

溶接部耐食性に優れた構造用ステンレス鋼 JFE410RW

High Corrosion Resistance Stainless Steel at Welding Point “JFE410RW”

藤田 健一 FUJITA Kenichi JFE スチール 東日本製鉄所 ステンレス部 西宮ステンレス工場長
柳沼 寛 YAGINUMA Hiroshi JFE スチール 東日本製鉄所 ステンレス部長
柿原 節雄 KAKIHARA Setsuo ダイワスチール 東部事業所長 (元 JFE スチール 東日本製鉄所 ステンレス部長)

要旨

石炭および鉄鉱石貨車のボディ用途材料として溶接部耐食性に優れたステンレス鋼 JFE410RW を開発した。溶接熱影響部分の耐粒界腐食性を重点に検討した結果、溶接部耐食性に必要な要素は (1) 溶接熱影響部がマルテンサイト組織を呈すること、および (2) Ti を添加することにより Cr の炭窒化物の粒界部分への析出を防止することの 2 点である。JFE410RW は熱間圧延鋼帯として製造し、良好な機械的性質と低温靱性を示している。

Abstract:

A newly developed stainless steel JFE410RW is superior in corrosion resistance at weld heat affected zone (HAZ) area. Its main usage is coal and iron ore wagon bodies. Two main elements are essential for intergranular corrosion resistance of weld HAZ. (1) The structure of weld HAZ must be martensite. (2) Precipitation of Cr carbide and nitride must be prevented by adding Titanium to stabilize C and N. JFE410RW is produced smoothly as hot coil products, and shows good mechanical properties and good toughness at low temperatures.

1. はじめに

最近の中国を始めとする景気拡大により、鉄鋼製品の需要が高まり、その原料である石炭や鉄鉱石の採掘量も増大している。それにともない石炭や鉄鉱石を運ぶ貨車（レールワゴン）の生産量も増加傾向にある。

採掘された石炭は硫黄分を多く含んでおり、レールワゴン用の材料には耐硫酸腐食性能、特に溶接部の耐粒界腐食性が求められる。そのため豪州では古くからステンレス鋼が使用され、その材料選定についても研究されてきた¹⁻³⁾。

JFE スチールでは同用途材料として JFE410RW を開発し、2005 年より製造を行ってきた。本論文では JFE410RW の開発に当たり、溶接部の耐粒界腐食性を重点に検討し成分決定した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

以前から当社で製造している構造物用材料 JFE410DH⁴⁾ をベースに、JFE410DH + Ti 添加鋼と Mn, Ni, Ti の値を変化させた 5 種類の試作鋼を加えて、表 1 に示す合計 7 種類

表 1 実験材成分

Table 1 Chemical composition of the samples

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	N	Ti/C+N
JFE410DH	0.008 0	0.18	1.49	0.029	0.002	11.03	0.28	0.001	0.005 5	0.08
JFE410DH+Ti	0.009 7	0.18	1.55	0.028	0.002	11.10	0.30	0.140	0.007 5	8.14
HiNi-HiMn	0.021 0	0.39	1.85	0.030	0.002	11.09	0.81	0.195	0.013 2	5.70
LowNi-HiMn	0.022 0	0.33	1.85	0.028	0.001	11.00	0.36	0.196	0.007 2	6.72
LowNi-LowMn	0.021 8	0.28	1.44	0.029	0.002	11.12	0.36	0.196	0.018 4	4.88
LowNi-LowMn-LowCN	0.015 9	0.38	1.44	0.028	0.002	11.03	0.35	0.190	0.009 6	7.45
HiTi-HiMn	0.015 7	0.28	1.95	0.029	0.002	11.03	0.41	0.269	0.006 7	12.01

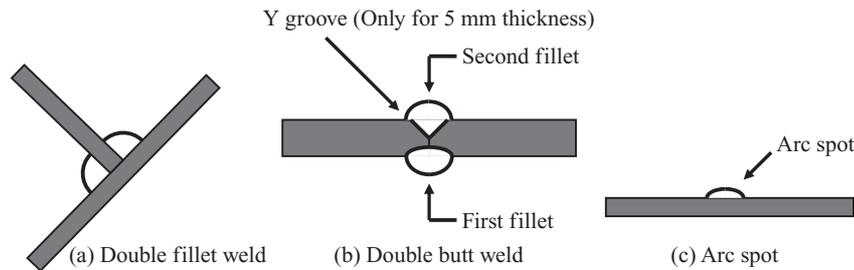


図1 溶接方法

Fig.1 Welding method

の鋼板を作製した。

これら鋼板を切断・焼鈍・研削・酸洗して、すみ肉溶接、板厚2種類の突合せ溶接およびアークスポット溶接部の評価のために3mm厚平板上へのアークスポットを行い、各溶接部から腐食試験用試験片を切り出して、塩水噴霧試験および硫酸-硫酸銅腐食試験に供して、鋼組成の耐食性への影響を調査した。また溶接部の靱性についても調査した。

2.2 製作工程

小型真空溶解炉を使用して50kg鋼塊を溶製し、熱間で粗圧延・仕上げ圧延を経て5.2および3.2mm厚の鋼板を作製した。

粗圧延は1170℃に加熱した鋼塊(160×160×250mm)を11パスで最終出側温度780℃にて板厚22mm×幅180mm×有効長さ1400mmまで圧延して常温まで空冷した後、7等分して長さを200mmの小片に切断した。これら小片のスケールを除去した後、仕上げ圧延は1050℃に再加熱して3パスで板厚5.2mm×幅180mm×有効長さ600mmまで、また5パスで板厚3.2mm×幅180mm×有効長さ800mmまで圧延した。

空冷した鋼板をそれぞれの溶接用試験体の大きさに切断してから690℃×10h、冷却速度20℃/hの焼鈍処理を施したのち、機械加工にて板厚をそれぞれ5および3mmに調整して酸洗を行い、溶接試験体の作成に供した。

2.3 溶接方法

溶接はGMAW (gas metal arc welding) 法で行い、ワイヤは(株)神戸製鋼所製MGS-309LSの1.2mm径を使用し、シールドガスは98%Ar-2%O₂を流量20l/minとして実施した。溶接はいずれも下向き姿勢で行い、各試験体に対する溶接条件は図1および表2のようにした。

板厚5mmの突合せ溶接はY開先を付したが、1パス目を開先のない側、2パス目を開先側として溶接を行った。

2.4 溶接用試験片

各溶接用試験片の形状と表面状況はそれぞれ次のような処理を行って作成した。

表2 溶接条件

Table 2 Welding condition

Welding method	GMAW (Gas sealed Metal Arc Welding) method
Welding wire	MGS-309LS 1.2 mmφ (C: 0.02 mass%, Si: 0.8 mass%, Mn: 1.8 mass%, Ni: 13.3 mass%, Cr: 23.6 mass%)
Sealed gas	98%Ar-2%O ₂
Flow rate	20 l/min

	Welding condition	3 mm thickness	5 mm thickness
(1)	Double fillet weld (i) First fillet 0.3 kJ/mm (ii) Second fillet 0.8 kJ/mm	○	—
(2)	Double butt weld (i) First fillet 0.6 kJ/mm (ii) Second fillet 0.6 kJ/mm	○	○
(3)	Arc spot	○	—

(1) すみ肉溶接用試験片

下板は原板から長さ400mm×幅60mmの平板を切り出し、焼鈍した後、溶接面の幅方向60mmのうち中央部40mm部分を研削した。立て板は長さ400mm×幅40mmの平板を焼鈍した後、溶接部側20mmを両面研削した後に酸洗した。これら下板と立て板を長さ400mmのT形試験体に組立て、表2の条件にて両側一層すみ肉溶接を行った。

(2) 突合せ溶接用試験片

原板から長さ400mm×幅40mmの平板を切り出し、焼鈍した後、片面全幅と突合せ面側全長を研削して、板厚3mm材は開先を取らず、板厚5mm材は片側45°、2mm深さの開先面を加工して酸洗したのちに、2パス目が研削した面になるように表2の条件で両側一層突合せ溶接を行った。

(3) アークスポット用試験片

すみ肉溶接の下板用と同じ形状の長さ400mm×幅60mmの平板を焼鈍した後、溶接面幅方向60mmのうち中央部40mm部分を研削した後に酸洗して3ヶ所/400mm長さの割合でアークスポットを行った。

2.5 腐食試験

2.5.1 試験方法

(1) 塩水噴霧試験

ASTM B 117 (ASTM ; 米国材料試験協会) に規定される中性塩水噴霧試験に準拠し、5%NaCl 試験溶液を試験容器内で 35℃ の噴霧状として、試験時間 96 h とし、試験終了時に腐食状況を観察した。

(2) 硫酸 - 硫酸銅腐食試験

ASTM A 262 practice E および ASTM A 763 practice Z に準拠した modified strauss test を実施した。試験溶液は $\text{Cu}/6\%\text{CuSO}_4/0.5\%\text{H}_2\text{SO}_4$ とし、この沸騰液中に端面を研磨した試験片を 20 h 浸せきして腐食状況を観察した。

試験終了時の試験片表面には全面に腐食生成物が付着して黒色化し組織が観察できないため、試験片研磨端面を約 20 μm 研削した面のマイクロ組織を光学顕微鏡にて観察した。

2.5.2 試験片

(1) 塩水噴霧試験用試験片

(a) 突合せ溶接用試験片

作成した突合せ溶接部から長さ 80 mm ・ 幅 60 mm の大きさの腐食試験片を各 3 体 / 鋼種ずつ切り出して、焼鈍時のスケールの影響を除去するため裏面側に幅 60 mm のテープを貼り試験に供した。

(b) アークスポット用試験片

400 mm 長さ方向の 3ヶ所に置かれたアークスポット部を含む長さ 80 mm × 幅 60 mm の試料を切り出し、幅 50 mm の被覆用テープを裏面中央に幅

30 mm テープを裏面端部から溶接面側の母材部へ約 12 mm かかる程度に折り返して貼って、裏面および幅方向端部にわずかに残る焼鈍時のスケールの影響を排除して試験に供した。

(2) 硫酸 - 硫酸銅腐食試験用試験片

(a) すみ肉溶接用試験片

作成したすみ肉溶接部から長さ 30 mm ・ 幅 30 mm ・ 高さ 15 mm の大きさの腐食試験片を各 2 体 / 鋼種ずつ切り出して、2 体 ・ 1 組で樹脂に埋め込み端面を最終バフ研磨まで行い、腐食試験にした。

2.6 溶接部の靱性評価

2.6.1 試験方法

突合せ溶接部の靱性を、JIS Z 2242 に規定されるシャルピー衝撃試験方法に準拠した方法で評価した。

試験温度は +50℃ ~ -100℃ で行った。

2.6.2 試験片

作成した板厚 5 mm の突合せ溶接部の表裏面を板厚 3 mm まで研削し、長さ 55 mm ・ 幅 10 mm の大きさで溶接金属部が板厚の 50% の位置に 2 mm の V ノッチを加工してシャルピー衝撃試験に供した。

3. 結果

3.1 塩水噴霧試験

突合せ溶接用試験片の 96 h 塩水噴霧試験終了時の観察結果を写真 1 に示す。

すべての試験片で錆が発生しているが、溶接熱影響部に深い腐食が見られたものはなかった。またアークスポット

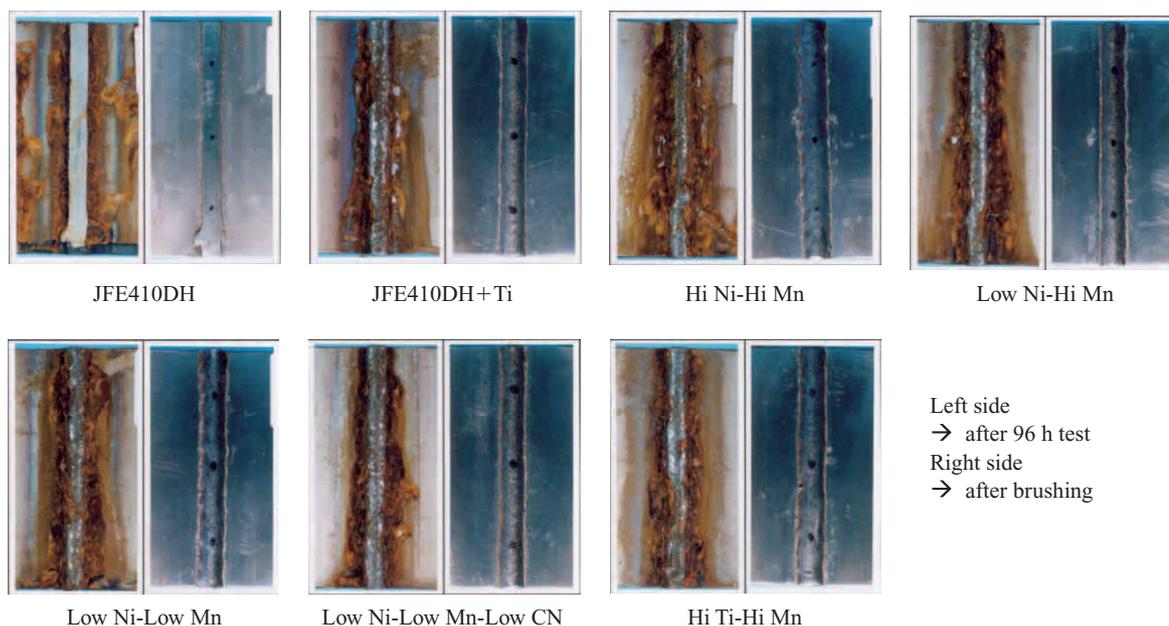


写真 1 塩水噴霧試験結果

Photo 1 Results of salt spray test

表3 硫酸 - 硫酸銅腐食試験結果
Table 3 Results of modified Strauss test

Sample	Position at weld			
	①	②	③	④
JFE410DH	○△	○○	××	△△
JFE410DH+Ti	△△	○△	○×	○○
Hi Ni-Hi Mn	○○	○○	△△	○○
Low Ni-Hi Mn	○○	○○	△△	○○
Low Ni-Low Mn	○○	○△	△×	○○
Low Ni-Low Mn-Low CN	○△	○△	△×	○○
Hi Ti-Hi Mn	○△	○△	△△	○○

○…No corrosion
△…Slight corrosion
×…Deep corrosion or intergranular corrosion

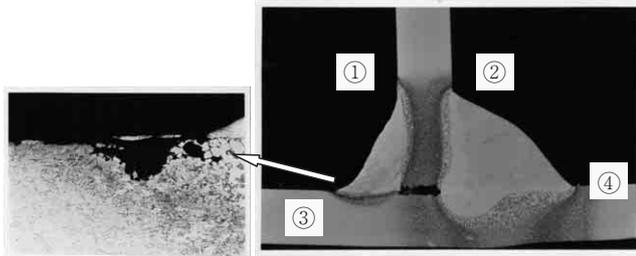


写真2 硫酸 - 硫酸銅腐食試験結果 (JFE410DH + Ti)
Photo 2 Results of modified Strauss test (JFE410DH + Ti)

用試験片でも同様に差は見られなかった。

3.2 硫酸 - 硫酸銅腐食試験

すみ肉溶接用試験片の硫酸 - 硫酸銅腐食試験後の結果を表3に示す。表3の①～④は、写真2に示す各溶接熱影響部の位置である。

また記号は、2つのサンプルの4ヶ所の結果である。

- …腐食なし
- △…ごく軽度な腐食
- ×…深い孔食や粒界腐食

腐食発生位置はいずれの溶接部もビード幅方向端部の熱影響粗粒部であり、特に表3の③の位置に何種類かの試験片で写真2に示すような深い孔食または粒界腐食が見られた。

表3の結果および実体顕微鏡による観察から定性的ではあるが耐食性に順序を付ければ、Hi Ni-Hi Mn 鋼がもっとも優れた耐食性を示し、次いで Low Ni-Hi Mn 鋼が良好であった。

3.3 溶接部の靱性評価

突合せ溶接試験片の靱性を調査した結果を表4に示す。吸収エネルギー遷移温度は、延性破面率100%となる最低温度での吸収エネルギーの1/2の値に相当する温度とした。

JFE410DH および JFE410DH + Ti の遷移温度は -100℃

表4 吸収エネルギー遷移温度
Table 4 Energy transition temperature

Sample	Energy transition temperature (°C)
JFE410DH	< -100
JFE410DH+Ti	< -100
Hi Ni-Hi Mn	-30
Low Ni-Hi Mn	-30
Low Ni-Low Mn	-10
Low Ni-Low Mn-Low CN	-15
Hi Ti-Hi Mn	-25

以下と非常に良好であり、その他の試作鋼は遷移温度 -10~-30℃程度と大きな差は見られなかった。すなわち低C、低Ti成分のものが良好であった。

4. 考察

4.1 溶接部耐食性と成分の関係

写真3に溶接熱影響部②の位置の組織を示す。

- (1) 腐食発生位置はいずれの溶接部もビード幅方向端部の熱影響粗粒部であり、特に表3の③の位置、すなわち最も入熱の小さな部分に孔食や粒界腐食が見られた。
- (2) 溶接熱影響粗粒部のマイクロ組織に相違があり、410DH 鋼および Hi Ni-Hi Mn 鋼はマルテンサイト組織を呈するのに対して、他の試作鋼は粗大フェライト組織を呈していた。
- (3) Tiを添加し、かつ溶接熱影響部がマルテンサイト組織を呈する Hi Ni-Hi Mn 鋼がもっとも優れた耐食性を示した。

以上の3つのことから、溶接部耐食性に必要な要素は以下の2点である。

- (a) 溶接熱影響部がマルテンサイト組織を呈すること
- (b) Tiを添加することによりCrの炭窒化物の粒界部分への析出を防止すること

ステンレス鋼の溶接熱影響部にCrの炭窒化物が発生し、粒界にCr欠乏が起こり、耐食性を悪くすることは従来から知られており^{5,6)}、今回のテスト結果は、溶接熱影響部の冷却の過程でマルテンサイト組織になることにより大半のCの析出を防止し、一部フェライト組織となり析出したC、NをTiで安定化するというメカニズムで粒界腐食を防止していると考えられる。

今回写真2の③の位置、すなわち最も入熱の小さな部分に孔食や粒界腐食が見られたのは、他の位置では入熱量が高く、フェライト組織でC、Nを析出させてもTiで炭窒化物を生成できたのに対し、③の位置では冷却速度の方が速かったためと考えられる。したがって、実用上ではアークスポットのような入熱の小さい個所の耐食性が最も重要となると考えられる。

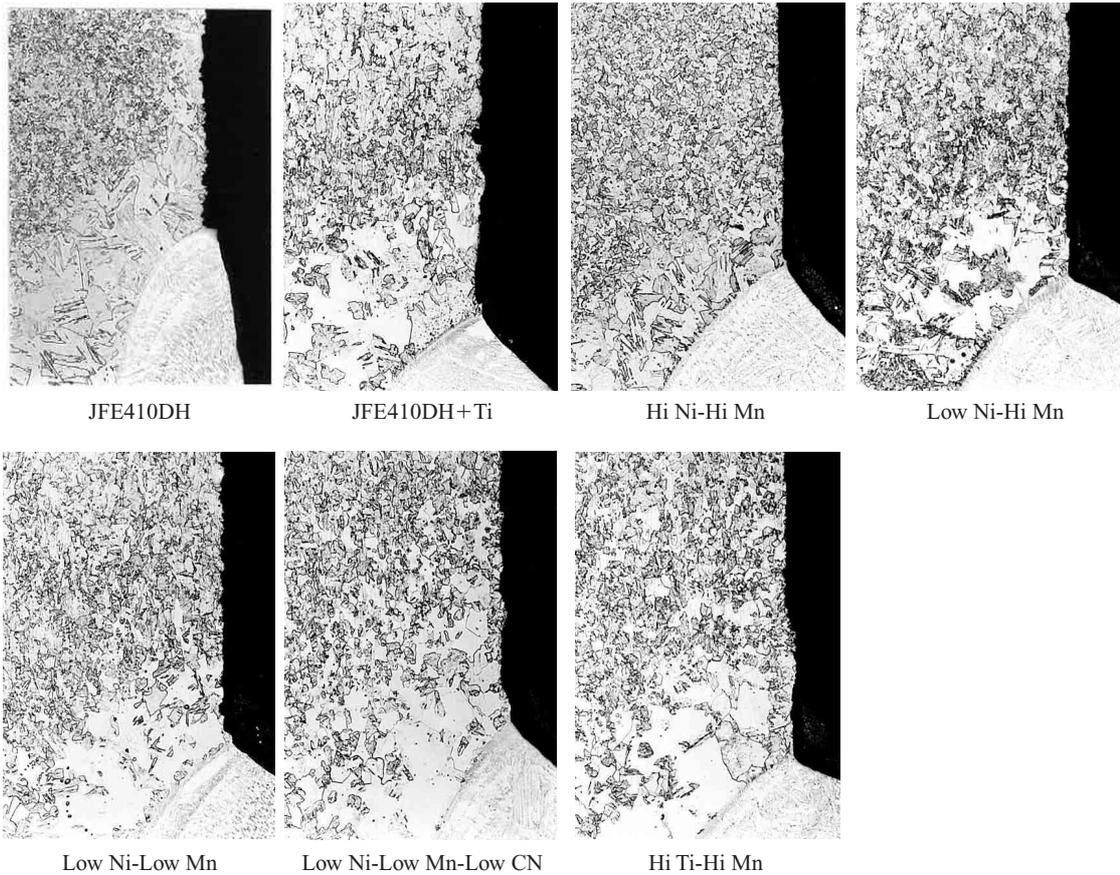


写真3 硫酸-硫酸銅腐食試験結果

Photo 3 Results of modified Strauss test

表5 JFE410RWの化学成分

Table 5 Chemical composition of JFE410RW

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	N
Specification	≤0.025	≤1.00	1.00-2.00	≤0.040	≤0.030	10.90-12.50	—	4 (C+N)-0.30	≤0.020
Typical	0.021	0.30	1.78	0.025	0.002	11.05	0.75	0.22	0.014

(mass%)

5. 実機製造結果

5.1 化学成分

以上の検討をもとに実機製造を行った。成分のスペックと1例を表5に示す。最も優れた耐食性を示したHi Ni-Hi Mn鋼を採用した。ただしLow Ni-Hi Mn鋼でもHi Ni-Hi Mn鋼と同様、ごく軽度な腐食しか発生しておらず、NをHi Ni-Hi Mn鋼と同量まで増量することにより、溶接熱影響部がマルテンサイト組織を呈することが可能であると考えられるため、Niの下限スペックは設けなかった。

5.2 物理的性質および機械的性質

表6に実機製造材の物理的性質および機械的性質の代表例を示す。鋼板への加工など問題なく製造できる良好な機械的性質となっている。

表6 JFE410RWの物性値

Table 6 Typical data of JFE410RW

Density (at 20°C)	Thermal expansion coefficient (-20-+50°C)	Mechanical properties			
		YS	TS	El	HB
7.731 g/cm ³	10.0×10 ⁻⁶ /°C	401 N/mm ²	519 N/mm ²	28.8%	155

YS: Yield strength TS: Tensile strength
El: Elongation HB: Brinell hardness

5.3 韌性

図2に溶接部の韌性を示す。

-20°Cの低温領域でも溶接部分で50 J/cm²程度以上の韌性を示している。

これは、溶接熱影響部が低Cのマルテンサイト組織であるためと考えられる。

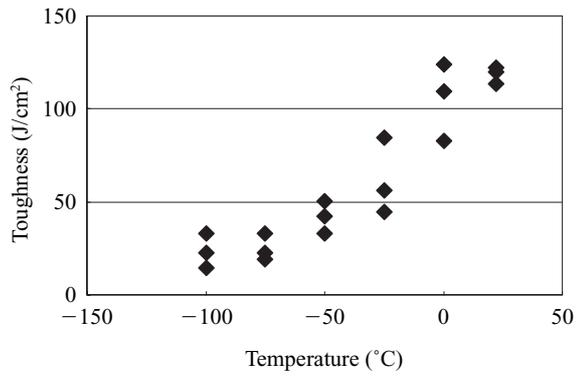


図2 溶接部靱性調査結果

Fig.2 Impact value on welding HAZ



写真4 石炭貨車

Photo 4 Coal wagon

6. おわりに

JFE410RW は豪州などで材料認定を獲得し、順調に販売量を伸ばしている。写真4に石炭貨車に適用された例を示す。今後は鉄鉱石・石炭貨車のみでなく他の用途にも拡大して行く所存である。

参考文献

- 1) Fritz, J. D.; Franson, I. A.. Material Selection and Design. 1997-08, p. 57-61.
- 2) Bennekom, A.V. et. al. INFACON 6. 1992, vol. 2, p. 157-163.
- 3) Sandenbergh, R. F.; Pistorus, P. G. H. INFACON 6. 1992, vol. 2, p. 225-228.
- 4) Yoshioka, K. et. al. Kawasaki Steel Technical Report. 1981, no. 3, p. 65-73.
- 5) ステンレス協会編. ステンレス鋼便覧. 1995. p. 998.
- 6) Nakamichi, H. et. al. JFE 技報. 2007, no. 17, p. 47-51.



藤田 健一



柳沼 寛



柿原 節雄