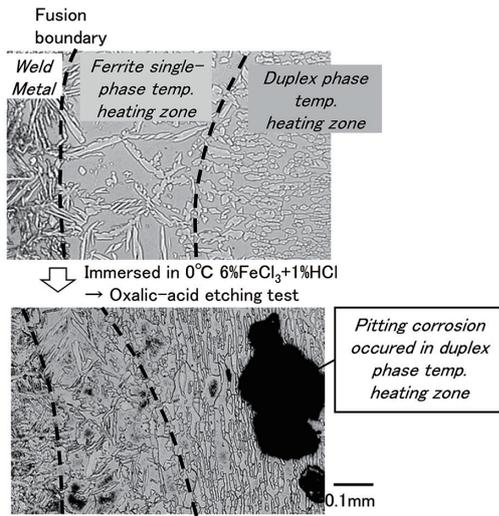


図1 省合金二相ステンレス鋼における溶接部孔食発生位置の特徴 (S32101)⁶⁾

Characteristics about position of pitting corrosion of lean duplex stainless steel weld (S32101)⁶⁾

ト単相化していない領域に優先的に孔食が発生した。その機構を明確化するために、最高加熱温度を変化させた再現熱サイクル試験を行ったサンプルにシュウ酸エッチング試験を行い金属組織を観察し、更に析出物を抽出レプリカ法にて採取し、透過電子顕微鏡 (TEM) にて観察した結果を図2⁷⁾に示す。フェライト単相温度域の1360℃まで加熱したサンプルではフェライト/フェライト粒界がほとんど存在せず、析出物は粒内析出したCr₂N、CrNが主体であったのに対し、フェライト単相とならない(以下、二相温度域と記載)1250℃まで加熱したサンプルでは多数存在するフェライト/フェライト粒界に溝状の侵食が見られ、当該位置にはフィルム状のCr₂Nが析出していた。

これは、フェライト単相温度域加熱では、冷却時にフェライト粒界からオーステナイト相が再析出するため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、フェライト中のNがオーステナイト析出に消費され欠乏することから粒界にCr窒化物は析出せず、フェライト粒内のみ微細析出するのに対し、二相温度域加熱では当初より存在しているフェライト/フェライト粒界にCr窒化物がフィルム状に析出し、結果、生じるCr欠乏層のサイズがより大きくなることが影響したものと推定される。二相温度域加熱では母材にあったオーステナイト相が残存しており、N添加によるオーステナイト再析出量促進は関係ない。この領域でCr窒化物の析出を抑制するには析出駆動力そのものを抑制する必要がある。

Cr窒化物の析出駆動力削減については、N量の低減が有効であるが、前述の通りNはオーステナイト相を再析出させるために重要な元素であり、無添加にはできない。また、窒化物析出駆動力はNだけでなく他の元素との相互作用やオーステナイト相率も影響する。そこで、本開発ではその指標として、熱力学計算ソフトウェア Thermo-Calc[®]によ

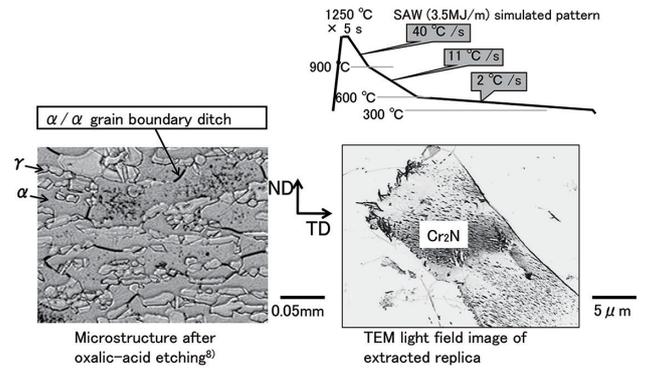


図2 省合金二相ステンレス鋼 (S32101) 再現熱サイクル材の組織とレプリカ-TEM観察結果⁷⁾

Microstructure & TEM image of extracted replica of HAZ simulated heat cycle tested sample of lean duplex stainless steel (S32101)⁷⁾

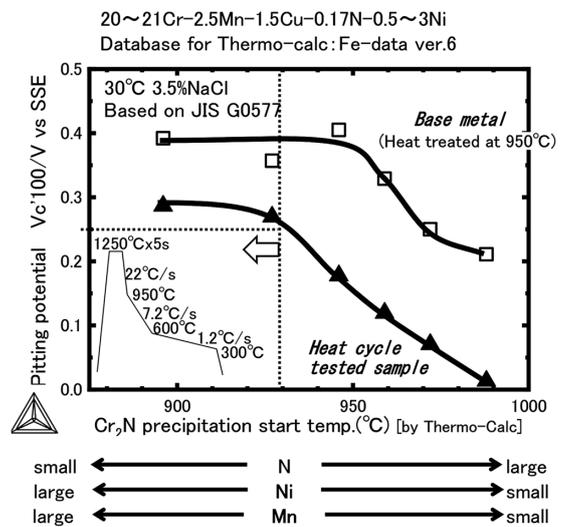


図3 母材と再現熱サイクル材の孔食電位に及ぼすCr₂N析出開始温度の影響⁷⁾

Effect of Cr₂N precipitation start temp. on pitting potential of base metal & heat cycle tested sample⁷⁾

る状態図計算を活用し、平衡的にCr窒化物が析出する上限温度であるCr₂N析出開始温度を求め、これを低減することとした。図3⁷⁾に母材と再現熱サイクル試験材の孔食電位に及ぼすCr₂N析出開始温度の影響を示す。当温度が低いほど耐食性の低下を抑制できていることが判る。一方、オーステナイト再析出量については、N以外のオーステナイト安定化元素であるNi、Mn、Cu量を調整し、母材のフェライト量をより低減する(50%未満狙い)ことにより、N量を若干低めに抑制しても溶接部のオーステナイト量を十分確保できることを確認した。Cr₂N析出開始温度の導入により、Cr窒化物析出駆動力、オーステナイト再析出特性に加え、製造性や合金コスト等も考え合わせた多次元で成分を最適化することが可能となり、結果、NSSC 2120の成分の導出に至った。

3.2 特性評価結果

表1にNSSC 2120の成分例を示す。また、図4に引張

表 1 各鋼種の化学成分例
Example of chemical composition of steels

Steel		C	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	PREN	Estimated ferrite amount (%)	Cr ₂ N precipitation start temp. (°C)*
Developed steel	NSSC 2120	0.03	3.2	20.9	2.3	0.5	1.1	0.17	25	46	910
	NSSC 2351	0.02	1.3	23.6	5.2	1.3	0.3	0.17	30	53	923
Duplex stainless steel (Comparative)	S32101	0.02	5.0	21.6	1.6	0.3	0.3	0.21	26	55	929
	SUS323L	0.02	1.6	23.6	4.0	0.3	0.2	0.14	27	63	912
	SUS329J1	0.01	0.3	24.4	4.6	1.8	0.1	0.12	32	78	951
	SUS329J3L	0.01	1.8	22.6	5.8	3.1	0.2	0.16	35	54	963
Austenitic stainless steel (Comparative)	SUS304	0.05	0.9	18.1	8.1	0.2	0.3	0.05	20	-	-
	SUS316L	0.01	0.9	17.6	12.2	2.1	0.2	0.03	25	-	-

PREN: Pitting Resistance Equivalent Number Cr+3.3Mo+16N * Calculated by Thermo-calc/Fe-Data ver.6

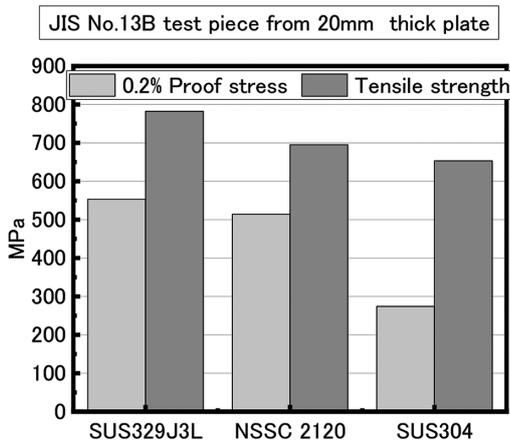


図 4 NSSC 2120 と各鋼種の厚板の引張強度例
Example of tensile strength of NSSC 2120 and other stainless steel plates

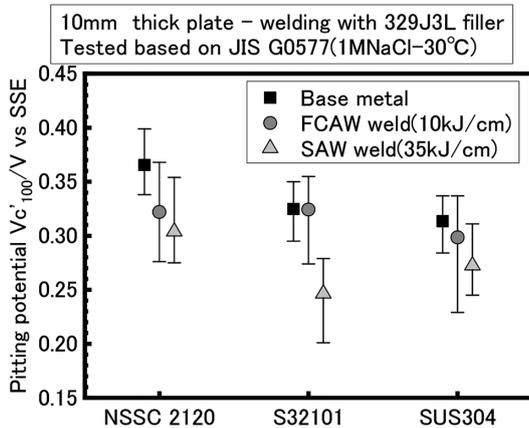


図 5 NSSC 2120 と各鋼種の母材，溶接部孔食電位⁶⁾
Pitting potential of base metal & weldings of NSSC 2120 and other steels⁶⁾

試験結果を示す。NSSC 2120 の 0.2%耐力は SUS304 の約 2 倍である。更に図 5 に NSSC 2120 の母材，フラックスワイヤを用いたマグ溶接 (FCAW) 継手および S32101 の推奨入熱量上限を超えた 35kJ/cm のサブマージアーク溶接 (SAW) 継手の孔食電位測定結果を S32101, SUS304 と比較して示す⁶⁾。NSSC 2120 は溶接部も含め、SUS304 以上の耐食性が得られている。

以上、NSSC 2120 は溶接部も含め SUS304 並み以上の耐食性を有し、かつ高強度の材料であることが明確になった。

4. NSSC 2120による新たなステンレス鋼市場の開拓

以上のように、NSSC 2120 は SUS304 より Ni 含有量が少なく、更に高強度のため薄肉化が可能であることから、二重の意味で省資源であり、更に軽量化も実現できる優れた材料である。近年我が国では様々な自然災害が相次ぎ、これに備えた社会資本の充実が求められている。本鋼はこれらインフラ向け構造材として好適な素材と考えられた。

しかしながら一般的には、ステンレス鋼はメンテナンスコストを極小にできライフサイクルコストの優位性はあるものの、初期投資が大きいとされ、当該用途向けに使用されることは少ない。また公共性の高い分野であるため、JIS 規格鋼種が使用されることが基本であり、新しい鋼種が採用されるのは困難だと思われていた。

これに対し、以下の二つの取り組みを行った。一つには、国土交通省が運営する、新技術を広く公開し活用を促進していくための情報提供システム NETIS にステンレス鋼材として初めて登録を行ったことである。もう一つは NSSC 2120 を使用した際の構造計算を材料メーカー自らがを行い、その優位性を具体的に示したことである。表 2 は、ある水門を NSSC 2120 で建設したと仮定した際のコストを試算し炭素鋼、SUS304 と比較したものである⁹⁾。NSSC 2120 は炭素鋼と比べライフサイクルコストで優位であるが、更に板厚を薄くできることから、建設コストでも炭素鋼と大きく変わらないことが判る。更に、軽量化により水門を開閉させるモーター等の負荷も低減する。

これらの取り組みの結果、現在では NSSC 2120 をはじめとする二相ステンレス鋼は、土木分野で炭素鋼や Al 合金と比べても競争力のある素材と認知され、全国のインフラ施設等で採用の動きが広がっており、更に橋梁や文化財保存用構造物等への適用も始まっている。NSSC 2120 の適用例を図 6 に示す。

表 2 水門の建設コストとライフサイクルコスト試算結果
Estimation of construction cost and life cycle cost of a water gate

	Carbon steel (SM490)	SUS304	NSSC 2120
7×7.8m 54.6m ²			
Thickness/mm	12-16	14	9-12
Construction cost	1 (Standard)	1.2	1.02
Life cycle cost	1.14	1.2	1.02

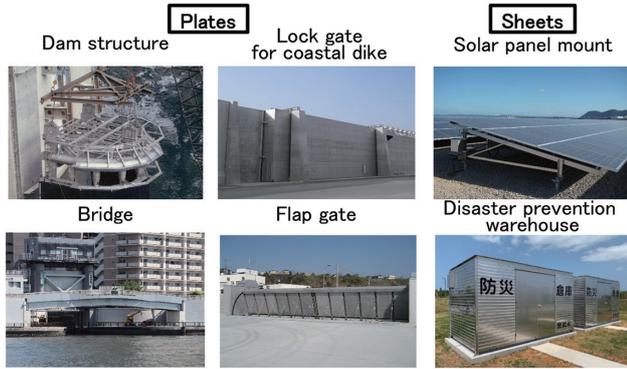


図 6 NSSC 2120 の適用例
Application examples of NSSC 2120

なお、NSSC 2120 は 2015 年に JIS に登録された (SUS 821L1)。また、当該開発は、第 6 回ものづくり日本大賞 経済産業大臣賞 (2015) および第 39 回日本金属学会 技術開発賞 (2016) を受賞した。

5. 汽水環境等に適用可能な二相ステンレス鋼 NSSC 2351 の開発

5.1 SUS316L 代替二相ステンレス鋼の課題と新鋼種のコンセプト

NSSC 2120 は SUS304 代替鋼であり、淡水向けや常時水没しない陸閘門等へ使用される。汽水環境水門等のより高い耐孔食性を必要とする用途へは、SUS316L 代替の二相ステンレス鋼として 1980 年代半ばに開発された SUS323L が適用されている。但し、SUS323L は、海水レベルに近い量の塩化物を含むような過酷な環境では、溶接部の耐食性が SUS316L を下回る場合がある。一方、上位鋼種の SUS329J3L は高合金コストである。そこで、溶接部を含む耐食性が SUS316L 並み以上で、合金コストは SUS329J3L や SUS316L を下回る二相ステンレス鋼の開発を開始した。

二相ステンレス鋼の JIS 規格の一つに SUS329J1 (23~28%Cr, 3~6%Ni, 1~3%Mo, ≤1.5%Mn) がある。当該規格鋼は PREN が SUS323L を上回り、SUS329J3L よりは合金コストが低いことから、今回のコンセプトに見合う成分系であるが、一般に溶接性に課題がある鋼種とみなされており、溶接を含まない鍛造品等に限定適用されている。そこで、SUS329J1 成分系をベースとして溶接性の課題を克服した新 SUS329J1 鋼を開発することとした。

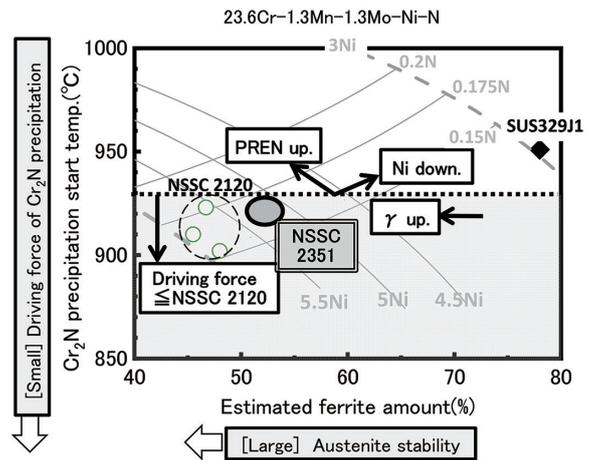


図 7 フェライト量推定値と Cr₂N 析出開始温度の当量線マップによる NSSC 2351 の適正成分導出
Derivation of appropriate component of NSSC 2351 by equivalent line map of estimated ferrite amount and Cr₂N precipitation start temperature

5.2 成分設計

SUS329J1 の成分には N 量が規定されておらず、溶接性の課題は、低 N のため溶接熱影響部へのオーステナイト相再析出量が少ないことが原因である。そこで N の添加を前提としつつ、更に NSSC 2120 の成分設計の考え方である、① Cr 窒化物の析出駆動力を Cr₂N 析出開始温度で制御すること、② 母材のフェライト量低減により溶接部のオーステナイト再析出量を確保することの二点を同様に適用することとした。SUS329J1 の規格範囲よりまず Cr, Mo を下限近傍, Mn を上限近傍とした 23.6Cr-1.3Mn-1.3Mo を設定し, Ni と N の最適値を求めるために、成分より計算できるフェライト量推定値 (X 軸) と Cr₂N 析出開始温度 (Y 軸) の等量線マップを作製した (図 7)。これから、a) Cr₂N 析出開始温度は NSSC 2120 並み以下となる範囲で、b) PREN が最大、c) Ni が最小、d) オーステナイト量が最大となる Ni, N を最適値とし、結果、23.6%Cr-5.2%Ni-1.3%Mo-0.17%N を導出した。またマイクロアロイング技術を導入して溶接時の Cr 窒化物析出を更に抑制する施策を行い、成分を確定させた。

5.3 既存 SUS329J1 および SUS316L, SUS323L との特性比較

表 1 (前掲) に、NSSC 2351 の成分例を、既存の SUS329J1 と比較して示す。NSSC 2351 は PREN が 30 以上となり、母材耐孔食性が SUS316L より良好である一方、合金コストは SUS316L を上回らない。まず本鋼と既存 SUS329J1 の 2mm 厚 冷間圧延焼鈍板を用い、溶接棒を用いずにビードオン、225A-10V-50cm/min (入熱 3kJ/cm) の条件で TIG 溶接を行い、溶接線を含む断面を切出してシュウ酸電解エッチング後、組織観察を行った。図 8 に溶接金属中心部の組織を示す。既存 SUS329J1 鋼では溶接金属の大部分が粗大

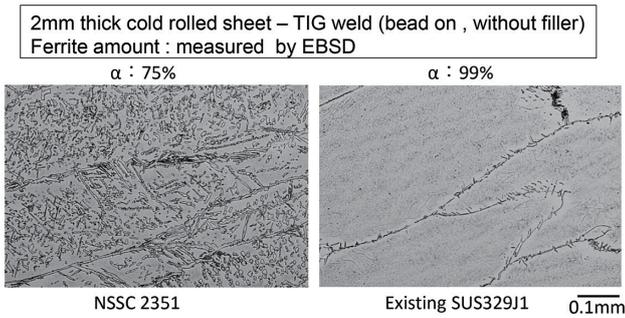


図8 ノンフィラー TIG 溶接金属の組織比較 (3kJ/cm)
Comparison microstructure of TIG weld metal without filler (3kJ/cm)

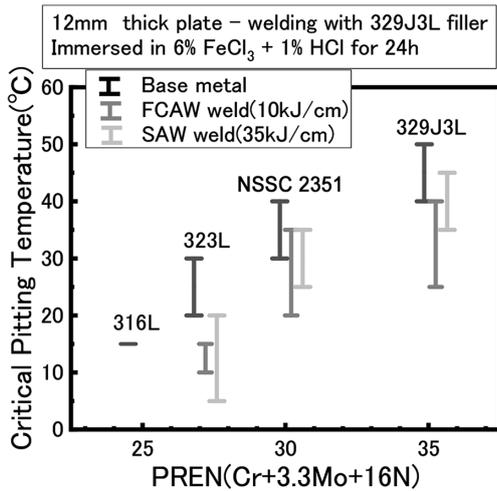


図9 母材と溶接部の塩化第二鉄 CPT¹⁰⁾
Critical pitting temperature of base metals & weldings by ferric chloride immersion test¹⁰⁾

なフェライト相で、オーステナイト相はフェライト粒界に極薄く析出したのみなのに対し、NSSC 2351 ではフェライト粒内に多量の微細なオーステナイト相が析出した。

次に、NSSC 2351, SUS323L, SUS329J3L, SUS316L の 12mm 厚 熱間圧延焼鈍板を用い、SUS329J3L 系溶接棒を用いて 200A-30V-35cm/min (入熱 10kJ/cm) の条件で三層の FCAW 溶接と 550A-32V-30cm/min (入熱 35kJ/cm) の条件で二層の SAW 溶接とを行い、表層から複数の試験片を採取して 6%FeCl₃+1%HCl 中で 24 時間の浸漬試験を行い、孔食が発生する最低温度 / CPT (臨界孔食発生温度) を求めた。図 9¹⁰⁾ に各鋼種の PREN と母材、溶接部の CPT 測定結果との関係を示す。SUS323L では溶接部の耐食性が SUS316L 母材を下回っているのに対し、NSSC 2351 では溶接部も含めて SUS316L 母材より高い耐食性を示した。

このように、NSSC 2351 は従来 SUS316L が用いられている臨海部の水門などのインフラ設備や、食品・薬品タンク類などへ適用可能で、かつ高強度、省資源の特長を持った二相ステンレス鋼となっている。

6. 結 言

以上のように、SUS304, SUS316L を代替可能な省合金独自二相ステンレス鋼 NSSC 2120, NSSC 2351 シリーズを開発した。高強度、省資源という高付加価値を持った戦略商品を創出し、更にこれを用いて高次元のソリューション拡販によりステンレス鋼の新たな大きな市場を生み出しつつある。製造コスト、生産性の課題についても、的確な設備投資と地道なソフト的改良を組み合わせ、汎用ステンレス鋼レベルの高生産性製造工程を実現している。

本報では厚板構造材用途への適用に関して主に述べたが、薄板用途についても、その高強度、軽量化、省資源のメリットを生かし、SUS304 や SUS316L の代替材として広く使われつつあり、さらなる用途拡大が期待される。

参照文献

- 1) Berhardsson, S: Duplex Stainless Steels '91, 1991, p.137
- 2) Johansson, P. et al.: 4th European Stainless Steel Science and Market Congress, Vol.2, 2002, p.153
- 3) 幸英昭 ほか：住友金属. 42, 272 (1990)
- 4) Blom, K.J.: Proc. Int. Conf. Stainless Steels '87, 1987, York
- 5) Holmberg, B. et al.: Duplex 2007 International Conference & Expo., 2007, Grado
- 6) 及川雄介 ほか：まてりあ. 55, 70 (2016)
- 7) 及川雄介 ほか：溶接学会誌. 82, 435 (2013)
- 8) 及川雄介 ほか：材料とプロセス. 25, 1183 (2012)
- 9) 遠藤義彦 ほか：電力土木. 385, 14 (2016)
- 10) 及川雄介 ほか：材料とプロセス. 33, 227 (2020)



及川雄介 Yusuke OIKAWA
日鉄ステンレス(株)
研究センター 厚板・棒線材料研究部
主幹研究員
山口県光市島田3434 〒743-8550



柘植信二 Shinji TSUGE
日鉄ステンレス(株)
研究センター シニアフェロー



江目文則 Fuminori GOHNAME
日鉄ステンレス(株)
商品開発部 厚板商品開発Gr
上席主幹(部長)