

技術資料

Technical Data

析出硬化型ステンレス鋼 Ferrium® PH48S™ の材料特性

高橋伸幸*¹, 古庄千紘*¹, 小柳禎彦*², Kerem TASKIN*³

Material Properties of Precipitation Hardening Stainless Steel

“Ferrium® PH48S™”

Nobuyuki TAKAHASHI, Chihiro FURUSHO, Yoshihiko KOYANAGI
and Kerem TASKIN

Synopsis

Ferrium® PH48S™ steel was computationally designed using Integrated Computational Materials Engineering (ICME) technologies and the Materials by Design methodology, which implements a systems engineering design framework that considers the various interactions between chemistry, processing, microstructure and properties to achieve desired material performance with lower development costs and faster transition to industry. Precipitation hardening stainless steels have high strength, high toughness and good corrosion resistance. Since high mechanical properties can be obtained by heat treatment, they have fewer restrictions on shape and dimensions than materials whose strength is obtained by cold working. Tailored to achieve a fully martensitic microstructure with precipitation hardening and corrosion resistance, Ferrium® PH48S™ steel was initially designed by QuesTek Innovations LLC to replace cast Ti-6Al-4V components through lower cost, comparable specific strength and improved corrosion resistance. Ferrium® PH48S™ steel possess excellent mechanical properties and good stress corrosion cracking (SCC) resistance. In this study, in order to determine the potential of Ferrium® PH48S™ steel for various applications, the material properties were evaluated in a lab-scale trial. The results show that Ferrium® PH48S™ steel has higher strength and toughness than conventional precipitation hardening stainless steels, and also has good corrosion resistance. It is expected that Ferrium® PH48S™ steel will contribute to weight reduction and miniaturization due to its good balance of strength and toughness, and elimination of coating for corrosion protection due to its high corrosion resistance compared with maraging steel and martensitic stainless steel.

1. 緒 言

析出硬化型ステンレス鋼は、高強度と高靱性、および耐食性を併せ持つ材料であり、時効処理により微細な析出相を分散させることを組織的な特徴とする。中でも特筆すべき特性は靱性であり、析出硬化型ステンレス鋼と同等以上の強度を有するステンレス鋼として SUS440C

や DSR® 40N などのマルテンサイト系ステンレス鋼が挙げられるものの、靱性面では一般に析出硬化型ステンレス鋼の方が優れる。このように析出硬化型ステンレス鋼は高強度と高靱性を両立した衝撃や振動に強い材料であり、その優れた機械的特性から、タービンプレードや航空機用部品などに用いられる¹⁾。また析出硬化型ステンレス鋼は、熱処理のみで機械的特性を発現できる材料で

2021年5月6日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 QuesTek Innovations LLC

あるため、冷間加工を加えて高強度を得る材料と比べ、製品形状などの制約が比較的小さい。析出硬化型ステンレス鋼の歴史は、古くは1940年代に析出硬化元素としてCuを利用する17-4PH (SUS630)が実用化され、現在においても代表的な析出硬化型ステンレス鋼として広く用いられている。17-4PHの発展鋼種として、機械的性質に異方性をもたらず δ フェライト相を低減した15-5PHや、Alを利用して高強度化したPH13-8Moが、いずれもArmco Steel Corp.によって開発された。その他、Cuに加えてTiを利用しPH13-8Mo以上の高強度を示すCustom 455[®]や、 δ フェライト相をなくし機械的性質の異方性を低減したCustom 450[®]などが、Carpenter Technology Corp.により開発されている¹⁾。一般に強度と靱性はトレードオフの関係がある中で、高い靱性を有したまま高強度化していく傾向が析出硬化型ステンレス鋼の開発の歴史から読み取れる。このことから、今後さらなる高強度・高靱性のニーズが予想される。さらに、直角方向の靱性に悪影響であるなど、機械的特性に異方性をもたらず δ フェライト相は抑制ないしは低減することが望ましい。QuesTek Innovations LLCではIntegrated Computational Materials Engineering (ICME)を活用してマルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼 Ferrium[®] PH48S[™]を開発^{2), 3)}しており、代表的な析出硬化型ステンレス鋼である17-4PHやPH13-8Moよりも優れた強度を有し、また耐SCC特性⁴⁾や、低温での靱性⁵⁾についても優れた材料であることが報告されている。しかし、実用上は必要に応じて時効処理条件を選定するため、材料の時効挙動を把握することは重要である。さらに析出硬化型ステンレス鋼は耐食性を要求されることが多いため、材料の耐食性も同様に重要である。そこで、Ferrium[®] PH48S[™]をラボスケールで少量試作し材料特性を評価した。

2. 実験方法

2. 1 供試材

Table 1にFerrium[®] PH48S[™]の代表的な成分を示す。供試材は真空誘導炉で溶製し、直径130 mmの50 kg鋼塊を作製した。製造した鋼塊は均質化処理を施した後、熱間鍛造にて直径25 mmの棒形状に加工し、焼準処理を行った。機械的特性および耐食性を評価するため実施した、供試材の熱処理条件をFig. 1に示す。固溶化処理として825℃にて1時間保持後、油冷し、その後480℃～595℃にて2時間保持後に空冷の時効処理を行った。

各条件での時効処理後に硬さ試験、引張試験、シャルピー衝撃試験、塩水噴霧試験および種々の酸浸漬試験を行った。硬さ試験については、固溶化処理ままにおいても実施した。いずれの熱処理条件においても、組織観察により δ フェライト相が存在しないことを確認しており、一例として、Fig. 2に520℃での時効処理後の組織をピレラ液(10% HCl + 1% ピクリン酸 + メタノール希釈)にてエッチング後に光学顕微鏡で観察した結果を示すが、全面マルテンサイト組織を呈しており δ フェライト相は認められない。また光学顕微鏡では観察困難であるが、ナノスケールの析出相が析出していることが推測される。

また比較のため、Custom 465[®]相当材料であるAlloy 465 (Fe-11Ni-12Cr-1Mo-1.6Ti, 単位はmass%)についても少量試作を実施した。

Table 1. Chemical composition (mass%).

Material	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Fe
Ferrium [®] PH48S [™]	11.5	9	7	1.4	0.6	0.4	Bal.

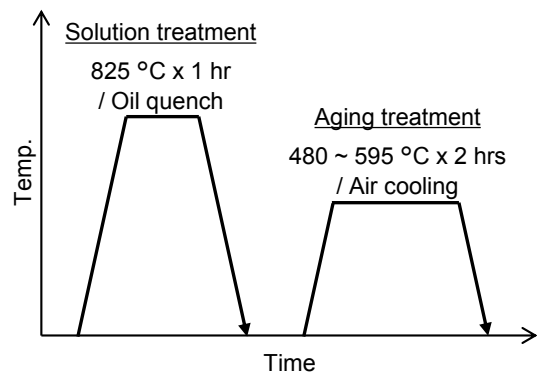


Fig. 1. Schematic diagram of heat treatment condition.

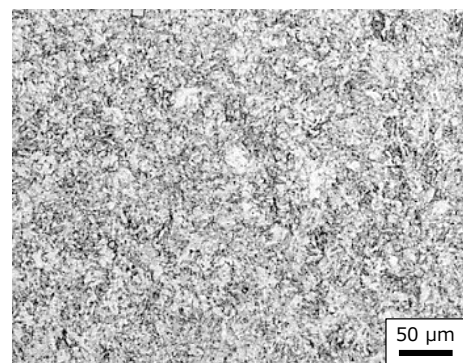


Fig. 2. Microstructure after aging treatment at 520 °C for 2 hrs.

2. 2 試験方法

硬さ試験はロックウェルC法を用い、JIS Z 2245に準

抛して実施した。引張試験は ASTM A370 に準拠し、試験部直径を 6.25 mm、標点間距離 G. L. = 32 mm の試験片を用い、室温にて評価した。シャルピー衝撃試験は JIS Z 2242 に準拠し、切り欠き部が 2 mm V ノッチの標準試験片を用いて室温にて評価した。塩水噴霧試験は JIS Z 2371 に準拠し、直径 15 mm、長さ 25 mm の円柱型の試験片を用い、35 °C、5% NaCl で最長で 192 時間実施した。酸浸漬試験は、室温にて 1% HCl 溶液および 5% H₂SO₄ 溶液にそれぞれ 6 時間浸漬し、その腐食度を測定することで評価した。

3. 結果および考察

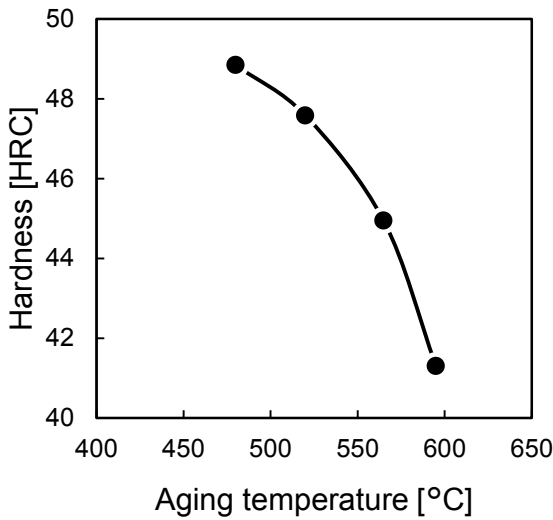


Fig. 3. Rockwell hardness of Ferrium® PH48S™ after aging treatment from 480 to 595 °C for 2 hrs.

3. 1 機械的特性

Fig. 3 に時効温度と硬さの関係を示す。時効処理後は、30 HRC であった固溶処理ままと比較して硬さに顕著な上昇が認められ、480 °C の時効において 49 HRC と最高の硬さを示す。時効処理後の硬さの上昇は、η 相 (Ni₃(Ti, Al)) の析出の影響によるものと考えられる³⁾。引張試験の結果およびシャルピー衝撃試験の結果を、それぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。520 °C での時効処理にて、引張強度および 0.2% 耐力はいずれも最も高い値を示した。520 °C 以上の時効温度では、時効温度の上昇に伴い引張強度および 0.2% 耐力は減少する。一方で、伸び、絞り、および衝撃値は、時効温度の上昇に伴い増加する。以上のように、必要に応じて時効温度を選択することにより機械的特性を調整可能である。Fig. 6 に、今回得られた 0.2% 耐力および衝撃値を既存の析出硬化型ステンレス鋼と比較した結果を示す。Ferrium® PH48S™ は既存の析出硬化型ステンレス鋼¹⁾ と比べると、0.2% 耐力は最高クラスであり、また、同等の 0.2% 耐力で比較したときの衝撃値が高く、強度 - 靱性バランスに優れた材料である。

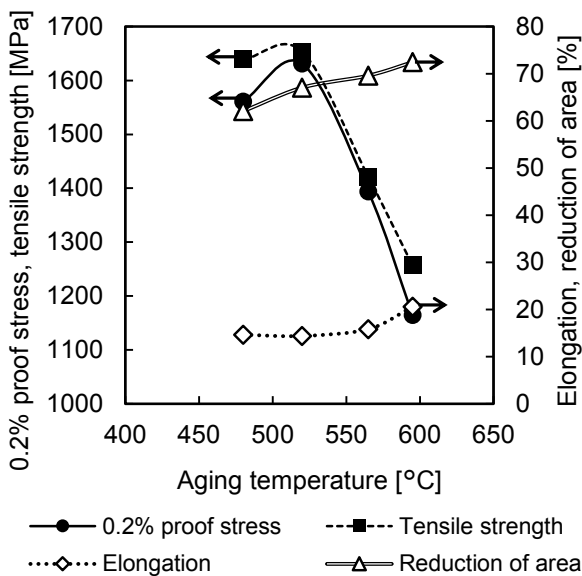


Fig. 4. Results of tensile test after aging treatment from 480 to 595 °C for 2 hrs.

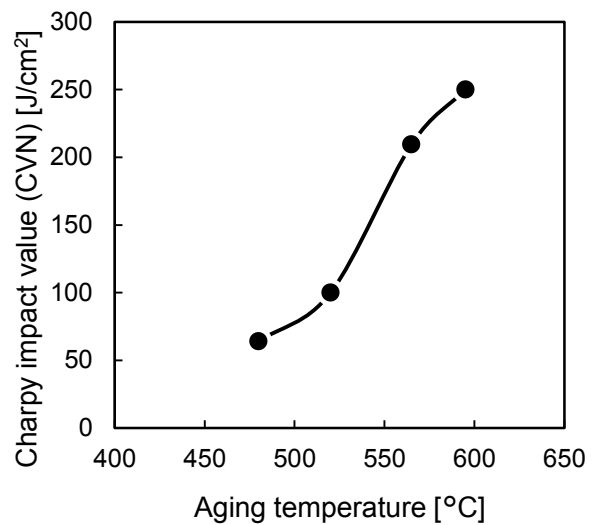


Fig. 5. Charpy impact value (CVN: Charpy V-notch specimens) after aging treatment from 480 to 595 °C for 2 hrs.

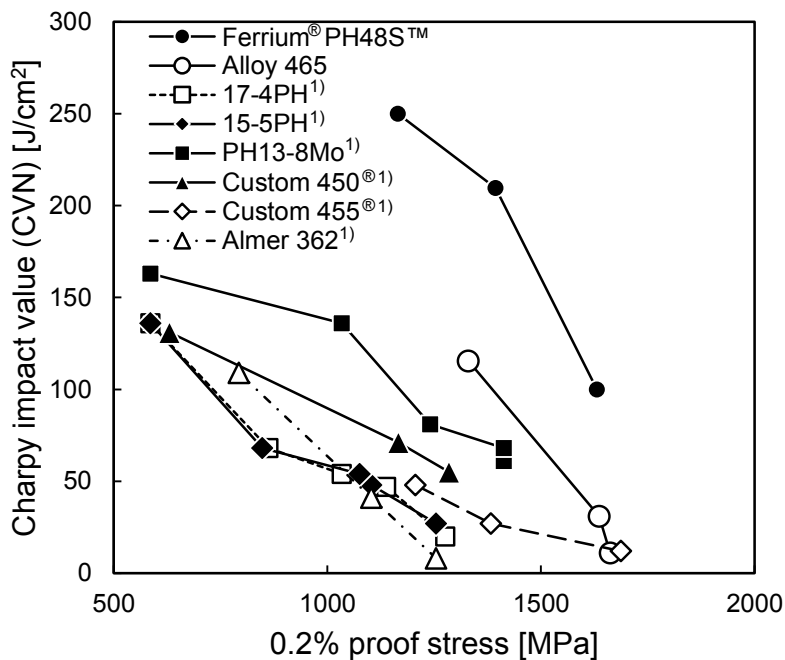


Fig. 6. Relationship between 0.2% proof stress and Charpy impact value (CVN: Charpy V-notch specimens) of various alloys after aging treatment¹⁾.

3. 2 耐食性

Fig. 7に Ferrium® PH48S™ の塩水噴霧試験後の外観を示す。Fig. 8に、比較のため、熱処理としてH900処理を実施した17-4PH、PH13-8Moおよびマルエージング鋼であるMAS1C、H1000処理を実施したAlloy 465、また730℃での焼戻し処理後のマルテンサイト系ステンレス鋼SUS403の塩水噴霧試験後の外観を示す。Ferrium® PH48S™ は、いずれの時効温度においてもわずかに発錆が認められ、17-4PHやPH13-8Moと比較すると若干劣るものの、著しい発錆が認められたMAS1CやSUS403と比較すると明らかに良好である。

Fig. 9およびFig. 10に、それぞれ1% HCl溶液および5% H₂SO₄溶液による酸浸漬試験の結果を示す。比較のため、熱処理としてH900処理を実施した17-4PHおよびPH13-8Mo、また、H1000処理を実施したAlloy 465についても同様の試験を実施した。Ferrium® PH48S™ の耐酸性はいずれの酸浸漬試験においても、時効温度が高いほど若干悪化する傾向にあるものの、塩酸に対してはいずれの時効温度においてもPH13-8MoやAlloy 465より良好である。Ferrium® PH48S™ の耐酸性は、いずれの酸に対しても17-4PHと比較すると劣るものの、従来の析出硬化型ステンレス鋼とおおむね同等程度で、一般的なマルテンサイト系ステンレス鋼やマルエージング鋼などと比較すると優れているといえる。

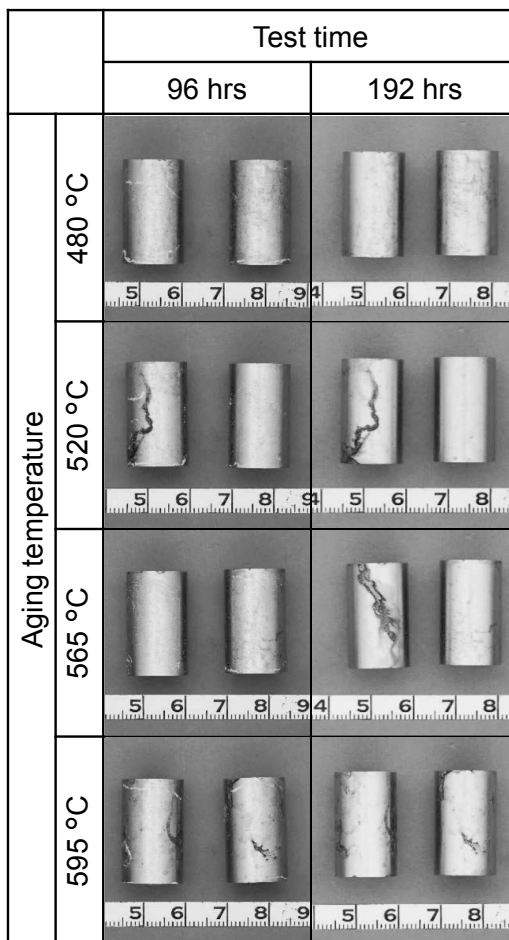


Fig. 7. Appearance photographs of Ferrium® PH48S™ after salt spray test (35 °C, 5% NaCl, 96 and 192 hrs).

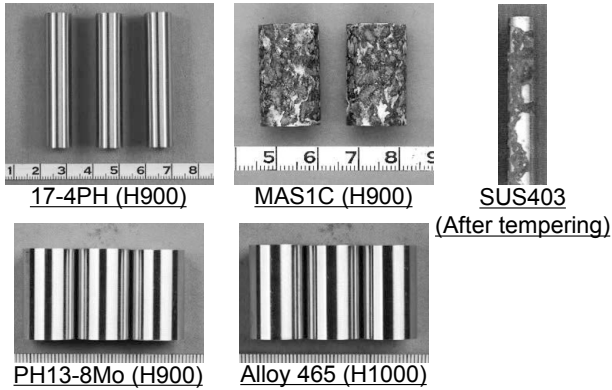


Fig. 8. Appearance photographs of 17-4PH, PH13-8Mo, MAS1C, Alloy 465 and SUS403 after salt spray test (35 °C, 5% NaCl, 96 hrs).

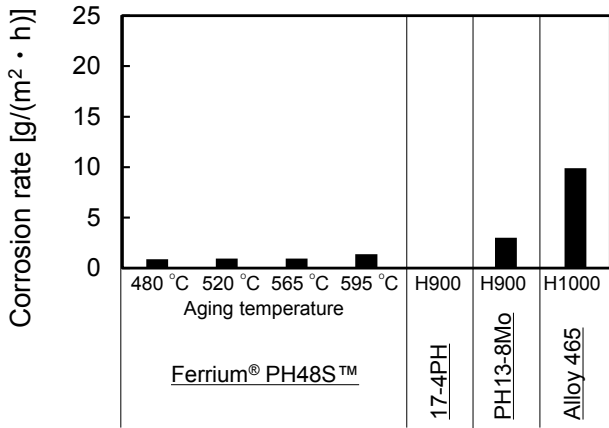


Fig. 9. Corrosion rate of hydrochloric acid immersion test (RT, 1%, 6 hrs) of Ferrium® PH48S™, 17-4PH, PH13-8Mo, and Alloy 465.

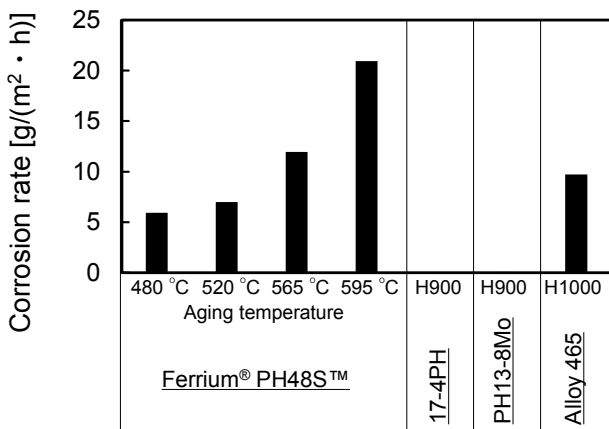


Fig. 10. Corrosion rate of sulfuric acid immersion test (RT, 5%, 6 hrs) of Ferrium® PH48S™, 17-4PH, PH13-8Mo, and Alloy 465.

4. 結 言

マルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼 Ferrium® PH48S™ を少量試作により評価し、得られた結果を元に、Fig. 11 に降伏応力と靱性の位置付けイメージを、Fig. 12 に降伏応力と耐食性の位置付けイメージを作成した。Ferrium® PH48S™ は、既存の析出硬化型ステンレス鋼に比べ非常に優れた強度-靱性バランスを有し、耐食性については、17-4PH には劣るものの、一般的なマルテンサイト系ステンレス鋼やマルエージング鋼などと比較すると良好である。

以上より、Ferrium® PH48S™ の優れた強度靱性バランスは部材の軽量化や小型化に貢献できる。さらに、マルテンサイト系ステンレス鋼やマルエージング鋼より耐食性が優れるため、耐食性向上のための表面処理が不要になる可能性があり、さまざまな分野での貢献が期待される。

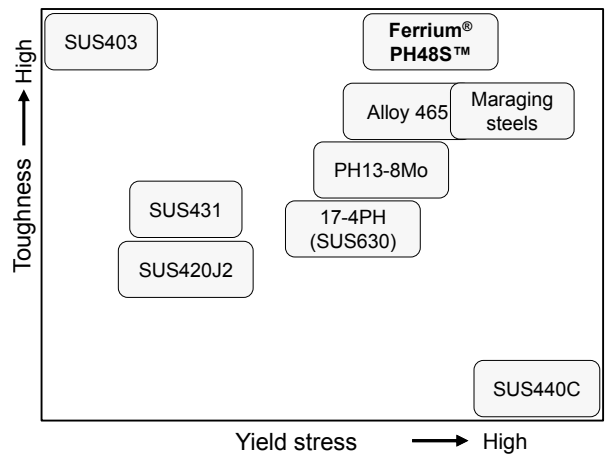


Fig. 11. Schematic image of positioning of yield stress and toughness.

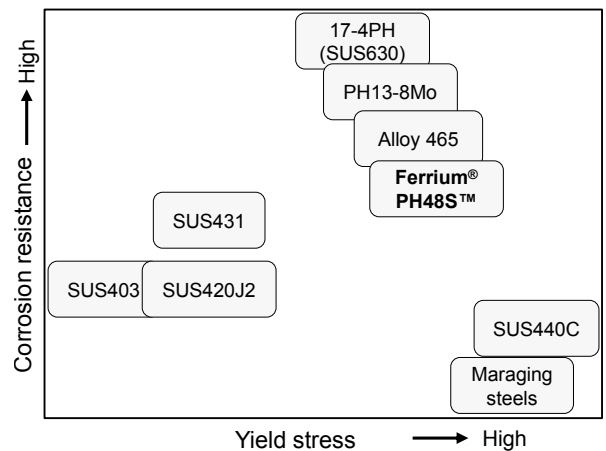


Fig. 12. Schematic image of positioning of yield stress and corrosion resistance.

- ※ Ferriumは QuesTek Innovations LLCの登録商標です.
- ※ DSRは大同特殊鋼株の登録商標です.
- ※ Custom 450, Custom 455, Custom 465は Carpenter Technology Corporationの子会社である CRS Holdings Inc.の登録商標です.

(文 献)

- 1) ステンレス協会 編: ステンレス鋼便覧 第3版, 日刊工業新聞社, 1995, 640.
- 2) G. B. Olson and C. J. Kuehmann: Scr. Mater., 70(2014), 25.
- 3) C. J. Kuehmann and G. B. Olson: Mater. Sci. Technol., 25(2009), 4, 472.
- 4) G. Pioszak: CHARACTERIZATION OF STRESS CORROSION CRACKING(SCC) IN ULTRA-HIGH STRENGTH STAINLESS STEEL, (2013).
- 5) QuesTek Innovations LLCデータシート「Ferrium® PH48S™」, (2012), 1.



高橋伸幸



古庄千紜



小柳禎彦



Kerem Taskin