

原子力プラント用高強度 Mn-Ni-Mo 鋼 SQV 2B の材質特性*

川崎製鉄技報
18 (1986) 4, 314-320

Mechanical Properties of High-Strength Mn-Ni-Mo Steel for Nuclear Power Plant



吉村 茂彦
Shigehiko Yoshimura
水島製鉄所 管理部厚
板管理室 主査(課長)



西崎 宏
Hiroshi Nishizaki
水島製鉄所 厚板鑄鍛
部厚板鑄鍛技術室 主
査(掛長)



杉江 英司
Eiji Sugie
鉄鋼研究所 水島研究
部第2研究室 主任研
究員(課長)



久保 高宏
Takahiro Kubo
鉄鋼研究所 厚板研究
部厚板研究室



佐藤 正信
Masanobu Sato
三菱重工業(株) 高砂
研究所材料強度研究室
主務

1 緒 言

加圧水型原子力発電プラント (PWR プラント) は原子炉を含む一次系設備とタービン発電機を含む二次系設備が蒸気発生器を介して分離されているという構造上の特徴をもつ。1957年に原型炉の運転を開始した PWR プラントも最近ではその発電能力が 1150 MW 級のものが建設されるようになり、プラント全体の構造も大型化する勢にある¹⁻⁴⁾。この出力のプラントでは、通常 4 ループの構造となり、4 基の蒸気発生器を有しているが、これらに用いられる材料も設計圧力の増大にともなう板厚の増大を高強度化によって抑える試みがなされている。すなわち、この蒸気発生器の胴板には 2, 3 ループでは SQV 1A (引張強さ 56 kgf/mm² 以上) 鋼板が使用されているがこれを SQV 2B (引張強さ 63 kgf/mm² 以上) 鋼板にかえ、軽量化を図ろうとするものである。

このような対象に用いられる材料については、常温および高温に

要旨

1150 MW 級の加圧水型 (PWR) 原子力発電プラントの蒸気発生器用鋼板を想定して、高強度鋼板である SQV 2B ($TS \geq 63 \text{ kgf/mm}^2$) の板厚 100 mm 鋼板を製造し、その特性を調べた。鋼は P, S, As, Sb などの不純物を低下した結果、板内の成分偏析は少なく、機械的性質の差も小さい。母材と SAW, MIG 溶接継手の常温および高温強度さらに衝撃特性は規格値を満足し、 RT_{NDT} も -45°C と良好である。母材および溶接継手 HAZ 部の静的および動的破壊靱性値、き裂伝播停止破壊靱性値はいずれも通産省告示 501 号 (昭和 55 年) の K_{IR} 曲線を上まわっている。以上の結果より、この鋼板は原子力プラント機器用として十分な材質特性をもっていることが確認された。

Synopsis:

High strength JIS SQV 2B 100 mm thick plate for the steam generator of a 1150 MW class pressurized water reactor type plant is manufactured and its characteristics are examined. Because of the reduction of impurities such as P, S, As and Sb in steel, the segregation of the elements and variations of mechanical properties in the whole plate are minimized. The yield and tensile strengths at ambient and high temperatures and impact properties of base material and welded joints by SAW and MIG fulfil the specifications. Furthermore those RT_{NDT} 's are lower than -45°C . The static and dynamic fracture toughness and the crack arrest fracture toughness are higher than those of K_{IR} curve specified by MITI No. 501. From these results, it is concluded that this material has sufficient safety for this purpose.

おける強度と溶接性が優れているばかりでなく、例えば下記に示す通産省告示 501 号の K_{IR} 式を上まわる高い靱性が要求される。

$$K_{IR} = 94.89 + 4.334 \exp [0.0261 (T - RT_{NDT} + 88.9)]$$

(kgf/mm^{3/2})

そこで今回 4 ループ型 PWR プラント蒸気発生器 (Fig. 1) のような原子力プラント機器への適用を目的に、板厚 100 mm の SQV 2B 鋼板を実生産規模で製造し、母材および溶接継手の特性、とくに破壊靱性について適用の可否を検討した。

2 供試鋼板の製造

今回の供試鋼板の製造にあたり目標とした性能を Table 1 に示す。この目標性能を満足するため、過去の 200 mm 厚を超える SQV 2A 鋼板の試作^{5,6)}を通じて得られた知見をもとにさらに高強度、

* 昭和61年9月1日原稿受付

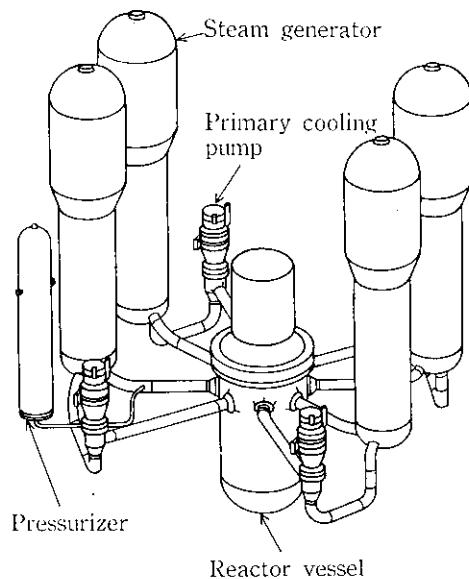
Fig. 1 Outline of the PWR type nuclear power plant (H. Susukida²⁾)

Table 1 Aiming value of mechanical properties

	Tensile Property			Impact property	Drop weight test
	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	$\sqrt{E_{-12}}$ (kgf·m)	RT_{NDT} (°C)
Room temp.	≥49	63~81	≥16	≥4.8 (ave) ≥4.1 (any)	<-12

高靱性を得るための目標化学成分を決定した。強度確保と溶接割れ性のバランスのよい C 含有量は 0.20% とし、さらに強度・靱性確保の点から Ni 量を、常温および高温強度確保の点から Mo 量を規格範囲内で上限近傍に設定した。また、靱性確保と内部性状の清浄化を図ることを狙いとし低 P ならびに低 S 仕様とした。Al および N は AlN を形成し結晶粒の微細化を通じ靱性改善に寄与するので、靱性改善効果の高い Al、N 量の添加量バランスを選定した。

Fig. 2 に製造工程図の概略を示す。溶製においては、不純物管理の徹底により、高純度鋼を溶製し、次の脱ガス工程においてガス成分の低減を図った。造塊においては、38t の大型上広鋼塊を使用

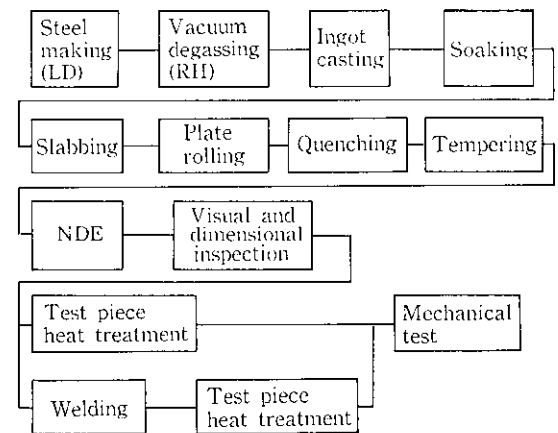


Fig. 2 Manufacturing process

Table 2 Heat treatment condition

Heat treatment		Spec. of JIS3120 SQV 2B	Actual condition
Quenching for plate	Temp.	855~1 000°C	880°C
Tempering for plate	Temp.	≥610°C	645°C
	Time	≥30 min × t/25	210 min
PWHT for test piece	Temp.	—	615°C
	Time	—	20 h

し、無酸化下注法により、非金属介在物を低減した。圧延寸法は板厚さ 100 mm、幅 4 000 mm とした。熱処理は、母板に対しては強度、靱性を考慮し最適な温度を選定し焼入れ焼もどしを、さらに試験片に対し PWHT を行った。熱処理条件を Table 2 に示す。

3 材質特性

供試鋼板の母材および SAW, MIG 溶接継手について、基本性能試験ならびに破壊靱性試験を行った。

3.1 母材試験結果

3.1.1 化学成分

鋼板トップおよびボトム部の板厚方向 3 箇所より採取したサンプルを用いて実施した製品分析結果を Table 3 に示す。各成分とも

Table 3 Chemical composition

		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	As	Sn	Sb	Co	Al (sol)	Al (Total)	N (ppm)	Ceq* (WES)
JIS G3120 SQV 2B Spec.		≤0.25	0.15 0.30	1.15 1.50	≤0.035	≤0.040	—	0.40 0.70	—	0.45 0.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Aiming		0.20	0.27	1.45	≤0.005	≤0.003	—	0.67	0.13	0.58	—	—	—	—	—	—	—	0.017	—	90	0.64
Heat Analysis		0.20	0.27	1.42	0.003	0.003	0.04	0.64	0.15	0.57	0.002	0.001	0.001	0.001	<0.001	0.0004	0.004	0.021	0.022	98	0.64
Product analysis	Top	Surface (5 mm)	0.20	0.27	1.40	0.003	0.003	0.04	0.65	0.14	0.58	0.003	0.002	0.002	<0.001	0.0004	0.004	0.018	0.020	88	0.63
		1/4 t	0.20	0.27	1.41	0.004	0.003	0.04	0.65	0.14	0.59	0.003	0.002	0.003	<0.001	0.0004	0.004	0.018	0.020	90	0.64
		1/2 t	0.21	0.23	1.43	0.004	0.003	0.05	0.66	0.15	0.59	0.003	0.002	0.002	<0.001	0.0004	0.004	0.017	0.019	93	0.65
	Bot-tom	Surface (5 mm)	0.19	0.27	1.40	0.002	0.003	0.05	0.65	0.14	0.58	0.003	0.002	0.003	<0.001	0.0004	0.004	0.018	0.019	91	0.62
		1/4 t	0.20	0.28	1.43	0.004	0.003	0.05	0.66	0.14	0.59	0.002	0.002	0.003	<0.001	0.0004	0.004	0.017	0.019	94	0.64
		1/2 t	0.19	0.27	1.41	0.004	0.002	0.04	0.64	0.13	0.57	0.002	0.002	0.002	<0.001	0.0004	0.004	0.017	0.019	88	0.62

* $C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$

JIS の規格内であり、取鍋分析値ともよく一致しており、鋼板内での成分ばらつきも少ない。また不純物元素もきわめて少ない清浄な鋼板である。

3.1.2 内部性状

鋼板のサルファプリントを Photo 1 に示す。低 S でそのうえ偏析の非常に少ないレベルであることが示されている。Table 4 に JIS G0555 に従った清浄度試験の結果を示す。鋼板のいずれの位置においても、非金属介在物の少ない清浄な鋼板である。また、通産省告示 501 および JIS G0801 に従って垂直法による超音波探傷試験を行ったが、欠陥エコーは全く検出されず内部品質のすぐれた鋼板であることが確認された。

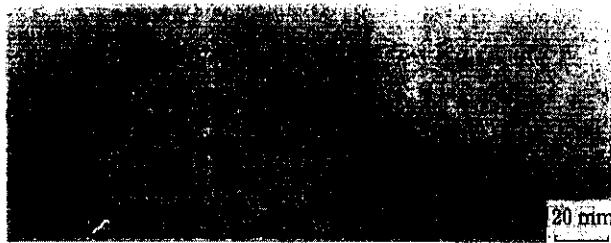


Photo 1 Sulphur print

Table 4 Cleanliness test*

Position	Thickness	dA (%)	dB (%)	dC (%)	dA+dB+dC (%)
Top	$1/4 t$	0.02	0	0	0.02
	$1/2 t$	0.02	0	0	0.02
Bottom	$1/4 t$	0.02	0	0	0.02
	$1/2 t$	0.01	0.01	0	0.02

* Test method: JIS G0555

3.1.3 ミクロ組織

Photo 2 に鋼板トップ部の $1/4 t$ および $1/2 t$ 部のミクロ組織を示す。均一なベイナイト組織である。Photo 3 に JIS G0551 の浸炭法により行ったオーステナイト粒度試験の結果を示す。オーステナイト結晶粒は粒度番号は 7.5 の細粒である。

3.1.4 機械試験

Table 5 に鋼板トップおよびボトム部の $1/4 t$, $1/2 t$ 部での PWHT 後の常温引張試験結果を示す。強度はいずれも JIS 要求値を十分満足しており、採取位置の差異によるばらつきも少ない。Fig. 3 は -196°C から 600°C までの引張試験結果をまとめて示したものである。高温強度は通産省告示 501 号の設計値を満足している。

Photo 4 に側曲げ試験の結果を示す。曲げ表面には割れの発生は認められず良好な曲げ延性をもつ。

Table 6 に PWHT 後の鋼板各位置におけるシャルピー衝撃試験および落重試験の結果を示す。試験は予ひずみのない場合と、5% の予ひずみを与えた後時効処理をした場合について行ったが、いずれも -12°C での吸収エネルギー値は JIS 規格値 $4.8 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ 以上を十分満足している。また、落重試験における NDT 温度は -45°C 以下であり、原子力プラント機器として十分満足できる値である。なお、シャルピー衝撃試験での vT_{r50} , $vT_{r35 \text{ mll}}$ と T_{NDT} との対比で、 T_{NDT} はいずれも関連温度 (RT_{NDT}) と等しいことが確認された。



Photo 2 Microstructure

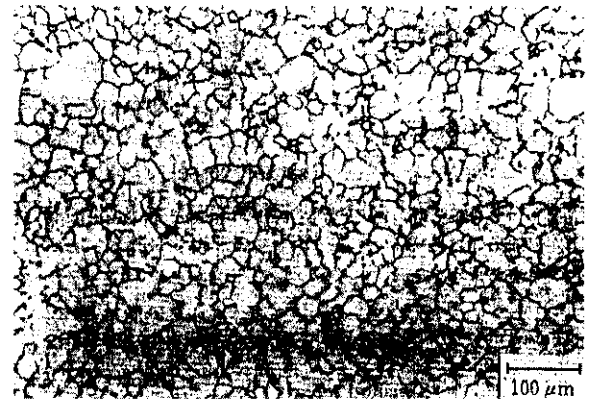


Photo 3 Austenite grain size

Table 5 Tensile properties at room temperature

Position	Thickness	Direction	YS (0.2%) (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	RA (%)
Top	$1/4 t$	T	55.2 55.1	70.4 70.3	25 25	67 68
	$1/2 t$	T	54.3 54.6	70.7 70.2	24 24	64 66
Bottom	$1/4 t$	T	54.0 53.9	69.2 68.7	26 27	68 67
	$1/2 t$	T	53.1 53.4	68.6 69.6	27 26	67 67

T.P. size: JIS Z2201 No. 10 type

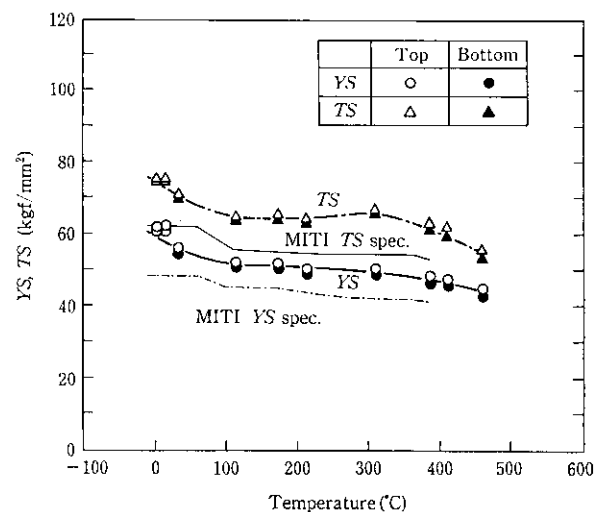


Fig. 3 Tensile properties at various test temperatures



Photo 4 Side bend test result

Table 6 Impact and drop weight properties

			Impact test*							DWT
			$\bar{v}E_{-12^{\circ}\text{C}}$ (kgf·m)	$LE_{-12^{\circ}\text{C}}$ (mm)	$\bar{v}T_{r30}$ (°C)	$\bar{v}T_{r50}$ (°C)	$\bar{v}T_{r35\text{m11}}$ (°C)	$\bar{v}T_{rs}$ (°C)	T_{NDT} (°C)	
JIS G3120 SQV 2B spec.			≥ 4.8 (ave) ≥ 4.1 (any)	—	—	—	—	—	—	
Prestrain 0%	Top	$1/4 t$	L	19.0 (16.6)	2.27 (2.14)	−71	−55	−58	−40	—
			T	19.6 (18.9)	2.32 (2.20)	−71	−53	−54	−40	−45
		$1/2 t$	L	18.0 (16.8)	2.21 (2.14)	−49	−37	−40	−35	—
			T	16.8 (16.1)	2.14 (2.12)	−66	−45	−46	−38	−45
	Bot.	$1/4 t$	L	22.7 (22.2)	2.42 (2.38)	−80	−51	−50	−33	—
			T	18.8 (17.9)	2.21 (2.13)	−53	−42	−41	−37	−50
		$1/2 t$	L	22.5 (22.2)	2.34 (2.28)	−56	−46	−45	−40	—
			T	18.5 (16.6)	2.14 (2.03)	−65	−47	−48	−32	−45
Prestrain 5% Aging 250°C	Top	$1/4 t$	L	20.0 (18.5)	2.29 (2.14)	−88	−60	−58	−47	—
			T	16.2 (15.5)	2.04 (1.91)	−81	−47	−49	−42	−55
	Bot.	$1/2 t$	L	17.7 (14.0)	2.16 (1.88)	−71	−48	−51	−41	—
			T	15.3 (14.6)	1.99 (1.93)	−75	−48	−49	−39	—

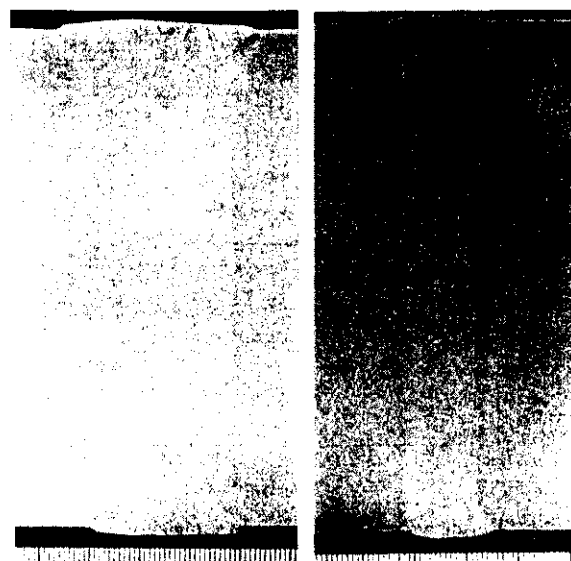
* () minimum value

3.2 溶接継手特性

サブマージアーク溶接継手 (SAW 継手) および狭開先 MIG 溶接継手を製作し、その性能を調べた。

3.2.1 溶接施工条件

SAW は 1 層 2 パスの積層法で溶接入熱は平均 35~37 kJ/cm であり、一方、MIG は 1 層 1 パス積層法で、溶接入熱は平均 29 kJ/cm である。Photo 5 に継手部のマクロ組織を示す。



SAW

MIG

Photo 5 Macrostructure of welded joints

Table 7 Tensile properties of welded joints

		Test position	YS (0.2%) (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	RA (%)	Broken position
SAW	All deposited metal*	$1/4 t$	62.6	68.6	26	70	—
		$3/4 t$	61.2	68.8	26	69	—
	Welded joint**	Top surf.	—	70.6	—	—	Weld metal
		Bottom surf.	—	71.2	—	—	Weld metal
MIG	All deposited metal*	$1/4 t$	62.3	69.6	27	70	—
		$3/4 t$	63.6	70.0	26	69	—
	Welded joint**	Top surf.	—	72.7	—	—	Weld metal
		Bottom surf.	—	72.0	—	—	Weld metal

* Test specimen JIS Z3111

** Test specimen JIS Z3121

3.2.2 機械試験

板厚方向 $1/4 t$, $3/4 t$ 部より試験片を採取し、溶接金属の引張試験を実施した結果を Table 7 に示す。SAW, MIG 両溶接法のいずれの部位も JIS 規格の母材要求値を満足する強度、延性が得られた。Fig. 4 は板厚 $1/4 t$ の部位の溶接金属高温引張り試験の結果を示す。高温強度は通産省告示 501 号の設計値を満足している。また、板厚方向に 2 分割した試験片を用い継手引張り試験を実施した結果も母材の JIS 規格値を満足している。

側曲げ、自由曲げ試験を実施したが、いずれの試験片にも割れの発生は認められず十分な曲げ延性をもつ。Photo 6 に側曲げ試験片の外観を示す。

板厚 $1/4 t$ の部位よりシャルピー衝撃試験片を採取し、溶接金属 (WM) 中央、溶融線 (FL), HAZ (FL より 0.8 mm) における試験を実施した。試験結果を Table 8 に示す。-12°C におけるシャルピー吸収エネルギーは SAW, MIG 両溶接法とも母材の JIS 規格

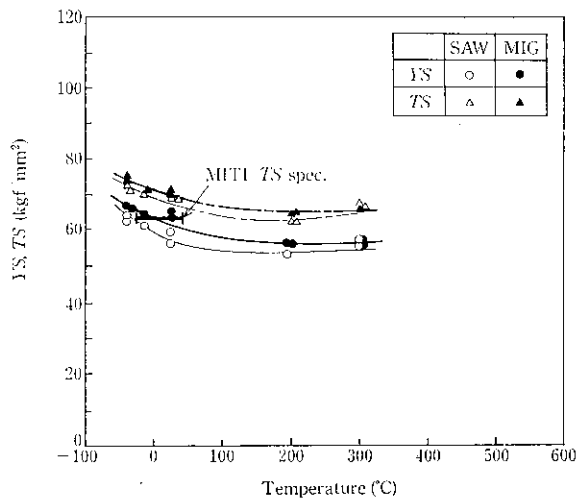


Fig. 4 Tensile properties at various temperatures of welded joints

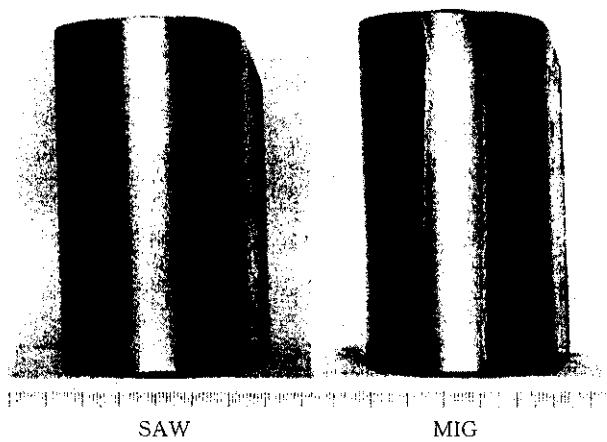


Photo 6 Side bend test results

Table 8 Results of impact and drop weight tests in welded joints

	Position	Charpy impact test*						DWT
		$\sqrt{E_{-120}}$ (kgf·m)	LE ₋₁₂₀ (mm)	$\sqrt{T_{r10}}$ (°C)	$\sqrt{T_{r50}}$ (°C)	$\sqrt{T_{r55ml}}$ (°C)	$\sqrt{T_{r73}}$ (°C)	
JIS G3120 SQV 2B spec.		≥4.8 ave ≥4.1 min	—	—	—	—	—	—
SAW	W.M. (1/4 t)	15.1 (14.8)	2.03 (1.91)	-69	-58	-57	-49	-75
	F.L. (1/4 t)	17.3 (16.3)	2.12 (2.01)	-87	-75	-72	-59	—
	HAZ (1/4 t)	19.4 (17.8)	2.16 (1.90)	-86	-72	-73	-70	-75
MIG	W.M. (1/4 t)	12.1 (10.7)	1.60 (1.38)	-60	-32	-31	-40	-65
	F.L. (1/4 t)	15.3 (13.1)	1.94 (1.74)	-72	-62	-56	-57	—
	HAZ (1/4 t)	19.2 (17.1)	2.17 (2.00)	≤-92	-88	-84	-76	-65

* (): Minimum value

値を満足する値が得られた。また、同様に WM 中央および HAZ における落重試験の NDT 温度とあわせ、通産省告示 501 号に従い RT_{NDT} を求めたところ、いずれも -60°C 以下であり、十分低温側にあることが確認された。

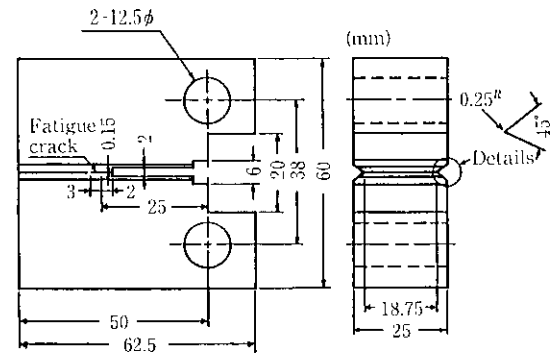


Fig. 5 Dimension of 1TCT specimen

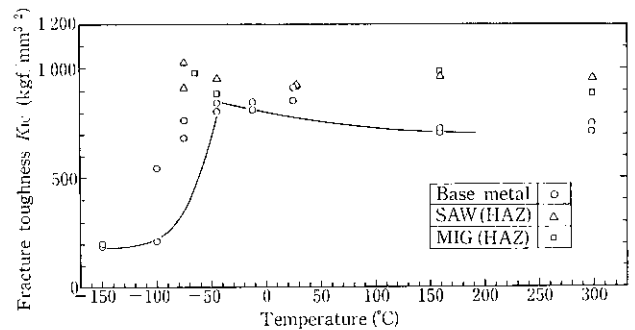


Fig. 6 Temperature dependence of static fracture toughness

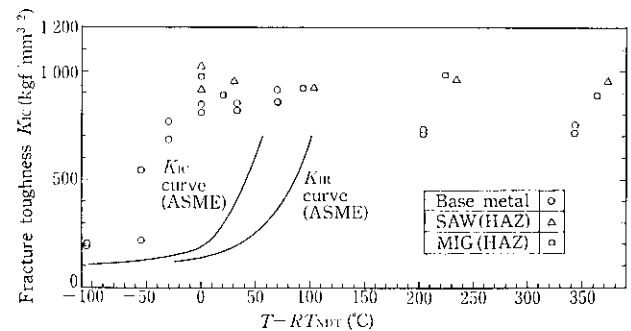


Fig. 7 Relation between static fracture toughness and $T-RT_{NDT}$

3.3 破壊靱性特性

本供試鋼板が 1150 MW 級の PWR 蒸気発生器用として破壊靱性の面から適合していることを確認する目的で静的破壊靱性試験 (K_{IC} 試験)、動的破壊靱性試験 (K_{ID} 試験) およびき裂伝ば停止破壊靱性試験 (K_{IS} 試験) を行い、これらの破壊靱性と告示に示される K_{IR} 曲線との相関を調べた。

3.3.1 静的破壊靱性試験

用いた試験片を Fig. 5 に示す。母材試験片は鋼板の板厚 1/4 の位置から、き裂面に垂直な方向が T 方向になるように採取し、試験は ASTM E813-81 に準じた J_{IC} 試験を行った。また、溶接継手については SAW, MIG の板厚 1/4 部の HAZ (FL から 0.8 mm) に切欠が入るように試験片を採取し、試験は ASTM E399-83 に準じて行った。ただし安定延性き裂の発生が顕著な場合は、母材と同様の J_{IC} 試験を行った。静的破壊靱性の温度依存性を Fig. 6 に、静的破壊靱性と $T-RT_{NDT}$ の関係を Fig. 7 に示す。得られたすべての破壊靱性値は ASME K_{IC} 曲線および K_{IR} 曲線を上まわっている。

3.3.2 動的破壊靱性試験

上述の静的破壊靱性試験と同様の試験片を用い、母材および溶接継手について ASTM E399-83 ANNEXES 7 に準じた高速負荷の動的破壊靱性試験、または ASTM E813-81 に準じた J_{Ic} 試験を高速負荷により行った。引張速度はストローク変位速度 0.5 m/s とした。動的破壊靱性の温度依存性を Fig. 8 に、動的破壊靱性と $T-R_{NDT}$ の関係を Fig. 9 に示す。得られたすべての破壊靱性値は告示の K_{IR} 曲線を上まわっている。

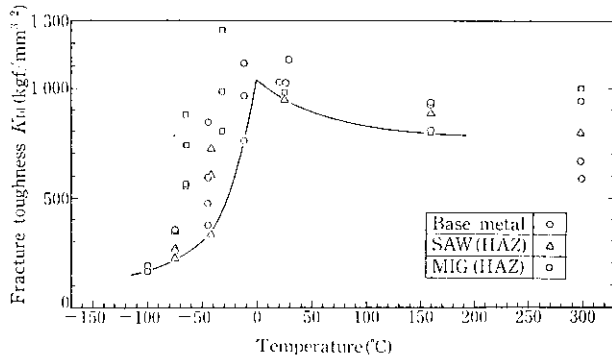


Fig. 8 Temperature dependence of dynamic fracture toughness

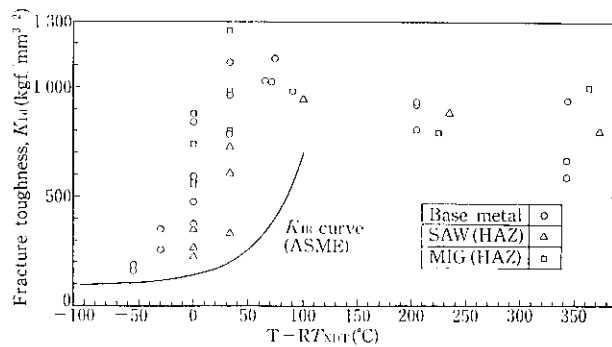


Fig. 9 Relation between dynamic fracture toughness and $T-R_{NDT}$

3.3.3 き裂伝ば停止破壊靱性試験

ASTM E24 委員会提案の方法に準じ、Fig. 10 に示す MRL 型試験片による CCA (Compact crack arrest) 試験を母材および溶接継手について行った。また WES 3003 に準拠した母材の ESSO 試験を Fig. 11 に示す要領で行った。き裂伝ば停止破壊靱性の温

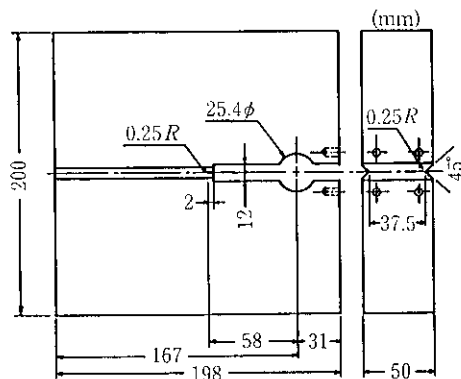


Fig. 10 Dimension of compact crack arrest specimen

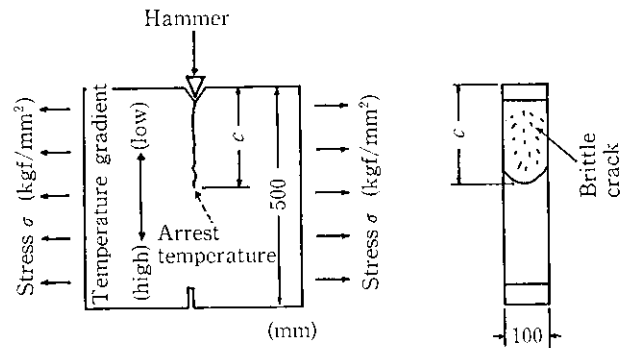


Fig. 11 ESSO test procedure

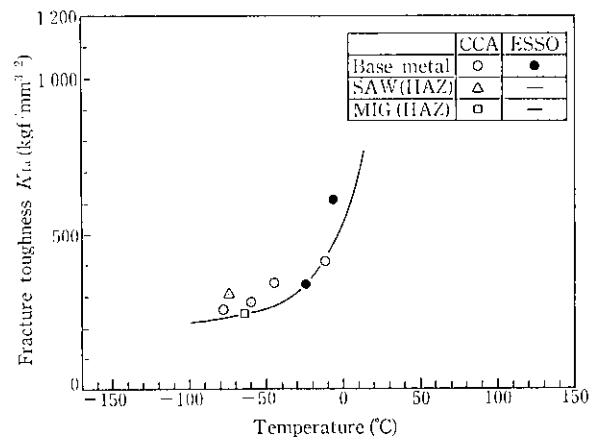


Fig. 12 Temperature dependence of crack arrest fracture toughness

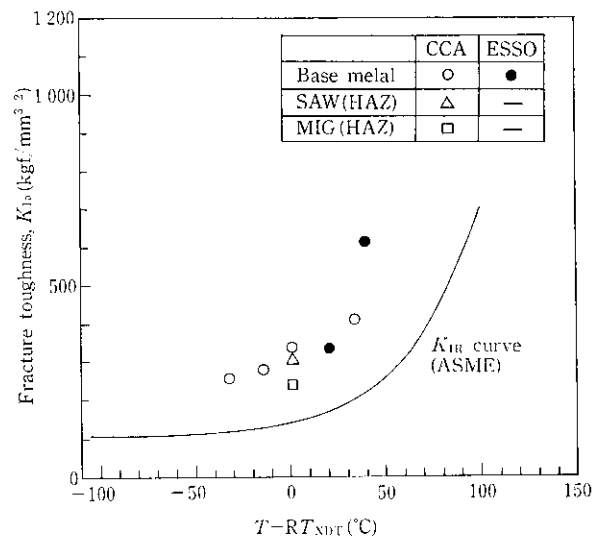


Fig. 13 Relation between crack arrest fracture toughness and $T-R_{NDT}$

度依存性を Fig. 12 に、き裂伝ば破壊靱性と $T-R_{NDT}$ の関係を Fig. 13 に示す。得られたすべての破壊靱性値は告示の K_{IR} 曲線を上まわっている。

4 結 論

1150 MW 級の PWR プラント蒸気発生器用鋼板を想定して板厚

100 mm の SQV 2B 鋼板を製造し、鋼板および SAW, MIG 溶接継手の性能を調べた。この結果は以下のとおりである。

- (1) 鋼は P, S, As, Sn, Sb などの不純物元素が低く、脱ガス、無酸化下注法により非金属介在物の少ない清浄鋼である。
- (2) 鋼板トップ、ボトムおよび板厚方向の各部の成分偏析は軽微であり、機械的性質の各部位の差も小さい。
- (3) 母材および SAW, MIG 溶接金属の常温の引張特性は JIS 規格値を満足し、高温強度も通産省告示 501 号の設計値を満足している。

- (4) 母材および SAW, MIG 溶接継手各位置の -12°C におけるシャルピー吸収エネルギーは JIS 規格値を満足し、落重試験より求めた関連温度 RT_{NDT} は -45°C 以下で十分良好な値である。

- (5) 母材および SAW, MIG 溶接継手の HAZ 部の静的破壊靱性値、動的破壊靱性値、き裂伝ば停止破壊靱性値はいずれも告示 501 号に示される K_{IR} 曲線を上回っている。

以上の結果から本供試鋼板は原子力プラント機器用鋼板として十分な材質特性をもっていることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 小倉成美, 青木禮次郎, 豊田行雄: 三菱重工技報, **19** (1982) 6, 620
- 2) 薄田 寛: 火力原子力発電, **34** (1983) 10, 1107
- 3) 薄田 寛, 砂本大造, 佐藤正信, 船田立夫: 三菱重工技報, **13** (1976) 1, 21
- 4) 上田敏彦, 上林常夫, 浜田紘司: 三菱重工技報, **19** (1982) 6, 671
- 5) 楠原祐司, 吉村茂彦, 荻野泰司, 榎並慎一, 船越哲己, 林 忠男: 川崎製鉄技報, **6** (1974) 2, 44
- 6) 楠原祐司, 腰塚典明, 関根徳弘, 榎並慎一, 田中康浩, 小林英司, 斎藤達: 川崎製鉄技報, **12** (1980) 1, 41