

発電プラント用高靱性高張力厚鋼板 SA-738 Gr. B の開発

Development of SA-738 Gr. B High Strength Steel Plate with Excellent Toughness for Power Generating Plants

大坪 浩文 OHTSUBO Hirofumi JFE スチール スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員 (係長)
荒木 清己 ARAKI Kiyomi JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部厚板・鍛造室 主任部員 (課長)
森谷 豊 MORIYA Yutaka JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (部長)

要旨

近年の米国や中国、新興国を中心とした原子力発電所の新規建設の需要増加に対応して、JFE スチールでは、原子炉格納容器に使用される ASME 規格 (ASME: The American Society of Mechanical Engineers) SA-738 Gr. B 高張力厚鋼板を開発した。本開発鋼は、ASME 規格において板厚 44.5 mm 以下で規定されている、溶接部の溶接後熱処理 (PWHT: Post-weld heat treatment) の省略規定を満足する優れた低温靱性を有しているとともに、予熱低減にも配慮した溶接施工性に優れた鋼材である。また、板厚 100 mm 級の厚物材では、不純物低減による低温靱性の向上を図るとともに、連続鋳造スラブに対して鍛造-圧延プロセスを適用し、優れた内質健全性を達成した。これらの開発鋼は、新型原子炉の格納容器としてすでに適用されつつある。

Abstract:

JFE Steel has developed ASME SA-738 Gr. B (ASME: The American Society of Mechanical Engineers) high strength steel plate for reactor containment vessels in response to great demand for new construction of nuclear power plants mainly in America, China, and developing countries. The developed steel has excellent toughness to meet the requirement of exemption rule of post-weld heat treatment (PWHT) in ASME with thickness 44.5 mm or less, and also has good weldability through the reduction of preheat temperature. Heavy section plate around 100 mm thickness has good toughness by reducing impurity levels, and excellent internal qualities can be obtained through the application of a forging and plate rolling process to continuous casting slabs. These developed steels have already been adapted to some nuclear power plants.

1. はじめに

CO₂ 削減による地球温暖化防止や世界的なエネルギー需要拡大に応えるため、米国や中国、新興国を中心に原子力発電所の新規建設が多数計画されている。今後建設される原子力発電プラントは、第 3 世代原子炉が主流になるといわれており¹⁾、その中の一つである出力 1 000 MW 級の加圧水型の新型原子炉では、原子炉格納容器用鋼板として、ASME 規格 (ASME Boiler & Pressure Vessel Code, ASME: The American Society of Mechanical Engineers) の SA-738 Gr. B が指定されている。

原子炉格納容器は容積が非常に大きく、建造は現地で行われる部分が多いため、現地溶接部に溶接後熱処理 (PWHT: Post weld heat treatment) を施すことは、コストおよび施工

負荷の増加を招く。一方、ASME 規格の Section III, Division I, Subsection NE, Class MC Components (原子炉格納容器に関する規格) では、SA-738 などの一部の炭素鋼において、C 含有量と予熱温度の制限を適用した場合に、靱性要求値を厳しくすることによって、板厚 44.5 mm までの PWHT を省略可能であることが認められている。したがって、所定の成分範囲において、上記規定を満足する優れた母材および溶接継手部の低温靱性を有する鋼板の開発が求められている。

また、原子炉格納容器には、機器搬入口やエアロック用の材料として板厚 100 mm 級の厚物材が使用される。このような厚物材を連続鋳造スラブから圧延プロセスで製造する場合には、板厚中心部での未圧着のセンターポロシティなどの影響による機械的特性の低下が懸念される。一方で、JFE スチールでは、厚物材の内質健全性の向上を目的に、厚板圧延前に連続鋳造スラブに鍛造を付与するプロセスを

表 1 開発鋼の目標性能

Table 1 Target properties of the developed steel

	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ceq
SA-738 Gr. B	$t \leq 38.1$	≤ 0.20	0.15/ 0.55	0.90/ 1.50	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 0.35	≤ 0.60	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.48
	$38.1 < t \leq 63.5$			≤ 0.30									
	$t > 63.5$			0.90/ 1.60						—			

Thickness (mm)	Base plate						Welded joint	
	Tensile properties			Charpy impact properties	Drop weight properties	Tensile properties		Charpy impact properties
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	\sqrt{E} (J)	T_{NDT} (°C)	TS (MPa)	\sqrt{E} (J)	
$38.1 < t \leq 63.5$	≥ 414	587/703	≥ 20	$\sqrt{E_{-60^\circ C}}$ ≥ 48 (Min.) ≥ 55 (Ave.)	—	≥ 587	$\sqrt{E_{-40^\circ C}}$ ≥ 48 (Min.) ≥ 55 (Ave.)	
$t > 63.5$	≥ 414	587/703	≥ 20	$\sqrt{E_{-40^\circ C}}$ ≥ 62 (Min.) ≥ 68 (Ave.)	≤ -25	≥ 587	$\sqrt{E_{-40^\circ C}}$ ≥ 62 (Min.) ≥ 68 (Ave.)	

$Ceq = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$

YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation \sqrt{E} : Absorbed energy T_{NDT} : Nil-ductility transition temperature

開発しており^{2~5)}、圧力容器用鋼板などですでに多くの実績を有している。本開発鋼においても、上記プロセスを適用することで、連続鋳造スラブを用いた、優れた内質特性を有する厚物材を開発した。

本報告では、原子炉格納容器用として開発した SA-738 Gr. B 高張力厚鋼板の母材性能、溶接性、溶接継手性能について紹介する。

2. 原子炉格納容器用 SA-738 Gr. B の開発目標

2.1 SA-738 Gr. B の目標性能

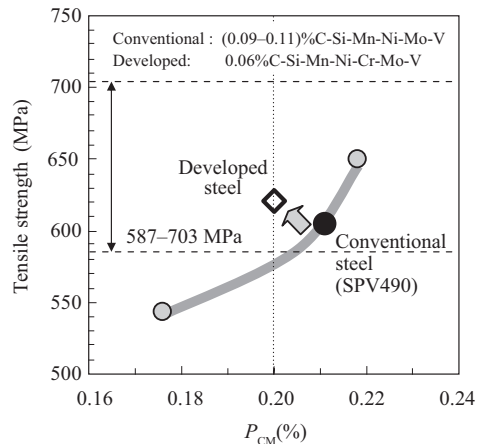
表 1 に原子炉格納容器用として開発した SA-738 Gr. B の成分と機械的特性の ASME 規格をベースとした目標性能を示す。SA-738 Gr. B は、焼入れ・焼もどし (Quench-Temper: Q-T) 処理で製造される調質型 600 MPa 級鋼であり、合金元素および炭素当量 Ceq の上限が板厚ごとに規定されている。また、PWHT (615°C × 10 h) による熱履歴を加えた後の特性を担保するために、Temper 温度 650°C 以上にて、所望の機械的特性を確保することを目標にした。

靱性保証温度については、最低使用温度を基に設定され、原子炉の建設地域や構造、板厚などで変化する。本開発では、ASME 規格に基づき、寒冷地での建設を想定してシャルピー衝撃特性や落重特性の試験温度を算出し、さらに安全代を考慮した上で -60°C や -40°C での靱性確保を開発目標として設定した。特に、前述の PWHT 省略規定を適用する場合には、シャルピー衝撃特性について、規定温度よりも 5.6°C 低い温度で規定の吸収エネルギーを満足する、または規定温度での吸収エネルギーを 7 J 上げることが要求される。

2.2 開発コンセプト

上記の目標性能を達成するために、日本国内の原子力発電プラントの原子炉格納容器用鋼板として実績がある JIS 規格材 (JIS: 日本工業規格) の調質型 600 MPa 級鋼である SPV490^{6~8)} をベースとして検討を行った。

製造方法に関しては、SA-738 Gr. B、SPV490 ともに Q-T であるが、Temper 温度を 650°C 以上の高温にすると、一般的に転位の回復、析出物の粗大化などが進行するため、強度低下が生じる。したがって、高温 Temper、さらにその後の PWHT を行っても所望の強度を確保するためには、焼もどし軟化抵抗を高めるなど、成分設計の上での配慮が必要



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

図 1 溶接後熱処理 (PWHT) 後の強度と P_{CM} との相関
Fig. 1 Relationship between tensile strength and P_{CM} after post weld heat treatment (PWHT)

である。

一方で、板厚 44.5 mm 以下の鋼板で PWHT 省略を達成するためには、C 量の低減や溶接割れ感受性組成 P_{CM} の低減により、溶接熱影響部 (HAZ) の硬さ上昇を抑制することが重要である。

0.11% C の従来鋼 SPV490 と 0.06% C 鋼をベースに、高温 Temper (670℃) と PWHT (615℃ × 10 h) を実施した後の強度について実験室検討を行った結果を図 1 に示す。従来鋼 SPV490 に対して、開発鋼では低 C 化による強度低下を補償するため、Mo, V, Cr, Si などの焼もどし軟化抵抗が大きい元素⁹⁾ を最適に添加することで、低 P_{CM} (≤ 0.20%) で強度確保が可能なる成分設計としている。

さらに、低温靱性を向上するために、不純物元素の低減効果について検討した。0.06% C 鋼をベースとして、Q-T-

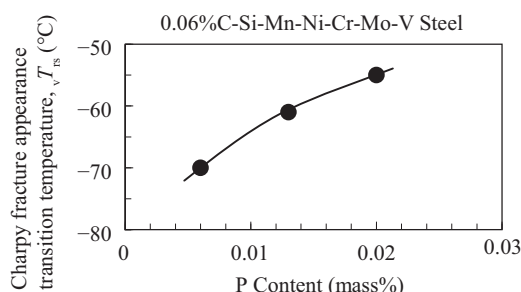


図 2 溶接後熱処理 (PWHT) 後の母材靱性に及ぼす P 量の影響
Fig. 2 Effect of P content on toughness after post weld heat treatment (PWHT)

PWHT 後の母材靱性に及ぼす P 量の影響を検討した結果を図 2 に示す。P 量を低減することにより、マトリックスの靱性低下を抑制し、PWHT 後の母材靱性向上が可能である。

また、板厚 100 mm 級の厚物材では、連続製造スラブを用いて板厚中心部での靱性を確保することが課題であり、JFE スチールですでに確立している鍛造-圧延プロセスを適用することにした。上述の板厚 40 mm 級の鋼板において検討したように、PWHT 後の強度確保のために、焼もどし軟化抵抗の大きい Mo, V, Cr などの合金元素の最適添加に加えて、低温靱性の向上対策として、不純物元素 P, S の低減を成分設計に反映させた。

3. SA-738 Gr. B 開発鋼の特性

3.1 開発鋼 (板厚 47.6 mm) の母材性能および溶接継手性能

開発鋼の化学成分 (ASME Sec. III の PWHT 省略規定が適用される板厚 44.5 mm 以下の鋼板も含む) を表 2 に示す。C 量を低く抑え、 P_{CM} を 0.20% 以下に低減することで、溶接施工性の向上を図っている。また、PWHT による強度低下を抑制するため、焼もどし軟化抵抗を高める元素 (Mo, V, Cr, Si など) を積極的に活用した成分系である。さらに、低温靱性の向上のため、製鋼工程での不純物元素 P, S の低減を図っている。

焼入れ・焼もどし (Q-T) プロセスにより製造した開発鋼の母材性能を表 3 に示す。PWHT 前後において、SA-738

表 2 開発鋼の化学組成

Table 2 Chemical compositions of the developed steels

Thickness (mm)	(mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Others	Ceq	P_{CM}
47.6	0.05	0.39	1.44	0.003	0.001	Cu, Ni, Cr, Mo, V, etc.	0.46	0.20
103.1	0.12	0.30	1.54	0.003	0.001	Ni, Cr, Mo, V, etc.	0.52	0.25

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

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

表 3 開発鋼の母材性能

Table 3 Mechanical properties of base plate of the developed steel

Thickness (mm)	Position	Direction	PWHT	Tensile properties			Charpy impact properties		
				YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\sqrt{E}_{-40^\circ C}$ (J)	$\sqrt{E}_{-60^\circ C}$ (J)	$\sqrt{T_{ts}}$ (°C)
47.6	1/4t	T	—	573	642	28	431	380	-97
			615°C × 10 h	565	642	27	343	303	-80

Tensile test specimen: ASME SA-370, $\phi 12.7$ mm (GL 50.8 mm)

Charpy impact test specimen: ASME SA-370, Full-size

ASME: The American Society of Mechanical Engineers

PWHT: Post weld heat treatment YS: Yield strength TS: Tensile strength El: Elongation

$\sqrt{E}_{-40^\circ C}$: Absorbed energy at $-40^\circ C$ $\sqrt{E}_{-60^\circ C}$: Absorbed energy at $-60^\circ C$ $\sqrt{T_{ts}}$: Fracture appearance transition temperature

表 4 開発鋼の最高硬さ試験結果 (板厚: 47.6 mm)

Table 4 Results of maximum hardness test (Thickness: 47.6 mm)

Preheat temperature (°C)	Maximum hardness, HV10
R.T. (25)	275
50	266
100	275
150	260

Test method: JIS Z 3101 (JIS: Japanese Industrial Standards)

Welding condition: SMAW SMAW: Shielded metal arc welding Heat input: 1.7 kJ/mm R.T.: Room temperature

表 5 開発鋼の y 形溶接割れ試験結果

Table 5 Results of y-groove weld cracking test

Thickness (mm)	Welding condition	Preheat temperature (°C)	Cracking ratio (%)		
			Surface	Section	Root
47.6	SMAW Welding consumable: LB-62UL* Heat input: 1.7 kJ/mm Atmosphere: 30°C-80%	R.T. (25)	0	0	0
		50	0	0	0
		75	0	0	0
		100	0	0	0

Test method: JIS Z 3158 (JIS: Japanese Industrial Standards)

*Supplied by Kobe Steel, Ltd.

SMAW: Shielded metal arc welding R.T.: Room temperature SMAW: Shielded metal arc welding

表 6 開発鋼の溶接条件と溶接継手性能

Table 6 Welding condition and mechanical properties of welded joints of the developed steel

Thickness (mm)	Groove configuration	Welding condition	PWHT	Tensile properties		Charpy impact properties		
				TS (MPa)	Fracture position	Position	$\sqrt{E_{-40^\circ\text{C}}}$ (J)	
47.6	X	GMAW Welding consumable: MG-S3N* Heat input: 3.8 kJ/mm	—	638	WM	1/4t	WM	147
							FL	176
							HAZ	289
			615°C×10 h	619	WM	1/4t	WM	144
							FL	176
							HAZ	244

*Supplied by Kobe Steel, Ltd. GMAW: Gas metal arc welding PWHT: Post weld heat treatment TS: Tensile strength
WM: Weld metal FL: Fusion line HAZ: Heat-affected zone $\sqrt{E_{-40^\circ\text{C}}}$: Absorbed energy at -40°C

Gr. B の規格を満足する強度と、-60°Cにおいても十分に優れた低温靱性が得られている。

溶接性の評価試験として実施した最高硬さ試験の結果を表 4, y 形溶接割れ試験の結果を表 5 に示す。P_{CM} を 0.20% 以下としているため、予熱なしの条件においても、最高硬さ 275 ポイントと低く、また割れ防止予熱温度も室温以下という優れた溶接性を有している。

また、開発鋼の溶接継手性能を表 6 に示す。PWHT 前後において、母材の規定を満足する継手強度と優れた溶接部靱性が得られている。PWHT 省略規定を適用する場合には、最低使用温度から 5.6°C 低い温度において靱性規定値を満足する、または規定温度での吸収エネルギーを 7J 上げることが必要であるが、本開発鋼は、PWHT なしでも -40°C においても十分に規定値を上回る優れた低温靱性を有している。

以上の母材靱性および溶接継手靱性の結果から、本開発鋼は、PWHT 省略可能な低温靱性の優れた鋼板であることを確認した。

3.2 開発鋼 (板厚 103.1 mm) の母材性能および溶接継手性能

原子炉格納容器の機器搬入口やエアロック用の材料として使用される厚物材の化学成分を表 2 に示す。写真 1, 2 に示すように、連続鋳造スラブに対して、幅方向と板厚方向に鍛造加工を行い、その後に厚板圧延を実施している。焼入れ・焼もどし (Q-T) プロセスにより製造した開発鋼の母材特性を表 7 に示す。厚物材は、PWHT を実施することが前提であるが、PWHT 前後において、1/4t, 1/2t ともに規格値を十分に満足する強度および -40°C での優れた低温靱

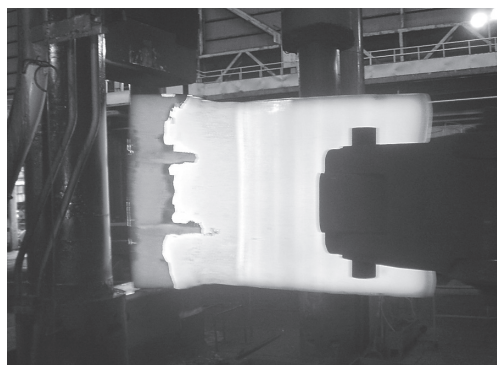


写真1 連続鋳造スラブ幅方向への鍛造加工付与

Photo 1 Forging reduction in widthwise of continuous casting slab

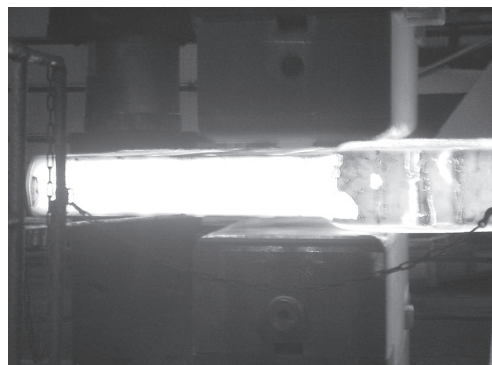


写真2 連続鋳造スラブ板厚方向への鍛造加工付与

Photo 2 Forging reduction in thicknesswise of continuous casting slab

表7 開発鋼の母材性能

Table 7 Mechanical properties of base plate of the developed steel

Thickness (mm)	Position	Direction	PWHT	Tensile properties			Charpy impact properties			Drop weight properties T_{NDT} (°C)
				YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\sqrt{E}_{-20^{\circ}\text{C}}$ (J)	$\sqrt{E}_{-40^{\circ}\text{C}}$ (J)	\sqrt{T}_{TS} (°C)	
103.1	1/4t	T	—	591	674	28	271	242	-69	-50
			615°C×10 h	566	663	28	295	258	-69	-40
	—		551	651	22	187	199	-43	—	
	615°C×10 h		536	646	24	219	174	-38	—	

Tensile test specimen: ASME SA-370, $\Phi 12.7$ mm (GL 50.8 mm)

Charpy impact test specimen: ASME SA-370, Full-size

ASME: The American Society of Mechanical Engineers

Drop weight test specimen: ASTM E208 type P-3

ASTM: The American Society for Testing and Materials

PWHT: Post weld heat treatment

YS: Yield strength

TS: Tensile strength

El: Elongation

$\sqrt{E}_{-20^{\circ}\text{C}}$: Absorbed energy at -20°C

$\sqrt{E}_{-40^{\circ}\text{C}}$: Absorbed energy at -40°C

\sqrt{T}_{TS} : Fracture appearance transition temperature

T_{NDT} : Nil-ductility transition temperature

表8 開発鋼のy形溶接割れ試験結果

Table 8 Results of y-groove weld cracking test

Thickness (mm)	Welding condition	Preheat temperature (°C)	Cracking ratio (%)		
			Surface	Section	Root
103.1	SMAW Welding consumable: LB-62UL* Heat input: 1.7 kJ/mm Atmosphere: 30°C-80%	75	15	23	94
		100	0	17	67
		125	0	0	0

Test method: JIS Z 3158 (JIS: Japanese Industrial Standards)

*Supplied by Kobe Steel, Ltd.

SMAW: Shielded metal arc welding

表9 開発鋼の溶接条件と溶接継手性能

Table 9 Welding condition and mechanical properties of welded joints of the developed steel

Thickness (mm)	Groove configuration	Welding condition	PWHT	Tensile properties		Charpy impact properties		
				TS (MPa)	Fracture position	Position	$\sqrt{E}_{-40^{\circ}\text{C}}$ (J)	
103.1	X	GMAW Welding consumable: MG-S3N* Heat input: 3.8 kJ/mm	—	678	WM	1/4t	WM	118
							FL	124
							HAZ	303
			615°C×10 h	623	WM	1/4t	WM	162
							FL	172
							HAZ	303

*Supplied by Kobe Steel, Ltd.

GMAW: Gas metal arc welding

PWHT: Post weld heat treatment

TS: Tensile strength

WM: Weld metal

FL: Fusion line

HAZ: Heat-affected zone

$\sqrt{E}_{-40^{\circ}\text{C}}$: Absorbed energy at -40°C

性を有している。

開発鋼の 103.1 mm 全厚試験片での y 形溶接割れ試験結果を表 8 に示す。割れ防止予熱温度は 125℃であり、600 MPa 級鋼の厚物材として、十分に優れた溶接性を有している。

また、開発鋼の溶接継手性能を表 9 に示す。PWHT 前後において、母材の規定を満足する継手強度と -40℃における優れた溶接部の低温靱性を有している。

4. おわりに

原子炉格納容器用の高靱性高張力厚鋼板 SA-738 Gr. B として、ASME Sec. III において板厚 44.5 mm 以下で規定されている PWHT 省略規定を満足する優れた低温靱性を有する高溶接施工性厚鋼板を開発した。また、板厚 100 mm 級の厚物材では、連続鑄造スラブに鍛造-圧延プロセスを適用し、優れた内質特性を有する厚鋼板を開発した。

本開発鋼は、新型原子炉プラントの原子炉格納容器用鋼板として、すでに適用が始まっており、今後も海外での新設プラントへ採用されていくものと期待している。

また、SA-738 Gr. B は、ASME Sec. VIII においてタンク、圧力容器用鋼板として幅広く用いられている SA-537 Cl. 2 に比べて、高い許容応力が設定されている。したがって、板厚低減による重量削減などのニーズに応えられる圧力容器用鋼板としても、今後の適用が期待される。

参考文献

- 1) たとえば、日本溶接協会. 「原子力の国際的な動きに関する国内シンポジウム—国際化の現状と展望—」資料集. 2008
- 2) 荒木清己, 郡山猛, 仲村基志, 川崎製鉄技報. 1998, vol. 30, no. 3, p. 57-61.
- 3) 荒木清己, 弟子丸慎一, 近藤寛, 郡山猛. 圧力技術. 2003, vol. 41, no. 4, p. 168-175.
- 4) 林謙次, 荒木清己, 阿部隆. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 56-62.
- 5) 荒木清己, 堀江正之, 大坪浩文, 和田典巳. 火力原子力発電大会論文集. 2009, p. 181-187.
- 6) 飯田國廣, 和田孝直, 松本輝夫, 正岡功, 広瀬圭介, 田中康浩. 火力原子力発電. 1979, vol. 30, no. 6, p. 629-641.
- 7) 飯田國廣, 石川晃司, 酒井啓一, 小野塚正一, 佐藤誠, 征矢勇夫. 圧力技術. 1979, vol. 17, no. 2, p. 72-79.
- 8) 田中康浩, 西山昇, 広瀬圭介, 千貫昌一, 関根稔弘, 楠原祐司. 川崎製鉄技報. 1980, vol. 12, no. 1, p. 78-90.
- 9) R. A. Grange; C. R. Hribal; L. F. Porter. Metallurgical Transactions A. 1977, vol. 8A, no. 11, p. 1775-1785.



大坪 浩文



荒木 清己



森谷 豊