電力技術のイノベーション(1)

——大容量国産火力1号タービン・発電機の建設——

上級会員 長野 進* 非会員 柿島 正好**

Innovation on Energy Power Technology (1)

——Building the First Large-capacity Domestic Turbine and Generator——

Susumu Nagano*, Senior Member, Masayoshi Kakishima**, Non-member

After the last war, the output of single Steam Turbine Generator produced by the own technology in Japan returned to a prewar level. Electric power companies imported the large-capacity high efficiency Steam Turbine Generator from the foreign manufacturers in order to support the sudden increase of electric power demand. On the other hand, they decided to produce those in our own country to improve industrial technology. The domestic production of large-capacity 125 MW Steam Turbine Generator overcome much difficulty and did much contribution for the later domestic technical progress.

キーワード：国産品，進歩・発達，革新，蒸気タービン，発電機

Keywords: domestic products, state of the art, innovation, steam turbine, generator

1. まえがき

1955年頃からの高度経済成長による電力需要急増に対応して、水力発電に比べて建設期間が短かく建設費用も低減できる石炭専焼火力発電設備が建設されるようになった。戦前の国産技術による発電設備の最大容量機は現関西電力(株)尼崎第二発電所75MWであった。

大戦を経て戦後の混乱の中で建設された発電所は54MW等で戦前の記録機を上回るものはなかったが1950年代初期には各地域で55～66MW発電設備が相次いで運転を開始し徐々にではあるが単機容量は戦前に近づきつつあった。電力需要増加によって火力発電設備新設が次々に計画されるとわが国の火力発電設備メーカー各社は海外の先進技術導入にふみきりこれによって新たに技術力を習得した結果、タービン蒸気圧力は60kg/cm²、482°C、さらに88kg/cm²、510°C、単機容量も66MWから戦前の最大容量機75MWレベルまで回復した。発電機は水素冷却が採用され始めた。

米国ではこの時期には効率向上のために蒸気条件向上や再熱サイクルが採用された100～200MW級発電所が運転

されており蒸気圧力も127kg/cm²級へと高まっていた。また大容量化に伴い発電機は標準的に水素冷却機が採用されていた。国内各電力会社は電力需要の急激な増加に対応し新設火力発電所の高効率化・大容量化を目指し最新鋭米国の高効率大容量蒸気タービンを採用するようになった。しかしながら将来自主技術で機器を製造するという長期的国内産業育成を視野に入れ、1号機は輸入、2号機は技術導入した図面により同型機を国産するというケースが次第に増えていった。中部電力(株)三重火力発電所および東京電力(株)千葉火力発電所がその始まりである。

この後火力発電所建設は急激に増加し、水力から火力へといわゆる水主火従から火主水従への電源構成が変化していくことになる。その後わが国はめざましい技術進歩をとげ自主技術による1000MW級火力発電所の建設に達するがこの変化のさきがけは100MW以上の大容量火力の建設である。この高効率大容量国産第一号である東京電力(株)千葉火力発電所2号機125MW発電プラントについて紹介する⁽¹⁾。

図1に戦後のタービン発電機単機出力の変遷を示す。

2. 千葉火力発電所2号機の建設

〈2・1〉タービン・発電機計画の概要 当時の環境において東京電力(株)は千葉地区に大容量発電所を建設することとなり世界のトップレベルにあり信頼度の高い米国のGE社より125MWタービン・発電機を輸入することとした。タービンの蒸気条件は主蒸気圧力127kg/cm²、主蒸気温度

* (株)東芝 京浜事業所
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4
Toshiba Corporation
2-4, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

** (株)東芝 火力・水力事業部
〒105-8001 東京都港区芝浦1-1-1
Toshiba Corporation
1-1-1, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105-8001

図1 タービン発電機大容量化の変遷

Fig. 1. Growth in turbine generator output in Japan.

図2 発電所プラント系統図

Fig. 2. Flow diagram of the 125000 KW turbine plant.

538°C 再熱蒸気温度 538°C の再熱タービンである。当時再熱タービン最大容量機は中部電力(株)三重火力 75 MW であり蒸気条件は主蒸気圧力 102 kg/cm², 主蒸気温度 538°C 再熱蒸気温度 538°C であった。

発電機は、出力が 160,000 kVA であり大容量化を達成するために水素ガス圧力 2 kg/cm²g を採用した初号機である。

東京電力は信頼性を維持しながら国産化するため米国の GE 社との技術提携によって得られた図面どおりに製造することを条件に 2 号機を現(株)東芝に発注した。

図2に発電所プラント系統図を示す。

〈2・2〉千葉火力発電所 2 号機蒸気タービンの仕様と特徴

蒸気タービン仕様

型式：串型複流排気式衝動型

定格出力：125000 KW

主蒸気圧力：127 kg/cm² 主蒸気温度 538°C

再熱蒸気温度：538°C

真空度 722 mmHg 最終段翼 584.2 mm (23 インチ)

給水加熱段数 6 段：最終給水温度 231.5°C

図3に千葉火力発電所 2 号機タービン組立断面図を示す。

図3 千葉火力発電所 2 号機タービン組立断面図

Fig. 3. Cross section assembly of the 125MW steam turbine for Chiba #2.

このタービンは 100 MW 以上の大容量機として初めて高圧部と中圧部の対向流一体形式構造が採用された 2 ケーシング構造であり高中圧ケーシングと低压ケーシングはボルト締め縦継ぎ手構造で結合され複雑な内部クロスオーバー管構造が採用されているもののシングルケーシング構造のごときコンパクトな設計となっている。蒸気タービン全長は約 11.5m と 2 年前に運転が開始された 66 MW タービンより約 2.5 m 長いだけである。

蒸気温度が高いことから高中圧ケーシングは 2 重になっており、2 本のタービンロータを 3 個の楕円軸受で支えている。対向流高中圧ロータの材料には先行する再熱タービン三重 2 号機と同様に Cr-Mo-V 鋼、また低压ロータには Ni-Mo-V 鋼の一体鍛造形が使われ、大気との軸シールには水シール方法が採用されている。蒸気通路部には当時の最先端の技術として翼形は蒸気の三次元流れを考慮しノズル・翼とも半径方向にねじられた高効率設計が採用され、微細加工により精度の高い通路部が製造された。大容量のため高圧初段動翼植え込み部は現在でも使われる鞍型が又頂部には 2 重のカバー締結構造が初めて採用され、最終段には有効長 584.2 mm (23 インチ) の記録的長翼が採用された。この最終段翼には蒸気湿分に対抗するため翼面にショットピーニング、ステライト超合金貼り付けといった新しい浸食対策が施された。これらの蒸気通路部最新鋭構造はその後のタービンのモデルとなり、蒸気条件向上と再熱サイクルの採用によりタービン室効率は大幅に上昇した。

再熱タービンとして蒸気量制御に再熱蒸気を制御するインタセプト弁が加わりこの制御が重要なものとなるためダブルエレメント形调速機が初めて採用された。

〈2・3〉千葉火力発電所 2 号機用発電機の仕様と特徴

前記 125,000 kW-3,000 rpm 蒸気タービンに直結される発電機の定格は下記の通りである。

型式：水素冷却回転界磁型

相数：3

極数：2

出力：160,000 MVA

回転数：3,000 rpm

電圧：15 kV

周波数：50 Hz

図 4 発電機断面図

Fig. 4. Cross section of the generator.

図 5 160,000kVA タービン発電機（工場試験中）

Fig. 5. The 160,000kVA turbine-generator under the shop test.

力率：0.85

短絡比：0.8（128,000kVA 水素圧力 0.5 psig で）

水素圧力：30 psig（2 kg/cm²g）

励磁電圧：375 V（別置励磁機による）

絶縁種別：固定子・回転子巻線とも B 種

タービン発電機は高速回転機であるため、回転子径は軸材強度により、鉄心長は振動により制約を受ける。単機容量の増大は、これらの制約を材料・振動技術の進歩とあいまって冷却方式の改良進歩、すなわち電気装荷、磁気装荷を増すことにより克服しながら進められてきた。換言すれば、タービン発電機の大容量化は冷却技術の進歩と言っても過言ではない⁽²⁾。

水素ガスが冷却効果に優れ通風摩擦抵抗の小さい冷却媒体である特徴を生かして、1953 年に最初の水素冷却機として 55 MVA 級機が製作された。本機は大容量化を目指して水素ガス圧力 2 kg/cm²g を採用した初号機である。

また、回転子径は軸材強度により制約を受けるため、余り増加できないが、本機の鉄心長は初めて 5 m を越えた。これにより、1 次危険速度が定格回転速度の半分以下となった初めての回転子である。図 4 は本発電機の断面を示すも

ので、図 5 は工場試験の際の外形写真を示す。

3. 千葉火力発電所 2 号機の設計から現地試運転までの経過

機器メーカーの現（株）東芝は国産大容量蒸気タービン第一号の製造に全精力をあげて取り組むため従業員一同で決起集会を開き決意を新たに取り組みを開始した。

設計者はまず製造に必要な情報として GE 社のインチで書かれた図面寸法や英文の製造仕様書・検査仕様書等の翻訳を行うことになるがそれは膨大な作業となった。この技術提携には製作図の供与と製造に関する know-how は含まれたが know-why は含まれなかったためインチ-mm 換算に精力をあげながらその裏にひそむ技術を得ようと必死に図面をながめた。

インチ-mm 換算は手回し計算機・算盤を駆使して行い少数点以下 3 桁の有効数字の寸法表示がなされたが換算誤差の修正をどのように吸収するか悩むといった今では考えられないような苦勞をしている。当時の設計室は近代的な CAD 等が存在するわけでもなく T 定規と三角定規を使いながら手書きで製図され製造現場には青焼き図面が送られた。

製造設備については技術提携に含まれないため GE 社の工場見学の折に最新機械情報を入手しつつ製造に生かさざるをえず国産化第 1 号として GE 社と同じ品質のものを作るのは至上命令であり設備が見劣りするなかで既存の設備を改造したりして工夫をこらし実現させていった。製造現場には訓練された、優れた技能者が多く設備のみならず冶工具類にしても当時の名人芸ともいえる力で細かな作業で困難を克服していった。製造完了後は工場にて全部品を組み立て蒸気による回転試験を実施した。初めての大型タービン構造のために振動が発生して苦勞し連日徹夜状態でその解決に努め無事立会いを終了し出荷することができた。

素材製造も多くの困難を共有し克服していった。例えば蒸気タービンロータ材料に必要な溶解炉は GE 社仕様にある大きな塩基性電気炉がなく数機の電気炉による合せ湯を使用せざるを得ずなんとか信頼性を維持するよう品質の良い部分のみ使うといった歩留まりの悪い製法を余儀なくされた。又当時溶接技術認可が必要な配管材料についても GE 社指定 ASTM 材の JIS 相当材がなく、当時の通産省に火力技術基準の特別申請（2 条申請）をして、試作を重ねながら国産化を進めたが、どうしても日本で出来ないものは米国から輸入した。ソレノイド、マイクロスイッチ、リミットスイッチなどの計装品は 1 号機の輸入品をスケッチして製造したが、上手く作動しないこともあり不良品の山を築いたこともあった。

図 6 にタービン組立状況を示す。

発電機についても次のような苦勞があった。1 号機の GE 設計では、新しく開発された方向性珪素鋼板が使用されていた。素材メーカーの米国から調達すべく通産省を介して交渉していたが、本機が短納期物件でもあったために納期的に間に合わず、国産の熱間圧延珪素鋼板を使用した。この

図6 タービン組立状況

Fig.6. Chiba #2 125MW steam turbine under shop assembly.

ため、鉄心部分の磁束密度の値を若干下げざるを得なくなり、鉄心外径が1号機と比較して少し大きくなり固定子鉄心重量は160トンが200トンに増加してしまった。これに伴い、固定子枠の外径についても若干大きくなった。

当時の回転子は鉄心長が短く剛体と考えられるため、単体バランスは毎分数百回転まで低速バランス装置で行い、比較的大容量の発電機はより高速回転域のバランスを掘り下げた組立試験場（ピット式の試験場）で行っていた。これに対し当時の最大容量機である本機は鉄心が長く回転子が剛体とは言えなくなったことで、高速回転域でのバランス調整をしなくてはならず、安全や段取り作業も配慮してロータ単体で高速回転試験が出来るバランスハウスを建設した。バランスハウス内では回転子単体を回転させ振動を測定し、現地運転時のすべての回転数において振動状態が良好になるまで、バランス調整をする。これと合わせて振動・位相などの計測技術も進歩したことから低速バランス装置によるバランス調整は不要となった。

また回転子が長くなり柔らかくなったので、オイルホイップなどの自励振動の対策も考慮して軸受の設計をするようになった。

4. おわりに

本機は適時タービン内部の性能向上や運用性改善等の近代化工事を行い2000年2月にその使命を終了し、発電所は新たにコンバインドサイクル発電方式を採用した最新鋭発電所に生まれ変わった。

累積発電時間約19.2万時間、累積発電量178億KWH、累積起動回数1420回の多くをかぞえ首都圏の需要に十分こたえていった。

このタービン・発電機の同型機はその後品川、新東京火力発電所、北海道電力（株）新江別発電所と合計4台製造することになる。

千葉火力発電所2号機は戦後遅れていた国産技術の育成向上及び国内各社の製造設備近代化に大きく貢献することができた機種としてその意義は非常に大きなものがある。設計から製造に至るまで遭遇した苦労は、大はロータ等の材料の製造、加工法、配管用の特殊材料の国産化から、小はスイッチ類の国産化まで、日本のあらゆる産業分野に大きな技術革新のインパクトを与えた。技術提携で入手した図面には多くの新技術が含まれており、現在設計・製作されている大容量・高性能のタービン・発電機の基本技術の大半はこの時期に導入された。これらの技術の消化、主要材料の国産化を図る中で技術を蓄積していった。

なお、歴史的なターニングポイントとなった先行輸入同型機の千葉火力発電所1号機は現在完全な形で「電気の史料館」に展示されている。

本稿では、火力プラントの大容量化の発端となった千葉火力2号を例に火力の黎明期について解説した。

その後、電機製造会社は自主技術の開発に努め、現在の1,000MW時代を迎えている。

（平成19年8月8日受付）

文 献

- (1) H. Enjoji, Y. Miyata, and T. Watanabe: "The 125,000 kW Turbine-Generator", *Toshiba Review*, Vol.12, No.8, pp.875-883 (1957-8) (in Japanese)
円城寺一・宮田佑二・渡辺達郎:「東京電力 千葉火力発電所 125,000 kW 発電設備」, 東芝レビュー, 12, 8, pp.875-883 (1957-8)
- (2) M. Tari, S. Nagano, S. Amemori, and T. Aso: "History of Rotating Machine Development and Foresight", *IEEJ Trans. FM*, Vol. 124-A, No.8, pp.705-712 (2004-8) (in Japanese)
田里 誠・長野 進・雨森史郎・阿曾俊幸:「発電機・電動機の歴史と今後の展望」, 電学論 A, 124, 8, pp.705-712 (2004-8)

長野 進（上級会員） 1947年1月22日。1969年5月東京大学電気工学科卒業。同年（株）東京芝浦電気（現、東芝）入社。現在、主としてタービン発電機の開発・設計に従事。工学博士。

柿島 正 好（非会員） 1946年10月10日生。1965年3月神奈川工業高校機械科卒業。同年（株）東京芝浦電気（現、東芝）入社。現在、主として蒸気タービンの開発・設計に従事。