資料2

発電用原子力設備規格
設計･建設規格（2020年版）
JSME S NC1-2020

設計・建設、材料及び溶接に係る日本機械学会の規格の技術評価に関する第５回検討チーム会合における日本機械学会への説明依頼事項への回答

2024年1月16日

（一社）日本機械学会　発電用設備規格委員会
原子力専門委員会　設計･建設分科会

目次

1．発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」

（1）事例規格の位置づけ

（2）最新知見の取り入れERNiCrFe-7Aの取り入れ

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（１） 事例規格の位置づけ

（a）日本機械学会によれば、事例規格は、次のいずれかの規格とされています。

① 適用対象設備等に限定的な制限を付けることにより、本文に規定されるものとは別の方法を適用する場合の規格

② 規格には含まれていない新規の材料、設計、施行又は検査等の適用実績を、ある期間にわたって得ようとする場合の規格

１）「発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」」（以下「SCC事例規格」という。）は、上記①、②のいずれに当たるのか説明して下さい。

（１）事例規格の位置づけ

（回答）

- SCC事例規格は、
  ① 適用対象設備等に限定的な制限を付けることにより、本文に規定されるものとは別の方法を適用する場合の規格

  に該当します。

- 本文対象規定は以下となります。（当該事例規格から引用）

発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」改訂

対象規定：	PVB-2000（クラス１容器に使用する材料）
	PPB-2000（クラス１配管に使用する材料）
	PMB-2000（クラス１ポンプに使用する材料）
	VVB-2000（クラス１弁に使用する材料）
	SSB-2000（クラス１支持構造物に使用する材料）
	CSS-2000（炉心支持構造物に使用する材料）

（１）事例規格の位置づけ

２）設計・建設規格に取り込んでいない理由を説明して下さい。

（回答）

- 本事例規格は、設計者がSCC発生の抑制に役立てるための基本的な考え方を示すものです。一方でSCCのメカニズムは完全に解明されているわけではなく、現在もPWR環境でのステンレス鋼溶接部におけるSCCの事例も報告されています。
- 引き続き知見を収集し、将来的に本体への取り込みを検討します。

（１）事例規格の位置づけ

（b）「２.「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」の規定」には、「材料選定においては注意深い考慮をすること。」とされていますが、本文規定には考慮すべき事項が規定されていません。規格として考慮すべき事項は何か説明して下さい。なお、「考慮すべき具体的な例には添付のようなものがある。」とあり、添付に例が記載されていると認識しています。

（回答）

- 応力腐食割れを抑制するための規定は材料・設計・製作・運転の状況で異なることから一義的な防止の規定を設けていません。
- SCC の発生は、三つの因子(材料、応力、環境）の重畳により発生するものであり、対応としては、三因子が重畳して SCC の発生する条件が形成されないようにすることとなります。

（２）最新知見の取り入れ

（a）改訂に当たって収集した最新知見と取り入れた最新知見について説明して下さい。

（回答）

- 変更点は、第１回検討チーム会合にて提示した資料の通りです。
- 改訂にあたっては、様々な52合金の応力腐食割れ特性を収集し、得られた最新知見を基に赤枠で囲む範囲を本事例規格に取り込んでいます。

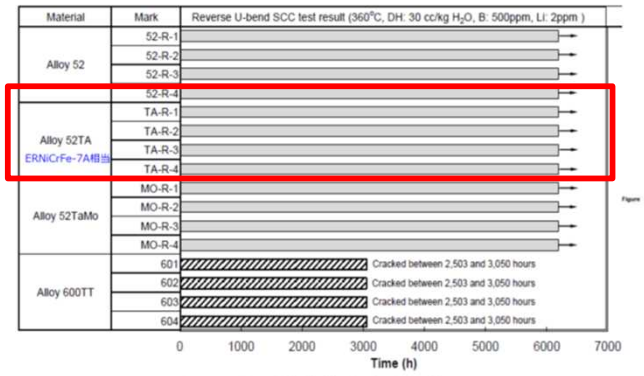
9. NC-CC-002からNC-CC-002(改定)-2への主な変更

- NC-CC-002(改訂版) [2011年12月12日制定]
  - ✓ 初版は本文だけであったが、解説を追加した。
  - ✓ 「高ニッケル合金」の記述をBWRとPWRに分割した。
- NC-CC-002(改訂)-1 [2013年6月17日制定]
  - ✓ 事例規格集として発行するため、表紙等の体裁を見直した。
- NC-CC-002(改定)-2 [2022年6月22日制定]
  - ✓ 現行の事例規格では、52 合金 として、UNS Number N06052 AWS クラス ERNiCrFe-7 ）のみ を対象としていが、海外では N06054 AWS クラス ERNiCrFe-7A ）が 実機で 適用されて おり、耐 PWSCC 性も ERNiCrFe-7 と同等である結果が得られている 。国内で使用可能となるように、付録1Bで52合金として取り込む。[10章にて技術的改定内容を説明]
  - ✓ 用語の記載の統一を行った。

19

10.技術的改定の説明（付録１Ｂ：52合金の改定）

- 応力腐食割れ特性：**SCC発生試験結果**



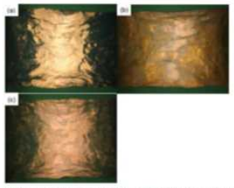


Figure 12: SCC initiation test results

360℃×約6000hの発生試験において、PWSCCは発生しておらず、両材料のPWSCC発生特性は同等である。

（出典）T. Maeguchi et al, Environmentally Assisited Cracking Susceptibility of Alloy 690 Weld Metals, FONTEVRAUD 9, 2018

21

※ 資料1－1－5　発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第Ｉ編【事例規格】(NC-CC-002(改定)-2)
発電用原子力設備における「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」の概要

（３） ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（a）インコネル690系の溶接金属の52合金としてERNiCrFe-7Aが追加されました。
ERNiCrFe-7Aを用いた溶接部が、技術基準規則第１７条の要求を満足する技術的根拠を示して下さい

＜質問の背景＞

- 技術基準規則第１７条第１号イにおいて、クラス１機器、クラス１支持構造物及び炉心支持構造物に使用する材料は、「その使用される圧力、温度、水質、放射線、荷重その他の使用条件に対して適切な機械的強度及び化学的成分（使用中の応力その他の使用条件に対する適切な耐食性を含む。）を有すること。」とされている。
- 技術基準規則第１７条第１５号ハにおいて、クラス１容器、クラス１管のうち主要な耐圧部の溶接部（溶接金属部及び熱影響部をいう。）は、「適切な強度を有するものであること。」とされ、同解釈で、「「適切な強度を有する」とは、母材と同等以上の機械的強度を有するものであることをいう。」とされている。
- したがって、溶接部は、溶接規格第１章クラス１容器「N-1040溶接部の強度等」等の規定を満足する必要がある。

（３）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- 溶接部の強度は溶接施工法確認試験で確認していますが、ERNiCrFe-7Aを用いて溶接施工法確認試験と同等の試験を実施して、規格を満足することを確認しています※1。また、ERNiCrFe-7とERNiCrFe-7Aを比較すると、成分に大きな差はなく、金属組織に有意な差は認められないため、他の特性にも差異はないと考えます。

溶接施工法確認試験適合性評価

試験項目（要求事項）	日本機械学会発電用原子力設備規格 溶接規格 2020年版
継手引張試験	適合(次ページ参照)
側曲げ試験	適合(次ページ参照)
破壊靭性試験	要求なし ※2

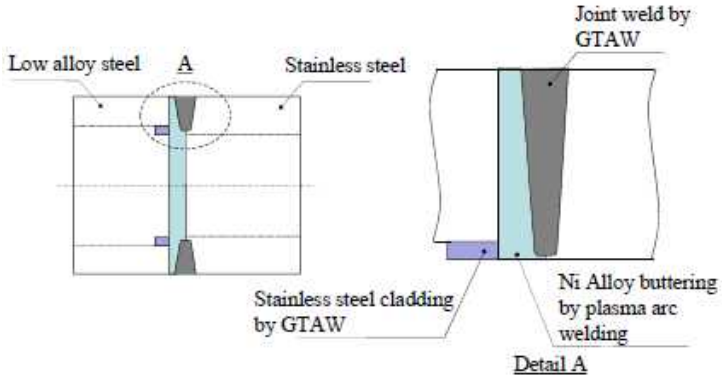
※1: 保田ら;”改良52合金溶接材料の開発と適用”, 日本機械学会関西支部 第98期定期総会講演会 [No.234-1](2023)20306

※2: 日本機械学会発電用原子力設備規格 溶接規格2020年版では、ニッケルクロム鉄合金(ERNiCrFe-7及び7Aも該当)には破壊靭性試験は要求されていない。
以下、溶接規格2020年版　表 N-X110-1より抜粋）

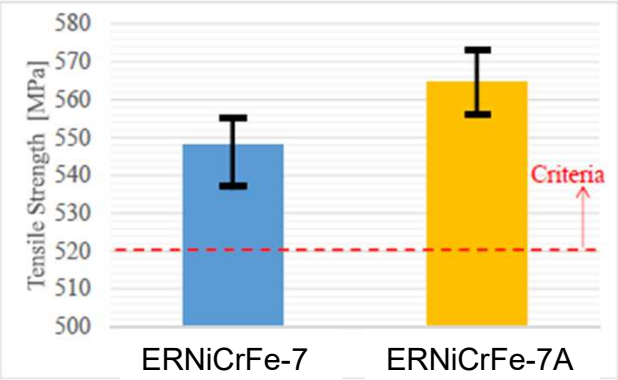
6. 溶接部が(1)から(4)までのいずれかに該当する場合は，破壊靭性試験を必要としない。
(1) 厚さが 16 mm 未満の溶接部
(2) 外径が 169 mm 未満の管の溶接部
(3) 厚さが 16 mm 又は外径が 169 mm 未満の管に接続されるフランジ又は管継手の溶接部
(4) (1)から(3)までに掲げるもの以外の溶接部であって，次の a. 又は b. のいずれかに掲げる溶接部
a. 熱影響部であって，母材の区分が表 N-G01 に掲げる P-8，P-43 若しくは P-45 又は非鉄金属であるもの
b. 溶接金属部であって，溶接金属がオーステナイト系ステンレス鋼，ニッケルクロム鉄合金又は非鉄金属の場合であるもの

（３）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

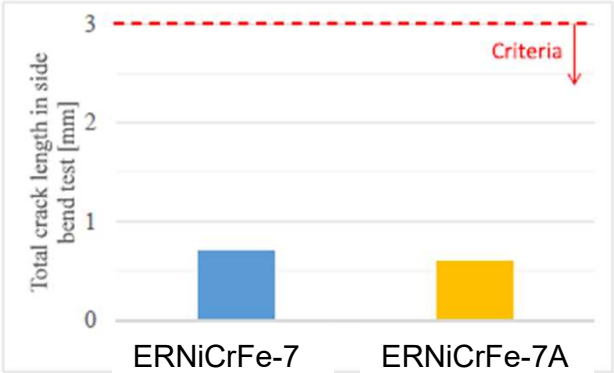
（回答） 試験項目および結果詳細



試験用継手構造※1



継手引張試験結果※1



側曲げ試験結果※1

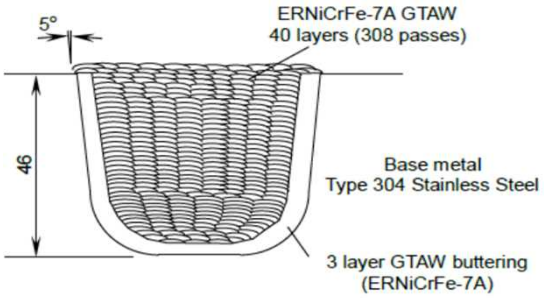
参照規格	継手引張クライテリア	側曲げクライテリア
引用文献記載 他規格（RCC-M）	母材規格強度以上	3mm以上の割れがないこと
日本機械学会発電用 原子力設備規格 溶接規格2020年版	母材規格強度以上	• 長さ3mmを超える割れがないこと • 長さ3mm以下の割れの長さの合計が7mmを超えないこと。 • 割れ及びブローホールの個数の合計が10個を超えないこと。
比較評価	同等	同等

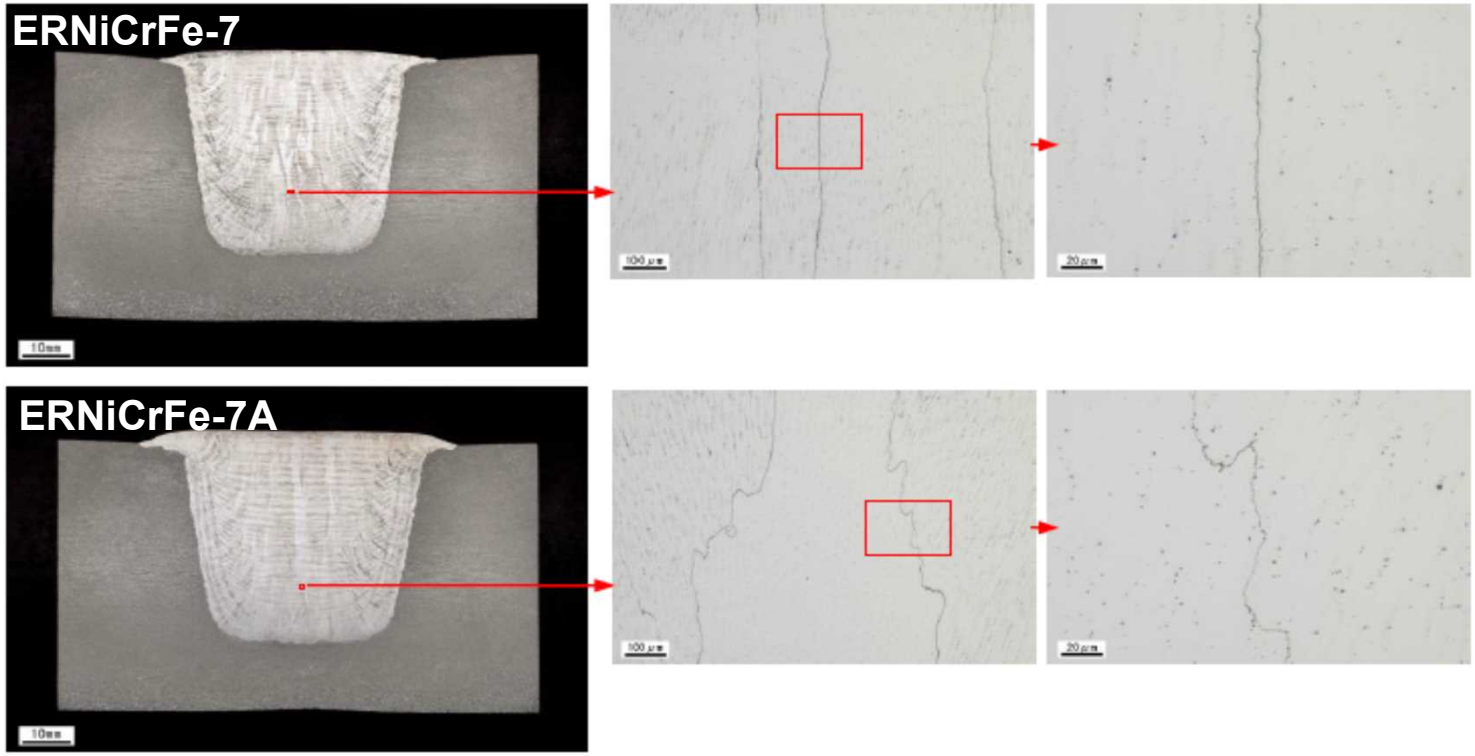
※1: 保田ら;”改良52合金溶接材料の開発と適用”, 日本機械学会関西支部 第98期定期総会講演会 [No.234-1](2023)20306

（３）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- ERNiCrFe-7およびERNiCrFe-7Aは、マクロ的には柱状晶組織を、ミクロ的にはNi基合金の凝固組織を呈しています※1。
- 両者の成分差はNb、Taの含有量程度であり、金属組織に有意な差は認められませんでした。





ERNiCrFe-7とERNiCrFe-7Aとの組織比較

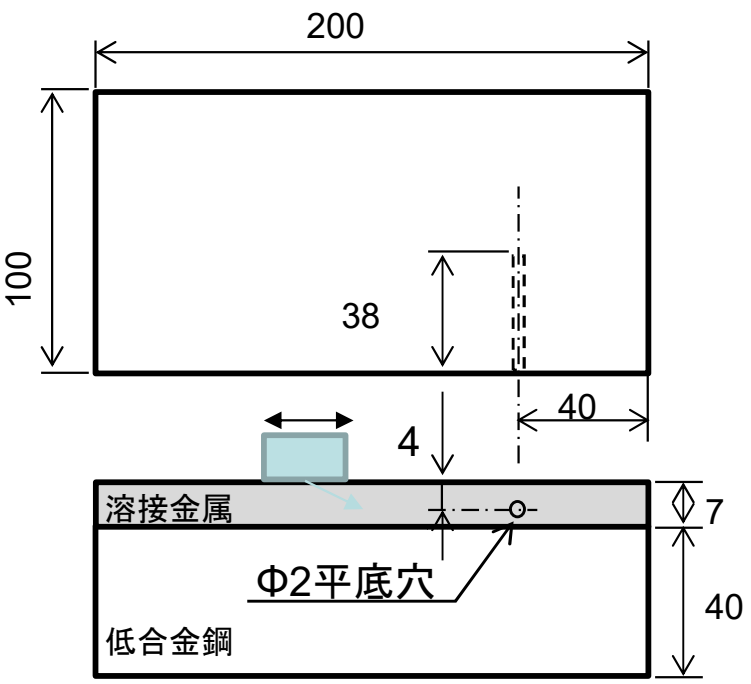
※1: T. Maeguchi et al, “Environmentally Assisted Cracking Susceptibility of Alloy 690 Weld Metals”, FONTEVRAUD 9, 2018

（３） ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- ERNiCrFe-7およびERNiCrFe-7Aを用いて製作した超音波探傷試験体を用いて、同形状の横穴（模擬欠陥）のエコーの感度差を比較しました。
- 横穴エコーの感度差は、斜角/垂直ともに同等（下表）であり、超音波透過性（超音波探傷性）は同等であることが確認されています。

試験時の探触子走査方向



超音波探傷試験体

横穴エコーの感度比較結果

	ERNiCrFe-7	ERNiCrFe-7A
縦波斜角45°(VSY-45-2) の横穴エコー高さ【感度51.6dB】	80%	80%
垂直(MSEB4)の横穴エコー高さ【感度18.5dB】	80%	78%

使用装置：縦波斜角45°プローブ：VSY45-2 (67154 687)
垂直プローブ：MSEB4 (18923 57462)
超音波探傷器：UI-25 No.4

（３） ERNiCrFe-7Aの取り入れ

(b)SCC発生試験の結果として、FONTEVRAUD 9の文献を引用し、ERNiCrFe-7とERNiCrFe-7AのPWSCC発生特性は同等としています。文献は6191時間(9ヶ月弱)の試験結果ですが、その後の長時間試験結果があれば示して下さい。

- Takaharu Maeguchi et.al, Environmentally Assisted Cracking Susceptibility of Alloy 690 Weld Metals, FONTEVRAUD 9, 2018
- 第1回設計・建設、材料及び溶接に係る日本機械学会の規格の技術評価に関する検討チーム 資料1-1-5, 21ページ

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- 現時点では、FONTEVRAUD 9で引用している文献に記載の6191時間以上のデータはございません。ただし、690合金、152合金、52合金等の耐PWSCC性の高い材料は、PWSCCが発生しないため、SCC進展試験により耐PWSCC性を評価することが一般的です※1。
- なお、耐SCC性を向上するためには、Cr量が影響することが一般的に知られており、従来使用してるERNiCrFe-7と同量のCrを含有するERNiCrFe-7Aは、ERNiCrFe-7と同等の耐SCC性を有するものと考えられます。
  ERNiCrFe-7の耐PWSCC性については、事例規格 解説図XX-2212-5に記載しているとおり、360℃の温度加速した条件下で8万時間以上の定荷重SCC試験を実施し、PWSCCが発生していないことを確認しております。

※1: Rickard Ruici Shen, “On the low primary water stress corrosion cracking susceptibility of weld deformed Alloy 690”, Doctoral thesis no. 101(2017), P.7

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（ｃ）SCC進展試験結果として、EPRIのMRP-386を引用し、ERNiCrFe-7とERNiCrFe-7AのSCC進展特性は同等としています。説明に用いられた図は、MRP-386を元に日本機械学会において作成したものと思われますが、図の詳細について説明して下さい。

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- 引用文献のEPRI MRP-386※1には、690系の母材と溶接金属を対象として、各国の研究機関等で測定されたPWR1次系模擬環境中でのSCC進展速度のデータが素材や試験条件の詳細と共にデータシートとなって掲載されています。
- その試験方法は、全て予亀裂入りCT型試験片を用いたもので、詳細な試験手順はEPRIが定めたガイドラインに沿ったものとなっています。
- このデータシートの中からERNiCrFe-7とERNiCrFe-7Aの亀裂進展速度データを抜き出し、横軸に応力拡大係数を取って表示したものが資料に掲載したグラフです。
- データの引用元であるEPRI MRP-386にも同様のグラフが掲載されていますが、溶接金属は52系(ERNiCrFe-7とERNiCrFe-7A)及び152系を区別せずにプロットされていることから、機械学会にて52系のみを取り出した上、さらにERNiCrFe-7とERNiCrFe-7Aの区別も行ってプロットしたものです。

※1 EPRI, “Materials Reliability Program: Recommended Factors of Improvement for Evaluating Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) Growth Rates of Thick-Wall Alloy 690 Materials and Alloy 52, 152, and Variants Welds (MRP 386) ”, 3002010756, 2017.

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（d）海外ではN06054（AWSクラスERNiCrFe7A）が実機に適用されてとの説明がありました 。海外におけるERNiCrFe-7Aの実機適用実績を示してください。

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- 海外でのERNiCrFe-7Aの適用例としては以下のものがあります。

・Limerick-2 (BWR、2017)
改良52合金を用いた原子炉圧力容器計装用ノズル部の補修
https://www.nrc.gov/docs/ML1718/ML17187A261.pdf

・Fitzpatrick (BWR、2017)
残留熱除熱系低圧冷却配管ー原子炉冷却材再循環系配管継手の改良52合金を用いた肉盛補修
https://www.nrc.gov/docs/ML1708/ML17081A553.pdf

・Palisades (PWR、2014)
加圧器セーフエンド継手の改良52合金を用いた肉盛補修
https://www.nrc.gov/docs/ML1408/ML14086A627.pdf

・Vogtle-3 (PWR/AP-1000、2012)
原子炉圧力容器入口管台異材継手部に改良52合金を使用
https://www.nrc.gov/docs/ML1315/ML13150A405.pdf

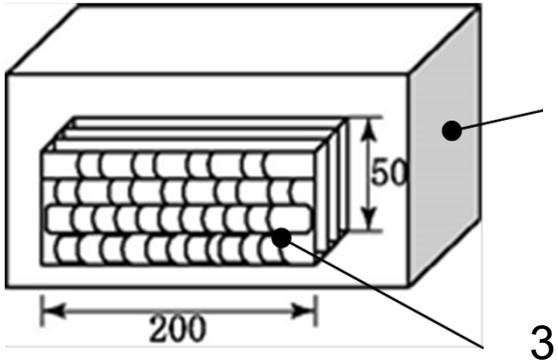
（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（e）ERNiCrFe-7AはERNiCrFe-7と比べて溶接スケールが少ない、施工時手入れが容易であるとの説明がありました 。具体的なエビデンスを提示してください。

（3）ERNiCrFe-7Aの取り入れ

（回答）

- 肉盛溶接試験を実施し、ERNiCrFe-7AはERNiCrFe-7と比較して、溶接ビード表面の酸化スケール面積率が大きく低下できることを確認しています※1。



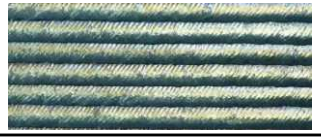
低合金鋼

（母材）

3層クラッド溶接

クラッド試験体

クラッド試験結果

規格	溶接材料（チャージ）	ビード外観	表面の酸化被膜割合（%）
ERNiCrFe-7	52（NX3648JK）		15
ERNiCrFe-7A	52TA（7W745K）		2

※1: Nishijima et.al.” IMPROVEMENT OF ALLOY 52 FILLER METAL FOR WELDABILITY”, Proceedings of ICAPP 2017 April 24-28, 2017 - Fukui and Kyoto (Japan)