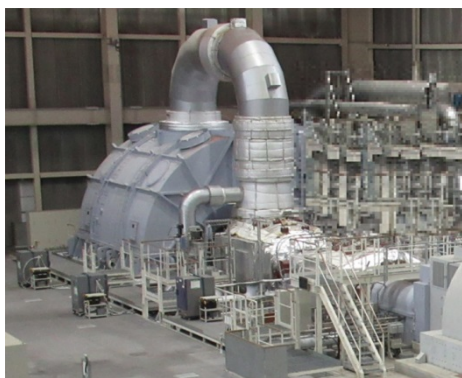


# 最新鋭サイド排気高性能蒸気タービンの開発

## Development of Latest High Efficiency Side Exhaust Steam Turbine



中野 隆\*<sup>1</sup>  
Takashi Nakano

杼谷 直人\*<sup>2</sup>  
Naoto Tochitani

松野 成之\*<sup>3</sup>  
Nariyuki Matsuno

牧野 雅臣\*<sup>4</sup>  
Masaomi Makino

李 宏元\*<sup>5</sup>  
Goingwon Lee

田畑 創一朗\*<sup>6</sup>  
Soichiro Tabata

三菱パワー株式会社(以下、当社)では、火力発電設備の効率向上にたゆまない努力を継続している。高効率のニーズかつコンパクトの要求に応えるべく、高圧/中圧別車室構造、サイド排気、SSSクラッチを用いた一軸GTCCを開発した。高性能翼列(反動翼、低圧最終翼群、排気ディフューザ)、クリアランス予測、及び制御技術の検証、新型シール、高性能軸受を採用し、第二T地点(当社の実証発電設備)にて性能、及び信頼性の検証を行った。次世代技術である700℃級高温蒸気タービンの実用化に向けての検証も実施している。本報は高性能蒸気タービンに採用された新技術、新構造の特徴、及び実機における検証結果について述べる。

### 1. はじめに

世界における脱炭素の流れが加速しており、再生可能エネルギーへのシフトが進んでいる。一方で電力需給から一定量の火力発電設備は将来も維持されると予想されており、温室効果ガス排出量抑制のために火力発電における高効率化は必須となっている。当社では、これまでもたゆまない努力で蒸気タービン効率向上について取り組んできた<sup>1)</sup>。設計手法に最新の解析技術を採用し、高効率、及び高信頼性の最新技術を実機に展開してきた。将来技術である700℃級高温蒸気タービン用ロータ<sup>2)</sup>の実機での検証も実施した。

### 2. 最新鋭サイド排気高性能蒸気タービンの概要

最新鋭の蒸気タービンに適用した高性能反動翼、最終翼群、サイド排気タービン、クリアランス予測技術、シール技術、高面圧軸受はコンバインドサイクル向けの蒸気タービンを始め、中小型機、石炭火力用大型機、原子力機、地熱タービン、アフターサービスにおける内部換装工事にも適用できる技術である。これらの技術を適用した高効率蒸気タービンを図1、仕様を表1に示す。本タービンは最新鋭の600℃の蒸気温度で定格出力170MWの蒸気タービンであり、SSSクラッチを介してGT、発電機と接続される566MWのGTCCプラントである。高圧中圧タービンには小径多段化で高速度比向けの翼を開発、低圧には一体解析を用いた翼列と排気室の最適化を実施。複流排気でありながら従来の下向き排気からサイド排気を採用することで、建屋高さの低減を達成している。非定常FEM(Finite Element Method)を用いたクリアランス予測、及びヒータを用い

\*1 三菱パワー株式会社 蒸気タービン技術総括部 総括部長

\*2 三菱パワー株式会社 蒸気タービン計画部 部長

\*3 三菱パワー株式会社 蒸気タービン計画部 次長

\*4 三菱パワー株式会社 蒸気タービン計画部 グループ長

\*5 三菱パワー株式会社 大型蒸気タービン技術部 グループ長

\*6 三菱パワー株式会社 蒸気タービン計画部 首席技師 博士(工学)

たクリアランス制御の検証も実施した。低圧損かつコンパクトな組合せ弁、高性能高面圧軸受を適用している。SSS クラッチを適用した一軸 GTCC を採用している。ターニング装置には1台のターニング装置で ST/GT を独立してターニング可能なダブルターニングを適用し、停止時の運用面も向上した。700℃級高温蒸気タービン用ロータとして開発を行ってきた Ni 基ロータの溶接ロータを実機適用し検証を行った。

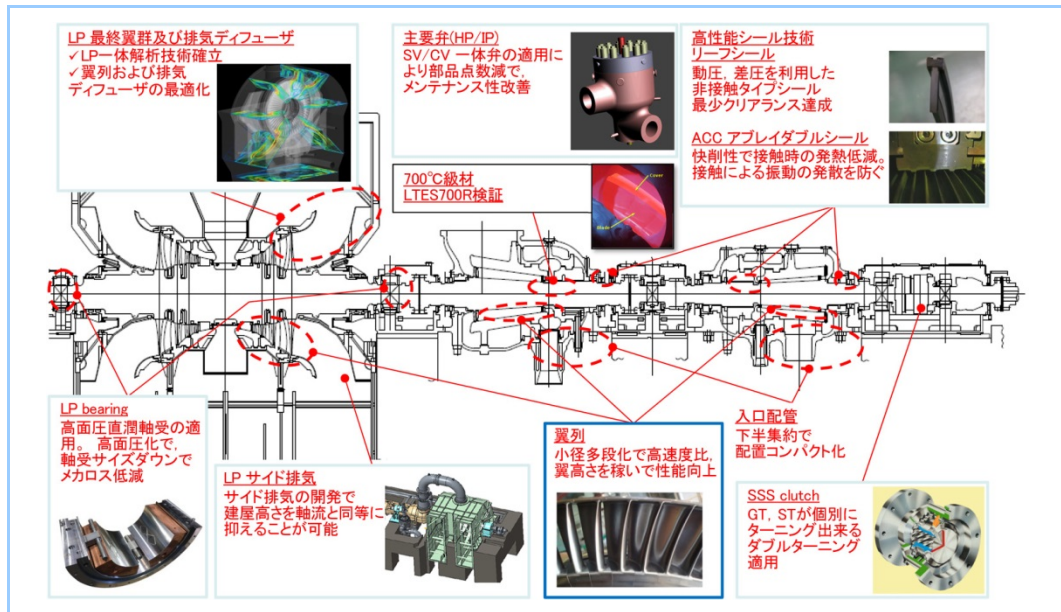


図1 最新鋭サイド排気蒸気タービンの概要

表1 第二T地点蒸気タービン仕様

第二T地点蒸気タービン仕様	
型式	TC2F-33.7
出力	約 170MW
回転数	3600rpm
軸構成	HP+IP+LP
排気方向	側方排気
主蒸気条件	14.98MPa × 600℃
再熱蒸気条件	3.46MPa × 600℃
復水器真空	6.8kPa abs

### 3. 新技術の特徴

#### 3.1 次世代高性能反動翼

最新鋭高性能蒸気タービンの高圧翼列、及び中圧翼列は、当社従来の反動翼列から小径多段化(ロータ径低減、翼列段数増加)することにより、翼端壁部における二次流れ損失や翼シール部からの漏れ流れ損失を低減し、翼列性能の向上を図っている。また、当社では以前から、多段三次元流動解析による開発と空気タービンによる検証を行うことで、翼効率、内部流動の予測精度を向上させてきている。図2に示すような、最新のキャビティを含めた多段三次元流動解析を用いて、小径多段翼列に適した高性能の高速度比向けの反動翼を開発した。従来の完全三次元反動翼から、ピッチコード比の見直しやバウ形状の緩和により濡れ面積を小さくすることで、翼プロファイル損失を低減した。さらに、反動度分布を制御することで、翼損失と漏れ流れ損失のバランスを最適化し、性能を向上させた。このように開発された高速度比反動翼は空気タービンによる検証の後、高圧翼列、中圧翼列、および低圧翼列上流段に適用しており、実証発電設備における特殊計測により、目論見通りの性能を達成していることを確認した。

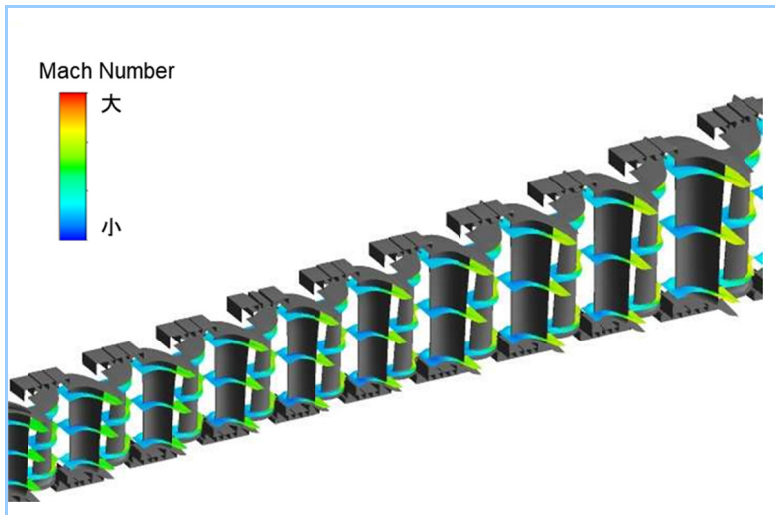


図2 キャビティを含めた多段三次元解析

### 3.2 次世代高性能低圧最終翼群およびサイド排気の採用

低圧最終翼群は出力分担が大きく、最終段動翼の大きさによってタービンケーシングの数、プラント建屋の大きさが決まる。従って低圧最終翼群の性能は蒸気タービンの全体効率において重要な役割を果たす。低圧最終翼群の性能は排気性能に大きく左右されるため、排気性能の最大化が蒸気タービンの全体性能に大きく影響する。

最新の数値解析技術により、以前から実施している段落負荷の最適化、翼高さ方向の負荷分布、高マッハ数流れに対する翼プロファイルの最適化に加え、翼列、及び排気室一体解析手法を用いて排気ディフューザの最適設計を実施した。図3に翼列・排気室一体解析の例(三次元流線図)を示す。また図4に排気ディフューザ周りの子午面マッハ数コンタを示す。図4に示すようにディフューザ内部流動は正常なフローパターンを呈していることがわかる。図5に静圧回復係数について解析予測値と実証発電設備における特殊計測による実測値の比較を示す。解析予測値と実測値は良く一致しており目論み通りの排気性能となっていることを実証した<sup>3,4)</sup>。

以上より、最新の数値解析技術を用いて開発された低圧最終翼群の性能が、当社実証発電設備により検証された。更に低圧最終翼群に特有のドレンによる損失(湿り損失)に対しても、最新の流動解析技術によりドレンスリット形状・位置の最適化を実施することで損失の低減を図っている。構造面においても、複流排気でありながらサイド排気を採用することで、従来の下方排気に比べて基礎高さ並びにタービン建屋高さの大幅な低減が可能となり(図6)、建設コスト低減に寄与している。

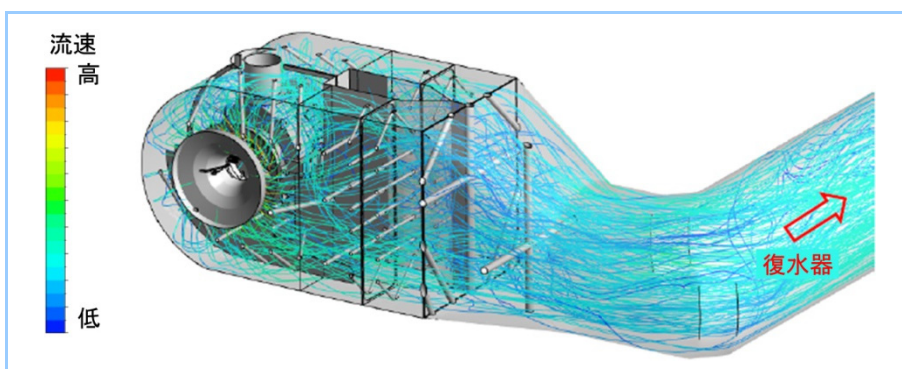


図3 翼列排気室一体解析

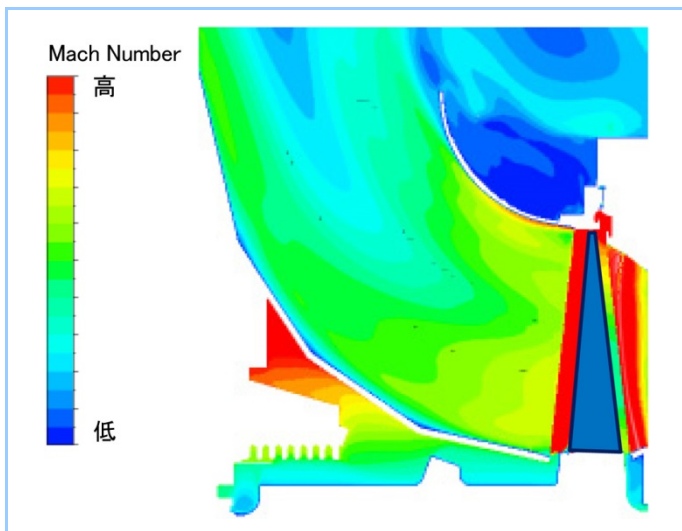


図4 排気ディフューザ周りの Ma 数コンター図

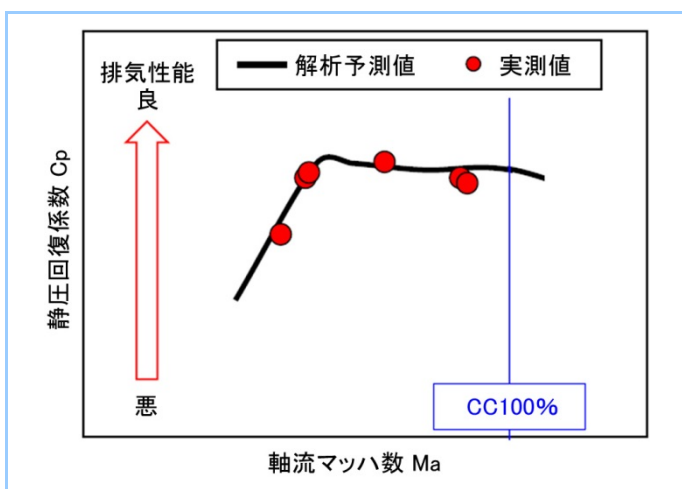


図5 静圧回復係数

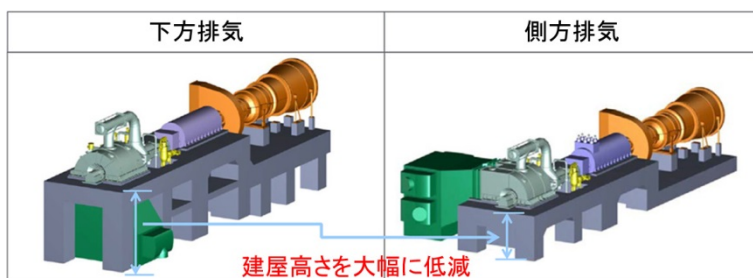


図6 サイド排気による建屋高さ低減

### 3.3 クリアランス制御技術

更なるクリアランス低減による性能改善, 及び運用性の改善を目指して, タービン車室外部からのヒータ加熱や空気冷却によるクリアランス制御(上下動制御)技術の検証を行った。クリアランスの動きはタービン内部に取り付けた GAP センサ(図7)で直接計測を行った。

図8に起動前のヒータによる外車持ち上げ(上部クリアランス拡大)のトレンドを示す。起動前に外車を持ち上げることで, 回転上昇後の上部クリアランスの余裕を確保できる。同様に図9には定格運転時の空気冷却による外車の沈み込み(下部クリアランス拡大)のトレンドを示す。逆にヒータ加熱を行うことで外車を持ち上げることも可能である。

このように停止中, 運転中を問わず, 外部からクリアランス(上下動)を制御可能であり, かつ内部でクリアランスを計測できるセンサ技術を確立した。今後は本技術を用いて, 更なる性能改善, 及び運用性の改善に展開していく予定である。



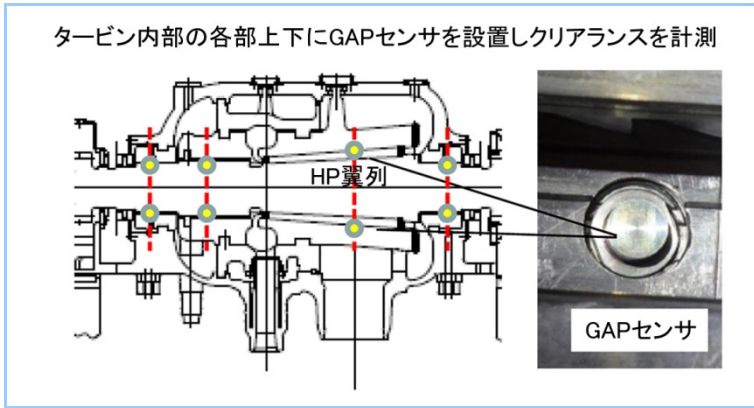


図7 GAP センサ取付け位置

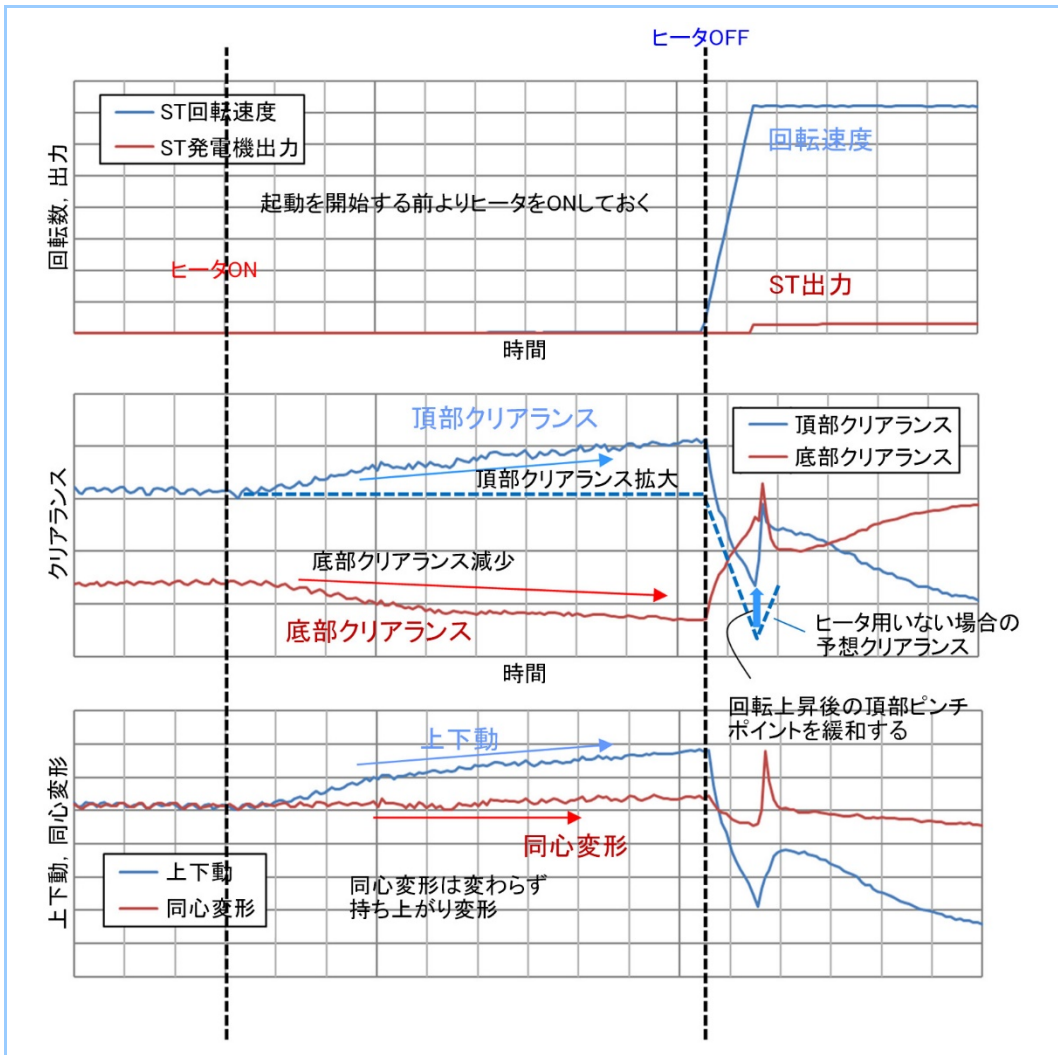


図8 起動前のヒータ運用によるクリアランス制御

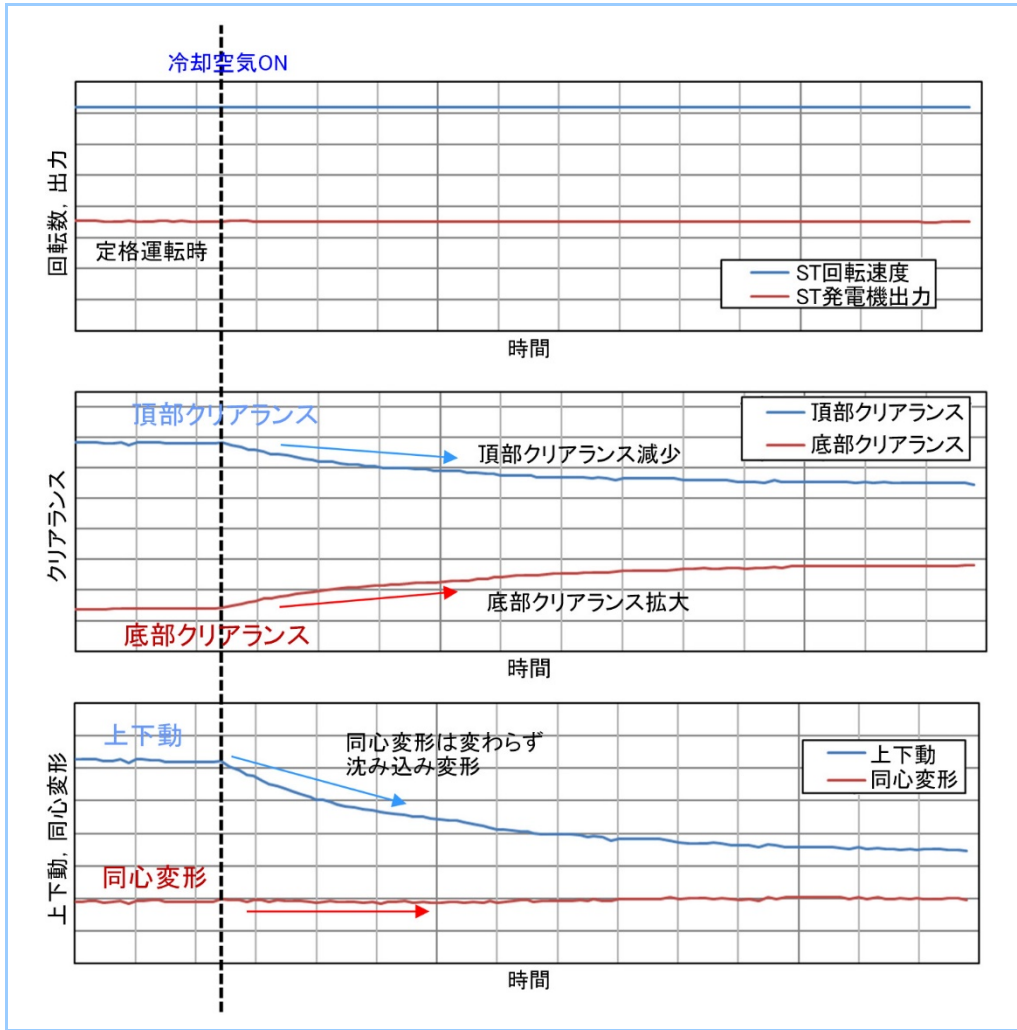


図9 運転中の冷却空気によるクリアランス制御

### 3.4 シール技術

ダミー部、グランド部や翼先端からのリーク低減を目的とし、リーフシール、ACC アブレイダブルシールを開発しており、これらを適切な組合せで配置することで高効率化を実現している。

リーフシールは、図 10 に示す板状のリーフを周方向に配列し、ロータ回転時にはわずかにリーフ先端が浮上し非接触状態を保つ。ACC (Active Clearance Control) アブレイダブルシールは、起動停止動作中及びタービン停止中にロータとラビリンスシール間のクリアランスを大きく保ち、定負荷運転中にはシール差圧を利用してシールセグメントを所定位置まで移動させクリアランスを小さく保つ ACC シールと、図 11 に示すようにシールリング内面に摺動特性の優れた低発熱シール材を溶射したアブレイダブルシールを組み合わせたもので、定格時のクリアランスを低減しつつ、フィン接触による発熱抑え軸振動を防止する。外部コントロール型 ACC も適用し、流動解析技術を活用して、これらのシールの組合せを最適化することで、図 12 に示すリーク低減を実現している。

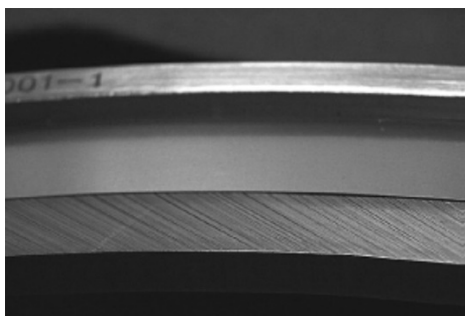


図 10 リーフシール

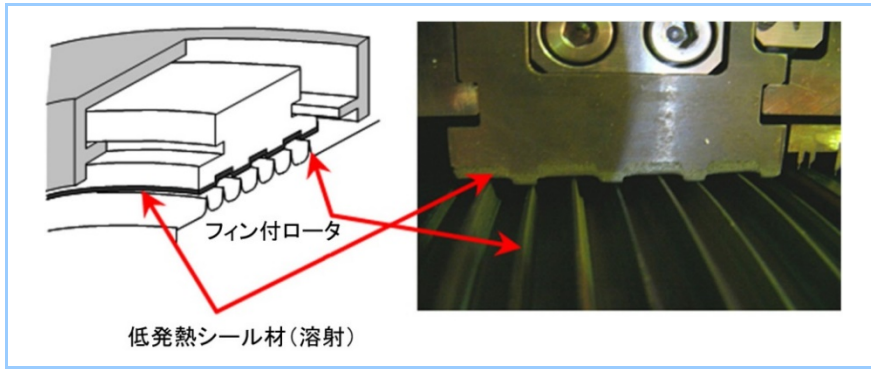


図 11 ACCシール(低発熱シール材適用)

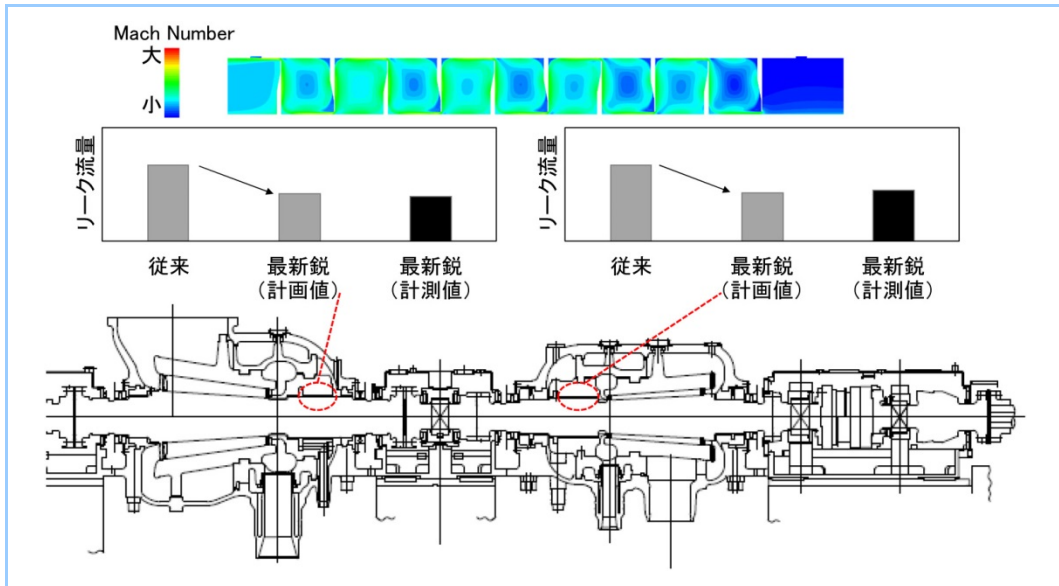


図 12 シールの組み合わせ最適化によるリーク低減

### 3.5 高性能高面圧軸受

軸スパンを短縮し蒸気タービンのコンパクト化を図るべく、以前からジャーナル軸受の数を減らした軸系設計を採用している(図 13)。軸受の数が減少するため、1軸受当たりにも負荷される荷重は従来よりも増加するため、従来よりも高荷重な条件に対応可能なジャーナル軸受を開発した(図 14)<sup>5)</sup>。軸受の設計に際しては、レイノルズ方程式/エネルギー方程式/熱伝導方程式を連成させた熱流体潤滑解析と軸受パッド弾性変形解析を連成させた TEHL (Thermo-Elastic Hydrodynamic Lubrication) 解析を用いて、軸受静特性/動特性が最適となるよう主要な仕様を決定した。軸受単体での検証試験を経た後、当社実証発電設備に適用し、メタル温度や軸受損失、振動特性などで良好な結果が得られた。本軸受の商用機への適用も進んでおり、中には既に運転開始されたプラントもある。

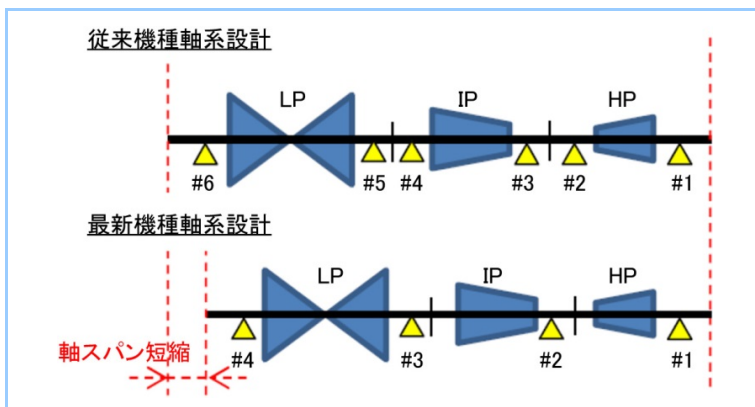


図 13 高性能高面圧軸受の採用による軸受数低減

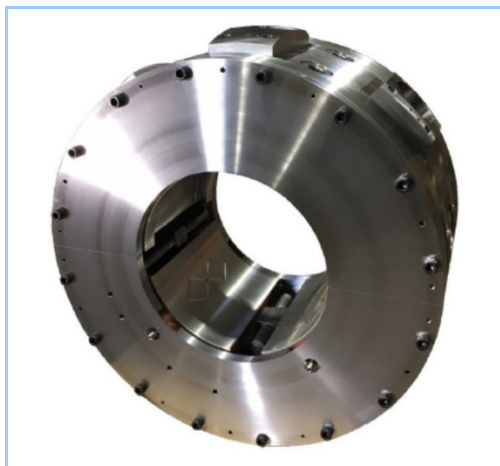


図 14 高性能高面圧軸受

### 3.6 SSS クラッチ採用軸

SSS クラッチを有する一軸 GTCC を採用しており ST 起動のタイミングを遅らせることが可能。このため、GT 先行起動後発生する蒸気で ST を起動することができ ST 風損発熱防止の冷却蒸気が不要となり起動時の補助蒸気量が大幅に低減可能となる。GT 起動時のサイリスタ容量に ST を考慮不要で小さく抑えることが可能となる。SSS クラッチで GT、及び発電機の伸び量を吸収可能であり、ST の伸び差に考慮不要となることから ST の段数増加などの性能向上対策が可能となる。発電機を GT、ST で1台にできることで建設コスト低減に寄与している。SSS クラッチは ST 起動時には未結合でオーバーハングとなり、ST 併入後は SSS が結合ししトルクを伝達することで剛となる。SSS 結合前後の状態を見極めた軸系設計とする必要があるが、当社のこれまでの知見を活かした設計としており、SSS 嵌合前後の軸振動も良好であり問題なく運用できている(図 15)。

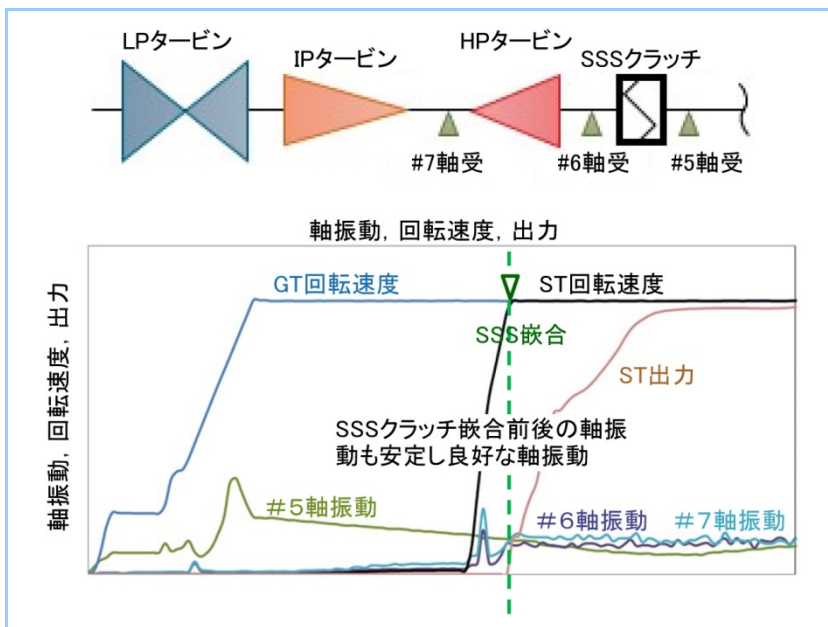


図 15 SSS クラッチの適用時の軸振動

### 3.7 高効率 SV/CV 一体型組合せ弁

開発した SV/CV 一体型組合せ弁は、弁室が止め弁(SV)と加減弁(CV)で共用(2室→1室)となり、ボンネット蓋やボルト等の部品点数が約半分に低減するため、従来型の SV/CV 別体弁(止め弁と加減弁が別々の構造体)と比較して、体格がコンパクトで製作コストの観点で有利である。600℃級ユニットにて適用実績のある弁室材料、全閉バックシート機能、ステムリーク接続システムを適用することで、信頼性向上を図り、また、サイズアップ、蒸气流路改善により圧力損失の低減を同時に達成した(図 16)。高圧主蒸気弁、及び高温再熱蒸気弁へ適用した SV/CV 一体型組合



せ弁について圧力損失を計測した結果、計測値は計画値の誤差の範囲内となる結果が得られており、圧力損失が初期計画値より低減していることを確認した<sup>6)</sup>。

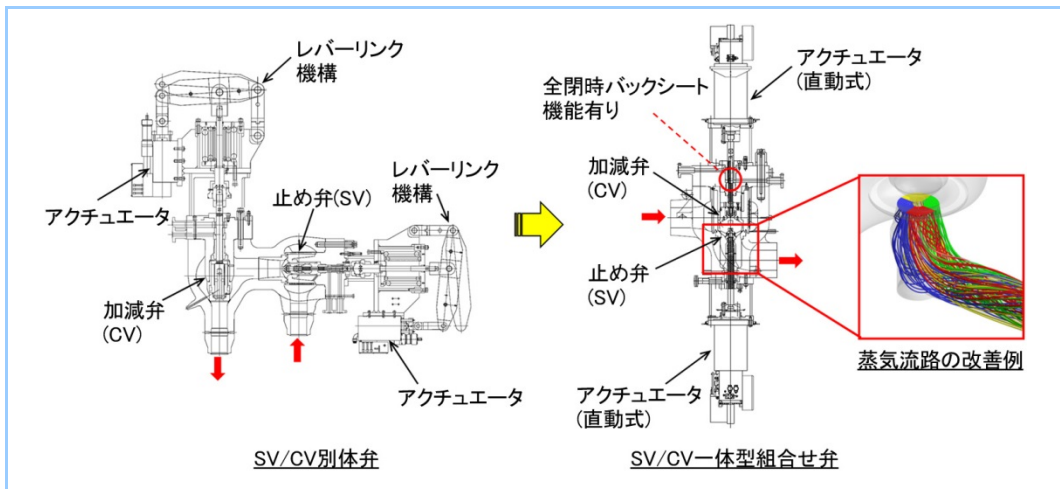


図 16 高効率 SV/CV 一体型組合せ弁

### 3.8 ダブルターニング技術

従来の一軸 GTCC (CGS 配置)プラントのターニング時間(停止後)は、メタル温度降下に時間を要するST側のターニング時間で決定されている。定検時のプラント停止期間短縮のためには、GTターニング先行停止が必要となる。今回1台のターニング装置でGT/STを各々ターニングすることができるダブルターニング装置を開発した。2台ターニング装置を導入する場合と比べ、設置スペースも小さくすることができた。定検作業中に誤動作によりターニング入りせぬように、複数のインターロックを追設する等、安全面にも考慮した。

### 3.9 700℃級高温蒸気タービン技術に向けた検証

中圧タービンには、“先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発”プロジェクトで開発したNi基合金(LTES700R)と先進12Cr鋼(MTR10A)の異材溶接ロータを採用した。Ni基合金と12Cr鋼の異材溶接ロータは、当時の国プロにおいて、700℃の高温空気環境下における1051時間の回転試験を実施し、異材継手部で16万時間相当の長時間回転試験を完了した。本技術は2017年 Powergen Europe で Best Paper Award を受賞している<sup>7)</sup>。この回転試験は3600rpmの定格回転、及び、空気環境下での試験であり、起動停止の負荷変動による影響評価は未実施であった。異材溶接ロータの継手位置を700℃級高温蒸気タービンと同じ設計温度とすることで、蒸気環境下での更なる信頼性検証を継続実施中である(図17)。ST高温化技術は高温ガス炉向けタービン、CO2タービン、蓄熱タービンといった事業にも展開可能な技術と期待される。

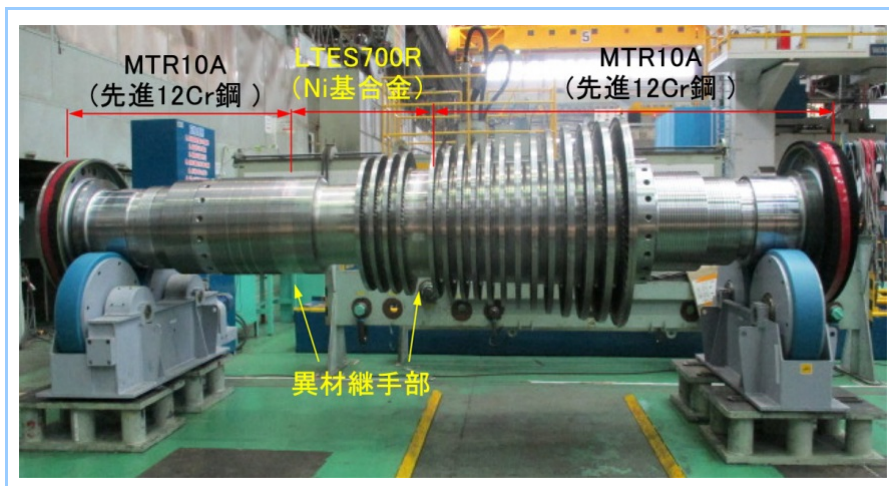


図 17 中圧ロータ(含む Ni 基-12Cr 鋼異材溶接ロータ)

## 4. まとめ

最新鋭の蒸気タービンの高性能化技術を開発し、実機にて目論見通りの成果が得られたことも確認できた。本技術は中小型タービンから大容量機、アフターサービスの換装工事向けを含めたあらゆる蒸気タービンに適用可能な技術であり、適用を開始している。当社では今後とも発電設備の更なる高効率化を目指して新技術の開発及びそれらを適用した高性能蒸気タービンの開発を続けてゆくことで、温室効果ガス排出量抑制にも貢献してゆく所存である。

## 参考文献

- (1) 渡辺英一郎ほか, 高効率新型蒸気タービンの開発, 三菱重工技報 Vol.40 No.4 (2003) p.212~215
- (2) 齋藤英治ほか, 最新鋭蒸気タービンの技術開発と展望, 三菱重工技報 Vol.52 No.2 (2015) p.36~43
- (3) Tabata, S., et al., 2019, "Experimental and Numerical Investigations of Steam Turbine Exhaust Hood Flow Field with Two Types of Diffusers," ASME Turbo Expo GT2019-90640
- (4) Tabata, S., et al., 2020, "Experimental and Numerical Investigations of the Effects of Real Shape Modeling and Non-equilibrium Condensation Modeling on the Flow Pattern in Steam Turbine," ASME Turbo Expo GT2020-14253
- (5) T.Nakano. et al., Development of high specific load and low mechanical loss journal bearing with two pads of tilting supported type, Proceedings of ASME Turbo Expo 2018, GT2018-75593
- (6) Fumiya Suzuki. et al., Verification of Combined Main Steam Valve Pressure Distribution and Vibration Characteristics with Downscale Model Test on Air Condition, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2019-90406
- (7) E.Siato, et al., "700°C class A-USC Steam Turbine Development", Powergen Europe (2017)