

特集記事・8

希少金属資源と省合金型鉄鋼材料開発の今

省資源型ステンレス鋼の開発と適用

Development and Applications of Resource Saving Stainless Steels

梶村治彦

Haruhiko Kajimura

新日鐵住金ステンレス(株)

研究センター

リサーチフェロー

はじめに

ステンレス鋼はCrを10.5%以上含むFe基の合金である¹⁾。1912年に今日のSUS304の原型となる特許がドイツで提出されて以降、耐食性を始め各種の性能向上研究が精力的になされてきた²⁾。

ステンレス鋼は図1に示すように、金属組織の点からフェライト系、マルテンサイト系、オーステナイト系、オーステナイト・フェライト系(二相系)、析出硬化系の5種類に分類されている。その開発過程で耐食性を始め、耐酸化性、機械的性質、溶接性、切削性など、要求される特性に応じて図2に示すような非常に多くの元素が使用されている³⁾。これらの

元素の多くは国家戦略上レアメタルとして指定されており、ステンレス鋼の主要元素であるCr、Ni、Moのいずれもがレアメタルの指定を受けている⁴⁾。ステンレス鋼はこれらのレアメタルの価格変動の影響を歴史的に何度も受けてきた。近年では2007年前後におけるNi、Moの高騰があった³⁾。これまでステンレス鋼で使用されるレアメタルの削減、特にオーステナイト系ステンレス鋼に添加されているNiや、耐食性や高温強度の点から添加されているMoなど、原料価格が高くかつ使用量が多い元素の削減が検討されてきた。

世界のステンレス鋼生産量は図3に示すように、21世紀初頭には19.1Mt(2001年)であったが現在ではその2.2倍の41.7Mt(2014年)と大幅な増加となっている⁵⁾。この増加のほとんどが中国における生産拡大の影響であるが、ステンレス鋼に必要な鉱物資源消費量が急伸していることには変わりはなく、レアメタルを多く使用しているステンレス鋼においては特に省資源化が求められる所以である。このように生産量が急増する中、オーステナイト系ステンレス鋼(300系+200系)の割合は依然として70%を超えているが、その中

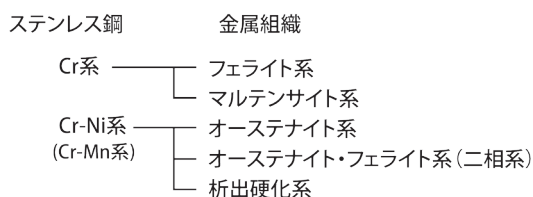


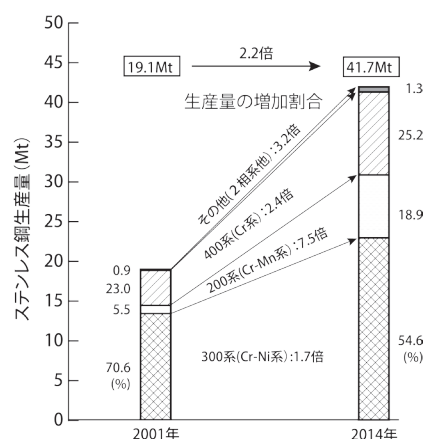
図1 ステンレス鋼の金属組織による分類

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

太字:ステンレス鋼に使用されている元素

太字:ステンレス鋼に使用されている元素
斜体文字:レアメタルとして定義されている元素

*1 ランタノイド: 57 La, 58 Ce, 59 Pr, 60 Nd, 61 Pm, 62 Sm, 63 Eu, 64 Gd, 65 Tb, 66 Dy, 67 Ho, 68 Er, 69 Tm, 70 Yb, 71 Lu

図2 ステンレス鋼に使用されている元素とレアメタル³⁾図3 世界のステンレス鋼生産量と鋼種別推移 (ISSF統計資料⁵⁾より作成)

でもCr-Mn系(200系)の増加が著しい。また、Cr-Ni系(300系)に比べるとフェライト系(400系)や二相系を含むその他鋼種の増加の方が大きく世界的にみてNi使用量を削減する方向に進んでいることを示している。

本稿では、ステンレス鋼における省資源化の考え方とその開発経緯を概説するとともに、最近開発された省資源型ステンレス鋼の特徴やその適用先などについて述べたい。なお、耐食材料としての省資源型ステンレス鋼とその特性の詳細については別報³⁾を参照していただきたい。

2 省資源化の考え方

省資源化に寄与するステンレス鋼の開発やその目標とする点をまず述べたい。合金中の単純な元素添加量削減だけでなく、高性能化や長寿命化に寄与する開発も省資源、すなわち世界的な鉱物資源枯渇への対応につながる。なお、次に述べる項目はそれぞれ相互に関係していることを念頭に合金開発が進められている。

(1) 合金元素量を低減したステンレス鋼開発

これはまさしく言葉通りNiなどのレアメタル削減に相当するステンレス鋼の開発である。ステンレス鋼の生産量の大部分を占めるのが300系と称されるSUS304(18Cr-8Ni)に代表されるCr-Ni系のオーステナイト系ステンレス鋼である。図4に元素添加量と組織の関係を表したシェフラー状態図を示す。Cr、Ni、Moなどの合金元素の添加量によりその組織がオーステナイト相になるのかフェライト相になるのかマルテンサイト相になるのかを示したのがシェフラー状態図である。図中にはJISに規格化されているステンレス鋼(オーステナイト系、二相系、フェライト系)のおおまかな範囲を示している。

原料価格の高いNiの削減を単純に進めていくと、Ni当量が下がり必然的に二相系ステンレス鋼、フェライト系ステン

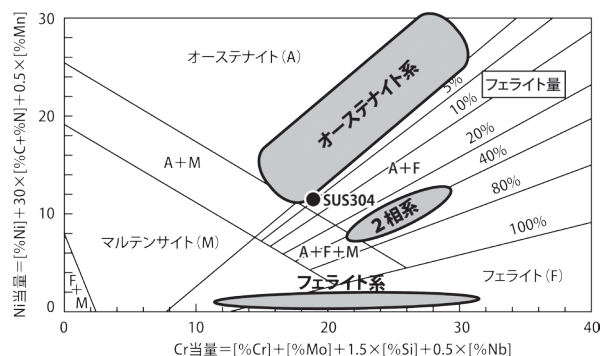


図4 シェフラー状態図と各種ステンレス鋼の範囲³⁾
(Ni当量へDeLongによるN換算式を追加)

レス鋼と金属組織そのものが変化してくる。また、NiをMnなどのオーステナイト相形成元素で代替するという方法もこの中に含む。

(2) 上位鋼種からのグレードダウン可能な高性能ステンレス鋼開発

これは耐食性、加工性や強度などを確保するために合金添加量が多かった鋼種を、従来特性が劣っていた下位鋼種の添加元素を工夫したり、製造方法を工夫することにより上位鋼種と同等の性能を確保することである。同等性能を確保することにより必要としていた合金元素量の削減につながる。

(3) 材料使用量低減可能な高強度ステンレス鋼開発

前項と似ているが耐食性等は同等の性能を維持したまま高強度化を図ろうとする材料開発である。高強度化の達成により、構造物ステンレス鋼などでは薄肉化などにより最終的な使用量そのものを削減することができ、省資源化へ寄与できるという考え方である。

3 省資源型ステンレス鋼の開発

3.1 オーステナイト系ステンレス鋼

オーステナイト系ステンレス鋼ではオーステナイト相を確保するためNiの添加が必要であり、この高価なNiを削減するのがオーステナイト系ステンレス鋼の中での省資源化として称されている。Niの代わりに同じオーステナイト形成元素であるMnを活用したものに、Cr-Mn系ステンレス鋼(200系)があり、図3に示したようにその生産量の増加は著しい。ただし、シェフラー状態図のNi当量式から言えるようにMnのオーステナイト相形成能はNiの1/2であり、Mnの添加量は必然的に多くなる。高Mn鋼の規格としては、米国で1955年に登録されたAISI 201(17Cr-4.5Ni-6.5Mn)やAISI 202(18Cr-5Ni-9Mn)が最初である。これらのステンレス鋼の特性として、機械的性質については伸びがSUS304より若干小さいが強度はSUS304以上、耐食性はSUS304よりは劣りSUS430との中間を示すとされる⁶⁾。図5に耐食性(耐孔食性)に対するMn添加量の影響を示すが、Mn添加量の増加により耐食性の低下が起こることに注意しなければならない⁷⁾。

日本においても上記鋼種に対応するSUS201とSUS202がJIS登録されたが、現在は鋼板、鋼帯は廃止され線材および棒材にのみ規定されているだけである。なお、ASTMには数多くの高Mn鋼種が規格化されている。

シェフラー状態図を見てわかるように、Mn以外の強力なオーステナイト相形成元素として、炭素(C)と窒素(N)がある。ステンレス鋼ではCは固溶度が小さく炭化物析出により耐食性を劣化させるが、Cに比べると固溶度が大きいNに

は耐食性向上効果があるとともに強度向上も図れる。資源という点ではNは大気中に存在する元素であり枯渇の懸念はないことから、ステンレス鋼への添加元素としての有効利用が進められてきた⁸⁾。MnはNi代替のオーステナイト相形成元素であると同時にN固溶度を高める元素である。このため、N含有量を極限まで高めるため高Mn化が検討されてきた。図6に示すように、N添加方法として加圧溶解設備[加圧ESR (Electro Slag Remelting)]が実用化されたこともあり、Mn-Cr系では極めて高いN添加鋼まで開発されている⁸⁾。

3.2 二相系ステンレス鋼

図4に示したようにオーステナイト相形成元素であるNiを低減していくと、もはやオーステナイト相は維持できずオーステナイト相とフェライト相の混在する組織となる。これが二相系ステンレス鋼である。オーステナイト系ステンレス鋼の中でのNi削減に比べて二相系ステンレス鋼にすると大幅にNi添加量を低減することが可能である。また、MnやNを有効に活用することによりさらなるNiの低減も可能である。

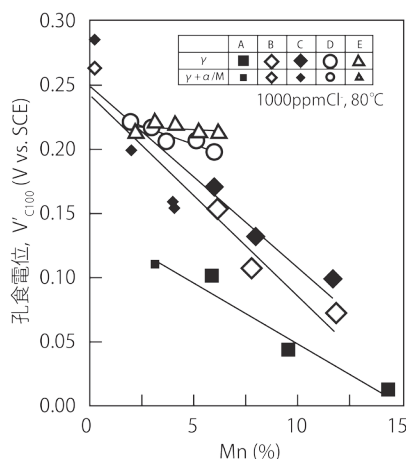


図5 高Mn系オーステナイト鋼の孔食電位に及ぼすMnの影響⁷⁾

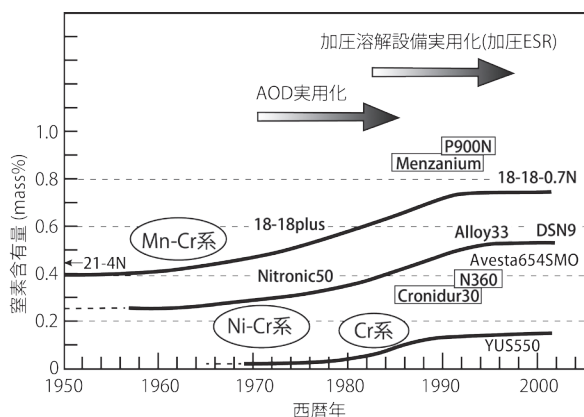


図6 窒素利用鋼の窒素レベルの推移および代表鋼種⁸⁾

図7に示すように、二相系ステンレス鋼には汎用二相系ステンレス鋼以外にスーパー二相系ステンレス鋼、リーン二相系ステンレス鋼の3種類がある。耐孔食指数を示すPRE (Pitting Resistance Equivalent) を基に分類されている。PRE<30の二相系ステンレス鋼をリーン、30≤PRE<40のものを汎用、40≤PREのものをスーパーと称している。なお、一般的には $PRE = (\%Cr) + 3.3 (\%Mo) + 16 (\%N)$ で与えられるが、Wを考慮した $PRE_W = (\%Cr) + 3.3 \{(\%Mo) + 0.5 (\%W)\} + 16 (\%N)$ や、W,Mnを考慮した $PRE_{W,Mn} = (\%Cr) + 3.3 \{(\%Mo) + 0.5 (\%W)\} + 16 (\%N) - (\%Mn)$ も使用される³⁾。オーステナイト系ステンレス鋼の項で示したように、Mnは耐食性を劣化させるためMnを活用しているリーン二相系ステンレス鋼ではMnのマイナス効果を考慮することが必要である。

二相系ステンレス鋼の代表的な鋼種を表1に示す。従来JIS規格に登録されていたのは汎用二相系ステンレス鋼であり、SUS304やSUS316の上位鋼種としての位置付けであった。省資源化の流れを受けて、図7に示したようにスーパーオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS312L: 20Cr-18Ni-6Mo-0.2N, SUS836L: 22Cr-25Ni-6Mo-0.2N) と同等の耐食性を有しNi量を7%程度まで大幅に削減し、Mo量も削減したスー

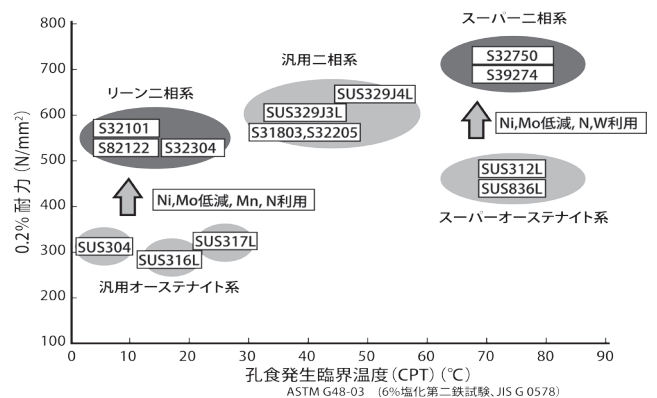


図7 二相系ステンレス鋼の耐食性と強度の関係

表1 代表的二相系ステンレス鋼の化学成分とPRE

分類	ASTM UNS番号	JIS	Cr	Ni	Mo	Mn	N	Cu	W	PRE _{W,Mn}
リーン二相系 (Lean DSS)	S32001		21	2	0.3	5	0.15	0.3		19.4
	S32101		21	1.5	0.3	5	0.21	0.3		20.4
	S82122	SUS821L1*	21	2	0.3	3	0.18	1		21.9
	S32304	SUS323L*	23	4	0.3	1	0.15	0.3		25.4
汎用二相系 (Standard DSS)	S32900	SUS329J1	25	4	1.5					30.8
	S31803	SUS329J3L	22	5.5	3		0.14			34.1
	S32205	SUS329J3L	23	5.5	3.2		0.18			36.4
	S31260	SUS329J4L	25	7	3		0.15	0.5	0.3	37.8
スーパー二相系 (Super DSS)	S32750	SUS327L1*	25	7	4		0.28	0.2		42.7
	S32760		25	7	3.5		0.25	0.7	0.7	41.7
	S39274		25	7	3		0.28	0.5	2	42.7

*:2015年JIS 制定

PRE_{W,Mn}:Cr+3.3(Mo+0.5W)+16N-Mn

パー二相系ステンレス鋼が開発されている。また、近年特に注目されているのはSUS304などの汎用オーステナイト鋼種と同等の耐食性を有するリーン二相系ステンレス鋼である。表1には代表的な鋼種のみを示したが、これ以外にも多くの鋼種が開発されている。特徴はNi量を2%程度まで低減し、MnとNを活用していることである。これらの鋼種では、厚板を始め薄板や線材などもすでに製造可能となっており⁹⁾、幅広い分野での利用がなされつつある。

二相系ステンレス鋼ではNiやMoなど合金元素の低減に加え、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて強度が非常に高いことが特徴として挙げられる。図7には耐食性ととも強度レベルを示しているが、二相系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼と同等の耐食性を有しながらも高強度化による材料使用削減も可能となり単なる合金元素削減に留まらない省資源化が達成できる新しいステンレス鋼として注目される。

3.3 フェライト系ステンレス鋼

Niをほとんど含まないフェライト系ステンレス鋼は、省資源型ステンレス鋼として究極のステンレス鋼と言っても過言ではない。炭化物が生成する温度域におけるフェライト系ステンレス鋼のC固溶度がオーステナイト系ステンレス鋼に比べて2桁程度小さく、溶接などで熱影響を受けると炭化物析出が避けられなかった。1970年代にAOD (Argon Oxygen Decarburization) やVOD (Vacuum Oxygen Decarburization) などの精錬技術の導入が進みC量の低減が可能となった。さらに、TiやNbなどの添加による固溶C量低減が行われ高純度フェライト系ステンレス鋼と呼ばれる耐食性の高い材料開発が進んだ。表2に現在JISで規格化されている高純度フェライト系ステンレス鋼を示す³⁾。Cr量およびMo量により便宜上3分類しているが、CuやNiの微量添加により耐食性を高めたSUS430J1LやSUS443J1は汎用オーステナイト系ステンレス鋼のSUS304とほぼ同等耐食性能を

表2 高純度フェライト系ステンレス鋼³⁾

SUS	Cr	Mo	Cu	Ti,Nb,Zr
410L	13	-	-	-
430LX	18	-	-	0.1~1.0 *
430J1L	18	-	0.5	8(C+N)~0.8
443J1	21	-	0.5	8(C+N)~0.8
436J1L	18	0.5	-	8(C+N)~0.8
436L	18	1	-	8(C+N)~0.8
444	19	2	-	8(C+N)~0.8
445J1	22	1	-	-
445J2	22	2	-	-
XM27	26	1	-	-
447J1	30	2	-	-

XM27,447J1以外 : Ni<0.60%
XM27,447J1 : Ni<0.50%, Cu<0.20%, (Ni+Cu)<0.50%
*: Ti または Nb

有していることから、SUS304を代替する省資源型ステンレス鋼としての位置付けである。

このようにオーステナイト系ステンレス鋼のNiを極限まで低減したものがフェライト系ステンレス鋼であるが、近年ステンレス鋼に必須と考えられてきたCrをも低減するステンレス鋼が開発されている¹⁰⁾。0.1%程度の微量Sn添加による活性溶解抑制、不動態化促進を利用したものであり、図8に示すように耐食性を確保しながらSUS430LX (17Cr) に対してCr量を削減した14Cr-Sn鋼、SUS430J1L (19Cr) に対してCr量を削減した14Cr-Sn鋼、SUS430J1L (19Cr) に対しては16Cr-Sn鋼が開発されている¹¹⁾。

3.4 新しい省資源型ステンレス鋼の開発と適用状況

このようにNiやMoの低減による省資源型ステンレス鋼の開発が活発になされてきており、汎用オーステナイト鋼の代替としてのフェライト系ステンレス鋼はすでに家庭電化製品、業務用冷蔵庫を始めシンクや鍋などの厨房機器、建築金物などへの適用が進んでいる^{6,9,12)}。

ここでは自動車、建築構造物と社会インフラの分野、さらに今後の新しいエネルギー源として注目されている水素輸送や貯蔵機器などの分野における新しい省資源型ステンレス鋼の開発と適用状況について述べる。

(1) 自動車分野

自動車においてステンレス鋼は排気系部品として多く使われている¹³⁾。この中でエンジン直下におかれるエキゾーストマニホールド (以下エキマニ) はその構造や製作方法からパイプエキマニ、プレスエキマニに大別され、いずれも優れた加工特性、耐酸化性や耐熱疲労特性などが必要とされる。エキマニにはNbによる固溶強化を図ったフェライト系ステンレス鋼SUS429系 (14Cr-1Si-Nb) が多く使用されているが、使用温度域が高くなるとさらにMoにより高温強度を向上させたSUS444系 (19Cr-2Mo-Nb) が用いられてきた。高温強度

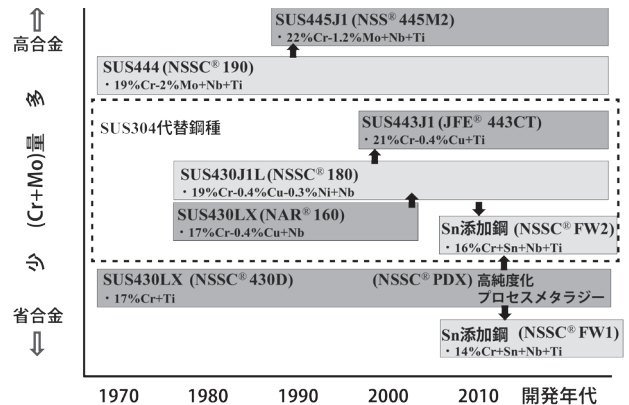


図8 高純度フェライト系ステンレス鋼の開発と合金添加量¹¹⁾

を確保するためMo添加量が2%と多く、加工性低下や価格が高いという問題がありMo添加量の削減要望が大きかった。

高温強度や耐熱疲労特性の観点からMoは必要な元素であるが、これを削減する方法としてCuを添加したエキマニ用材料が開発されている¹⁴⁾。Cu添加鋼はエンジンから排出された高温の排ガスが材料温度を上昇させ、ステンレス鋼中に固溶していたCuがCu粒子として析出し高温強度を上げる析出強化機構を利用したものである。その詳細な強化機構についてはCu粒子と転位の相互作用の観点から検討されている¹⁵⁾。ただし、図9に示すように750℃～800℃では約1%以上のCu添加により高温耐力の増加が著しいが、800℃を超える領域ではその強化量は小さくなってしま¹⁶⁾。また一方で、Cuを1.4%以上添加すると高温とは逆に常温での延性低下が起り材質劣化が著しい。このため、Cuのさらなる添加をせずに微量Mo添加することにより常温の材質劣化がほとんどなくかつ耐熱性を確保した鋼種が開発された¹⁶⁾。図10に示すように実部品に近い薄肉管を使用した熱疲労試験においてMoをほとんど使用しないにもかかわらず900℃の高温まで熱疲労特性が良好なことが確認されている。また、Cu添加に加え微量のAlを添加した材料も開発されている¹⁷⁾。このように新しい強化機構に基づき大幅なMo削減を達成したCu添加エキマニ用フェライト系ステンレス鋼は、自動車分野において大いに活用されている。

(2) 建築構造物、社会インフラ

近年、社会インフラのヴィンテージが約20年となり老朽化が大きな問題となっている¹⁸⁾。建築構造物や社会インフラの分野においても、価格優位性がありかつ耐久性が優れるため維持管理費低減が可能な省資源型ステンレス鋼が注目されている。建築・土木分野においては、構造物鋼としての規格や設計指針などの基準整備が重要である。ステンレス鋼では、

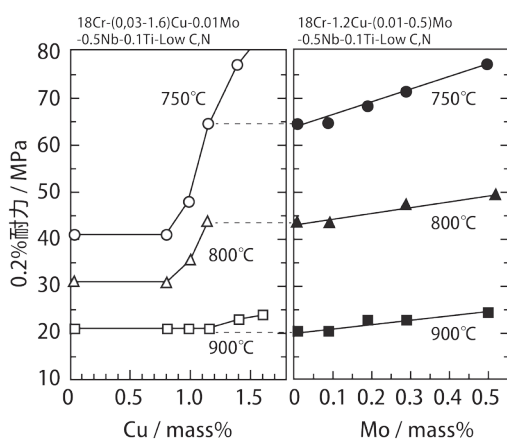


図9 750℃～900℃における0.2%耐力に及ぼすCuおよび微量Moの影響¹⁶⁾

SUS304やSUS316に加えて省資源型ステンレス鋼のSUS410系材料が各分野の規格や設計指針に登録されている¹⁹⁾。特に、厳しい腐食環境に曝される構造物にこのSUS410鉄筋が適用されつつあり、日本海に面する国道の橋架替工事に採用されたことなどが報告されている⁹⁾。海岸に近い箇所では海水のコンクリートへの浸透による鉄筋の腐食、およびそれに伴うコンクリートの損傷や剥離が起こる。このような塩害損傷が懸念される構造物に対してステンレス鉄筋はコンクリート構造物の耐久性を大幅に向上させ、長期的に使用される社会インフラの維持管理費を大幅に低減させることができる^{20,21)}。

二相系ステンレス鋼も日本鋼構造協会の「ステンレス土木構造物設計施工指針案」や国土交通省「新技術情報提供システム (NETIS)」に掲載、登録され今後の実構造物での適用拡大が待たれる⁹⁾。耐食性が高く津波などで塩分濃度が高くなっても腐食しない、軽量化が図れるなどの利点が注目され、ダム、堰、水門などへの適応が進みつつあり東日本大震災復興にも寄与している^{9,22)}。高耐食と高強度を生かして薄肉軽量化が可能など、素材のみならず施工時のコスト削減にも効果を発揮し水道設備などの公共インフラへの適用も進みつつある⁹⁾。都市部における最近の適用例としては、図11に示したように東京駅八重洲の壁面を緑化した換気口施設にSUS329J3Lが採用されている。

(3) 水素輸送、貯蔵分野

新しいエネルギー源として水素の活用が注目されている。特に、燃料電池自動車やそれに関わる水素ステーションの実用化研究が行われており、高圧水素ガスに曝される金属材料の研究が新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) を中心に進められている。鉄鋼材料では水素脆性と呼ばれる材

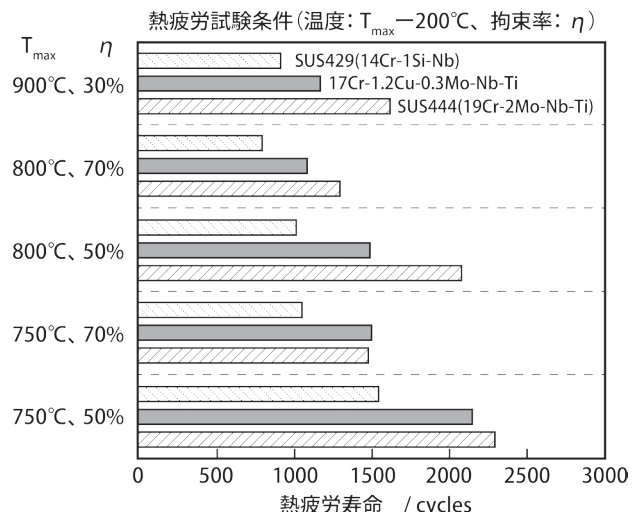


図10 薄肉鋼管の熱疲労特性 (750℃～900℃)¹⁶⁾



図11 二相系ステンレス鋼の構造物への適用例：東京駅八重洲の換気口施設 (写真提供：新日鐵住金ステンレス (株))

料劣化現象があり、そのメカニズム解明や材質劣化の無い材料の研究が精力的に行われている。ステンレス鋼においてはフェライト系やマルテンサイト系では水素脆化が顕著であり、オーステナイト系では起こり難い。このオーステナイト系ステンレス鋼の中でも、SUS316Lのようなオーステナイト相が安定なステンレス鋼が最も水素脆性抵抗性がある²³⁾。SUS316Lでは、レアメタルであるNiやMoの添加量が多くこれら元素の削減や高強度化による薄肉化が種々検討されてきた。例えば、窒素を0.3%添加することにより高压の水素ガス環境下においても耐水素脆性を抑止するためのオーステナイト相安定化と高強度化を両立させ材料使用量の削減、軽量化ができる材料 (22Cr-13Ni-5Mn-2Mo-0.3N) が開発されている^{24,25)}。レアメタルのMoを添加せずSUS304のNi量を増加させたステンレス鋼 (19Cr-13Ni-2Mn-1Si)²⁶⁾ や、低Cr化省Ni、省Moを図りながらN、MnやCuを活用することにより高压水素ガス環境下において水素脆性感受性がないステンレス鋼 (15Cr-9Mn-6Ni-2.5Cu-0.2N) も開発されている^{27,28)}。このような省資源型オーステナイト系ステンレス鋼は来るべき将来の水素社会構築に寄与するものと考えられる。

4 おわりに

省資源型ステンレス鋼の考え方とその開発の歴史、および新分野における開発状況とその適用について述べた。レアメタルを多く使うステンレス鋼の省資源化は単純な合金元素削減にとどまらず、材料使用量そのものを削減できる高強度化をも視野に入れつつ開発が進みつつある。今後、こうした省資源型ステンレス鋼の規格化や材料特性データの蓄積が進むにつれて汎用的に使われ発展していくことが期待される。

参考文献

1) ISO 15510 : 2014, JIS G 0203

- 2) 遅沢浩一郎：ステンレス鋼の科学と最新技術，細井祐三監修，ステンレス協会，東京，(2011)，3.
- 3) 梶村治彦：第215回，第216回 西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京 (2013)，17.
- 4) 総合資源エネルギー調査会 鉱業分科会レアメタル対策部会，今後のレアメタルの安定供給対策について，(2007年7月)
- 5) International Stainless Steel Forum, Stainless Steel in Figures 2015, (2015)
- 6) 宇城工：「第60回技術セミナー」資料，腐食防食学会，東京，(2013)，21.
- 7) 大嶋貴之，濱田辰巳，斎田知明，羽原泰裕，黒田光太郎：CAMP-ISIJ, 20 (2007)，431.
- 8) 野田俊治：第190回 西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京 (2006)，141.
- 9) 新日鐵住金ステンレス (株) ニュースリリース，<http://nssc.nssmc.com/>
- 10) 秦野正治，松山宏之，石丸詠一郎，高橋明彦：まてりあ，51 (2012)，25.
- 11) 秦野正治：まてりあ，54 (2015)，356.
- 12) JFE スチール (株) ニュースリリース，<http://www.jfe-steel.co.jp/>
- 13) 梶村治彦：ふえらむ，11 (2006)，67.
- 14) 富田壮郎，奥学：日新製鋼技報，90 (2009)，30.
- 15) 小林周平，金子賢司，山田和広，菊池正夫，神野憲博，濱田純一：鉄と鋼，101 (2015)，315.
- 16) 濱田純一，神野憲博，林篤剛，平出信彦，梶村治彦，井上宜治：自動車技術会 学術講演会前刷集，(2014) 46-14，13.
- 17) 中村徹之，太田裕樹，加藤康：まてりあ，54 (2015)，18.
- 18) 平成25年度国土交通白書，国土交通省，(2015) 第1部，28.
- 19) ステンレス鋼の科学と最新技術，細井祐三監修，ステンレス協会，東京，(2011)，291.
- 20) 二羽淳一郎，丸尾剛，田所裕：未来材料，9 (2009) 10，20.
- 21) 丸尾剛，二羽淳一郎：コンクリート工学，46 (2008) 12，3.
- 22) 建築通信新聞，2014年9月26日
- 23) ステンレス鋼の科学と最新技術，細井祐三監修，ステンレス協会，東京，(2011)，371.
- 24) 中村潤，大村朋彦，富尾悠素，平田弘征，照沼正明，旦越雄：CAMP-ISIJ, 25 (2012) 1205.
- 25) 大村朋彦：JRCM NEWS, (2014) 337, 2.
- 26) 窪田和正：JRCM NEWS, (2014) 339, 2.
- 27) 秦野正治，高橋明彦，松本和久，藤井秀樹，大宮慎一：燃料電池，12 (2013)，70.
- 28) 秦野正治：JRCM NEWS, (2015) 341, 2.

(2015年8月10日受付)