

# BWRタービン設備の新技术

## Recent Technology for BWR Nuclear Steam Turbine Unit

第三次改良標準プラントであるABWR(改良型沸騰水型原子炉)プラントは、すでに50 Hz用の電気出力1,356 MW級の建設が計画されている。

日立製作所では、ABWRプラントの全体を国産化するための技術の蓄積を蒸気タービン設備も含めて行ってきた。その成果として、最近営業運転を開始した東京電力株式会社 柏崎刈羽原子力発電所5号機以後のプラントへのバタフライ型組合せ中間弁の適用、および現在製作中の中部電力株式会社浜岡原子力発電所4号機以後のプラントへの湿分分離加熱器の適用などが行われている。

森谷新一\* *Shin'ichi Moriya*  
 増田豊彦\* *Toyohiko Masuda*  
 柏原克人\* *Katsuto Kashiwabara*  
 大島義邦\* *Yoshikuni Ôshima*

### 1 緒言

日立製作所製原子力発電用蒸気タービン設備は、現状の国内最高出力機である電気出力1,100 MW級のもの50 Hz用3台と60 Hz用1台が営業運転に入っている。ABWR(改良型沸騰水型原子炉)プラントとしては、すでに50 Hz用の電気出力1,356 MWのもの(2台)の建設が計画されている。このプラントでは湿分分離加熱器、復水器、給水加熱器などの補機類やタービン・発電機制御装置などを国内のメーカーが担当することで計画が進められている。

日立製作所でも国産のABWRプラント用の電気出力1,350 MW級蒸気タービン設備に必要な技術開発が完了している<sup>1)~4)</sup>。

50 Hz用ABWRプラントの蒸気タービン設備の基本仕様をBWR-5プラントの従来機と比較して表1に示す。また、このタービン設備に適用した主な新技术の採用状況を図1に示す。

以下に、これらの新技术の概要について述べる。

### 2 蒸気タービン

ABWRプラント用蒸気タービンでは、電気出力を1,350 MW級とし、52インチ長翼、湿分分離加熱器およびバタフライ型組合せ中間弁の採用によって高効率化を図った。さらに、ディフューザ付き低圧排気室などの高効率化新技术の適用も従来機と同様に行うことができる。50 Hz用TC 6 F-52型機の構造を図2に示す。この機械では、電気出力1,100 MW級先行機での製作実績と運転経験を生かした信頼性の高い技術と、新たに開発した技術を使用しているが、その中でも、特筆される新技术として次のものがある。

#### (1) 最終段落用52インチ長翼の開発<sup>5)</sup>

日立製作所では、昭和60年に1,500 r/min用52インチ長翼の開発を完了し、引き続いて昭和61年には1,800 r/min用52インチ長翼を完成した。この2種の52インチ長翼を図3に示す。

従来の最大長翼は、1,500 r/min用では41インチ、1,800 r/min用では43インチであった。新しく開発された52インチ長翼を採用することによって、長翼化による排気損失の低減効果から約40%の出力増加が、あるいは同一の電気出力とすればそれに相当する分の熱効率向上が図られることになる。一方、最終段長翼の能力限界近くまで使用するといった、タービン単体での大容量化の面からとらえると、従来のTC 6 F-41型またはTC 6 F-43型では電気出力1,300 MW級が最大出力レベルであったが、TC 6 F-52型とすれば電気出力1,700 MW以上の出力にも対応可能となる。あるいは電気出力1,100 MW級もTC 4 F-52型で可能ということになる。しかし、実際のプラントでは電気出力1,100 MW級は従来技術で標準化が進められているので、今後の標準出力とされる電気出力1,350 MW級のプラントに52インチ長翼を採用して、主として熱効率の向上を期待することになろう。

#### (2) ロータ系の新設計手法の開発

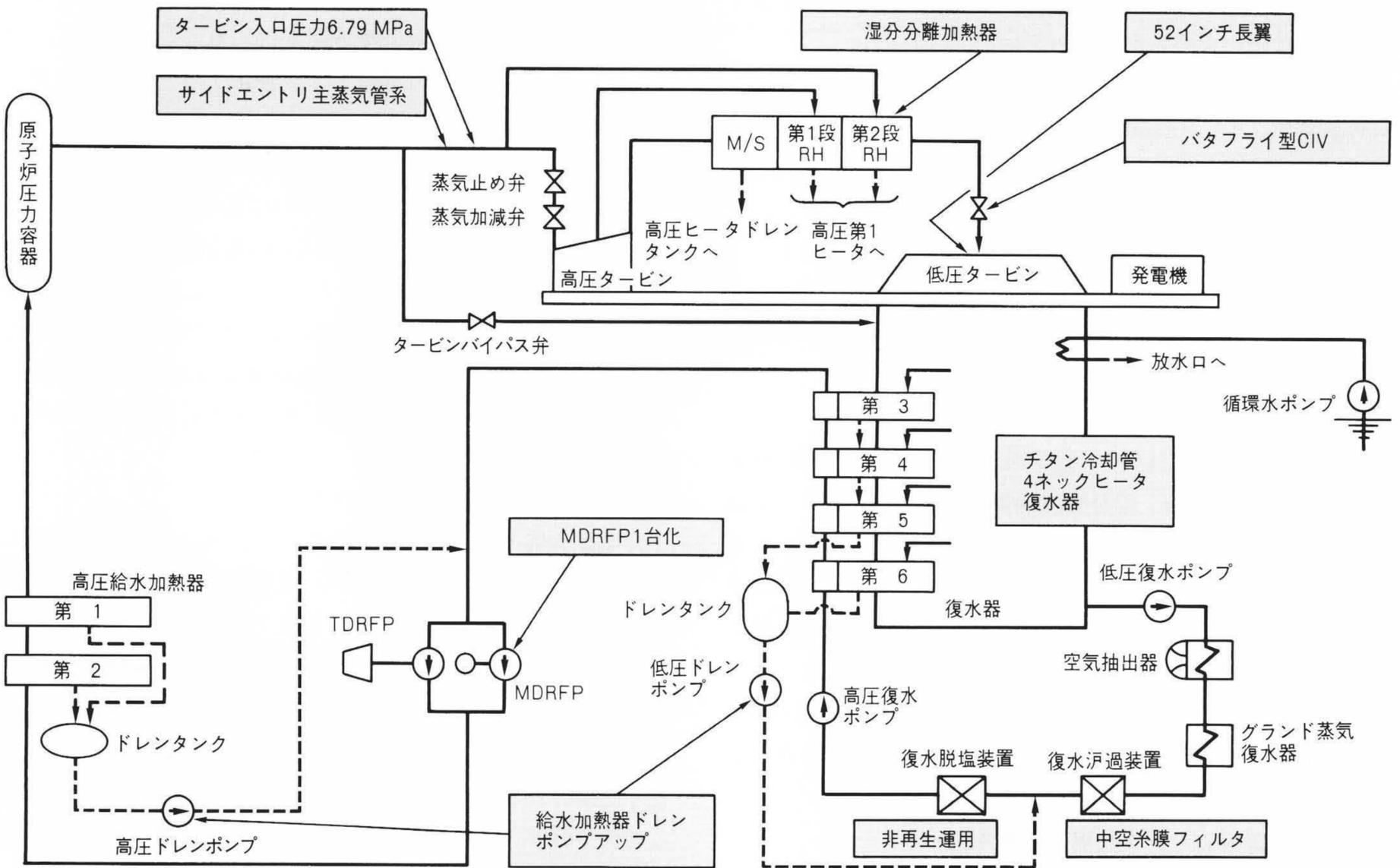
大容量蒸気タービン・発電機のロータ系は信頼性確保のために重要な因子であるが、最近、送電系統での電気的外乱、例えば落雷、再閉路などによる電気ショックや主変圧器の切り離し時に起こる電気ショックなどによって発電機ロータが電氣的に励振され、この励振力によってロータ系全体にねじり振動を発生するとともに、低圧ロータに植えられている長翼も励振されるという現象が検討項目に加えられるようになってきている。これは翼・軸連成振動現象と呼ばれ、その動

\* 日立製作所 日立工場

表1 ABWRプラント用蒸気タービン・発電機設備の基本仕様 50 Hz用と比較すると、BWR-5プラントに比較しABWRプラントでは、原子炉熱出力19.2%増に対して電気出力23.3%増とした高効率形プラントである。なお、最近のBWR-5プラントでは、ABWR用の新技術を可能なものから適用して出力増加を図るようになってきている。

項目	ABWRプラント	BWR-5プラント		
		東京電力株式会社 柏崎刈羽原子力発電所 5号機	中部電力株式会社 浜岡原子力発電所 4号機	
1. 原子炉	● 定格熱出力	3,926 MW	3,293 MW	3,293 MW
	● 給水温度	215 °C	215.5 °C	215.6 °C
2. タービン	● 型式	TC6F-52	TC6F-41	TC6F-43
	● 定格電気出力	1,356 MW	1,100 MW	1,137 MW
	● 主蒸気圧力	6.79 MPa(abs)	6.65 MPa(abs)	6.65 MPa(abs)
	● 回転数	1,500 r/min	1,500 r/min	1,800 r/min
3. 復水器	● 定格真空度	5.07 kPa(abs)	5.07 kPa(abs)	5.07 kPa(abs)
	● 冷却管材料	チタン	チタン	チタン
	● 内蔵ヒータ	低圧 4本	低圧 4本	低圧 4本
4. 湿分分離加熱器	● 型式	2段再熱式	非再熱式	2段再熱式
5. 主蒸気系	● 主蒸気管導入	サイドエントリー	フロントエントリー	フロントエントリー
6. 復水給水	● 給水ポンプ	TDRFP×2台 MDRFP×1台	TDRFP×2台 MDRFP×2台	TDRFP×2台 MDRFP×2台
	● ヒータドレン	ポンプアップ	カスケード	カスケード
7. 発電機	● 型式	TFLQQ・KD	TFLQQ・KD	TFLQQ・KD
	● 定格出力	1,540 MVA	1,300 MVA	1,280 MVA
	● 極数	4	4	4
	● 力率	0.9	0.9	0.9

注：略語説明 ABWR(改良型沸騰水型原子炉), BWR(沸騰水型原子炉), TDRFP(タービン駆動給水ポンプ), MDRFP(電動機駆動給水ポンプ)



注：略語説明など M/S(湿分分離器), RH(加熱器), CIV(給合せ中間弁), [ ] は最新技術を示す。

図1 ABWRプラント用蒸気タービン・発電機設備の技術的特徴 おのおのの構成要素に最新技術が適用され、高効率で信頼性の高いシステムとなっている。

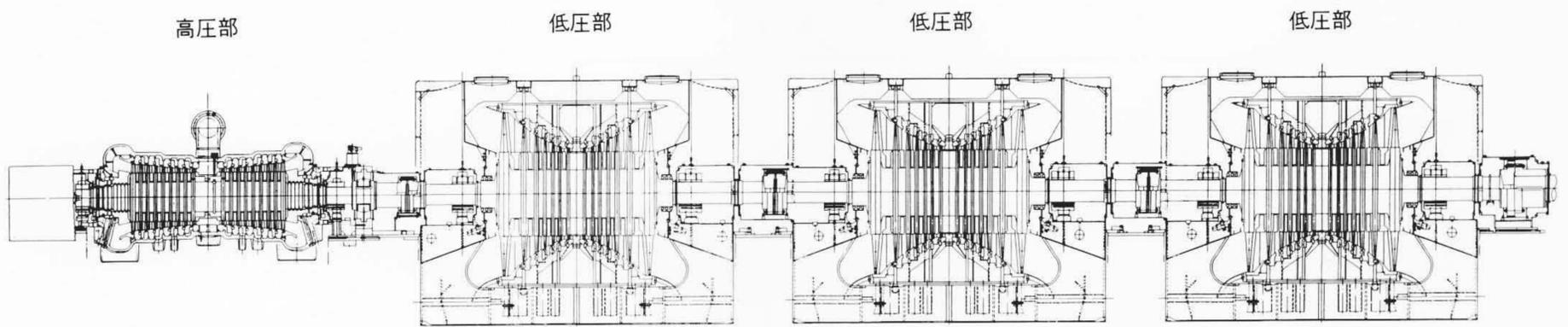


図2 TC6F-52型原子力用タービンの構造 本図は50 Hz向け、電気出力1,356 MW、TC6F-52型蒸気タービンの断面構造を示すもので、タービン前面から発電機とのカップリング面までの全長は49.6 mである。

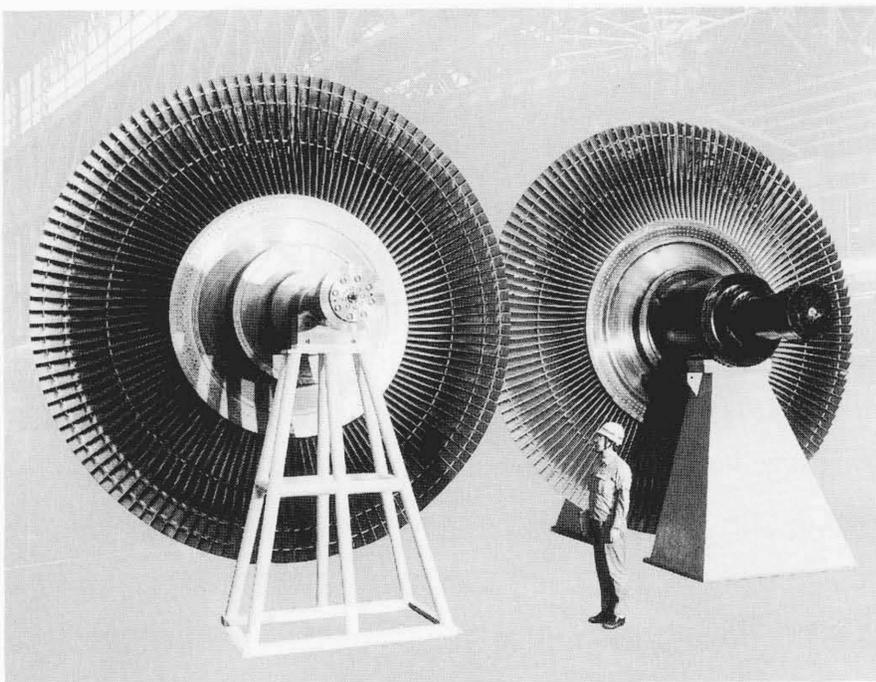


図3 52インチ長翼の実物翼試験ロータ 左側に1,800 r/min(60 Hz)用を、右側に1,500 r/min(50 Hz)用を示す。この実物翼試験ロータによって回転実証試験を実施し、52インチ長翼の高い信頼性を確認している。

作説明を図4に示す。

日立製作所では、現在までに大容量機のロータ系の翼・軸連成振動の解析プログラムを作成し、おのこの実プラントのロータ系の解析を推進している<sup>6),7)</sup>。さらには、実機火力用700 MW蒸気タービンでの振動数を測定することによって、解析計算精度の確認を行った<sup>8)</sup>。

このように、高精度の解析と火力機での実測を行った結果、図5に示す装置を用いて、ロータの翼・軸連成ねじり固有振動数をロータ単体で測定し確認する技術を確立できたので、工場出荷前に信頼性確認を行うことができるようになった。この確認試験は最近の新設プラントに適用している。

(3) 湿分分離加熱器の開発<sup>2),4)</sup>

最近では、熱効率向上のために湿分分離加熱器を用いた再熱プラントが主流となっている。この再熱方式を適用することによって、従来の非再熱方式に比べ電気出力が約2%向上

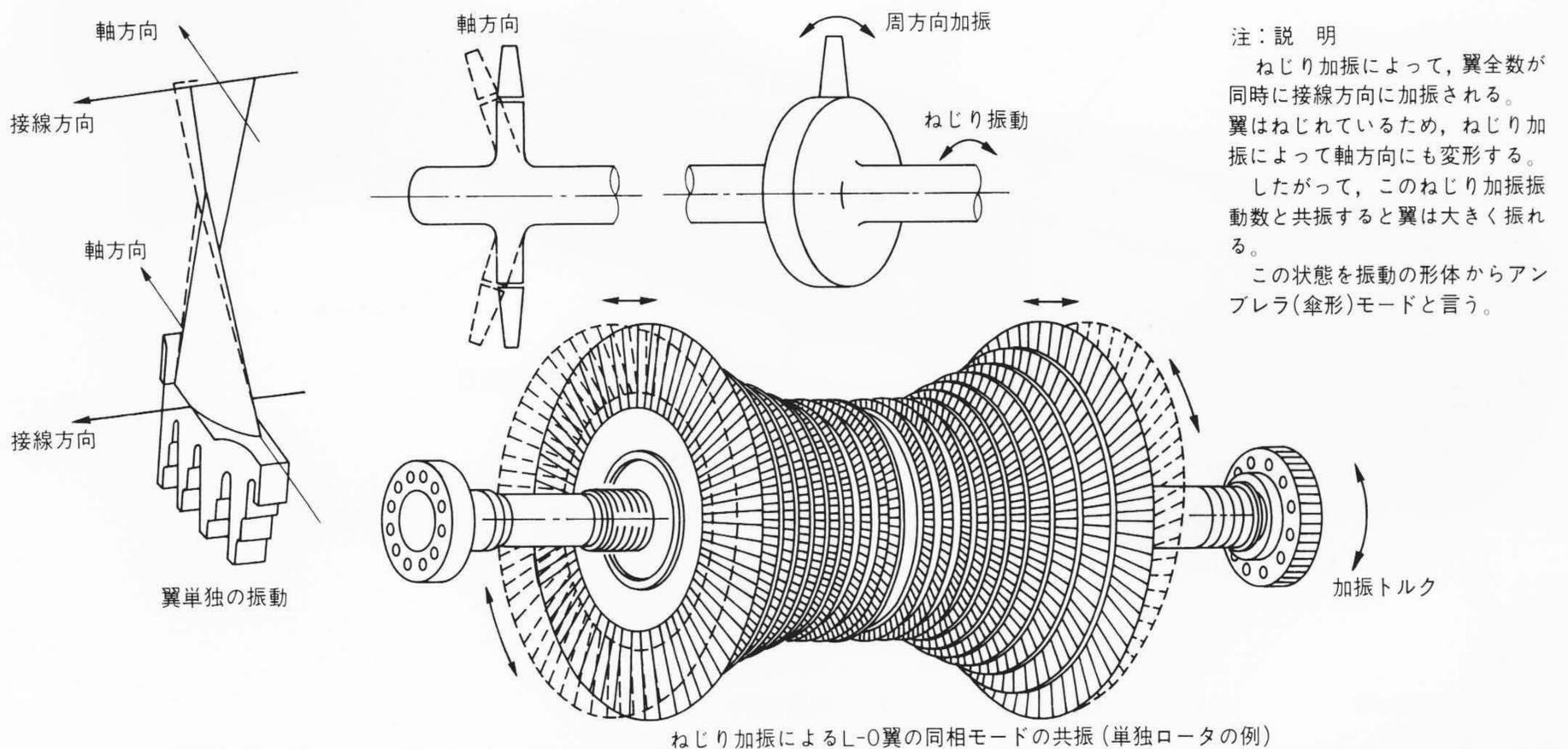


図4 翼・軸連成振動説明図 運転中の低圧ロータが、発電機に働く逆相磁界による倍周波トルクによってねじり加振されて、ロータ車軸および長翼の固有振動数との共振現象が発生するおそれがあるため、低圧ロータの設計ではこの共振を避けるようにしなければならない。

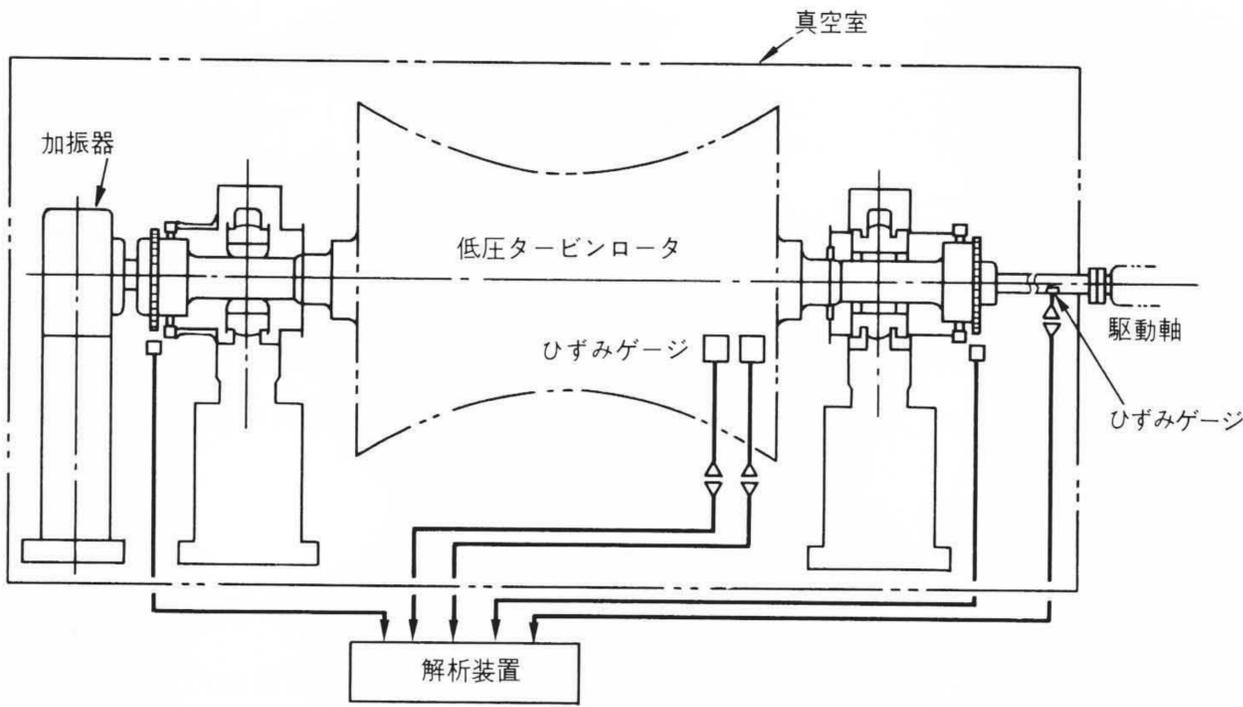


図5 バンカーテスト装置  
完成した低圧ロータの翼・軸連成固有振動数が、倍周波数トルクによる励振振動数と共振していないことは、この図に示す装置(高速ダイナミックバランス装置を流用)によって確認する。

する。また、低圧タービン入口蒸気が乾き蒸気となるほか、低圧タービン内の蒸気湿り度が全体に浅くなるので、エロージョンの軽減も図られる。この湿分分離加熱器についても、実機大モデル試験などによる信頼性確認試験を完了しており、現在製作中の中部電力株式会社浜岡原子力発電所4号機(以下、浜岡4号機と言う。)、電気出力1,137 MW蒸気タービンに適用した。実機への採用にあたっては海外先行機での運転実績調査を十分に行って、信頼性の向上を図っている。この

タービンの仕様は表1に示したとおりである。

湿分分離加熱器の構造を図6に示す。湿分分離加熱器の全長は、1,300 MW級では33 m、1,100 MW級では28 m(浜岡4号機用)の超大形压力容器であるとともに多数の配管に接続された構造となっているので、運転中の分離ドレンを含む自重と熱変形による応力、および配管の熱伸びによる反力がクロスアラウンド管系に及ぼす影響について綿密な検討を行った。さらに、地震発生時の信頼性については、モデル装置によっ

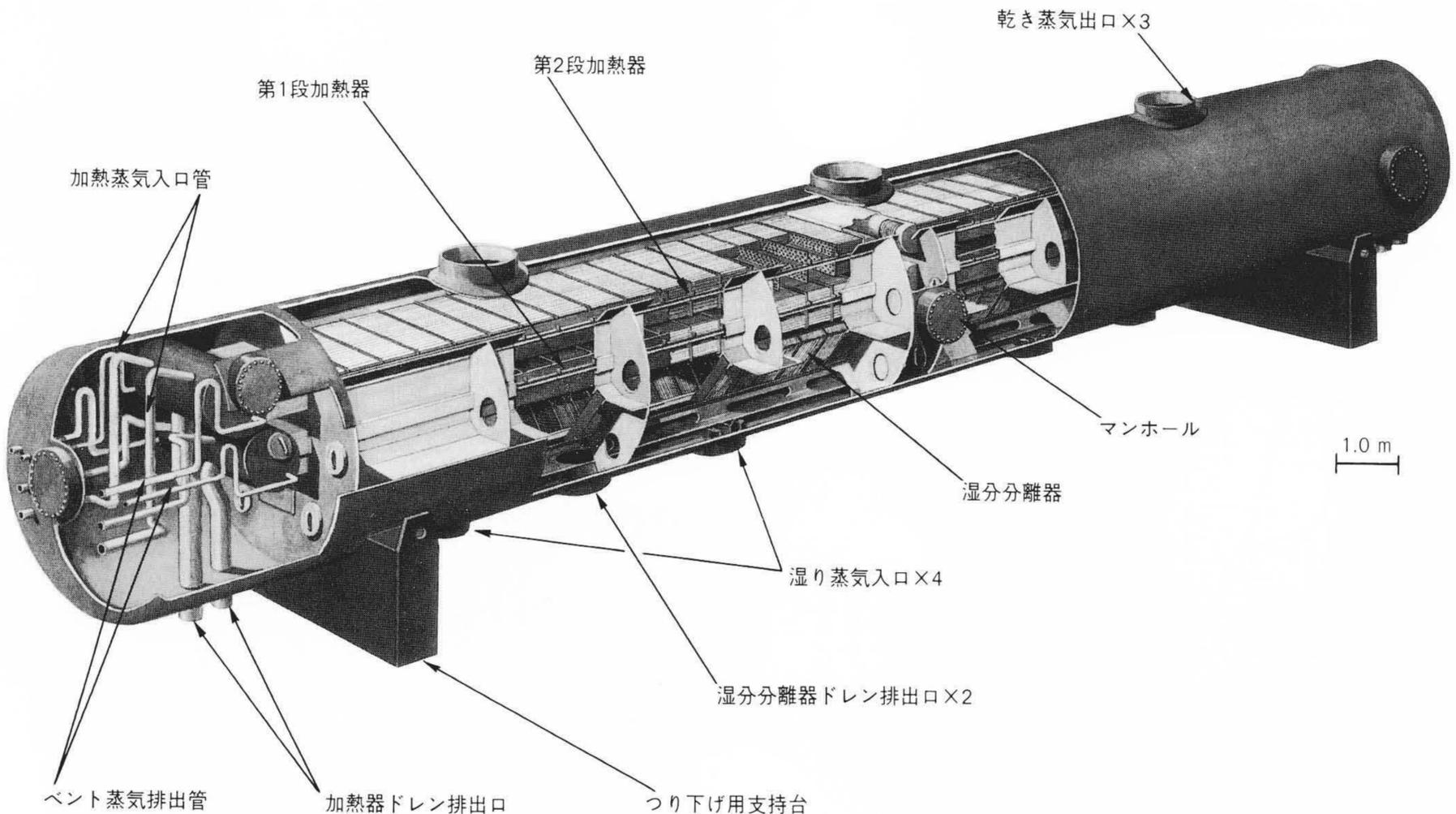


図6 湿分分離加熱器の構造 全長33 mの胴体内に、この図に示すように湿分分離器、第1段加熱器、第2段加熱器の順に配置されている。これが50%容量であり、蒸気タービンの両側に2基設置されている。なおこの新技術は、実長大モデル試験などによる信頼性確認試験を行い、国内BWRプラントとして初めて浜岡4号機に採用した。浜岡4号機のもは全長28 mである。

て緩衝機構の機能確認と振動特性の測定を行った。この試験では、大型加振器を用いて、国内原子力発電プラントに適用されているなかでも最大級の加速度 $4.5 \text{ m/s}^2$ で加振試験を実施し、その結果を実機設計に反映した。浜岡4号機用湿分分離加熱器の製作状況を図7に示す。

### 3 バタフライ型組合せ中間弁<sup>4)</sup>

蒸気タービン制御には、製作実績と運転経験のあるデジタル電子油圧制御装置、および大口径タービンバイパス弁を使用する。さらに、従来縦(たて)型であった組合せ中間弁(インタセプト弁と中間蒸気止め弁)をバタフライ弁にすることによって、この弁のコンパクト化を図っている。

なお、この組合せ中間弁の機能は、負荷遮断およびタービントリップ時に急閉して、タービンの速度上昇を防止すること、ならびに負荷遮断後クロスアラウンド管と湿分分離加熱器内に残留した蒸気を、低圧タービンに排出しながらタービンの速度制御を行うことである。バタフライ型中間弁の構造を図8に示す。この構造の組合せ中間弁は、最近の新設プラントに適用している。

また、バタフライ弁は管路の一部を構成し蒸気流の方向を変えないので圧力損失が少なく、熱効率向上効果も期待できる。

### 4 クロスアラウンド管

湿分分離加熱器は、上述のように大型の容器なので、その設置場所については十分に考慮を払わなければならない。また、高圧排気ノズルから湿分分離加熱器を経て低圧蒸気入口ノズルに連結するクロスアラウンド管の本数と経路も重要な設計要素である。湿分分離加熱器をタービン運転床下に配置した例を図9に示す。このような配置では湿分分離器を復水器のメンテナンススペースから外して、高圧側にシフトした形で配置する必要があるが、同図にみるように、湿分分離加熱器から各低圧に延びるクロスアラウンド管の長さがほぼ等しくなるなど、良好な配管経路となっている。また、バタフライ型組合せ中間弁はクロスアラウンド管と同径のケーシング内に収まっており、ベンドのないスムーズな配管を可能としている。なお、この方式の配置は、定期検査時の分解部品レイダウンでタービン運転床面を広く使えるというメリットがある。これは、浜岡4号機に適用されている。

一方、建屋のコンパクト化をねらって、湿分分離加熱器をタービン運転床面に配置する場合もある。現在計画中的の電気出力1,350 MW級のABWRプラントでは、この型式の配置を採用している。この場合には湿分分離加熱器を遮へい壁で囲う必要があるため、図10に示すようなタービン運転床面上の機器配置となる。この場合、湿分分離加熱器は低圧タービンの真横に置かれ、クロスアラウンド管は熱伸びの吸収と、バ

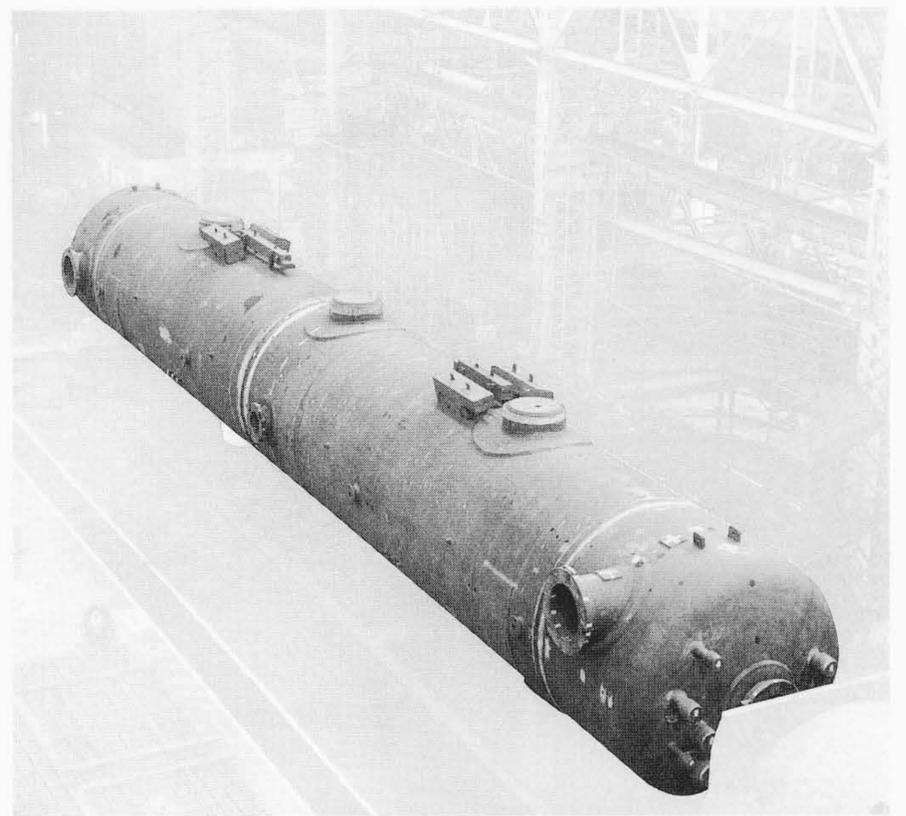


図7 湿分分離加熱器の製作状況 現在、日立製作所の工場で浜岡4号機用の湿分分離加熱器を製作中である。この写真は外径3.8 m×長さ28 mの全長に組み立てた状態を示しており、これが蒸気タービンの左右(床下)に2個配置される。

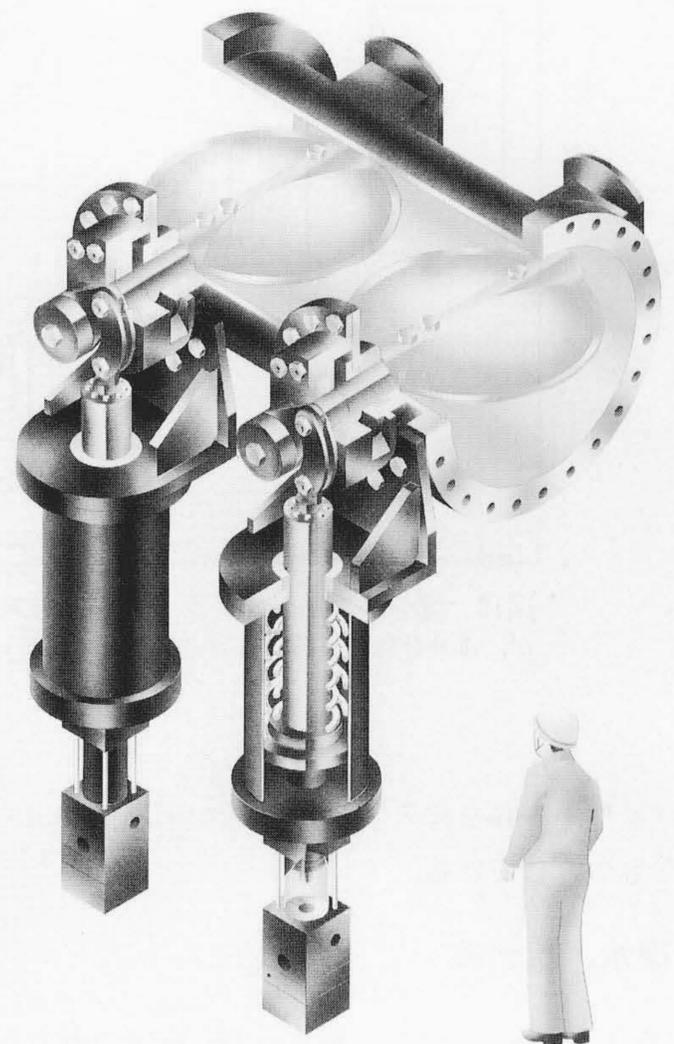


図8 バタフライ型組合せ中間弁 クロスアラウンド管と同径の一つの弁ケーシング内に、中間蒸気止め弁とインタセプト弁が内蔵されている。

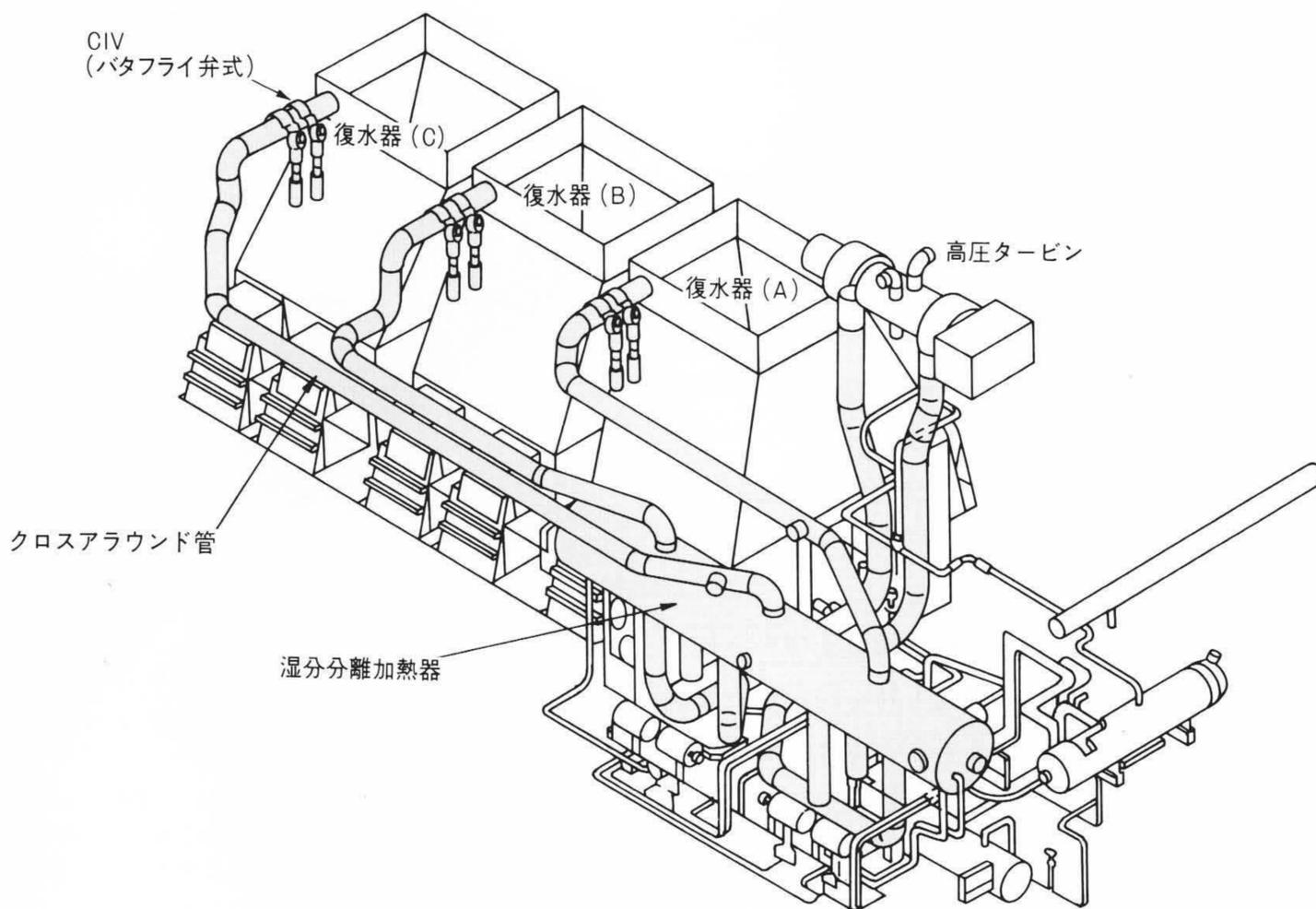


図9 湿分分離器をタービン運転床下に配置した例 運転床下に湿分分離器を配置すると定期検査時のレイ  
ダウンスペースが広くとれるなどのメリットが得られる。

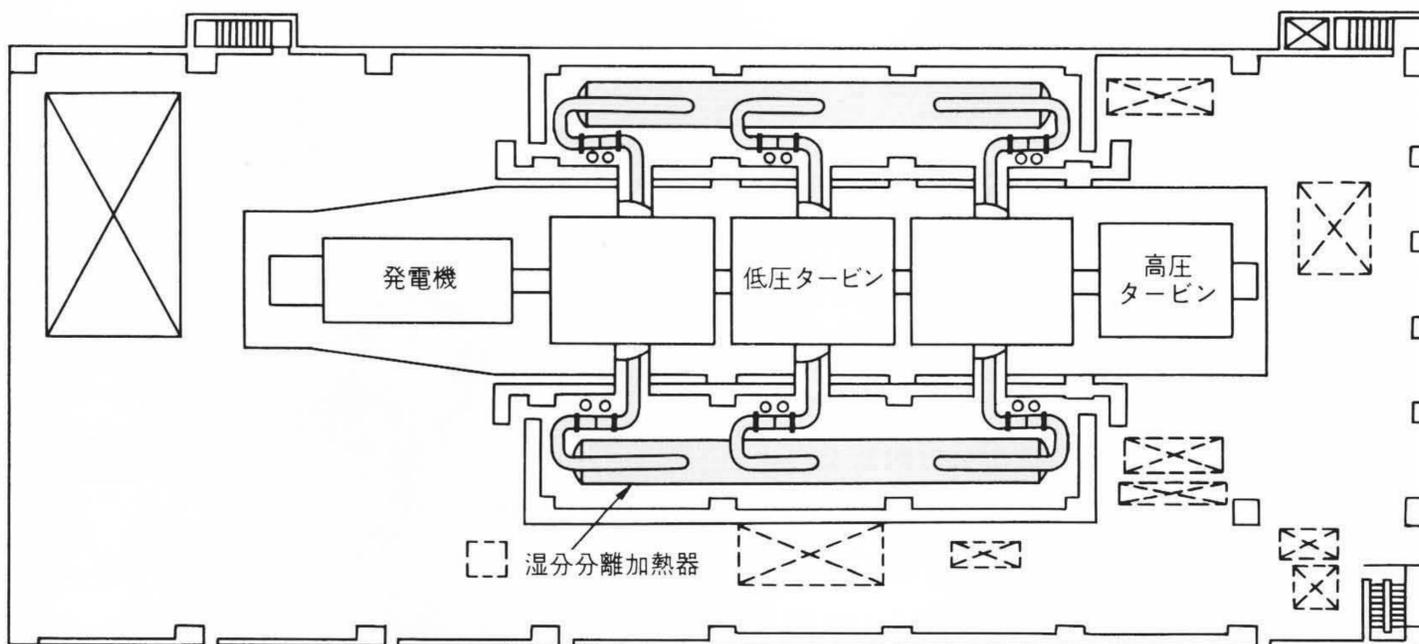


図10 湿分分離加熱器をタービン運転床上に配置した例 この図はタービン運転床面の平面図を示している  
が、湿分分離加熱器はコンクリートの遮へい壁に囲まれて、タービンの両側に配置されている。

タフライ型中間弁を挿入するスペース確保のためにループを設けたものとしている。

## 5 復水，給水系

ABWRプラントの復水，給水系でも設備全体のスケールアップを図るとともに，経済性向上のために種々の新技術を導入している。

### 5.1 復水，給水系統構成

系統構成と採用技術については図1に示したとおりである

が，その主な特徴を次に述べる。

- (1) 復水器は，先行の電気出力1,100 MW級BWRプラントで実績のある，チタン製冷却管と4ネックヒータ構造の組み合わせを採用している。
- (2) 給水加熱器の構成は，先行BWRプラントと同じく高圧2段×2系列，低圧4段×3系列としているが，後述する給水加熱器ドレンアップ方式の採用によって，設備の合理化と性能の向上を図っている。このドレンアップ方式は，復水浄化系の容量低減だけでなく，復水器ネックヒータの軽量化も図

られるので、結果として、ABWRプラントの低圧給水加熱器は電気出力1,100 MW級BWRプラントのものよりも小型のものとなっている。

(3) 復水浄化系は、二重式浄化が近年の標準型式となっている。前置汙過装置は従来のプリコート式に対して、新技术である非助剤型(中空糸膜)フィルタを3基設置している。本型式のフィルタは、すでに稼動中プラントにも追設されているものもある。復水脱塩装置は混床式を6基設置しているが、タービン設備に耐食性材料を使用した先行BWRプラントでの良好な非再生運用の実績を反映して、ABWRプラントでもこの運用方式を適用することになっている。

(4) 以上の復水浄化系の容量低減と新技术の採用および廃棄物処理設備の改善も考慮すると、廃棄物発生量は大幅に低減され、設備容量の削減にも寄与する。

## 5.2 給水加熱器ドレンアップ方式

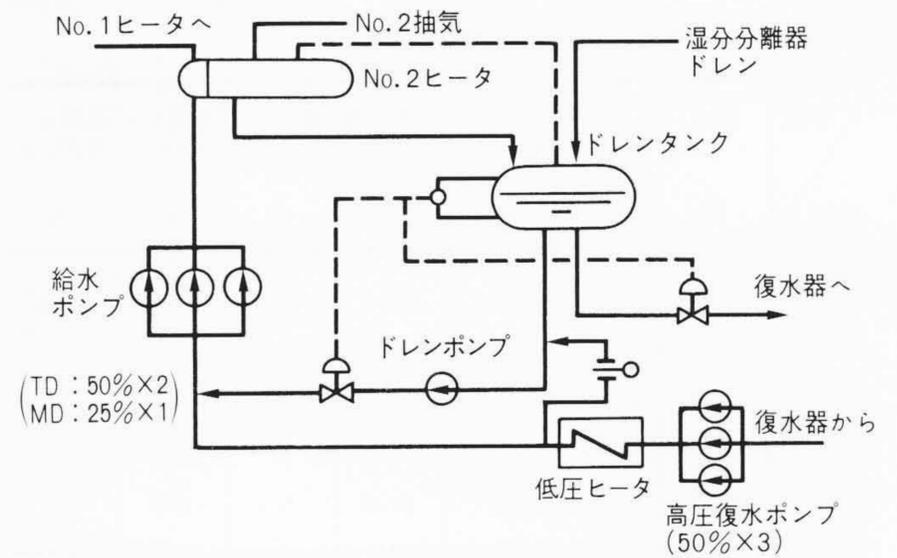
従来、国内BWRプラントでは原子炉給水水質の確保と従事者が受ける放射線量低減の観点から、給水加熱器ドレンの全量を復水器にカスケードし、復水浄化装置で処理する方式が採用されていた。しかし、クラッド低減技術を採用した最新のBWRプラントの水質上の良好な運転実績を考慮し、ABWRプラントでは給水加熱器ドレンを直接復水系に回収するドレンアップ方式を採用することにした。

高压および低圧ドレンポンプアップの機器構成を図11、12に示す。高压ドレンアップでは、高压給水加熱器ドレンを高压ドレンタンクに回収し、ドレンポンプによって昇圧して給水ポンプの吸込側に回収する。低圧ドレンアップでは、ドレン水質上の配慮から復水脱塩装置の上流側に回収している。通常運転中はドレンポンプ出口に設置された水位調節弁でドレンタンク水位を一定にするよう制御し、起動、停止時および負荷変化時では余剰ドレンが発生するので、これを処理するために復水器への排出ラインを設置している。

高压および低圧のドレンポンプの必要揚程は、復水、給水系統内の他のポンプの特性と系統圧力損失特性および給水加熱器内圧によって決定されるが、プラント出力が約50%以上となった時点で、ドレンアップを開始するように計画している。

ドレンアップ方式では、給水ポンプ上流のポンプ台数が増加するが、おのこのポンプがトリップしたときにも安定した給水を確保するように、各ポンプ間の相互インタロックを設けている。

特に高压ドレンアップでは、高温の飽和ドレン処理となるため、負荷急減時のドレンポンプ有効吸込圧力(NPSH: Net Positive Suction Head)の確保が重要となる。つまり、ポンプ吸込圧力の降下に対して、ドレン飽和圧力の追従が遅れるため安定した有効吸込圧力の確保が困難であった。日立製作所ではこの対応策として、従来一般に採用されている縦型のドレンポンプを横型とすることによって、ドレンポンプ入口



注：略語説明 TD (タービン駆動)  
MD (電動機駆動)

図11 高压ヒータドレンポンプアップの機器構成 第2給水加熱器ドレンをドレンタンクに回収した後、給水ポンプ吸込側にポンプアップする。

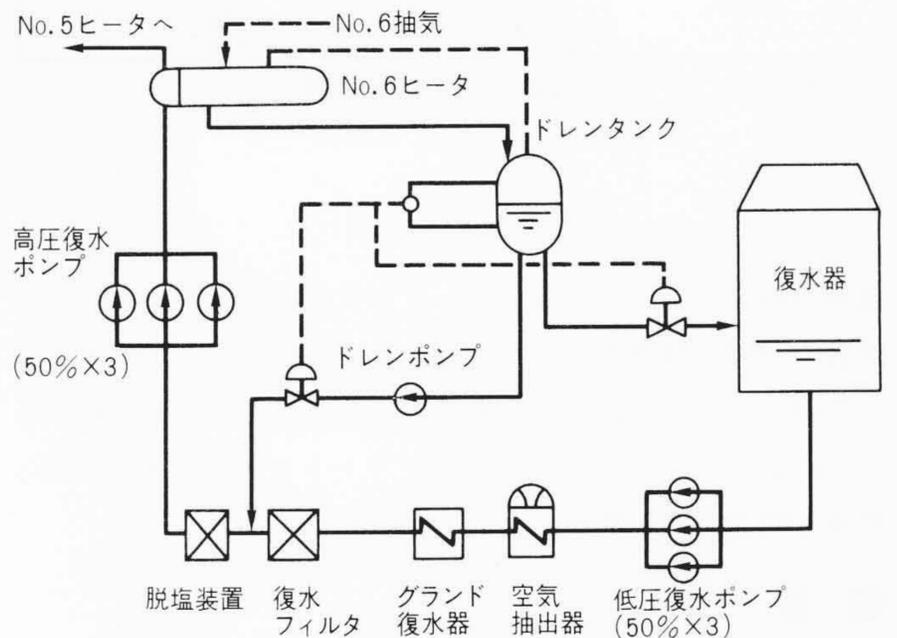


図12 低圧ヒータドレンポンプアップの機器構成 第6給水加熱器ドレンを、復水脱塩装置の上流側にポンプアップする。

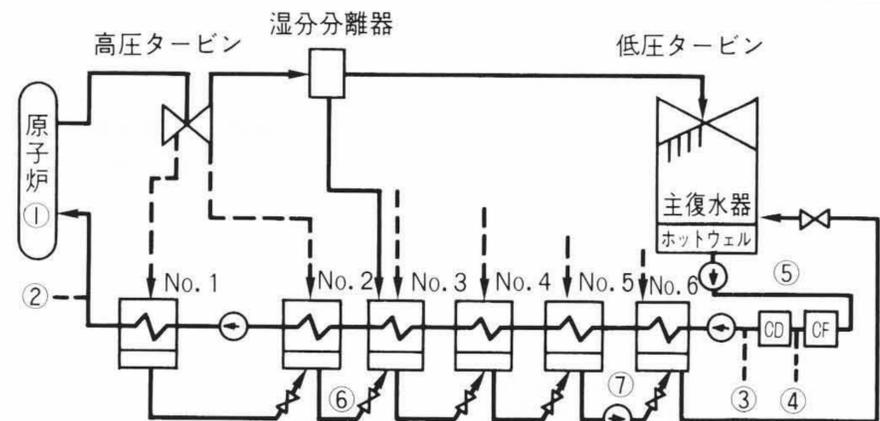
側の飽和ドレン容積を低減し、また復水系統から低温復水の一部をドレンポンプ吸込側に注入するという方式を開発している。この方式の適用によって、ドレンポンプの信頼性が確保されるとともに、プラント負荷急減時でもドレンポンプを操作せずに済ませられるようになった。

## 5.3 給水水質評価<sup>9)</sup>

近年のBWRプラントでは、給水中の腐食生成金属の低減のために二重式浄化方式、および復水中の溶存酸素制御を採用しており、減肉対策のために給水加熱器、湿分分離器、蒸気管等に耐食性材料を使用するなど対策を施した結果、良好な給水水質実績が得られている。最近の代表的プラントでのタービン系統各点の水質調査結果を表2に示す。このような実機水質の追跡調査によって、復水系やドレン系の金属腐食速

表2 タービン設備の水質調査結果 最新の電気出力1,100 MW BWRプラントの各測定点の水質調査結果を示す。

系統	炉水	給水	復水脱塩器出口	復水汚過器出口	復水ポンプ出口	高圧ヒータドレン	低圧ヒータドレン
金属	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
鉄 (ppb)	0.64	0.39	0.34	0.74	5.9	0.061	0.80
ニッケル (ppb)	0.17	0.19	0.0029	0.013	0.041	0.086	0.067
コバルト (ppt)	14.0	1.5	0.67	0.98	6.1	6.0	6.0



注：略語説明 CD (復水脱塩器), CF (復水汚過器)

度を分析し、ヒータドレンアップ方式を採用した場合の給水水質の予測、評価を行った結果、ABWRプラントではタービン設備への低合金鋼の採用範囲の拡大などの改善を実施することによって、上述の先行BWRプラントと同等の水質が得られるものと評価している。

## 6 結 言

以上述べたように、電気出力1,350 MW級向けに開発したABWRプラント用蒸気タービン設備は、従来のBWRプラントでの運転で得られた経験と、すでに開発実証された技術を集大成した最新鋭機となっている。さらに、このうちの一部の技術については、すでに運転中あるいは製作中のBWRプラントに適用しており、その成果が表われつつある。

日立製作所では、これらの新技術を用いて、今後の建設計画に対しては、表3に示すようにABWRプラント・タービン設備のシリーズ化で対応してゆくことが可能である。なお、電気出力500 MW級のものについては、プラント全体のいっそうのコンパクト化に対応できるように、補機の簡素化などの思想を取り入れたものも検討対象としてゆく予定である。

表3 ABWRプラントのシリーズ化対応 電気出力1,300 MW級用に開発されたABWRプラント技術は、より小容量機への適用も可能である。

電気出力	1,350 MW級	1,100 MW級	800 MW級	500 MW級	
タービン型式	50 Hz	TC6F-52	TC6F-41	TC4F-52 または TC4F-41	TCDF-52 または TC4F-35
	60 Hz	TC6F-52	TC6F-43	TC4F-52, TC4F-43 または TC6F-38	TCDF-52 または TC4F-38
湿分分離加熱器	横型×2基 2段加熱	同 左	同 左	横型×2基 2段または 1段加熱*	
組合せ中間弁	バタフライ型	同 左	同 左	同 左	
復水器ネックヒータ	4 本	同 左	同 左	4本または 0本*	
主原子炉給水ポンプ	タービン駆動×2	同 左	同 左	電動機駆動 ×3	
給水加熱器ドレンシステム	ドレンポンプアップ方式	同 左	同 左	同 左	

注：\*はシンプルファイドABWRプラント対応技術を示す。

## 参考文献

- 1) 久野：原子力用蒸気タービン技術の現状と課題，日本原子力学会誌，27-1001(昭60-11)
- 2) 漆谷，外：原子力発電用大容量タービン設備，日立評論，68，4，295～300(昭61-4)
- 3) 荒川，外：BWR高効率蒸気タービン系の技術開発，日本機械学会，動力及びエネルギー技術シンポジウム，講演会発表論文(昭62年11月13日)
- 4) 森谷，外：原子力発電用タービン・発電機設備新技術，日立評論，70，4，387～394(昭63-4)
- 5) 池内，外：大容量蒸気タービン用52 in長翼の開発，火力原子力発電，37(昭61-1)
- 6) 松下，外：タービン発電機の翼軸連成ねじり振動解析，火力原子力発電，Vol.41，No.1 49～56(Jan. 1990)
- 7) O. Matsushita, et al. : Coupled Vibration Analysis ; Torsional Vibration of Turbine-Generator-Blade Coupled System, ASME, DE - Vol.18-1, Rotating Machinery Dynamics, Book No H0508A-1989, 135～140
- 8) K. Isii, et al. : Field Telemetry of Blade-Rotor Coupled Torsional Vibration at Matuura Power Station No.1 Unit, for Presentation at the Sixth Workshop on Rotordynamic Instability Problems in High Performance Turbomachinery, May 22-24, 1990, Texas A & M University, Texas.
- 9) 乙葉，外：BWR給，復水管理改善とそのシステム展開，火力原子力発電，Vol.39(昭63-6)