

溶接管理技術者の体験紹介

二相ステンレス鋼溶接施工確立時の苦労

株式会社日立インダストリアルプロダクツ
山口陽平

1. はじめに

当社の主力製品である大型ポンプは使用される地域によって環境が大きく異なる。海水を取り扱うポンプを例にとると、中東向けの海水ポンプでは海水温度が高いため塩分濃度が高く、厳しい腐食環境にさらされることから、ステンレス鋼の中でも耐食性の高い材料が求められる。

本稿では、高耐食性材料の一つである二相ステンレス鋼を採用し、溶接施工法を確立した際の苦労話を紹介する。

2. 二相ステンレス鋼の概要

塩水環境下における耐食性は耐孔食指数 (PREW : $Cr+3.3(Mo+0.5W)+16N$) で表すことができ、耐孔食指数が高いほど孔食が発生しにくいことを表している。図 1 に耐孔食材料の代表格であるフェライト系ステンレス鋼、オーステナイト系ステンレス鋼と二相ステンレス鋼の比較を示す。

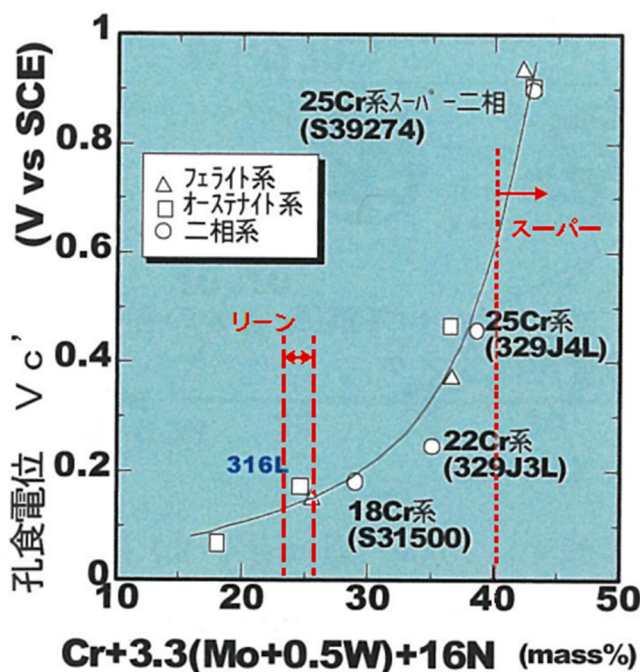


図 1 ステンレス鋼の合金組成 (Cr, Mo, W, N の関数 PREW) と耐孔食性の関係¹⁾

図 1 よりフェライト系ステンレス鋼、オーステナイト系ステンレス鋼よりも二相ステンレス鋼のほうが耐食性に優れていることがわかる。二相ステンレス鋼はオーステナイト相とフェライト相の比率がほぼ 50 : 50 の二相組織を有するステンレス鋼であり、耐応力腐食割れ性、耐孔食性に優れ、

かつ機械的強度が高いという特長がある。

二相ステンレス鋼は成分系によってスーパー二相系、ノーマル二相系、省合金二相系（リーン）の三つに分類される。オーステナイト系ステンレス鋼と比較して耐食性のみならず機械的性質、特に2倍以上の耐力を有するため、薄肉化が可能であり、機器の軽量化が可能である。図2に耐孔食性と耐力をそれぞれの軸にとった各鋼種の位置づけを示す。

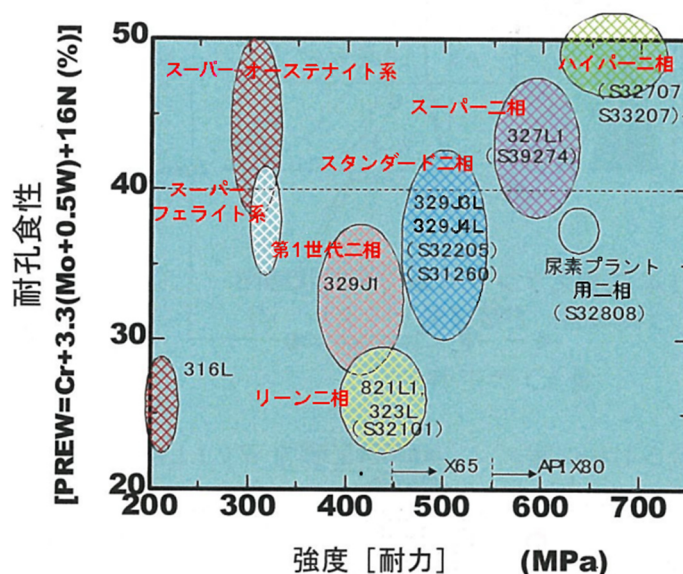


図2 耐孔食性と強度からみた二相ステンレス鋼の各鋼種の位置づけ²⁾

しかしながら、ある温度域に保持されるとシグマ相の析出や475℃ぜい性などにより急激に諸特性が劣化する³⁾、溶接割れ感受性が高い⁴⁾など特有の現象があり、一般的なオーステナイト系ステンレス鋼に比べて取り扱いが難しい材料でもある。

当社では上述の二相ステンレス鋼の特長に着目し施工法案の確認や腐食試験などの検証を実施し、2000年前半頃より製品適用を開始、50mm程度の板厚までに適用していた。しかし、2000年後半頃、50mmを超える領域（最大200mm程度）の部位への適用のための試作において溶接割れやじん性の不足などの問題が発生した。極厚板領域での実績や文献が少なく、基本要素からの再検討が必要となり種々の検討を実施した。

3. 極厚板領域の溶接における評価内容

二相ステンレス鋼の極厚板領域の溶接施工で評価した概要を以下に記す。

(1) 溶接割れ感受性の評価

二相ステンレス鋼は割れ感受性が高いためトランスバレストレイン試験により適正な溶接施工条件の評価を実施した。

(2) 化学成分や冷却速度の違いによる相分率

二相ステンレス鋼は化学成分や冷却速度の違いにより相分率が変化する。適切な相分率となるCr当量、Ni当量比や入熱を評価した。

(3) 衝撃特性の高い溶接施工の確立

ステンレス鋼の溶接に広く適用されるFCAWは施工性が良い反面、溶接金属の衝撃特性がほかの溶接方法より低い欠点がある。適用される規格によっては、FCAWでは求められる衝撃特性を満足できないことがあるため、衝撃特性の高い溶接施工方法を評価した。

本稿では、上述 (3) の内容について紹介する。

上述した通り、ステンレス鋼の溶接には FCAW が選定されている。FCAW は内包されるフラックスの効能によりアークが安定するため溶接性に優れ、かつ電流密度が高いため高能率の溶接が可能など、多くの特長を有している。

一方で、フラックスの影響により溶着金属中に微細な酸化物が混入するため、衝撃特性は低くなる。また、主として FCAW にはシールドガスに CO₂ を使用することも衝撃特性低下の要因として挙げられる。

衝撃特性を示す吸収エネルギー C_v の要求値は適用される規格・基準や温度・鋼種によってもさまざまだが、当社の使用環境における二相ステンレス鋼については 27~70J 程度が規定されている。

一方、FCAW は 30~50J 程度であり SMAW でも 60~80J となる。広く適用されている溶接方法の中では GTAW が最も高く 150~200 J 程度の衝撃特性を有するが施工能率は低く、構造物の溶接には適していない。そこで溶接法が GTAW に近いソリッドワイヤを使用した GMAW に着目し検討を進めた。図 3 にステンレス鋼における溶接方法別の溶接金属衝撃特性の比較を示す。

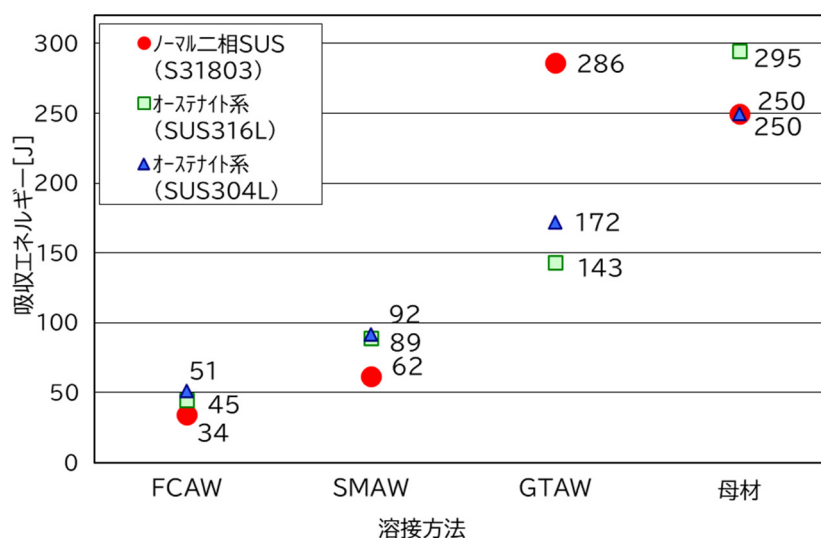


図 3 溶接方法別の溶接金属衝撃特性の比較 (C_v, @0°C)

4. 二相ステンレス鋼におけるソリッドワイヤを使用した GMAW での溶接施工

ソリッドワイヤを使用した GMAW は施工能率が高く、かつソリッドワイヤを使用するため溶着金属への微細な酸化物の混入が少なく高い衝撃特性を有する。その反面、ステンレス鋼においてはアークの安定性が悪くブローホールが入りやすいなど適正な溶接条件の裕度が狭い欠点がある。

溶接条件の一つにシールドガスがある。シールドガスは溶接金属を外気から遮断する目的だけでなく、添加する成分によって溶接中のアークの安定性、溶滴移行、溶融池の対流に大きく影響を及ぼす。

図 4 にシールドガス種類別のアークの特徴と溶け込み形状の比較を示す。




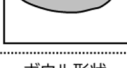
シールドガス	アークの安定性	溶け込み形状	特徴
Ar	アークの集中性・安定性悪い	 フィンガー形状	・GMAWでは使用しない
Ar+O ₂ 系	集中性の良い安定したアーク	 フィンガー形状	・ステンレス鋼のGMAWで主に使用されている ・2%のO ₂ 添加でアーク安定性が最も良い
Ar+CO ₂ 系	集中性の良い安定したアーク	 フィンガー形状	・2~5%のCO ₂ 添加でアークの安定性が最も良い ・5%を超えるとアークの安定性悪くなる
Ar+He系	安定したアーク	 ボウル形状	・Heの添加でアークエネルギー増加、溶融池の温度上昇 ・適用実績少ない

図4 シールドガス種類別のアークの特徴と溶け込み形状の比較

5. 実験内容および結果

5.1 溶接施工条件の確認

適正な施工条件を確立するため、シールドガスの種類を変えてビードオンプレートによる溶接施工性およびブローホールの評価を実施した。表1にシールドガスの種類および放射線透過試験(RT)判定結果、図5に溶け込み断面形状を示す。

表1 シールドガスの種類とRT判定結果

母材/ 溶接材料	パルス	シールドガス種類	RT結果 JIS Z3104
S32750/ AWS A5.9 ER2594	有	(1) Ar+2%O ₂	1種4類
		(2) Ar+2%CO ₂	1種4類
		(3) Ar+He+CO ₂ 系(3種混合ガス)	1種3類
		(4) Ar+He+CO ₂ +N ₂ 系(4種混合ガス)	1種1類

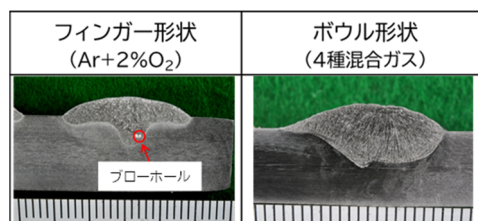


図5 溶け込み断面形状

溶接施工条件の確認の結果、シールドガスにHeを混合させた3種混合ガスおよび4種混合ガスにおいて、ブローホールの発生が少ないことが確認できた。HeはArに比べ電位傾度および熱伝導率が大きいという特徴がある。このことより次のような効果が得られ、ブローホールが減少したと考えられる。

- (1) 溶融池の温度が上昇し、凝固するまでの時間が長くなったことでブローホールの原因ガスを放出しやすくなった。

(2) 溶け込み形状より、中央が深いフィンガー形状から幅広のボウル形状になることでブローホールの原因ガスを放出しやすくなった。

5.2 衝撃特性の評価

上記 5.1 でブローホールの抑制効果があった 3 種混合ガスおよび 4 種混合ガスを用いて継手試験材を作成し、シャルピー衝撃試験片 (JIS Z2242, 10mm×10mm, 2mm-V) による衝撃特性の評価を実施した。表 2 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。

表 2 シャルピー衝撃試験結果

シールドガス	試験温度 (°C)	吸収エネルギー(J)			
		1	2	3	平均
3種混合ガス	20°C	108	121	112	114
	0°C	112	104	112	109
	-20°C	104	108	99	104
4種混合ガス	20°C	157	161	152	157
	0°C	108	152	134	131
	-20°C	130	139	148	139

衝撃試験の結果、3 種混合ガス、4 種混合ガス共に平均 100~150J 程度の吸収エネルギーを有していた。3 種混合ガスのほうが 4 種混合ガスと比較して吸収エネルギーが低い理由として、4 種混合ガスよりもブローホールが多いため吸収エネルギーが低下したと考えられる。図 6 に溶接方法別の衝撃特性の比較を示す。

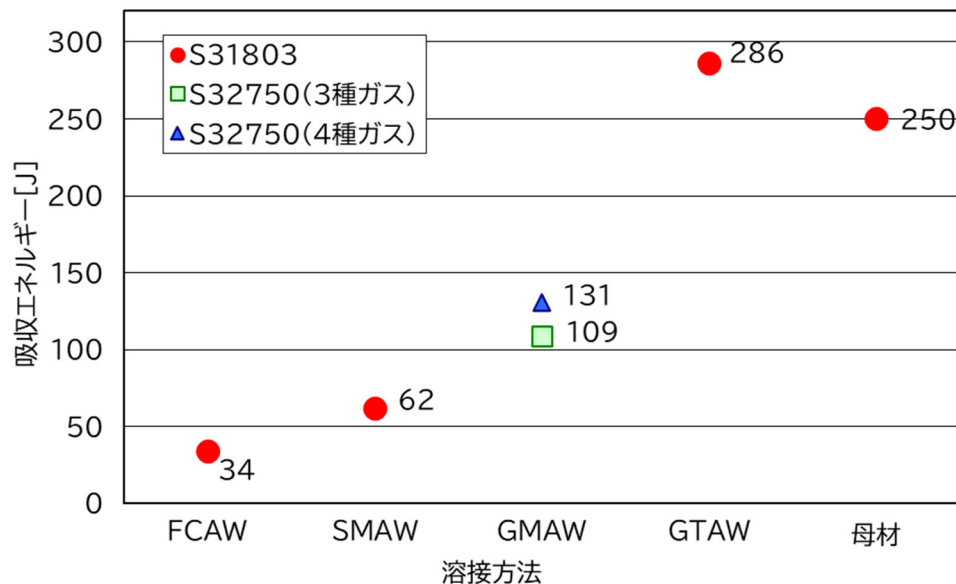


図 6 溶接方法別の溶接金属衝撃特性の比較 (Cv, @0°C)

6. まとめ

二相ステンレス鋼の極厚板領域の溶接施工において、種々の問題が生じ溶接施工の再検討が必要となったが、当時、二相ステンレス鋼の極厚板領域の溶接施工に関しては適用事例も少なかったため、基礎的な評価から実施した。

一例として、衝撃特性の低い FCAW の代替としてソリッドワイヤを使用した GMAW の溶接施工条件確立に取り組んだ。一般に使用されている Ar+O₂、Ar+CO₂ ではブローホールの発生が多く実用には適さなかったが、He を混合することでアークの安定性や溶け込み形状を改善することができ、ブローホールの低減と衝撃特性を改善することができた。

本稿で挙げた二相ステンレス鋼だけでなく、高機能材料や新材料は素材の開発よりもやや遅れて溶接材料や溶接技術が確立される傾向にある。

各メーカーは素材開発だけでなくユーザーの使い方にも着目した材料開発をお願いしたい。

参考文献

- 1) (一社)日本溶接協会化学機械溶接研究委員会：二相ステンレス鋼の溶接施工ガイドライン第四部 図 4.1.1.2：(一社)日本溶接協会
- 2) (一社)日本溶接協会化学機械溶接研究委員会：二相ステンレス鋼の溶接施工ガイドライン第四部 図 4.1.1.3：(一社)日本溶接協会
- 3) 熊田誠，柴田俊夫ほか 13 名：二相ステンレス鋼の上手な使い方 第 6 章：(社)日本材料学会
- 4) 西本和俊，夏目松吾ほか 2 名：ステンレス鋼の溶接 p 84-88：産報出版

<略歴>

山口 陽 平 (やまぐち ようへい)

2004 年 株式会社日立インダストリイズ 生産技術部 入社

2015 年 AWS CWI (Certified Welding Inspector) 取得

2019 年 溶接管理技術者 特別級取得

2025 年 株式会社日立インダストリアルプロダクツ 設計製造改革推進部 主任技師
現在に至る