



技術解説

高性能ステンレス鋼の溶接

中尾嘉邦*

1. はしがき

ドイツ、イギリスにおいて、ステンレス鋼の実用化の端緒が開かれて以来、約70年の歳月が経過したのであるが、この間に多種多様なステンレス鋼が開発され、家庭用品から各種エネルギー関連機器、さらにはスペースシャトルに至るまでその用途が広がっている。吾国における1979年度の生産量は約230万トンで、自由世界の約30%の生産高をあげており、世界一の座を堅持している。ステンレス鋼は文学どおりすぐれた耐食性を有しているのであるが、年々その使用環境条件が苛酷となり、ステンレス鋼といえども万全ではなく、種々の損傷をひきおこしており、特にその溶接部に損傷が集中している。図1¹⁾は化学装置について、過去20数年にわたり損傷例を解析した結果で、腐食損傷の事例では応力腐食割れの事例が約40%を占め、孔食、隙間腐食、局部腐食の範ちゅうに入る事例がそれにつき、約30%となっている。このような経緯をへて最近では、耐応力腐食割れさらには耐食性の優れたステンレス鋼が次々と開発されており、ステンレス鋼製の溶接構造物の信頼性の向上、耐用年数の長期化、経済性の向上が図られつつある。ここでは最近開発された、高純度フェライト系ステンレス鋼、2相ステンレス鋼、高Siステンレス鋼、高Moステンレス鋼、高窒素ステンレス鋼などの高性能ステンレス鋼の特徴を述べるとともに、その溶接上の問題点について解説することにした。

2. 高純度フェライト系ステンレス鋼

1970年代に入って実用化された AOD (アルゴン・酸素脱炭) 法、VOD (真空・酸素脱炭)



図1 化学装置における損傷解析例

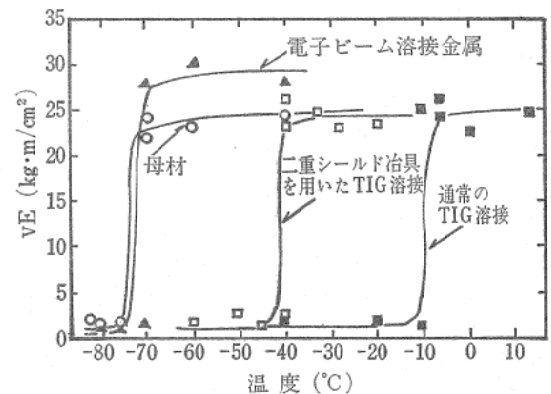


図2 30Cr-2Mo 鋼母材ならびに溶接金属の衝撃試験結果

法、VIM (真空溶解) 法、電子ビーム溶解法などの精錬法を駆使して、炭素、窒素などの不純物元素量を極力低下させ、微量の Nb, Ti, Zr を単独もしくは複合添加した、高純度フェライト系ステンレス鋼が開発された。これらの範ちゅうに入る合金には、最近 JIS に追加された、SUS 430 LX (16~19 Cr, Ti, Nb), SUS 436 L (16~19 Cr, 0.75~1.25 Mo, Ti, Nb, Zr), SUS 444 (17~20 Cr, 1.75~2.5 Mo, Ti, Zr) SUS XM 27 (25~27.5 Cr, 0.75~1.50 Mo), SUS 447 J₁ (28.5~32 Cr, 1.5~2.5 Mo) などがあり、いずれも塩素イオン環境下での耐応

* 中尾嘉邦 (Yoshikuni NAKAO), 大阪大学, 工学部, 溶接工学科, 教授, 工学博士, 溶接工学

力腐食割れ性が極めて良好であるとともに、優れた耐孔食性ならびに耐隙間腐食性を有している。また、炭素、窒素の含有量を低減させた結果、SUS 430に比べ良好な靱性が得られるようになった。このような優れた特性を持っているため、貯湯槽、太陽熱温水器、苛性ソーダ製造プラント、酢酸製造プラントなどに使用されつつある。

本系ステンレス鋼の溶接に際しての一般的な留意事項は、いかにして溶接部の汚染を避けるかということである。開先面、溶接ワイヤ表面の清浄化はもとより、溶接雰囲気への空気への混入にともなう溶接金属の汚染は極力避けなければならない。図2²⁾は、30Cr-2Mo鋼の母材ならびに溶接金属の衝撃試験結果であるが、二重シールド治具を用いず TIG 溶接した場合には、空気の混入により、著るしいぜい化を示す。これに対し、真空中で電子ビーム溶接を行った場合には、空気による汚染がないのでぜい化しない。また、二重シールド治具を用いて、不活性ガスにより溶接部をシールドし、空気の混入を極力避ければ比較的靱性の優れた溶接金属が得られる。空気の混入による溶接金属のぜい化は、18Cr系あるいは26Cr系の高純度フェライト系ステンレス鋼でも顕著に認められる。19Cr-2Mo-0.3Nb鋼の溶接金属のぜい化は、空気の混入により溶接金属中の酸素及び窒素量が増加したことが主原因であるが、図3³⁾に示すように、希土類元素 (REM) を添加することにより、ぜい化を軽減することが可能である。一方、30Cr-2Mo鋼の溶接金属のぜい化は、空気中から混入した窒素がCr₂Nとして{100}面に析出し、素地を硬化させるとともに、壁開き裂の発生、伝播を容易にするためである。30Cr-2Mo鋼の場合にも、図4⁴⁾に示すように、希土類元素の添加が溶接金属の靱性を改善する上で有効である。

溶接金属中の炭素あるいは窒素含有量が増加した場合には、靱性が劣化するばかりでなく、Crの炭化物、窒化物が析出するため、耐食性そのものも劣化する。この意味でも本系ステンレス鋼の溶接に際しては、溶接部の汚染を極力防止しなければならない。

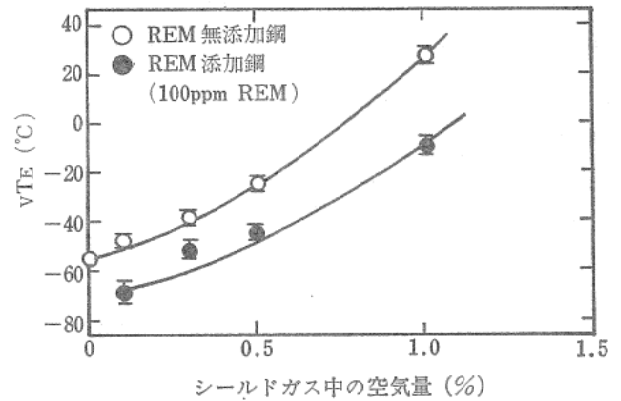


図3 19Cr-2Mo-0.3Nb鋼の溶接金属部の vT_E に及ぼす REM (希土類元素) ならびにシールドガス中の空気の影響

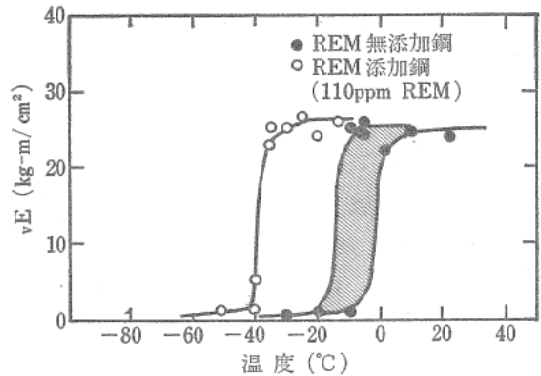


図4 30Cr-2Mo鋼 TIG 溶接金属の衝撃特性に及ぼす REM の影響

また、Cr含有量が多くなってくると、多層溶接の場合、475°Cぜい化も発生しやすくなるので⁵⁾、溶接入熱は低くし、層間温度も100°C以下にすべきである。

3. 2 相ステンレス鋼

本系ステンレス鋼も塩素イオン環境下での耐応力腐食割れ性、耐孔食性、耐隙間腐食性を改善させた鋼種である。21~23% Cr, 1~10% Niなる組成範囲では、フェライト含有量が約40%となるような合金組成で耐応力腐食割れ性は最良となる⁶⁾。耐孔食性は、基本的にはCr, Moの添加により著るしく改善される。Crは不動態皮膜を形成する主要元素であり、強固な不動態皮膜の形成ならびに不動態皮膜の再生能を高めるという点で耐孔食性の改善に寄与している⁷⁾。一方Moは、MoO₄²⁻のイオンとして、不動態皮膜が破壊され、形成された活性金属面

に吸着し、金属の活性溶解を抑制するため、耐孔食性を向上させる働きをするものと考えられている⁷⁾。特に窒素と Mo の複合添加が有効である。その他、Cu、W の添加も有効とされている⁸⁾。代表的な 2 相ステンレス鋼としては SUS 329 J₁ (23~28 Cr, 3~6 Ni, 1~3 Mo) があげられる。一般市販鋼には、NAS 45 M (22.5~25.5 Cr, 4~6 Ni, 1~2 Mo, 0.5~1.5 Cu), DP 3 (24~26 Cr, 5.5~7.5 Ni, 2.5~3.5 Mo, Cu, W), NTKC-1 (21~23 Cr, 4~5.5 Ni), NAR F (24~26 Cr, 5~8 Ni, 1.5~2.5 Mo, 0.10~0.15 N) などがある。これらのステンレス鋼は、海水用熱交換器、船舶用機器、塩素イオン環境下で稼動する化学プラントなどに使用される。

本系ステンレス鋼の溶接についての主要な問題は溶接部、特に溶接熱影響部 (HAZ) の耐孔食性の劣化である。これは溶接部でのオーステナイト量の減少、結晶粒の粗大化、Cr の炭化物、窒化物の析出などに起因する。

SUS 329 J₁ の HAZ におけるオーステナイトの固溶及び析出挙動について検討した結果によれど⁹⁾、図 5 に示すように、1300°C 以上に加熱された領域ではオーステナイト量は、約 35% (母材中) から約 5% にまで減少する。炭素の溶解度の高いオーステナイト量が減少するため、フェライト中の炭素濃度は増加し、オーステナイト-フェライト界面における Cr の炭化物の析出を容易にする結果、HAZ では耐孔食性が劣化する。溶接部の耐孔食性の改善には、オーステナイト量を増加させる窒素の添加が有効である¹⁰⁾。また図 6¹⁰⁾に示すように、微量の B の添加も SUS 329 J₁ の耐孔食性を改善する上で効果のあることが明らかにされつつある。

4. 高 Si ステンレス鋼

Si はオーステナイト系ステンレス鋼の耐応力腐食割れ性、耐酸化性、高温高濃度の硝酸に対する耐食性を改善する効果を有するため、本系のステンレス鋼が開発された。SUS XM 15 J₁ (17~20 Cr, 11.5~15.0 Ni, 3~5 Si) や SUS 302 B (17~19 Cr, 8~10 Ni, 2~3 Si) は代表的な高 Si ステンレス鋼である。

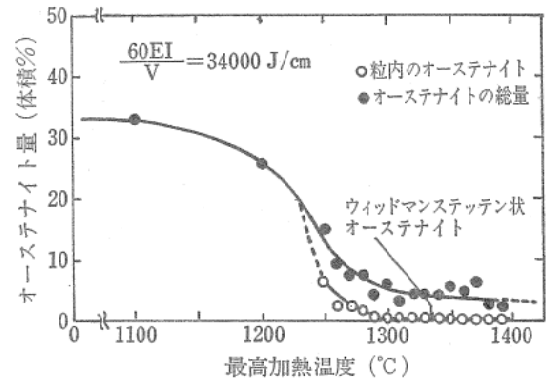


図 5 SUS 329J₁ の HAZ におけるオーステナイトの固溶、析出挙動

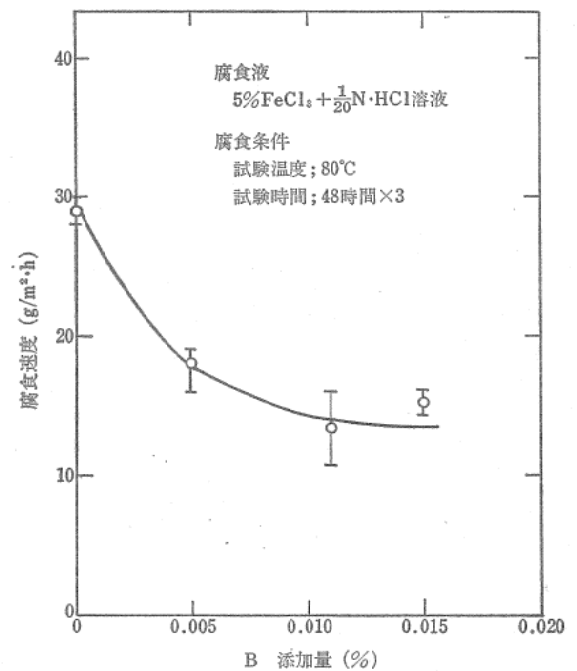


図 6 SUS 329J₁ 再現 HAZ (ピーク温度; 1250°C) 材の耐孔食性に及ぼす B の影響

SUS 302 B は、自動車用排気ガス浄化装置、熱交換器、高温用炉材など、主として耐酸化性を要求される用途に用いられる。一方、SUS XM 15 J₁ は耐熱性ならびに耐食性用途に用いられる。Si の添加量が増加すると、Cr 炭化物の析出が促進されるが、炭素量を減じ、さらに Ti、Nb を添加することにより炭素を Ti、Nb で固定すると、Cr 炭化物の析出を阻止することができ、耐食性の向上を図ることができる。このため、微量の Ti、Nb が添加されることがある。耐酸化性の向上に対しては、Ca 及び

希土類元素の効果が示されている¹¹⁾。

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の高温割れ減受性は、一般的には Si 含有量の増加にしたがって増大する。しかし一方では、割れ感受性は、 δ フェライトの含有量を増加させることにより、改善され得ることも良く知られている。高 Si ステンレス鋼の場合には、数%の δ フェライトを含むように成分調整を行って、割れ感受性の改善を図っている。図7¹²⁾は高温割れ試験の結果で、完全オーステナイト組織の SUS 310 Sにくらべ、SUS XM 15 J₁の高温割れ感受性は相当低下している。また、SUS 302 Bの高温割れ感受性はさらに低く、ほぼ SUS 309 Sに近いレベルとなっている。

5. 高 Mo ステンレス鋼¹³⁾

Mo は前述のような理由で耐孔食性改善効果の顕著な元素である。この Mo の効果を最大限に発揮させ、耐孔食性を向上させたステンレス鋼が高 Mo ステンレス鋼であり、この範ちゅうに入る合金としては、15~20 Cr, 12~20 Ni, 4~6 Mo の低 Cr-Ni 型合金 (SUS 317 J₁) と20~25 Cr, 20~30 Ni, 4~6 Mo の高 Cr-Ni 型合金があげられる。その他耐孔食性を向上させるため、窒素, Cu, Nb, Ti などの元素が適宜添加される場合もある。

低 Cr-Ni 型合金の溶接金属では、共金溶接の場合、耐孔食性を付与するのに必要不可欠な元素である Cr, Mo がデンドライト境界に偏析し、デンドライトの中心部の Cr, Mo 濃度が低下するため、孔食が発生しやすくなる。このような溶接金属の耐食性の劣化を防止するには、1100°C程度の温度で後熱処理をすることが有効である。あるいはさらに耐食性の優れた溶接材料を使用することも孔食の発生を防止する上で有効と考えられている。例えば 20 Cr-18 Ni-6 Mo なる組成のステンレス鋼を溶接する際に、18~23 Cr, 8~10 Mo, 3~4 Nb, 残 Ni なる Ni 系の溶接材料が用いられる場合がある。その他ビード表面のスケールは、孔食を極めて発生しやすくなるので、溶接後必ず除去する必要がある。低 Cr-Ni 型合金の溶接金属では少量の δ フェライトが存在するが、高 Cr-

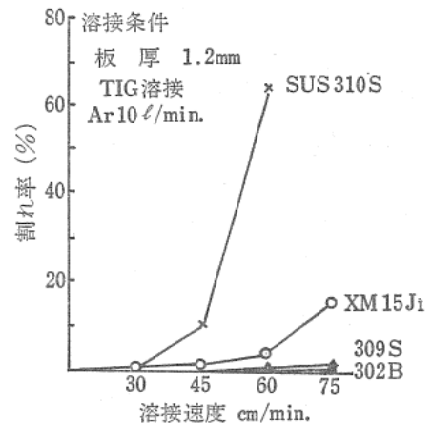


図7 SUS 302B, 309S, XM15J₁, 310Sの高温割れ試験結果

Ni 型合金の溶接金属の組織は完全オーステナイト組織である。しかし、高 Mo ステンレス鋼溶接部の高温割れ感受性は比較的 low、溶接施工上あまり問題とならない。これは Mo が、現象的には凝固せい性温度領域の温度幅を狭しく、結果的に高温割れ感受性を低減させる効果をもつためと考えられている。

6. 高窒素ステンレス鋼

窒素はよく知られているように、オーステナイト安定化元素である。昨今、資源的あるいは経済的な要請から、低 Ni 化が図られており、その代替元素として、窒素が脚光をあびつつある。オーステナイト系ステンレス鋼に窒素を添加した場合、クリープ・破断強さなどの高温における機械的性質を改善することができる。また、極低温においては、降伏応力を著るしく高める効果も有している。さらに窒素は、塩素イオン下における耐孔食性をも向上させる働きがある。このため、現在では、オーステナイト系ステンレス鋼に窒素を添加し、それぞれの用途に適したステンレス鋼の開発がなされている。すなわち、高窒素ステンレス鋼には、耐熱用鋼として、SUS 304 N₁ (18 Cr, 8 Ni, 0.2 N), 304 N₂ (18 Cr, 8 Ni, 0.25 N, Nb), 304 LN (18 Cr, 9 Ni, 0.2 N, 低 C) などが、また耐孔食用鋼として、25 Cr-13.5 Ni-1 Mo-0.35 N-低 C 鋼, 25 Cr-8 Ni-3 Mo-3 Cu-0.2 N 鋼などが、さらには耐熱・耐食用鋼として、SUS 316 N (18 Cr, 12 Ni, 2.5 Mo, 0.2

N), 316 LN (18 Cr, 12 Ni, 2.5 Mo, 0.2 N, 低 C) などがある。

高窒素ステンレス鋼を溶接する場合、窒素含有量が窒素の溶解度に近いと、溶接金属に気孔が発生し、問題となる。このような気孔の防止には、 $[\text{Ar} + \text{CO}_2(12\sim 33\%)]$ ガスをシールドガスとして使用することが有効と考えられている¹⁴⁾。その他、Ti, Zr, Nb, V, Mo, Mn により窒素の溶解度を増大させ、気孔を防止することも検討されている¹⁵⁾。次に高温割れの問題であるが、窒素含有量が多くなると、割れ防止に必要な δ フェライト量が減少するため、割れ感受性が増大する。成分調整を行って、5%以上の δ フェライトを確保することが、溶接金属の高温割れ防止上必要である。溶接金属は母材と異なり、鑄造組織のまま腐食性の環境にさらされる場合が多い。前述したように、耐食性を向上させるのに必要な Cr, Mo は凝固段階でデンドライトの境界に偏析するため、デンドライトの中心部での、Cr, Mo の濃度は低下し、耐食性を劣化させる。また、Cr, Mo の炭、窒化物の析出ならびにそれに伴う固溶窒素の減少も耐食性を阻害する要因となる。このため、高窒素ステンレス鋼においても、溶接部は母材にくらべ一般に耐食性は劣化する。したがって、溶接部の耐食性を改善するには、溶接後熱処理による偏析の軽減ならびに炭、窒化物の析出防止効果や、溶接材料あるいはシールドガスからの窒素の添加効果について今後検討が必要と考えられる。しかし極低温特性、特に極低温における靱性は、 δ フェライト量ならびに窒素含有量が増加するにしたがって劣化するので、耐食性、機械的性質、高温割れ感受性などを勘案の上、溶接金属の成分設計を行わなければならない。

さらに、24 Cr-13 Ni-1 Mo-0.35 N 鋼の溶接金属においては、図 8 に示すように¹⁰⁾、700°C ~ 1000°C の温度範囲、特に 850°C 近傍の温度において、短時間の間に δ フェライトが σ に変態し、靱性が著るしく劣化するので、多層盛溶接や溶接後熱処理などにおいては、十分な注意が必要となる。

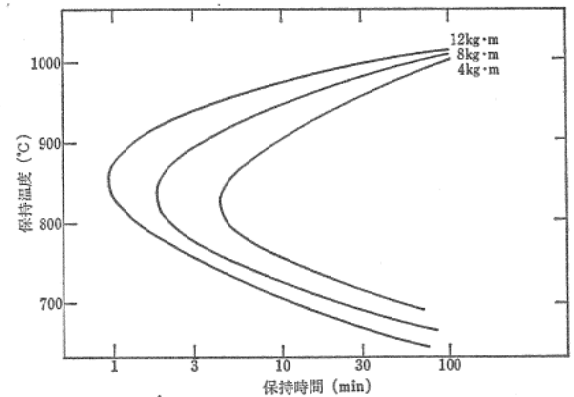


図 8 25Cr-13Ni-1Mo-0.35N 鋼溶接金属の等ぜい化曲線

7. む す び

高性能ステンレス鋼は、今後高速増殖炉、核融合実験装置、極低温用各種機器等、極めて苛酷な条件下で、しかも従来例をみないような高い信頼性を要求される分野にも利用されることが予想される。このような場合、母材もさることながら溶接部に問題点が集約されることが多い。したがって、高性能ステンレス鋼の飛躍的な発展を図るためには、溶接部に焦点を絞って多角的な方面からの研究開発が望まれる次第である。

参 考 文 献

- 1) 武川, 三木, 石丸; 化学工学, 44—3 (1980), 128.
- 2) 井川, 中尾, 西本, 寺島; 溶接学会誌, 48—12 (1979), 1054.
- 3) 中尾, 西本; 高純度 19Cr—2 Mo 鋼の溶接金属のぜい化と REM 添加によるその改善, 溶接学会溶接冶金研究委員会資料, WM—749—80 (1980).
- 4) 中尾, 西本, 寺島; 溶接学会誌, 50—5 (1981), 508.
- 5) 中尾, 西本; 高純度 30Cr—2 Mo 鋼溶接部のじん性, 溶接協会化学機械溶接研究委員会資料, (1981).
- 6) 鈴木, 長谷川, 渡辺; 日本金属学会誌, 32—11 (1968), 1171.
- 7) 小川, 細井, 伊藤, 岡田, 中田; 製鉄研究, 292 (1977), 12246.
- 8) T. Suzuki and Y. Kitamura; Corrosion, 28—1 (1972), 1.
- 9) 中尾, 西本, 井上; 溶接学会誌, 50—5 (1981), 514.
- 10) 中尾, 西本; 未発表.
- 11) 飯泉, 衣笠, 藤原; 鉄と鋼, 63—5 (1977), 715.
- 12) 西間; 溶接学会誌, 50—3 (1981), 240.
- 13) 斉藤; 溶接学会誌, 50—3 (1981), 251.
- 14) 井上, 佐藤; 日本金属学会会報, 17—3 (1978), 244.
- 15) 小川, 財前; 溶接学会誌, 50—3 (1981), 246.