

Ni 基超合金 LTES700R 製 A-USC タービンロータの特性評価

Production and Evaluation of 10-ton Class A-USC Turbine Rotor of Ni-Base Superalloy LTES700R



田中 遼司*
Ryoji Tanaka



博士(工学) 高澤 孝一*
Dr. Koichi Takasawa



呉 晃宇*
Terutaka Kure



博士(工学) 高橋 達也*
Dr. Tatsuya Takahashi



松尾 朝春**
Asaharu Matsuo



遠藤 裕之**
Hiroyuki Endo



西本 慎**
Shin Nishimoto



博士(工学) 山本 隆一***
Dr. Ryuichi Yamamoto

要 旨

低熱膨張 Ni 基超合金 LTES700R を用いて先進超々臨界圧火力発電 (Advanced-Ultra Super Critical: A-USC) 用タービンロータを製造し、引張・衝撃特性、および超音波探傷試験における超音波透過性を評価した。真空誘導溶解とエレクトロスラグ再溶解のダブルメルト法により $\phi 1050\text{mm}$ 、長さ 2800mm 、重量約 20 トンのインゴットを溶製し、これを 14000 トン自由鍛造プレスで鍛錬して約 10.5 トンの LTES700R ロータ素材を製造した。この素材に溶体化熱処理を施し、大径部 ($\phi 1124\text{mm}$)、小径部 ($\phi 778\text{mm}$) の 2 部材に分割したのち共材溶接により一体化し、さらに軸部に 12Cr 系耐熱鋼 MTR10A を異材溶接で接合することにより A-USC 回転試験用タービンロータの製造に成功した。

時効熱処理、および溶接部の溶接後熱処理を施したのち、ロータの Bottom、Top 側、および表層から軸心の各部位から採取した試験片で室温と 700°C での引張試験を実施した。結果としては、いずれの位置においても優れた強度と伸び、絞り が得られ、良好な引張特性を有していることを確認した。同様に衝撃試験においても優れた室温靱性を備えていることを確認した。また、表層から軸心の結晶粒度は 3 から 4 程度であった。超音波探傷試験における最小検出可能欠陥サイズは大径部、小径部ともに $\phi 1.6\text{mm}$ 以下であり、高い超音波透過性を有することを確認した。 700°C におけるクリープ試験においては、ロータ使用上の目安となる 10 万時間破断強度 100MPa 以上を確保できる見込みを得た。今回の特性評価により、引張・衝撃特性および超音波の透過性に優れた LTES700R 製 A-USC 用タービンロータの製造が可能であることを実証した。

*: 室蘭製作所
Muroran Plant

** : 三菱日立パワーシステムズ
Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.

*** : 三菱重工業
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

— Synopsis —

Ni-base superalloy LTES700R turbine rotor for advanced-ultra supercritical (A-USC) power generation was produced, and its microstructure, tensile, impact, and creep properties were evaluated. 10-ton class rotor forging was successfully produced through the double melting process, which is the vacuum induction melting (VIM) followed by the electroslag remelting (ESR), and open-die forging with a 14,000 ton hydraulic press. Fine grain microstructure of which grain size number was approximately 3 to 4 at the surface and the center of the rotor, this result indicated that the conditions of the forging and solution heat treatment were appropriate. Fine grain microstructure improved the permeability of the ultrasonic wave in the ultrasonic inspection test, resulting in minimum detectable flaw size (MDFS) of under 1.6mm. The tensile strength at 700 °C was adequate, without large difference among the position in the rotor. The creep test at 700 °C revealed that the 10^5 h rupture stress at 700 °C was estimated to be sufficiently higher than 100 MPa, which is thought as an industrial target in service. The results of the present production expressly demonstrated that it is possible to manufacture 10-ton class A-USC turbine rotors of LTES700R with excellent mechanical properties and good permeability of the ultrasonic wave.

1. 緒 言

主蒸気温度を 700°C 以上にした先進超々臨界圧火力発電 (A-USC) は次世代の高効率発電技術として期待されており、10% (20 百万トン/年) 近くの CO₂ 削減が可能であると考えられている。この A-USC 技術は欧州を中心に 1998 年より開発が開始されている。近年は中国、インドでも開発が検討されているなど、世界的な開発競争に入っている。このような状況の中、日本国内においては、2008 年度からスタートした「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」プロジェクト内において、700°C 超級 A-USC プラントの実現を目指した材料開発が進められている⁽¹⁾。

主要部材であるタービンロータでは、一般的に使用されているフェライト系耐熱鋼では 630°C 前後が耐熱温度の限界と考えられており、700°C 級の蒸気温度に対してはオーステナイト鋼でも強度不足とされる。従って図 1 に示すように A-USC タービンロータの材料にはオーステナイト鋼よりも更に高い高温強度を有する Ni 基超合金の適用が不可欠となる。更に、A-USC タービンロータは 700°C 以上の高温の蒸気に晒される上、700°C における 10 万時間クリープ破断強度が 100MPa 以上という厳しい特性が要求される。また、Ni 基超合金は変態を利用して結晶粒径をコントロールすることができず、著しい粗大粒が残存してしまう可能性がある。粗大粒が残存すると超音波の反射源となり、良好な超音波の透過性が得られない。以上から Ni 基超合金は大型化が難しく、A-USC プラントの実現には Ni 基超合金の大型タービンロータの開発が重要なカギを握る。

当社ではこれまで、Ni-Fe 基超合金 FENIX-700 を用いて 10 トン級 A-USC タービンロータを試作した実績がある⁽²⁾。同ロータの製造においては鍛造条件の適正化により結晶粒を微細にし、優れた強度-延性バランスと超音波探傷試験における超音波の透過性を確保することに成功している。今回はその知見を活かし、低熱膨張 Ni 基超合金 LTES700R 製 10 トン級 A-USC タービンロータを製造したので、特性評価結果と併せて紹介する。

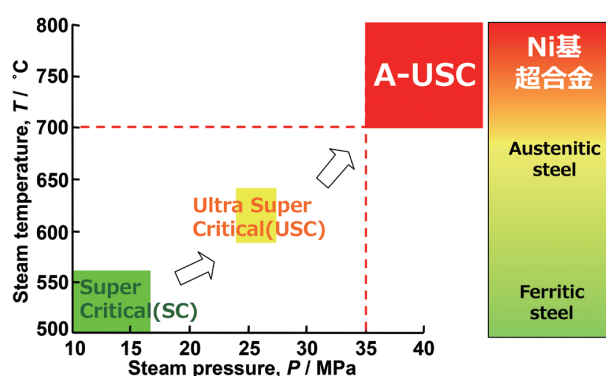


図 1 蒸気温度に対する主要材料

2. LTES700R タービンロータ製造

LTES700R は大型部材への適用を目標に開発された Ni 基超合金⁽³⁾であり、Ni-12%Cr-6%Mo-7%W-Al-Ti (％は mass%) を主な組成とする。高温強度が高く、線膨張係数が小さいのが特徴である。A-USC タービンロータの構成としては、高価な Ni 基超合金の適用範囲を極力低減すべく、高温部の Ni 基超合金と低温部の 12Cr 鋼を組み合わせた溶接ロータが想定されている。12Cr 鋼に近い線膨張係数を有する LTES700R は高 Cr 鋼との異材溶接に関して溶接部残留応力の観点から有利である。

図 2 に LTES700R タービンロータの製造工程の概略を示す。素材となるインゴットは真空誘導溶解 (VIM) およびエレクトロスラグ再溶解 (ESR) のダブルメルト法によりφ 1,050mm、長さ 2,800mm、重量約 20 トンの LTES700R インゴットを溶製した。図 3 に ESR インゴットの外観を示す。このインゴットの casting 組織を破壊し適正な内部組織を造り込むため、14,000 トン自由鍛造プレスで鍛造した。鍛造性は非常に良好であり、鍛造中に著しい割れなどの発生はなく計画形状を確保できた。鍛造後は 1100°C で溶体化処理を施し、機械加工を経て約 10.5 トンの素材を製造した。図 4 に LTES700R タービンロータ素材の外観を示す。

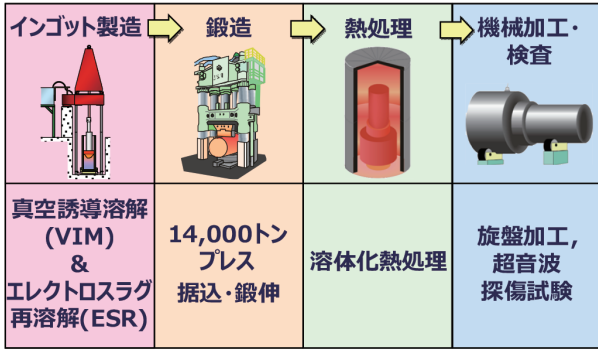


図2 LTES700R タービンロータ素材の製造工程の模式図



図3 LTES700R、ESR インゴットの外観写真



図4 LTES700R タービンロータ素材の外観写真

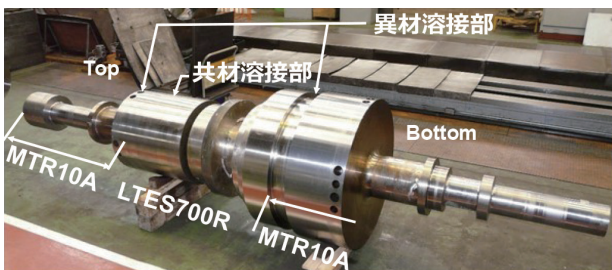


図5 A-USC 回転試験用タービンロータの溶接一体化後外観写真

この素材を最大径がそれぞれφ1,124mmとφ778mmの大径部と小径部の2部材に分割し、これらを共材溶接により一体化し時効熱処理を施した。時効熱処理後、ロータ外表面から超音波探傷試験を行い、大径部および小径部における超音波の透過性を評価した。この後、軸部に12Cr系耐熱鋼 MTR10Aを異材溶接することにより、A-USC 回転試験用タービンロータの製造に成功した。図5に溶接一体化後の外観、図6にブレード取付後の外観を示す。以下、本文中のロータとは LTES700R 部を指す。

機械的特性評価およびマイクロ組織観察用の試験片は溶体化熱処理後のロータ各部から採取し、時効熱処理と溶接後熱処理を模擬した熱処理を施した。その後機械試験片に加工し、引張、衝撃、クリープ、およびマイクロ組織観察の各試験に供した。図7にチェック分析用サンプル採取位置、および表1にチェック分析結果を示す。チェック分析はロータ各部において実施し、各成分ともに著しい差は認められず、均質な組成であることを確認した。



図6 A-USC 回転試験用タービンロータ (溶接一体化後) のブレード取付時外観写真

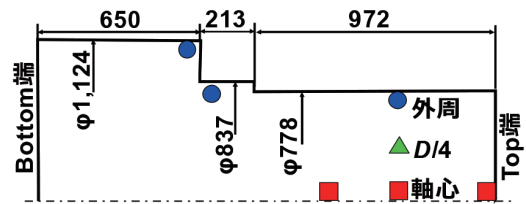


図7 チェック分析用サンプル採取位置 (単位 mm、Dはロータ直径)

表1 LTES700R 製タービンロータの化学組成 (mass %)

| | Ni | C | Cr | Mo | W | Al | Ti |
|-----|------|-------|-------|------|------|------|------|
| 外周 | Bal. | 0.028 | 11.94 | 6.27 | 6.92 | 1.65 | 0.63 |
| | Bal. | 0.026 | 11.91 | 6.18 | 6.97 | 1.64 | 0.61 |
| | Bal. | 0.029 | 11.88 | 6.18 | 6.90 | 1.61 | 0.62 |
| D/4 | Bal. | 0.028 | 11.77 | 6.10 | 7.06 | 1.61 | 0.59 |
| | Bal. | 0.026 | 11.85 | 6.16 | 7.06 | 1.64 | 0.61 |
| | Bal. | 0.027 | 11.96 | 6.28 | 6.75 | 1.60 | 0.64 |
| 軸芯 | Bal. | 0.027 | 11.96 | 6.28 | 6.75 | 1.60 | 0.64 |
| | Bal. | 0.025 | 11.91 | 6.12 | 6.98 | 1.61 | 0.60 |

3. 特性評価結果

図 8 に代表位置におけるマイクロ組織の光学顕微鏡観察結果を示す。図中の下線をつけた数値はその位置の結晶粒度番号であり、数値が大きいほど細粒であることを示す。大径部の軸芯に若干の粗粒部が認められたが、概ね外周、軸芯ともに結晶粒度番号は 3～4 であった。これは同じく LTES700R の中・小型試験材の結晶粒⁽⁴⁾と同等の整細粒であり、大型化しても良好な金属組織であることを確認した。これは鍛造工程における温度やひずみ量、および溶体化熱処理条件が適正であったことを示している。超音波探傷検査における本品の最小検出可能欠陥サイズ (MDFS)

は、時効熱処理後において大径部および小径部で 1.6mm を下回り、超音波の透過性は良好であった。本品における良好な超音波透過性は上述の整細粒組織に起因している。

図 9 に機械試験の試験片採取位置を示し、図 10～図 13 に室温および 700℃における各位置の引張試験結果を示す。なお、図 10～図 13 の破線は中・小型試験材の実績⁽⁴⁾を示す。室温、高温共に強度および延性は中・小型試験材の実績と同等であり、部位による差も小さかった。図 14 に室温における各位置のシャルピー吸収エネルギーを示す。これも中・小型試験材と同等であり、良好な室温靱性であることを確認した。(中型試験材：φ 845 × 850mm、小型試験材：φ 910 × 235mm)

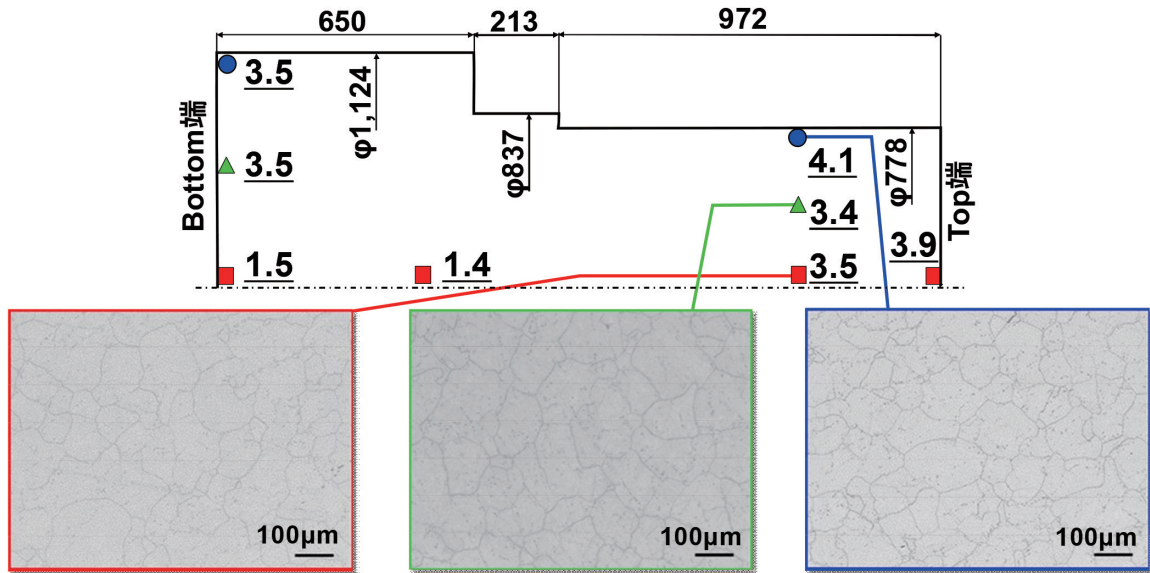


図 8 LTES700R タービンロータのマイクロ組織 (下線部は結晶粒度番号)

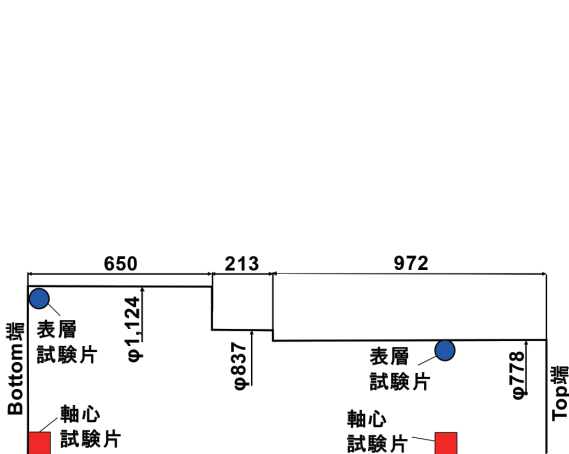


図 9 機械試験の試験片採取位置

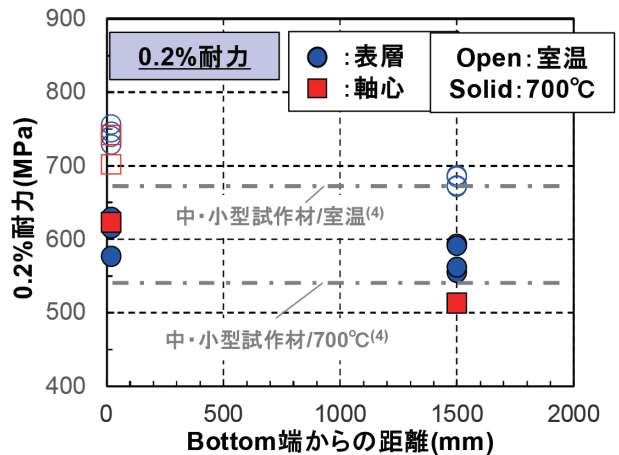


図 10 室温および 700℃における 0.2% 耐力

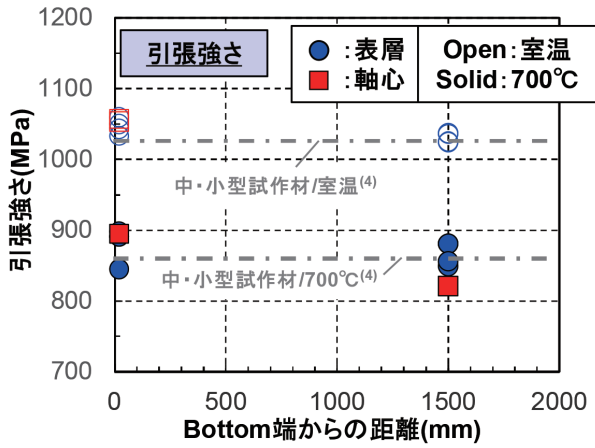


図 11 室温および 700°C における引張強さ

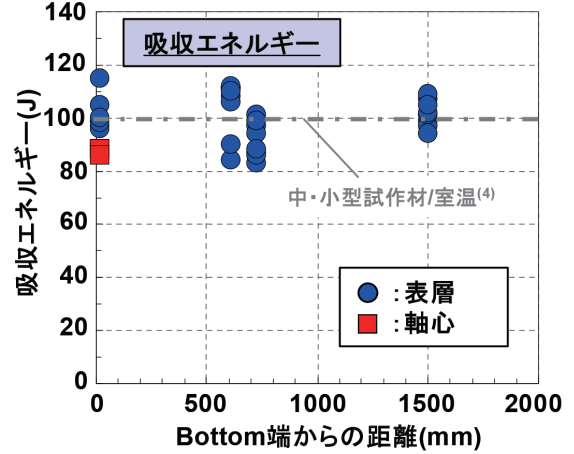


図 14 室温における吸収エネルギー

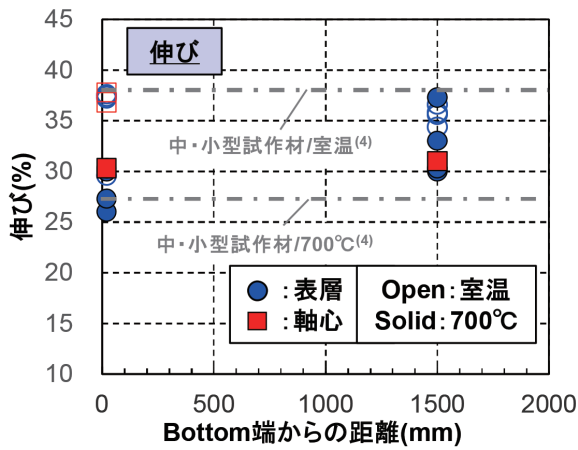


図 12 室温および 700°C における伸び

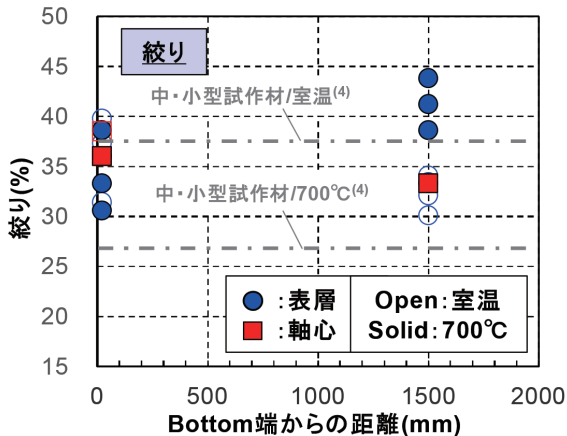


図 13 室温および 700°C における絞り

また、図 15 に 700°C におけるクリープ試験結果を示す。LMP (ラーソン・ミラー パラメーター) は異なる温度 T (K) と破断時間 t_r (h) のクリープ試験結果の比較に用いる経験的パラメータである。

本ロータのクリープ強度は中・小型試験材の結果⁽⁵⁾と同等の結果であり、大型化しても優れたクリープ強度を有し、ロータ使用上の目安となる 700°C、10 万時間破断強度 100MPa 以上を確保できる見込みを得た。

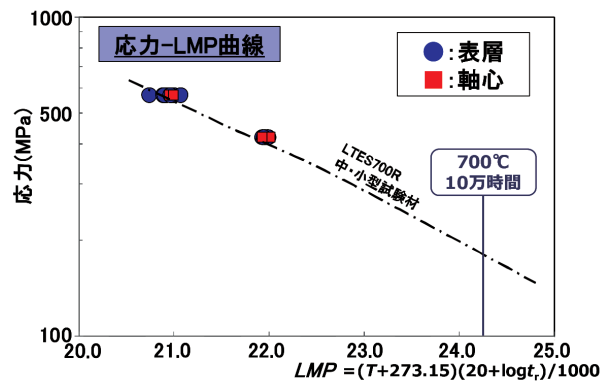


図 15 700°C におけるクリープ試験結果

4. 結 言

低熱膨張 Ni 基超合金 LTES700R のインゴットを溶製し、10 トン級 A-USC 回転試験用タービンロータ素材を製造し特性を評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) VIM と ESR のダブルメルト法、14,000 トン水圧プレスを用いた鍛造工程、および 12Cr 耐熱鋼との異材溶接により、10 トン級の LTES700R 素材を胴部とする A-USC タービンロータの製造に成功した。
- (2) 整細粒組織により、MDFS が ϕ 1.6mm 以下の良好な超音波透過性を有することを確認した。
- (3) 優れた高温強度・延性と室温韌性を備えることを確認した。
- (4) 700℃・10 万時間におけるクリープ破断強度は 100MPa を超える見込みを得た。

本品の製造を通じて、優れた超音波透過性と機械的特性を具備する 10 トン級 LTES700R ロータ素材の製造が可能であることを実証した。A-USC 発電技術は 2020 年以降に見込まれている国内既設火力発電設備の更新における候補技術として期待されており、今後はより高品質、低コストを実現できる製造技術の確立を目指す。

参 考 文 献

- (1) M. Fukuda et al.: Advances in Material Technology for Fossil Power Plants Proceedings from the Eighth International Conference Oct. 11-14, 2016, Albufeira, Algarve, Portugal
- (2) 高澤ら: 日本製鋼所技報, No.64 (2013.10), (R1-1 ~ 8)
- (3) R. Yamamoto et al.: Proc. of 5th Int. Conf. on Advances in Material Technology on Fossil Power Plants, (2007), 3B-04.
- (4) R. Yamamoto et al.: Advances in Material Technology for Fossil Power Plants Proceedings from the Seventh International Conference Oct. 22-25, 2013, Waikoloa, Hawaii, USA, 468-481.
- (5) 中村ら: 三菱重工技報, Vol.48, No.3, (2011), 8-15.