

PWHT 対応フラックス入りワイヤ TRUSTARC™ DW-A61LSR・TRUSTARC™ DW-A62LSR の開発

井元 雅弘^{*1)} 名古 秀徳^{*2)} 岡崎 喜臣^{*3)} 北川 良彦^{*4)}
高和 真名^{*5)} 笹倉 秀司^{*4)} 永見 正行^{*4)} 加納 覚^{*4)}

1. はじめに

溶接施工後、溶接によって導入された残留応力を低減し、じん性や疲労特性を向上させることを目的に溶接後熱処理 (Post weld heat treatment, 以下 PWHT という) が球形タンクや圧力容器など構造物の建造において行われる。近年のエネルギー需要増大に伴ってこれら構造物は大型化が進み、また高圧力環境で使用される傾向にあり、適用される鋼材の高強度化も進んでいる。鋼材の高強度化に伴って、溶接材料もより高強度のものが要求されることに加え、溶接施工の高効率性から、全姿勢の溶接性に優れたルチール系フラックス入りワイヤ (Flux-cored Wire, 以下 FCW という) が要望されている。一方、引張強さ 610 MPa 級鋼 (以下、HT610 という) 用以上の従来のルチール系 FCW による溶接金属では、PWHT 後じん性が大きく低下する課題があった。PWHT 後のぜい化の従来知見として、引張強さ 550 MPa 級鋼用以下の溶接金属では、不純物元素の Nb, V が炭化物を形成して析出硬化を起こすことが一因であると考えられていた⁽¹⁾。しかしながら、これら不純物元素を低減するだけでは、HT610 級鋼用以上の溶接金属は、PWHT 後に十分なじん性が得られず、さらなる組織制御によるじん性向上が必要であった。

また、油井管や LPG タンクなどのサワーガス環境下では、硫化水素が原因となって、硫化物応力腐食割れ (Sulphide Stress Corrosion Cracking, 以下 SSCC という) が問題となる。これに対し、米国防蝕技術協会 (National Association

of Corrosion Engineers, 以下 NACE という) の規格では (NACE MR0175), 溶接金属中の Ni 含有量が 1% 未満に規制されている。そのため、NACE 規格対応のためには Ni 添加量を抑制した上で、PWHT 対応可能な溶接金属を開発する必要があった。本報では、新たに開発した高張力鋼用 PWHT 対応高じん性 FCW の設計の考え方と各種性能を紹介する。

2. 開発技術

(1) 粒界脆化の抑制

PWHT 後のシャルピー試験片の破面では旧オーステナイト粒界に沿った粒界破壊が観察されており、PWHT 後、粒界破壊が助長されることで、吸収エネルギーの低下が生じたと考えられた⁽²⁾。PWHT 後の組織変化として、図 1 に示すように旧オーステナイト粒界上に粗大な炭化物 (セメントライト) が析出し、図 2 に示すように、旧オーステナイト粒界の炭化物サイズが大きくなるほど -40°C の吸収エネルギーが低下する傾向が見られた。そのため、これらの炭化物が粒界破壊の起点となる可能性が示唆された。また、P などの不純物偏析が PWHT 中に促進されると考えられ、PWHT 後のじん性確保のため、粒界炭化物の微細化と不純物偏析を抑制するための合金元素設計を行った。炭化物形成挙動について

旧オーステナイト粒界

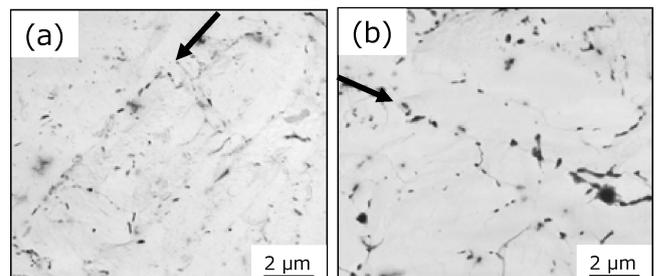


図 1 (a) 溶接ままと (b) PWHT 後の TEM 観察組織⁽²⁾。

* 神戸製鋼所
材料研究所：1) 研究員, 2) 主任部員, 3) 所長
溶接事業部門：4) 主任研究員, 5) 研究員
Development of Flux Cored Wire for PWHT “TRUSTARC™ DW-A61LSR” and “TRUSTARC™ DW-A62LSR”; Masahiro Inomoto, Hidenori Nako, Yoshitomi Okazaki, Yoshihiko Kitagawa, Mana Takawa, Shuji Sasakura, Masayuki Nagami, Satoru Kano (KOBE STEEL, LTD.)
2022年11月1日受理 [doi:10.2320/materia.62.122]

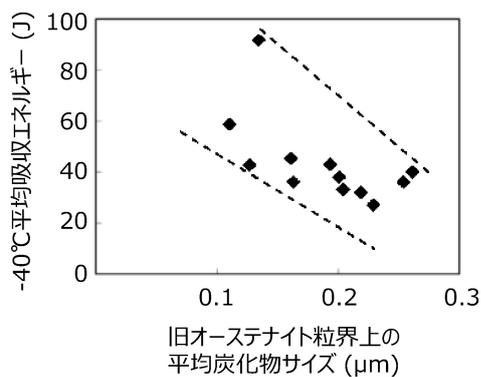


図2 旧オーステナイト粒界上の平均炭化物サイズと-40°C平均吸収エネルギーの相関⁽²⁾。

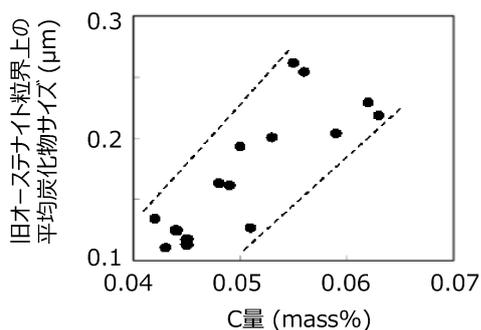


図3 C量と旧オーステナイト粒界上の平均炭化物サイズの相関⁽²⁾。

は、Cおよび主要な炭化物形成元素であるMoに着目した。

図3にC量と旧オーステナイト粒界上の炭化物サイズとの関係を示すが、C量増加により炭化物サイズが粗大化することがわかる。C量の低減は炭化物サイズの微細化の観点から有効と考えられる一方で、過剰なC量の低減は溶接金属の焼入れ性低下により、粗大な粒界フェライトを形成して、溶接ままのじん性低下を招くため、0.04%以上の設計とした。

図4にMo量と炭化物サイズの相関および-40°C吸収エネルギーの関係を示す。Moを添加することで、炭化物サイズが微細化する傾向にある。しかしながら、0.4%を超えると吸収エネルギーの低下が顕著となった。図5に0.2%と0.6%MoにおけるTEM観察像を示す。0.6%Moにおいては、マトリクス中に微細なMo₂Cが増加し、2次硬化によるぜい化の影響が作用した結果と推察され、Mo添加量は0.4%以下にすることが望ましいと考えられる。

SiおよびMnはPの粒界偏析を助長するという知見⁽³⁾および強度とじん性とのバランスの観点から、従来材からSi、Mnの添加量を低減することで、Niが1%以上の成分系(2.5%Ni系)の設計を確立した。

(2) 低温強度の上昇抑制

Niは低温じん性改善に有効な元素と知られており、そのメカニズムとして低温で固溶軟化⁽⁴⁾することが報告されている。Ni代替可能な元素を検討し、PWHT後の溶着金属を用いて低温引張試験の降伏挙動を評価した。図6はCuフリー材とCu添加材の-120°Cと室温の上降伏応力の差を整理したものであり、同じNi添加量(0.9%)であっても、Cu添加

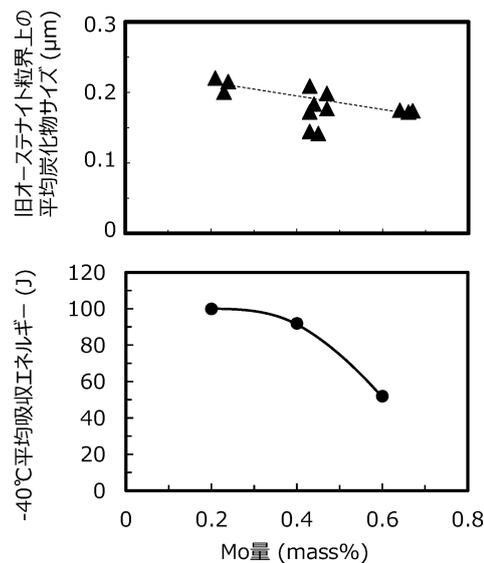


図4 Mo量と旧オーステナイト粒界上の炭化物サイズおよび吸収エネルギーの相関⁽²⁾。

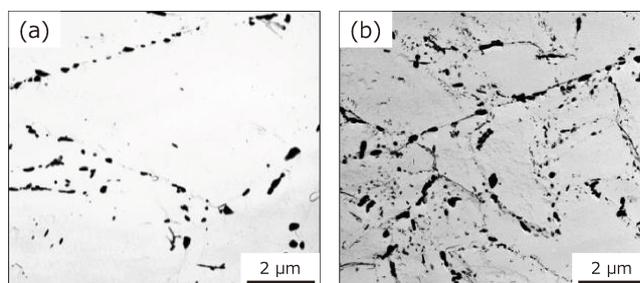


図5 Mo量(a)0.2%および(b)0.6%の溶接金属のPWHT後TEM観察組織⁽²⁾。

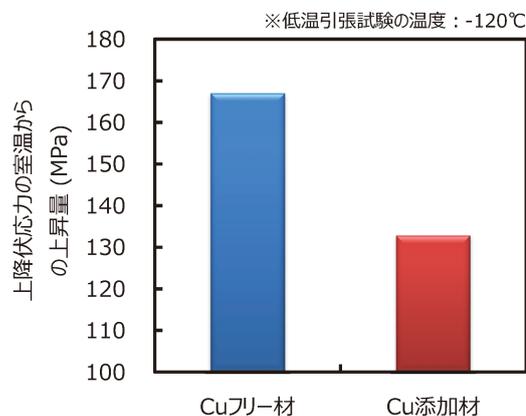


図6 Cu添加による低温の強度上昇抑制効果。

によって低温における上降伏応力の上昇を抑制する効果があることを見出した。このCu添加の効果を活用することで、Niが1%未満の成分系での最適合金元素成分の設計を行った。

3. 開発材の諸特性

本技術を適用してHT610MPa級鋼用の溶接ワイヤとしてNACE規格対応のTRUSTARC™ DW-A61LSR(Ni<1%)

表1 溶着金属の化学成分(mass%)⁽⁵⁾.

ワイヤ銘柄	C	Si	Mn	P	S	Ni	その他
TRUSTARC™ DW-A61LSR	0.05	0.16	1.39	0.007	0.004	0.92	Cu, Mo, Ti, B
TRUSTARC™ DW-A62LSR	0.05	0.14	1.29	0.007	0.008	2.59	Mo, Ti, B

表2 溶接条件.

平均入熱	1.2 - 1.4kJ/mm
シールドガス	Ar+20%CO ₂
予熱温度	90 - 110℃
パス間温度	140 - 160℃

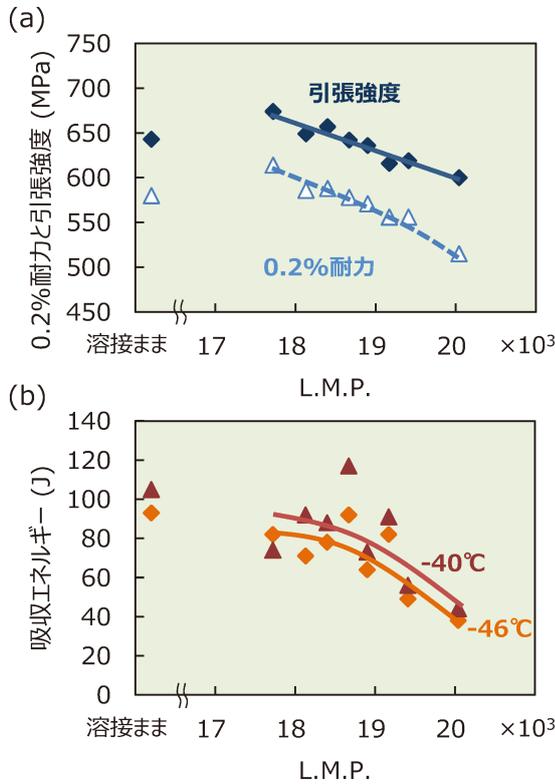


図7 TRUSTARC™ DW-A61LSR における L.M.P. と (a) 強度, (b) 吸収エネルギーの相関⁽⁵⁾.

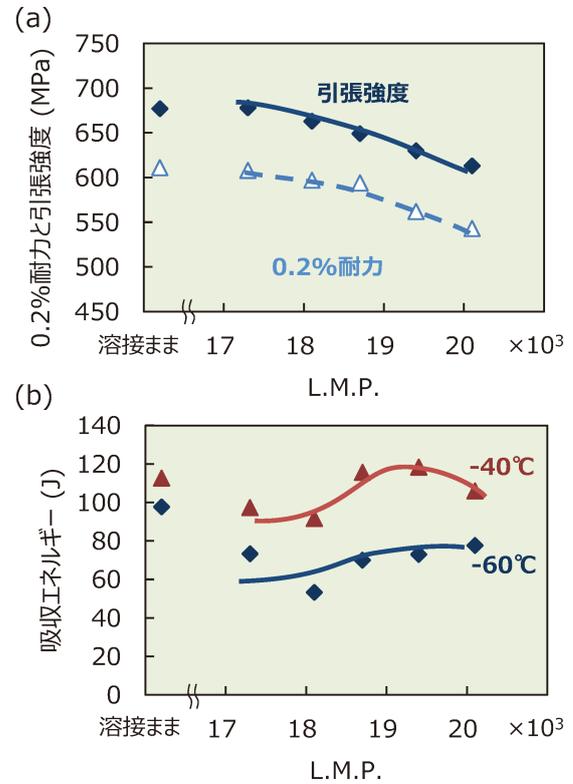


図8 TRUSTARC™ DW-A62LSR における L.M.P. と (a) 強度, (b) 吸収エネルギーの相関⁽⁵⁾.

と高じん性タイプの TRUSTARC™ DW-A62LSR (Ni ≧ 1%) の 2 種類のワイヤを開発した。PWHT 後の溶着金属の特性を以下に紹介する。表 1, 2 に開発ワイヤで作製した溶着金属の化学成分および溶接施工条件を示し, 図 7, 8 に Larson Miller Parameter (L.M.P.) と強度の相関および L.M.P. とシャルピー吸収エネルギーの相関を示す⁽⁵⁾。いずれのワイヤ銘柄も溶接ままおよび L.M.P. = 18.7 × 10³ 以下に相当する PWHT 後で, 引張強度は 620 MPa (90ksi) を満足できる。また, PWHT 後も -40℃ において良好な吸収エネルギーを示しており, PWHT 後の低温じん性確保が達成できていることがわかる。また Cu 添加による SSCC 特性への影響についても確認した。表 3 は, Ni 添加量 (0.9%) を揃えて, Cu フリー材と Cu 添加材の溶接ままと PWHT 後の溶着金属における SSCC 特性を NACE TM0177 Method B に準拠し, 評価した結果である。なお PWHT 条件は, L.M.P. = 18.7 × 10³ 相当の条件とした。80% AYS (Actual yield stress) の応力を負荷した条件で, いずれもクラックの発生は無く, 実用上十分な耐 SSCC 特性を有することを確認した。

4. 特許および実用化状況

PWHT 後も機械的特性に優れた高強度 FCW を開発し,

表3 溶接ままと PWHT 後の溶着金属の SSCC 試験結果.

クラック発生判定	
Cu フリー材	○
Cu 添加材	○

※○: クラック無し

海洋構造物をはじめとして, 低温タンクなどのエネルギー分野に適用可能な溶接材料として, 適用拡大が期待される。本報で紹介した PWHT 対応 FCW に関連する特許は特許 6399983 号, 特許 6399984 号の 2 件が登録されており, 特開 2022-97255, 特開 2022-97256 の 2 件が公開されている。

文 献

- (1) 細井宏一, 平田好則: 溶接学会論文集, **34**(2016), 81-92.
- (2) 北川良彦, 笹倉秀司, 井元雅弘, 名古屋秀徳, 岡崎喜臣: 神戸製鋼技報, **67**(2018), 11-15.
- (3) 例えば, 亀田 純: 日本金属学会会報, **19**(1980), 595-603.
- (4) 前野圭輝, 田中将己, 吉村信幸, 白幡浩幸, 潮田浩作, 東田賢二: 鉄と鋼, **98**(2012), 667-674.
- (5) <https://www.kobelco.co.jp/welding/industries/offshore-structure.html>