600 °C 級 1 000 MW 級蒸気タービンロータ材の開発

Development of Rotor Material for 600 °C Class 1 000 MW Class Steam Turbine

> 智*1 明 次*2 技術本部 鎌 田 政 Ħ 尾 春*3 原動機事業本部 松 朝 長崎造船所 Ħ 宏*' 棤 **郎***5 高砂製作所 辻 藤 夫* 東京大学 田 利

火力発電プラントの高温化に対応するため、三菱重工業(株)では最新の12Crロータ材TMK2 (10.5Cr 1.8W 0.4MoVNbN) を開発した。開発の最大のポイントはクリープ破断強度を高めることであり、成分的にはMo当量(Mo%+1/2W%)を1.0 ~1.5とし、かつ W/Mo 比を3以上に制御することでこれを達成した。このような材料的な最新技術を基に、600℃級の主蒸気 及び 610℃級の再熱蒸気を世界的にも初めて採用した1000 MW 級大容量タービンが計画され、中国電力(株)三隅1号ユニット 等に採用されることになった。タービンの製作は現在も進行中であるが、本報では、すでに製造を完了した高圧ロータ素材 (TMK 2) についての材料試験結果を詳述する。

In order to raise the steam temperature of the Mitsubishi USC (ultra-supercritical) turbine, an advanced 12 Cr rotor steel of TMK 2 (10.5 Cr 1.8 W 0.4 MoVNbN) was developed. The key factors in upgrading the creep rupture strength of TMK 2 are to adjust the equivalent molybdenum content in the range of 1.0 to 1.5% and the ratio of wolfram to molybdenum in the range over 3. Based on these current material technologies, a 1 000 MW class turbine was designed to which 600°C class main steam and 610 °C class reheat steam temperature were applied for the first time in the world, as the Misumi No.1 Unit of the Chugoku Electric Power Co.,Inc., for example. An HP rotor of TMK 2 has already been produced and verification researches have been carried out. This paper reports the results of the verification researches in detail.

1. はじめに

火力発電プラントの高効率化を進めるためには蒸気温度や蒸気 圧力を上げることが最も基本的な方法である⁽¹⁾. すでに三菱重工 業(株)では、12Cr ロータ材 TMK1(10.2Cr1.5MoVNbN) の開発により蒸気温度条件 593/593℃の超高温タービンを実用化 するに至っている^{(2)~(4)}.

その後も、タービンロータ材の高温強度特性向上を目的とした 開発研究は継続して実施されている。その結果の一つとして、 TMK1の材料設計概念を保ちながら、強化元素としてWを新 たに添加した最新ロータ材 TMK2が開発された⁽⁵⁾⁽⁶⁾.このよう な材料技術に加えて最新の設計技術を組合せることで、600℃級 の主蒸気温度及び 610℃級の再熱蒸気を世界に先駆けて採用した 1 000 MW 級ユニットの製造が可能になった⁽⁷⁾.

高圧ロータ素材(TMK2)の製造はすでに完了しており,製造方法はTMK1ロータのそれに準じている.ただし焼戻しに関しては,従来から高温でかつ多段処理を行い長時間クリープ破断強度の確保を図っている.得られたロータ素材については,各位置から試験材をサンプリングし,成分分析,組織観察,材料試験等の確性試験を実施した.得られた結果はいずれも良好であり, 健全なロータ素材であることを確認している.

2. 実機ロータ素材の製造

図1に実機ロータ素材の製造プロセスを示す.まず,厳選された原材料用スクラップをアーク溶解したのち,不純物やガス成分



の除去を進めるためにとりべ精錬と真空カーボン脱酸処理 (Vacuum Carbon Deoxidization: VCD)を施している。溶鋼は 合金成分の調整後,エレクトロスラグ再溶解(Electro Slag Remelting: ESR) 用の電極形状に鋳込まれ,ESR 処理を経て最 終的には直径1500 mm, 重量 55 t のインゴットを得た。ESR 処 理では溶鋼がインゴット下部から徐々に一方向凝固されるため,

Chemical composition of rotor material at various regions (v													
	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	W	N
X-1	0.12	0.07	0.47	0.008	0.001	0.03	0.51	10.59	0.37	0.17	0.045	1.84	0.052
X-2	0.11	0.06	0.48	0.007	0.001	0.03	0.51	10.61	0.37	0.18	0.045	1.84	0.050
X-3	0.11	0.06	0.48	0.007	0.001	0.03	0.50	10.52	0.36	0.18	0.043	1.84	0.049
X-4	0.11	0.06	0.48	0.007	0.001	0.03	0.51	10.57	0.37	0.18	0.045	1.83	0.051
C-1	0.12	0.07	0.47	0.007	0.001	0.03	0.53	10.49	0.38	0.18	0.043	1.82	0.050
C-2	0.12	0.06	0.47	0.006	0.001	0.03	0.52	10.49	0.38	0.18	0.045	1.83	0.050
C-3	0.12	0.06	0.47	0.006	0.001	0.03	0.52	10.48	0.37	0.18	0.044	1.83	0.049
C-4	0.11	0.05	0.47	0.006	0.001	0.03	0.51	10.40	0.36	0.18	0.040	1.84	0.049

表1 ロータ素材の化学成分分析結果



図2 油焼入れ直前のロータ素材 Rotor material just before oil quenching

合金元素の偏析抑制やザク性欠陥の低減が期待できる.

続いて据込や鍛伸の熱間鍛造工程にてインゴットを鍛錬したの ち、ロータ形状に仕上鍛造して熱処理に供している.

熱処理では、溶体化後、油焼入れし、続いて多段階の焼戻しを 施している。図2には、油焼入れ直前のロータ素材の状況写真を 示す。

素材の強度特性は、焼戻し過程の中で最も温度が高い処理でほ ぼ決定されるが、さらに本ロータは、長時間のクリーブ破断強度 を確保するために焼戻しを多段階に分けて実施して、炭窒化物の 析出を十分に進めるとともにこれを安定化させている.

熱処理終了後,最終的には切削加工によって図3に示す形状 (最大径は960mm,長さは約7000mm)にロータ素材を仕上げ た.なお,図3には確性試験に用いた試験材の採取位置も併せて 示している.



Configuration of rotor material after machining

3. 確性試験結果

3.1 化学成分分析

表1にロータ素材の各位置から採取した試験材の化学成分分析 結果を示す.

一般的に大型インゴットの造塊過程では、炭素や窒素などの軽い元素が最終凝固部となるインゴットの中央部トップ側に偏析しやすい.しかし、例えば X-1 (外周部のボトム側)と C-4 (中央部のトップ側)の成分分析結果を比較すれば明らかなように、本ロータ素材ではこのような偏析傾向は全く認められない.また、原子量が大きいため重量偏析が懸念される W についても調査位置による濃度変動はほとんどなく、その他の合金元素も総じて均一な分布状態である.これは造塊過程において ESR プロセスを採用し、各種合金元素の偏析を抑制した結果である.

次に不純物元素である P や S は、クリープ破断強度特性や焼 戻し脆化挙動に悪影響を及ぼすため、極力低減することが望まし い.本ロータ素材では、工業的生産における最も低いレベルに含 有量が抑制されている。表1に記載していないその他の不純物に ついても、0.001~0.004 wt % Al (以下、wt % は単に%と記 す)、0.001 % Sn、0.0005 % Sb、0.002 % As であり、これら も工業的に最も低いレベルを確保している。

3.2 金属組織

図4に中心孔から採取した試験材の断面のマクロ組織を示す. 一般に 12 Cr 鋼の大型インゴットの中心部には網目状偏析が生じ やすい. 図4は,これを検出するためにハムフレイ氏液で腐食を 行った結果であるが,網目状偏析は全く認められない.また,高 温強度特性や靭性に有害なるフェライトも観察されていない.

このように均質なマクロ組織が得られた理由として、二つの点 が挙げられる。--つは ESR プロセスによる合金元素の均一分散 であり、もう一つは各種強化元素の添加効果を保ちながら、次式 で示される Cr 当量を極力下げる方向で調整した適切な材料成分 設計である。



図4 中心孔から採取した試験材のマクロ写真 材質特性に有害な網目 状偏析やるフェライトは観察されない. Macro-structures of rotor material at center core

Microstructures of rotor material

均質な焼戻しマルテンサイト組織に制御されてい



表2 ロータ素材の引張試験、衝撃試験結果 Result of tensile and impact testing performed with rotor

 $Cr \cong \equiv \% Cr + 6(\% Si) + 4(\% Mo) + 1.5(\% W)$

+11(% V) + 5(% Nb) - 40(% C) - 2(% Mn)

-4 (% Ni) -30 (% N)

例えば、ロータの中心孔から採取した試験材のCr当量は 8.0~8.3 であり、これまでの12 Cr 鋼ロータ(TMK1製ロー タ)の製造実績に基づいて判断すると、この値は & フェライト の抑制に対して十分に低い.

図5にロータ素材の外周部及び中心孔から採取した試料の光学 顕微鏡写真を示す.いずれの場所でも組織は均質な焼戻しマルテ ンサイトに制御されており,局所的に観察してもるフェライト は出現していない.また,結果の詳細は省略するが,サルファプ リントの結果でも偏析は全く認められなかった.これはS量を 0.001~0.002%という非常に低いレベルにまで抑制したためで ある.

3.3 機械的特性

表2にロータ素材の各位置から採取した試験材について,室温 引張試験,衝撃試験(2mm V ノッチシャルピー試験)を行った 結果を示す.強度特性には試験材の採取位置によるばらつきが若 干認められるが,値自体は目標の範囲内にあり,ばらつきについ ても特に問題となる程度のものではない.伸び,絞りについては, ばらつきがほとんどなく,値自体も十分に高い.室温衝撃吸収エ ネルギーは素材の中心孔部に比べて外周部がやや劣っているが,



強度 破断強度は設計応力値より高い値で推移しており、 600℃級の蒸気温度にも十分耐えうる素材であることを示 唆している。

Relation between designed strength and creep rupture strength of 12 % Cr rotor material

それでも衝撃特性の目安となる 50 % FATT (Fracture Appearance Transition Temperature) は 23 ℃以下という十分に低い 値である.

図6に,Larson-Miller パラメータで整理したクリープ破断試 験結果を示す.試験は平滑及び切欠試験片を用いて550,600, 650℃にて行っている.同図中には,600℃級対応実機高圧ロー タの設計応力(適切な安全率を考慮した値)を併記している.ク リープ破断強度は設計応力値より高い値で推移しており,610℃ 級の蒸気温度にも十分耐え得るロータ素材であることを示唆して いる.また,同一破断時間で比較した場合,切欠試験の破断強度 は平滑試験の強度より高く,いわゆる切欠弱化の傾向も認められ ない.

このように優れたクリープ破断強度特性を確保できた主たる理 由は、Wを中心とした各種強化元素の適切な添加である。W添 加による強化機構については、現在、諸説が提案され学会等でも 討論されている段階であるが、本ロータ素材については、最も一 般的な解釈である固溶強化機構に加えて、Wにより Nb(CN)等 の析出物の分散を微細化する効果⁽⁰⁾も特性向上に寄与していると 考えられる。

このほか、高温引張試験、クリープ試験、等温長時間保持脆化

試験,疲労亀裂伝ば試験,破壊靭性試験等を実施済みであり,い ずれも良好な結果を得ている.

4. おわりに

600 ℃級の主蒸気を採用した1000 MW 大容量タービンの高圧 ロータ素材(TMK 2)について、各種材料試験を実施し素材の 健全性を評価した.

(1) 合金元素は素材中に均一に分布しており、各種不純物元素の

- (1) 宮沢正樹ほか,超々臨界圧発電と材料開発,金属56-1 (1986) p.9
- (2) Fujita, T. et al., An Advanced 12 Cr Steel Rotor (TMK 1) for EPDC Wakamatsu's STEP 1 (593/593 °C), COST-EPRI Workshop 9-12 Cr Steel for Power Generation (Schaffhausen, Schweiz) (1986)
- (3) Hizume, A. et al., An Advanced 12 Cr Steel Rotor Applicable to Elevated Steam Temperature 593 °C, J. Eng. Mat. & Tech. Vol.109 (1987) p.319
- (4) Furuya, K. et al., Wakamatsu High-Temperature Turbine Verification Test Project, JSME Int. J. Series II Vol.

含有量も工業的に最も低いレベルにある.

- (2) 組織は均質な焼戻しマルテンサイトに制御されており、マク ロ組織や光学顕微鏡組織を調査しても材質特性に有害なるフ ェライトや網目状偏析は観察されない.
- (3) 引張試験やクリープ破断試験をはじめとする材料試験結果は いずれも良好であり、問題点は認められない.

以上の結果から、本ロータ素材は極めて健全に製造されている ことが明らかになった.

- - 34 (1991) p.564
- (5) Hizume, A. et al., The Probability of a New 12 % Cr Rotor Steel Applicable for Steam Temperature above 593 °C, Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, ASM Int. (1987) p.143
- (6) Furuya, K. et al., Advanced 12 Cr Steel Rotors Developed for EPDC Wakamatsu's Ultra High Temperature Turbine Project, The 2nd Int. Conf. on Improved Coal-Fired Power Plants, Palo Alto, USA (1988)
- (7) 小原一郎ほか,600 ℃級1000 MW 蒸気タービンの計画,三 菱重工技報 Vol.32(1995) p.8

老文献

