

中・常温域で引張強さ 610 MPa 以上を有する ボイラ圧力容器用極厚 SPV490 鋼板*

川崎製鉄技報
30 (1998) 3, 162-166

Ultra Heavy Gauge SPV490 Steel Plate with Tensile Strength over 610 MPa at Intermediate and Moderate Temperatures for Boiler Pressure Vessels



板倉 教次
Noritsugu Itakura
技術研究所 厚板・条
鋼研究部門 主任研究
員(掛長)



弟子丸 慎一
Shin-ichi Deshimaru
水島製鉄所 厚板・鋳
鍛部厚板課長



中川 一郎
Ichiro Nakagawa
水島製鉄所 管理部技
術サービス室 主査
(課長)

要旨

ボイラ圧力容器用鋼板として、中・常温域で、PWHT 後にも引張強さ (TS) 610 MPa 以上を有する SPV490 鋼 (最大板厚: 150 mm) を開発した。母材のシャルピー吸収エネルギー (vE) は、PWHT 前後のいずれにおいても、目標値 (vE - 30°C ≧ 47 J) を満足するとともに -40°C で 100 J 以上と十分高かった。また、y 形溶接割れ試験の割れ阻止温度は 75°C と良好であった。一方、MAG 溶接およびサブマージアーク溶接の継手の特性は、PWHT 前後のいずれにおいても、中・常温域で、TS ≧ 610 MPa であるとともに、vE も母材に設定した目標値 (vE - 30°C ≧ 47 J) 以上の値を示した。

Synopsis:

An advanced type of SPV490 steel plate up to 150 mm in thickness has been developed for boiler pressure vessels. This advanced steel exhibits a tensile strength (TS) greater than 610 MPa after post weld heat treatment (PWHT) at intermediate and moderate temperatures. The Charpy absorbed energy (vE) of base metal was more than 100 J even at -40°C which substantially exceeded the target value (vE - 30°C ≧ 47 J). The preheating at 75°C prevented cold cracking in a y-slit test. The TS of the welded joints made by MAG welding and SAW were also over 610 MPa before and after PWHT at intermediate and moderate temperatures. The vE of those welded joints were greater than the value aimed for base metal (vE - 30°C ≧ 47 J) even after PWHT.

1 緒 言

ボイラ圧力容器用鋼材として、クリープ現象を考慮しなくて良い中・常温域 (350°C 以下) では炭素鋼が用いられ、焼きならし焼戻し (NT) プロセスによる JIS G 3119 の SBV2 鋼などが主に用いられている。しかし、板厚が 100 mm を超える大型のボイラ圧力容器に SBV2 鋼を用いた場合には、鋼板の炭素当量 (Ceq) が高くなることから高温予熱および多パス溶接という過大な溶接作業が強いられることとなる。そのためボイラ圧力容器用鋼材として溶接割れ感受性が低く、かつ板厚削減のため、より高強度な高張力鋼の開発が望まれていた。そこで、SBV2 鋼より引張強さ (TS) が高く、かつ Ceq および溶接割れ感受性組成 (Pcm) が低い焼入れ焼戻し (QT) 鋼である JIS G 3115 の SPV490 鋼に着目し新しい鋼板を開発した。本報ではその基礎的検討結果と開発鋼板の特性について述べる。

2 開発目標

ボイラ圧力容器用鋼材としての炭素鋼は主にクリープが生じない温度域 (350°C 以下) で使用するもので、その許容応力は最高使用温度における TS 規格下限値の 1/4 または降伏強さ (YS) 規格下限値の 2/3 のいずれか低い値となる²⁾。実質的には前者の TS で決まる³⁾。現在、主に用いられている NT 材の SBV2 鋼は TS 規格下限値が低い (550 MPa) ため、その許容応力は低くなり厚肉材を使用せざるを得ない。また、NT 材であるため一般に Ceq および Pcm は高く溶接割れ感受性が高い。そこで、高温での TS が高く溶接割れ感受性の低い鋼材として、QT 鋼である SPV490 鋼に着目した。同鋼は TS が 610 MPa 級の圧力容器用高張力鋼であり、その強度レベルで設計した場合、SBV2 鋼に比べて板厚は約 10% 低減できる。

開発鋼板の目標値は、Table 1 に示すように設定した。板厚は、開発当時における SPV490 鋼の JIS 規格最大板厚は 75 mm であったが、将来の圧力容器のさらなる大型化を考えて最大 150 mm とした。また、溶接割れ感受性を低くするため、Ceq ≦ 0.52%, Pcm ≦

* 平成10年6月10日原稿受付

Table 1 Target values for the advanced SPV490 steel plate

Item	Target value
Thickness (mm)	Maximum 150
Carbon equivalent (mass%)	$Ceq^{*1} \leq 0.52$
Weld cracking parameter (mass%)	$Pcm^{*2} \leq 0.27$
PWHT cracking parameter (mass%)	$\Delta G^{*3} < 0$
Tensile strength (MPa)	≥ 610 (At RT ~ 350°C after triple PWHT)
V-notch Charpy absorbed energy of base metal (J)	$vE - 30^\circ C \geq 47$

*1 $Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$ (mass%)

*2 $Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$ (mass%)

*3 $\Delta G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2$ (mass%)

0.27% とした。TS については、室温から 350°C の温度範囲で、溶接後熱処理 (PWHT) を考慮し最大 3 回の PWHT 後においても 610 MPa 以上とした。シャルピー衝撃値については、WES3003-1995⁴⁾ に基づいて、開発当時の JIS 規格 (板厚 ≤ 75 mm で $vE - 10^\circ C \geq 47$ J) を、板厚 150 mm へ拡大し $vE - 30^\circ C \geq 47$ J とした。また PWHT 時の再熱割れを防止するため、再熱割れ感受性指数 ΔG 値⁵⁾ を 0 未満とした。

3 基礎的検討

3.1 高温強度

開発目標は板厚 150 mm と極厚であり、また室温から 350°C の範囲での TS も 610 MPa 以上であるため、室温の強度は HT690 MPa 級に近くなることが予想される。そこで HT690 MPa 鋼の高温強度特性を検討した。Fig. 1 に HT690 MPa 級鋼 (0.12% C-0.27% Si-0.80% Mn-0.25% Cu-0.97% Ni-0.44% Cr-0.34% Mo-0.026% V 鋼, QT 材) の引張特性の試験温度依存性を示す。試験温度の上昇にともない、YS は減少するが 300°C 近傍では低下割合は緩慢となる。一方、TS は試験温度の上昇にともない 200°C 近傍までは減少するが、200°C 以上でだいに上昇し 300°C でピークとなり、300°C 以上では温度の上昇にほぼ比例して減少する。このように、室温から 350°C の温度範囲において、TS ≥ 610 MPa とするためには、室温における TS と 200°C 近傍および 350°C における TS との差、すなわち TS からの TS 低下量を明らかにする必要がある。

そこで、室温の TS と高温の TS の関係を、強度レベルが 500 ~ 750 MPa の鋼について調査した。Fig. 2 に室温の TS と高温の TS の関係を示すが、試験温度 100 ~ 250°C では強度レベルによらず、室温の TS からの低下量は一定で最大 80 MPa である。また、試験温度 350°C ではミクロ組織をベイナイト (B) あるいはベイナイト+マルテンサイト (B + M) とした高強度鋼ほど、高温の TS の低下量が大きい傾向にあるが、室温の TS からの低下量は強度レベルによらず 80 MPa 以内である。

さらに、添加元素種の高温の TS への影響を検討した。Fig. 3 に Cr, V および Mo 添加量の変化にともなう、室温の TS 上昇量と 350°C の TS 上昇量の関係を示す。通常の低合金鋼の合金元素量では室温の TS 上昇量だけ、350°C の TS も上昇しており、添加元素による差異は認められない。

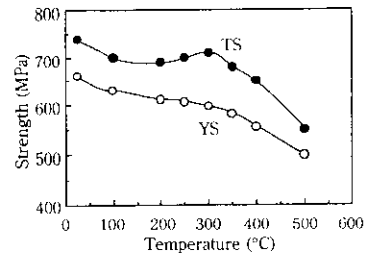


Fig. 1 Tensile properties of HT690 steel at elevated temperatures

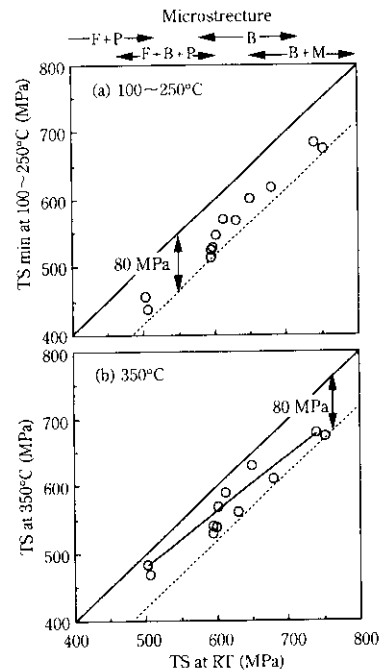


Fig. 2 Relationship between tensile strength at RT and that at elevated temperatures

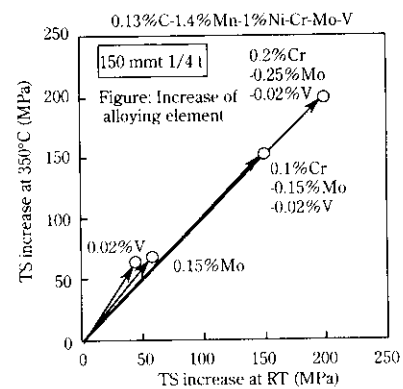
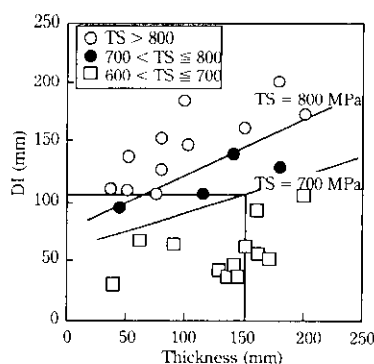


Fig. 3 Effect of alloy addition on tensile strength at RT and 350°C

3.2 極厚材の室温強度と靱性

以上より開発鋼の室温の目標 TS を設定した。室温から 350°C において TS ≥ 610 MPa の開発目標に対し、室温から 350°C の範囲での TS の最大低下量 80 MPa を加えた 690 MPa 以上が室温の目標 TS となる。目標 TS を満足し、かつ靱性および溶接性を満足するように Ni, Cr, Mo などの添加元素の適正化を図る必要がある。



$$DI = \sqrt{\frac{C}{10}} \times f_{Si} \times f_{Mn} \times f_{Cu} \times f_{Ni} \times f_{Cr} \times f_{Mo} \times f_{V} \times f_B \times 25.4 \text{ (mm)}$$

$$\left[\begin{array}{l} f_{Si} = 0.7Si + 1, f_{Mn} = 3.3Mn + 1 (Mn \leq 1.2\%), \\ f_{Mn} = 5.1(Mn - 1.2) + 5 (Mn > 1.2\%), f_{Cu} = 0.35Cu + 1, f_{Ni} = 0.36Ni + 1, \\ f_{Cr} = 2.16Cr + 1, f_{Mo} = 3.00Mo + 1, f_V = 1.75V + 1, f_B = 1.3 \end{array} \right]$$

Fig. 4 Relationship between plate thickness and DI value for quench-and-tempered steels

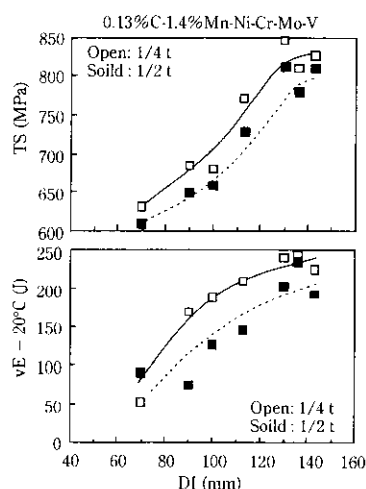


Fig. 5 Effect of DI value of the 150 mm thick plate on tensile strength and toughness

焼入れ性の指標である理想臨界直径 DI^0 と、当社製造実績における TS が 600 MPa 以上の高張力鋼の板厚との関係を Fig. 4 に示す。板厚 150 mm で 690 MPa の TS を得るには 110 mm 程度の DI 値が必要である。0.13% C-1.4% Mn 鋼で Ni, Cr, Mo および V 量を変化させた種々の DI 値を持つ鋼の板厚 150 mm 相当シミュレート材の機械的特性を Fig. 5 に示す。DI 値の増加にともない TS およびシャルピー吸収エネルギーが増加し、DI 値 110 mm 程度で、TS は

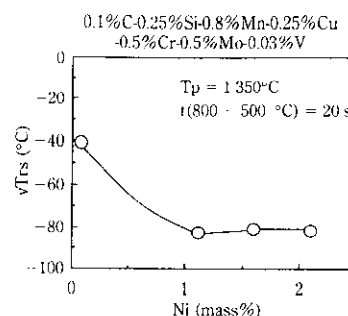


Fig. 6 Effect on Ni content on vTrs of synthetic coarse grained HAZ

700 MPa 程度となり、またシャルピー吸収エネルギーも良好である。DI 値 70 mm 程度では上部ベイナイト主体組織であるのに対し、110 mm 程度では下部ベイナイト主体組織に変化しており、このマイクロ組織の改善効果により機械的特性が向上する。

3.3 溶接部特性

耐溶接硬化性および耐割れ性のためにそれぞれ Ceq および Pcm の上限値を設定したが、溶接熱影響部 (HAZ) の靱性向上には Ni の添加が有効である。Fig. 6 は HT780 MPa 級鋼で再現溶接熱サイクルシャルピー試験を用いて Ni 量の影響を検討した結果であるが、Ni を 1% 以上添加すると vTrs で約 40°C 向上する。

4 鋼板および溶接継手の特性

4.1 150 mm 厚鋼板の製造

前章に示した鋼材製造の考え方にしたが、板厚 150 mm の鋼板を工場試作した。Table 2 に試作鋼の化学組成の実績値を示す。同表には比較のために用いた NT 製の SBV2 鋼の成分も示した。開発鋼は SBV2 鋼に比べて Ceq , Pcm が低く抑えられている。また、 ΔG は -0.47 であり再熱割れ感受性は十分低い。

鋼板は厚板圧延に引続き、QT 熱処理を行い製造した。Table 3 に試作鋼板の機械的特性値を SBV2 鋼と比較して示す。開発鋼は 1/2 t 部、1/4 t 部の機械的特性差の小さい均質な鋼板である。Fig. 7 に TS の温度依存性を示す。図中には NT 製の SBV2 鋼のデータも示した。開発鋼の室温の PWHT 前の TS は目標通り 700 MPa 程度であり、そのため室温から 350°C の温度範囲において PWHT 後も TS は 610 MPa 以上と開発目標を満足した。

開発鋼のシャルピー衝撃特性は Table 3 に示したように、PWHT 前後で目標値を満足した。Fig. 8 にシャルピー吸収エネルギーの遷移曲線を示す。PWHT により遷移曲線は高温側に移行するが、板厚方向各位置で吸収エネルギーの平均値は -40°C においても 100J

Table 2 Chemical compositions of the advanced SPV490 steel plate and the conventional SBV2 steel plate

	Thick. (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Nb	Ceq	Pcm	ΔG	DI (mm)
JIS G 3115 SPV490	≦ 75	≦ 0.18	0.15- 0.75	≦ 1.60	≦ 0.030	≦ 0.030	Alloying elements other than those listed may be added as required.						≦ 0.47	≦ 0.30	—	—
JIS G 3119 SBV2	≦ 75	≦ 0.25	0.15- 0.30	1.15- 1.50	≦ 0.035	≦ 0.040	0.40- 0.70	—	0.45- 0.60	—	—	—	—	—	—	—
SBV2	130	0.18	0.23	1.40	0.009	0.004	0.63	0.10	0.50	0.021	0.010	0.018	0.60	0.32	-0.08	92
Advanced SPV490	150	0.12	0.21	1.30	0.005	0.001	1.20	0.25	0.34	0.019	0.051	—	0.51	0.26	-0.47	103

Table 3 Mechanical properties of the advanced SPV490 steel plate and the conventional SBV2 steel plate

Steel	Thickness (mm)	PWHT 580°C × 27 h	Position	Tensile properties				Charpy impact properties			Preheat temp. without cracking*1 (°C)
				RT		350°C		vE0°C (J)	vE – 30°C (J)	vTrs (°C)	
				YS (MPa)	TS (MPa)	YS (MPa)	TS (MPa)				
JIS G 3115 SPV490	≦ 75		1/4 t	≧ 490	610-740	—	—	vE – 10°C ≧ 47 J		—	
Advanced SPV490	150	No	1/4 t	609	703	539	658	260	203	–68	75
			1/2 t	606	707	541	659	258	205	–68	
		Yes	1/4 t	599	693	531	634	239	181	–53	—
			1/2 t	595	694	533	687	229	171	–35	
SBV2	130	No	1/4 t	511	653	421	568	55	—	—	150

*1 JIS Z 3158

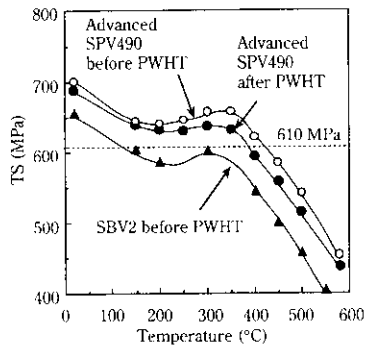


Fig. 7 Tensile strength at elevated temperatures of the advanced SPV490 and SBV2 steels before or after PWHT

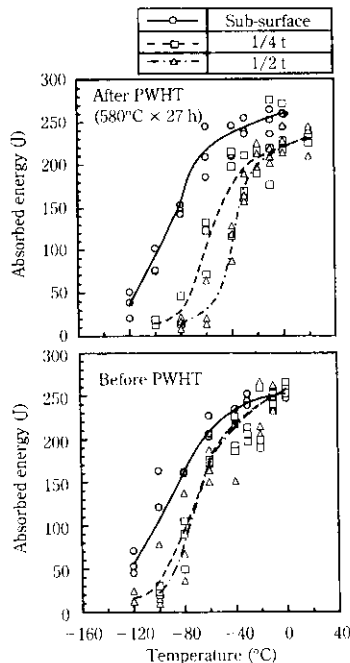


Fig. 8 V-notch Charpy transition curves of the advanced SPV490

以上と十分高い値であった。y 形溶接割れ試験の割れ阻止温度は、75°C であり、Table 3 に示したように、比較の SBV2 鋼の 150°C に対し良好な特性であった。

Photo 1 に試作鋼板のミクロ組織を示す。1/2t 部および 1/4t 部ともにミクロ組織に差がない均質な下部ベイナイト主体組織であった。

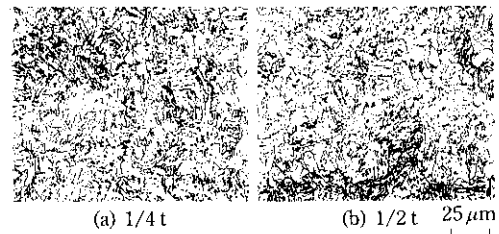


Photo 1 Microstructure of the advanced SPV490 steel

4.2 溶接継手特性

4.2.1 溶接条件

ボイラ圧力容器の立向溶接を対象とした MAG 溶接法、下向溶接を対象としたサブマージアーク溶接法により継手性能を評価した。溶接条件を Table 4 に示す。

4.2.2 溶接継手の特性

サブマージアーク溶接部に関しては PWHT 後に試験を行ったが、MAG 溶接法については PWHT 前後で試験を行った。Table 5 に、各継手の引張試験結果および継手のフュージョンライン (FL) および HAZ2 mm におけるシャルピー試験結果を示す。継手の引張強度は、室温から 350°C の範囲において PWHT 後でも Table 1 に示した J 標特性を満した。Fig. 9 に溶接継手のシャルピー吸収エネルギーの遷移曲線を示す。FL および HAZ2 mm のシャルピー吸収エネルギーは PWHT により低下はするが、MAG 溶接およびサブマージアーク溶接とも母材に設定した目標値 (vE - 30°C ≥ 47 J) を十分満足する値を示した。

5 大型ボイラ圧力容器への適用

得られた成果をもとに、360 MW 級 PFBC (pressurized fluidized bed combustion) ボイラ容器用の鋼材として板厚 89.4 mm の鋼板を製造した。板厚 89.4 mm 鋼板は溶接性の一層の向上と経済性を考慮し、板厚 150 mm 鋼板より低 C 化および低 Ni 化を図った成分系 (0.10% C-0.20% Si-1.30% Mn-1.0% Ni-0.25% Cr-0.35% Mo-0.02% V 鋼、Ceq = 0.49%、Pcm = 0.23%) とした。開発鋼を適用した 360 MW 級 PFBC 圧力容器は 1996 年 5 月から石川島播磨重工業 (株) において製作が開始され、1997 年 11 月に世界で最初の極厚高張力鋼を用いたものとして完成された。

この世界最大級の 360 MW 級 PFBC では圧力容器の内径は 15.4 m、高さは 44.6 m と大型化しているため、NT 製のボイラ圧力容器

Table 4 Welding conditions

Welding method	Welding position	Groove shape	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Shield gas	Heat input (kJ/mm)
MAG	Vertical	X	130-160	21-24	45-55	90%Ar + 10%CO ₂	3.5-6.0
Tandem SAW	Flat	X	L: 500 T: 550	L: 31-32 T: 33-34	600-700	—	2.0-3.5

Table 5 Tensile test and Charpy impact test results of welded joints

Welding method	Heat input (kJ/mm)	PWHT 580°C × 13.5 h	Tensile test			Charpy impact test		
			Test temp. (°C)	TS (MPa)	Location of fracture	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)	
							FL	HAZ 2 mm
MAG	3.5-6.0	No	RT	706	Base metal	0	233	284
			350	687	Base metal	-30	195	252
		Yes	RT	692	Base metal	0	201	241
			350	669	Base metal	-30	92	243
Tandem SAW	2.0-3.5	Yes	RT	714	Base metal	0	225	251
			350	645	Base metal	-30	176	261

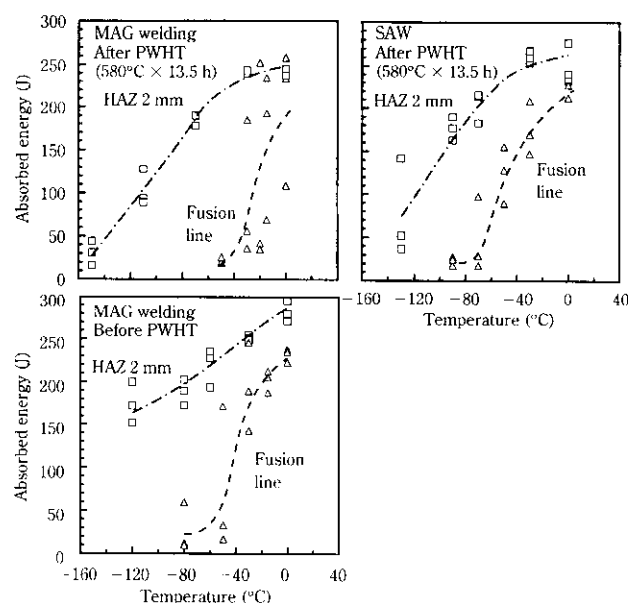


Fig. 9 V-notch Charpy transition curves of welded joints (1/4 t)

鋼板 SBV2 鋼を用いたとすると、板厚は 100 mm を超え、また鋼板の C_{eq} も 0.62% 程度と高くなることから、溶接時の低温割れが懸念される。しかし、本開発鋼を用いることによって板厚は約 10% 低減可能となり、 C_{eq} も低いことから溶接時の低温割れ防止の点で有利であり、 ΔG 値も 0 以下に制御できることから、PWHT 時における再熱割れ防止に関しても安全側にある。また圧力容器全体の鋼

材重量は 1900 t 程度になるため、鋼材重量低減効果は大きく、また板厚の低減にともなう溶接作業量の低減、輸送コストの低減などのメリットがあった。

なお、JIS における SPV490 鋼の適用最大板厚も、1995 年に 75 mm から 150 mm までに拡大された。今後とも本鋼板の多方面への適用が期待される。

6 結 言

ボイラ圧力容器用鋼材として、高温強度に対する基礎的検討に基づいて、高温強度と靱性および溶接性に優れた QT 製の板厚 150 mm の SPV490 鋼の開発をした。その結果、次の結論を得た。

- (1) 開発鋼板の常温強度および靱性は開発目標に対し十分な値を示した。また、母材のシャルピー吸収エネルギーは、PWHT 前後で、 -40°C においても 100 J 以上と十分高い値であった。
- (2) 室温から 350°C の範囲において、PWHT 後においても TS ≥ 610 MPa を十分満足した。
- (3) y 形溶接割れ試験の割れ阻止温度は、 75°C と良好であった。
- (4) MAG 溶接およびサブマージアーク溶接継手の継手強度は、室温から 350°C の範囲において、PWHT 後にも目標を満足した。
- (5) また、MAG 溶接およびサブマージアーク溶接継手の FL および HAZ2 mm のシャルピー吸収エネルギーは PWHT 後においても、母材に設定した目標値 ($vE - 30^{\circ}\text{C} \geq 47$ J) を十分満足する値を示した。

なお、本鋼の開発にあたり多くのご協力とご支援を戴いた石川島播磨重工業(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、日本ボイラ協会：「ボイラ技術講座 ボイラの材料と強度」、(1976)、123、[共立出版株式会社]
- 2) 丸山公一、中島英治：「高温強度の材料科学」、(1997)、5、[内田老鶴園]
- 3) 三宮好史：「第 4 回圧力容器の信頼性シンポジウムテキスト」、(1994)、13、[日本圧力容器研究会 (JPVRC)・日本溶接協会・日本高圧技術協会・日本鉄鋼協会]

術協会・日本鉄鋼協会]

- 4) 日本溶接協会：WES3003「低温用圧延鋼板判定基準」、(1995)
- 5) 内木虎蔵、岡林久喜：溶接学会誌、**39**(1970)10、1059
- 6) 鹿内伸夫、田川寿俊、山田 真：熱処理、**27**(1987)3、136
- 7) 片山典彦、梶谷一郎、今川公男、石田海男：石川島播磨技報、**38**(1998)3、172