
低温用調質高張力鋼板 RIVER ACE 60L, 70L, K-0L について

Low Alloy High Strength Steel Plates for Low Temperature Service -RIVER ACE 60L, 70L, K-0L-

猪又 克郎(Katsuro Inomata) 服部 邦宏(Kunihiro Hattori)

要旨：

これらの鋼板は 60, 70, 80kg/mm² 級の低合金系高張力鋼 (RIVER ACE 60L, 70L, K-0L) をもとに、低温での靱性をさらに改良し、低温圧力容器や低温溶接構造物用鋼板として開発されたものである。ここでは機械的性質、切欠靱性、溶接性などを調べた結果について述べている。これらの鋼板は低合金系高張力鋼板に比べて機械的性質は変わらないが低温靱性はよりすぐれている。遷移温度は RIVER ACE 60L で-60~-80℃, RIVER ACE 70L では-70~-84℃, RIVER ACE K-0L で-99~-101℃である。また溶接性も良好であり、各鋼種とも日本溶接協会より低温用鋼として承認されている。その他各鋼板の溶接最大入熱量についても述べている。

Synopsis：

The RIVER ACE L-series are the low-alloy quench-tempered high strength steel of 60, 70, and 80kg/mm² classes having good weldability and excellent low temperature toughness suited for pressure vessels and welded structures at low temperature use. This report centers on their mechanical properties, notch toughness and weldability. They are competitive with low-alloy high strength steels in mechanical properties. Their transition temperatures are -60 to -80℃ for RIVER ACE 60L, -70 to -84℃ for RIVER ACE 70L, and -90 to -101℃ for RIVER ACE K-0L. Their weldabilities are also good, well meeting the quality requirement of low-temperature structurals.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

低温用調質高張力鋼板 RIVER ACE

60 L, 70 L, K-0L について

Low Alloy High Strength Steel Plates for Low Temperature Service

—RIVER ACE 60L, 70L, K-0L—

猪 又 克 郎*

Katsuro Inomata

服 部 邦 宏**

Kunihiro Hattori

Synopsis :

The RIVER ACE L-series are the low-alloy quench-tempered high strength steel of 60, 70, and 80 kg/mm² classes having good weldability and excellent low temperature toughness suited for pressure vessels and welded structures at low temperature use. This report centers on their mechanical properties, notch toughness and weldability. They are competitive with low-alloy high strength steels in mechanical properties. Their transition temperatures are -60 to -80°C for RIVER ACE 60L, -70 to -84°C for RIVER ACE 70L, and -90 to -101°C for RIVER ACE K-0L. Their weldabilities are also good, well meeting the quality requirement of low-temperature structurals.

1. ま え が き

戦後の技術革新、特に溶接技術の進歩によって構造物はますます大型化される傾向にある。したがって構造物の軽量化や安全性が重要な要素になり、これら構造物に使用される鋼板の品質に対しても、より高い強度とすぐれた靱性、良好な溶接性が要求されるようになった。

当社はこれらの要望にこたえるため、種々研究を重ね昭和33年より調質処理をほどこした低合金系調質高張力鋼板 RIVER ACE シリーズの市販を開始して以来好評をえている。

ところが近年、石油化学工業の発展やエネルギーの質的量的変化にともない、液化ガスの需要が大幅に伸びるにつれて、これらガスの運搬、貯蔵用容器の需要も増大した。液化ガスは、低温常圧または中圧半冷凍などの状態で貯蔵、運搬されるため、これらに使用される低温用鋼板は低温での

切欠靱性にすぐれ、脆性破壊に対しても安全で、しかも強度の高い鋼板でなければならない。

もともと調質高張力鋼板は、切欠靱性がすぐれていて強度も高いところから、溶接性をそこなうことなく低温靱性をさらに改善すれば、これらの用途目的に十分かなうものとなる。ここに述べる RIVER ACE 60 L, RIVER ACE 70 L および RIVER ACE K-0 L はこうした背景から開発された当社の低温用調質高張力鋼板である。

RIVER ACE 60 L は 60 kg/mm², RIVER ACE 70 L は 70 kg/mm², RIVER ACE K-0L は 80 kg/mm² 級であり、すでに日本溶接協会低温構造用鋼板材質判定基準（設計応力と最低使用温度、板厚などの条件より V ノッチシャルピー衝撃試験を行ない、鋼板の低温特性を判定する）にもとづいて表 I のように G 種では -50° ～ -90°C, A 種では -20° ～ -60°C までの鋼種承認をえている。

したがってプロパンや炭酸ガス、エチレンなど

* 鋼材技術部神戸鋼材技術室課長（現水島製鉄所厚板管理課長）

** 鋼材技術部東京鋼材技術室課長（現神戸鋼材技術室課長）

表 1 WES 承認条件 (°C)

鋼 種	降 伏 点 記 号	G 種					A 種				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
		t ≤ 13	13 < t ≤ 20	20 < t ≤ 26	26 < t ≤ 32	32 < t ≤ 40	t ≤ 13	13 < t ≤ 20	20 < t ≤ 26	26 < t ≤ 32	32 < t ≤ 40
RIVER ACE 60L	LT50	-80	-80	-80	-70	-60	-50	-50	-50	-40	-20
RIVER ACE 70L	LT63	-90	-80	-80	-70	-70	-60	-50	-50	-40	-40
RIVER ACE K-0L	LT70	-60	-60	-50	-50	-50	-40	-40	-30	-30	-30

G 種：ごく短かい脆性亀裂ならばその伝播を阻止できる性能が要求される場合

A 種：万一事故が発生しても脆性亀裂の伝播を阻止できる特殊な性能が要求される場合

I～V：板厚区分

t：板厚 (mm)

の半加圧、半冷凍の貯槽容器や寒冷地での大型構造物などに使用される鋼材に適している。以下にこれら低温用調質高張力鋼板の機械的性質、溶接性などについて紹介する。

2. 母材の性質

このシリーズは、低合金系調質高張力鋼をもとに、低温特性をさらに改善するため適量の元素を添加した細粒キルド鋼で、成分系としては RIVER ACE 60L は Ni-Mo-V 系、RIVER ACE 70L は Ni-Cr-Mo-V-B 系、RIVER ACE K-0L は Ni-Cr-Mo-V-B 系であり、溶接構造用高張力鋼板 RIVER ACE 60, RIVER ACE 70, RIVER ACE K-0 と異なる点は Ni-Mo-V の量的勘案を

はかっている点にある。したがって添加元素と調質による焼もどしマルテンサイト組織のため、非常にすぐれた低温切欠靱性を持っている。

また圧延後に、焼入れ焼もどしという調質処理工程をとし、同一成分の非調質鋼よりも高い降伏点と高い強度をもち、同一強度で比較すると炭素当量が低くなり溶接性は良い。

2.1 化学 成分

RIVER ACE L Series 供試材の化学成分を表 2 にしめす。

これらの化学成分は、引張強さ、低温靱性、溶接性、製造原価、などを考えながら、実験的にその最大公約数を求めたものであるが、図 1 に概念的に示したように調質鋼の強度と靱性、靱性と炭

表 2 化学成分 (wt. %)

鋼 種	板 厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	B	Ceq*
RIVER ACE 60L	26	0.13	0.40	1.16	0.016	0.006	0.06	0.50	0.06	0.13	0.021	0.025	—	0.398
"	32	0.12	0.36	1.37	0.012	0.007	0.04	0.86	0.04	0.13	0.017	0.051	—	0.426
"	40	0.14	0.38	1.22	0.013	0.008	0.07	0.52	0.06	0.14	0.020	0.028	—	0.420
RIVER ACE 70L	12	0.13	0.27	1.14	0.016	0.008	0.24	0.66	0.30	0.24	0.028	0.020	—	0.467
"	25	0.15	0.29	1.12	0.016	0.006	0.24	0.80	0.40	0.27	0.027	0.022	0.0028	0.515
"	40	0.13	0.31	1.17	0.016	0.009	0.23	0.93	0.48	0.33	0.028	0.020	0.0031	0.542
RIVER ACE K-0L	25	0.14	0.31	1.02	0.013	0.010	0.25	0.85	0.55	0.46	0.080	0.021	0.0035	0.475
"	35	0.15	0.28	0.90	0.011	0.012	0.14	0.81	0.49	0.43	0.060	0.027	0.0034	0.532
"	50	0.16	0.28	0.88	0.009	0.010	0.24	1.00	0.58	0.53	0.050	0.024	0.0035	0.595

* $Ceq = C + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{24}Si + \frac{1}{40}Ni + \frac{1}{6}Cr + \frac{1}{4}Mo + \frac{1}{4}V$

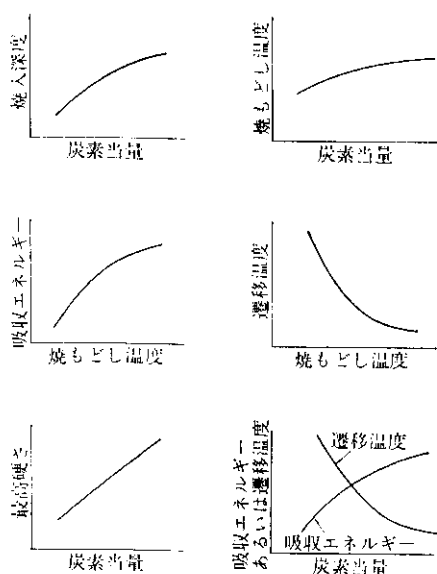


図 1 化学成分—機械的性質の概念図

素当量(Ceq)の間には相反する性質があるため、Ni, Mo, V のように高価な合金元素を多量に使用する必要性があり、従来一般に使用されている鋼材とおもむきを異にする。

特に化学成分の中でNi, Mo, V 含有量が溶接構造用高張力鋼 RIVER ACE と異っている。すなわち RIVER ACE L シリーズでは

Ni……添加量を増やし、焼入性を良好にする
一方低温靱性の増大をはかり、さらに溶接熱影響部の靱性劣化を防止する

Mo……添加量を幾分高めとし、焼入性の改善をはかる一方焼もどし軟化抵抗性を増大させるとともに焼もどし脆性の防止を図る

V……焼入性および焼もどし抵抗の点から不可欠の添加元素であるが、靱性の点で問題があるので、焼入性、結晶粒調整、焼もどし軟化抵抗性に対する最小必要量にとどめ

表 3 引張および曲げ試験結果

鋼 種	板 厚 (mm)	方 向	引 張 試 験					曲げ試験		焼もどし 温度 (°C)
			試験片 採取位置	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏比 (%)	伸 び (%)	180° R	判 定	
RIVER ACE 60L	26	L	JIS 4 号 1/4t	57.5	67.2	86	31	1.5t	良	660
"	"	C	"	57.7	66.2	87	28	"	"	
"	32	L	"	58.1	66.6	87	29	1.5t	"	670
"	"	C	"	54.8	66.1	83	31	"	"	
"	40	L	"	58.0	67.1	86	29	1.5t	"	640
"	"	C	"	56.2	66.5	85	28	"	"	
RIVER ACE 70L	12	L	JIS 5 号	69.7	75.7	92	30	1.0t	良	700
12	"	C	"	67.8	74.7	91	29	"	"	
"	25	L	JIS 4 号 1/4t	64.7	74.0	89	28	1.0t	"	670
25	"	C	"	64.2	73.8	87	27	"	"	
"	40	L	"	71.4	79.2	90	25	1.5t	"	670
40	"	C	"	70.7	78.1	91	25	"	"	
RIVER ACE K-0L	25	L	JIS 4 号 1/4t	77.7	84.9	92	23	1.0t	良	660
"	"	C	"	78.7	85.2	92	21	"	"	
"	35	L	"	76.5	83.7	91	24	1.5t	"	670
"	"	C	"	74.0	81.6	90	23	"	"	
"	50	L	"	83.9	89.1	94	24	2.0t	"	670
"	"	C	"	83.9	89.1	94	24	"	"	

表 4 各種シャルピー試験結果

鋼 種	板厚 (mm)	方向	2 mm V ノッチ								5 mm U ノッチ プレスノッチ				
			vT _E	vT _S	vT ₁₅	vE ₀	vE ₂₀	vE ₄₀	vE ₆₀	vE ₈₀	vE ₈₀	uT ₁₅	uT _d	pT _E	pT _C
			(°C)	(°C)	(°C)	(kg・m)	(kg・m)	(kg・m)	(kg・m)	(kg・m)	(kg・m)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
RIVER ACE 60L	26	L	-70	-71	- 92	—	20.0	18.3	14.4	3.7	1.6	-140	-140	-55	-55
"	"	C	-67	-65	- 88	—	16.2	14.9	11.0	3.0	1.3	-117	-140	-50	-50
"	32	L	-84	-83	-101	—	23.2	23.2	20.6	13.6	2.2	-140	-140	-70	-70
"	"	C	-77	-80	-104	—	20.4	19.6	17.3	9.2	2.8	-140	-140	-65	-65
"	40	L	-66	-64	- 81	—	21.0	18.0	13.3	2.4	1.2	-130	-130	-45	-45
"	"	C	-62	-60	- 79	—	18.0	16.1	10.1	2.0	1.1	-130	-130	-45	-45
RIVER ACE 70L	12	L	-80	-84	-124	21.2	21.5	21.5	21.0	10.6	3.8	<-120	-135	-77	-83
"	"	C	-78	-73	-108	16.6	16.8	16.5	16.2	7.9	2.5	"	-135	-67	-71
"	25	L	-65	-73	-126	14.3	14.4	13.7	7.9	5.6	3.9	"	-135	-64	-74
"	"	C	-67	-77	-123	12.8	12.8	10.5	7.3	5.0	3.4	"	-135	-63	-71
"	40	L	-63	-74	-129	11.0	10.5	9.0	5.8	4.4	3.3	"	-135	-67	-74
"	"	C	-67	-74	-124	9.8	9.7	8.6	5.5	4.2	3.2	"	-135	-65	-71
RIVER ACE K-0L	50	L	-94	-101	-153	14.1	14.2	14.1	13.8	11.8	5.8	<-140	<-140	-88	-92
"	"	C	-90	- 97	-150	13.3	13.2	13.5	12.9	10.6	4.8	"	"	-87	-92

試験片は板厚の1/2より採取。

ている。

2.2 引張強さおよび曲げ特性

一般に調質鋼は軟鋼や非調質鋼に比べて降伏比（降伏点／引張強さ×100%）が高いのが特徴で、80～95%に達する。低温用調質高張力鋼についても同様であり、最近のように圧力容器の設計圧力を降伏点の1/2～1/2.5にとる場合は、板厚の減少に有利である。また低温用調質高張力鋼は伸びや曲げ特性についても調質鋼と変らない。

表3に供試材の引張と曲げ試験結果をしめす。

2.3 靱性試験（小型試験）

2.3.1 シャルピー衝撃試験

一般に溶接構造物は、溶接部に材質または形状的に種々の欠陥があり、また溶接による残留応力もかなりの大きさに達する場合がある。このような状態のもとでは、低応力で切欠より亀裂が発生、伝播する破壊、いわゆる脆性破壊の危険性が

高く、しかも低温では靱性が劣化するため低温用高張力鋼板には低温でもすぐれた切欠靱性をもち、たとえ脆性亀裂が発生したとしても、それを阻止するような靱性が必要である。

各供試材について切欠靱性を調べるため、板厚の1/4、1/2の位置より圧延方向に平行方向、直角方向にサンプルを採取し、2mm V、5mm U、プレスノッチのシャルピー衝撃試験を行なった。

その代表結果を表4に、また2mm V ノッチシャルピーの遷移温度曲線図を図2～図7に示す。

シャルピー衝撃試験の結果を総合的にみると、各供試鋼の vT_S 、 uT_d および pT_C は以下に示した範囲内にあり、低温での靱性がすぐれていることがわかる。

RIVER ACE 60 L $vT_S = -60 \sim -80^\circ\text{C}$,

$uT_d < -130^\circ\text{C}$, $pT_C = -45 \sim -70^\circ\text{C}$

RIVER ACE 70 L $vT_S = -74 \sim -84^\circ\text{C}$,

$uT_d < -135^\circ\text{C}$, $pT_C = -71 \sim -83^\circ\text{C}$

RIVER ACE K-0L $vT_S = -97 \sim -101^\circ\text{C}$,

$uT_d < -140^\circ\text{C}$, $pT_C = -90^\circ\text{C}$

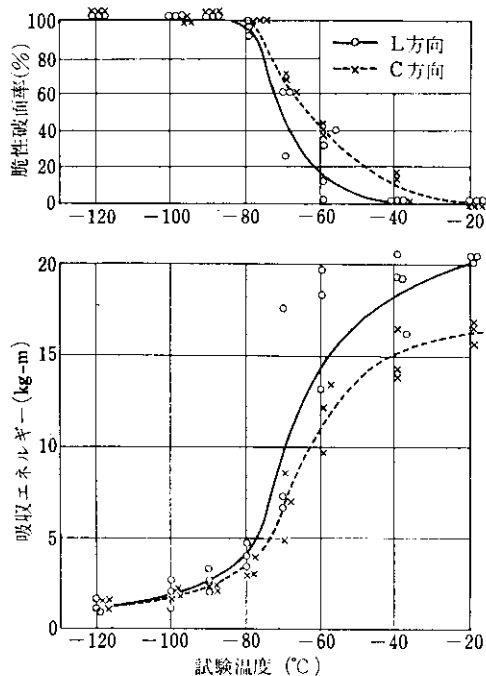


図 2 RIVER ACE 60L 26mm 1/4t の
2mm V ノッチシャルビー衝撃試験結果

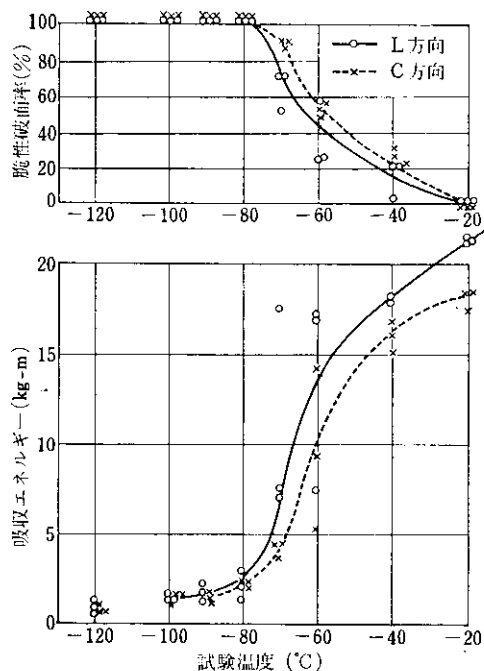


図 3 RIVER ACE 60L 40mm 1/4t の
2mm V ノッチシャルビー衝撃試験結果

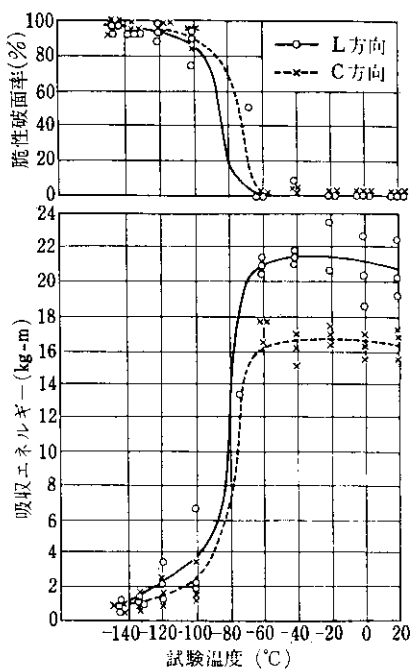


図 4 RIVER ACE 70L 12mm の
2mm V ノッチシャルビー衝撃試験結果

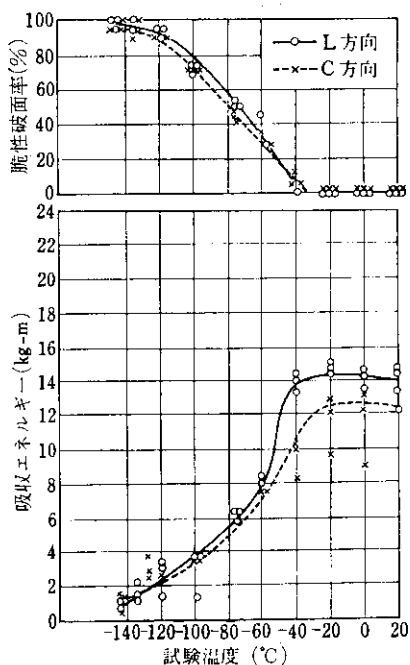


図 5 RIVER ACE 70L 25mm 1/4t の
2mm V ノッチシャルビー衝撃試験結果

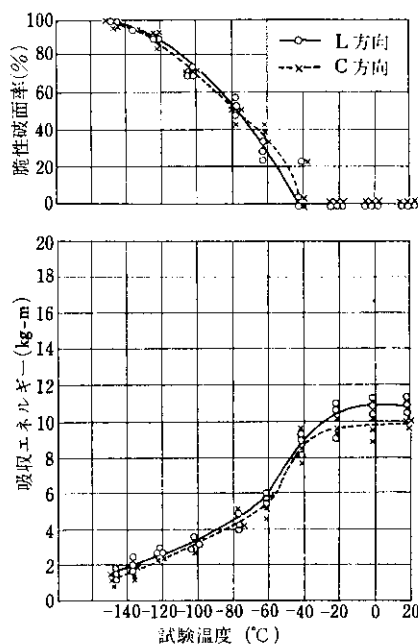


図 6 RIVER ACE 70 L 40 mm $\frac{1}{4}$ t の
2 mm V ノッチシャルビー衝撃試験結果

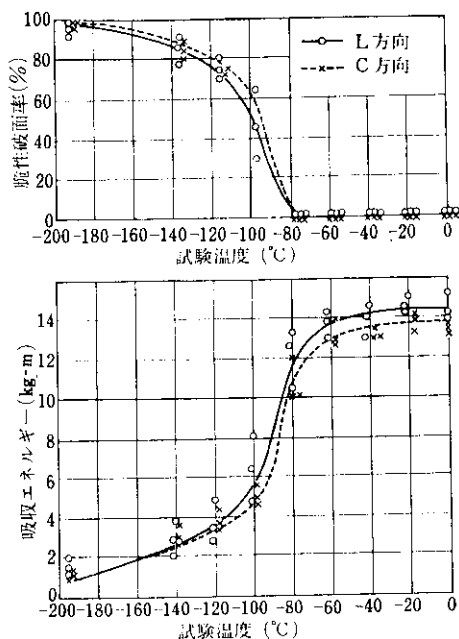


図 7 RIVER ACE K-0L 50 mm $\frac{1}{4}$ t の
2 mm V ノッチシャルビー衝撃試験結果

2.3.2 NRL 落重試験

脆性亀裂の発生特性を調べ、脆性破壊の限界温度 (NDT) を求めるため、供試材より圧延方向に試験片を採取、図 8 に示すクラック発生ビードを圧延面におき、ノッチをつけたのち種々の温度に冷却して、ビードの裏側に重錘を高所より落下させ、クラックの発生、伝播を観察した。

試験条件を表 5 に、結果を表 6 に示す。

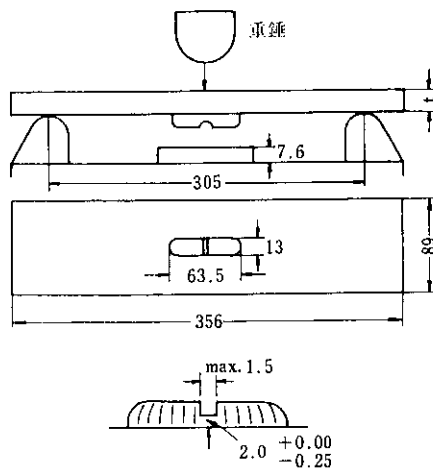


図 8 NRL 落重試験片概要

表 5 NRL落重試験条件

鋼 種	スパン長さ (mm)	たわみ止め (mm)	重錘重量 (kg)	落下高さ (m)
RIVER ACE 60L	305	7.6	45	3.0
" 70L	305	7.6	59	3.0
" K-0L	305	7.6	45	3.6

表 6 NRL落重試験結果

鋼 種	板 厚 (mm)	試 験 温 度 (°C)								NDT
		-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70	-75	
RIVER ACE 60L	26		○	○	①	①	●	●		-60
			○	○	①	●	●	●		
			○	○	①	●	●	●		
RIVER ACE 60L	32			○	○	○	①	●	●	-65
				○	○	○	●	●	●	
				○	○	○	●	●	●	
RIVER ACE 60L	40	○	○	①	●					-50
		○	○	●	●					
		○	○	●	●					
RIVER ACE 70L	12					①	①	●	●	-70
						①	①	●	●	
						①	①	●	●	
RIVER ACE 70L	25				○	①	●	●		-60
					①	●	●	●		
					①	●	●	●		
RIVER ACE 70L	40			○	○	①	●	●	●	-65
				○	○	○	●	●	●	
				○	○	○	●	●	●	
RIVER ACE K-0L	50				○	○	①	●	●	-65
					○	○	●	●	●	

- 亀裂なし
 ① 一部亀裂発生
 ● 片側破断
 ● 両面破断

NDT 温度は RIVER ACE 60 L 40 mm の
 -50°Cを除いて、-60°~-70°C である。

2.3.3 ESSO 試験

脆性亀裂停止特性を知るため図 9 の大型試験片を作成し調査した。

試験は試験片全体に引張応力を与え、所定の温度に冷却した後、亀裂をもつ切欠部にクサビを打ち込み、亀裂を発生伝播させるもので、引張応力と温度（平坦温度と温度勾配型がある）を変化させ亀裂伝播の限界曲線を求めた。結果を表 7 と図 10 に示す。

板厚の影響がはっきり示されているが、低温靱

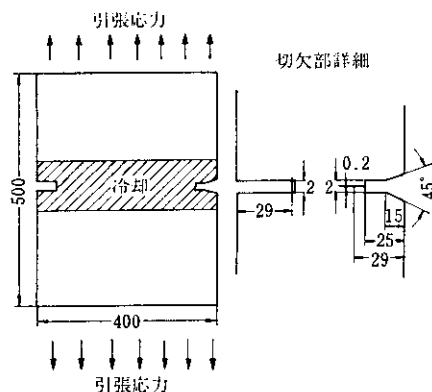


図 9 ESSO 試験片概要

表 7 ESSO試験遷移温度

鋼 種	板厚 (mm)	亀裂の発生しない温度	
		$\frac{\sigma_y}{2} T_{nl}(^{\circ}\text{C})$	$\frac{\sigma_y}{3} T_{nl}(^{\circ}\text{C})$
RIVER ACE 70L	12	-112	-129
	25	-132	-155
	40	- 81	- 82
RIVER ACE K-OL	25	-145	-146
	35	-106	-110
	50	- 33	- 42

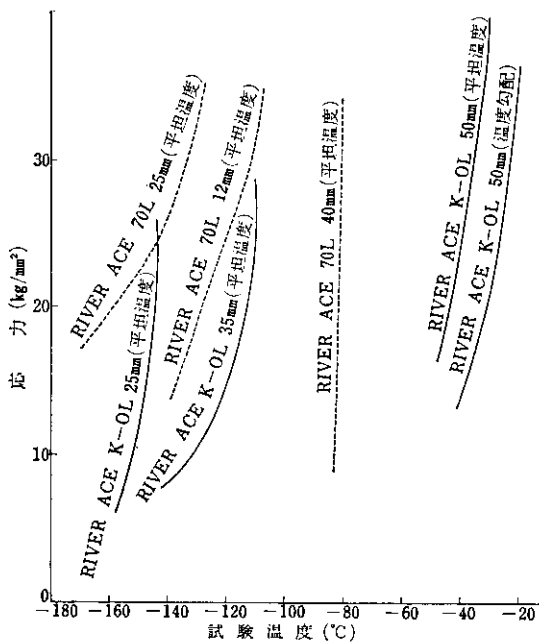


図 10 ESSO 試験結果

性にすぐれている。

次に説明する二重引張試験結果からも相当の低温までの使用が安全であることが立証されている。

2.3.4 二重引張試験

ESSO 試験と同じく脆性亀裂の伝播停止特性を

調べる目的で、図11の試験片を用い温度勾配型と一様温度型の二重引張試験を行ない、亀裂伝播の限界条件を求めた。

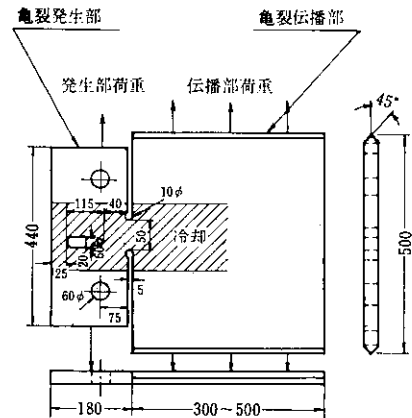


図 11 二重引張試験片概要

得られた結果から脆性亀裂伝播抵抗値 (K_{IC} 値) を計算し、絶対温度の逆数との関係を求め、さらに亀裂長さを WES 低温構造用判定基準の $C=10$ mm, $C=100$ mmとしたときの応力と脆性亀裂停止温度との曲線を作成した。結果を図12、図13と表 8 に示す。なお表 8 には ESSO 試験から求めた K_{IC} 値と停止温度の関係(図14)から求めた結果も含めた。

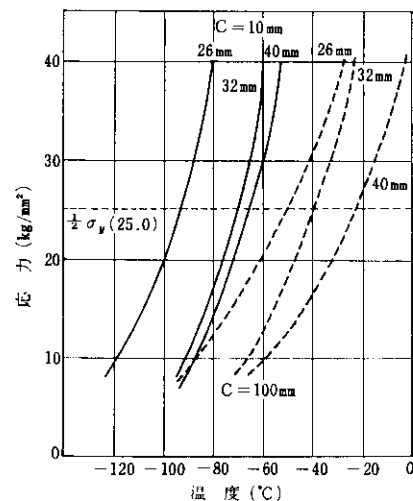


図 12 RIVER ACE 60L の二重引張試験結果

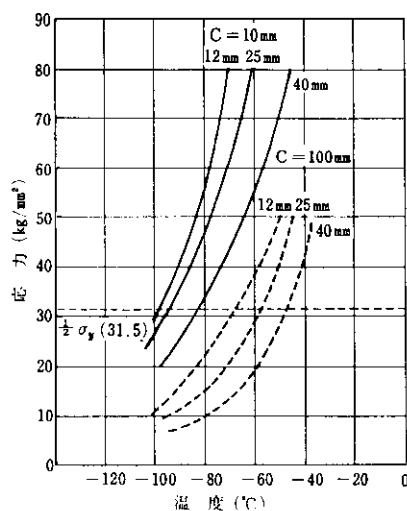


図 13 RIVER ACE 70L の二重引張試験結果

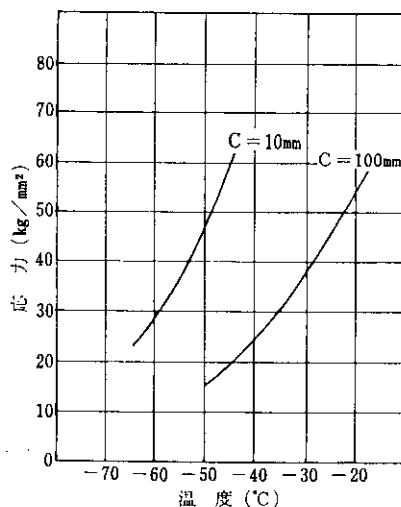
図 14 RIVER ACE K-0L (50 mm) の ESSO 試験から求めた Kc 値と停止温度の関係

表 8 二重引張試験結果

鋼 種	板 厚 (mm)	方 向	C=100mmとしたときの $\sigma_y/2$ に対応する亀裂停止温度 * (°C)	C=10mmとしたときの $\sigma_y/2$ に対応する亀裂停止温度 ** (°C)
RIVER ACE 60L	26	L	-51	-92
	32	L	-43	-71
	40	L	-23	-64
RIVER ACE 70L	12	L	-65	-96
	25	L	-56	-93
	"	C	-51	-84
	40	L	-41	-80
RIVER ACE K-0 L	50	L	-31	-56

* WES A種相当

** WES G種相当

3. 溶 接 性

低温用調質高張力鋼の溶接性は、溶接構造用調質高張力鋼のそれと特に異なることはない。溶接性をしめす目安として、溶接割れ感受性を知るため、溶接熱影響部の硬化性と溶接ルート割れの阻止温度を調べ、さらに溶接熱影響部の延性、溶接部および母材の切欠靱性を調査した。

3.1 溶接硬化性試験

溶接熱影響部の硬化性を調べるため、テーパ付きの試験片（図15に示す）に溶接し、溶接部の冷却速度と硬さの関係を求めた。結果を図16～図18に示す。各供試鋼の540°Cにおけるボンドの冷却速度が28°C/secに相当する硬さの比較結果を表9に示す。また図19は、最高硬さを板厚との関係でまとめたもので、強度が高く、板厚の厚いも

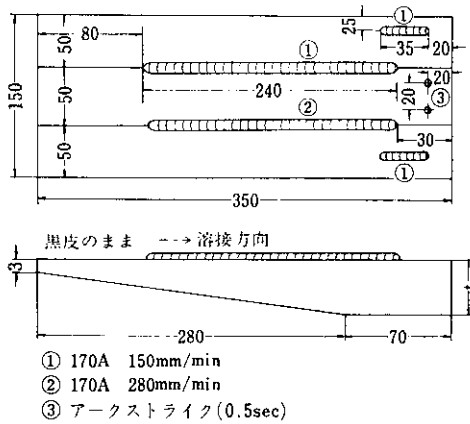


図 15 テーパー硬さ試験片

表 9 テーパー硬さ試験結果

鋼 種	板厚 (mm)	540°Cにおけるボンドの 冷却速度が、28°C/secに 相当する硬さ (Hv)
RIVER ACE 60L	26	342
	32	375
	40	361
RIVER ACE 70L	12	385
	25	415
	40	413
RIVER ACE K-0L	50	438

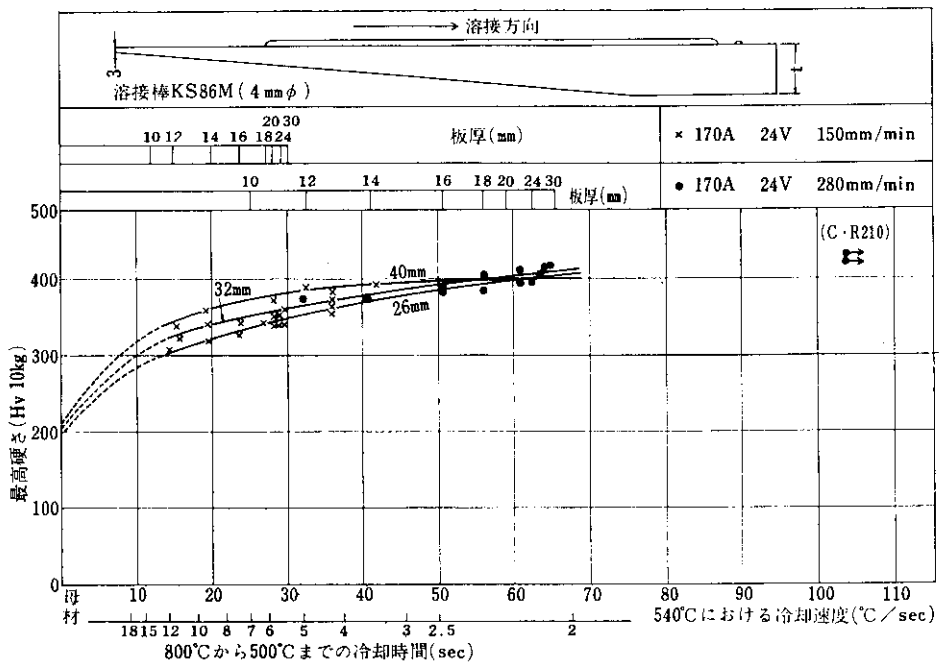


図 16 RIVER ACE 60 L のテーパー硬さ試験結果

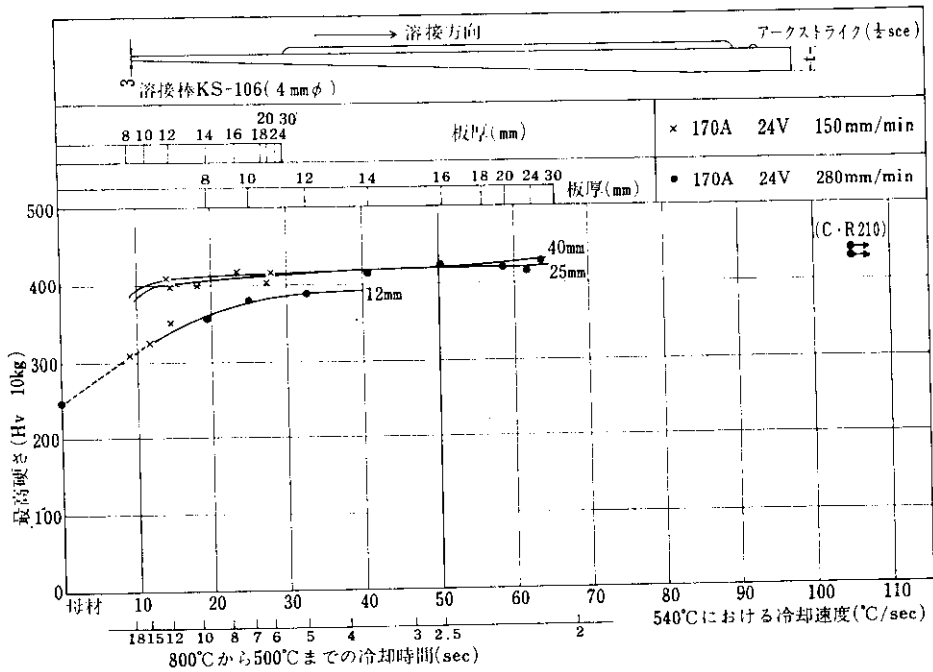


図 17 RIVER ACE 70L のテーパー硬さ試験結果

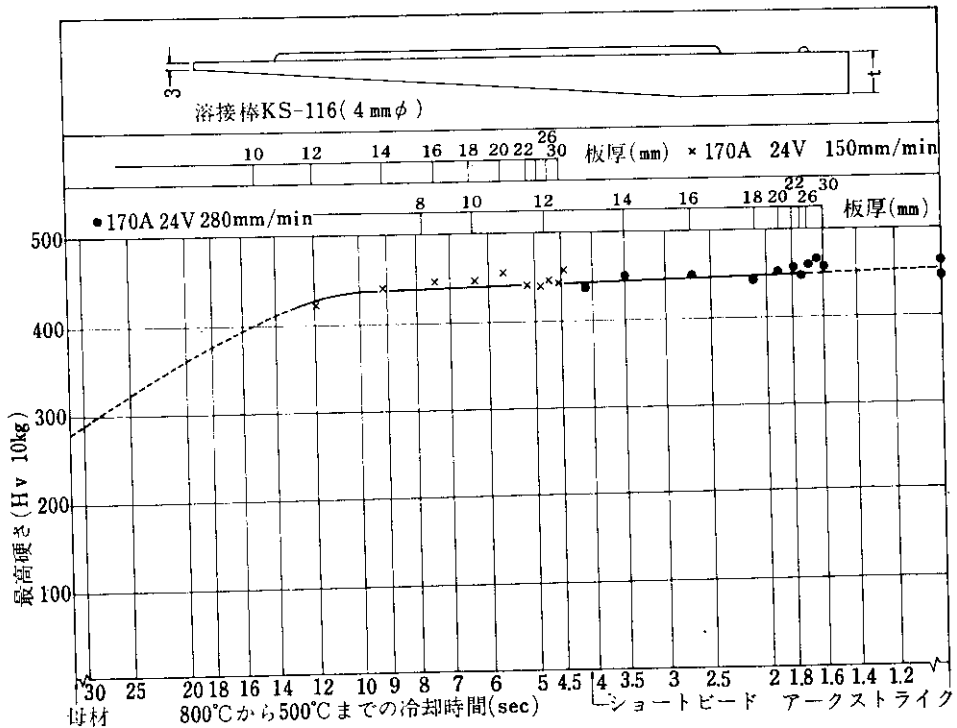


図 18 RIVER ACE K-0L のテーパー硬さ試験結果

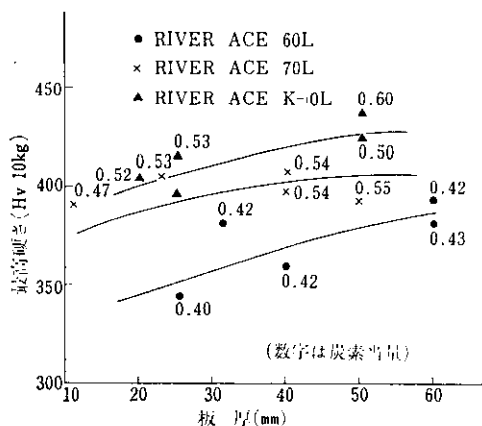


図 19 板厚と最高硬さの関係

のほど最高硬さが高くなるので、溶接にあたっては予熱などの考慮が必要となる。

3.2 溶接割れ試験

溶接熱影響部の割れ感受性を判定するため、斜

めY開先拘束割れ試験を行なった。試験は図20に示すような試験片をもちい、溶接棒は水素の影響を除くため所定の条件で使用前に乾燥を行なったものを使用した。

溶接条件は表10に示した。鋼種によって予熱温度範囲を変化させた。結果の一例を図21に示す。これまでに行なわれた多くの試験データをもとに、ルート割れ阻止に必要な予熱温度と板厚との関係を見ると、図22のようになり、炭素当量との関係はあるが、ルート割れ防止に必要な予熱温度

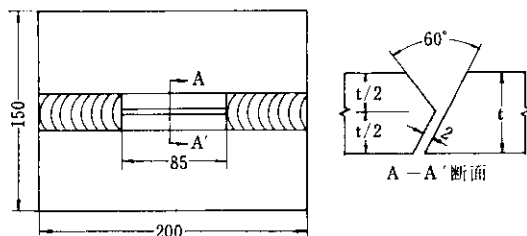


図 20 斜めY開先拘束割れ試験片

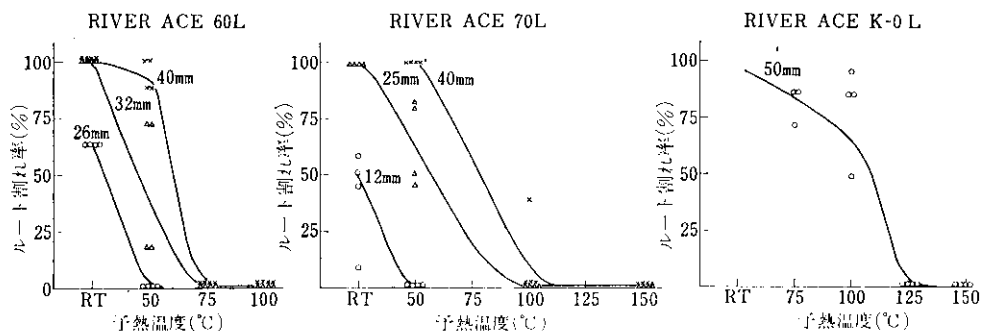


図 21 斜めY開先拘束ワレ試験結果

表 10 斜めY開先拘束割れ試験の溶接条件

鋼 種	RIVER ACE 60L	RIVER ACE 70L	RIVER ACE K-0L
予 熱 温 度	0°~150°C	0°~200°C	0°~200°C
溶 接 棒	KS86M (4 mmφ)	KS-106 (4 mmφ)	KS-116 (4 mmφ)
溶 接 電 流	170A		
溶 接 速 度	150mm/min		

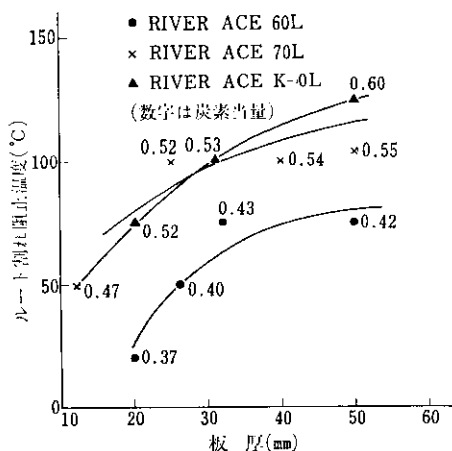


図 22 ルート割れ阻止温度と板厚の関係

表 11 ルート割れ阻止温度と板厚の関係

鋼 種	板 厚 (mm)	12	25	38	50
		R. T.			
RIVER ACE 60L			50	75	75
" 70L		50	75	100	125
" K-0L		50	100	125	150

のためやすは表11のようになる。

3.3 溶接ビード曲げ試験

溶接部の延性および靱性を判定するため、日本溶接協会では、ビード曲げ試験を提唱し、溶接熱影響部にきれつ（溶接止端より約 2 mm）の生ずるまでの曲り角度が、図23に示す曲線以上でなければならないと規定している。普通、試験機の容量から板厚の厚いものは、溶接ビードをおいた後

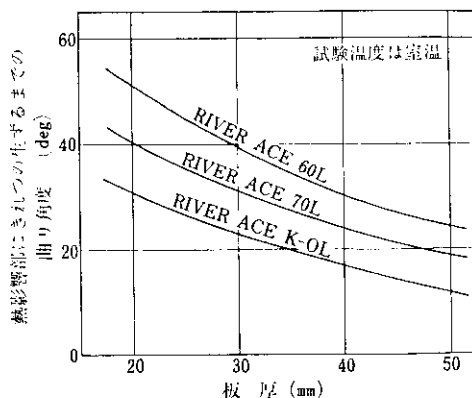


図 23 ビード曲げ試験における熱影響部にきれつの生ずるまでの曲り角度の板厚に対する規定値

板厚を削減して試験を行なっている。実験結果を示すと表12のようになる。規格値は十分満足しているが、強度の高い鋼種ほど曲り角度は小さくなっている。

3.4 手溶接継手のシャルピー衝撃試験結果

溶接金属部から熱影響部、母材にいたる各位置の切欠靱性の変化を調べるため手溶接継手のシャルピー衝撃試験を行なった。一般に使用されるV型開先を用い、RIVER ACE 60Lの板厚 40 mm および RIVER ACE K-0Lの板厚 50 mm について行なった。表13に溶接条件を示す。応力除去焼きなましは 625°C×1 hr/25 mm で行なっている。なおシャルピー衝撃試験片のノッチ位置は、図24に示したように溶接金属から熱影響部、母材原質部に至る5個所とした。実験結果を表14、15

表 12 ビード曲げ試験結果

鋼 種	板 厚 (mm)	削減板厚 (mm)	熱影響部にきれつの生ずるまでの曲り角度 (deg)	
			WESの規定角度	実 験 結 果
RIVER ACE 60L	40	25	45	120 以上
" 70L	40	"	35	48, 52
" K-0L	50	"	26 以上	41, 50

表 13 溶接条件と衝撃試験片採取位置

鋼 種	板厚 (mm)	溶 接 棒	予熱層間 温度(°C)	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (mm/min)	試験片採取位置 (t : 板厚)
RIVER ACE 60L	40	被覆アーク KS86M	75 以下	230~240	—	—	1/4 t
RIVER ACE K-0L	50	被覆アーク KS116	150以下	170	23	150	1/4 t

表 14 RIVER ACE 60L 40mm の溶接部シャルピー衝撃試験結果

試験温度 (°C)	処 理	母 材		溶接金属		ボ ン ド		熱影響部境界		熱影響部境界 から 2 mm		熱影響部境界 から 4 mm	
		吸収エネルギー	脆性破面率	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C
		E (kg·m)	C (%)	(kg·m)	(%)	(kg·m)	(%)	(kg·m)	(%)	(kg·m)	(%)	(kg·m)	(%)
-40	A.W	19.1	13	8.9	35	8.2	42	17.0	22	17.8	18	19.7	5
	S.R	—	—	14.0	27	8.6	33	12.2	38	15.8	26	15.6	32
-60	A.W	13.7	34	4.9	55	5.9	57	9.2	57	7.7	67	9.2	57
	S.R	—	—	9.0	45	10.6	40	13.0	43	7.0	68	9.4	55

A.W : 溶接のまま

S.R : 応力除去焼なまし後

表 15 RIVER ACE K-0L 50mm の溶接部シャルピー衝撃試験結果

ノ ッ チ 位 置	処 理	vT _E (°C)	vT _S (°C)	vT ₁₅ (°C)	E ₀ (kg·m)
母 材	A.W	-94	-101	-153	14.1
	S.R	-92	-101	-137	12.8
溶 接 金 属	A.W	-36	-50	-84	11.4
	S.R	-27	-15	-64	8.5
ボ ン ド	A.W	-60	-60	-108	10.9
	S.R	-31	-33	-79	9.5
熱影響部境界	A.W	-88	-85	-118	10.8
	S.R	-66	-67	-111	10.8
熱影響部境界から 2 mm	A.W	-81	-86	-102	10.4
	S.R	-74	-74	-112	11.1
熱影響部境界から 4 mm	A.W	-74	-70	-107	11.8
	S.R	-62	-66	-115	13.2

A.W : 溶接のまま

S.R : 応力除去焼なまし後

表 16 応力除去焼きなまし温度と時間

保 持 温 度	保 持 時 間	備 考
600°C	板厚25mmにつき 1 hr 以上	この表にない中間の温度に対する保持時間は比例によってきめる
570	" 2 "	
540	" 3 "	
510	" 5 "	
480	" 10 "	

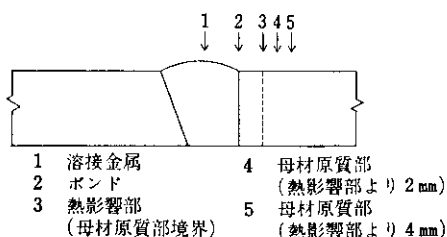


図 24 溶接部シャルピー衝撃試験片のノッチ位置

に示す。

ボンド部の脆化は両鋼種に見られる。RIVER ACE 60L の場合、応力除去焼きなましにより、靱性はかなり回復するが、RIVER ACE K-0L は応力除去焼きなましにより脆化を示す。したがって応力除去焼きなまし温度・時間の選定と後に述べる溶接入熱量をどの程度にするかが重要な問題となってくる。参考のために日本高圧容器技術研究会応力除去委員会制定の応力除去焼きなまし

の保持温度および保持時間を表16に示す。

4. 加工性試験

4.1 焼きなまし試験

溶接のままの構造物には、溶接による残留応力が存在する。この応力は脆性破壊発生・伝播に大きな影響をおよぼすので、応力除去は構造物の安全性からも、設計応力面からも有利になる。調質鋼の場合応力除去焼きなまし温度は強度低下を防ぐうえから焼もどし温度による制限をうけ、少なくとも鋼板の焼もどし温度より 30~50°C 低い温度でなければならない。また焼きなまし後の冷却速度の遅い場合には、炭化物などの析出による靱性の劣化があるので、前もってこれらの特性を調査しておく必要がある。

表 17 焼きなまし試験結果 RIVER ACE 60L および RIVER ACE K-0L

	板厚 (mm)	焼もどし 温度 (°C)	焼きなまし 温度 (°C)	引 張 試 験			衝 撃 試 験				
				降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	vT _B (°C)	vT _S (°C)	vT ₁₅ (°C)	E-20 (kg·m)	E-60 (kg·m)
RIVER ACE 60L	40	640	調質のまま	57.2	66.0	18	-66	-64	-81	21.0	18.0
			575	57.2	65.8	18	-70	-65	-76	20.0	15.0
			600	57.6	66.2	22	-69	-64	-76	19.5	14.3
			625	54.2	63.7	20	-71	-66	-79	20.4	15.5
RIVER ACE K-0L	50	670	調質のまま	83.9	89.1	24	-94	-101	-153	14.2	13.8
			575	82.9	89.0	24	-89	-95	-140	13.1	12.0
			600	83.2	89.0	24	-92	-97	-133	13.4	11.6
			625	82.7	88.5	24	-92	-100	-137	13.3	11.6

焼きなまし時間：1 hr/25mm

まず代表的な RIVER ACE 60 L の板厚 40 mm と RIVER ACE K-0 L の板厚 50 mm について焼きなまし温度による母材の強度と靱性の変化を調査した。結果を表17に示す。

結果的には著るしい変化を見出し得ないが、さらに長時間、高温度の焼きなましによる靱性の劣化や3・4で述べたように、特に溶接熱影響部の焼きなましによる靱性劣化がはなはだしいことなどを十分考慮する必要がある。

4.2 歪時効試験

鋼板は構造物に製作される途中、なんらかの冷間加工を受けるが、この場合切欠靱性が劣化する傾向がある。この性質は鋼種によって感受性が異なるため、あらかじめその程度を知っておく必要がある。板厚 40 mm の RIVER ACE 60 L および 50 mm の RIVER ACE K-0 L について図 25 のような引張試験片を作成し冷間引張による 2 % および 5 % の予歪を与え、さらに 250°C×1 hr の時効処理をほどこした後、試験片を切り出して

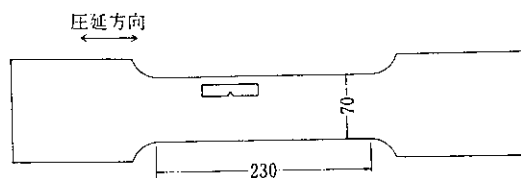


図 25 歪時効試験片

2 mm V ノッチシャルピー試験片を行なった。結果を表18に示す。

歪量の増加につれて RIVER ACE 60 L で vT_s は約 10°C 高温側にづれるが、なお -50°C 前後であり、また RIVER ACE K-0 L も vT_s は約 10°C の劣化するが -90°C 付近でありいずれも低温靱性は非常に良好である。

4.3 溶接熱入量と強度、靱性の関係

一般に溶接による熱影響部の強度、靱性は Si-Mn 系を主体とする 60 kg/mm² 級高張力鋼よりも、Ni, Cr, Mo, V の添加されている 70 kg/mm² 級、80 kg/mm² 級高張力鋼が影響を大きく受け

表 18 歪時効試験結果

鋼 種	板 厚 (mm)	予歪量 (%)	vT_E (°C)	vT_s (°C)	vT_{15} (°C)	E_{-20} (kg·m)	E_{-40} (kg·m)	E_{-60} (kg·m)
RIVER ACE 60 L	40	0	-66	-64	-81	21.0	18.0	13.3
		2	-62	-56	-73	20.6	19.6	11.1
		5	-58	-52	-71	20.6	19.3	8.6
RIVER ACE K-0 L	50	0	-94	-101	-153	14.2	14.1	13.8
		2	-84	-92	-133	12.4	12.4	13.9
		5	-80	-90	-123	11.8	11.2	10.0

表 19 広幅引張試験による強度と溶接熱入量の関係

鋼 種	板 厚 (mm)	入 熱 量 (Joule/cm)	引張強さ (kg/mm ²)	破断位置	備 考
RIVER ACE K-0 L	50	35,200	86.2	母 材	厚 25mmに削減した
		38,400	86.3	溶接金属	幅 100mmに統一した
		44,800	84.1	熱影響部	
		51,000	84.1	熱影響部	

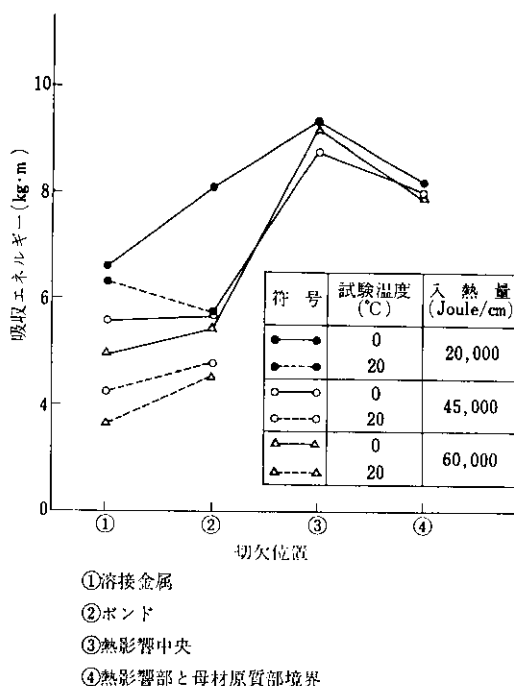


図 26 RIVER ACE K-0L の入熱量と靱性の関係

るので入熱量の制約が課せられている。

板厚 50 mm の RIVER ACE K-0L について、溶接入熱量を変えて行なった溶接継手の広幅引張試験結果を表19に示す。また同じ材料につい

て行なった溶接継手各切欠位置における衝撃値と溶接入熱量との関係を図26に示す。これらの結果からわかるように 50 mm の RIVER ACE K-0L 最大入熱量は 45,000 Joule/cm である。他の実験結果ともあわせて総合的に考えると、特に高压容器、重要構造物を対象とする場合当社低温用高張力鋼板の溶接最大入熱量は RIVER ACE 60L では 60,000 Joule/cm, RIVER ACE 70L では 50,000 Joule/cm, RIVER ACE K-0Lでは45,000 Joule/cm と考えられる。

5. む す び

低温用調質高張力鋼は、調質高張力鋼の強度、降伏比が高く、溶接性、靱性がすぐれているという特色を生かし、低温切欠靱性をさらに改善したものである。したがって加圧式、または半加圧半冷凍方式の低温圧力容器類、低温で使用される溶接構造物など設計上低温での特性を要求される用途に対し、溶接性の良い材料として利用されている。

溶接施工にあたっては、その溶接材料の選択はもちろんのこと、施工上必要な準備工作は十分とらねばならない。