

表層硬さ厳格仕様耐サワーラインパイプ

Grade X65 Linepipe with Low Surface Hardness for Severe Sour Environment

嶋村 純二 SHIMAMURA Junji JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (課長)
伊木 聡 IGI Satoshi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長 (理事)・博士 (工学)
田村 雄太 TAMURA Yuta JFE スチール スチール研究所 圧延加工プロセス研究部 主任研究員 (副課長)

要旨

硫化水素 (H₂S) を含む湿潤サワー環境における硫化物応力腐食割れ抵抗 (耐 SSC 性能) に優れた, X65 級耐サワーラインパイプ用鋼を開発した。合金成分と制御圧延条件の最適化および *Super-OLAC*[®]-A (On-Line Accelerated Cooling) による制御冷却技術の適用により, 板厚 30 mm 以上の厚鋼板において YS450 N/mm² を超える高強度と高靱性, 耐 SSC 性能の両立を達成した。*Super-OLAC*-A の冷却の均一性と冷却速度の高精度コントロールにより, パイプ成形後の内表面をグラニューラーベイナイト主体の組織とし, 安定的に表層硬さを低減することが可能となった。開発鋼は, 16 bar の高圧 H₂S 分圧の条件でも, 小型 4 点曲げ試験および実管試験で優れた耐 SSC 性能を達成した。

Abstract:

Grade X65 linepipe steel plate with excellent SSC resistant properties for H₂S sour service has been developed. Optimized alloy design and controlled rolling conditions and the cooling process using *Super-OLAC*TM-A (On-Line Accelerated Cooling) are applied to achieve a high strength and high toughness steel with uniform low surface hardness. By improving cooling uniformity as well as surface cooling rate control, homogeneous granular bainite microstructure is obtained, resulting in stable low surface hardness. UOE pipes using the developed steel plates achieved superior SSC resistant properties in the small scale four-point bend (4PB) test and full ring test even in 16bar H₂S high pressure conditions.

1. はじめに

硫化水素 (H₂S) を含む天然ガス (サワーガス) を輸送するパイプラインに用いられる耐サワーラインパイプには, API X65 級 (YS450 N/mm² 以上) の高強度鋼が広く用いられており, 強度, 靱性に加え水素誘起割れ (Hydrogen induced cracking: HIC) や硫化物応力腐食割れ (Sulfide stress cracking: SSC) に対する十分な耐性が要求される。そのため, 高強度の X65 級耐サワーラインパイプに用いられる厚鋼板は, HIC の起点となる介在物や偏析を極限まで低減し, さらにマイクロ組織を均一で微細なベイナイト組織とすることで強度, 靱性と耐 HIC 性能を両立させている^{1,2)}。一方, 鋼材が硬くなるほど SSC 感受性が高まることが報告されており^{3,4)}, サワー環境で使用されるラインパイプには硬さの上限値が規定されている⁵⁾。近年, サワー環境の過酷化やパイプラインの高圧操業のため, 従来標準の 1 bar を超える H₂S 分圧の過酷なサワー環境でラインパイプが使用されるようになってきている。このような流れの中で, 2000 年代

に製造されたラインパイプを用いたサワーガス輸送パイプラインで SSC による事故が発生したことから, 制御圧延・制御冷却プロセス (Thermo-mechanical control process: TMCP) で製造される厚鋼板を用いたラインパイプの耐 SSC 性能を再評価する動きが出てきており⁶⁻⁸⁾, これまで高圧の厳格サワー環境下における適切な評価方法の検討や SSC メカニズム, 腐食に関する多くの研究が行われている⁹⁾。

1970 年代以降, 圧延後の加速冷却プロセスの発展により冷却速度の高速化を達成し, より厚肉の鋼板でも高強度と高靱性を得ることができるようになった¹⁰⁻¹²⁾ が, 一方で冷却速度が速いことで表層硬度が高くなり, SSC の危険性が高まるという課題が生じた。SSC の挙動に対する硬度の影響は, これまで主に, 焼入れ焼戻しされ比較的強度が高い油井管製品 (OCTG), もしくは局所硬度が増す可能性のある溶接部で調査されてきた^{13,14)}。しかし, 耐サワーラインパイプに用いる厚鋼板は, 強度は OCTG 製品よりも低いものの, 一般的な加速冷却では表層部の硬度が高くなる場合があり, SSC との関連性が議論されるようになった^{6,7)}。近年の過酷なサワー環境において SSC のリスクを最小限に抑えるには, 過度の表層高硬度化を抑え, 鋼板全体に均一な

2020 年 3 月 10 日受付

表層硬度分布を確保するための、高精度な冷却制御技術が必要となっている。

JFE スチール西日本製鉄所では、冷却の均一性と冷却速度の高精度コントロールを可能とする制御冷却技術 *Super-OLAC[®]-A* を 2011 年に導入し、多種多様な高性能鋼板およびラインパイプ用鋼板に適用してきた¹³⁾。*Super-OLAC-A* を用いることにより、鋼板表層部を軟質なグラニューラーベイナイト主体組織とし、鋼板全面にわたり安定的に表層硬さを低減することが可能となった。本報告では、はじめに H₂S 分圧が従来標準の 1 bar を超える過酷なサワー環境に対応した耐 SSC 性能を達成するための材料設計指針を示す。次に、高圧 H₂S 環境においても耐 SSC 性能に優れた X65 級耐サワーラインパイプ用鋼を開発したので、その耐 SSC 性能を中心に報告する。

2. 耐 SSC 性能達成のための材料設計指針

2.1 材料設計指針

耐サワーラインパイプの設計では、SSC を回避するため、材料には NACE MR0175/ISO 15156-1 規格に示されるような硬度制限があり、炭素鋼や低合金鋼では 22 HRC (約 250 HV10) の硬度上限が規定されている⁵⁾。また、一般的なラインパイプの規格である API Spec 5L には、パイプ内外面の表面から 1.5 mm の位置が 250 HV10 以下であることが規定されている。これらの硬さ規定は多くの耐サワーラインパイプに適用され、従来の 1 bar 以下の H₂S 環境の試験においては SSC に対する安全性が実証されてきた。しかし、1 bar を超える厳しい H₂S 環境における SSC 試験はこれまでほとんど行われておらず、材料の適合性に不明な点が多い。一方、近年のパイプラインの SSC 事故以来、TMCP で製造するラインパイプの極表層領域の硬化部形成に焦点が当てられるようになった。より表面側の表層 0.25~0.5 mm 位置の断面硬さを測定することは、従来の 10 kg の荷重では圧痕サイズが大きく困難であるため、0.1 kg や 0.5 kg の低荷重で測定することが提案されている。ここでは、パイプの極表層部の組織と硬さに着目し、1 bar を超える H₂S 環境での耐 SSC 性能との関係解明を試みた。

図 1 に鋼板の板厚中心位置及び鋼板表面の加速冷却時の温度履歴の模式図を示す。一般的に、加速冷却は鋼板を表面から水で冷却するプロセスであり、鋼板表層の方が板厚中心よりも冷却速度が速くなる。従って、表層硬さを低くするためには表層部の冷却速度の制御が重要となる。図 2 に表層冷却速度と X65 級耐サワーラインパイプ用鋼のマイクロ組織の関係を CCT 模式図上に示す。冷却速度が 200°C/sec を超える高い冷却速度では硬質のラスベイナイト (Lath bainite: LB) 主体組織となり、50°C/sec を下回る低い冷却速度では軟質なグラニューラーベイナイト (Granular bainite: GB) 主体組織となる。図 3 に表層 0.25 mm 位置の LB 組織

と GB 組織の典型的なマイクロ組織を示す。図 4 に鋼板の表層冷却速度と最大硬さ HV0.1 との関係を示す。硬さはピッカース硬さを測定するが、通常の 10 kg の荷重では圧痕サイ

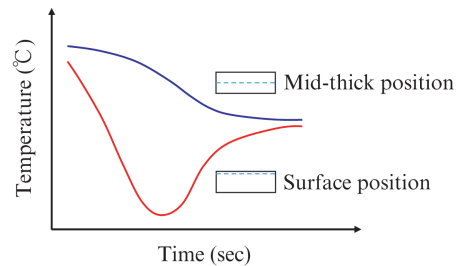


図 1 鋼板の加速冷却における温度履歴の模式図
Fig. 1 Schematic illustration of cooling curve in steel plate

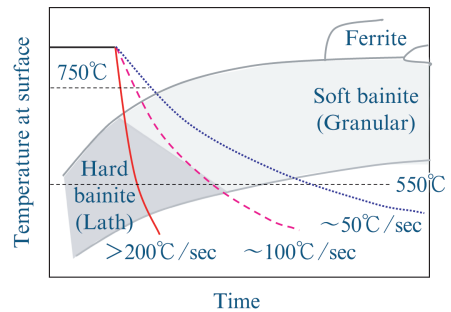


図 2 X65 級耐サワーラインパイプ用鋼の CCT 模式図
Fig. 2 Schematic illustration of CCT diagram of X65 sour linepipe steel

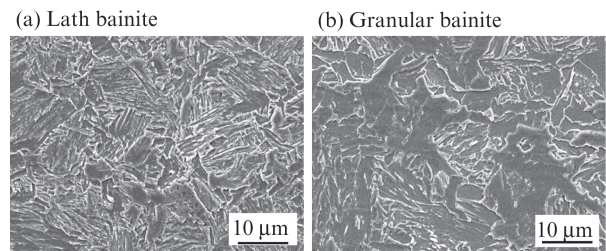


図 3 表層マイクロ組織例
Fig. 3 Typical surface microstructure of (a) lath bainite and (b) granular bainite

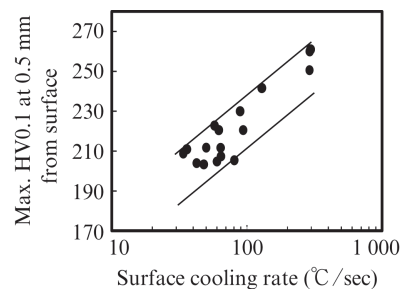


図 4 X65 級厚鋼板の表層冷速と硬さの関係
Fig. 4 Relationship between surface cooling rate and maximum surface hardness in grade X65 steel plate

ズが大きく極表層部の測定は困難なため0.1 kgの荷重とした。冷却速度が遅いほど、表層硬さを低くできることが分かる。

2.2 冷却速度と表層組織及び硬さの関係

異なる冷却速度の鋼板を用いて製造されたパイプの、詳細なマイクロ組織観察を実施した。図5に冷却速度が表層マイクロ組織に及ぼす影響を示す。X65級耐サワーラインパイプ用鋼では、通常、表層マイクロ組織はベイナイト組織を形成する。ベイナイト組織は、一般的にはラス状に形成したベイニティックフェライト (Bainitic Ferrite: BF) を基相とし、BF界面に炭化物が析出するか、もしくは析出のないものを上部ベイナイト (Upper bainite), BF粒内に炭化物が析出するものを下部ベイナイト (Lower bainite) と分類することが多い¹⁵⁾。しかし、ラインパイプ用鋼のような低炭素鋼においては、冷却速度が遅い場合にBFが粒状 (Granular) に成長することから、ここではBFの形態によってラスベイナイト (LB) とグラニューラーベイナイト (GB) に分類する。冷却速度が200°C/sec以上の場合はLBがほとんどであり300 HV以上の高硬度であるが、約100°C/secになると、LBにGBが混在した組織となり硬さが低下する。さらに、50°C/sec以下の低い冷却速度となるとGBがほとんどであり硬さはさらに低下している。図6に、冷却速度が異なる3種類の鋼板を用いて製造されたパイプの硬度分布の例を示す。100°C/sec以上の高い冷却速度の鋼板を用いたパイプは、板厚方向と幅方向ともに広い領域で高硬度を示す傾向がみられた。一方、冷却速度が50°C/sec以下の場合、板厚方向と幅方向ともに広い領域で低硬度を示した。特にこの低い冷却速度では表層0.25 mm位置において硬さが安定的に250 HV0.1を下回っている。これらのパイプを用いて、4点曲げSSC試験及び実管SSC試験を実施した。

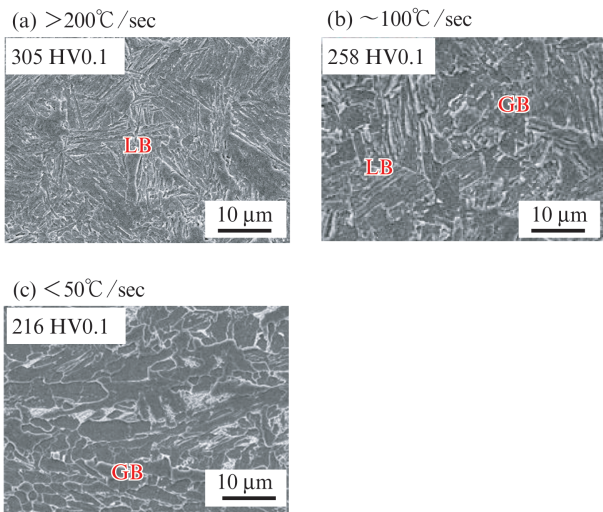


図5 表層組織に及ぼす冷却速度の影響

Fig. 5 Effect of surface cooling rate on surface microstructure

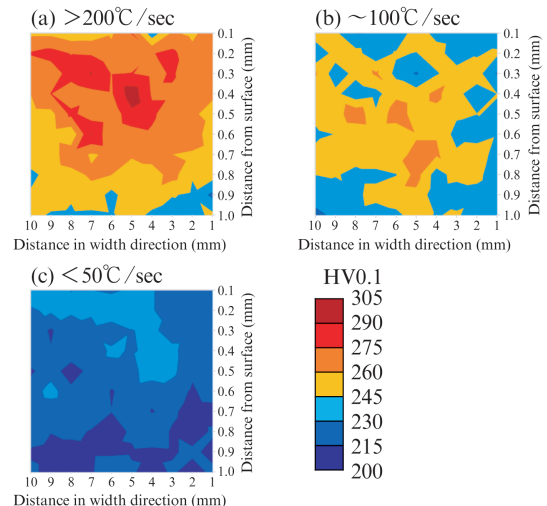


図6 表層硬さ分布に及ぼす冷却速度の影響

Fig. 6 Surface hardness distribution in three different cooling rates of steel pipe

3. X65級耐サワーラインパイプの耐SSC性能

3.1 4点曲げSSC試験

3.1.1 実験方法

耐SSC性能を評価するため、NACE TM0316規格¹⁶⁾に準拠し、様々なH₂S分圧条件下で4点曲げSSC試験を実施した。供試材は前節で示した3つの異なる表層冷却速度の鋼板を用いてUOEプロセスで製造した管厚30 mm、外径711.2 mmのX65級耐サワーラインパイプであり、外面コーティングでの熱履歴に相当する250°Cで1時間の時効処理を施した後、パイプ内表層から4点曲げ試験片を採取した。SSC試験条件を表1に示す。NACE TM0177 A溶液¹⁷⁾を使用した試験では、H₂S分圧は1~16 barの範囲とした。H₂S分圧が8 barおよび16 barの条件では、5 barのCO₂との混合ガスを使用した。NACE TM0177 B溶液¹⁷⁾を使用した試験では、H₂S分圧は0.07~0.13 barの範囲とし、CO₂を混合して総ガス圧は1 barとした。図7に4点曲げSSC試験の治具の模式図を示す。パイプ内表面側を4点曲げの引張側にセットし、負荷応力は、実YSの90%とした。試験時間は

表1 4点曲げSSC試験条件

Table 1 Four-point bend test conditions

Test solution (NACE TM0177)	pH (Ini./Fin.)	Partial pressure (bar)		Duration (hr)
		H ₂ S	CO ₂	
Solution A (5.0 wt%NaCl + 0.5 wt%CH ₃ COOH)	2.6 to 2.8 /4.0	1	-	720
		8	5	
		16	5	
Solution B (5.0 wt%NaCl + 2.5 wt%CH ₃ COOH + 0.41 wt%CH ₃ COONa)	3.4 to 3.6 /4.0	0.07	0.93	720
		0.1	0.9	
		0.13	0.87	

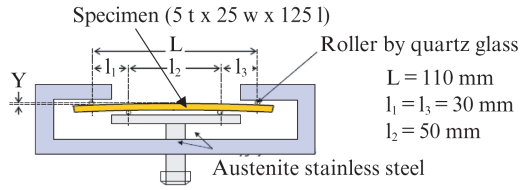


図7 4点曲げSSC試験の治具模式図

Fig. 7 Schematic illustration of four-point bend loading jig

720時間とし、試験終了後の試験片の中央部を切断、研磨し、割れの有無を評価した。また、同じ切断した試験片を用いて表層下0.25 mm位置での硬さ(HV0.1)を測定し、20点測定 of 最大値で評価した。

3.1.2 実験結果および考察

図8に4点曲げSSC試験結果を示す。各試験片の表層硬さの最大値及びH₂S分圧(pH₂S)と割れの有無を示している。1 bar以上のH₂S分圧の場合、4点曲げSSC試験で割れが発生しない表層硬度の限界は約250 HV0.1であった。0.13 barの場合、表層硬度の限界は約270 HV0.1であり、0.07 barでは、SSC発生は見られなかった。また、SSC発生は、200°C/secを超える高い冷却速度のサンプルでのみ見られた。前章に示したとおり、200°C/secを超える高い冷却速度のサンプルは、板厚方向(約1 mm)と幅方向(約10 mm)の広い領域で250 HV0.1を超える高硬度を示したことから、SSCが発生すると厚み方向にき裂が伝播しやすいと考えられる。

実験の結果、1 bar以上のH₂S分圧条件下でLB組織の体積分率が增加すると、パイプ内面の表層硬度が高くなり、SSCが発生しやすくなることが明らかとなった。また、1 bar以上のH₂S分圧条件の場合、LB組織を抑制しGB組織主体とすることで、表層0.25 mm位置の硬さが250 HV0.1以下となり、良好な耐SSC性能が得られることが分かった。

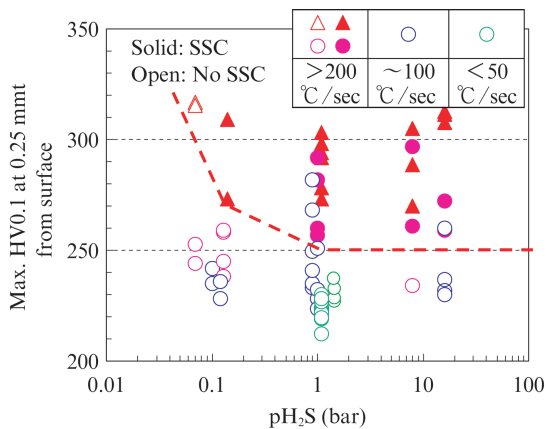


図8 4点曲げSSC試験におけるSSC発生有無に及ぼすH₂S分圧と表層硬さの影響

Fig. 8 Effect of H₂S partial pressure and surface hardness on SSC by four-point bend test

3.2 実管SSC試験

3.2.1 実験方法

実管での耐SSC性能を評価し、また小型4点曲げ試験との相関を調査するため、実管SSC試験を実施した。供試材は、異なる表層硬さを有する、4点曲げSSC試験と同じ管厚30 mm、外径711.2 mmのX65級耐サワーラインパイプである。H₂S分圧は1 barおよび16 barとし、BS8701規格¹⁸⁾に基づき試験した。実管SSC試験の試験溶液およびH₂S分圧条件を表2に示す。NACE TM0177 A溶液を使用し、H₂S分圧16 barの試験では、5 barのCO₂との混合ガスを用いた。図9に実管SSC試験における応力荷重方法の模式図を示す。供試材は250°Cで1時間時効処理を施し、ショットブラストにより表面スケールを除去した。表3に鋼板製造時の表層冷却速度、パイプ内面の表層硬さ、そして実管SSC試験条件を示す。負荷応力は試験パイプの内面に添付した歪ゲージ

表2 実管SSC試験溶液およびH₂S分圧条件
Table 2 Test solution and H₂S pressure condition

Test solution (NACE TM0177)	pH (Ini./Fin.)	Partial pressure (bar)		Duration (hr)
		H ₂ S	CO ₂	
Solution A (5.0 wt%NaCl + 0.5 wt%CH ₃ COOH)	2.6 to 2.8 /4.0	1	-	720
		16	5	

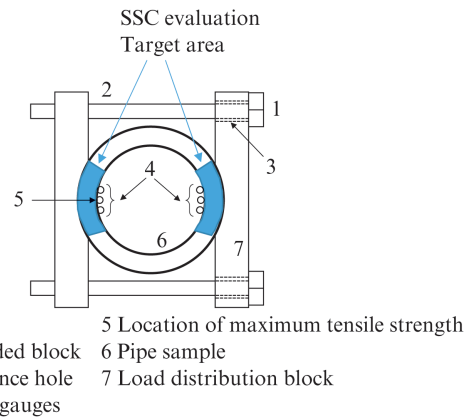


図9 実管SSC試験における応力荷重方法の模式図

Fig. 9 Schematic illustration of full ring SSC test

表3 実管SSC試験条件
Table 3 Full ring SSC test matrix

Steel	Cooling rate at surface (°C/sec)	HV0.1 max. at 0.25 mm	Applied stress (MPa)	
			1 bar H ₂ S	16 bar H ₂ S + 5 bar CO ₂
A1, A2	<50	234	360	360
B	<50	243	465	-
C	>200	293	458	-

ジで測定し、規格下限降伏応力の80%から、実際の降伏応力の80%に相当する応力までのいずれかの条件とした。

3.2.2 実験結果および考察

表4に実管SSC試験結果を示す。各サンプルのパイプ内表層0.25mm位置のHV0.1の最大値およびH₂S分圧条件、負荷応力も合わせて示す。表層硬さの低いパイプA1とA2ではそれぞれ1bar、16barのいずれの条件でもSSCは見られなかった。図10にパイプA1の、図11にパイプA2の試験後のパイプ内表層の外観およびパイプ長手中央の表層のマイクロ組織を示す。16barの高圧条件でやや腐食量が多い傾向が見られたがSSCは発生していない。同じく表層硬さの低いパイプBでは、負荷応力が高い条件においても、図12に示すようにH₂S分圧1barでSSCは見られなかった。一方、表層硬さの高い250HV0.1超えのパイプCでは、図13に示

表4 実管SSC試験結果
Table 4 Full ring SSC test results

Steel	Cooling rate at surface (°C/sec)	HV0.1 max. at 0.25 mm	Test result	
			1 bar H ₂ S	16 bar H ₂ S + 5 bar CO ₂
A1, A2	<50	234	No SSC	No SSC
B	<50	243	No SSC	-
C	>200	293	SSC	-

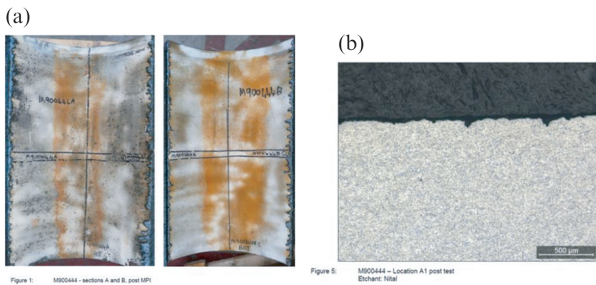


図10 パイプA1試験後の外観および内表層マイクロ組織
Fig. 10 Test pipe A1 after full ring SSC test at 1 bar H₂S ((a) Pipe inner surface of target area (b) Micrograph of pipe inner surface)

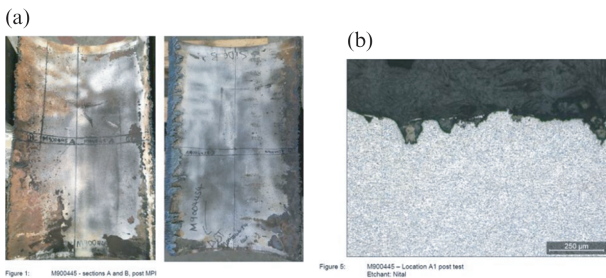


図11 パイプA2試験後の外観および内表層マイクロ組織
Fig. 11 Test pipe A2 after full ring SSC test at 16 bar H₂S ((a) Pipe inner surface of target area (b) Micrograph of pipe inner surface)

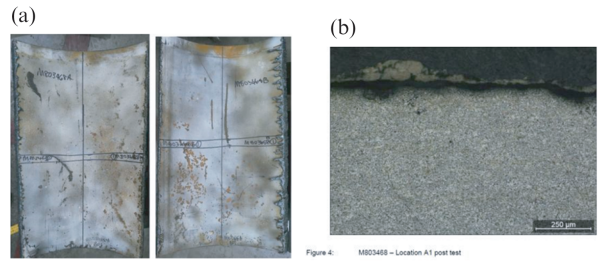


図12 パイプB試験後の外観および内表層マイクロ組織
Fig. 12 Test pipe B after full ring SSC test at 1 bar H₂S ((a) Pipe inner surface of target area (b) Micrograph of pipe inner surface)

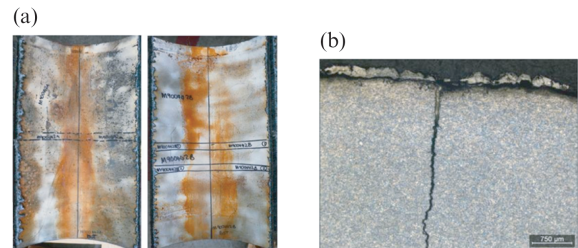


図13 パイプC試験後の外観および内表層マイクロ組織
Fig. 13 Test pipe C after full ring SSC test at 1 bar H₂S ((a) Pipe inner surface of target area (b) Micrograph of pipe inner surface)

すどおりパイプBと同様の負荷応力条件でSSCが発生した。この結果は前節の4点曲げSSC試験結果の図8とよく対応している。以上から、16barの高圧H₂S条件を含む実管SSC試験においても、表層硬さ低減がSSC抑制に有効であることが分かった。

4. 表層硬さ厳格仕様 X65 級耐サワーラインパイプの機械的特性

表5に開発したX65耐サワーラインパイプの機械的特性を示す。外面コーティングでの熱履歴に相当する熱処理を行ったパイプの特性も併せて示す。管厚30mmの厚肉でX65級の高強度であるが、DWTT試験での破面率は-10℃において100%であり、優れた母材靱性を有している。また、シーム溶接部の靱性も-30℃で高い吸収エネルギーを示している。パイプ内面の表層部の硬さは、コーティング模擬の熱処理後も低い値を示している。これらの特性は近年発行されたパイプラインの国際規格 (IOGP S-616) を満足するものである。

5. おわりに

本報告では、耐SSC性能を有する表層硬さ厳格仕様X65級耐サワーラインパイプ用鋼の材料設計指針を示した。開

表5 開発鋼を用いた造管パイプの機械的特性
Table 5 Mechanical properties of developed UOE pipes

Steel	Thickness (mm)	OD (mm)	AsUOE Aged	Tensile properties*			Charpy			DWTT**
				YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	vE (J) at -30°C			SA (%) at -10°C
							BM	WM	HAZ	
Developed	30	711.2	AsUOE	519	593	56	476	197	132	100
			Aged	531	625	54	470	193	485	-
Specification of IOGP (tentative)				≥ 450	≥ 535	≥ 24	≥ 40			≥ 85

Steel	Thickness (mm)	OD (mm)	AsUOE Aged***	HV0.1 max. at 0.25 mm			4PB SSC Test
				BM	WM	HAZ	
Developed	30	711.2	AsUOE	217	241	231	No SSC
			Aged	237	237	242	
Specification of IOGP (tentative)				≤ 245			No SSC

* API rectangular specimen, transverse direction
** 19 mm reduced thickness specimen
*** Simulated coating heat treatment (250°C × 1 hr)

開発鋼の特徴と得られた結果を以下にまとめる。本開発鋼の適用により、サワーガス輸送用パイプラインのより一層の安全性向上に寄与できると考えている。

- 各種冷却条件を変更し実機製造した厚板を用いたパイプを調査した結果、パイプの内面硬度は、LB組織の体積分率の増加に伴い上昇した。
- 4点曲げSSC試験で、1 bar以上のH₂S分圧条件下では、LB組織の体積分率が增加するとパイプの内表層硬度が上昇し、SSCが発生することが明らかになった。LB組織を抑制してGB組織主体とし、表層硬度を低減することでSSC割れ抑制が可能となった。
- 実管SSC試験において、1 barおよび16 barの高圧H₂S条件で、いずれも表層硬さ低減がSSC割れ抑制に有効であることが分かった。実管SSC試験の結果は4点曲げ試験の結果とよく対応していた。
- X65級サワーラインパイプのSSC割れの発生を抑制するためには、表層0.25 mm位置の表層硬さHV0.1を250以下に低減することが有効であると分かった。
- 開発した耐サワーラインパイプは、管厚30 mmの厚肉にもかかわらずX65級の高強度と優れた母材靱性及び溶接部靱性を有しており、パイプ内面表層部の硬さも安定的に低い値を示した。

- NACE MR0175/ISO 15156-1, Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production, NACE International/ISO (2001)
- Newbury, BD.; Fairchild, DP.; Prescott, CA.; Anderson, TD.; Wasson, AJ. Qualification of TMCP Pipe for Severe Sour Service: Mitigation of Local Hard Zones in Sour Service Steels. Proc. OMAE 2019. Paper No. OMAE2019-96614.
- Fairchild, DP.; Newbury, BD.; Anderson, TD.; Thirumalai, NS. Local Hard Zones in Sour Service Steels. Proc. OMAE 2019. Paper No. OMAE2019-96593.
- 伊木聡. パイプライン・ペンストック. 溶接学会誌. 2019, vol. 88, no. 5, p. 75-78.
- Salama, MM.; Rincon, H.; Wilson, S. Integrity of Sour Gas Pipeline Despite Local Hard Zones. Proc. OMAE 2018. Paper No. OMAE2018-78672.
- 東田幸四郎ほか. OLACの実用化研究-1厚鋼板へのオンライン加速冷却(OLAC)の適用. 日本鋼管技報. 1981, no. 89, p. 1-12.
- 小指軍夫. 制御圧延・制御冷却. 地人書館, 1997, 214p.
- 遠藤茂, 中田直樹. JFEスチールのTMCP技術の進歩とそれによる高性能厚板. JFE技報. 2014, no. 33, p. 1-6.
- Omar, AA.; Kane, RD.; Boyd, WK. Factor Affecting the Sulfide Stress Cracking Resistance of Steel Weldments. Corrosion 81, 1981, Paper No. 186.
- Pargeter, RJ. The Effect of Low H₂S Concentrations on Welded Steels. Corrosion 2000, Paper No. 143.
- 牧正志. 鉄鋼の組織制御. 内田老鶴圃, 2015, 312p.
- NACE TM0316-2016, Four-Point Bend Testing of Materials for Oil and Gas Applications.
- NACE TM0177-2016, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments.
- BS701: 2016, Full ring ovalization test for determining the susceptibility to cracking of linepipe steels in sour service-Test method.

参考文献

- 平忠明ほか. 耐サワーガス鋼管の開発-1耐サワーガス鋼管のHIC性能およびSSC性能. 日本鋼管技報. 1980, no. 87, p. 61-75.
- Ishikawa, N.; Shinmiya, T.; Endo, S.; Wada, T.; Kondo, J. Recent Development in High Strength Linepipe for Sour Environment. Proc. OMAE 2003. Paper No. OMAE2003-37065.
- 山根康義, 元田邦昭, 倉橋速生, 中井揚一. 硫化物環境下での低合金鋼の応力腐食割れ挙動. 川崎製鉄技報. 1985, vol. 17, No. 2, p. 178-184.
- Endo, S.; Nagae, M.; Kobayashi, Y.; Ume, K. Sulfide Stress Corrosion Cracking in Welded Joints of Welded Linepipes. ISIJ Int. 1994, vol. 34, no. 2, p. 217-223.



嶋村 純二



伊木 聡



田村 雄太