

タンク・ペンストック用高靱性 TMCP 型高張力鋼板

High Strength Steel Plates

Applying Thermo-Mechanical Control Process (TMCP)

with Excellent Toughness for Tanks and Pen-Stocks

1. はじめに

エネルギー貯蔵設備や化学プラント、発電設備などのエネルギープラント分野では種々の鋼板が使用されている。近年、これらの設備の大型化、操業条件、使用環境の過酷化、さらに建設コストの低減を目的とした施工の高効率化などにより、使用される鋼材に対しても高強度化、靱性の向上、溶接施工性の向上などの厳しい性能やコストの低減が要求されている。また、世界的なエネルギー需要の増大から、エネルギープラントの建設が活発化しており、高性能鋼のニーズが高いことから、供給量の確保や短工期化なども求められている。

JFE スチールではこのようなニーズにこたえるため、各種タンクや水力発電設備のペンストック向けに、高い冷却能力と均一冷却性を有する加速冷却装置 *Super-OLAC*[®] (On-Line Accelerated Cooling) や加速冷却後の誘導加熱型オンライン熱処理プロセス HOP[®] (Heat-treatment On-line Process) などの最新の厚板製造技術¹⁾と高度な材質設計技術を駆使した溶接施工性に優れた高性能高張力鋼を開発しており^{2,3)}、すでに多くのプラントに使用されている。

ここでは、タンクやペンストックに広く使用されている海外規格熱処理型鋼 (ASME SA-537 など) に代替可能な TMCP (Thermo-mechanical control process, 熱加工制御) 型鋼板 (ASME SA-841 / ASTM A841 / EN 10028-5 適合鋼) を紹介する。(ASME: The American Society of Mechanical Engineers, ASTM: The American Society for Testing and

Materials, EN: European Norm)

2. 開発鋼の特長とコンセプト

2.1 適用規格

2.1.1 ASME SA-841 / ASTM A841

TMCP 型の SA-841/A841 鋼は焼ならし (N) や焼入れ・焼もどし (Q-T) などの熱処理型の SA-537/A537 鋼に代替可能な鋼板として規格化され、ASME Boiler & Pressure Vessel Code の Code Case への登録を経て 2011 年に正式に Section VIII Div. 1, 2 に登録されている。引張特性要求は SA-537/A537 と同等であり、今後 TMCP 鋼としての幅広い適用が期待できる。強度クラスとしては SA-841 Gr.A Cl.1 鋼 (TS480MPa 級, TS: 引張強度), SA-841 Gr.B Cl.2 鋼 (TS550MPa 級) がある (表 1)。

2.1.2 EN 10028-5

EN 規格においても、TMCP 型鋼は EN 10028-5 として登録されており、N 型鋼 (EN 10028-3) や Q-T 型鋼 (EN 10025-6) に対して、熱処理の省略が可能となる (表 1)。

2.2 TMCP 適用による熱処理省略

TMCP と従来の熱処理プロセスの比較を図 1 に示す。TMCP の適用により、従来の N や Q-T などの熱処理工程の省略が可能となる。また、EN 規格ではノルマライジングローリング (NR) が N を省略できるプロセスとして認められている (EN 10028-3)。

表 1 TMCP (熱加工制御) 適用規格と従来規格との比較

Table 1 Thermo-mechanical control process (TMCP) standard with respect to ordinal standard

TS Grade	Standard	Conventional standard		Recommended standard	
		Grade	Heat treatment	Grade	Heat treatment
450-500	ASME	SA-537-1	N	SA-841A-1	TMCP
	EN 10028	P355N, NL1, NL2	N or NR	P355M, ML1, ML2	TMCP
		—	—	P420M, ML1, ML2	TMCP
530-550	ASME	SA-537-2	Q-T	SA-841B-2	TMCP
	EN 10028	P460Q, QL1, QL2	Q-T	P460M, ML1, ML2	TMCP

ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm
N: Normalizing NR: Normalizing rolling Q-T: Quenching and tempering

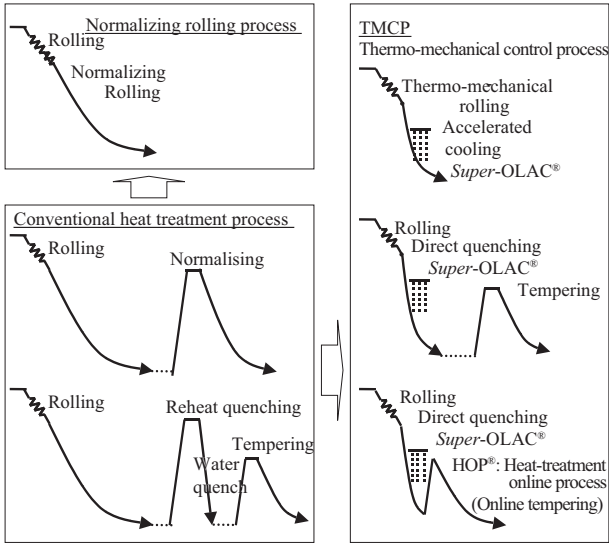


図1 TMCP（熱加工制御）プロセスと従来の熱処理プロセスの比較

Fig. 1 Comparison of production process between thermo-mechanical control process (TMCP) and conventional heat treatment process

2.3 開発鋼の特長とコンセプト

TMCPを適用した開発鋼の特長を図2に示す。Super-OLAC®の適用とマイクロアロイング技術の活用によりC量および P_{CM} （溶接割れ感受性組成）の低減が可能となり、溶接性の改善（低温割れ性の抑制による予熱温度の低減：図3）と溶接部性能の向上（硬さの低減：図4，靱性の向上）など、施工性および信頼性の向上が図られる。また、TMCPの適用により、オフライン熱処理工程が省略でき、オンラインプロセスとなることから、製造工期の短縮や熱処理コストの削減、さらには製造能力の拡大が可能となる。このように、TMCPにより、従来と同じ設計条件のもとで大幅なメリットが享受できる。

3. 開発鋼の特性

3.1 母材性能

開発鋼 SA-841 Gr.A Cl.1 および SA-841 Gr.B Cl.2 の化学成分、機械的性質をそれぞれ表2～5に示す。SA-841 Gr.A

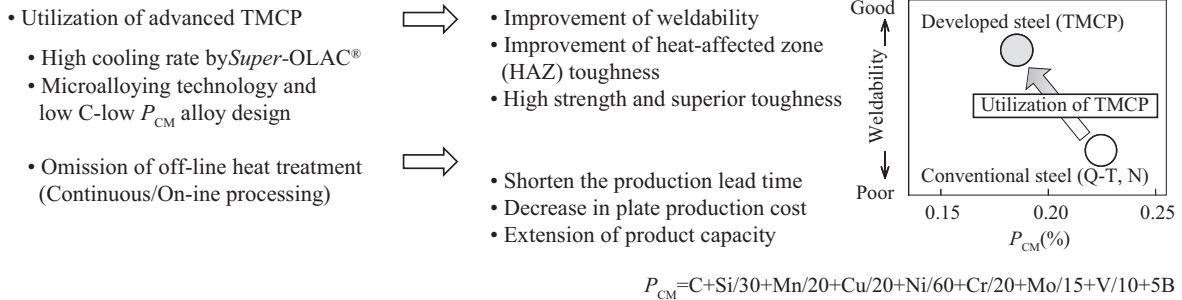
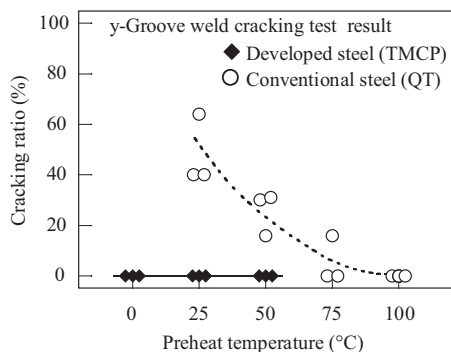


図2 タンク・ペンストック用 TMCP（熱加工制御）型高張力鋼板の特長

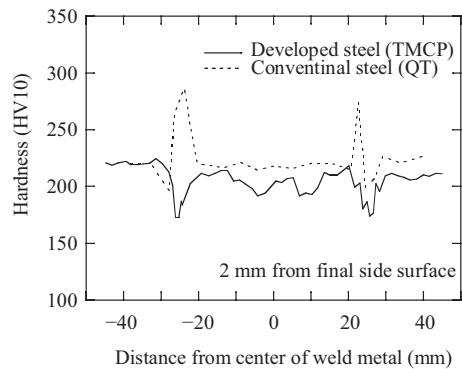
Fig. 2 Feature of high strength steel plates applying thermo-mechanical control process (TMCP) for tanks and pen-stocks



TMCP: Thermo-mechanical control process
 $P_{CM} = C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$

図3 C量, P_{CM} の低減による溶接割れ防止予熱温度の低減

Fig. 3 Decrease of preheat temperature to avoid weld cracking of the developed steel by suppression of C content and P_{CM}



TMCP: Thermo-mechanical control process
 $P_{CM} = C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$

図4 C量, P_{CM} の低減による溶接熱影響部硬さの低減

Fig. 4 Improvement of heat affected zone (HAZ) hardness distribution of the developed steel by suppression of C content and P_{CM}

表 2 ASME SA-841Gr.A Cl.1 鋼の化学成分

Table 2 Chemical compositions of ASME SA-841 Gr.A Cl.1

Grade	Thickness (mm)	(mass%)							
		C	Si	Mn	P	S	Others	C_{eq}	P_{CM}
SA-841A-1 (EN P355ML2)	12	0.09	0.39	1.47	0.004	0.001	Ti, etc.	0.34	0.18
	40	0.10	0.40	1.46	0.010	0.002	Ti, etc.	0.35	0.19

ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Cu/15 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

表 3 ASME SA-841 Gr.A Cl.1 鋼の機械的性質

Table 3 Mechanical properties of ASME SA-841 Gr.A Cl.1

Grade	Thickness (mm)	Tensile properties				Charpy impact properties		
		Position, Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Position, direction	$\sqrt{E}_{-40^{\circ}C}$ (J)	$\sqrt{E}_{-60^{\circ}C}$ (J)
SA-841A-1 (EN P355ML2)	12	Full-thickness, C	445	533	24	1/4t, C	399	345
	40	Full-thickness, C	420	536	32	1/4t, C	426	424

ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm

SA-841Gr.B Cl.2 Specification: $YS \geq 345$, $480 \leq TS \leq 620$ MPa

\sqrt{E} : On the purchase order, if not specified; $\sqrt{E}_{-40^{\circ}C} \geq 20$ J

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation \sqrt{E} : Absorbed energy

表 4 ASME SA-841Gr.B Cl.2 鋼の化学成分

Table 4 Chemical compositions of ASME SA-841 Gr.B Cl.2

Grade	Thickness (mm)	(mass%)							
		C	Si	Mn	P	S	Others	C_{eq}	P_{CM}
SA-841B-2 [Type I] (EN P460M)	16 and 38	0.08	0.19	1.34	0.014	0.002	Mo, V, etc.	0.33	0.16
	60	0.09	0.26	1.45	0.011	0.001	Mo, V, etc.	0.39	0.20
SA-841B-2 [Type II] (EN P460ML2)	40 and 60	0.06	0.20	1.47	0.009	0.003	Cu, Ni, Cr, Mo, V, etc.	0.40	0.17

ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Cu/15 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

表 5 ASME SA-841 Gr.B Cl.2 鋼の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of ASME SA-841 Gr.B Cl.2

Grade	Thickness (mm)	Tensile properties				Charpy impact properties				
		Position, Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Position, Direction	$\sqrt{E}_{-25^{\circ}C}$ (J)	$\sqrt{E}_{-40^{\circ}C}$ (J)	$\sqrt{E}_{-45^{\circ}C}$ (J)	$\sqrt{E}_{-50^{\circ}C}$ (J)
SA-841B-2 [Type I] (EN P460M)	16	Full-thickness, C	583	669	36	1/4t-C	236	—	140	—
	38	Full-thickness, C	522	617	50	1/4t-C	298	—	284	—
	60	1/4t-C	553	641	30	1/4t-C	276	—	170	—
SA-841B-2 [Type II] (EN P460ML2)	40	1/4t-C	500	595	30	1/4t-C	—	282	—	310
	60	1/4t-C	504	573	31	1/4t-C	—	288	—	345



ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm

SA-841Gr.B Cl.2 Specification: $YS \geq 415$, $550 \leq TS \leq 690$ MPa, \sqrt{E} : On the purchase order, if not specified; $\sqrt{E}_{-40^{\circ}C} \geq 20$ J

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation \sqrt{E} : Absorbed energy

表 6 ASME SA-841 Gr.A Cl.1 鋼の溶接継手性能の一例

Table 6 Typical mechanical properties of ASME SA-841 Gr.A Cl.1's SMAW weldments

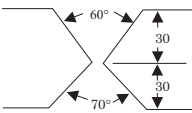
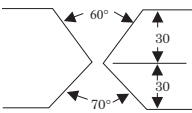
Grade	Thickness (mm)	Welding		PWHT	Tensile properties		Charpy impact properties		
		Edge preparation	Welding condition		TS (MPa)	Position	$\sqrt{E}_{-40^{\circ}\text{C}}$ (J)	$\sqrt{E}_{-60^{\circ}\text{C}}$ (J)	
SA-841A-1 (EN P355ML2)	12		Welding consumable: NB-1SJ (3.2φ)* Heat input: 4.0 kJ/mm	—	526 529	1/4 t	WM	65	45
							FL	162	59
							HAZ	321	228
	40		Welding consumable: NB-1SJ (4.0φ)* Heat input: 4.3 kJ/mm	—	550 552	1/4 t	WM	66	49
							FL	126	56
							HAZ	239	196

*Supplied by Kobe Steel, Ltd.

ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm SMAW: Shielded metal arc welding
PWHT: Post weld heat treatment TS: Tensile strength \sqrt{E} : Absorbed energy WM: Weld metal FL: Fusion line HAZ: Heat-affected zone

表 7 ASME SA-841 Gr.B Cl.2 鋼の溶接継手性能の一例

Table 7 Typical mechanical properties of ASME SA-841 Gr.B Cl.2's SMAW weldments

Grade	Thickness (mm)	Welding		PWHT	Tensile properties		Charpy impact properties					
		Edge preparation	Welding condition		TS (MPa)	Position	$\sqrt{E}_{-25^{\circ}\text{C}}$ (J)	$\sqrt{E}_{-30^{\circ}\text{C}}$ (J)	$\sqrt{E}_{-45^{\circ}\text{C}}$ (J)	$\sqrt{E}_{-50^{\circ}\text{C}}$ (J)		
SA-841B-2 [Type I] (EN P460M)	60		Welding consumable: LB-62UL (5.0φ)* Heat input: 2.3 kJ/mm	—	679 677	1/4 t	WM	158	—	99		
							FL	178	—	126		
							HAZ	300	—	224		
					580°C ×5 h	681 683	1/4 t	WM	141	—	68	
								FL	126	—	84	
								HAZ	209	—	193	
SA-841B-2 [Type II] (EN P460ML2)	60		Welding consumable: NB-1SJ (5.0φ)* Heat input: 2.3 kJ/mm	—	620 622	1/4 t	WM		125		106	
							FL		237		260	
							HAZ		274		241	
					580°C ×4.5 h	598 605	1/4 t	WM		147		127
								FL		177		117
								HAZ		281		170

*Supplied by Kobe Steel, Ltd.

ASME: The American Society of Mechanical Engineers EN: European Norm SMAW: Shielded metal arc welding
PWHT: Post weld heat treatment TS: Tensile strength \sqrt{E} : Absorbed energy WM: Weld metal FL: Fusion line HAZ: Heat-affected zone

Cl.1 鋼は、EN 10028 P355ML2 を、SA-841 Gr.B Cl.2 鋼の Type I (−20℃仕様) は EN 10028 P460M を、Type II (−50℃仕様) は EN 10028 P460ML2 をも併せて満足しており、それぞれの規格を十分に満足する強度と優れた低温靱性が得られている。

3.2 開発鋼の溶接継手性能

開発鋼 SA-841 Gr.A Cl.1 および SA-841 Gr.B Cl.2 の溶接継手性能の一例として、被覆アーク溶接 (SMAW) 継手性能を表 6 および 7 にそれぞれ示す。いずれも、ASME 規格および対応する EN 規格 (P355ML2 および P460M, P460ML2) の母材の規定値を満足する継手強度と高い溶接部靱性が得られており、優れた溶接継手性能を有している。

4. おわりに

最新の TMCP 技術を活用して製造したタンク・ペンストック用鋼板は、優れた溶接性と母材および溶接部性能を有するとともに、コスト低減や製造の工期短縮、供給能力の拡大をも実現する。熱処理材に代わり、今後幅広く適用されることが期待される。

参考文献

- 1) 藤林晃夫ほか. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 8.
- 2) 林謙次ほか. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 56.
- 3) 林謙次ほか. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 35.

<問い合わせ先>

JFE スチール 厚板セクター部
TEL : 03-3597-3531 FAX : 03-3597-3533