

世界最大級容量の2極60 Hz 1,230 MVAタービン発電機

Two-Pole 60 Hz Turbine Generator with World's Largest-Class Capacity of 1,230 MVA

根本 幸祐 千葉 英樹

■ NEMOTO Kosuke

■ CHIBA Hideki

近年、国内外で新設される火力発電プラントは、大容量プラントと中・小容量プラントの二極化が進んでいる。このうち大容量石炭火力プラントでは、経済性追求と立地点活用の観点から、高効率化と単機容量の大容量化が従来以上に求められている。

東芝は、このような状況に応え、これまで多数の1,000 MW級タービン発電機を製造し納入してきた。今回更なる大容量化に対応した、2極60 Hz機として世界最大級容量^(注1)の1,100 MW (1,230 MVA)タービン発電機を製造し、工場試験を経て2013年11月に出荷した。構造、設計の最適化及び、機内水素ガス圧力や出力電圧の向上と損失低減施策などの当社最新技術の適用により、世界最大級容量であるとともに、世界最高レベル^(注1)である99%以上の高効率設計を実現した。現在、2015年末に予定された商用運転開始に向けて、据付け及び試験調整を進めている。

Thermal power plants recently constructed in Japan and other countries can be classified into two groups: large-capacity plants, and medium and small-capacity plants. In the field of large-capacity coal-fired thermal power plants, higher efficiency and greater single-unit capacity are increasingly required in terms of economic efficiency and optimal site utilization.

To meet these market requirements, Toshiba has manufactured and delivered a large number of 1,000 MW-class steam turbine generators. We have now developed a two-pole 60 Hz steam turbine generator that achieves both the world's largest-class capacity of 1,100 MW (1,230 MVA) and the world's highest-level efficiency of 99% through the optimization of the structural design and application of our latest technologies to increase the hydrogen gas pressure and terminal voltage and to reduce the power loss. This turbine generator was shipped in November 2013 after successful shop tests, and is currently under installation with the start of commercial operation scheduled for 2015.

1 まえがき

近年、国内外で新設される火力発電プラントは、大容量プラントと、機動性や分散電源を指向した中・小容量プラントの二極化が進んでいる。このうち大容量プラントでは、経済性追求や立地点の最大活用などの観点から、従来以上に高効率化と単機容量の大容量化が求められる傾向にある。特に石炭火力プラントにおいては、単機容量が1,000 MW以上のプラントが国内外で数多く建設されるようになってきた。

東芝は、このような状況に対応するため、タービン発電機の大容量化及び高効率化を推進している。2000年に世界初^(注2)の1,000 MW (1,120 MVA)機を製造して以降、当社では同容量帯のタービン発電機を、海外市場向けを含め9台納入するとともに、安定した運転実績により顧客の信頼を得てきた。今回、更なる大容量機である1,100 MW (1,230 MVA)機を製造し、工場試験を経て2013年11月に出荷した。このタービン発電機は、2極60 Hz機としては世界最大級容量である。

1,100 MW機の設計には最新のコンパクト化技術と高効率

技術を適用し、従来の当社1,000 MW機に比べ体格増加を最小限に抑えつつ効率向上を目指した結果、IEEE（電気電子技術者協会）規格に基づく規約効率が99%以上となる高効率を実現することができた。

ここでは、1,100 MW機の開発方針、基本設計、適用技術、及び工場試験の結果について述べる。

2 開発方針

今回開発したタービン発電機の構造を図1に示す。大容量化及び高効率化に対し、以下の方針で対応した。

開発にあたっては、当社の水冷却及び水素冷却タービン発電機の豊富な製作・運転実績を反映した。特に1,000 MW級の大容量機で実証された各種技術を基に、計算機による解析と実機で十分検証された技術をバランスよく組み合わせることで、1,100 MW機としてコンパクト化と高効率化を両立させた最適設計を目指した。機内水素ガス圧力など、これまでの実績を超える技術については、それに対応する機械構造などを有限要素法（FEM：Finite Element Method）解析を用いて評価し信頼性を確認した。

(注1) 2014年7月現在、当社調べ。

(注2) 2001年11月時点、当社調べ。

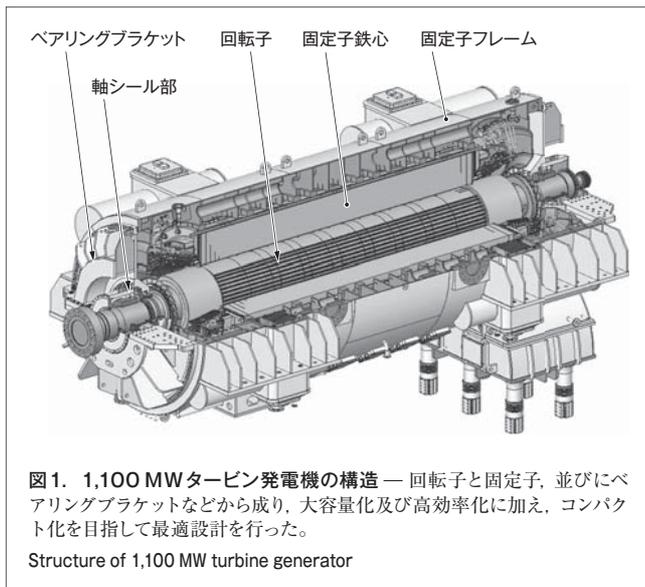


図1. 1,100 MWタービン発電機の構造 — 回転子と固定子、並びにベアリングブラケットなどから成り、大容量化及び高効率化に加え、コンパクト化を目指して最適設計を行った。
Structure of 1,100 MW turbine generator

表2. タービン発電機的设计パラメータ比較

Comparison of design parameters for 1,000 MW and 1,100 MW turbine generators

項目	1,100 MW機	1,000 MW機
容量	1.10	1
K	1.04	1
Di^2L	1.06	1

* 1,000 MW機を1とした相対値

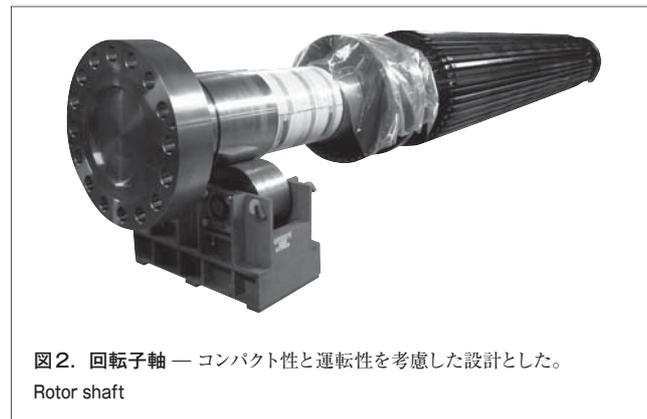


図2. 回転子軸 — コンパクト性と運転性を考慮した設計とした。
Rotor shaft

3 基本設計

今回の1,100 MW機と従来の1,000 MW機の定格の比較を表1に示す。容量は1,230 MVAとなり、1,000 MW機 (1,120 MVA) の1.1倍に達する。容量増加に対し、電流値の増加を抑えるため、電圧は当社の2極60 Hz機では最大となる27 kVを採用した。また冷却性能向上のための機内水素ガス圧力についても、当社の実績では最大となる600 kPagを適用した。

3.1 固定子設計

タービン発電機の容量 P は、一般に式(1)で表される。

$$P = K \times Di^2 \times L \times n \quad (1)$$

ここで、 K は出力係数(エネルギー密度=単位体積当たりの容量)、 Di 及び L は固定子鉄心の内径と長さ、 n は回転数である。式(1)の各諸量を1,000 MW機を1として相対値で比較した結果を表2に示す。

1,100 MW機では、容量増加に対し、体格の増加を極力抑えつつ、高効率化を実現するための最適設計を行い、 K を

1,000 MW機の1.04倍に選定した。これにより、1.1倍の容量増加に対して、鉄心体格を1.06倍に抑制できた。 K の選定に際しては、体格や、効率(損失)、冷却性能など種々のパラメータの最適化を目指し、冷却能力の向上と、風損の増加やフレーム構造物の重量増加とのバランスを考慮した。その結果、冷却用の機内水素ガス圧力を従来の520 kPagから600 kPagに増加させることにした。

3.2 回転子設計

回転子外径 D ($\approx Di$)と L の選定は、タービン発電機の回転子設計ではもっとも重要なポイントになる。 D を増加する設計(L/D が小)では、遠心力の増加に伴い、遠心力に耐えるための回転子設計が求められる。また L を増加する設計(L/D が大)では、運転性、特に振動面における確認が必要になる。

今回、コンパクト化の観点から、体格増加を L の増加だけによらず、 D も増加させる設計を採用した。そこで回転子は、 L/D を1,000 MW機と同等のレベルに設定することとし、運転性については従来機と同等に保つ設計とした(図2)。

表1. タービン発電機の定格諸元

Ratings of 1,000 MW and 1,100 MW turbine generators

項目	1,100 MW機 (2013年製造)	1,000 MW機 (2008年製造)
容量 (MVA)	1,230	1,120
電圧 (kV)	27	24.5
電流 (A)	26,302	26,394
回転数 (min ⁻¹)	3,600	3,600
周波数 (Hz)	60	60
水素ガス圧力 (kPag)	600	520
固定子冷却	水直接	水直接
力率	0.9	0.9

4 適用技術

1,100 MW機の開発に適用した主な技術を以下に述べる。

4.1 発電機電圧の27 kV化

電機子(固定子)電圧の選定においては、タービン発電機の容量増加に伴い、従来の1,000 MW機に比べ電圧を増加させ50 Hz機で適用実績がある27 kVを採用した。

当社は、固定子コイルの絶縁では、マイカテープやレジンなど絶縁材料の継続的な改良開発により、高耐圧で長寿命の絶縁を実現している。これはレジンリッチ絶縁方式と呼ばれ、JEC（電気規格調査会標準規格）の耐熱クラス155（F）に分類される。製造方法は、エポキシ樹脂をあらかじめ含浸したマイカテープをコイル導体に巻回し、真空処理した後、加圧と加熱によって樹脂を溶融硬化させるものである。真空加圧含浸方式に比べ含浸樹脂を使用しないことから、環境負荷が小さいという利点がある⁽¹⁾。

4.2 回転子断面の最適化

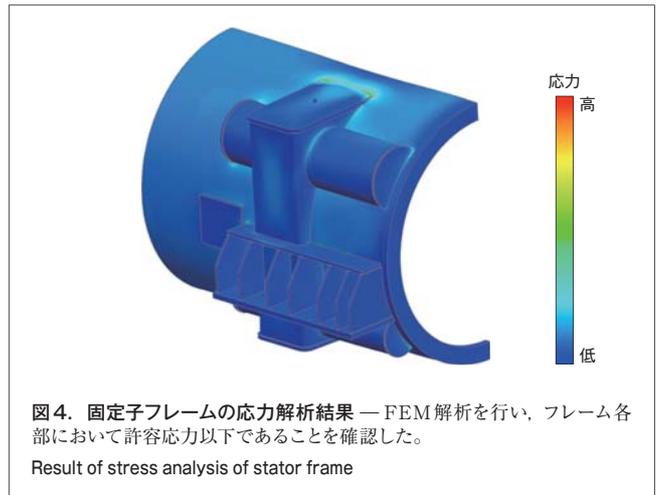
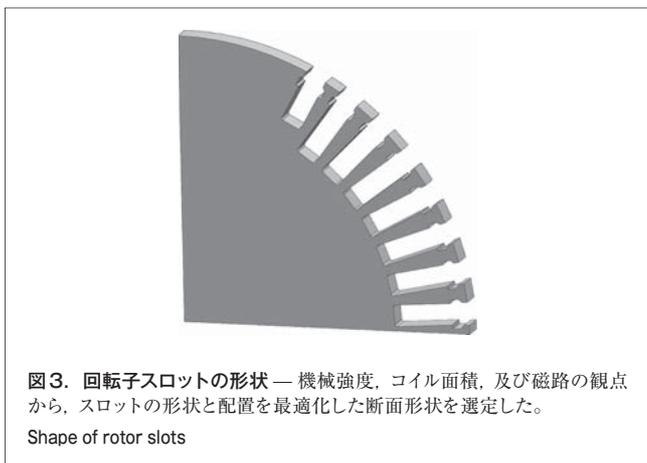
D を従来機より増加させる設計を適用するにあたり、機械強度と電磁気特性との両面から回転子断面（コイルスロットの形状及び配置）の最適設計を行った。増加する遠心力に耐える最大コイル面積の確保とともに、適切な磁路（磁束の通路）の確保がポイントとなる。機械応力解析及び電磁解析を適用することで、最適な断面形状を選定した（図3）。

4.3 機内水素ガス圧力の600 kPag化

K を向上させるため、1,100 MW機の機内水素ガス圧力には、当社実績ではこれまでで最大となる600 kPagを適用した。機内水素ガス圧力の増加に伴い、固定子フレーム、ベアリングブラケット、並びに軸貫通部からの水素ガスの漏えいを防ぐため、各部構造強度をその圧力に適合させる必要がある。固定子フレーム及びベアリングブラケットの設計に際しては、以下に述べるFEM解析による強度評価を活用して最適な補強構造を見だし、信頼性向上と軽量化を同時に実現した。

- (1) 固定子フレーム応力解析 固定子フレームは、水素ガス冷却用の熱交換器を収納するクーラボックスが接合されているなど、複雑な形状となっており、固定子フレーム各部に発生する応力を適切に評価する必要がある。FEMによる応力解析を実施した結果から、固定子フレームの各部位における発生応力が定格の水素ガス圧力時において許容応力以下であることを確認した（図4）。

- (2) ベアリングブラケット応力解析 固定子フレーム端

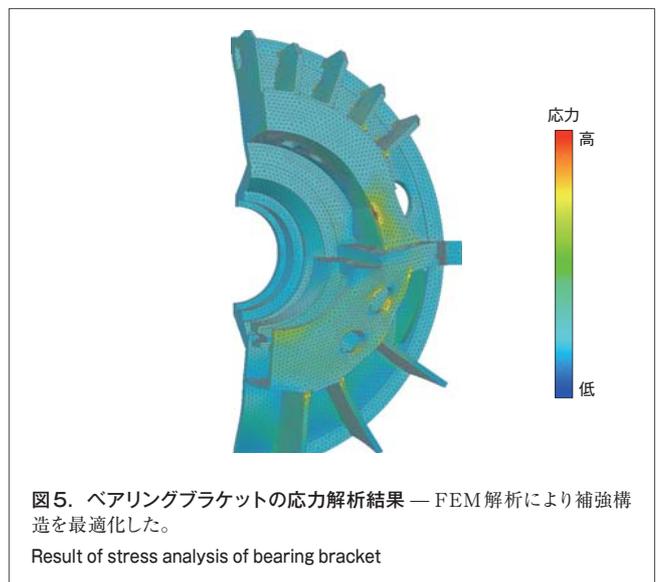


部にあるベアリングブラケットは、平面構造であるため適切な補強など、特に機内水素ガス圧力に対して設計上の配慮が必要である。このため、各部に発生する応力をFEM解析で評価し、定格の水素ガス圧力時の最大発生応力が許容応力以下となる最適な補強構造を決定した（図5）。

4.4 低損失化

1,100 MW機の設計では、3.1節で述べたように、1,000 MW機に比べ K を1.04倍に増加させている。今回、 K の増加は磁気装荷（磁気的エネルギー）の増加により実現しており、そのため鉄損や界磁銅損などの損失増加につながるおそれがある。

そこで今回、損失の増加による効率低下を抑制するため、当社がこれまで研究開発を進めてきた損失低減のための諸施策を適用した。4.2節で述べた回転子断面の最適化による界磁銅損の低減に加え、流体解析による通風冷却の最適化によ



る風損の低減，低損失型鉄心端部構造の採用など，各種施策の積上げにより， K を1,000 MW機の1.04倍とし体格増加を最小限に抑えたコンパクト化と，99%以上となる高効率化という相反する課題を解決した。

5 回転電気試験

回転電気試験は2013年9月に当社京浜事業所内で実施し(図6)，仕様及び規格を満足する良好な結果を得た。主要な試験項目と結果について以下に述べる。

- (1) 特性 無負荷飽和特性試験，三相短絡特性試験，及び三相突発短絡試験を行い，各種電気特性が要求仕様値を満足することを確認した。
- (2) 損失及び効率 IEEE規格に基づき各損失を測定し，規約効率を算定した。定格出力時における効率は99%以上と実測され，同容量帯の発電機では世界最高レベルとなる結果が得られた。
- (3) コイル温度上昇 等価温度上昇法による試験を行い，定格出力時における各部の温度上昇を推定した。温度上昇値はIEEE規格の要求を満足する良好なレベルであることを確認した。

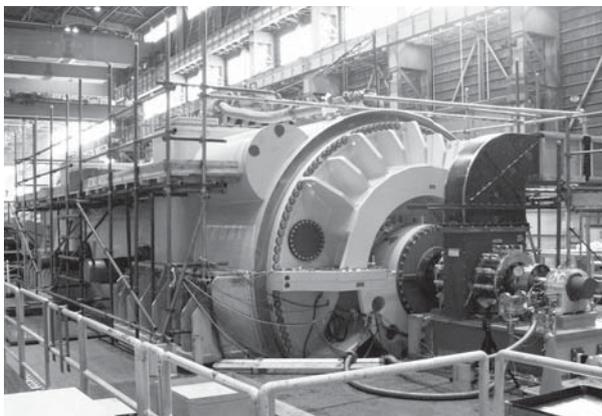


図6. タービン発電機の工場試験 — 仕様や規格を満足する良好な工場試験結果が得られた。

Turbine generator undergoing shop test

- (4) 軸振動 定格速度及び120%過速度試験により軸振動の計測，確認を行った。結果は良好であり，振動に対する要求仕様値を満足することを確認した。

6 あとがき

構造，設計の最適化と，機内水素ガス圧力や出力電圧の増加，損失の低減などの当社最新技術を適用することで，2極60 Hzタービン発電機として世界最大級容量である1,100 MW (1,230 MVA) 機を世界最高レベルである99%以上の高効率で実現した。各種解析により信頼性を検証するとともに，工場試験によって特性を実証した。このタービン発電機は，2015年末の商用運転開始に向けて据付け，試験調整を進めている。

今回得られた設計，製造，及び試験に関する知見を活用し，更なる高性能化を目指した研究開発を引き続き行い，より優れたタービン発電機を提供していく。

文献

- (1) 小林雅司 他. タービン発電機を支える絶縁技術. 東芝レビュー. 65, 8, 2010, p.16 - 19.



根本 幸祐 NEMOTO Kosuke

電力システム社 火力・水力事業部 火力電機技術部。
火力発電所の電気系システムのエンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



千葉 英樹 CHIBA Hideki

電力システム社 京浜事業所 発電機部主務。
タービン発電機的设计・開発に従事。
Keihin Product Operations