
溶接構造用高耐食性フェライト系ステンレス鋼, RIVER LITE 434 LN-2

Weldable and High Corrosion Resistant Ferritic Stainless Steel, RIVER LITE 434 LN-2,
for Structural Use

吉岡 啓一(Keiichi Yoshioka) 玉置 克臣(Katsuomi Tamaki) 篠原 忠広(Tadahiro
Shinohara) 木下 昇(Noboru Kinoshita) 堀内 唯義(Tadayoshi Horiuchi) 倉橋
速生(Hayao Kurahashi)

要旨：

溶接構造用フェライト系ステンレス鋼, R 434 LN-2 の化学成分的特徴は, じん性を著しく
高めるために当社の低 C, N 精錬技術である SS-VOD プロセスにより C, N をそれぞれ 20,
40 ppm まで低減し, また安定化元素として Nb と Al を添加した点にある。適正な溶接条
件により溶接部のじん性も確保されるので, 0℃以上の使用温度で約 12 mm 厚までの厚板
への適用が可能である。同鋼は耐孔食性に優れ, また応力腐食割れ感受性がないことから,
湿潤な腐食環境等の容器に適しており, 現在, 主として貯湯槽に使用されている。

Synopsis：

The characteristics of the weldable ferritic stainless steel, RIVER LITE 434 LN-2,
produced by SS-VOD process, are reviewed. In order to improve its toughness, C and N
contents of the steel have been reduced to extremely low levels and Nb and Al added.
The weld made under the suitable welding conditions also is superior in toughness.
Therefore, the steel plate up to about 12 mm in thickness for structural use above a
temperature 0℃ can be manufactured. Being excellent in pitting corrosion resistance
and free of stress corrosion cracking, the plates are suitable for the use as vessels in wet
corrosive environment and have mainly been applied to hot water reservoirs.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

溶接構造用高耐食性フェライト系ステンレス鋼, RIVER LITE 434 LN-2^{*1}

川崎製鉄技報
17 (1985) 3, 249-257

吉岡 啓一^{*2} 玉置 克臣^{*3} 篠原 忠広^{*4} 木下 昇^{*5} 堀内 唯義^{*6} 倉橋 速生^{*7}

Weldable and High Corrosion Resistant Ferritic Stainless Steel, RIVER LITE 434 LN-2, for Structural Use

Keiichi Yoshioka, Katsuomi Tamaki, Tadahiro Shinohara, Noboru Kinoshita,
Tadayoshi Horiuchi, Hayao Kurahashi

要旨

溶接構造用フェライト系ステンレス鋼, R 434 LN-2 の化学成分の特徴は, じん性を著しく高めるために当社の低 C, N 精錬技術である SS-VOD プロセスにより C, N をそれぞれ 20, 40 ppm まで低減し, また安定化元素として Nb と Al を添加した点にある。適正な溶接条件により溶接部のじん性も確保されるので, 0°C 以上の使用温度で約 12 mm 厚までの厚板への適用が可能である。同鋼は耐孔食性に優れ, また応力腐食割れ感受性がないことから, 湿潤な腐食環境等の容器に適しており, 現在, 主として貯湯槽に使用されている。

Synopsis:

The characteristics of the weldable ferritic stainless steel, RIVER LITE 434 LN-2, produced by SS-VOD process, are reviewed. In order to improve its toughness, C and N contents of the steel have been reduced to extremely low levels and Nb and Al added. The weld made under the suitable welding conditions also is superior in toughness. Therefore, the steel plate up to about 12 mm in thickness for structural use above a temperature 0°C can be manufactured.

Being excellent in pitting corrosion resistance and free of stress corrosion cracking, the plates are suitable for the use as vessels in wet corrosive environment and have mainly been applied to hot water reservoirs.

1 はじめに

低 C, N フェライト系ステンレス鋼である SUS 444 (18 Cr-2 Mo) 鋼は, SUS 304 および SUS 316 等で代表されるオーステナイト系ステンレス鋼で問題となる応力腐食割れ感受性がなく, 耐孔食性および耐隙間腐食性に優れている。また C, N 含有量が低いため薄板での溶接部の延性に優れているので, 現在主として温水環境での太陽熱集熱板および溶接薄肉鋼管等に使用されている。

しかし, フェライト系ステンレス鋼では板厚が厚くなると一般にじん性が不足するのに加え, 溶接熱影響部の結晶粒が粗大化しやすく, じん性が著しく低下する。じん性の改善に対しては鋼中の C, N の低減が有効であることが知られているが¹⁾, 溶接構造用厚板材料としては単に鋼中の C, N の低減のみでは十分でなく, その適用対象は薄板 (3 mm 以下) に限定されていた。

著者らは, 当社の画期的な極低 C, N 精錬技術である Strongly Stirred-Vacuum Oxygen Decarburization (SS-VOD) プロセス²⁾ の特徴を生かした極低 C, N 18Cr-2Mo 鋼のじん性および耐食性におよぼす化学成分の影響を検討し, 溶接部のじん性および耐食性に優れた R 434 LN-2 を開発し今日に至っている。ここでは, まずフェライト系ステンレス鋼のじん性におよぼす化学成分の影響についての実験室的検討経過について述べ, その結果をもとに開発された溶

接構造用フェライト系ステンレス鋼 R 434 LN-2 の特徴を紹介する。

2 化学成分の検討

高 Cr フェライト系ステンレス鋼のじん性および延性改善には鋼中の C, N の低減が有効であることが Binder ら³⁾ によって明らかにされているが, ここではまず中 Cr フェライト系ステンレス鋼のじん性におよぼす C, N 量の影響から検討した。

Fig. 1 は 3 mm 厚の 16Cr フェライト系ステンレス鋼の TIG 溶接部の溶接金属のじん性におよぼす C, N の影響を示す³⁾。C, N 量の低減とともにじん性が著しく向上することがわかる。

当社の C, N 低減精錬技術である SS-VOD プロセスでは, 16~20% Cr 鋼中の C, N 量をそれぞれ 20, 40 ppm まで低減することができる。そこで, 以後 C, N それぞれ 20 および 40 ppm の極低レベルに限定し, 以下 18Cr-2Mo 鋼のじん性について検討した。

Fig. 2 は 1000~1200°C で 10 min 保持後水冷した場合の 4 mm 厚の 18Cr-2Mo 鋼の 2 mm V ノッチシャルビー衝撃特性におよぼす熱処理温度の影響を示す³⁾。加熱温度が高くなるに従いじん性は低下する。このじん性低下は結晶粒の粗大化に起因するものと考えられるが, 溶接構造物での溶接熱影響部では 1200~1300°C の高温になるので, そこでのじん性の低下が問題となる。

*1 昭和60年5月24日原稿受付

*2 鉄鋼研究所薄板研究部ステンレス鋼研究室主任研究員 (課長)・工博

*3 鉄鋼研究所知多研究部主任研究員 (掛長)

*4 鉄鋼技術本部鋼材技術部主査 (課長)

*5 阪神製造所ステンレス部生産技術室主査 (部長補)

*6 鉄鋼技術本部電磁ステンレス技術部主査 (課長)

*7 鉄鋼技術本部電磁ステンレス技術部主査 (課長)

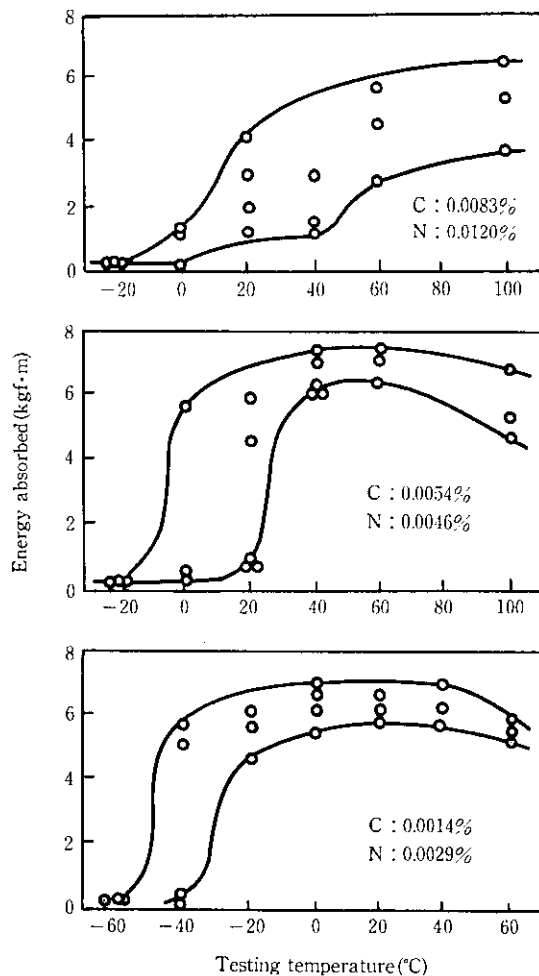


Fig. 1 Charpy energy vs. temperature curves for TIG weld metals of 3 mm thick 16% Cr steels

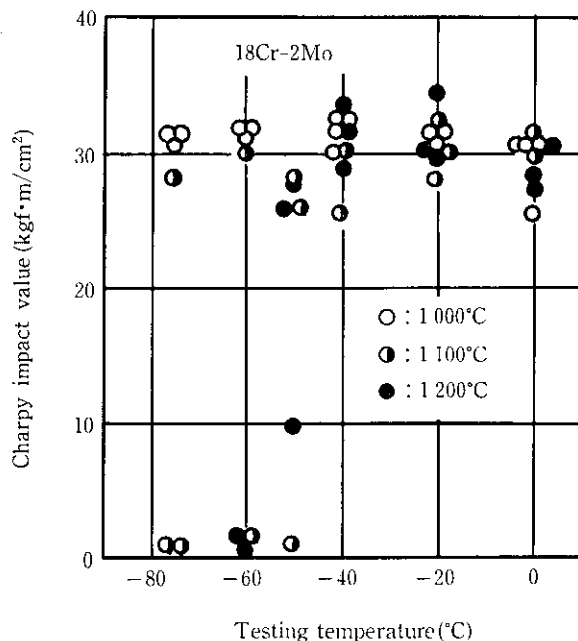


Fig. 2 Charpy absorbed energy vs. test temperature of solution-treated specimens followed by water quenching (4 mm thick, 2 mm V-notch)

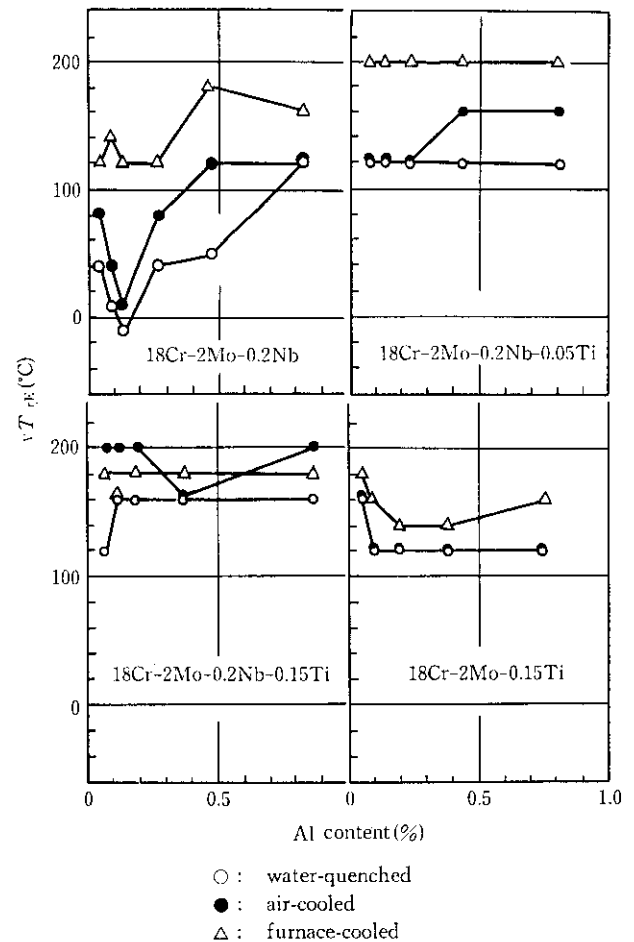


Fig. 3 Influence of chemistry (Nb, Ti, Al) and cooling rate after heat-treatment at 1200°C for 5 min on Charpy V-notch toughness of 18Cr-2Mo steels (full size)

フェライト系ステンレス鋼では、溶接熱影響部の粒界腐食防止のために、一般に炭化物形成元素である Ti あるいは Nb が添加される。18Cr-2Mo 鋼のじん性におよぼすこれらの安定化元素の影響と窒化物あるいは酸化物形成元素である Al の効果とを併せて以下検討した。

Fig. 3 は、1200°C で 5 min 保持後、水冷、空冷および炉冷した場合のシャルピー衝撃特性におよぼす Ti, Nb, Al 含有量の影響を示す。18Cr-2Mo-0.2Nb 鋼では、じん性は 1200°C からの冷却速度の低下とともに低下する。また、水冷あるいは空冷のように冷却速度が比較的大きい場合、0.2% 程度の Al の添加はじん性改善に対し極めて効果的であることがわかる。しかし、18Cr-2Mo-0.2Nb 鋼に 0.05% 以上の Ti を添加すると冷却速度の如何によらずエネルギー遷移速度は 100~200°C となりじん性は低下し、また Al 添加によるじん性改善効果が消失する。

Fig. 4 は 1200°C で 5 min 保持後種々の速度で冷却を行ったシャルピー試験片の上に Fig. 5 に示すような薄い Ti と軟鋼の板を重ね電子ビーム溶接を行い³⁾、試験片中央部に約 2 mm 深さだけ溶融し、熱応力により溶融部にクラックを導入した場合のシャルピー試験結果を示す。エネルギー遷移温度は、冷却速度および安定化元素の種類によらず、100~200°C と高くなり、じん性は低い。

これら2つの結果から、フェライト系ステンレス鋼では、シャルピーVノッチ試験片のごとく鈍い切欠をもつ場合、鋼中の C, N の低減、安定化元素として Nb 添加、適量の Al 添加および高温から

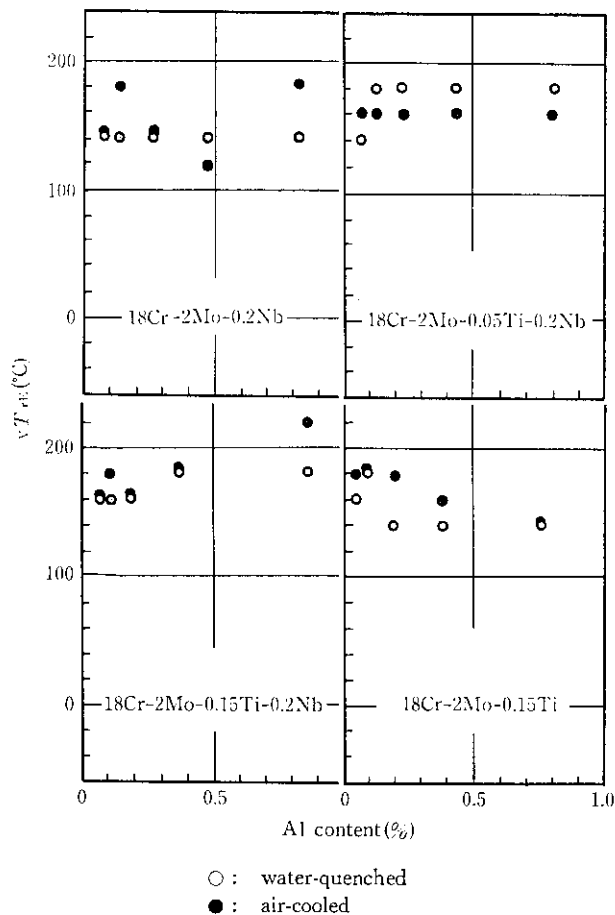


Fig. 4 Influence of chemistry (Nb, Ti, Al) and cooling rate after heat-treatment at 1 200°C for 5 min on the toughness of Charpy specimens (full size) having weld crack

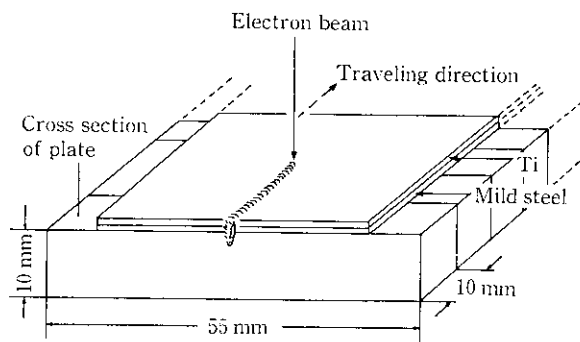


Fig. 5 Preparation of the specimen having brittle weld crack

の冷却速度の制御が極めて有効であるが、Ti 脆化ビードのごとく鋭利なクラックではこれらの効果が消失することを示している。一般に、脆性破面を呈する場合フェライト鋼のシャルピーVノッチ試験片で得られる吸収エネルギーの大半はクラック発生に要するエネルギーであることが知られているが、Ti 脆化ビード試験片からの結果をもとに考えると、鋭利なクラックの伝播は極めて容易であり、その伝播のしやすさに対して化学成分および冷却速度はほとんど影響を与えないものと考えられる。

シャルピーVノッチ試験片の場合、高温からの冷却速度が遅くなるとじん性が低下するが、この原因は冷却速度の低下とともにCrあるいは安定化元素の炭窒化物の粒界析出により、そこでのクラックの発生が容易になるためと考えられる。また、Ti 添加鋼の場合、

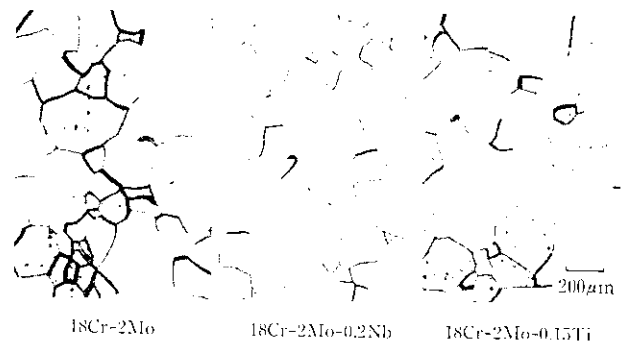


Photo 1 Microstructures after heat-treatment at 1 200°C for 5 min, followed by air-cooling

Table 1 Effect of chemistry (Nb, Ti, Al) on pitting potential ($V_{c'_{10}}$) at 80°C in 100 ppm Cl^- solution

	Al (%)	$V_{c'_{10}}$ (mV vs. SCE)	
18Cr-2Mo-0.2Nb	0.057	455,	400
	0.13	473,	460
	0.26	500,	443
	0.47	453,	463
	0.82	435,	450
18Cr-2Mo-0.15Ti	0.048	403,	433
	0.093	445,	433
	0.38	440,	413

シャルピーVノッチ衝撃特性は著しく低下するが、Photo 1に1 200°Cで5min保持後空冷した場合のミクロ組成を示すように、NbあるいはTi添加による結晶粒の粗大化または微細化は観察されない。しかしTi添加鋼の場合、TiNの粗大な析出物が観察される。したがって、Ti添加によるじん性低下の原因は、TiNが高温にさらされても溶解せず粗大な析出物として存在するため、高温からの冷却速度の大小によらず粒界析出物の近傍でクラックの発生が生じやすくなるためと考えられる。

また、適量のAlの添加はシャルピーVノッチ衝撃特性の改善に有効である。その原因については、現在はっきりしないが、Alの添加により鋼中のO量が低下し介在物が減少することおよびそれらはほとんど微細なC系介在物となることなどによるものと推察される。また過剰のAlの添加は逆にじん性低下を招くが、これについては固溶Alの増加による機械的性質の低下と関係があるものと思われる。

18Cr-2Mo鋼の耐孔食性について孔食電位測定により調べた結果をTable 1に示す。耐孔食性はTiあるいはNbの安定化元素の種類によらず、またAl含有量の大小によらずほぼ同程度であることがわかる。

このように、18Cr-2Mo鋼板厚のじん性改善に対する化学成分および熱履歴の影響を検討してきたが、C、Nの極低化、安定化元素としてNbおよびAlの添加が有効であり、耐孔食性にも優れていることが明らかとなった。

3 R 434 LN-2 厚板の材質特性

3.1 化学成分および製造工程

Table 2にR 434 LN-2厚板材の化学組成範囲とその代表例を示

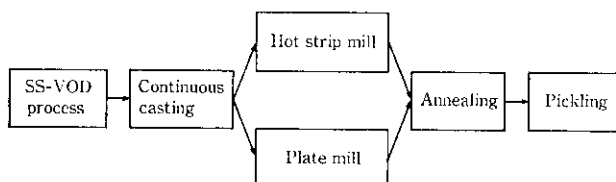
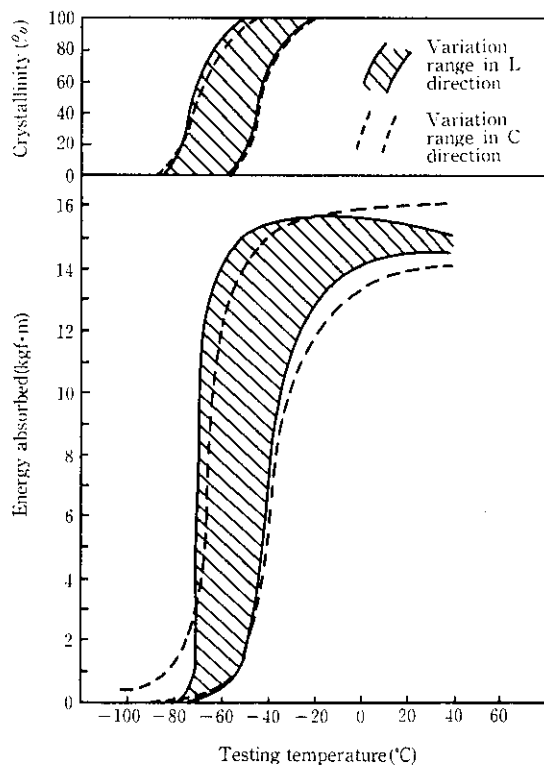
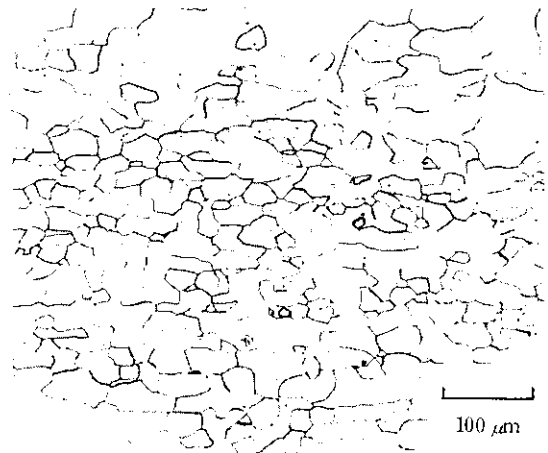
Table 2 Typical examples of chemical composition of R 434 LN-2

(wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Al	Nb	Nb/C+N
Specification	≤0.020	≤1.0	≤1.0	≤0.040	≤0.030	≤0.60	17.50~ 19.50	1.75~ 2.25	—	0.1~ 0.4	—	≥10
An example of plates	0.002	0.15	0.15	0.025	0.005	0.10	18.10	2.00	0.0050	0.22	0.24	34

Table 3 Mechanical properties of 6 mm thick R 434 LN-2 plate

	Tensile test			Bend test	Impact test
	0.2% proof strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation in G.L. of 50 mm (%)	180°, r=1 t	2 mm V-notch Charpy absorbed energy at 0°C (kgf·m)
Specification* ¹⁾	>25	>42	≥20	Good	Min. ave. 4.8 (10×10 mm) 3.6 (10×7.5 mm) 2.5 (10×5 mm)
An example* ²⁾	32	52	39	Good	14.5

*¹⁾ Transverse direction*²⁾ Transverse direction, 6 mm thick**Fig. 6** Manufacturing process of R 434 LN-2 plate**Fig. 7** Charpy absorbed energy vs. temperature plots of 6 mm thick R 434 LN-2 plate (2 mm V-notch half sized specimen)**Photo 2** Microstructure of 6 mm thick R 434 LN-2 plate (L-cross section)

す。前述のじん性確保の観点から、鋼中の C、N 量は当社の極低 C、N 低減精錬技術である SS-VOD プロセスによりそれぞれ 20、50 ppm 程度に低減され、安定化元素として Nb および Al が添加されている。

Fig. 6 に R 434 LN-2 厚中板の製造プロセスを示すが、板厚および板幅によって熱間圧延機が異なり、薄物狭幅材はホットストリップミルで、また厚板広幅材は厚板ミルで圧延され熱処理酸洗を経て製品とされる。

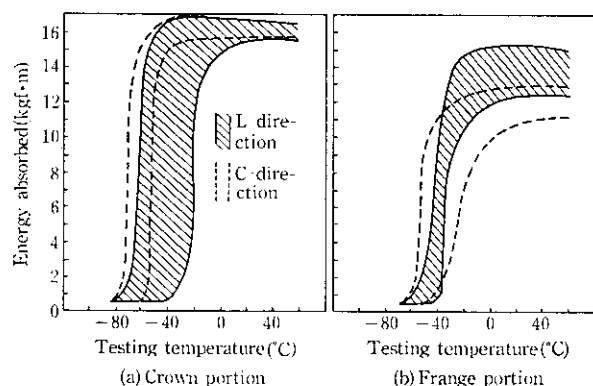
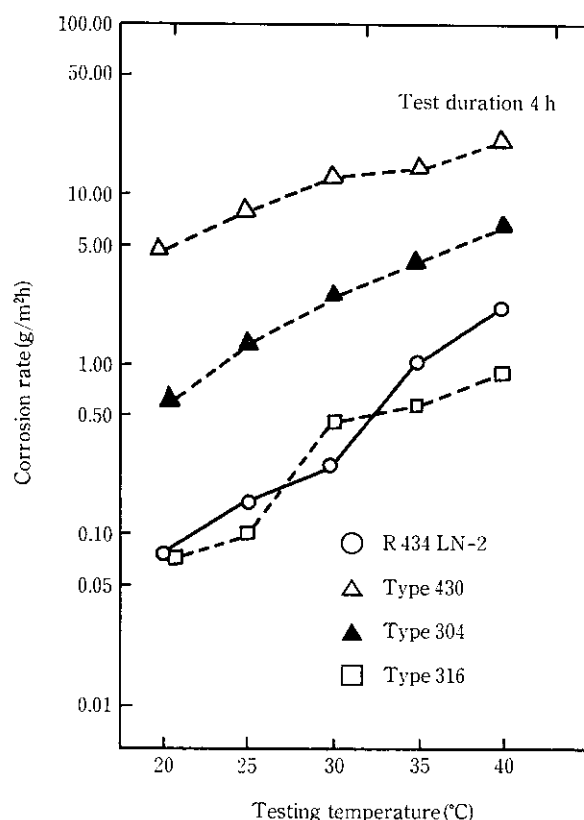
3.2 機械的性質

Table 3 に R 434 LN-2 厚板材の機械的性質を示す。鋼中の C、N の低減効果により、機械的性質は比較的軟質であり延性に優れることがわかる。**Fig. 7** にハーフサイズ 2 mm V ノッチシャルピー試験片の遷移曲線を示すが、エネルギー遷移温度は -50°C と低くじん性に優れている。**Photo 2** に板のミクロ組織を示す。

6 mm 厚の R 434 LN-2 を冷間プレスにて内径 1000 mm の 10% 皿型鏡板に加工した場合の鏡板の種々の箇所についての機械的性質を **Table 4** に、また、シャルピー V ノッチ試験結果を **Fig. 8** に

Table 4 Mechanical properties of the cold-pressed head plate (SD 1 000 mm dia, 6 mm thick) of R 434 LN-2

Portion of head	Direction	0.2% proof strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
Frang	L	68	73	15
	T	70	74	15
Knuckle	L	54	57	22
	T	55	58	26
Crown	L	43	52	33
	T	45	52	36

**Fig. 8** Charpy impact test results of the cold-pressed head plate (SD 1 000 mm dia, 6 mm thick) of R 434 LN-2 by using half sized specimen**Fig. 9** Corrosion rate of R 434 LN-2 in 10% FeCl₃·6H₂O solution in comparison with those of commercial grade stainless steels**Table 5** Corrosion test results of TIG weldments of R 434 LN-2 and austenitic stainless steels

Steel	Strauß test	Rupture time in the boiling solution of 42% MgCl ₂	
		Stress (kgf/mm ²)	Rupture time (h)
R 434 LN-2	Passed	30	> 500
Type 304	Passed	20	1
Type 316	Passed	20	4

Table 6 Corrosion rates of R 434 LN-2 and austenitic stainless steels after immersion in boiling solutions for 24 h

	(g/m ² ·h)				
	5% H ₂ SO ₄	1% HCl	80% CH ₃ CO ₂ H	50% HCO ₂ H	50% NaOH
R 434 LN-2	474	320	< 0.01	2.02	6.90
Type 304	183	12.2	0.29	0.46	2.03
Type 316L	4.96	16.2	0.19	0.45	3.12

示す。最も苛酷な冷間加工を受けるフランジ部においても、延性の低下は小さく、また Fig. 7 の母材のじん性に比べその低下はほとんど認められない。

3.3 耐食性

Fig. 9 に 10% FeCl₃·6H₂O 水溶液中で 4 h 浸漬した場合の腐食速度を示す。R 434 LN-2 の耐孔食性は SUS 430 および 304 のそれに比べ優れており、SUS 316 と遜色がないことがわかる。

Table 5 に TIG 溶接部についての Strauß 試験および沸騰 42% MgCl₂ 水溶液中での定応力下での応力腐食割れ試験結果を示す。R 434 LN-2, SUS 304 および SUS 316 のいずれも溶接部において粒界腐食感受性は低い。また、SUS 304 および 316 では応力腐食割れが生ずるが、R 434 LN-2 ではまったく発生しない。

Table 6 に R 434 LN-2 の耐酸および耐アルカリ性を示す。耐酸性は SUS 304 および 316L に比べ優れるが、耐塩酸性、耐硫酸性および耐アルカリ性は劣るので、その使用には濃度、温度等の腐食環境には十分留意する必要がある。

4 溶 接

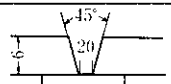
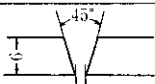
一般に、ステンレス鋼板の溶接では TIG および MIG 溶接が用いられることが多い。そこで、ここではそれらの溶接部の材質特性および溶接の際の留意点について述べる。

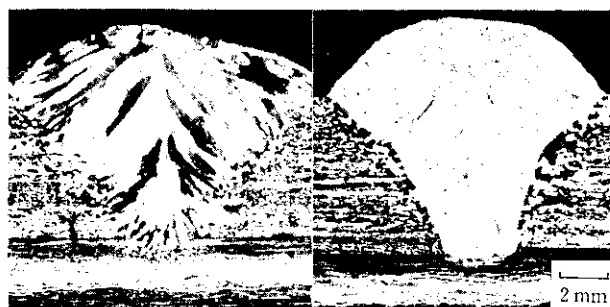
4.1 機械的性質

Table 7 に 6 mm 厚の R 434 LN-2 鋼板の TIG および MIG 溶接条件の一例を示す。ここで用いた共金系溶接材料は、溶接中の Cr および Mo ロスを考慮し、母材の化学成分よりこれらの元素を若干高めたものである。この化学組成を Table 8 に示す。

Photo 3 に Table 7 の条件で行った MIG 溶接部のミクロ組織を、また Photo 4 には TIG 溶接部のその一例を示す。MIG 溶接で Y-316L を用いた場合、約 30% のフェライト相を含むオーステナイト混合組織を呈し、また共金系溶接材料を用いた場合粗大なフェライト単相組織となる。一方、TIG 溶接の場合、Y-309L および Y-316L のオーステナイト系ステンレス溶接材料を用いても溶

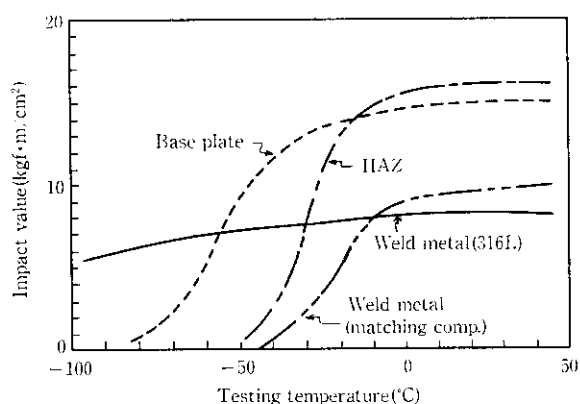
Table 7 Welding conditions of 6 mm thick R 434 LN-2

	MIG welding	TIG welding
Groove geometry	 3 mm thick Type 304	
No. of welding pass	1	First side 2 Backing side 1 (No consumable is used)
Welding current	300 A	180 A
Welding voltage	25 V	12 V
Torch gas	(19.8 ℓ Ar + 0.2 ℓ O ₂) min or 20 ℓ Ar min	15 ℓ Ar min
Traveling speed	350 mm/min	10 mm/min
Welding consumable	Matching composition consumable Type 316 L	Matching composition consumable Type 316 L Type 309 L



(a) Matching composition consumable

(b) Type 316 L consumable

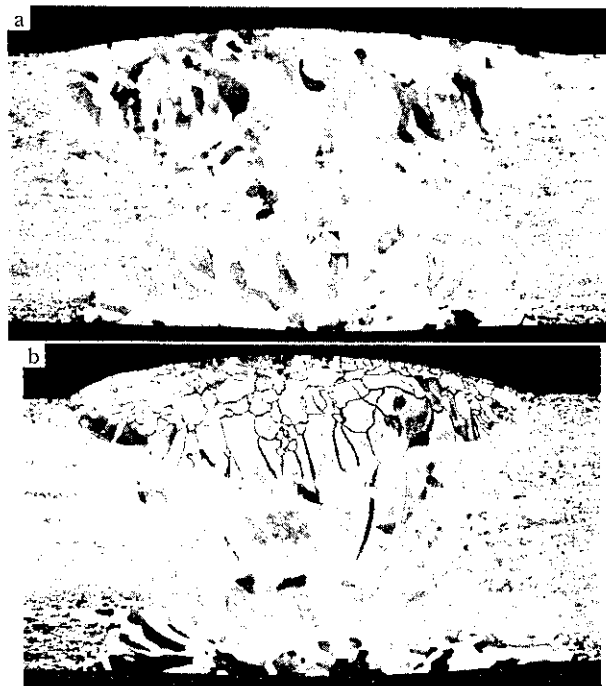
Photo 3 Macrostructure of MIG weldment of 6 mm thick R 435 LN-2**Fig. 10** Results of Charpy impact test for MIG weldments of 6 mm thick R 434 LN-2 plate welded by using the matching composition consumable and type 316L consumable (Torch shielding gas of Ar-1% O₂ and 1/2 sized specimen was used)

接金属への母材の希釈率が大きいので、フェライト相が主体の少量のオーステナイト相を含む混合組織となる。

Fig. 10 に MIG 溶接部についてのシャルピーVノッチ衝撃試験

Table 8 Chemical composition of matching composition consumable

(wt %)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	N
0.009	0.18	0.27	0.024	0.004	0.006	19.04	2.48	0.22	0.011



(a) Matching composition consumable

(b) Type 316 L consumable

Photo 4 Macrostructure of TIG weldment of 6 mm thick R 434 LN-2

結果を、また **Fig. 11** に TIG 溶接部についてのそれを示す。MIG 溶接では、Y-316L を用いた場合溶接金属の組織がオーステナイト相が主体であるので、そのエネルギー遷移温度は存在しないのに対し、共金系溶接材料を用いた場合のそれは -20°C であり、また溶接熱影響部のそれは -30°C である。

一方、TIG 溶接部では、オーステナイト系ステンレス溶接材料を用いた場合でも溶接金属はフェライト相主体の組織となるので、その遷移温度が現れるが、 -60°C と低くじん性に富む。また共金系溶接材料を用いた場合の溶接金属の遷移温度は、MIG 溶接部の場合のそれに比べ -30°C と低く、また Shelf-energy も高く、じん性に優れていることがわかる。

このように、共金系溶接材料を用いた場合、MIG 溶接金属のじん性が TIG 溶接部のそれに比べ劣るが、この原因は MIG 溶接の場合通常アークの安定性の点からトーチガス Ar 中に O₂ を 1% 程度添加するので、溶接金属に O が 130~200 ppm 程度混入し、清浄度が低下するためと考えられる。

Table 9 に溶接部についての機械的性質を示す。TIG および MIG 溶接では、溶接材料の種類によらず溶接部の延性に富み、曲げ試験でも表曲げではまったく割れは生じないが、裏曲げではピンホール等の溶接欠陥に起因して小割れを生ずる場合がある。したがって、この点に関しては溶接欠陥の防止に留意する必要がある。

一般に、フェライト系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼に比べ水素割れ感受性の高いことが知られているが、R 434

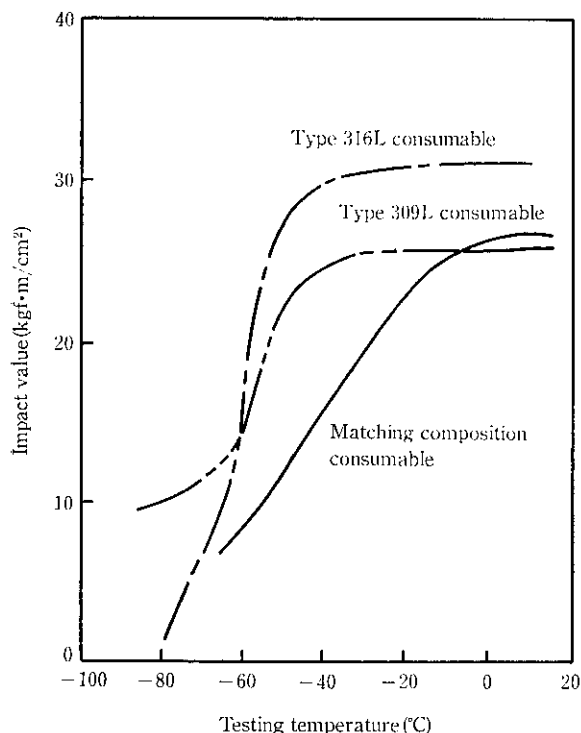
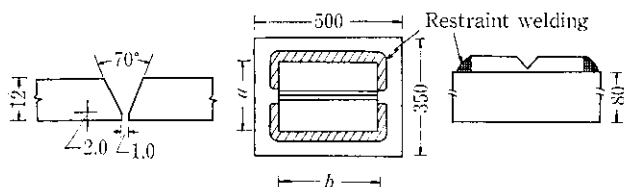
Table 9 Mechanical properties of MIG and TIG Weldments of 6 mm thick R 434 LN-2 plate

	Consumable	Tensile strength (kgf/mm ²)	Breaking point	Vickers hardness			180° bend ($r=2t$)	
				Weld metal	HAZ	Base metal	Face	Root
MIG	Matching composition consumable	48	Base metal	170	160	160	Good	Small crack
	Type 316L	49	Base metal	200	160	160	Good	Small crack
TIG	Matching composition consumable	49	Base metal	175	170	160	Good	Small crack
	Type 316L	48	Base metal	190	160	160	Good	Small crack
	Type 316L	49	Base metal	210	160	160	Good	Small crack

Table 10 Result of restraint cracking test

Without pre- and post-heating	50°C*	100°C*	150°C*
Crack	No crack	No crack	No crack

* Pre-and post-heating time is 1 h

**Fig. 11** Results of charpy impact test for TIG weld metals of 6 mm thick R 434 LN-2 plate welded with the matching composition consumable and austenitic stainless steel consumables (1/2 sized specimen, 3 pass welding)**Fig. 12** Outline of restraint cracking test

LN-2 厚板材においても、共金系溶接材料を用いての溶接の場合、溶接時での拘束が強い場合問題となる。Fig. 12 に示すような 12 mm 厚の試験片に共金系溶接材料を用いて、溶接電流 200 A、電圧

Table 11 Results of Strauß test and immersion test in 10% FeCl₃·6H₂O solution at 30°C for 4 h

	Consumable	Strauß test	Corrosion rate in 10% FeCl ₃ ·6H ₂ O solution (g/m ² ·h)
MIG (Ar-1%O ₂)	Matching composition consumable	Good	2.66
	Type 316L	Good	4.12
TIG	Matching composition consumable	Good	0.77
	Type 309L	Good	0.80
	Type 316L	Good	1.15

12 V、溶接速度 10 mm/min、トーチガス 20 l/min Ar の条件で 1 層 TIG 溶接を行い、溶接拘束割れ試験を行った結果を Table 10 に示す。予熱あるいは後熱を行わない場合は溶接割れが発生するが、50°C 以上の予熱後熱を行うと割れがまったく発生しなくなる。この溶接割れの原因は、割れの発生比率が湿度等の気象条件によって異なることから、溶接雰囲気からの H の溶接金属への混入によるものと考えられる。

4.2 耐食性

Table 11 に 6 mm 厚の R 434 LN-2 鋼板の TIG および MIG 溶接部についての Strauß 試験および 10% FeCl₃·6H₂O 中で 30°C、4 h の浸漬を行った場合の耐食試験結果を示す。溶接部の粒界腐食感受性は溶接法および溶接材料の種類によらずまったくない。また耐孔食性は、MIG 溶接で共金系溶接材料を用いた方が Y-316L を用いた場合よりも腐食速度が小さく、耐孔食性に優れる。Photo 5 にその試験の外観を示すが、Y-316L を用いた場合溶接金属に孔食が集中発生することがわかる。一方、TIG 溶接部の耐孔食性は溶接材料の種類によってはほぼ同程度であり、MIG 溶接のそれに比べ優れる。

Table 12 に MIG 溶接部についての 80°C、100 ppm Cl⁻ 水溶液中での孔食電位測定結果を示す。トーチガスの種類によって孔食電位は異なり、Ar-1%O₂ を用いた場合の方が Ar のみの場合に比べて溶接材料の種類によらず耐孔食性は劣る。この原因は、前述のようにトーチガスの Ar 中に O₂ 添加すると溶接金属中の非金属介在物が増加することと関係があると考えられる。このように、R 434 LN-2 厚板の溶接部の耐孔食性は、MIG 溶接よりも TIG 溶接が優れており、温水環境で良好な耐孔食性を示す。

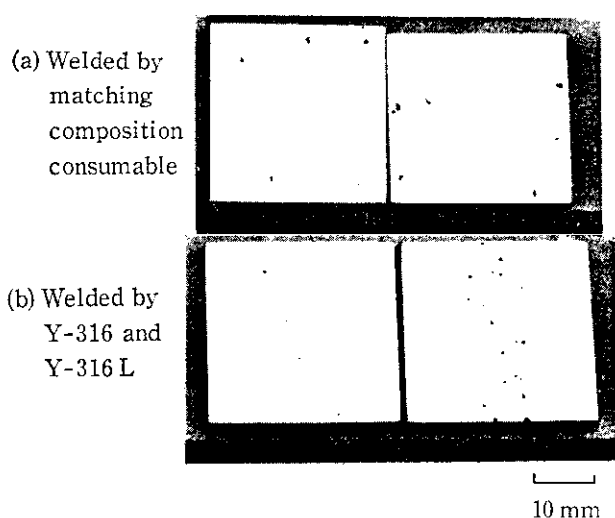


Photo 5 Appearance of MIG weldments after immersion in 10% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ solution at 30°C for 4 h

Table 12 Pitting potential of MIG weldments in 100 ppm Cl^- solution at 80°C

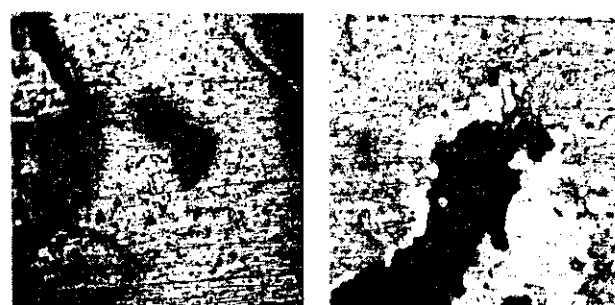
Consumable	Torch gas	$V_{c'10}$ (mV vs. SCE)	$V_{c'100}$ (mV vs. SCE)
Matching composition consumable	Ar	502	575
		445	522
	Ar-1% O_2	435	500
		466	510
Type 316L	Ar	530	585
		520	590
	Ar-1% O_2	428	490
		490	485

Table 13 Results of stress corrosion cracking test on weldments in boiling 42% MgCl_2 solution and boiling 10% NaCl solution containing 1% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ using U-bend Specimen*)

	Consumable	42% MgCl_2 boiling solution, for 120 h	(10% NaCl + 1% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) boiling solution for 120 h
MIG (Ar-1% O_2)	Matching composition consumable	No crack	No crack
	Type 316L	Crack	Crack
TIG	Matching composition consumable	No crack	No crack
	Type 309L	Crack	No crack
	Type 316L	Crack	No crack

* Test specimen except weld metal was sealed by silicon resin

Table 13 に溶接部についての沸騰 42% MgCl_2 水溶液中および沸騰 (10% NaCl +1% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 水溶液中での応力腐食割れ試験結果を示す。試験片は溶接部を中心に U-ベンドを行い溶接金属以外をシリコンゴムでシールしたものをを用いた。共金系溶接材料を用いた



(a) Matching composition consumable

(b) Type 316 L

Photo 6 Surface observation of U-bend specimen on MIG weld metal after immersion in boiling 10% NaCl solution containing 1% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ for 120 h

場合では、溶接法および腐食溶液の種類によらず応力腐食割れは生じない。しかしオーステナイト系溶接材料を用いた場合、沸騰 42% MgCl_2 水溶液中ではすべて応力腐食割れを生じる。沸騰 (10% NaCl +1% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 水溶液中では、MIG 溶接金属では **Photo 6** に示すように大きな孔食で割れが観察されるものの、TIG 溶接部では割れが認められず、応力腐食割れ感受性は減少することがわかる。

このような応力腐食割れ感受性の低減原因は、TIG 溶接における溶接金属への母材の溶込量が大きいことと関係があると思われる。

このように、オーステナイト系ステンレス溶接材料を用いると、共金系溶接材料に比べ応力腐食割れ感受性が高まる。しかし、腐食環境が、沸騰 42% MgCl_2 水溶液から沸騰 (10% NaCl +1% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 水溶液へと、温和になるに従い応力腐食割れ感受性が低下し、特に TIG 溶接部ではその傾向が顕著である。このことから、温水環境のような、より温和な腐食環境下ではオーステナイト系ステンレス溶接材料でも十分使用できると考えられる。

4.3 溶接上の問題点

溶接施工上の留意点を列記すると、

- (1) 溶接開先部の C 汚れによる溶接金属の浸炭防止
- (2) 溶接雰囲気からの溶接金属への N, O の混入防止
- (3) 溶接入熱の適正化
- (4) 溶込不良等の溶接欠陥の防止
- (5) 拘束が厳しい場合の予熱、後熱の採用

(1), (2) を防止できなければ極低 C, N 化によるじん性改善効果が消失するので、溶接前の十分な開先面の脱脂、トーチ、バックあるいはアフターシールドを十分施す必要がある。

5 おわりに

溶接構造用 R 434 LN-2 の化学成分的特徴は、当社の低 C, N 精錬技術である SS-VOD プロセスにより C, N をそれぞれ 20, 40 ppm まで低減し、また安定化元素として Nb と Al を添加した点にあり、じん性を著しく改善した鋼種である。適正な溶接条件の採用により溶接部のじん性は確保されるので、0°C 以上の使用温度で約 12 mm 厚までの厚板の適用が可能である。耐孔食性に著しく優れ、また応力腐食割れ感受性がないことから、現在主として貯湯槽などの用途に使用されているが、今後他の用途にも適用例が増えていくことが期待される。

参 考 文 献

- 1) W. O. Binder and H. R. Spindelov Jr.: *Trans. ASM*, **43** (1951), 759
- 2) S. Iwaoka, H. Kaito, T. Ohtani, N. Ohashi, M. Takeda, and N. Kinoshita: *Stainless Steel '77*, sponsored by Climax Molybdenum Co., London, (1977)
- 3) N. Ohashi, Y. Ono, N. Kinoshita, and K. Yoshioka: *ASTM, Special Technical Report*, (1980), 202