

原子炉格納容器用 720N/mm²級高張力鋼板 (旧 ASTM A 543 Type B Class 1) の実用化試験

Verification Test of 720N/mm² Class High-Tensile Steel Plate (Former ASTM A 543 Type B Class 1) for Hybrid High-Tensile Steel Containment Vessels for PWR

今井兼敬^{*(1)} 萩原行人^{*(2)} 岡山 豊^{*(3)} 熊谷達也^{*(4)}
Kaneyuki IMAI Yukito HAGIWARA Yutaka OKAYAMA Tatsuya KUMAGAI

千葉秀隆^{*(5)} 山中勝義^{*(6)}
Hidetaka TIBA Katuyosi YAMANAKA

抄 録

高張力鋼製円筒形格納容器への720N/mm²級低合金高張力鋼板(旧 ASTM A 543 Type B Class 1)の実用化を目指して、転炉溶製鋼板の基本性能試験、溶接性、応力除去焼鈍割れ試験、並びに鋼材及び溶接融合線の静的及び動的破壊靱性試験を実施した結果、本鋼板は焼入焼戻し及び後熱処理後で規格を十分に満足するばかりでなく、応力除去焼鈍割れの可能性が全くなく、静的及び動的破壊靱性に優れた特性を示した。又、溶接材料の改良により溶接性も更に改善されている。これらの結果を踏まえて本鋼板の高張力鋼製円筒形格納容器への適用は可能との結論を得た。

Abstract

Aiming at the practical application of former ASTM A 543 Type B class 1 steel plate manufactured through BOF steelmaking to cylindrical high-tensile steel containment vessels for PRW, various tests were conducted, including basic performance test, weldability test and stress-relief cracking test as well as static and dynamic fracture toughness tests of welded fusion line. As a result, it was found that the steel plate satisfies the specification after QT and post weld heat treatment, is free from stress-relief cracking and exhibits excellent static and dynamic fracture toughness. Moreover, the weldability of this plate has been improved through the improvement of welding materials. Based on these results, it was concluded that the steel plate is applicable to cylindrical high-tensile steel containment vessels for PWR.

1. 緒 言

原子炉格納容器に使用される鋼材は、当初、ASTM A 212 Type Bであったが、A 516 Type 60又はType 70を経て JIS G 3118 SGV 480 (旧 SGV 49) が広く用いられるようになった。原子炉の大型化に伴い格納容器も大きくなってきたが、加圧水型原子炉格納容器では、耐震設計から格納容器の高さを制限する必要があり、そのため最高使用圧力を高める(2.50kgf/cm²g→2.89kgf/cm²g)ことが必要となった。そのためには、SGV 480鋼の厚板化及び鋼板の高強度化が指向された^{1,2)}。

前者に関しては、通商産業省技術基準(1977年以前)で溶接部に応力除去焼鈍(後熱処理、以下PWHT)を行わないで使用できる板厚は、38mmに制限されていたのに対し、SGV 480鋼板をPWHTなしで使用できる板厚範囲を44.5mmまで拡大する検討が発電用熱機関協会(現在、発電設備技術検査協会)の原子炉容器材料確性試

験技術委員会で行われた。その結果、その使用が認められ、関西電力(株)高浜原子力発電所3号機で採用された^{1,2)}。

一方、高張力鋼製円筒形格納容器(以下HHCV)用鋼板として、720N(74kgf/mm²)級のASTM A 543 Type B Class 1(以下A543 B1)鋼板が選定され、本鋼(板厚40及び50mm)の原子炉格納容器への適用性(1)鋼材及び溶接継手の不安定破壊に対する安全性、2)PWHTなし、3)溶接割れ感受性等)が発電用熱機関協会の原子炉格納容器高張力鋼技術検討委員会で検討され、1974年にその使用が認められた³⁾。

表1及び表2に原子炉格納容器用鋼板の規格概要(化学成分と機械的性質)を示す。

その後、1100MW級PWR型原子炉格納容器にはHHCV、プレストレスコンクリート製格納容器(以下PCCV)と球状格納容器(SSCV)が検討され、外国で実績のあるPCCVが採用され、日本原子力発電(株)敦賀2号以降適用されている。しかし三菱重工業(株)神戸

*⁽¹⁾ 技術本部 厚板技術部 部長代理 工博

*⁽²⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 厚板・破壊力学研究部

主幹研究員 工博

*⁽³⁾ 技術本部 技術企画部 掛長

*⁽⁴⁾ 技術開発本部 名古屋技術研究部 掛長

*⁽⁵⁾ 名古屋製鐵所 品質管理部 掛長

*⁽⁶⁾ 名古屋製鐵所 品質管理部 部長代理

表 1 HHCV 用 ASTM A 543 Type B Class 1-1974鋼板の化学成分 (規格及び出鋼材)

化学成分 (%)		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Sol.Al	Ceq**	P _{CM} **5	As	Sb	Sn	B
ASTM A 543 Type B Class 1-1974	取鋼	≤0.23	0.20 ~0.35	≤0.40	≤0.020	≤0.020	—	2.60 ~3.25	1.50 ~2.00	0.45 ~0.60	≤0.03	—	—	—	—	—	—	—
熱機関協会特認条件規格 (A 543 Type B Class 1)	取鋼	≤0.13**1	0.20 ~0.35	≤0.40	≤0.020	≤0.020	—	2.60 ~3.25	1.50 ~2.00	0.45 ~0.60	≤0.03	—	≤0.70	—	—	—	—	—
新日本製鐵成分設計目標値	取鋼	0.09	0.25	0.35	≤0.005	≤0.001	—	2.80	1.60	0.50	≤0.03	—	≤0.67	—	—	—	—	—
今回 (1986年) 転炉出鋼材 板厚50mm 鋼番 SN6076	取鋼	0.09	0.24	0.35	0.005	0.001	0.01	2.82	1.64	0.53	tr**2	0.039**3	0.69	0.28	0.002	0.001	0.001	0.0002
	製鋼塊	1/4t	0.10	0.23	0.32	0.006	0.001	0.01	2.77	1.63	0.52	tr	0.030	0.69	0.28	0.002	0.001	0.001
前回 (1975年) 電気炉出鋼材 板厚40mm 鋼番 DH9256	取鋼	0.08	0.23	0.35	0.006	0.004	—	2.77	1.54	0.50	—	0.021	0.65	0.26	—	—	—	—
	鋼塊頭部	0.08	0.25	0.36	0.006	0.005	0.03	2.76	1.55	0.51	0.01	0.021	0.65	0.26	0.003	0.007	0.004	0.0001

* 1 : C>0.10%の場合, y形溶接割れ試験の停止温度が100°C以下であること
* 2 : V=0.004% (添加せず) * 3 : Total Al

* 4 : Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14
* 5 : P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+Cu/50+5B

表 2 原子炉格納容器用鋼板 (JIS SGV 480と ASTM A 543 Type B Class 1) の機械的性質

項目	A 534 Type B Class 1鋼	SGV 480鋼
降伏強さ (0.2%耐力)	585N/mm ² 以上	265N/mm ² 以上
引張強さ	720~860N/mm ² (74~88kgf/mm ²)	480~590N/mm ²
伸び	14%以上 (JIS 4号試験片)	17%以上 (JIS 1A号試験片)
衝撃試験	最低使用温度で 吸収エネルギー: 68J 以上 (6.9kgf·m) 横膨出量: 0.89mm 以上	最低使用温度で 吸収エネルギー: 29J 以上 (3.0kgf·m)
落重試験	NDT 温度 ≤ 最低使用温度 - 33°C	—

造船所では, PCCV と共にこれまでの経験と, 最近の容器構造解析技術の進展により HHCV も PCCV 並の寸法で設計可能であることが判明した。

そこで三菱重工業㈱神戸造船所は, その後の製鋼技術の進歩 (転炉及び二次精錬), 溶接材料の改良及び溶接施工技術の向上を踏まえ, “ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板 (板厚50mm) 製原子炉格納

容器の製作性検討” を計画し, 1985年10月新日本製鐵に対し本鋼板サンプル材提供の可能性について打診があった。これに対し, 新日本製鐵は1986年160トン転炉溶製により出鋼し, 板厚50mmの鋼板を製造し, 三菱重工業㈱に提供した。

本報は, 新日本製鐵が実施した A543B1鋼母材及び溶接継手について基本性能試験, 低温割れ試験, 応力除去焼鈍割れ試験, 並びに動的破壊靱性試験を含む破壊特性について報告する。併せて1974年の認可に使用された鋼板, (60トン電気炉溶製, 以下前回鋼) との性能を比較すると共に, 格納容器の使用条件のもとで脆性破壊に対する安全性について検討した結果も報告する。

2. ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板の基本性能

2.1 成分設計の考え方と製造について

今回の鋼板製造については, 前回 (40mm) より板厚が厚い (50mm) こと, PWHT 時間の長時間化 (595°C×1.6h → 3.4h), 格納容器の最低使用温度の低温化等を踏まえて成分設計を行い, 図1に示すように, 溶鋼原料の厳選, 溶銑脱硫, 溶銑脱磷, 160トン LD 転炉, 取鍋二次精錬により鋼塊を製造し, 圧延, 熱処理 (焼入れ (Q), 焼戻し

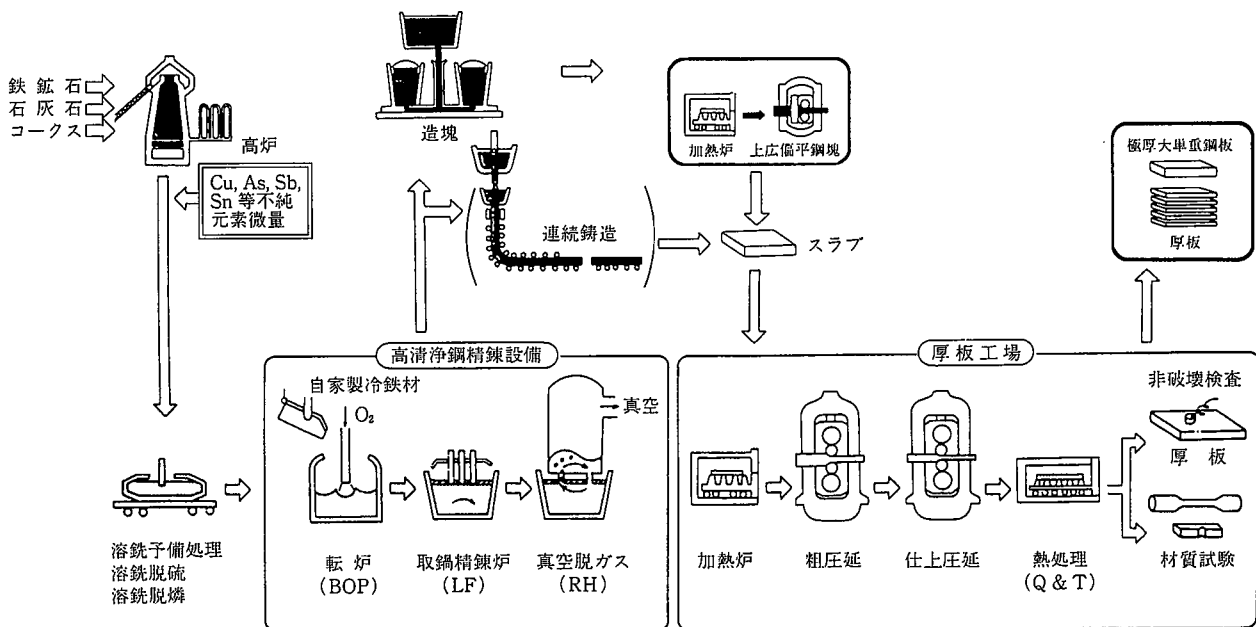


図 1 原子炉格納容器用高張力鋼板の製造工程の概略図

(T))を行い、板厚50mmの鋼板を製造した。表1に規格、成分設計目標値、取鍋及び製品分析結果を示した。炭素当量(Ceq)及びP_{CM}は前回材よりやや高く、不純物元素(P, S, As, Sb, Sn等)は前回材より低減されていることがわかる。

2.2 常温及び高温引張特性

引張試験片は板厚(t)のt/4、圧延方向(L方向)、圧延に直角方向(C方向)、鋼塊の頂部及び底部相当位置から採取し、引張試験を行った結果を表3に示す。前回のA543B1鋼板の引張試験結果も併せて示す。今回材の焼入焼戻し及び後熱処理後の引張強さ及び降伏強さとも、前回材より20N/mm²(2 kgf/mm²)高い。後熱処理による強度低下は今回材と前回材とで差が殆どないことがわかる。

図2に今回材の引張特性に及ぼす後熱処理の影響を示す。焼入焼戻し材に595°C×7.4h(テンパーパラメーター:18.12)の後熱処理を施すと降伏強さ及び引張強さとも約30N/mm²低下している。

図3に今回材の後熱処理前後の高温強度特性を示す。後熱処理を加えても高温強度特性は大きく変わらず、かつ熱機関協会特認条件の降伏強さも十分満足していることがわかる。

2.3 顕微鏡組織

今回材の焼入焼戻し及び後熱処理後の顕微鏡組織を写真1に示す。板厚位置に関係なく安定した顕微鏡組織を示していることがわかる。

表3 今回材(転炉溶製)と前回材(電気炉)のt/4の引張試験結果

後熱処理の有無		今回供試材(1986年)(50mm)		前回材(1975年)(40mm)	
		範	平均	範	平均
焼入焼戻し(QT)のまま	降伏強さ(N/mm ²)	700~724	710	680~702	692
	引張強さ(N/mm ²)	771~790	780	743~768	757
	伸び(%)	25~26	25.3	26~28	26.6
	絞り(%)	79~80	79.5	73~77	75.2
後熱処理*1(PWHT)	降伏強さ(N/mm ²)	689~707	698	668~690	682
	引張強さ(N/mm ²)	762~783	770	740~761	751
	伸び(%)	24~26	25.3	26~28	26.6
		80	80	73~78	75.3

*1:後熱処理(PWHT)条件:今回材:595°C×3.4h, 前回材:595°C×1.6h
A543B1鋼規格:降伏強さ:585N/mm²(60kgf/mm²)以上
(熱機関協会特認条件)引張強さ:725~860N/mm²(74~88kgf/mm²)
伸び(JIS 4号, GL=50mm):14%以上

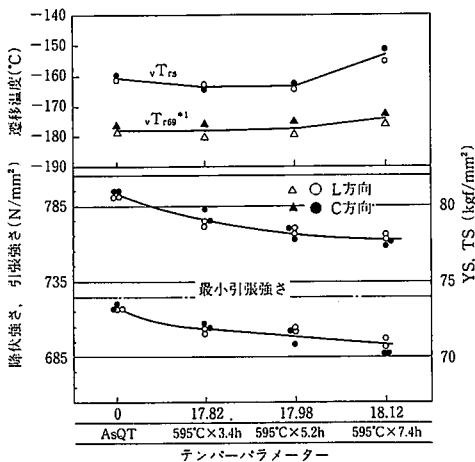


図2 今回材の引張特性及び衝撃特性に及ぼす後熱処理の影響

*1 v_{T_{rs}}: 吸収エネルギー遷移温度, 吸収エネルギーが6.9 kgf·mとなる温度

2.4 シャルピー衝撃特性

衝撃試験片はt/4、圧延方向、圧延に直角方向、鋼塊の頂部相当位置から採取した。その結果を纏めて表4に示す。図4は今回材のシャルピー吸収エネルギー遷移曲線の1例を示す。今回材は非常に優れた切欠靱性を示しており、熱機関協会特認条件を十分満足して

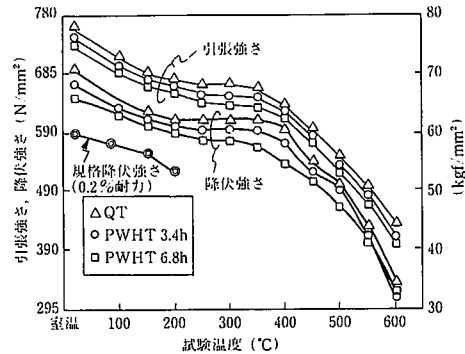


図3 今回材の後熱処理前後の高温強度特性

試験片採取位置:t/4 C方向
高温引張試験片:10mmφ, GL=50mm
後熱処理条件:595°C×3.4h, 6.8h

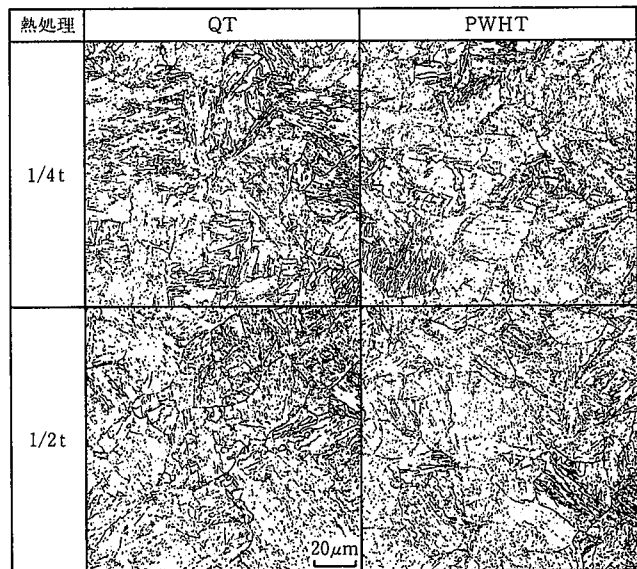


写真1 今回材の顕微鏡組織(鋼塊頭部)

表4 今回材の衝撃試験結果(t/4, 鋼塊頭部)

熱処理	方向	v _{T_{rs0}}	v _{T_{rs}}	v _{T_{rs}mitis}	vE ₋₁₃	vE ₋₃₀	vE _{max}	LE ₋₁₃
		(°C)	(°C)	(°C)	(J)	(J)	(J)	(mm)
QT	L	<-180	<-180	<-180	301	313	323	2.21
					321	297	310	2.16
					313	304		2.32
	C	-180	-173	-180	294	287	318	2.23
				307	309		2.35	
				299	310		2.23	
QT + PWHT (595°C×3.4h)	L	<-180	-173	<-180	310	306	315	2.25
					315	309	315	2.25
					313	304		2.27
	C	-176	-164	-174	313	306	313	2.30
				296	291		2.21	
				311	304		2.24	

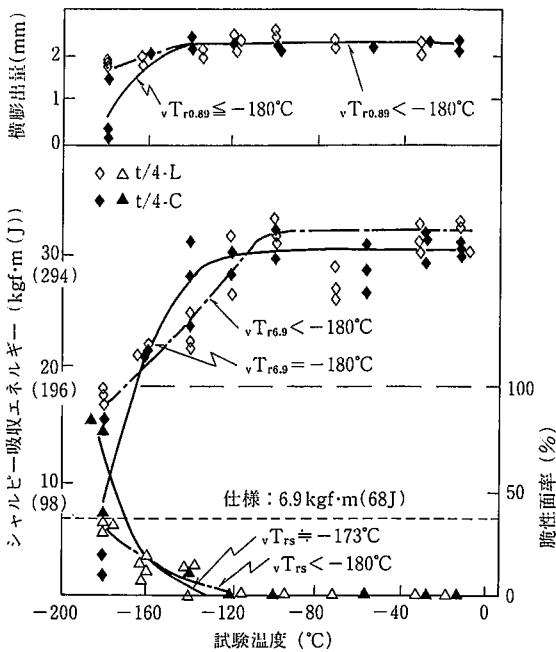


図 4 今回材のシャルピー吸収エネルギー遷移曲線の例

いることがわかる。

表 5 に今回材と前回材とのシャルピー遷移温度の比較を示す。今回材は焼入焼戻し及び後熱処理後の各種遷移温度が前回材に比べて優れており、かつ後熱処理による靱性低下が少ないことを示している。その傾向は図 2 でもわかる。

2.5 歪時効特性

図 5, 表 6 に今回材と前回材の歪時効試験結果を纏めて示す。焼入焼戻し材での歪量による特性値(衝撃値, 引張特性)の変化は今回材も前回材も大きな差はない。しかし、歪時効を施しても前回材に比べて遷移温度は低温側にあることがわかる。

3. ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板の溶接性: y 形溶接割れ試験結果

表 7 に今回材と前回材の y 形溶接割れ試験結果及び割れ停止温度を纏めて示す。今回材は P_{CM} が前回材に比べて若干高いにもかかわらず、手溶接の低温割れ停止温度は 50°C 低い。これは溶接材料の改良によると考えられる。

4. ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板の応力除去焼鈍 (SR) 割れ試験

新日本製鐵方式, WES 方式及び y 形方式による転炉溶製 A543B1 鋼板の SR 割れ試験結果を表 8 に示す。いずれの方式でも SR 割れは発生しなかった^{4,5)}。

これまでの 780N/mm²級高張力鋼板に関する SR 割れの研究⁴⁻¹⁴⁾, 今回の A543B1 鋼の試験結果及び今井らの試験結果¹⁵⁾ を踏まえると次のことがいえる。

- (1) 本鋼種の SR 割れ感受性が低いのは C 及び P が十分低いこと, V 及び Nb 等 SR 割れ感受性を高くする元素が含まれていないことが大きな要因であることが確かめられた。
- (2) SR 割れ感受性評価指標の ΔG, P_{SR} と A543B1 鋼の SR 割れ感受性

表 5 今回材のと前回材との t/4 位置のシャルピー遷移温度

	今回材 (50mm)	前回材 (1975年) (40mm)	
焼入焼戻し材	vT _{rs} *1	-173°C~-180°C以下	-150°C~-177°C以下
	vT _{r50} *2	-180°C~-180°C以下	-153°C~-189°C以下
	vT _{r0.89} *3	-180°C~-180°C以下	—
後熱処理材	vT _{rs}	-153°C~-173°C	-148°C~-150°C以下
	vT _{r50}	-172°C~-180°C以下	-150°C以下
	vT _{r0.89}	-168°C~-180°C以下	—

* 1 vT_{rs}: 破面遷移温度, 延性破面率50%となる温度
 * 2 vT_{r50}: 吸収エネルギー遷移温度, 吸収エネルギーが50ft・lbとなる温度
 * 3 vT_{r0.89}: 横膨出遷移温度, 横膨出量0.89mmとなる温度

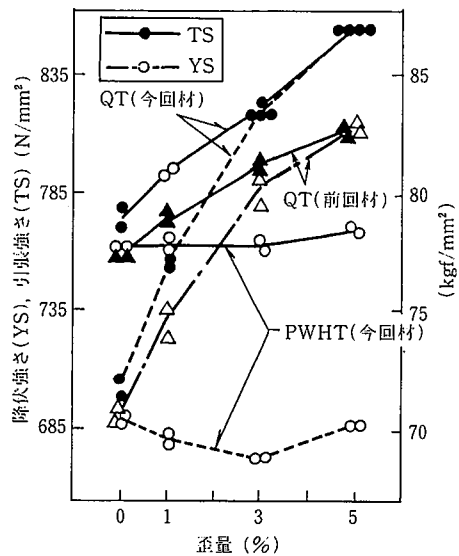


図 5 今回材と前回材(t=50mm)歪時効引張試験結果
 試験片: JIS Z 2201 4号, 位置 1/4t, C方向
 時効 250°C×1h, PWHT: 594°C×3.4h

表 6 今回材と前回材の歪時効衝撃試験結果

熱処理	予歪量 (%)	方向	今回材 (板厚50mm)		前回材 (板厚40mm)	
			vT _{rs} (°C)	vT _{r50} (°C)	vT _{rs} (°C)	vT _{r50} (°C)
QT	0	L	-175	<-180	—	—
		C	-173	<-180	-150	-153
	1	L	<-180	<-180	—	—
		C	-151	-166	-133	-138
	3	L	-165	-175	—	—
		C	-150	-158	-134	-138
	5	L	-170	-179	—	—
		C	-158	-165	-116	-126

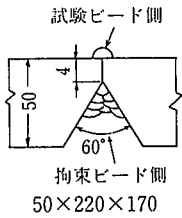
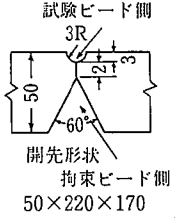
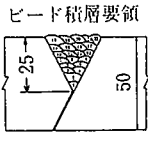
時効処理: 250°C×1 h, PWHT: 595°C×3.4h

表 7 今回材と前回材の y 型溶接割れ試験による割れ停止温度

溶接法	今回材 (50mm)	前回材 (40mm)	溶接条件
手溶接	50°C	100°C	175A×25V×15cm/min
MIG溶接	50°C	75°C	150A×20V×20cm/min

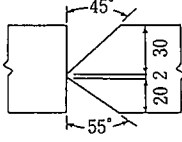
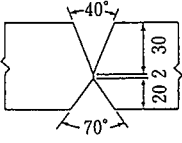
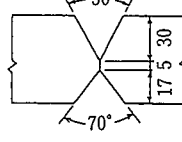
溶接雰囲気条件: 30°C, 80%
 手溶接材料: LBY-75 (溶接金属の拡散性水素量: 2.2ml/100g)
 MIG溶接材料: MGS-70 (溶接金属の拡散性水素量: 0.2ml/100g)

表 8 転炉溶製 ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板 (板厚50mm) の SR 割れ試験結果^{4,5)}

試験方式	新日本製鐵方式SR割れ試験 (T-type)	WES方式SR割れ試験 (WES 3005-1977)	y形SR割れ試験 (JIS Z 3158に準拠)
試験片形状 (mm) (厚×幅×長, mm)			
拘束溶接 拘束パス数	220A-26V-15cm/min 6, 8, 10, 13, 16, 20, 25 (くり返し1回)		JIS Z 3158に準拠した 拘束溶接
試験ビード	170A-24V-15cm/min 1パス	170A-24V-15cm/min 1パス	170A-25V-15cm/min 22パス
評価要領	WES 3005-1977のSR割れ評価要領による		PWHT後4断面のマクロ組織で SR割れの有無を調査
試験結果	表面割れ及び断面割れ無		断面割れなし(2くりかえし)

溶接棒: LBY-75(4.0mmφ), 溶接時予熱温度: 100°C
 気温, 湿度: 30°C, 80%, 後熱処理条件: 595°C×7.4h

表 9 ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板の溶接条件

溶接法	開先形状 (mm)	溶接材料	溶接条件				
			電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	予熱パス間 (°C)	入熱 (kJ/cm)
MIG K開先		ワイヤー : MGS-70 1.2mmφ シールドガス : 80%Ar+20% CO ₂ (30 l/min)	270~300	34~37	18~21	150	32
MIG X開先		ワイヤー : MGS-70 1.2mmφ シールドガス : 80%Ar+20% CO ₂ (30 l/min)	290~300	35	20~21	150	31
SAW X開先		ワイヤー : KW-103B 4.8mmφ フラックス : KB-80C 12×200	610~730	30~32	30~35	120~150	41

とは対応しないことが示された。

5. ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板及び溶接継手の破壊靱性

5.1 溶接継手

溶接継手は格納容器製作に使用される MIG 溶接法 (以下 MIG) 及びサブマージーク溶接法 (以下 SAW) を用い, 表9に示す溶接条件で製作した。MIG 溶接継手については溶接のまま (AW) と後熱処理を施したものについて試験した。表10に溶接継手の衝撃試験結果を示す。

5.2 破壊靱性試験内容

格納容器用鋼として A543B1を適用する場合, 格納容器の使用条件で A543B1鋼及びその溶接継手, 特に FL が脆性破壊に対して十分に

表 10 ASTM A 543 Type B Class 1 溶接部の衝撃試験結果

溶接法	処理	切欠位置	vT_{rs} (°C)	vT_{r50} (°C)	vE_{max} (J)	vE_{-13} (J)	$vT_{r35mils}$ (°C)	LE ₋₁₃ (mm)
MIG K開先	AW	FL*1	-52	-60	220	192	-61	2.19
		HAZO.8*2	-111	-151	239	232	-140	2.15
	PWHT	FL	-59	-65	187	181	-67	1.84
MIG X開先	AW	FL	-71	-76	200	208	-75	2.12
		HAZO.8	-101	-125	229	219	-124	2.24
	PWHT	FL	-54	-69	197	174	-68	1.88
SAW X開先	AW	FL	-57	-66	138	149	-66	1.76
		HAZO.8	-97	-122	294	286	-115	2.38

* 1 FL: 溶接融合線

* 2 HAZO.8: FLより0.8mm溶接熱影響部 (HAZ) に入ったところ

安全であることを確認する必要がある。そこで、母材及びFLに関して破壊靱性特性を明らかにし、電気協会及びASME Sec. IIIの要求値^{16,17)}に対する評価と共に使用条件における安全性検討を破壊力学を用いて定量的に行うために、各種の破壊靱性試験：静的破壊靱性試験、動的破壊靱性試験及びき裂伝播停止試験をそれぞれASTM E 399, E 813 及びCAA試験法, ESSO試験法に従って求めた。鋼板の板厚は50mmであるため、静的及び動的破壊靱性試験は2TCT試験片を、CCA試験, ESSO試験は50mm厚で実施した。

溶接継手に関しては靱性が問題となるFLに切欠を設けて試験した。この場合、鋼板のFL靱性特性を正確に求めるためにK開先継手を用いた。

5.3 シャルピー衝撃特性

格納容器用鋼に関する電気協会基準 JEAC 4206-1991及びASME基準 ASME Sec. IIIによる靱性要求値 (シャルピー試験特性及び落重試験特性) を表11に示す。最低使用温度 (LDT:ここでは-13°C

表11 格納容器用鋼の靱性規定 (ASTM A 543 Type B Class 1鋼を考慮して)

	JEAC 4206-1991	ASME Sec. III (NB 2332, NE 4622)
衝撃試験	$\sqrt{E} \geq 61/54 \text{ J}$ at LDT $LE \geq 0.9/0.75 \text{ mm}$ at LDT	$\sqrt{E} \geq 61/54 \text{ J}$ at LDT $LE \geq 0.9/0.75 \text{ mm}$ at LDT
	SGV 480 (SA 516-70) の場合, $t=38 \sim 44.5 \text{ mm}$, PWHT なしで使用する場合	
	$\sqrt{E} \geq 68/61 \text{ J}$ at LDT	$\sqrt{E} \geq 68/61 \text{ J}$ at LDT 又は $\sqrt{E} \geq 61/54 \text{ J}$ at LDT-6°C
落重試験	$T_{NDT} \leq LDT - 17^\circ\text{C} (A=17^\circ\text{C})$	$T_{NDT} \leq LDT - 17^\circ\text{C} (A=17^\circ\text{C})$

を採用する)におけるシャルピー吸収エネルギーが規定 (3本の平均値/最低値 $\geq 61/54 \text{ J}$) されている。表4及び表10に示したように、母材及び溶接熱影響部は靱性要求値を十分に満足していることがわかる。

5.4 落重特性

落重試験のNDT温度の要求値は、表11に示したようにLDT-17°C (すなわち-30°C)、以下である。2ビート法による落重試験結果を図6にまとめた。母材、FLともPWHTの有無にかかわらず要求値を満たしている。前回材のNDTも比較のために示したが、今回供試した鋼板はそれらと同等以上の特性を示している。

なお図6に併せて示したように、母材の落重試験は1ビート法 (ASTM E 208-1986)¹⁸⁾でも実施したが、NDT温度の高温側への移行量は5~10°Cであり、本供試鋼板は1ビート法によるNDT温度でみても十分な性能になっている。

5.5 静的破壊靱性

焼入焼戻材 (QT) 及びPWHT (595°C×3.7h) 処理を施した鋼板について、2TCT試験片を用いてASTM E 399に基づく K_{Ic} 試験及びE 813に基づく J_{Ic} 試験を行った。 K_{Ic} 試験において有効な K_{Ic} 値が得られなかった場合は、破壊発生時のJ値 (J_c) で評価した。

母材に関する試験結果を全てK値に換算して図7に示す。最低使用温度-13°CではQT材, PWHT材いずれも破壊靱性の上部棚 (アッパーシェルフ) 領域にあり、 J_{Ic} 試験で得られた K_{Ic} 値になっている。図にはMIG溶接継手のK開先FLについての静的破壊靱性試験結果も併せて示している。溶接のまま及びPWHT処理したFLは、いずれも同等な靱性レベルにあり、前回材とも類似の破壊靱性遷移曲線を示している。

5.6 動的破壊靱性及び脆性き裂伝播停止靱性

図8に母材及びFLの動的破壊靱性試験及び脆性き裂伝播停止試験結果をまとめて示す。最低使用温度-13°Cにおける最低靱性値は K_{Ia} 試験による $124 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。前回材については動的破壊靱性試験は行っておらず、結果はすべてESSO試験で得られたものであり、その点を考慮すると今回の供試鋼板の特性は前回材と同等と見なすことができる。

5.7 安全性に関する考察

母材及び溶接部のシャルピー衝撃特性はJEAC及びASMEの要求を満たしており、落重試験のNDT温度も要求値を十分に満足したものになっている。又、それらの特性は前回材と同等以上であることが確認できた。更に破壊靱性特性は、母材については静的及び動的破壊靱性値のいずれも最低使用温度の-13°Cでアッパーシェルフになっており、十分な耐脆性破壊性能を有している。一方、FLの最低使用温度における破壊靱性の最低値は、溶接のまま (AW) 及びPWHTのいずれの場合も約 $124 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (K_{Ia} 試験による) であった。

本供試鋼板の破壊靱性を一次系の原子炉容器を対象に規定してい

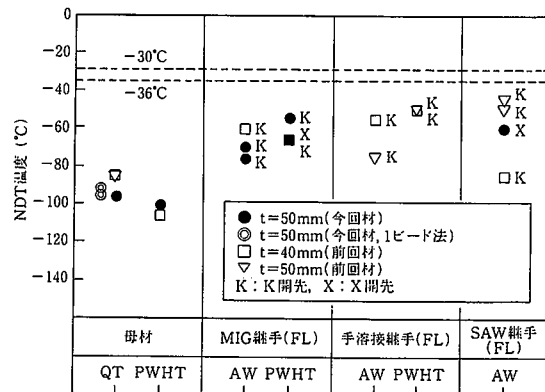


図6 ASTM A 543 Type B Class 1鋼板及び溶接融合線のNDT温度 (2ビート法による)

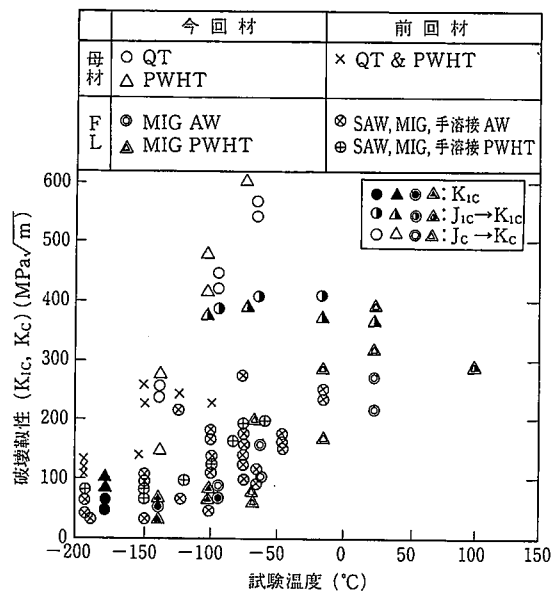


図7 ASTM A 543 Type B Class 1鋼板及び溶接部の静的破壊靱性と試験温度との関係

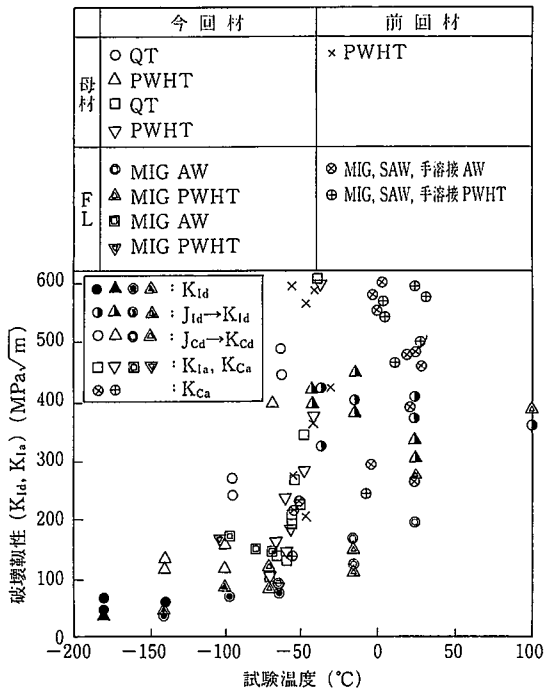


図 8 ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板及び FL の動的破壊靱性及びき裂伝播停止特性と試験温度との関係

る ASME Sec. III 及び Sec. XI の K_{IR} 及び K_{IC} 曲線と比較して検討した。図 9 に母材と FL についての静的破壊靱性試験結果と K_{IC} 曲線と比較して示す。又、図 10 は母材及び FL の動的破壊靱性試験及び脆性き裂伝播停止試験結果と K_{IR} 曲線とを比較したものである。静的及び動的破壊靱性値の下限包絡線は、いずれも K_{IC} 曲線及び K_{IR} 曲線と同等の傾向を示すことが認められる。

図 10 にみられるように、破壊靱性値と $T - RT_{NDT}$ の関係は溶接のままの試験結果の方がやや低めにはなっているが、 K_{IR} 曲線を下回るものではなく、 K_{IR} 曲線が靱性の下限を与えている。従って、A543B1 鋼についても ASME Sec. III 及び Sec. XI の破壊靱性曲線を用いて RT_{NDT} 温度から評価できるといえる。

破壊靱性値の下限包絡線から線形破壊力学によって破壊限界応力と温度の関係を求める。ここで想定する欠陥は、ASME Sec. III Appendix G に準じ、深さ $1/4 t$ 、表面での長さ $1.5t$ の半楕円表面

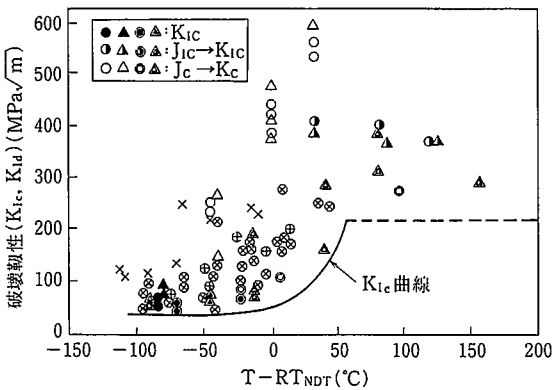


図 9 ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板及び溶接部の静的破靱性と K_{IC} 曲線との関係 (記号は図 7 を参照)

き裂とする。又、表面き裂には一様な引張応力が作用するものとした。表面き裂の K 値は次式で与えられる。

$$K = \sigma_m M_m \sqrt{\pi a / Q} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 σ_m : 引張応力、 a : き裂深さ、 Q : 楕円き裂の形状係数、 M_m : 引張応力に対する補正係数

M_m の値を Newman の式¹⁹⁾ から算定し、限界破壊応力と温度の関係を求めた結果を図 11 に示す。設計条件範囲 (最低使用温度: -13°C 、A543B1 鋼の許容応力: 180N/mm^2) に比べて極めて高い限界応力曲線を示しており、脆性破壊に対して安全であることがわかる。

次に、板厚 50mm の A543B1 鋼が PWHT なしで脆性破壊に対して安全に使用できるかを最低使用温度における破壊靱性値を基に検討する。FL についての RT_{NDT} 温度 (AW で -75°C 、PWHT で -55°C) から -13°C における破壊靱性値を ASME の K_{IR} 曲線、 K_{IC} 曲線及び実験で得られた最低値をもとに求める。溶接のままの状態で溶接残留応力がある場合には、(1) 式で σ_m の代わりに $\sigma_m + \sigma_R$ (σ_R : 溶接残留応力) とする K 値加算則で評価する。

いま、深さ $1/4 t$ 、長さ $1.5t$ の大きな表面欠陥が溶接線に沿って存在すると仮定すると、 $\sigma_R = \sigma_v / 3 = 196\text{N/mm}^2$ (σ_v : 降伏応力) と

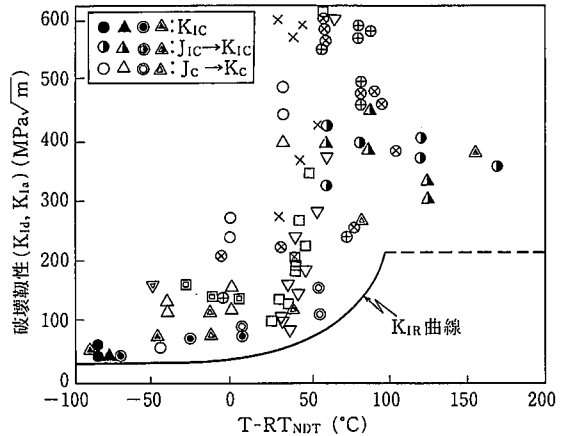


図 10 ASTM A 543 Type B Class 1 鋼板の動的破壊靱性及び脆性き裂伝播停止特性と K_{IR} 曲線との関係 (記号は図 8 を参照)

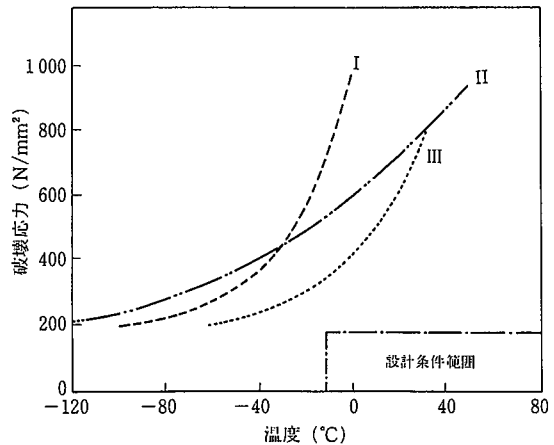


図 11 限界破壊応力と温度との関係

I: K_{IC} 曲線 ($NDT = -55^\circ\text{C}$) から推定した破壊応力曲線
II: 靱性下限線から推定した破壊応力曲線
III: K_{IR} 曲線 ($NDT = -55^\circ\text{C}$) から推定した残留応力曲線

みなすことができる。従って、限界破壊応力は表12のようにまとめられる。溶接のままの状態においても A543B1鋼の許容応力よりも十分に高い限界応力になっており、溶接のままでも安全に使用できるといえる。

表12 脆性破壊に対する限界応用

		破壊靱性値		
		K _{IR} 曲線	K _{IC} 曲線	実測最低値
PWHT	K _{crit} (MPa√m)	70	140	124
RT _{NDT} = -55°C	σ _{crit} (N/mm ²)	338	674	589
AW	K _{crit} (MPa√m)	90	215	124
RT _{NDT} = -75°C	σ _{crit} (N/mm ²)	276	1000	392

$$\sigma_{crit} = K_{crit} / M_m \sqrt{[\pi a / Q]} - \sigma_R, \sigma_R = 196 \text{ N/mm}^2$$

6. 結 論

高張力鋼製円筒形格納容器への720N/mm²級低合金高張力鋼板 (旧 ASTM A 543 Type B Class 1) の実用化を目指し、転炉溶製により製造した鋼板の基本性能試験、溶接性、SR 割れ試験、並びに鋼材及び溶接融合線の静的及び動的破壊靱性試験を実施した結果、本鋼板は焼入焼戻し及び後熱処理後で規格を十分に満足するばかりでなく、SR 割れの可能性が全くなく、静的及び動的破壊靱性に優れた特性を示した。又、溶接材料の改良により溶接性(限界予熱温度：50°C)も更に改善された。これらの結果を踏まえて本鋼板の高張力鋼製円筒形格納容器への適用は可能との結論を得た。

近い将来原子炉格納容器への720N/mm²級 Ni-Cr-Mo 系高張力鋼

板 (旧 ASTM A 543 Tyep B Class 1) の適用を期待すると共に、本鋼板の実用化試験のためにご協力頂いた 三菱重工業(株)神戸造船所鉄構部及び高砂研究所の関係者の方々に深い謝意を表します。

参 照 文 献

- 1) 飯田：圧力技術の現状と将来, (株)日本高圧技術協会, 1989, p.188-206
- 2) 竹内, 深谷, 佐藤：圧力技術, 17 (2), 7 (1979)
- 3) 内田：原子炉格納容器用高張力鋼の靱性試験に対する報告書, (株)発電用熱機関協会 原子炉格納容器用高張力鋼技術検討委員会, 1974
- 4) 金沢, 山戸, 武田, 橋本：溶接学会誌, 44 (10) 791 (1975)
- 5) 日本溶接協会認定委員会：鋼種認定試験方法, WES 3005-1977 (HPIS B 108-1977), 1985
- 6) 内木, 岡林：溶接学会誌, 39 (10), 1060 (1970)
- 7) 伊藤, 中西：溶接学会誌, 41 (1), 59 (1972)
- 8) 金沢, 山戸, 武田, 橋本：溶接学会誌, 45 (6), 481 (1976)
- 9) 玉置：溶接学会誌, 58 (1), 58 (1989)
- 10) Nichols, R. W. : Reheat Cracking in Welded Structures. IIW Doc, X-547-69, IX-665-6
- 11) 岡林：溶接技術, (1976-11), 24 (1976)
- 12) 玉置, 鈴木：溶接学会誌, 51 (9), 796 (1982)
- 13) 玉置, 鈴木：溶接学会論文集, 1 (2), 152 (1983)
- 14) 玉置, 鈴木：溶接学会論文集, 2 (3), 475 (1984)
- 15) 今井, 熊谷, 堀井, 玉置, 鈴木：1993年秋季溶接学会講演大会発表予定 (720 N/mm²低合金鋼のSR 割れ感受性に及ぼす元素の影響, 1989)
- 16) 電気協会：JEAC 4204-1991
- 17) ASME：ASME Sec. III
- 18) ASTM：ASTM E 208-1986
- 19) Newman, J. C., Raju, I. S. : Eng. Frac. Mech. 15 (1-2), 185 (1989)