

大型地熱蒸気タービンを実現する新ロータ材料

Newly Developed Material for Realization of Large-Scale Geothermal Steam Turbines

閻 梁 山田 政之 和田 一宏

■ YAN Liang

■ YAMADA Masayuki

■ WADA Kazuhiro

近年、再生可能エネルギーの一つとして地熱発電が注目されており、地熱発電用蒸気タービンの単体出力や機器サイズも増大しつつある。

東芝は、最大重量が50 t級の大型地熱蒸気タービンロータ用素材に適用できる、優れた焼入れ性^(注1)、強度と靱性(じんせい)、及び耐応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)^(注2)性を持ち、かつ鋼塊中心部の炭素(C)偏析^(注3)を低減できる材料を開発した。砂型鋼塊の試作により製造性を検証した後、開発材料を実機に適用して、地熱発電所向けの大型地熱蒸気タービンロータを製造することに成功した。

Geothermal power generation has been attracting attention in recent years as a renewable energy resource, and demand has arisen for increases in the size and output of individual geothermal steam turbine units accompanying the expansion of large-scale geothermal power plants.

Under these circumstances, Toshiba has developed a new material for large-scale geothermal steam turbine rotor shafts with a maximum weight in the 50-ton class. This material has the properties of excellent hardenability, high strength, high toughness, high stress corrosion cracking (SCC) resistance, and less center segregation of carbon in the steel ingots. We have verified the manufacturability of the newly developed material in the form of an 8-ton sand mold ingot, and successfully applied it to the manufacturing of geothermal steam turbine rotor shafts for large-scale geothermal power plants.

1 まえがき

地熱発電は、掘削によって地下深層部から天然蒸気を取り出して蒸気タービンを回す発電方式で、温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)排出量が石炭火力発電の約1.5%と非常に少ない。このため、特に近年、世界的に地熱発電の開発が進み、現在では世界の地熱発電容量は既に電気出力12 GWeに迫っている。

東芝は、わが国初となる岩手県松川地熱発電所^(注4)(図1)に地熱蒸気タービンと発電機を1966年に納入して以来、腐食性ガスなど地熱発電特有の環境における機器の性能向上や信頼性向上に努め、米国カリフォルニア州のガイザース地熱発電所に北米向けの初号機を1971年に納めた。その後、東南アジアや、ニュージーランド、アイスランドなど世界各国に約3 GWeの地熱発電設備を納入し、世界の地熱発電容量トップ^(注5)の24%のシェアを占めている⁽¹⁾。

近年では、再生可能エネルギーの需要が増大するなか、地

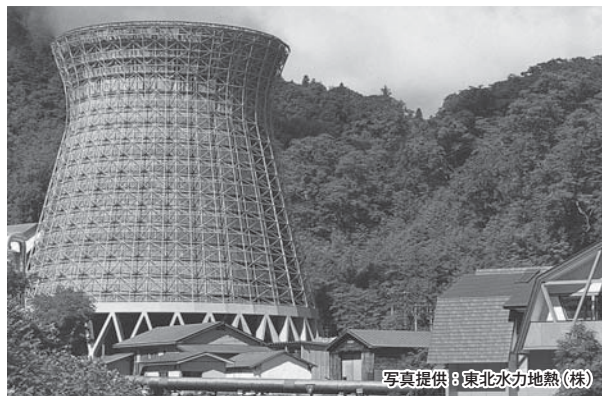


図1. 東北水力地熱(株)松川地熱発電所 — 東芝は、わが国初の地熱発電所に地熱蒸気タービンと発電機を納入した。

Matsukawa Geothermal Power Station of Tohoku Hydropower & Geothermal Energy Co., Inc.

熱蒸気タービンの単体出力や機器サイズも増大しつつある。当社はこのような顧客ニーズに応え、(株)日本製鋼所と連携して、大型地熱蒸気タービンの心臓部であるロータに適用できる新しい材料を開発した。

ここでは、大型地熱蒸気タービンロータ用材料に要求される特性とそれを実現した開発材料の特長、及び実機製造性を検証して製品へ適用した結果について述べる。

(注1) 金属の熱処理によって表面からどれだけ深く硬い組織が得られるかを示す一つの性質。

(注2) 材料の感受性、環境の腐食性、及び引張応力の付加という三つの条件が同時に相乗的に関与したときに起こる割れ現象。

(注3) Cが不均一に偏在している現象。

(注4) 現在、東北水力地熱(株)が運営。

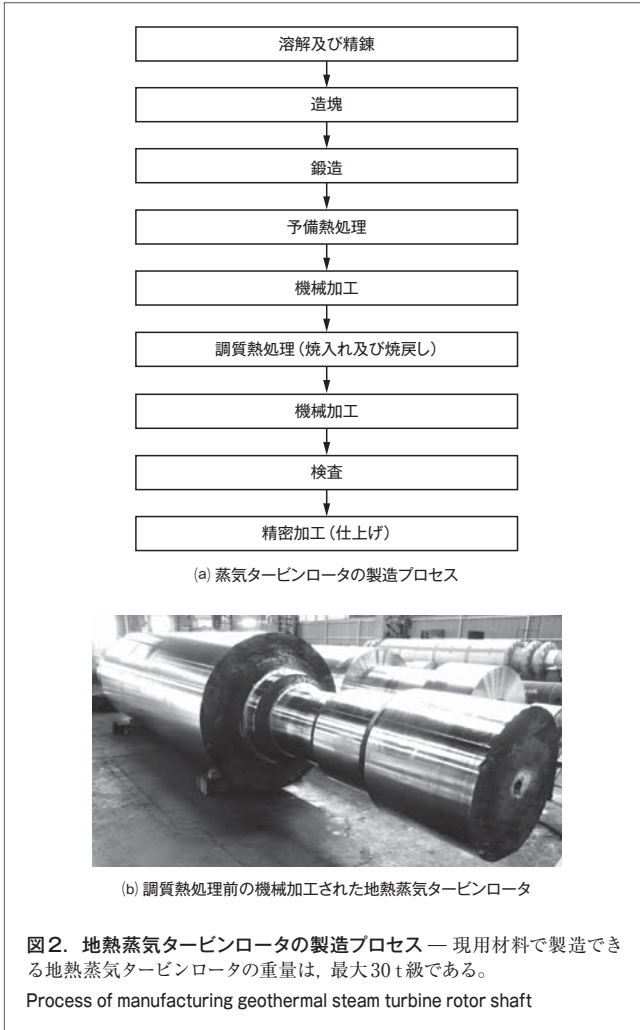
(注5) 2014年10月現在、当社調べ。

2 地熱蒸気タービンロータ用材料に要求される特性

タービンロータの製造プロセス及び調質熱処理前のタービンロータの外観の例を図2に示す。当社は、これまで1 mass%CrMoV (クロム-モリブデン-バナジウム) 系の低合金鋼で多くの地熱蒸気タービンロータを製造してきたが、そのタービンロータの重量は、最大で30 t級であった。

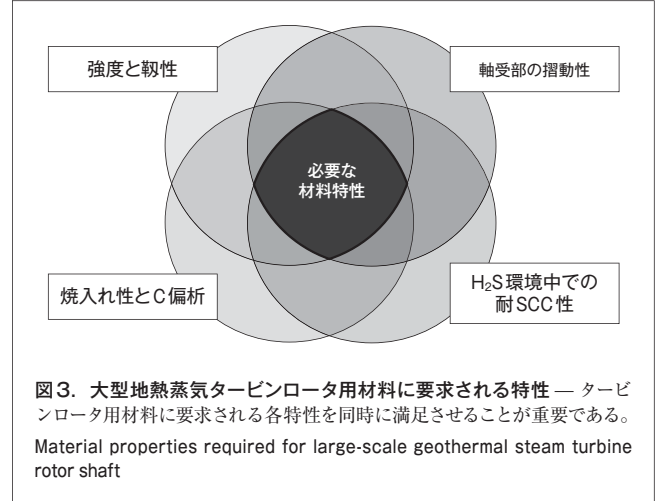
しかし、地熱蒸気タービンの大型化によりロータの重量は最大で50 t級となる。その場合、現用材料の化学成分では、造塊^(注6)の段階で鋼塊中心部の軸方向に沿ってC偏析が増加し、その影響を受けて焼入れの段階で鋼塊に焼割れ^(注7)が発生するリスクが高まる。更に、タービンロータが大型化すると、焼入れ時に鋼塊中心部の冷却速度が十分に得られないため、強度と靱性の両方を満足させることは困難であった。

そこで、最大50 t級の大型タービンロータに適した新しい材料組成の開発に取り組んだ。開発の基本的な考え方を図3



(注6) 熔融状態の鋼をいったん取鋼に受けた後、鑄型に注湯し、凝固させて鋼塊を作ること。

(注7) 焼入れしたときに生じるひび割れ現象。



に示す。製造時のC偏析、材料の強度と靱性、軸受部の摺動(しゅうどう)性^(注8)、及び耐SCC性という、要求される特性を同時に満足させる必要がある。

蒸気タービンは回転体であり、タービンロータに動翼が植え込まれて遠心応力が掛かるため、タービンロータに対して高い強度と靱性が要求される。また、地熱蒸気タービンロータは硫化水素(H₂S)などの腐食性ガスを含む地熱特有の蒸気雰囲気中に置かれるため、高い耐SCC性も要求される。

一方、化学成分中に含まれるCr量が約3 mass%以上になると、高速回転中にタービンロータを支える軸受部に凝着摩耗^(注9)を生じてタービンロータの損傷を引き起こすことがあるため、Cr含有量を一定レベル以下に制限する必要がある⁽²⁾。

3 大型地熱蒸気タービンロータ用材料の開発

50 t級地熱蒸気タービンロータ用材料の諸制約条件を踏まえて、要求されるそれぞれの特性バランスを考慮しながら新しい材料を開発した。

3.1 開発材料の成分設計

開発材料は、2 mass%CrMoV系の低合金鋼である。C偏析の抑制及び強度と靱性の改善を図り、現用材料よりC含有量を減らし、Ni(ニッケル)及びMn(マンガン)含有量を増やし、焼入れ性の向上を図った。大型鋼塊製造時のC偏析の助長を抑えるために、Mo含有量は現用材料より低減させた⁽³⁾。

また、耐食・耐SCC性を向上させるためにCr含有量を現用材料より増やしたが、軸受部で摺動による凝着摩耗が発生するのを防ぐために3 mass%以下に抑えた。地熱蒸気中という腐食環境下での耐SCC性は、Ni含有量の増加によって低下することが指摘されていることから、Ni含有量の上限を約1 mass%とした。

(注8) 部品の表面が滑らかで部品どうしの摩擦が少なく、接触部分や可動部分が滑らかに動く性質。

(注9) 金属どうしの接触摩擦により、表面が傷つけられる現象。

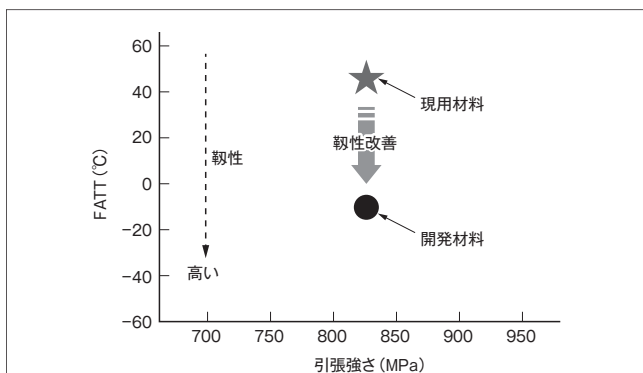


図4. 開発材料と現用材料の強度・靱性試験結果 — 大型タービンロータに向けた開発材料は、現用材料と同等の強度（引張強さ）を持ちながら靱性（FATT）は大きく改善された。

Results of strength and toughness tests of existing and newly developed materials

3.2 開発材料の強度と靱性

実機の製造条件を想定し、50 kg 試験鋼塊を真空誘導溶解炉で溶製し、鍛造及び予備熱処理を行った。その後、焼入れと焼戻しを施し、強度と靱性を評価するための室温引張試験及びシャルピー衝撃試験を行った。その結果を図4に示す。図中のFATT (Fracture Appearance Transition Temperature: 延性-脆性(ぜいせい)破面遷移温度)は、金属材料の衝撃試験で破断した試験片の破断面における延性破面率が50%となる温度で、金属の靱性を表す指標の一つである。FATTが低いほど靱性が高いことを表す。開発材料は現用材料と同等レベルの強度を持ちながらFATTは低く、靱性は大きく改善された。

3.3 開発材料の耐SCC性

2章で述べたように、地熱蒸気中には H_2S などの腐食性成分が含まれており、地熱蒸気タービンロータのSCCを引き起こすリスクがあるため、SCC試験によりタービンロータ用材料の耐SCC性を把握することが重要である。そこで、NACE (米国防食技術者協会) が規定する H_2S 環境中での低合金鋼SCC試験法TM0177のMethod Bに基づき、実験室レベルで三点曲げ法を用いてSCC試験を実施した。この試験方法は、 H_2S 中での低合金鋼の成分及び硬さの変動に対するSCC感受性の変化を短時間で容易に比較できる。強度と靱性を満足した開発材料と、現用材料それぞれについてSCC試験を行い、その結果を比較した。

現用材料は実機プラントで多数の使用実績があるため、開発材料は現用材料と同等以上の耐SCC性があれば、実機へ適用するのに必要な耐SCC性を持つと判断できる。

開発材料と現用材料のSCC試験結果を図5に示す。図中のSc値はNACE-TM0177のMethod B規定に基づいて算出した数値で、材料の耐SCC感受性を表す指標の一つである。Sc値が大きいくほど、耐SCC性が向上する。開発材料のSc値

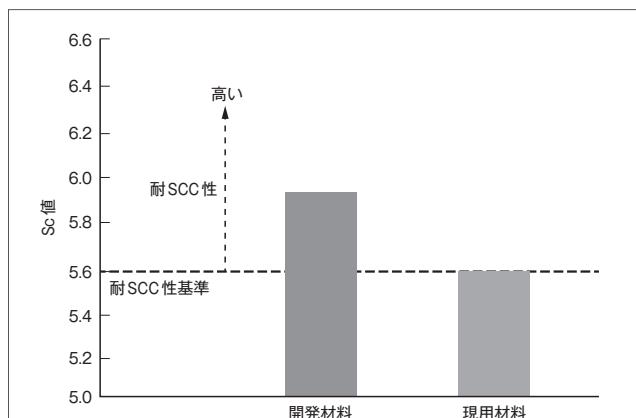


図5. 開発材料と現用材料の耐SCC性試験結果 — 開発材料は運用実績がある現用材料を超える耐SCC性を示した。

Results of SCC resistance tests of existing and newly developed materials

は現用材料より大きく、開発材料が現用材料より高い耐SCC性を持つことが示された⁽⁴⁾。

4 実機への適用

4.1 実機製造性の検証

3章で述べた結果により、開発材料は図3に示した要求され

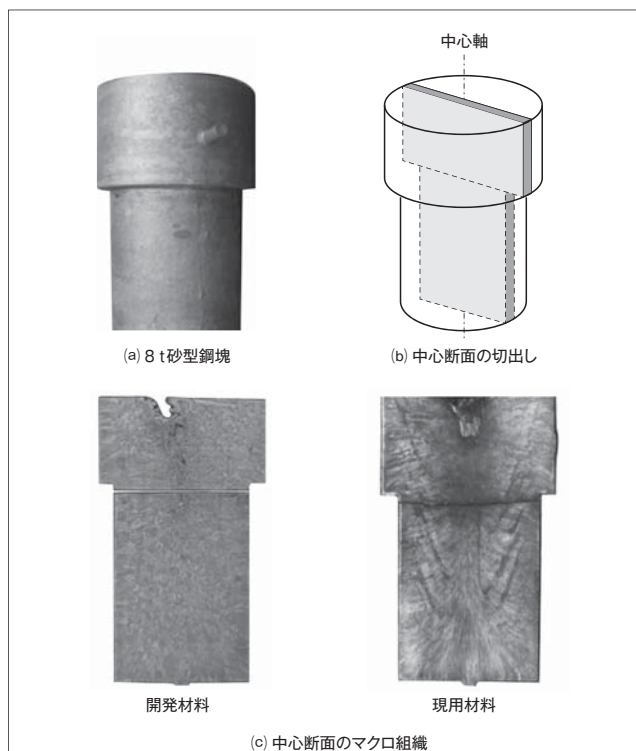


図6. 8 t砂型鋼塊の試作による実機製造性の検証 — 開発材料は現用材料と比べてC偏析が著しく減少した。

Verification of manufacturability of geothermal steam turbine rotor shaft through trial manufacturing of 8-ton sand mold ingots

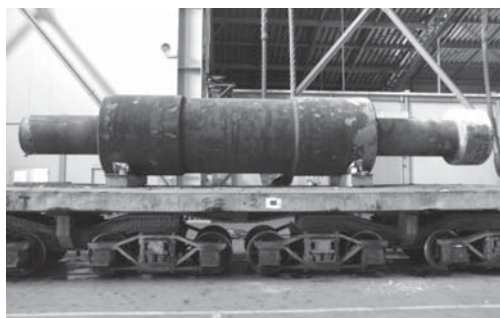
る特性のうち、強度と靱性、軸受部の摺動性、及びH₂S環境中での耐SCC性の三つの特性を満たしていることが示された。残る焼入れ性とC偏析は製造性に関わる特性である。

今回、重量8t、直径約1mの円柱状の砂型鋼塊を試作して開発材料の製造性を検証した(図6)。試作した砂型鋼塊は、100t程度の実機金型鋼塊の凝固時間やC偏析濃度を模擬することが可能である⁽⁵⁾。

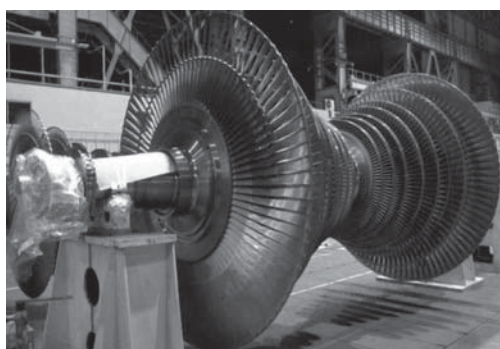
凝固後の8tの砂型鋼塊について、中心部を含む縦断面のマクロ組織^(注10)を、開発材料と現用材料とで比較した。その結果、開発材料は現用材料と比べて成分偏析模様が非常に軽微であり⁽⁶⁾、開発材料を適用した実機が優れた製造性を持つことが示された。

4.2 大型地熱タービンロータの製造

開発材料は、優れた焼入れ性、強度と靱性、及び耐SCC性を持ち、かつ鋼塊中心部のC偏析を低減できるため、この材料を用いて最大重量が50t級の大型地熱蒸気タービンロータを製造することが可能になった⁽⁷⁾(図7)。現在、開発材料は大型地熱蒸気タービンロータの製造に適用され、製品として納入されている。



(a) 製造中の大型地熱蒸気タービンロータ



(b) 完成した大型地熱蒸気タービン

図7. 開発材料を基に製造中の地熱蒸気タービンロータ及び完成した地熱蒸気タービン— 開発材料を基に50t級の大型地熱タービンロータを製造し、製品として地熱発電所に納入した。

Geothermal steam turbine rotor shaft manufactured using newly developed material and completed state of large-scale geothermal turbine

(注10) 材料の凝固によって生じる成分偏析模様。

5 あとがき

大型地熱蒸気タービンロータを実現するために要求される特性を持つ材料を開発した。今後、いっそうの研究開発や技術革新を進め、タービンロータ用材料の高性能化、高信頼性の向上、短納期化、及び低コスト化を図り、地熱発電プラントの普及を通して、地球温暖化の緩和に貢献していく。

文献

- (1) 谷口晶洋. 地熱発電普及への取組み—蒸気タービンの性能・信頼性向上. 東芝レビュー. 63, 9, 2008, p.27-30.
- (2) Yamada, M. et al. Effects of Alloying Elements on the Hardenability, Toughness and the Resistance of Stress Corrosion Cracking in 1 to 3mass% Cr Low Alloy Steel. ISIJ International. 54, 1, 2014, p.240-247.
- (3) 水戸祐介 他. “地熱タービンロータ用新合金鋼の開発. 第一報: 焼入れ性, 靱性に及ぼす合金元素の影響”. 日本鉄鋼協会第162回秋季講演大会講演論文集. 吹田, 2011-09, 日本鉄鋼協会. 2011, p.948.
- (4) 閻 梁 他. “地熱タービンロータ用新合金鋼の開発. 第二報: 耐SCC性に及ぼす合金元素の影響”. 日本鉄鋼協会第162回秋季講演大会講演論文集. 吹田, 2011-09, 日本鉄鋼協会. 2011, p.949.
- (5) 鈴木 茂 他. “地熱タービンロータ用新合金鋼の開発. 第三報: 砂型鋼塊の製造とその検証”. 日本鉄鋼協会第162回秋季講演大会講演論文集. 吹田, 2011-09, 日本鉄鋼協会. 2011, p.950.
- (6) 三木一宏 他. 地熱発電タービンロータ用鋼の開発. 日本製鋼所技報. 63, 2012, p.1-8.
- (7) Yan, L. et al. "Material Development & Application for Large-sized Geothermal Turbine". Grand Renewable Energy(GRE) 2014 - International Conference and Exhibition. Tokyo, 2014-07, GRE 2014 Organizing Committee. 2014, O-Ge-3-2.



閻 梁 YAN Liang

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部主査。高温材料及び強度評価技術の開発に従事。日本鉄鋼協会、腐食防食学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



山田 政之 YAMADA Masayuki, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部, 工博。金属材料技術の開発に従事。日本鉄鋼協会会員。技術士(金属部門, 総合技術監理部門)。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



和田 一宏 WADA Kazuhiro

電力システム社 火力・水力事業部 火力プロジェクト部主務。地熱発電所のエンジニアリング業務に従事。日本機械学会会員。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.