

# 改良型 BWR (ABWR) のタービン・発電機システム

Steam Turbine and Generator System for ABWR

森 純夫  
S. Mori

北村 理  
O. Kitamura

大容量、高信頼性ほか数々の特長をもった改良型沸騰水型原子炉 (ABWR: Advanced Boiling Water Reactor) が開発され、その初号機が東京電力榑柏崎刈羽原子力発電所 6 号機 (K-6) / 7 号機 (K-7) に採用された。当社はこの ABWR 用のタービン・発電機システムとして、従来の原子力発電プラントの建設・保全経験をベースに新技術を開発し、米国 GE 社と共同して K-7 に適用した。K-7 タービン・発電機システムは 1,356 MW と世界最大容量級であるとともに、従来プラントに比べ熱効率の向上、コンパクトな建屋、建設工期の短縮が図られている。また、次期 ABWR 用のタービン・発電機システムに対して、さらに最新の高效率火力発電プラントに適用・実証された技術も取り入れ、さらなる高效率、高保守性を目ざしている。

The advanced boiling water reactor (ABWR), with a number of superior characteristics including high reliability and large capacity, has been developed. The first ABWR units have been realized as Units No. 6 and 7 of The Tokyo Electric Power Co., Inc.'s Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station.

Based on its considerable experience in the construction and maintenance of nuclear steam turbine and generator systems, Toshiba has developed the world's largest class steam turbine as well as generator systems with high efficiency, high reliability, small turbine buildings and a short construction period, and has been constructing Kashiwazaki-Kariwa Unit No. 7 jointly with General Electric Co. of the United States. We have been developing additional techniques to further improve the efficiency and maintainability of the steam turbine and generator system of the next ABWR plant, based on techniques that have been verified with fossil-fuel power plants.

## 1 まえがき

当社は BWR プラントに対して約 30 年前からタービン・発電機システムの設計・製作および保全業務を続け、運転経験も含む豊富な実績をもっている。ABWR 用のタービン・発電機システムの開発にあたっては、大容量、高效率を追求するとともに、多くの実績をもつ火力プラントにおける実証技術の適用も図り、信頼性の確保を基本理念として新技術の適用を積極的に推進した。わが国では原子力発電の重要性はますます大きくなるとともにプラントの大型化が図られてきた。一方他の電源との競合の面から、原子力プラントでもよりいっそうの合理化が必要となってきた。その結果、原子力発電所用タービン・発電機システムは、信頼性とともな合理化をも念頭にいた技術開発が重要となっている。その中で ABWR 向け 1,350 MW 級として最初に当社が作ったタービンプラントが K-7 である。

ここでは、K-7 の技術の特長および次期 ABWR 用に開発したさらに進んだ技術について述べる。なお、K-7 の蒸気タービンと発電機の本体は米国 GE 社の所掌であるが、GE 社の委託により据付および機器製作の一部を当社で実施している (図 1)。また、タービンの制御盤、タービンおよび発電機の補機装置、ならびに復水器、給水加熱器などの熱交換器は GE 社の本体に合わせて当社が設計・製作した。

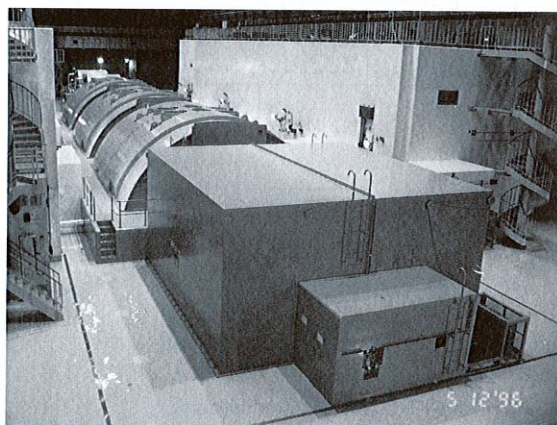


図 1. K-7 蒸気タービン 当社が据付けた GE 社 1,356 MW 蒸気タービン。  
K-7 steam turbine

## 2 タービンプラント

K-7 タービンプラントの特長を図 2 に示すとともな主な技術を以下に述べる。

### 2.1 熱効率の向上

熱効率は先行の BWR 1,100 MW 機を基準に、原子炉の出力増加、主蒸気の圧力上昇、再熱サイクルの採用、ヒー

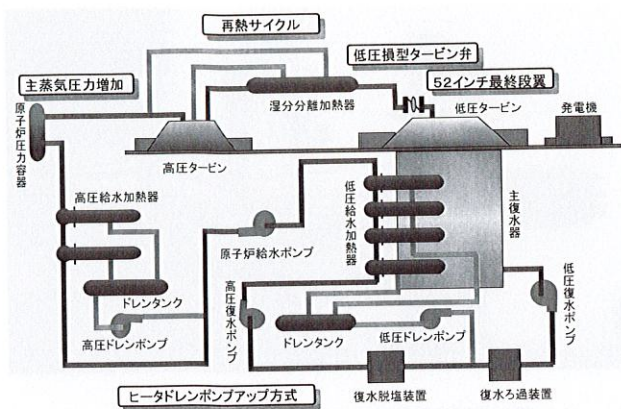


図2. K-7タービンプラントの特長 信頼性を基本理念に大容量化, 高性能化を追求した。

Characteristics of K-7 turbine plant

タドレンポンプアップ方式の採用, 低圧損型の低圧タービン入口弁の採用およびタービン最終段翼の長翼化 (52 インチ翼の採用) によるタービン性能向上分を効率向上項目として加え, 夏場の海水温度を考慮して 1,356 MW を決定した。なお, 海水温度が低い場合の熱平衡線図も作り, より高い電気出力で運転できることを可能とする運転方法への対応もできるように考えられている。

## 2.2 再熱サイクル

東北電力(株)女川原子力発電所 2 号機に続き, 経済的効果が大きい K-7 でも再熱サイクルを採用した。再熱サイクルにおけるキーコンポーネントである湿分分離加熱器 (MSH) は, 内径 3.7 m, 長さ 33 m, 重量 400 t と大型機器である。その加熱管は応力腐食割れが起こりにくく, かつ伝熱性能の良いフェライト系のステンレスチューブとしており, 2 段再熱としている。

## 2.3 ヒータドレンポンプアップシステム

国内 BWR タービンプラントは, 給水水質の面から給水加熱器のドレンは次段の給水加熱器に送水後最終的にすべてのドレンを復水器に回収していた。BWR も運転を重ねるとともに材料改善を図り, 近年のプラントは鉄分濃度をはじめ水質の改善を実現している。水質のデータをシミュレートした結果, 高圧給水加熱器伝熱管への極低コバルト材の採用, タービン本体, 給水加熱器, 配管などへの耐食性材料の適用など材料改善の効果が実証されたため, ヒータドレンを直接復水系に回収できると判断した。ヒータドレンをポンプで復水系に回収することにより, プラント熱効率の向上とともに, 給水加熱器, 復水配管, 復水ポンプおよび復水浄化設備のコンパクト化が図られた。K-7 では高圧および低圧ドレンを復水系に回収することにより, 熱効率で 0.5 % の向上, 復水設備の通過流量で 35 % の設備低減を図っている。

## 2.4 コンパクト型タービン建屋

従来型 BWR では主蒸気止め弁と蒸気加減弁はタービン軸方向の高圧タービンの前側に置いていたが, K-7 ではタービン軸直角方向の原子炉側に配置することにした。このことによりタービン建屋を 1 スパン低減することができた。また, MSH はタービン運転床面の低圧タービンの両側に配置したが, K-6/7 共通の廃棄物処理建屋の上を定期検査 (以下, 定検と略記) 時のタービン分解部品のレイダウエリアとして確保した。そのほかにもタービン建屋のコンパクト化を追求し, 機器配置のくふうなどを重ねた結果, タービン建屋体積は, 出力が増加したにもかかわらず逆に 1,100 MW BWR プラントより 10 % 以上小型となっている。

## 3 蒸気タービンおよびタービン発電機

当社は K-7 の経験を基に近年の合理化要求を入れ, 次期 ABWR に向け蒸気タービンおよびタービン発電機のさらなる改善に取り組んだ。

### 3.1 大容量・高効率蒸気タービン

**3.1.1 52 インチ最終段翼** 当社の 52 インチ最終段翼は従来の翼形状に対してより高い性能が得られる設計としている。高性能形状翼の採用により従来形状翼に比べ段落性能, つまり羽根の性能は相対値で約 4 % のアップが図れる。低圧タービンを段落群として最新の三次元流体設計を行い蒸気通路部として性能の向上を図っている。

**3.1.2 内部効率向上** タービン効率向上策には以下の項目などがある。これらは, 解析検証を行いその効果・信頼性が確認されており, また火力プラントで採用実績を十分積んだ技術である。これら技術の採用により, 従来レベルに比べ熱効率で 1 % 以上の向上が図れる。

- (1) 高性能動翼 高効率部に流量をシフト
- (2) リーンノズル 2 次流れ損失を低減
- (3) マルチチップフィン 動翼先端の漏えい損失低減
- (4) High-Low ノズルパッキン ノズル内輪側漏えい損失低減
- (5) 高性能低圧タービン排気室 新型曲面による損失低減

**3.1.3 保守性向上** 保守性の向上は定検期間の短縮を主目的として技術開発を進め, 運転プラントにバックフィットして早期適用を図っている。油圧式カップリングボルトは, 柏崎刈羽原子力発電所 3 号機 (K-3) の初回定検で原子力プラントとしてわが国で初めて適用した。油圧式ケーシングボルト, 主要弁油圧テンションナも近々運転中の原子力プラントに導入予定である。

### 3.2 大容量, コンパクトタービン発電機

発電機は原子力用大容量機であることを十分考慮し, これまでの 100 台を超す水冷却発電機の製作・運転実績に基づき, 大容量化への取組みを進めている。設計の基本は実

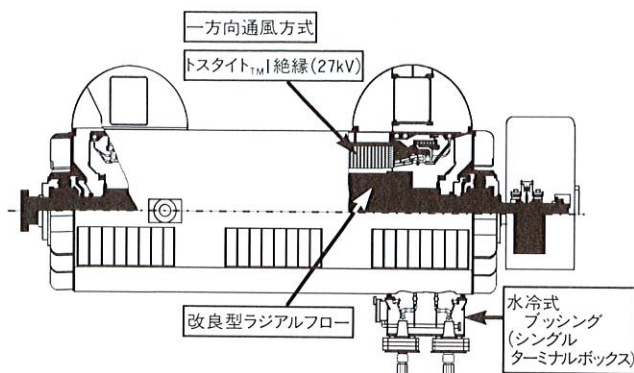


図3. ABWR用タービン発電機 最新の技術を適用し、信頼性向上、コンパクト化を実現している。

Toshiba turbine generator for ABWR

績のある1,300 MVA 発電機におき、回転子への改良型ラジアルフロー、固定子機内通風への1方向通風の適用などの冷却方式の改善、およびトスタイト™絶縁固定子コイルによる発電機電圧の高電圧化により、容量増に対し発電機体格の増加を最小限に抑えたコンパクト設計としている。また、従来の水素冷却ブッシングに代わる水冷式ブッシングの適用により、1,500 MVA 超級発電機においてもシングルターミナルボックスの構成とすることが可能となり、配置設計の合理化に寄与している(図3)。

励磁方式は、実績のあるサイリスタ励磁方式とし、系統安定化装置(PSS: Power System Stabilizer)を付加した超速応励磁方式により過渡安定度・動態安定度の向上を実現している。

#### 4 K-7の建設及び試運転

K-7は1992年2月に着工し、97年7月の運転開始に向け、53か月の工期で建設が進められている。建設工事にあたっては、工期短縮、経済性追求のため、数々のくふうを凝らしてきた。

##### 4.1 大物機器の搬入

復水器下部本体は従来4分割でサイトに搬入し、細管挿入も含め現地で搬入、組立てていた。K-7では、据付工期の短縮をねらって、工場での細管挿入も含めた下部胴一体製造、一体搬入・据付を実施することにより、現地での据付工期を従来の13か月から5.5か月に短縮できた。

発電機の搬入は従来ジャッキ架構を組んで搬入していたが、2台のタービン建屋走行クレーンと新たに開発した複合天秤(びん)を用いて、搬入と据付を段取替えなしで行った。

工場一体で製作されたMSHはタービン建屋の外で運転床面まで持ち上げられた後、低圧タービンの両側に一気に引込まれた(図4)。また、8,000 t・mの大型クレーンをタービン建屋海側に配置し、給水加熱器、復水ポンプ、大型

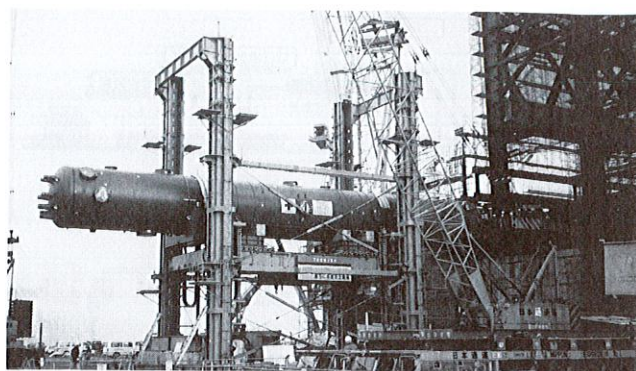


図4. K-7 湿分分離加熱器(MSH) 再熱サイクルのキーコンポーネントであるMSHは、胴径3.7 m、全長33 m、重量400 tで2基からなる。

K-7 moisture separator heater

配管装置などを吊(つ)り込んだ。

##### 4.2 大型ブロック化

配管工事は配管とサポート、架台などを現場近傍で組み立て、大型ブロックとして搬入した。この結果、現場での溶接作業の低減と平行作業による工期短縮を可能とした。

##### 4.3 試運転

K-7は96年10月10日に燃料装荷開始、同年12月17日発電機初併入を行い順調に試運転が進められている。20%、50%、75%そして100%の各段階の試運転で、すべての想定される事象を配慮して決められた試験項目を行い、健全性を確認した後に営業運転が開始される。

#### 5 あとがき

約20年の間、多くの関係者の熱意と努力が注がれたABWRの初号機であるK-6/7がまさに完成されようとしている。この歴史的プラントのタービン・発電機システムとして高効率、高信頼の大容量システムを納入することができた。K-7の営業運転開始までには、最後の試運転調整が残っているので、当面はその業務に全力を傾ける。さらにその後はK-6/7の経験を生かし、次期ABWRに向けいっそうの技術向上を図り、ABWRの発展を目標に行きたいと思っている。関係各位のにご指導、ごべんたつをお願いする次第である。



森 純夫 Sumio Mori

原子力事業部原子力タービン・電機技術部部长。  
原子力発電用蒸気タービン設備のシステムエンジニアリング業務に従事。  
Nuclear Energy Div.



北村 理 Osamu Kitamura

京浜事業所タービンプラント機器部主幹。  
蒸気タービンの開発、設計に従事。  
Keihin Product Operations