小 特 集

ステンレス鋼の進歩と溶接

Minor Special Issue
Progress on Stainless Steels
and Their Weldability

1 高耐食性ステンレス鋼の溶接*

三 浦 実**, 小 川 和 博**

Welding of Stainless Steels with High Corrosion Resistance *

by Minoru Miura ** and Kazuhiro Ogawa **

キーワード：ステンレス鋼，耐孔食性，応力腐食割れ，耐粒界腐食性，
溶接施工，溶接材料，溶接高温割れ

1. ま え が き

近年の産業分野の目ざましい進歩，発展にともない，新しいステンレス鋼が多く開発され，厳しい環境への適用が拡大されつつある。

従来より，ステンレス鋼を装置材料として使用しても期待したほどの成果が得られない例のほとんどが溶接部でのトラブルに関連していると言われている。

新しく開発された高性能のステンレス鋼の特徴を十分に生かすためには，それぞれに適した溶接施工が必要であり，そのためには，溶接性を十分把握しておくことが重要であると考えられる。近年，ステンレス鋼の溶接部における基本的な冶金現象と性能（耐食性等）との関係についても検討がなされており，新しい知見が得られている。

ここでは，最近開発され，その用途が拡大されつつある高耐食性ステンレス鋼ならびにその溶接性について紹介する。

2. 母 材 特 性

2.1 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は，延性に優れ耐食性

を維持している皮膜は，比較的安定である。その欠点としては，550～850℃近傍に長時間保持されると粒界に炭化物が析出して，粒界腐食を生じやすいこと，環境によっては，応力腐食割れ（SCC）が発生しやすいことが挙げられる。

近年開発された新しいステンレス鋼には，これらの欠点が改善されたものが多い。粒界鋭敏化の原因となる炭素を低減し，代わりに窒素を添加して，強度を補った高温水 SCC 対策材として，304 LN，316 LN，347 LC 等が開発されている（図 1³⁾⁴⁾）。

また，ステンレス鋼の塩化物環境での耐孔食性は Cr，Mo，N をより多く添加することにより向上することが知られており，N，Mo 含有量の高い高耐食ステンレス鋼が開発されている（図 2⁵⁾）。

特殊用途としては，高温硝酸環境で使用するものとして高 Cr，低炭素あるいは，高 Si のステンレス鋼がある。

2.2 フェライト系ステンレス鋼

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の最大の弱点である SCC に対し，強い抵抗性を有するため SCC 対策材として近年用途が拡大されつつある。材料の耐孔食性は，図 2⁵⁾に示されるように Cr，Mo 量の増加にともない向上するが，反面脆さが助長される⁶⁾⁷⁾。最近の製鋼技術の進歩により，材料の不純物（特に C，N）の低減が可能となり，十分な靱性を有する高 Cr，高 Mo 含有の高純度フェライト系ステンレ

*原稿受付 昭和63年 5 月19日

**正 員 住友金属工業(株)研究開発本部 Member,
Sumitomo Metal Industries

表1 新しい高耐食ステンレス鋼

	規格あるいは商品名	Cr	Ni	Mo	N	その他	(wt.%)	主な適用環境
	304 LN	19	10	—	0.1	C<0.02		高 温 水
	316 NG	17	13	2.5	0.1	C<0.02		
	347 LC 347 AP	18	11	—	0.08	C<0.02, Nb/C>10		
オーステナイト系	310 ELC	25	20	—	—	C<0.02		硝 酸
	310 Nb	25	20	—	—	C<0.02	Nb:0.2	
	SN-1	17	14	—	—	C<0.03	Si:4	
	YUS 110	16	13	—	—	C<0.05	Si:4 Cu:1.2	低濃度塩化物
	YUS 170	25	13	0.9	0.35	C<0.06		
	NAS 124 L	20	12	2.5	0.20	C<0.05		
	254 SMO	20	18	6	0.20	C<0.02	Cu:0.7	海 水
	AL-6 X	20	24	6	—	C<0.05		
フェライト・オーステナイト二相系	3 RE 60	19	5	2.7	—	C<0.03	Si:1.7	低濃度塩化物
	SUS 329 J 1	25	5	2	—	C<0.08		
	SAF 2205	22	5.5	3	0.15	C<0.03		低濃度塩化物 天然ガス
	SUS 329 J 2 L	25	7	3	0.15	C<0.03		海 水
	SN-5	27	8	—	0.1	C<0.03		硝 酸
	DP 9	23	10	—	0.1	C<0.02	Si:3.5	
	SUS 430 LX	18	—	—	—	C<0.03, Ti, Nb		大 気
フェライト系	SUS 436 L	18	—	1	<0.025	C<0.025	Ti, Nb, Zr	
	SUS 444	18	—	2	<0.025	C<0.025	Ti, Nb, Zr	低濃度塩化物
	SUSXM 27	26	—	1	<0.015	C<0.01	—	
	AL 29-4 C	29	—	4	—	C<0.025	Ti:0.5	
	MONIT	25	—	4	—	C<0.025	Ti:0.4	海 水
	SHOMAC-RIVER	26	—	4	—	C<0.01	Nb

図1³⁾

347 ステンレス鋼の析出物に及ぼすC, N量の影響(固溶化熱処理後700°C, 24 h 時効)

図2⁵⁾ 各種市販ステンレス鋼相当材の孔食電位(人工海水, ASTM-1141-52, 80°C, Ar 脱気)

ス鋼が開発され低濃度塩化物環境, 耐海水用として使用されている。

2.3 二相ステンレス鋼

二相ステンレス鋼は, オーステナイト系, フェライト系の両方のステンレス鋼の欠点を補填し合う特徴を有している。すなわち, オーステナイト系ステンレス鋼の欠

点である塩化物環境での SCC に対する抵抗性⁸⁾とフェライト系ステンレス鋼の欠点である脆さが単相ステンレス鋼に比べ改善されている。また, 二相混合組織であるため組織が微細化され, 単相ステンレス鋼に比べ高強度となっている。

広く用いられている二相ステンレス鋼は22~25 Cr 系で, 5~7%のNi, 3%のMo, 0.1~0.2%のNが添加されており, 低濃度塩化物, 耐海水用として開発²⁾⁹⁾されている。また最近では, 石油掘削関連の輸送用パイプにも多用されるようになってきた¹⁰⁾。

また, 他に耐硝酸用として, 27 Cr-8 Ni-0.1 N 及び高 Si の23 Cr-10 Ni-3.5 Si-0.1 N 等が開発¹¹⁾¹²⁾されている。

3. 溶 接 施 工

オーステナイト系ステンレス鋼は, 被覆アーク溶接法, ガスシールドアーク溶接法(ティグ, ミグ等), サブマージアーク溶接法, プラズマ溶接法, 抵抗溶接法, 電子ビーム溶接法, レーザー溶接法などにより溶接が可能であるが, 高耐食ステンレス鋼ではティグ溶接法が最も安定した性能が得られ, 比較的安価な設備コストにて行なえる。また, 電子ビーム溶接では, 高窒素系ステンレス鋼ではブローホールが発生しやすいことが知られている¹³⁾。

フェライト系ステンレス鋼に対しては, オーステナイト系ステンレス鋼と同様各種の溶接法が適用される。

しかし、耐食性の高い高 Cr, 高 Mo 含有のフェライト系ステンレス鋼では、溶接部の脆化防止のため、補助シールド治具を用いて大気のを込みを防止するとともに、溶接入熱量を制限する必要がある、ティグ溶接法、電子ビーム溶接法、レーザー溶接法の適用が望ましいとされている。

二相ステンレス鋼に対しては、被覆アーク溶接法、ティグ溶接法、プラズマ溶接法、サブマージ溶接法が一般的であるが、ミグ溶接法の適用も検討¹⁴⁾され、一部で用いられている。

また、高耐食性ステンレス鋼では、耐食性向上の一つの手段として、材料中の炭素の低減が図られているが、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接では、フラックスから溶接金属に炭素が移行しやすく、その防止のためフラックス成分も低炭素系のものが使用されている。

サブマージアーク溶接は、厚肉材を高エネルギーで溶接可能であることがその特徴であるが、そのため比較的大入熱で溶接される。オーステナイト系ステンレス鋼では、HAZ において、炭化物析出が生じ耐食性が劣化する場合があります¹⁵⁾。また、オーステナイト系二相ステンレス鋼では溶接高温割れ（凝固割れ）が特に厚肉材において発生しやすい傾向にあり、溶接条件、溶接材料フラックスの選定に留意する必要がある¹⁶⁾¹⁷⁾。

プラズマアーク溶接法は、高エネルギー密度のアークプラズマを利用した溶接法であり比較的薄肉の場合ティグ溶接に比べ高エネルギー率な溶接が可能となる。

電子ビーム溶接法は、溶接入熱量が低く厚肉材を高エネルギー率に変形を少なく溶接できることが特徴であり、オーステナイト系、フェライト系ステンレス鋼への適用が可能と考えられる。しかし、N 量の高いオーステナイト系ステンレス鋼二相ステンレス鋼に対しては、ポロシティ等の欠陥¹⁸⁾の発生が懸念される。

レーザー溶接法は高エネルギー密度熱源であるレーザー光を使用するためビード幅の狭い溶接部が得られ、熱影響が小さくなる。レーザー溶接法は、比較的薄肉材への適用が検討されているもののあまり一般的な溶接法とはなっていない。

レーザー、電子ビームを利用した溶接は、オーステナイト系ステンレス鋼の HAZ 鋭敏化抑制、フェライト系ステンレス鋼の脆化防止に有効と考えられる。

4. 溶 接 性

4.1 溶接高温割れ

溶接高温割れは、凝固形態と溶接ビード形状の影響を大きく受けると言われている（図 3¹⁸⁾）。すなわち、 γ

図3¹⁸⁾ 溶接高温割れに及ぼすフェライト量、凝固形態の影響（トランスバレストレン試験）

単相凝固が最も割れ感受性が高く、次いで α 単相凝固が割れやすく、 $\alpha + \gamma$ 二相凝固が最も割れ感受性が低くなる¹⁸⁾¹⁹⁾。また、割れ感受性は、合金元素（Nb, Ti, Si, Al等）や、不純物（P, S等）の影響も大きく受ける¹³⁾。従って、耐食性を向上させるためにNb, Ti, Si, Al等を添加した材料では、溶接金属のフェライト量をコントロールすることが必要であり、また、完全オーステナイト系では、特に不純物の低い溶接材料を使用し溶接ビード形状をコントロールすることが、溶接高温割れ防止の対策の一つとなっている。

4.2 耐 食 性

(1) オーステナイト系ステンレス鋼

新しいオーステナイト系ステンレス鋼の中にはMo, Nの添加量を増すことにより耐孔食性を高めている場合が多い²⁰⁾²¹⁾。高Mo含有の材料では、母材と同じ成分であっても溶接金属の耐孔食性は母材に比べ劣ると言われている²²⁾²³⁾（図4²³⁾）。これは、溶接金属ではMoが凝固偏析するためと言われており、高Mo系ステンレス鋼では、溶接部の耐食性を確保するため、母材よりもMo量の高い溶接材料を用いるのが一般的である。

また、HAZでの炭化物の析出により耐粒界腐食性が劣化するいわゆる鋭敏化が生じうことはよく知られている¹⁵⁾。このため、最近の高耐食ステンレス鋼では、低C化されており、通常の溶接では、鋭敏化は生じにくい

図4²³⁾ 母材、溶接金属の臨界孔食発生温度に及ぼす Mo 量の影響 (ティグ溶接, 10% FeCl₃)

図5²⁵⁾ 溶接金属の耐孔食性に及ぼすフェライト量及びNの影響

図6³⁰⁾ 溶接金属の窒化物の析出量に及ぼすフェライト量の影響

と考えられる。

(2) フェライト系ステンレス鋼

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に比べてC, Nの固溶量が小さく、マトリックス中の拡散速度が大きいため、溶接熱サイクルにより炭窒化物が粒界に析出し耐食性が劣化しやすい²⁴⁾。

従って、溶接部の耐食性を向上させるには、Ti, Nb等の安定化元素を含んだものや、C, N量を低減したいわゆる高純度材を用いるとともに、開先面の洗浄、ガスシールドの強化により、溶接時のC, Nのピックアップを防止することが必要となる⁶⁾²⁴⁾。

(3) 二相ステンレス鋼

二相ステンレス鋼の溶接部の耐食性確保の点からは、HAZ、溶接金属のフェライト量のコントロールが最も重要と考えられる。²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾ フェライト量は40～60%の範囲が望ましいとされている (図5²⁵⁾)。二相ステンレス鋼は、高温に加熱されるとフェライト単相もしくは、それに近くなり、冷却過程でオーステナイト相が析出し二相組織となる。その際、オーステナイト相が十分析出しないとフェライト相に炭窒化物が析出し、耐食性が劣化

する (図6²⁸⁾)。このため、拡散速度がNiに比べ大きいNをオーステナイト形成元素として、適量 (0.1～0.2%) 添加し、溶接部でオーステナイト相が析出しやすとした材料が望ましい²⁷⁾³⁰⁾。

4.3 機械的性質

(1) オーステナイト系

オーステナイト系ステンレス鋼は、延性に富み機械的性質の点からは、溶接性に優れており、一般的には共金系の溶接材料が用いられている。しかし、高Mo含有のステンレス鋼などでは溶接金属の耐食性確保のため高MoのNi基溶接材料が用いられる場合には、金属間化合物相の生成により、延性が母材部に比べ低下する傾向がある。

(2) フェライト系

フェライト系ステンレス鋼は溶接熱サイクルによる結晶粒の粗大化や炭窒化物の析出により脆化する傾向がある。高純度フェライト鋼では、開先面からのCのピックアップ、溶接雰囲気からのN, Oの混入によっても著しく脆化することが知られており、開先部の洗浄、ガスシールドの強化が必要となる (図7⁶⁾)。また、材料面からは、

図7⁶⁾ 30Cr-2Mo 鋼溶接金属の v_{Trs} 及び上部棚エネルギーに及ぼすO, Nの影響

図8⁶⁾ 30Cr-2Mo 鋼溶接金属の等ぜい化曲線

図9³⁰⁾ 溶接金属の低温靱性に及ぼすO量の影響

図10³³⁾ 二相ステンレス鋼の衝撃値に及ぼす σ 量の影響

である。また σ 相脆化もCr, Moの含有量の多いもの程進行しやすく、不要な加熱は避けるべきである。

(3) 二相ステンレス鋼

二相ステンレス鋼の溶接部の靱性は、一般には良好であるが、低温での靱性を向上させるには溶接金属中のO量を低減し、フェライト量を適量にコントロールすることが必要である¹³⁾。溶接金属のO量の高くなる被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接では、ティグ溶接法に比べフェライト量を少なくすることが必要である (図9³⁰⁾)。

また、二相ステンレス鋼は600~950℃の温度域に加熱されると σ 相脆化を生ずる。 σ 相がわずかに(1%程度)析出しても靱性が大きく低下する (図10³³⁾)。従って、過大入熱量での溶接や σ 相析出温度域への加熱は靱性面からは避けるべきである。このため、溶接入熱量、層間温度を十分低く管理する必要がある³⁴⁾。

参考文献

空気混入による脆化防止には微量の希土類元素の添加が有効であると言われている³²⁾。

加熱による脆化としては、475℃、 σ 相脆化がよく知られている。475℃脆化は、Cr濃度の高い α 固溶体の生成によるものと考えられており、高Crの材料ほど生じやすく、図8⁶⁾に示すように短時間の加熱でも靱性低下が生じうる。従って、溶接入熱量のコントロールが必要

- 1) 藤原：鉄と鋼, 71 (1985), P 794
 - 2) 原田：防食技術, 26 (1977), P 721
 - 3) 工藤, 樽谷, 三浦, 榑木, 西：住友金属, 38 (1986), P 190
 - 4) 小若, 長野, 吉川, 三浦, 太田, 永田：住友金属, 34 (1982), P 86
 - 5) 工藤, 樽谷：腐食防食協会 第62回腐食防食シンポジウム資料 (1985)
 - 6) 井川, 中尾, 西本, 寺島：本誌, 48 (1979), P 1054
 - 7) 三浦, 高祖, 大森：鉄と鋼, 66 (1980), S 538
 - 8) 小若, 工藤：防食技術, 30 (1980), P 218
 - 9) R. R. Irving : Iron Age, 68 (1983), Dec.
 - 10) C. V. Roscoe and K. J. Gradwell : Proc. of " Duplex Stainless steel '86", Hague, Netherland, 1986, P 126
 - 11) 梶村, 小川, 森川, 三浦, 長野：鉄と鋼, 72 (1986), S 599
 - 12) 三浦, 小川, 梶村, 長野：鉄と鋼, 72 (1986), S 600
 - 13) 中尾：日本鉄鋼協会 第118, 119回西山記念技術講座資料, P 259
 - 14) 赤坂, 中手, 永尾, 阪口：日本鉄鋼協会講演論文集, Vol. 1 (1988), P 605
 - 15) 井川, 中尾, 西本, 井上：本誌, 47 (1978), P 147
 - 16) 中西, 勝本：本会講概, 38 (1986), P 134
 - 17) 中西, 勝本, 池上, 河合：本会講概, 39 (1986), P 142
 - 18) 松田, 中川, 加藤, 村田：本誌論文集, 5 (1987), P 329
 - 19) V. Kujanppa et al : Welding Research International, 9 (1979), 2, P 5
 - 20) 小川, 村田, 青木, 常富：本誌, 49 (1980), P 564
 - 21) 小川, 財前：本誌, 50 (1981), P 246
 - 22) 齊藤：本誌, 50 (1981), P 251
 - 23) A. Garner : Welding Journal, 62 (1983), P 27- P 34
 - 24) 山本：防食技術, 33 (1984), P 587
 - 25) T. Ogawa and T. Koseki : Proc. of "Welding and Performance of Pipelines ", TWI London, Nov., 1986, Paper 10
 - 26) 鈴木, 長谷川, 渡辺：日本金属学会誌, 32 (1968), P 1171
 - 27) 小川, 小関：本会会誌, 57- 2 (1988), P 92
 - 28) 三浦, 高祖, 工藤, 柘植：鉄と鋼, 72 (1986), S 1439
 - 29) 三浦, 高祖, 小川, 小林：鉄と鋼, 72 (1986), S 606
 - 30) M. Miura, T. Kudo and et al : Proc. of " Duplex Stainless steel '86" . Hague, Netherland, 1986, P 319
 - 31) 三浦, 工藤, 柘植, 高祖：本会講概, 39 (1986), P 148
 - 32) 中尾, 西本：日本溶接協会化学機械溶接研究委員会資料 CP-80-28 (1980)
 - 33) 前原, 大森：鉄と鋼, 67 (1981), P 577
 - 34) 三浦, 小川, 梶村, 長野：本会講概, 41 (1987), P 318
- ~~~~~