

特集：二相ステンレス鋼の最近の動向とその溶接**二相ステンレス鋼の溶接**株式会社 タセト
岡 崎 司**1. はじめに**

二相ステンレス鋼の溶接金属の組織はオーステナイト相とフェライト相（フェライト量およそ 30～70%）からなり、オーステナイト系ステンレス鋼に比べフェライト量が高いものの同じく延性、じん性に優れており、溶接性はオーステナイト系ステンレス鋼と同様に良い。しかし、N 量が高いことや、高温でのぜい化を招きやすい Cr 量や Mo 量がオーステナイト系に比べ高く、溶接に際しては注意が必要となる場合もある。

ここでは、適用できる溶接法、溶接材料、溶接部の性能および溶接に際しての留意点について述べる。

2. 溶接性

溶接作業性は、オーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同等であるため、シールドガス、溶接条件、開先形状や溶接上の注意事項はオーステナイト系のそれを参考とすればよい。

基本的に予熱の必要はないが、パス間温度、入熱に関しては後述するように、HAZ のフェライト量のコントロール、ぜい化や鋭敏化の防止の観点からオーステナイト系に比べ制限が大きくなっている。

適用できる溶接法は、オーステナイト系と同様ティグ溶接、被覆アーク溶接、ミグ・マグ溶接などほとんどの溶融溶接方法が適用できる。ただし溶加材を使用しない溶接法は後述する溶接金属のフェライト量過多の問題があり、用途が制限される。

二相ステンレス鋼は N 量が高く、オーステナイト系ステンレス鋼に比べブローホールが発生しやすい傾向にあるため注意が必要である。また、二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼にはない拡散性水素による遅れ割れ感受性があるため、溶接材料の吸湿対策が重要となる。

3. 溶接材料

二相ステンレス鋼溶接材料として、JIS では被覆アーク棒が 5 鋼種、ソリッド溶加材が 2 鋼種、およびフラックス入りワイヤが 3 鋼種規定されている。表 1 に各鋼種の化学成分範囲を示す。溶接材料の特徴として化学成分は母材成分に比べ Ni が 3～4% 高く設定されている。母材はその化学成分で最適なオーステナイト／フェライト相比となるように 1000℃ 付近の温度で熱処理される。これに対し、溶接金属では溶接熱サイクルの冷却過程で十分な量のオーステナイト相が析出するように、オーステナイト生成元素である Ni を母材に比べ高く設計している。このため溶加材を使わない母材のみを溶融する溶接では、溶接金属はフェライト量過多となり、延性、じん性や耐食性が低下する。

表 1 JIS に規定されている二相ステンレス鋼溶接材料

種類	記号	化学成分 (%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu	W
被覆アーク溶接棒 ^{*)}	ES329J1	Max. 0.08	Max. 0.90	Max. 1.50	Max. 0.040	Max. 0.030	6.0- 8.0	23.0- 28.0	1.00- 3.00	—	—	—
	ES2209	Max. 0.04	Max. 1.00	0.5- 2.0	Max. 0.04	Max. 0.03	7.5- 10.0	21.5- 23.5	2.5- 3.5	0.08- 0.20	Max. 0.75	—
	ES2553	Max. 0.06	Max. 1.00	0.5- 1.5	Max. 0.04	Max. 0.03	6.5- 8.5	24.0- 27.0	2.9- 3.9	0.10- 0.25	1.5- 2.5	—
	ES2593	Max. 0.04	Max. 1.0	0.5- 1.5	Max. 0.04	Max. 0.03	8.5- 10.5	24.0- 27.0	2.9- 3.9	0.08- 0.25	1.5- 3.0	—
	ES329J4L	Max. 0.04	Max. 1.0	0.5- 2.0	Max. 0.040	Max. 0.030	8.0- 11.0	23.0- 27.0	3.0- 4.5	0.08- 0.30	Max. 1.0	Max. 2.5
裸棒／ワイヤ ^{**)}	YS2209	Max. 0.03	Max. 0.90	0.5- 2.0	Max. 0.03	Max. 0.03	7.5- 9.5	21.0- 23.5	2.5- 3.5	0.08- 0.20	Max. 0.75	—
	YS329J4L	Max. 0.03	Max. 0.90	0.5- 2.0	Max. 0.03	Max. 0.03	8.0- 11.0	23.0- 27.0	3.0- 4.5	0.08- 0.30	Max. 1.0	—
フラックス入りワイヤ ^{***)}	TS2209	Max. 0.04	Max. 1.0	0.5- 2.0	Max. 0.04	Max. 0.03	7.5- 10.0	21.0- 24.0	2.5- 4.0	0.08- 0.20	Max. 0.5	—
	TS2553	Max. 0.04	Max. 0.75	0.5- 1.5	Max. 0.04	Max. 0.03	8.5- 10.5	24.0- 27.0	2.9- 3.9	0.10- 0.20	1.5- 2.5	—
	TS329J4L	Max. 0.04	Max. 1.0	0.5- 2.0	Max. 0.04	Max. 0.03	8.0- 11.0	23.0- 27.0	2.5- 4.0	0.08- 0.30	Max. 1.0	—

*) JIS Z3221:2008 ステンレス鋼被覆アーク溶接棒

***) JIS Z3321:2010 溶接用ステンレス鋼溶加棒、ソリッドワイヤ及び鋼帯

***) JIS Z3323:2007 ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ及び溶加棒

いずれの溶接材料も溶接作業性はオーステナイト系と同等であるが、被覆アーク溶接棒やフラックス入りワイヤでは溶接金属の N 量が高いため、ややスラグ剥離性が劣る傾向にある。ティグ溶接において注意すべき点は、溶接中に熔融池から N が蒸発するため、凝固後の溶接金属の N 量が溶加材の値より低くなることである。ティグ溶接用の溶加材の成分規定は、JIS や AWS 規格では被覆アーク溶接棒やフラックス入りワイヤとは異なり、溶加材そのものの化学成分で規定される（被覆アーク溶接棒やフラックス入りワイヤは溶接金属で規定される）。ミルシートの値も溶加材の分析値であり、溶接金属の化学成分はそれぞれの元素の溶接中の歩留りによる。各元素の歩留まりはほぼ 100%と考えるとよいが、N の歩留りは溶接条件や溶加量により変化し 50~70%となる。N は PRE 値(耐孔食指数で $Cr\%+3.3Mo\%+16N\%$ 。W をカウントした場合は PREW となる。) すなわち耐孔食性に大きく影響するとともにフェライト量に影響を与える。ティグ溶接においてはこの N の歩留りを把握する必要がある。N の歩留りが悪い場合には、シールドガスに N₂ ガスを混合すると歩留りは改善される。2%程度の N₂ ガスを混合した場合に溶接金属の N 量は、溶加材の N 量と同程度となる。

一般的に二相ステンレス鋼の共金溶接では、同成分系の溶接材料が使用される。表 2 に各鋼種に対応する溶接材料の規格記号を示す。リーン二相ステンレス鋼の場合、成分系が近いこの鋼種専用の 2307 が AWS 規格のフラックス入りワイヤ規格 (A5.22) に規定されているが、通常は強度も耐食性もオーバーマッチである 2209 が使用されることが多い。

表 2 共金溶接の推奨溶接材料

二相鋼の 分類	UNS 記号	規格		溶接材料					
		ASTM TYPE	JIS	JIS			AWS		
				被覆アーク 溶接棒	裸棒およ びワイヤ	フラックス入り ワイヤ	被覆アーク 溶接棒	棒および ワイヤ	フラックス入り ワイヤ
リーン	S32101	—	—	ES2209	YS2209	TS2209	E2209	ER2209	E2307T E2209T
	S32304	2304	—	ES2209	YS2209	TS2209	E2209	ER2209	E2307T E2209T
22Cr	S31803	2205	SUS329J3L	ES2209	YS2209	TS2209	E2209	ER2209	E2209T
	S32205								
25Cr	S31260	—	SUS329J4L	ES329J4L	YS329J4L	TS329J4L	E2594	ER2594	E2594T
スーパー	S32750	2507	—	—	—	—	E2594	ER2594	E2594T
	S32760	—	—	—	—	—	E2595	(ER2594)	(E2594T)

4. 異材溶接

異材溶接には、二相ステンレス鋼と炭素鋼／低合金鋼との組合せ、Cr系ステンレス鋼との組合せ、オーステナイト系との組合せ、鋼種の違う二相鋼の組合せおよび高Ni合金との組合せが考えられる。表3に各組合せに使用できる溶接材料の規格記号を示す。以下に溶接材料選定の基本的な考え方を述べる。

表 3 異材溶接の推奨溶接材料

材料	リーン二相鋼	22Cr 二相鋼	25Cr 二相鋼	スーパー 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	Cr系 ステンレス鋼	炭素鋼	高 Ni 合金
リーン二相鋼	2209	2209	2209 329J4L 2594	NiCrMo-3 NiCrMo-4	2209	309(L) 309(L)Mo	309(L) 309(L)Mo	NiCr-3 NiCrMo-3 など
22Cr 二相鋼		2209	329J4L 2594	NiCrMo-3 NiCrMo-4	2209	309(L) 309(L)Mo 2209	309(L) 309(L)Mo 2209	NiCrMo-3 NiCrMo-4 など
25Cr 二相鋼			329J4L 2594	NiCrMo-3 NiCrMo-4	329J4L 2594	309(L) 309(L)Mo 329J4L 2594	309(L) 309(L)Mo 329J4L 2594	NiCrMo-3 NiCrMo-4 など

4.1 炭素鋼／低合金鋼との組合せ

溶接材料の選定は、基本的には309や309Moなどの309系の溶接材料となる。厚板の場合は理想的には309系でバタリング溶接を行い、その後開先を二相鋼と同成分系の溶接材料で溶接することが望ましい。炭素鋼側でPWHTを要求される場合は、この309系のバタリング後PWHTを実施しその後二相系溶接材料で開先溶接を行う。

炭素鋼側の強度が高いケースでは、309系の溶接材料では溶接金属の強度が両母材に比べ低くなる所謂アンダーマッチ継手となり、曲げ試験にて溶接金属にひずみが集中し割れが発生するケースがある。このような場合には二相系の溶接材料を使用し溶接金属の強度を確保する方法もある。ただし、溶接金属のNi量が309系に比べ低いいため、炭素鋼側の希釈が過大にならないよう注意が必要である。

リーン二相鋼の場合には、2209 で溶接を行うと希釈により溶接金属の合金量が低下しマルテンサイト析出の危険性があるため、2209 による異材溶接は推奨できない。

4.2 Cr 系ステンレス鋼との組合せ

基本的には炭素鋼と同じで、309 系か二相系の溶接材料となる。塩化物 SCC 対策としてフェライト系ステンレス鋼を選定している場合には、オーステナイト系の溶接材料は使用できない。また SUS444 (19Cr-2Mo-Ti,Nb,Zr-極低 C,N) のような高純度フェライト系ステンレス鋼の場合には耐 SCC 性とともに耐孔食性 (PRE 値) にも配慮しなければならず二相系も選択肢となる。

4.3 オーステナイト系ステンレス鋼との組合せ

オーステナイト系母材に合わせた溶接材料、309 系溶接材料、二相系溶接材料と母材の PRE 値を下回らなければいずれの溶接材料も使用可能である。ただし、フラックスを利用する溶接方法の場合、オーステナイト系や 309 系の溶接材料では溶接金属の N 量が二相鋼の希釈により高くなるためスラグ剥離が悪くなる傾向にある。このケースでは高 N 量の溶接金属でもスラグ剥離性の良い二相系の溶接材料を用いることが推奨される。

4.4 鋼種の違う二相鋼の組合せ

この場合、高耐食側の母材に合わせた溶接材料を選定する。これは後述するように溶接金属の耐食性が同成分系の母材に劣るためである。

4.5 スーパーオーステナイト系ステンレス鋼もしくは高 Ni 合金との組合せ

いずれのケースも溶接材料は高 Ni 合金系の溶接材料となる。ただし NiCrMo-3(Alloy625;Ni-22Cr-9Mo-3.5Nb) のように Nb を含むと好ましくないとの考え方もあり¹⁾、事前に予備試験で検討することが望ましい。

5. 溶接部の組織

溶接部のマイクロ組織を図 1 に示す。溶接金属の組織は F モード凝固のアシキュラーフェライト組織である。HAZ は最高加熱温度がフェライト単相域まで加熱された高温 HAZ と二相域にとどまった低温 HAZ の二つの領域からなる。

溶接金属は Ni 量を高めているため十分なオーステナイト相が析出している。高温 HAZ では溶接金属と同様な針状のオーステナイト相が析出しているが量が母材の現出部に比べかなり少なくなっている。これが二相ステンレス鋼溶接部の問題点のひとつとなっている。第一世代の SUS329J1(25Cr-4.5Ni-2Mo)ではこの部分がほとんどフェライト単相となり、窒化物の析出により耐食性の劣化が問題となった。現状では N 量を高めることによりオーステナイトの析出を促しているが、小入熱の溶接で冷却速度が速くなると相バランスがフェライト過多側に崩れる。

もうひとつの HAZ 組織の問題点は、低温 HAZ における溶接熱サイクルによるぜい化である。二相ステンレス鋼は 800~900℃に加熱されると短時間で σ 相を析出してぜい化する。SUS329J4L(25Cr-7Ni-3Mo-0.2N)や S32750(25Cr-7Ni-4Mo-0.3N)のようなスーパー二相ステンレス鋼のように Cr、Mo の高い場合、より短時間で σ 相が析出する。このため、大入熱の溶接で冷却速度が遅くなると冷却曲線が σ 相析出のノーズにかかりぜい化する危険性が出てくる。このため太径のサブマ

ージアーク溶接のような過大な入熱の溶接は避ける必要がある。

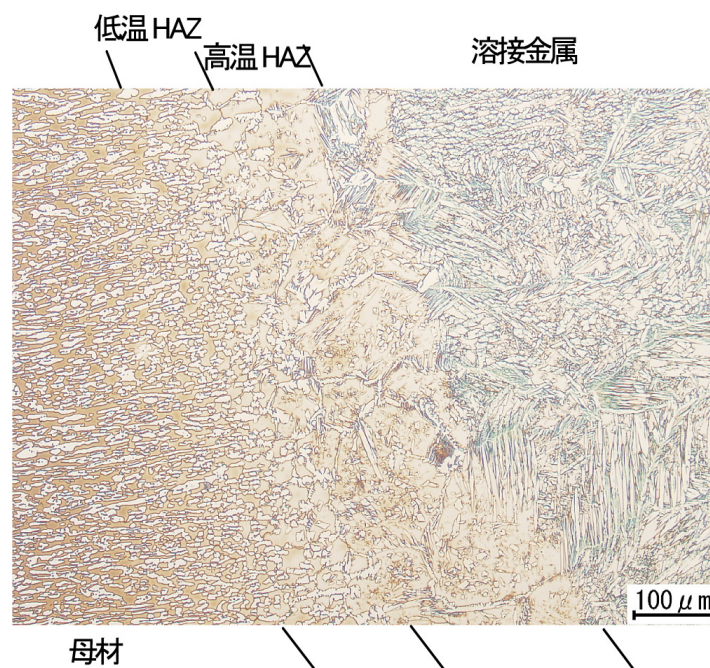


図1 溶接部のマイクロ組織

6. 溶接部の機械的性能

溶接金属はアシキュラーフェライト組織で強度が高く、母材に対しオーバーマッチとなるため、継手引張試験においては母材破断となる。

溶接金属の衝撃特性は溶接金属の酸素量に影響を受けるため溶接方法により異なる。一例として SUS329J3L(22Cr-5Ni-3Mo-0.2N)のティグ溶接とフラックス入りワイヤによるマグ溶接の継手でのシャルピー衝撃試験結果(試験温度 0°C)で、ティグ溶接継手では母材よりやや低い 250J 程度であるがマグ溶接継手では溶接金属の酸素量が高いため(約 1000ppm) 60J 程度と低くなることが報告されている²⁾。

7. 溶接部の耐食性

溶接部の耐食性は HAZ の耐食性と溶接金属の耐食性とにより決まる。

高温 HAZ では小入熱溶接でフェライト相過多となるため、固溶限の低下による Cr_2N の析出による鋭敏化で耐食性が低下する。また、低温 HAZ では大入熱溶接で σ 相の析出によりやはり耐食性が低下する。このため、HAZ での耐食性の低下を最小限とするため入熱とパス間温度の管理が重要となる。

溶接金属でも多パス溶接の場合、母材 HAZ 部と同様に後パスにより熱影響を受けた領域が多数存在するため、耐食性としては母材に比べやや劣る。このため SUS329J3L に 329J4L の溶接材料というように、母材より耐食性のグレードの高いものを選択するケースもある。耐食性のグレードは PRE 値($\text{Cr}\%+3.3\text{Mo}\%+16\text{N}\%$)を参考とするのがよい。

さらに溶接部では、溶接による焼け (Heat tint) による耐食性の低下が問題となる。

ステンレス鋼のように金属表面の不動態皮膜により耐食性を維持している金属では、溶接熱による

スケールで耐食性が劣化する。図 2 に S32750 上に ER2594 でのビードオン溶接部の各種表面処理方法による耐食性の違いを示す。溶接のままでの耐孔食性は、酸洗処理や機械的にスケールを除去したものに比べ劣る。

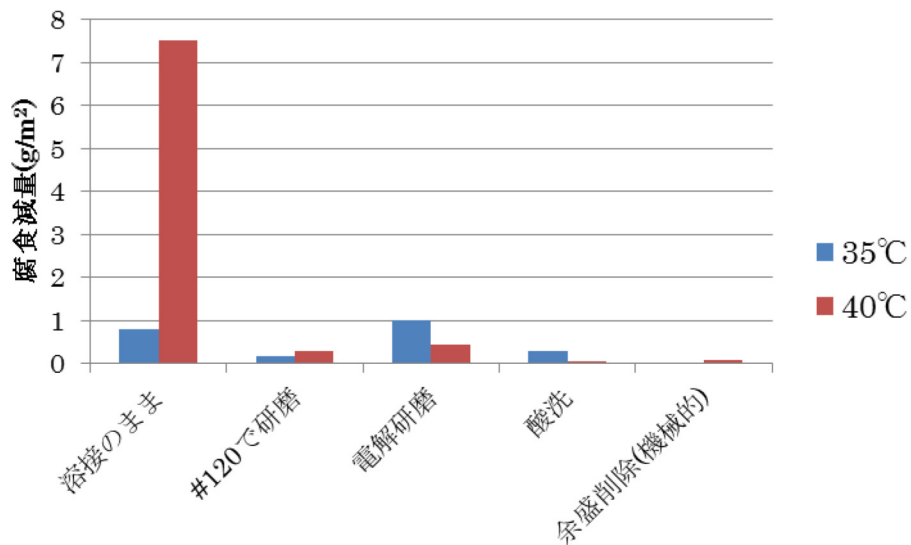


図 2 孔食に及ぼす表面処理の影響
 腐食試験: ASTM G48 method A (24h)
 試験温度: 35°C、40°C

8. 溶接上の留意点

二相ステンレス鋼の溶接の留意点はオーステナイト系に準じればよい。ただし、上述したように HAZ の組織がオーステナイト系に比べ冷却速度の影響を受けやすいため、入熱、パス間温度の管理がより厳密となるとともに開先精度もより高いことが望ましい。

また溶接後処理も

- ・スパッタやアークストライクはグラインダ等で除去する。(急冷組織まで)
- ・機械的なスケールの除去は炭素鋼/低合金鋼に使用していないステンレス鋼ワイヤブラシもしくはグラインダで行う。
- ・ショットブラストはガラスビーズなど鉄系以外のもので行う。
- ・より優れた耐食性を確保するには、機械的なスケール除去後、酸洗や不動態化処理 (Passivation) で不動態皮膜を形成させるとともに表面の鉄分 (Free Iron) を除去する。

などとオーステナイト系よりは厳密に管理する必要がある。

また、ノンフィラーの溶接を避ける必要があり、タック溶接においても溶加材を使用する必要がある。

9. おわりに

二相ステンレス鋼は溶接性に優れており、溶接における留意点はオーステナイト系に準ずるが、熱管理や後処理ではより厳密な管理が必要となる。この点に留意すれば、健全な溶接部を得ることが可能である。

参考文献

- 1) R. N. Gunn 編: Duplex Stainless Steel—Microstructure, properties and applications, Abington Publishing, (1997), 122
- 2) 迎井: 二相ステンレス鋼溶接継手の高温履歴を受けた場合の性能, JSSC No.13(2013), 28-30.3

<略歴>

岡崎 司 (おかざき つかさ)

-
- 1980年 大阪大学大学院 溶接工学専攻 前期課程修了
 - 1980年 日本油脂(株)入社 神明工場研究科配属
 - 2000年 (株)タセト入社技術部配属
 - 2002年 博士(工学)取得
 - 2006年 技術部部长 現在に至る