

UDC 669.15'24'26'28:621.039.536
620.178.7
621.791.01

原子炉格納容器用鋼板の材質特性と溶接性

Material Property and Weldability of Primary Containment Vessel Steel Plate for Nuclear Plant

田 中 康 浩*
Michihiro Tanaka

西 山 昇**
Noboru Nishiyama

広 瀬 圭 介***
Keisuke Hirose

千 貫 昌 一****
Shoichi Sengan

関 根 稔 弘*****
Toshihiro Sekine

楠 原 祐 司*****
Yuji Kusuvara

Synopsis:

Steel plates for primary containment vessels of nuclear power plants are described. As the nuclear power plants are getting larger with severe safety design requirement, it is necessary to use a high strength steel having a higher tensile strength than ordinary SGV49 steel or to use a SGV49 steel plate thicker than 38mm. For these purposes, various properties have been investigated of high tensile, 38mm thick SPV50 and 45mm thick SGV49 steels. The mechanical properties, weldabilities and fracture toughness of these steel plates and their weld joints are proved safe enough to be used for containment vessel without stress relief heat treatment as well as the conventional SGV49 steel.

1. 緒 言

安全性に十分留意し、事故を未然にふせぐ対策が完全に施されている原子力発電所において、原子炉格納容器は仮想事故に対する最後の防壁としての役割を期待されている。したがって、格納容器に使用される鋼材に対しては、優秀な材質特性と製造に際しての厳重な品質管理体制が要求される。格納容器用鋼材に要求される特性としては、

- (1) 低温靱性がすぐれていること、
- (2) 必要な強度と延性が確保されていること、
- (3) 溶接性がすぐれていること、
- (4) 安定した製品であること、

などがあげられ、いずれも格納容器として使用される場合の安全条件となっている。我が国における格納容器の建設にあたっては、その安全性の確保のために、鋼材の製造から機器の施工にいたるまで通商産業省 (MITI) の告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(構造技術基準と略す) あるいは省令第 81 号「電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令」(溶接技術基準と略す) などの適用を受けることになっている。本報ではこのような厳重な管理体制のなかで製造される格納容器用鋼板の現状について、とくに母材の機械的性質、溶接性および破壊靱性に注目して紹介する。

* 技術研究所厚板研究室主任研究員
*** 千葉製鉄所管理部厚板管理課課長
***** 水島製鉄所管理部厚板管理課課長
(昭和54年11月19日原稿受付)

** 技術研究所溶接研究室主任研究員
**** 千葉製鉄所管理部熱間圧延部厚板課課長
***** 水島製鉄所管理部厚板管理課掛長

2. 格納容器用鋼板の現状

格納容器は容積が非常に大きいので、その建造は現地で行われる部分が多く、その溶接部に応力除去焼なまし処理 (SR と略す) を施すことは困難である。したがって、使用される鋼材は SR の除外規定があるものが対象となる。我が国の原子力発電設備に関する諸規格の源は米国に発しているが、米国においては機械学会規格「BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE」(ASME CODE と略す) で格納容器 (Class 2 Component) 用の鋼板として認められているもののうち、SR の除外規定がある P-1 鋼 (SA283, SA299, SA442, SA455, SA515, SA516, SA537 など) として分類される C 鋼、C-Si 鋼、C-Mn Si 鋼などが多く用いられている。我が国においてもその流れを受け SA516 Gr.60 または Gr.70 (JIS G 3118「中、常温圧力容器用炭素鋼鋼板」、SGV42 または 49) が主として用いられてきた。

近年、原子力発電所の大容量化するとともに、安全に対する信頼性のより一層の向上や、作業者の被ばく量低減、保守点検の的確化を図るための空間拡大などにより格納容器は大型化している¹⁾。Fig. 1 は沸騰水型軽水炉 (BWR と略す) 格納容器の改良型の例²⁾であり、Fig. 2 は加圧水型軽水炉 (PWR と略す) の改良型の例³⁾である。前者では、大型化のため板厚増大あるいは高張力鋼採用の必要があり、後者では、耐震性向上のため板厚増大の必要が生じている。

現行の溶接技術基準では、前述の鋼材については板厚 38mm までは SR なしでの使用が認められているが、それをこえたものについては SR する必要がある。ところが、1977 年に発行された ASME CODE CASE INTERPRETATION 1714 では、C 含有量 0.24% 以下の鋼板を 93°C 以上の予熱温度で溶接する場合については、その靱性規定をシャルピー吸収エネルギーで 0.7kg・m 高くするか、または試験温度を 6°C 低くすることにより、板厚 44.5mm まで SR なしで使用することが認められている。この ASME CODE は国内の技術基準に取り入れられるには至っていないが、将来採用されるものと思われる。

	New design	Conventional design
Inner diameter (m)	29	25.9
Height (m)	48	48
Design pressure (kg/cm ² G)	2.85	2.85

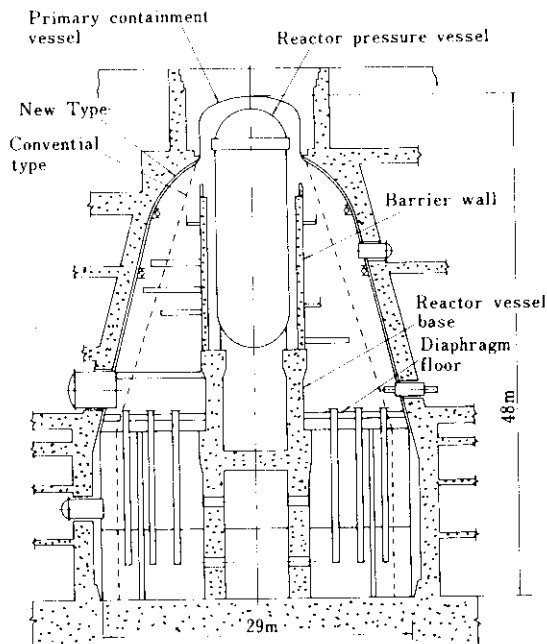


Fig. 1 New type of primary containment vessel for BWR

一方、高張力鋼の採用にあたっては、材質、実績、品質の安定性を考慮せねばならない。ASTM 規格で該当する鋼材としては、靱性を第 1 と考えた場合、A543 鋼、A514 鋼などがあげられるが、国内では球形タンク、水力発電機器などに使用実績の多い JIS G 3115「圧力容器用鋼板」SPV50 について採用の可能性を検討することになった。これらの検討はいずれも発電用熱機関協会において行われ、SGV49 鋼の板厚 44.5mm までの使用、A543 鋼および SPV50 鋼の採用の見通しが得られている²⁻⁵⁾。

3. 格納容器用鋼板の特徴と実績

格納容器用として使用されてきたか、あるいは使用の可能性のある鋼板の例を Table 1 に示す。従来多く用いられてきた SGV49 は、いわゆる非

	New design	Conventional design
Plate thickness (mm)	44.5	38
Material	SA516 70	SA516 70
Allowable stress (kg/mm ²)	12.3	12.3
Design pressure (kg/cm ² G)	2.60	2.25

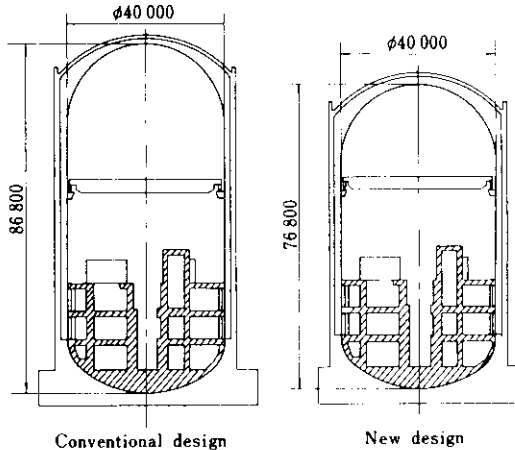


Fig. 2 Comparison between conventional and new design for PWR containment vessel

調質の鋼材であり、フェライト・パーライト組織をもっているが、このような組織の鋼材で十分な強度を得るためには、必要に応じCあるいはMn等の合金元素を添加している。とくに厚肉材の場合には少量のNi, Cr, Moなどを添加することもあり、溶接熱影響部の最高硬さの日安となる炭素当量 C_{eq} や溶接割れ感受性を表示する指数 P_{CM} (Table 1 参照) が次に述べる2種の鋼材にくらべ

やや高くなるきらいがある。

一方、調質の鋼材であるSPV50やA543は焼入れ、焼もどしという調質工程が入るためコスト高になるが、合金元素のバランスをとりやすく、 C_{eq} や P_{CM} を低くでき、しかも靱性も大変すぐれている。しかし、調質鋼特有の問題として降伏比がやや高目になる傾向がある。

国内で実用に供されたSGV49とSPV50の C_{eq} と、構造技術基準の規定によって最低使用温度より17°C低い温度を-30°Cと想定して試験を行ったシャルピー吸収エネルギー vE_{30} の実績ヒストグラムをFig. 3とFig. 4に示す。 C_{eq} および vE_{30} ともに前述の傾向がみられるが、いずれも十分な値を示している。また、強度については、設計最高温度における引張強さが構造技術基準で定められつつあり、検討の必要がある。高温における引張強さの変化の様子をFig. 5に示す。BWR用格納容器の設計最高温度181°C、PWR用格納容

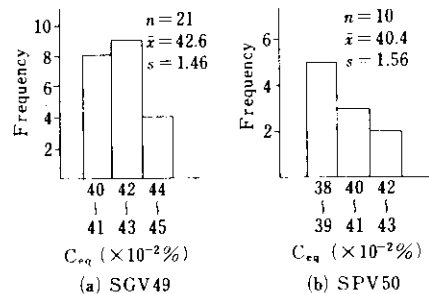


Fig. 3 Distribution of carbon equivalent, C_{eq} , of SGV49 and SPV50 steel plates (SGV49: 38mm and under, SPV50: 20 to 70mm)

Table 1 Typical examples of pressure vessel steels

Steel	H.T.*	t** (mm)	Chemical composition (wt.%)												Tension test						Impact test	
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	C _{eq} ***	P _{CM} ***	Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	El. (%)	R.A. (%)	Y.R. (%)	vE ₁₀ kg·m	vT _S (°C)
SGV49	N.	45	0.18	0.26	1.09	0.009	0.003	0.09	0.44	0.16	0.012	0.02	-	0.42	0.27	34	56	36	70	61	12.2	30
SGV49	N.	38	0.17	0.23	1.14	0.017	0.003	0.10	0.36	0.09	0.052	0.03	-	0.41	0.25	34	52	37	72	65	13.9	-34
SPV50	Q.T.	38	0.11	0.31	1.20	0.012	0.003	0.01	0.45	0.01	0.205	0.05	-	0.39	0.21	65	71	28	71	91	17.8	-50
SPV50	Q.T.	38	0.12	0.30	1.28	0.016	0.003	0.01	0.42	0.01	0.151	0.03	-	0.40	0.21	58	65	27	72	89	26.7	-80
A543	Q.T.	50	0.09	0.24	0.33	0.007	0.007	0.03	2.78	1.57	0.52	0.01	-	0.67	0.28	70	77	27	74	91	23.5	138
A514(HT 80)	Q.T.	38	0.12	0.24	0.85	0.012	0.007	0.21	0.97	0.42	0.46	0.03	0.001	0.50	0.25	79	84	26	64	94	21.2	-104

* Heat treatment: N.: Normalizing, Q.T.: Quench-tempering

** t: Plate thickness

*** $C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$ (%)
 $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Ni/60 + Mo/15 + Cr/20 + Cu/20 + 5B$ (%)

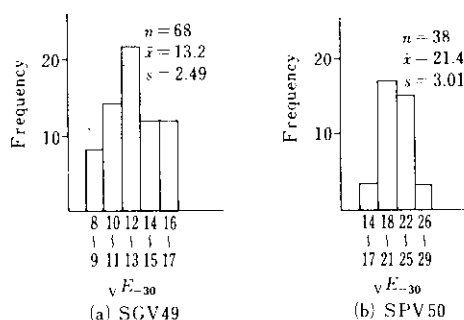


Fig. 4 Distribution of Charpy absorbed energy at 30°C of SGV49 and SPV50 steel plates (SGV49: 38mm and under, SPV50: 20 to 70mm)

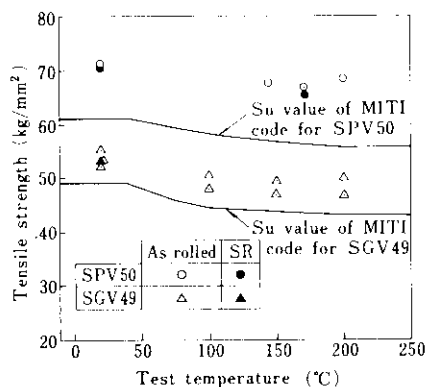


Fig. 5 Changes in tensile strength of SGV49 and SPV50 steels with test temperature

器の132°Cにおいてそれぞれ十分な強度の余裕をみこみうることがわかる。

このような基本的な背景を有する格納容器用の鋼材について、最近実用に供されているもののうち、45mmの厚肉SGV49と38mm（実際には40mm）のSPV50の特性について溶接性と靱性を主体に、一部についてはSRを行った場合の材質変化も含めて以下に紹介する。

4. 格納容器用鋼板の溶接性および継手性能

4.1 斜めY型拘束割れ特性

溶接時の冷間割れに対する感受性は P_{CM} 値によって表される。Table 1にみられるように、SGV49はSPV50より P_{CM} 値がいく分高く、溶接割れの防止のために必要とする予熱温度が高くなることが予想される。Fig. 6とFig. 7にSGV49とSPV50

の斜めY型拘束割れ試験(JIS Z 3158)結果を示す。SGV49では板厚が厚いこともあり、割れ阻止温度が150°CとSPV50の100°Cより高いので、高目の温度で予熱する必要がある。また、60kg/mm²級高張力鋼用の極低水素系溶接棒KS-86ELを、SPV50の溶接に使用するとほとんど予熱の必要がないことがわかる。

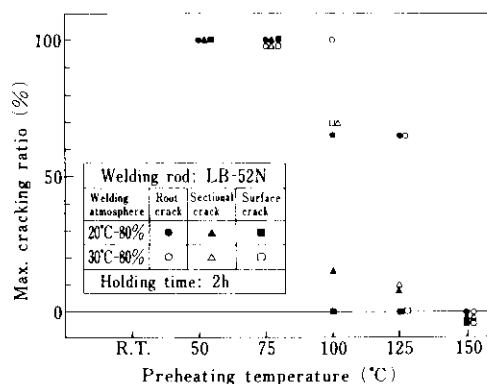


Fig. 6 Result of Y-groove restraint cracking test for SGV49 steel (45mm)

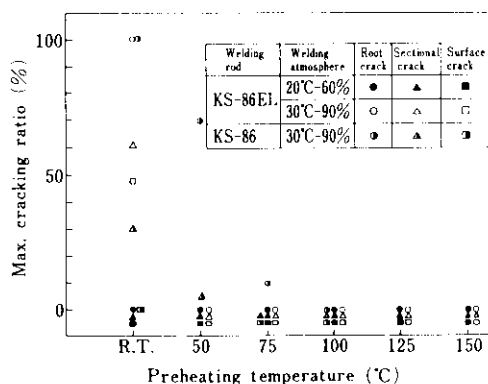


Fig. 7 Result of Y-groove restraint cracking test for SPV50 steel (38mm)

4.2 溶接最高硬さ

溶接継手部での最高硬さを調査するため行った試験(JIS Z 3101)の結果をTable 2に示す。予熱なしの場合は C_{eq} 値と対応し、SGV49が $H_{V(10)}$ で30ほどSPV50より高くなっている。

4.3 溶接継手性能

性能試験用の溶接継手は、SGV49の場合被覆アーク溶接(SMAW)によって、またSPV50の場合

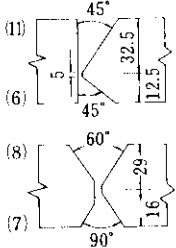
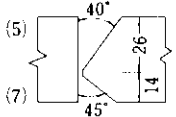
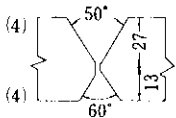
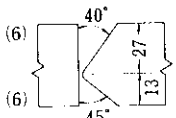
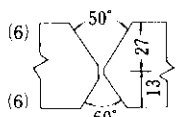
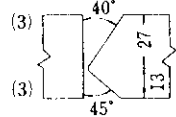
Table 2 Results of maximum hardness measuring test for welds of SPV50 and SGV49 steel plates

Steel	Plate thickness (mm)	Preheating temperature (°C)	Maximum hardness $H_{V(10)}$
SPV50	38	R.T. (24)	366
		50	360
		100	342
		150	327
SGV49	45	R.T. (32)	397

は被覆アーク溶接、潜弧アーク溶接 (SAW)、および MIG 溶接 (GMAW) によって製作した。製作条件を **Table 3** に示す。格納容器用の溶接材料としては 50kg/mm^2 級、あるいは 60kg/mm^2 級のもののうち、とくに靱性が良好なものが使用されている。溶接金属部の化学成分および引張特性を **Table 4** にまとめて示す。なお、これらの継手の製作条件は破壊靱性試験用の継手にも適用している。

溶接継手の硬さ分布を SGV49 と SPV50 の SMAW 材についてそれぞれ **Fig. 8** に示す。いずれも SR なしの状態での測定結果であるが、最高

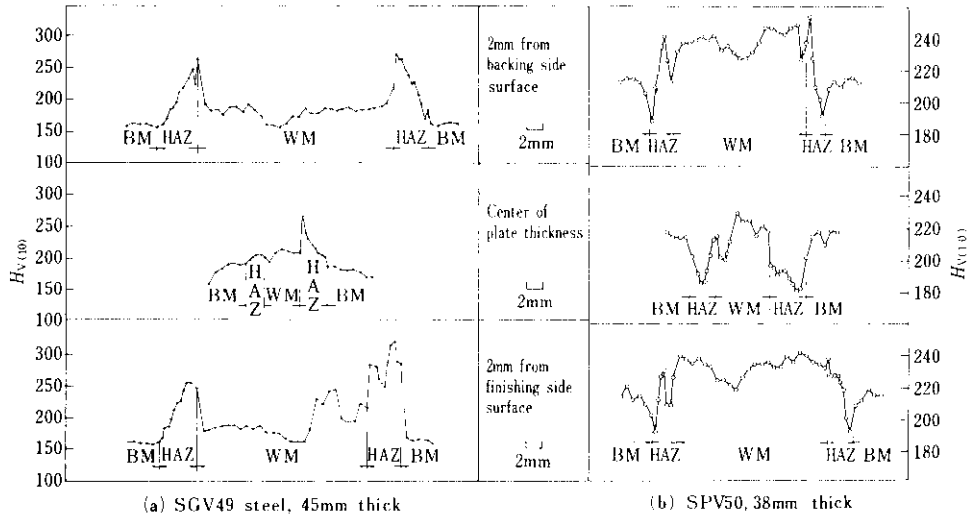
Table 3 Welding conditions for SGV49 and SPV50 steels

Steel (Thickness)	Welding method	Groove* (Number of layers)	Welding material	Preheat temp. (°C)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
SGV49 (45mm)	SMAW		LB-52N (4φ, 5φ)	>100	180~260	25	8~9	45
SPV50 (38mm)	SMAW		KS86M (4φ, 5φ)	>120	140~190	24	5~7	42
					130~170	24	5~7	43
	SAW		KW101B (4.8φ) × KB80C	>120	600~680	32	26~34	43
					600~700	32	26~30	44
								
	GMAW		MGT62S (1.2φ) Ar + CO ₂	>100	160~180	17~18	5~6	40

* Root gap: 2.3mm max., Root face: 2mm max.

Table 4 Typical examples of weld metals for SGV49 and SPV50 steels

Welding materials	Welding method	Chemical composition (wt.%)										Tension test (JIS Z 3111, A1)				
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)	Y.R. (%)
For SGV49	SMAW	0.07	0.28	1.09	0.016	0.010	0.02	0.50	0.04			48.2	56.3	29	72	85
	SMAW	0.07	0.39	0.91	0.016	0.010	0.04	2.46	0.01	0.304	0.011	64.2	70.7	24	71	91
For SPV50	SAW	0.06	0.24	1.83	0.013	0.003	0.16	1.48	0.04	0.353	0.015	65.4	70.8	26	71	93
	GMAW	0.08	0.32	1.37	0.013	0.005	0.13	0.08	0.29	0.260	0.015	61.6	68.6	26	71	90

Fig. 8 Distribution of vickers hardness, $H_{V(10)}$, in weld joint by SMAW

硬さは $H_{V(10)}$ で SGV49 が 319, SPV50 が 254 となっている。

つぎに、溶接継手の引張試験 (JIS Z 3121) を、1号試験片を用いて実施した結果を Table 5 に示

Table 5 Results of tension test for weld joints

Steel	Welding method (heat input)	Groove	Heat treatment	Tensile strength (kg/mm ²)	Fractured position*
SGV49 (45mm)	SMAW	X	Non-SR	57.4	BM
			SR	54.7	BM-WM
SPV50 (38mm)	SMAW	X	Non-SR	69.7	BM
			SR	69.2	BM-WM
		K	SR	68.1	BM-WM
	SAW	X	Non-SR	70.4	BM-WM
			SR	68.6	BM-WM
		K	SR	69.2	BM-WM
	GMAW	K	Non-SR	71.1	BM-WM
			SR	70.6	BM-WM

* BM: Base metal; WM: Weld metal

す。いずれも母材の規格値 (SGV49 は 49kg/mm^2 以上, SPV50 は 62kg/mm^2 以上) を十分満足し、破断位置も母材または母材と溶接部の境界部であり、溶接部として良好な特性となっている。

5. 格納容器鋼板の破壊靱性

5.1 規格要求値

格納容器用鋼板に要求される靱性はシャルピー衝撃試験あるいは落重試験の結果について構造技術基準に規定されている。シャルピー衝撃試験では予想される最低使用温度より 17°C だけ低い温度での吸収エネルギーが試験片 3 個の平均値で $4.1\text{kg}\cdot\text{m}$ 以上であり、しかも個々の値で $3.5\text{kg}\cdot\text{m}$

以上でなければならない。もちろん、JIS 規格の鋼材の場合は JIS で規定する靱性値 (-10°C で $4.8\text{kg}\cdot\text{m}$ 以上) を満足する必要があるが、国内における格納容器の最低使用温度は一般に -10°C 程度であるので、構造技術基準の要求の方が厳しい条件となっている。シャルピー衝撃試験にかえて落重試験を行う場合は最低使用温度より 17°C 低い温度での試験において 2 個の試験片のすべてが非破断、すなわち無延性遷移温度 T_{NDT} が該当温度以下である必要がある。Fig. 9 に、SGV49 について最低使用温度を -11°C と仮定し、ASME CODE CASE 1714 による板厚補正を -6°C とした場合のシャルピー衝撃試験結果 $\sqrt{E}_{-34}$ と、SPV50 については最低使用温度を -8°C とした場合に若干の余裕をみた $\sqrt{E}_{-30}$ とを示した。また Table 6 には、

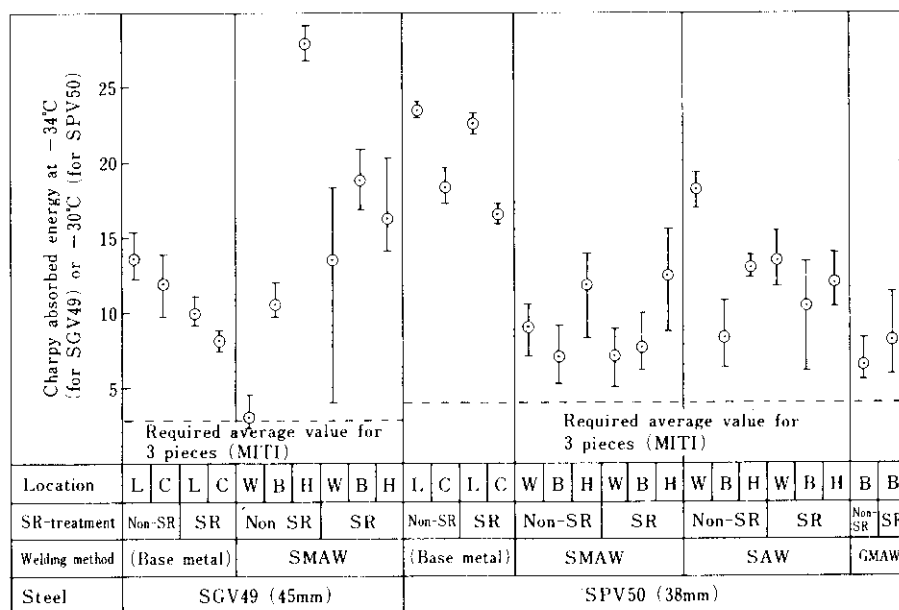


Fig. 9 Results of Charpy impact test for base metals and welds of SGV49 and SPV50 steels

Table 6 Results of drop weight test for base metals and welds of SGV49 and SPV50 steels

Steel	SGV49 (45mm)										SPV50 (38mm)											
Classification	Base metal		Weld joint						Base metal		Weld joint											
Welding method			SMAW								SMAW				SAW				GM AW			
Heat treatment	Non SR	SR	Non SR		SR		Non SR		SR	Non-SR		SR	Non-SR		SR	Non-SR	SR	Non SR				
Location	t/4	t/4	W t/4	B t/4	H t/4	W t/4	B t/4	H t/4	Surface t/4	Surface t/4	W t/4	B t/4	W t/4	B t/4	W t/4	B t/4	W t/4	B t/4				
T _{NDT} (°C)	-40	-40	40	40	35	40	40	-35	-45	50	-40	-45	-70	-40	-55	-40	<-90	50	<-75	60	30	

JEAC 4202 P 3 試験片を用いた落重試験結果を示した。SGV49 および SPV50 の母材および各種溶接継手部はいずれも規格要求値を十分満足し、格納容器用として十分良好な特性を示している。

5・2 不安定破壊の発生に関する限界 COD 値

SGV49 と SPV50 の限界の亀裂開口変位 (COD) δ_c を Fig. 10 に示す。前者はコンパクトテンション (CT) 試験片による測定値³⁾であり、同一試験片についての既報のデータ⁶⁾を併記してある。また、後者は 3 点曲げ試験片による値である。いずれも切欠端部における限界開口量 V_c をクリップゲージにより計測し、その値を次式により切欠先端部での値 δ_c に換算した。

$$\delta_c = \begin{cases} \frac{0.45(W-a)}{0.45W+0.55a} \left[V_c - \frac{\gamma \sigma_y W(1-\nu^2)}{E} \right] & V_c \geq \frac{2\gamma \sigma_y W(1-\nu^2)}{E} \text{ のとき} \\ \frac{0.45(W-a)}{0.45W+0.55a} \left[\frac{V_c^2 E}{4\gamma \sigma_y W(1-\nu^2)} \right] & V_c < \frac{2\gamma \sigma_y W(1-\nu^2)}{E} \text{ のとき} \end{cases} \quad \text{..... (1)}$$

γ : 無次元化したクリップゲージの弾性

限変位 (CT 試験の場合は 2.34⁷⁾, 3 点曲げ試験の場合は BSDD 19 の表⁸⁾により 1.45~1.60 とした)

W : 試験片幅 (mm)

a : 切欠深さ (mm)

σ_y : 試験温度 T (K) における降伏応力 (kg/mm^2) で、室温 (293 K) における降伏応力 σ_{y0} から次式⁹⁾により推定する。

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \exp \left\{ (329.6 - 66.5 \ln \sigma_{y0}) \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \right\}$$

ν : ポアソン比

E : ヤング率

試験の手法が異なるが全般的に低強度の SGV49 の方が良好な値を与えている現在の諸規定の中には、限界 COD に関する要求規定値の具体例は見あたらない。応力場における亀裂先端の開口変位 δ は付加応力 σ や亀裂長さ $2a$ との間に (2) 式の関係がある。

$$\delta = \frac{8\sigma_y a}{\pi E} \ln \left(\sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right) \quad \text{..... (2)}$$

ここで、付加応力として構造技術基準にもとづいて求めた許容応力値を、SGV49 については

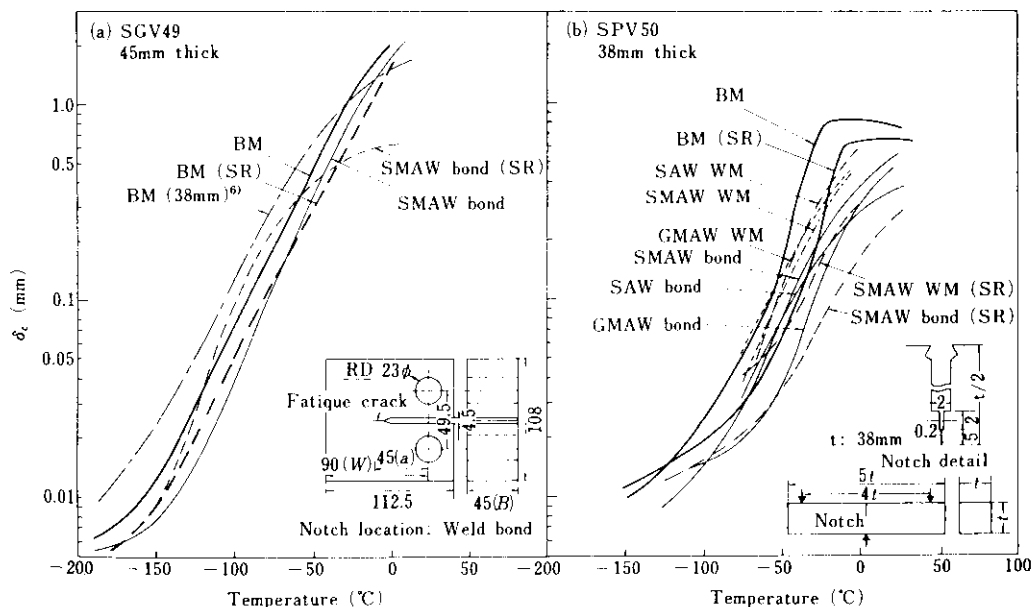


Fig. 10 Temperature dependence of critical COD, δ_c , of SGV49 and SPV50 steels (45mm)

12.3kg/mm², SPV50については15.5kg/mm²とし、安全をみてそれぞれの2倍をとり、存在する仮想欠陥の長さ(2a)を40mmとするとδはそれぞれ0.13mm, 0.07mmと求まる。このような条件下の, SRをしない状態で, それぞれの鋼材の最も靱性の劣る部分の破壊が生じない限界温度はSGV49, では-73°C, SPV50では-36°Cとなり, 格納容器の使用条件に対して十分余裕をもっていることになる。

5.3 不安定破壊の発生に関する破壊靱性 K_{IC}

平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} の静的荷重下における測定法はASTM規格E399に規定されているが, 45mm以下の比較的薄い小型試験片についての試験では有効な値が得られにくい。ここでは大型試験片を用いて, 溶接残留応力なども含んだ状態での総合的な破壊靱性値 K_c を求めた結果をのべることにする。

板厚45mmのSGV49鋼と板厚38mmのSPV50鋼のSMAW継手ボンド部について脆性破壊の発生特性を求めるため実施した, ディープノッチ試験結果をFig. 11に示す。 K_c 値は次式によって求めた。

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2W}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

σ : 破壊応力 (kg/mm²)

2a : 中央切欠の長さ (mm)

2W : 試験片の幅 (mm)

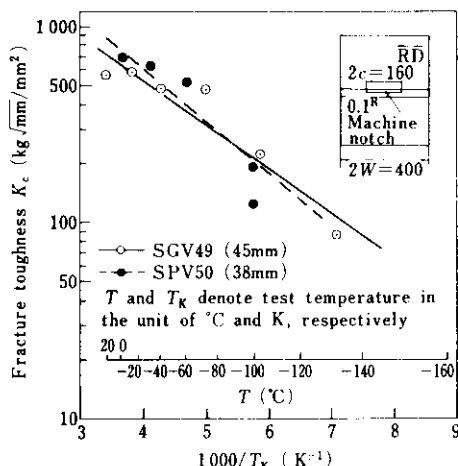


Fig. 11 Temperature dependence of fracture toughness, K_c , obtained by deep notch test (SMAW bond)

両鋼材の溶接ボンド部における K_c 値は差がないといえる。

Fig. 12は実施工の際もっとも大きな残留応力が存在すると考えられる十字継手の貫通切欠付広幅引張試験片の形状である。切欠先端は横継手の溶接ボンド部に入っている。SGV49のSMAW十字継手の試験片を, 8000tテストリグによって各種の温度で引張り, 破壊させたときの K_c の温度依存性をFig. 13に示す。なお, K_c 値はディープノッチ試験片と同様に(3)式によって求めた。また, Photo. 1にはこの試験片の破壊状況の例を示す。室温の試験では全面降伏するため K_c 値が意味を

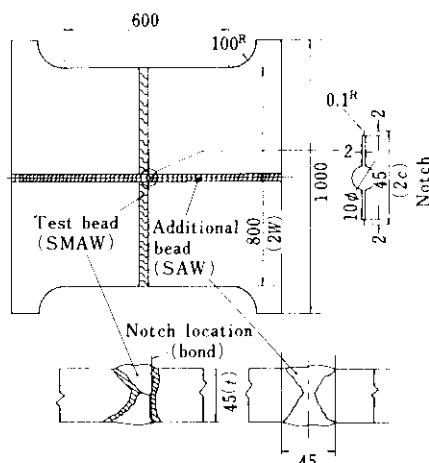


Fig. 12 Wide tension test specimen for cross weld joint (SGV49)

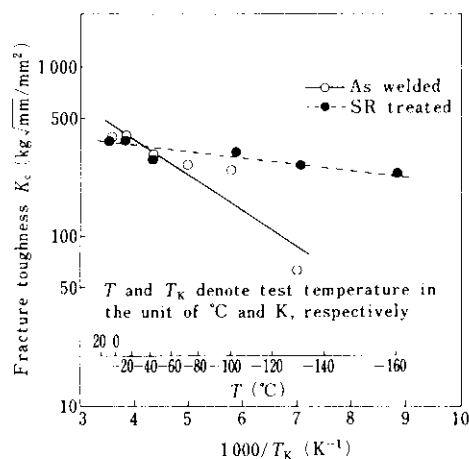


Fig. 13 Temperature dependence of fracture toughness, K_c , obtained by wide tension test for SGV49 cross weld joint (45mm, SMAW, bond)

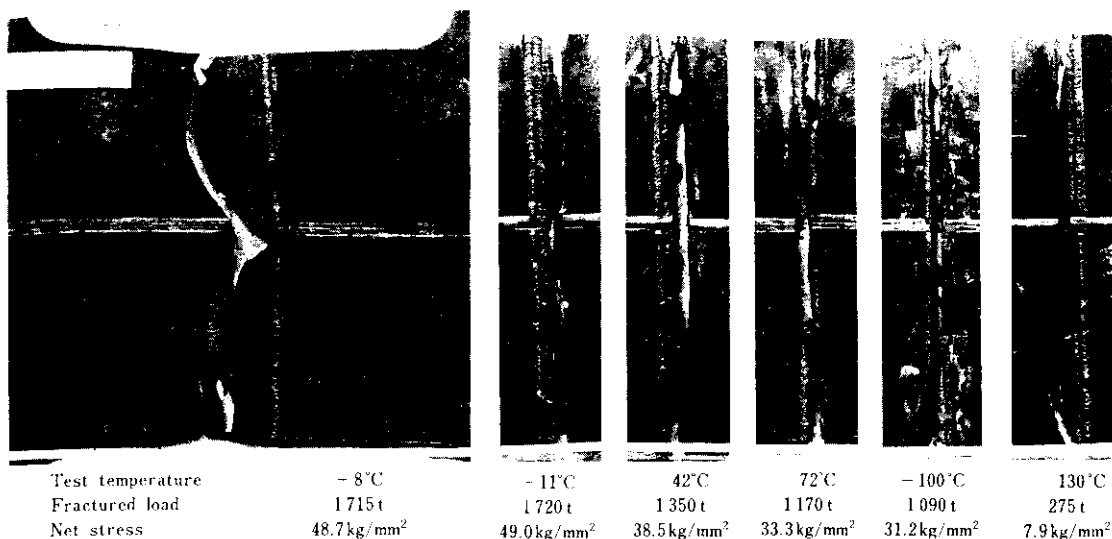


Photo. 1 Fracture appearance of wide tension test specimen of SGV49 cross weld joint

なさないが、脆性破壊が生ずる低温領域では、溶接残留応力が重畳する溶接のままの試験片と、残留応力の効果が消滅していると考えられるSRをした試験片とでは K_{IC} 値に顕著な差があらわれている。

Fig. 14 は、溶接工作誤差として実際には考えられないような大きさの、1000mm につき 30mm の角変形が存在するところに表面切欠が残存した場合の破壊を考えた角変形・表面切欠付広幅引張試験片の形状である。実際の球形タンクなど鋼構造

物で許容される溶接部の角変形は1000mm につき15mm 以下¹⁰⁾であるが、安全性評価のため極端な場合を想定している。SPV50の SMAW 継手のボンド部に切欠をつけた試験片を、1200t テストリグによって種々の温度で引張り、破壊させたときの K_{IC} の温度依存性を Fig. 15 に示す。 K_{IC} の計算は、表面切欠の最深部について次式¹¹⁾に従って求めた。

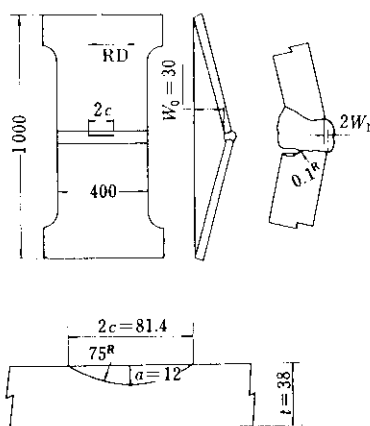


Fig. 14 Wide tension test specimen for SPV50 butt weld joint with angular distortion (SMAW, bond)

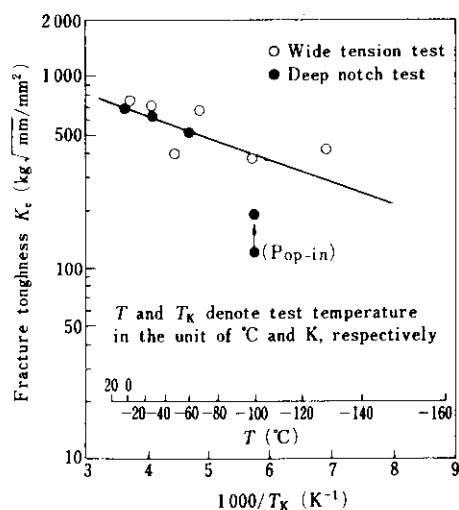


Fig. 15 Temperature dependence of fracture toughness K_{IC} obtained by wide tension test for SPV50 in comparison with the values obtained by deep notch test (38mm, SMAW, bond)

$$K_{ca} = \left\{ M_1 \cdot M_2 \sigma_t + M_3 \sigma_b \right\} \sqrt{\frac{\pi a}{\Phi}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left\{ 1 - (1 - a^2/c^2) \sin^2 \theta \right\}^{1/2} d\theta$$

σ_t : 引張応力(全断面平均応力, kg/mm²)

σ_b : 曲げ応力(kg/mm²)

$a, 2c$: 表面切欠深さおよび長さ(mm)

M_1, M_2 : 引張応力での自由表面による補正係数

M_3 : 曲げ応力での自由表面による補正係数

なお, Fig. 15 にはディープノッチ試験結果を合わせて示した。低温側の低破壊靱性領域では表面切欠試験片の試験結果の方が高い K_{ca} 値を与えている。

5・4 不安定亀裂の伝播停止に関する破壊靱性 K_{ca}

鋼構造物において万一脆性亀裂が発生した場合に, その亀裂が母材あるいは溶接部を伝播するかどうかを判定するため, 温度勾配型の ESSO 試験を実施した。試験片形状を Fig. 16 に示す。一部の試験片はくさび打込部を 30mm の突起つきとした。また, 溶接継手部の試験片の切欠は溶接ボンドから亀裂を発生させている。幅 W (mm) の試験片の幅方向に直線分布する温度勾配を与え, 応力 σ を加えた状態で, 低温側試験片端部の切欠にくさびを打撃装置で打込み, 発生させた脆性亀裂の

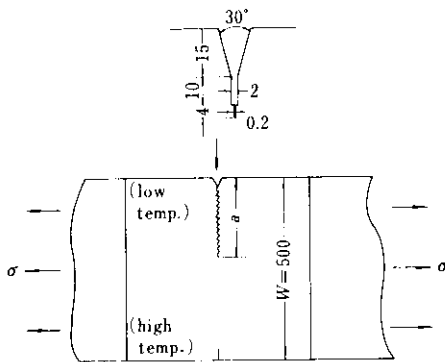


Fig. 16 Specimen dimensions and method of ESSO test

伝播長さ a を測定した。そして亀裂が停止した位置の温度における亀裂伝播停止に関する破壊靱性 K_{ca} を(5)式により求めた。

$$K_{ca} = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2W}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 17 は SGV49 の母材と被覆アーク溶接継手の試験結果であり, Fig. 18 は SPV50 の試験結果である。SR なしの状態では, 溶接ボンドから発生した亀裂はほとんど母材にそって伝播する傾向がみられる。両図から母材および溶接部ともに, SPV50 の方がやや亀裂停止破壊靱性は良好であること, SPV50 では SR により亀裂停止破壊靱性は劣化することがわかる。

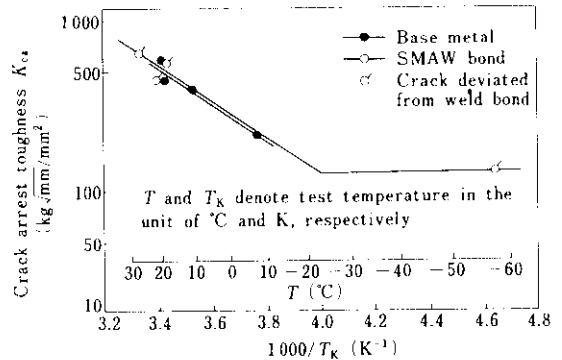


Fig. 17 Temperature dependence of crack arrest toughness, K_{ca} , obtained by ESSO test for SGV49 steel plate and the weld joint (45mm)

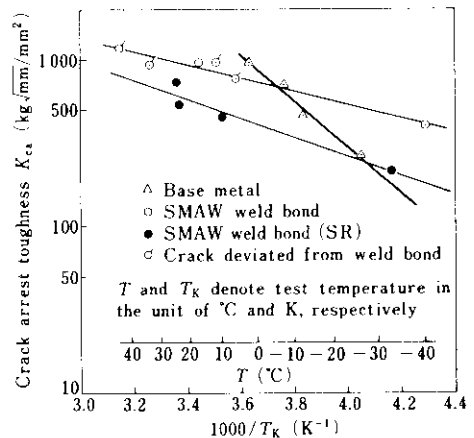


Fig. 18 Temperature dependence of crack arrest toughness, K_{ca} , obtained by ESSO test for SPV50 steel plate and the weld joint (38mm)

6. 格納容器用鋼板としての不安定破壊に対する安全性

原子炉格納容器用鋼材として不安定破壊に対す

る安全性の評価の基準は前述のとおり、現在のところ衝撃試験および落重試験についての規格のみである。しかし、関連する参考基準としては ASME CODE SEC. III APPENDIX G で定める K_{IR} 曲線が一つの目安となる。Fig. 19 はディープノッチ試験、広幅引張試験、ESSO 試験など大型試験で得られた母材や溶接継手の K_c や K_{ca} の値を、それぞれの切欠位置での参照無延性遷移温度 RT_{NDT} により補正された相対温度 ($T - RT_{NDT}$) に対して、試験法や SR の有無を区別せずに図示したものである。 K_{IR} 曲線は、元来原子炉圧力容器用鋼材に対する設計基準線として提案されたものであり、対象とされた破壊靱性値はすべて平面ひずみ状態における K 値である。本試験で得られた K 値はかならずしも平面ひずみ状態の破壊条件とはなっていないが、溶接残留応力の影響がきわめて大きいとみられるごく一部の低温における試験結果を除き、測定点はすべて K_{IR} 曲線の上側にあり、圧力容器の設計に関する基本条件を満足していることになる。

つぎに、ASME CODE で想定する欠陥が格納容器部材に万一存在した場合の鋼材の脆性破壊の発生の可能性を検討する。ASME CODE での想定欠陥は 100~300mm の極厚材については深さが板厚の 1/4、長さは板厚の 1.5 倍の半だ円形表面欠陥であるので、これを適用することにする。一般に表面切欠に関する破壊靱性 K は (6) 式の形で表示され、所定温度での K 値から想定欠陥の存在

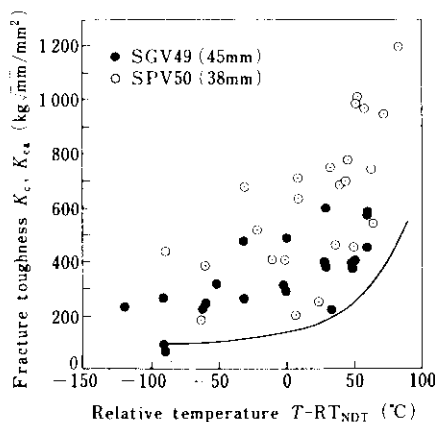


Fig. 19 Comparison of fracture toughness K_c and K_{ca} obtained by large scale testing with ASME K_{IR} curve (base metal and weld joint)

下での破壊限界応力が求められる。

$$K = M_m \sigma \sqrt{\pi a / Q} \quad (6)$$

M_m, Q : 形状係数

a : 切欠深さ (mm)

計算に使用した破壊靱性値は SGV49 と SPV50 について種々の条件で得られた値のうちもっとも小さな値を安全評価のため用いている。また、 δ_c を用いる場合は前述の (2) 式において σ が σ_y より比較的小さい場合に成り立つ (7) 式によって K に換算して用いている。

$$K = \sqrt{\delta_c E \sigma_y} \quad (7)$$

Fig. 20 は SGV49 の母材と SMAW 継手について、および SPV50 の母材、SMAW、SAW、GMAW 継手についての不安定破壊発生に関する限界応力曲線である。いずれの部材でも、図の右下に示される格納容器の使用条件を考慮しても不安定破壊は発生しないことがわかる。さらに、これらの限界曲線は、実際の鋼構造物として、溶接残留応力あるいは溶接工作誤差などの影響で、約 60°C ほど高温に移行しても十分安全に使用しうることが理解される。また、これら 2 種の鋼材は、使用応力

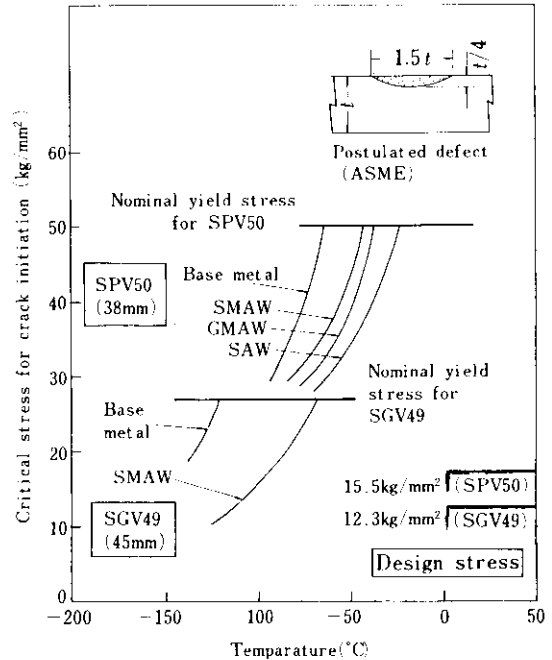


Fig. 20 Critical stress curves for brittle crack initiation under the existence of the postulated defects in SGV49 and SPV50 steels

レベルが異なるなど、直接の比較はできないが、不安定破壊発生に関する限界曲線の位置関係から考え、ほぼ同等のあつかいが可能であるといえよう。

7. 総 括

原子炉格納容器に使用される鋼材の現況を、とくに最近この厚みまで規格が拡大適用されることになった板厚 45mm の SGV49 鋼と、38mm の新しく適用される高張力 SPV50 鋼について、溶接性および靱性に関する諸特性を主体に紹介した。これらの材料は、従来から用いられて多くの実績をもつ板厚 38mm までの SGV49 鋼の特性と、は

ば同等にあつかうことができ、格納容器用の鋼材として用いられた場合、溶接性、靱性にすぐれ、破壊に対する安全性も十分保証しうることを破壊力学的手法により実証した。

終わりに、本報告の一部には、財団法人発電用熱機関協会の原子炉格納容器用材料確性試験技術検討委員会で実施された研究結果を使用させていただいた。試験結果の解析、評価などについてご教示いただいた同委員会委員長安藤良夫教授を初めとする委員各位、および試験の実施などでご協力くださった(株)日立製作所、三菱重工業(株)、石川島播磨重工業(株)の関係各位に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 火力発電技術協会：火力原子力発電，29 (1978)，1235
- 2) 飯田，和田，松本，正岡，広瀬，田中：火力原子力発電，30 (1979)，629
- 3) 竹内，深谷，佐藤：圧力技術，17 (1979)，63
- 4) 薄田，佐藤，高野，上林，吉田：三菱重工技報，13 (1976) 10
- 5) 飯田，石川，酒井，小野塚，佐藤，征矢：圧力技術，17 (1979) 72
- 6) 日本溶接協会：「原子炉耐圧部の不安定破壊に対する安全基準に関する試験研究」，(1974)
- 7) A. W. Pense and R. D. Stout: WRC Bulletin, 205 (1975) May
- 8) British Standard Institute: DD19 (1974)
- 9) 日本溶接協会：「脆性破壊発生特性に基づく鋼材の判定規準の確立に関する共同研究総合報告書」，(1975)
- 10) 高圧ガス保安協会：「高圧ガスの球形貯槽に関する基準」，KHK S021，(1970)
- 11) 征矢，柏村，荻原，佐藤，三波：日本造船学会論文集，140 (1976) 223
- 12) 笠松，高野，松岡：R & D 神戸製鋼技報，26 (1976) 70