

(論文)

# 長時間PWHT対応型タンク用550MPa級鋼の開発

## Development of 550MPa Class Steel Plate for Spherical Tanks with High Resistance to Long-term PWHT



下山哲史\*  
Satoshi SHIMOYAMA



泉 学\*  
Manabu IZUMI



今村弘樹\*  
Hiroki IMAMURA



安部研吾\*  
Kengo ABE

During construction of spherical tanks, long-term post-welding heat treatment (PWHT) may decrease the tensile strength (TS) of the steel plate. This is due to the coarsening of cementite, which causes the cementite not contributing to the strengthening any more. Proper amount of alloy elements, which dissolve well in cementite and easily form carbide, were added to suppress the coarsening of cementite and keep the cementite finely dispersed after the PWHT. This has enabled the development of a new type of steel plate with suppressed reduction of strength after the PWHT by delaying the diffusion of carbon, which otherwise can easily diffuse cause coarsening.

まえがき = エネルギータンクに求められる最も重要な性能は、安全性である<sup>1),2),3),4)</sup>。そこで、厚肉球形タンクの製作工程では溶接部に発生する残留応力を除去するための溶接後熱処理( Post Weld Heat Treatment:PWHT, 以下PWHT という)が必要不可欠となる。

一方、近年のエネルギー需要増大のためにエネルギータンク建設基数は増加しており、また敷地の有効利用のため一基当りの収容量増量を目的としたタンクの大型化・高圧化が進んでいる<sup>5),6),7)</sup>。そのため、必要とされる鋼板は厚肉化する傾向にあり、板厚によって決定されるPWHT 時間は長時間化している<sup>8)</sup>。また、PWHT を現地にて行う場合、昇降温スピードのばらつきにより、さらなるPWHT 時間の延長を考慮する必要がある。

一般的に、PWHT の長時間化によって鋼板の強度の低下量は大きくなる<sup>8),9)</sup>が、上記の状況から、より長時間のPWHT 後においても高強度を維持することができる鋼板が求められている。筆者らはこのような要望に対応して、PWHT による強度低下抑制技術を検討した結果、長時間PWHT 後にも高強度を維持しうる新しい鋼板を開発した。本報ではこの技術の概要と板厚72mmの開発鋼板の特性を紹介する。

### 1. 開発目標特性

長時間PWHT の条件として、従来は(600 ± 15 ) × 3 ~ 7.5h 程度であったものを、想定される再PWHT や施

工ばらつきを考慮し、温度に関してはばらつきの高温側である615 を選択した。また、時間に関しても同様にばらつきの長時間側である7.5h とし、さらに安全側での評価として3回の再PWHT を想定した合計23h とした。このPWHT 条件下でも強度クラスがASTM A537-2 を満足することを鋼板特性の目標とした(表1)。また溶接継手特性に関しては、最大入熱量を50kJ/cm とし、長時間PWHT 後に継手部の強度および靱性が母材と同等の特性を示すことを目標とした。

### 2. 基礎的検討

長時間PWHT 後でも目標強度特性を満足させる手段として、i) PWHT 前の強度を向上させる方法、ii) PWHT による強度低下を抑制する方法の二通りがあるが、合金元素の添加によって溶接継手靱性を悪化させるため、ここではii)の考え方による解決手法を検討した。PWHT による強度低下に対して最も影響が大きい因子は炭化物の粗大化である<sup>10)</sup>。すなわち、炭化物(セメントタイト)がオストワルド成長することによって粗大化し、強化への寄与が低減すると考えられている。したがって、長時間PWHT 後でもセメントタイトを強化に寄与できる大きさに微細分散させておくことが強度低下抑制のために重要である。

#### 2.1 強度低下抑制へのCr, Mn の影響

PWHT によるセメントタイトの粗大化は、微細なセメン

表1 開発鋼の目標特性  
Table 1 Target properties of developed steel

	Tensile properties			Impact property of base plate and welded joints (J)	PWHT condition
	YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)		
Target properties	380	515 ~ 655	22	≧E <sub>46</sub> 50 (Transverse test) (Average for 3 specimens)	615 × 23h

\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

タイトが表面エネルギーを小さくするためにいったん母相に固溶し、これにより過剰となったCが粗大セメントタイトへ拡散することによって進行する。つまりオストワルド成長が、その粗大化のメカニズムである。また、フェライト相よりもセメントタイトへの固溶度が大きく、Cと比較して拡散速度が非常に遅いCrやMnといった溶質元素を固溶した合金セメントタイトは、純セメントタイトと比較して分解の駆動力が小さいことが知られている<sup>11)</sup>。表2に各合金元素のセメントタイトとフェライト相への分配比を表す分配係数を示す。これによると、Cr、Mnはフェライト相よりもセメントタイト中へ固溶しやすいことがわかる。そこで、これら元素の添加量とPWHT後の強度低下抑制効果を定量的に評価した。

### 2.2 Cr, Mnのセメントタイト粗大化抑制効果の検証

供試鋼の化学成分は表3に示す通りである。図1にこれらの元素を添加した鋼板の長時間PWHT後の強度低下量を示す。横軸はPWHTの保持時間であり、縦軸はPWHT前後の鋼板の引張強度差( $T_S$ )である。この関係より、615 × 23hというPWHT条件において、Cr、Mnを適量複合添加した鋼板の強度低下量が従来鋼と比較して小さいことがわかった。図2には長時間PWHT後のセメントタイトの析出形態を示すが、Cr、Mnを複合添加した鋼板ではセメントタイトの粗大化が抑制され、従来鋼よりも微細分散していることがわかる。

表2 合金元素のセメントタイトへの分配係数比較  
Table 2 Comparison of distribution coefficient of alloys

	Cr	Mn	V	Mo
Distribution coefficient*	28.0	10.5	9.0	7.5

\*Parameter that shows distribution ratio of alloy elements into ferrite and cementite

表3 基礎検討材の化学成分  
Table 3 Chemical composition of tested steels (wt%)

Chemical composition			
C	Si	Mn	Others
0.10	0.35	1.25 ~ 1.58	Ni, Mo, V Cr, Ni, Mo, V

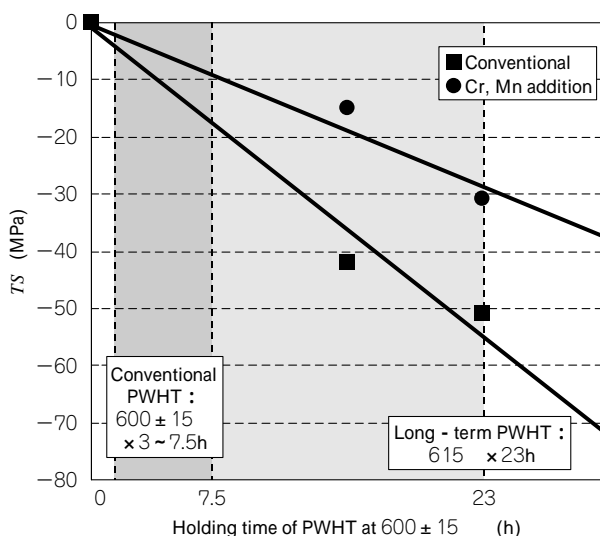


図1 PWHT保持時間と引張強度低下量の関係  
Fig. 1 Relation between holding time of PWHT and  $T_S$

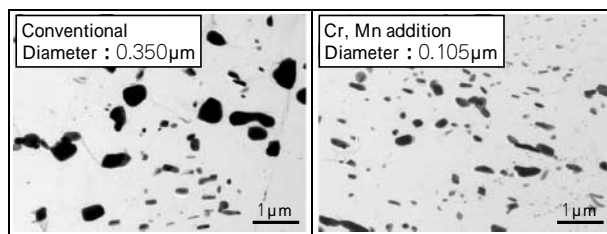


図2 PWHT後セメントタイト分布のTEM写真  
(左: 従来鋼, 右: Cr, Mn添加鋼)  
Fig. 2 TEM images of the distribution of cementite after PWHT  
(Left: Conventional, Right: Cr, Mn addition)

### 3. 開発鋼の特性

上記検討で得られた結果を基に化学成分および製造条件を決定し、工場試作を行った。その結果を以下に述べる。

#### 3.1 化学成分

開発鋼の化学成分は、前述の基礎検討結果を基にして、PWHT後の強度を確保するためにセメントタイトへの固溶量が多いCr、Mnをそれぞれ0.2%、1.35%添加する成分系とした(表4)。また、溶接継手部の靱性確保の観点から、従来鋼に比べてCを低減し、Cu、Mo、Tiを適量添加した。

#### 3.2 母材特性

開発鋼母材の機械的性質を表5に示す。降伏強度、引張強度ともに目標を十分に満足する結果が得られ、シャルピー吸収エネルギー値についても、試験温度である-46において安定して目標値を満足した。また、開発鋼のセメントタイト分布をTEMによって観察した結果を図3に示す。基礎検討により想定した通り、セメントタイトが微細に分散した組織となっており、これがPWHT後の強度低下抑制に効果的であったと考えられる。

#### 3.3 溶接継手特性

表6に示す条件においてSMAW(被覆アーク溶接: Shielded Metal Arc Welding, 立向・横向)を実施した。板厚は72mmで、入熱は立向では50kJ/cm、横向では30kJ/cmとした。試験内容は継手引張試験と試験温度-46での継手シャルピー衝撃試験である。試験片は図4に示す通り、ファイナル側1/4部・板厚方向中央部・バック側表面のそれぞれ溶接金属部・ポンド部・HAZ中央で実施した。また、継手強度評価については全厚引張試験片で行った。継手強度は立向、横向いずれにおいても十分高い値を示している(表7)。図5、6は継手シャルピー衝撃試験結果を示している。継手靱性についても、板

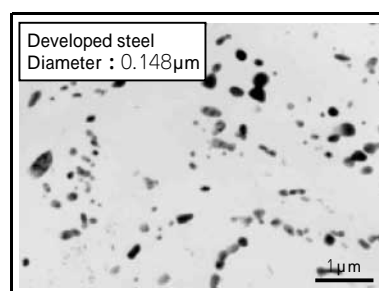


図3 開発鋼のPWHT後セメントタイト分布  
Fig. 3 Cementite distribution of developed steel after PWHT

表 4 開発鋼の化学成分

Table 4 Chemical composition of developed steel

(wt%)

	Chemical composition					
	C	Si	Mn	P	S	Others
Developed steel	0.12	0.35	1.35	0.007	0.001	Cr, Ni, V, etc.
Conventional steel	0.15	0.35	1.25	0.007	0.001	Ni, V, etc.

表 5 開発鋼材の PWHT 後機械的性質

Table 5 Mechanical properties of developed steel after PWHT

	Thickness (mm)	Heat treatment	PWHT condition	Position	Tensile properties			Impact property (Transverse test)
					YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	$\sqrt{E_{-46}}$ (J) (Average for 3 specimens)
Developed steel	72	QT	615 × 23h	1/4t	405	541	32	394
Target properties	-	-	615 × 23h	1/4t	380	515 ~ 655	22	50

表 6 SMAW 施工条件

Table 6 Condition of shielded metal arc welding

Thickness (mm)	Welding electrode	Position	Heat input (kJ/cm)
72	LB-62L	Vertical	50
		Horizontal	30

表 7 継手引張特性 (全厚引張試験)

Table 7 Tensile properties of welded joint (full thickness)

Position	Tensile properties	
	TS (MPa)	Fracture point
Vertical	605	Base metal + HAZ
Horizontal	607	Base metal + HAZ

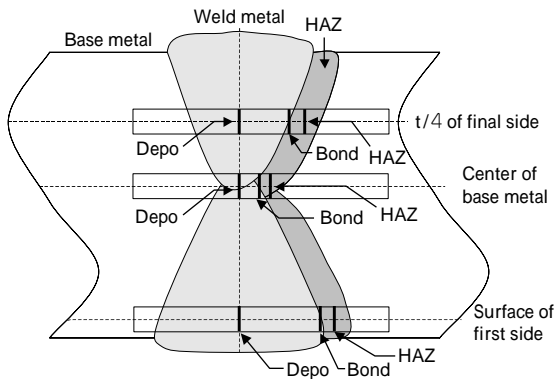


図 4 溶接継手シャルピー試験要領

Fig. 4 Notch location of Charpy impact test of welded joint

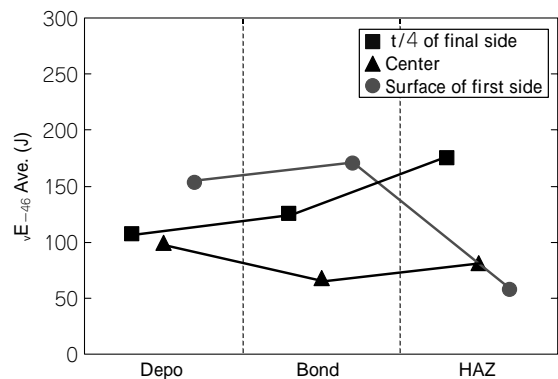


図 5 開発鋼の PWHT 後 SMAW 継手特性 (立向溶接)

Fig. 5 Charpy absorbed energy of welded joint by SMAW of developed steel after PWHT (weld position : vertical)

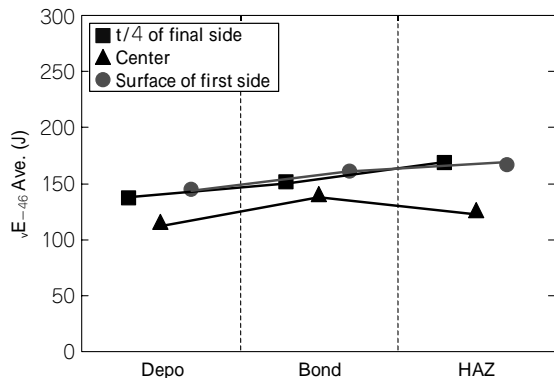


図 6 開発鋼の PWHT 後 SMAW 継手特性 (横向溶接)

Fig. 6 Charpy absorbed energy of welded joint by SMAW of developed steel after PWHT (weld position : horizontal)

厚方向のいずれにおいても溶接金属部・ボンド部・HAZ 中央部の全てで高い値を示し、目標値を満足する結果が得られた。

むすび = 球形タンク用厚肉 550MPa 級鋼板の長時間 PWHT 後の母材・溶接継手特性の安定確保を検討した。

その結果、PWHT 後の母材強度確保にはセメントの粗大化抑制が有効であり、その実現には Cr, Mn の適量添加が有効であることを見出した。この知見を基に、長時間 PWHT 後も安定して目標特性を満足することができる厚肉の球形タンク用 550MPa 級鋼板を開発した。開発鋼はその優れた母材・溶接継手性能によりタンク本体の安全性の向上に寄与すると期待され、今後の適用拡大が見込まれる。

参考文献

- 1) 深川宗光：第 86 回，第 87 回西山記念技術講座，p.259.
- 2) 村本聖一：溶接技術，1(1993) p.76.
- 3) 中西庸介：溶接技術，1(1984) p.32.
- 4) 有持和茂：第 159 回，第 160 回西山記念技術講座，p.93.
- 5) 松田 穰ほか：NKK 技報，No.174 (2001) p.71.
- 6) 片山典彦ほか：溶接学会誌，Vol.63, No.2 (1994) p.40.
- 7) 林 謙次ほか：JFE 技報，No.5 (2004) p.56.
- 8) 中井清人ほか：溶接技術，12 (1980) p.75.
- 9) 川端友弥ほか：圧力技術，Vol.40, No.6 (2002) p.16.
- 10) 高木節雄：第 191 回，第 192 回西山記念技術講座，p.3.
- 11) 梅本 実ほか：鉄と鋼，Vol.88, No.3 (2002) p.11.