

特 集 論 文



スロベニア クルスコ原子力発電所 54 インチ翼低圧タービン取替工事 超短工期にて完遂

Completion of the 54 inch-blade Low Pressure Turbine Replacement of Nuclear Power Plant KRSKO with Very Short Outage Period

鷺 森 啓^{*1}
Hiromu Sagimori

大 山 宏 治^{*2}
Hiroharu Ooyama

古 川 達 也^{*3}
Tatsuya Furukawa

大 田 黒 浩^{*4}
Hiroshi Otaguro

スロベニア共和国のクルスコ原子力発電所（70 万 kW 級）は、2006 年 4 月に低圧タービンロータの応力腐食割れ対策として当社全一体型低圧タービンへの取替工事を超短工期（27 日間）で実施し、その後保証性能を満足し良好に運転している。本低圧タービンは当社最長翼である 54 インチ低圧最終翼を実機初適用した全一体型タービンで、応力腐食割れ対策としてキー溝構造廃止などにより作用応力を低減し低強度材を適用している。本報では、54 インチ最終翼低圧タービン初号機的设计及び運転状況、取替工事について紹介する。

1. は じ め に

クルスコ原子力発電所は旧ユーゴスラビア時代の 1983 年に営業運転を開始したスロベニア唯一の原子力発電所で、スロベニア国内だけでなくクロアチアをはじめ近隣諸国にも電力を供給している（図 1 参照）。

クルスコ原子力発電所は建設以来ウェスチングハウス社製の蒸気タービンを使用していたが、低圧タービンロータの応力腐食割れ（Stress Corrosion Crack 以下 SCC と呼ぶ）に対する保全と発電出力向上のため 2006 年 4 月に当社製全一体型ロータの 54 インチ最終翼低圧タービンに取替えた。

2. 取替工事の概要

2. 1 クルスコ原子力発電所の概要

クルスコ原子力発電所のプラント仕様概要を表 1 に



図 1 クルスコ原子力発電所の立地

表 1 クルスコ原子力発電所 プラント仕様概要

項 目	仕 様
炉 型	加圧水型軽水炉
蒸気発生器台数	2 台
蒸気発生器熱出力 (MWth)	2000
発電周波数 (Hz)	50
タービン型式 (取替前) (取替後)	TC4F-44 TC4F-54
定格出力 (MW)	727
タービン入口蒸気圧力 (MPa)	6.2
タービン回転速度 (rpm)	1500
発電機容量 (MVA)	813

示す。低圧タービンはウェスチングハウス社製の全焼嵌型 44 インチ最終翼低圧タービンロータを使用していた。

2. 2 低圧タービン取替範囲

本工事での取替範囲を図 2 着色部に示す。取替機器は SCC の懸念される低圧タービンロータのほかに内部車室及びジャーナル軸受、スラスト軸受、中間軸、グラウンド、油止め輪などを取替え、工期短縮や最終翼長大化（44 インチ→54 インチ）対応、機器信頼性向上を図った。

3. 取替用低圧タービンの設計

既設機設計データのない本発電所に対し、高性能・高信頼性の低圧タービンを超短工期で収めるために以下の対応を取った。

^{*1} 高砂製作所原子力統括室原子力タービン計画グループ

^{*2} 原動機事業本部蒸気タービン技術部主席

^{*3} 原動機事業本部蒸気タービン技術部タービン開発グループ

^{*4} 高砂製作所プラント建設部主席

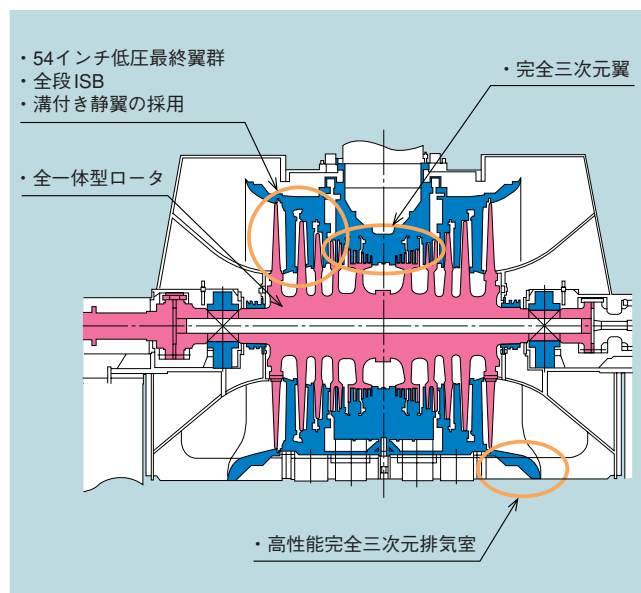


図2 低圧タービン取替範囲（着色部）

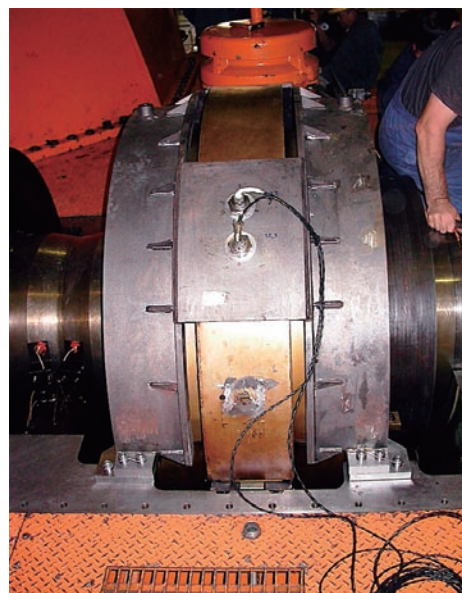


図4 振り振動計測センサ取付け状況

3. 1 他社製タービン取替への対応

(1) 既設機三次元計測

既設機とのインターフェース部分に対してタービン開放点検の機会に三次元計測などを実施し、取替用タービンの構造設計に反映することにより現地での機械加工低減と干渉回避を図り、スムーズな工事を実現した。図3に計測例を示す。

(2) 既設機実機振り振動計測

取替対象外で設計データのない発電機の振り振動特性は未知の部分があるため、実機振り振動計測を実施した。振り振動計測には三次元計測結果を基に狭隘な軸受箱内に取付けられるブラケットを設計

し、振り振動計測用センサを取付けた（図4参照）。計測結果はほぼ事前予測と一致し、特に設計上重要な 100 Hz 付近の振り振動数は 0.1 Hz 以内で予測と実測が一致した。これにより、発電機を含めた振り振動評価モデルの妥当性を確認し、振り振動に対する高い信頼性を実現した。

3. 2 高性能化技術

取替用低圧タービンには以下の最新高効率技術を適用し、高性能化を図った。

- 54 インチ ISB（Integral Shroud Blade）翼採用
- 溝つき静翼（中空静翼）
- 翼列全段三次元 CFD（Computational Fluid Dynamics）

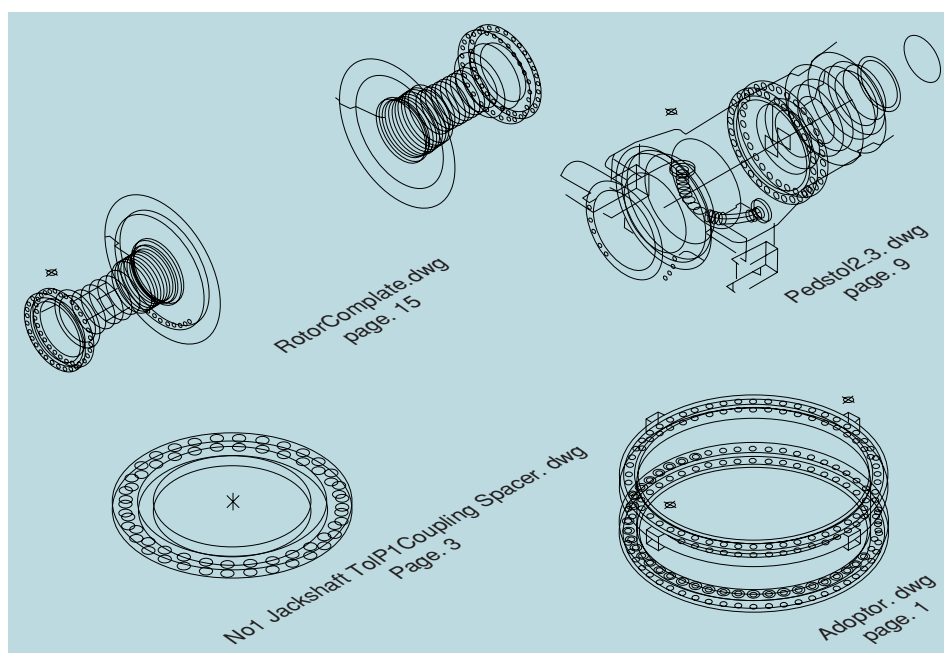


図3 三次元計測結果例

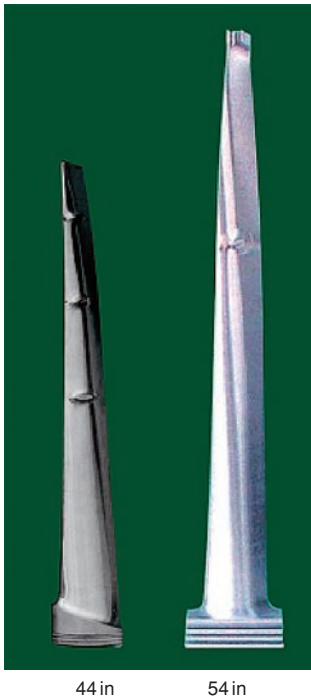


図5 44 インチ翼と 54 インチ翼

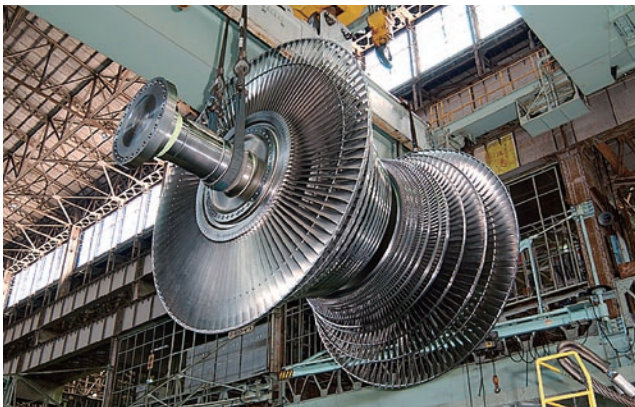


図6 取替用低圧タービンロータ

解析による最適化

- 高性能完全三次元排気室
- 翼列入口部形状最適化
- シール形状最適化

(1) 54 インチ低圧最終翼の適用

低圧最終翼は44インチグループ翼から排気損失低減のため翼長を10インチ長くし、当社最長翼である54インチISB翼を適用した(図5, 図6参照)。54インチISB翼は開発・検証段階⁽¹⁾では実物大翼テストロータでの回転振動試験やL-3～L-0段のスケールモデルによる実蒸気での検証試験を実施し、信頼性を検証している。また、実機ロータ出荷前には、高速バランス設備において実際に回転させた状態での動翼固有振動数を計測し共振回避を確認するとともに、単体振り加振試験も実施し翼軸連成振動に対する健全性を確認した。図7に試験設備への搬



図7 高速バランス設備への低圧タービンロータ搬入状況

入状況を示す。

一方、低圧最終3段の静翼にはドリル孔式の溝つき静翼(中空静翼)を適用し、ドレン除去による高効率化とエロージョン低減を図った。

(2) ISB 完全三次元翼

取替用低圧タービンは54インチISB最終翼群を含む反動段10段から構成されている。反動段全段へのISB完全三次元設計翼の適用による高性能化に対しては、先行機取替工事などで確立された信頼性の高い設計を踏襲している⁽²⁾。また、翼列全段三次元CFD解析を適用し、最適化を図った。

3. 3 SCC 対策

(1) 低強度材の適用

蒸気タービンロータのSCCに関してはロータ材強度との相関が確認されており⁽³⁾、取替用低圧タービンロータには低降伏応力材を適用し、耐SCC性の向上を図った。

(2) 全一体型ロータの適用

SCC感受性は作用応力との相関があり、全一体型ロータでは焼嵌型ロータで必要となるキー溝構造が不要となりキー溝部での応力集中を排除することができ、耐SCC性の向上を図ることができる。また、全一体型ロータでは軸・円板が一体となることから円板部断面積が増加し平均的な作用応力が低減され、耐SCC性の向上を図ることができる。

3. 4 その他信頼性向上・高性能化技術

取替用低圧タービンには前記以外に大型翼植部構造、軸受サイズ大型化、高性能完全三次元排気室、翼列入口部形状最適化、シール形状最適化を適用し、信頼性向上・高性能化を図った。

4. 取替工事について

本工事はスロベニア唯一の原子力発電所の大型工事であることから国(国民)の関心事となり新聞・TV

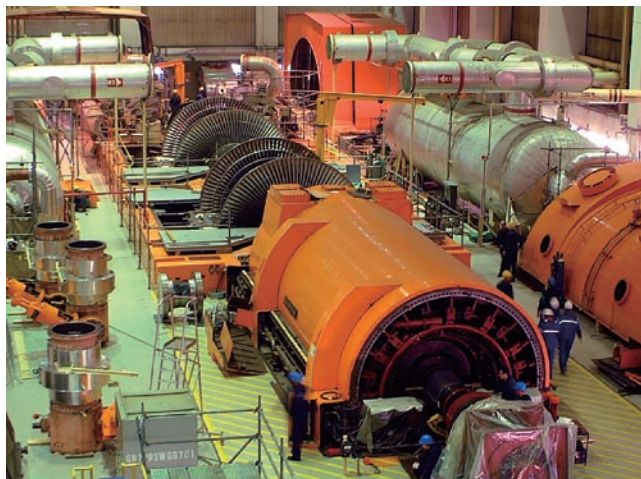


図8 取替工事状況

で報道される上に、28日間という予定工期は従来国内向け低圧タービン取替工事（約60日工期）の半分以下の非常にタイトな工期であることから、ひとつの失敗も許されないような状況下での工事となった。

設計上の配慮としては内部車室、中間軸、グランド、油止め輪の取替や、油圧締めカップリングボルト適用、内部車室ボルト油圧レンチ適用、工事用予備品の準備を行い工期短縮をはかり、現地工事上の配慮としては綿密な工程調整や高品質な現地機械加工業者確保、客先との良好な関係維持、現地3交代勤務を行ない工期短縮をはかった。その結果、当初予定より1日早く27日間の超短工期にて工事を完了させることができた。取替工事の状況を図8に示す。

5. 運 転 状 況

2006年4月の取替工事後、同年5月に1回の高圧タービンバランス調整を経て順調に起動し、熱出力一定運転に移行した。図9に起動過程の軸振動値を示すが、回転上昇中のクリティカル通過時でも $50\mu\text{mp-p}$ 程度と十分小さく、負荷変化途中の特異な振動変化もなく100%負荷では $25\mu\text{mp-p}$ 以下となり非常に良好な軸振動特性を示した。また、取替後の発電機出力は計画出力を上回っており、高真空条件では4.5%程度の出力向上（取替前計画出力との比較）が確認され、予定通りの性能レベルを達成した。また、本運転結果により今回適用した高効率技術の有用性が実証された。

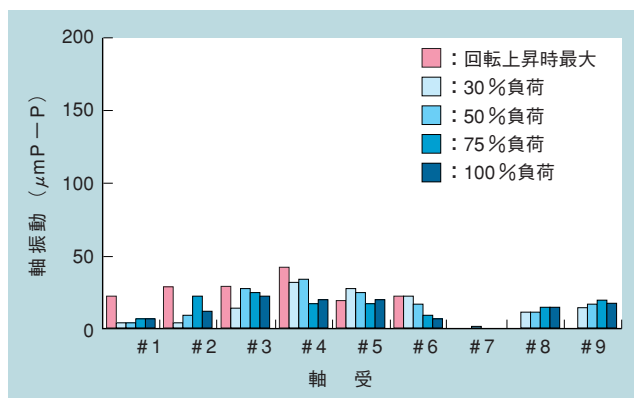


図9 起動時軸振動値

6. ま と め

クルスコ原子力発電所は全一体型ロータの54インチ最終翼低圧タービンに取替え、工事期間は従来の国内向け低圧タービン取替工事の半分以下の27日間にて完遂した。運転状況としては良好な軸振動特性と計画を上回るタービン性能を示し、良好であった。

当社としては、今後とも社会に求められる技術の開発、改善に一層の努力を続けることで、たしかな未来を築いていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 渡辺ほか、高効率・高信頼性タービン長大翼の開発、三菱重工技報 Vol.38 No.2 (2001) p.92
- (2) 渡辺ほか、完全三次元流動設計インテグラルシュラウド翼適用による原子力タービンの高効率・高信頼性化、三菱重工技報 Vol.35 No.4 (1998) p.266
- (3) 伊東ほか、3.5% NiCrMoV 鋼の403K中での粒界応力腐食割れ感受性の強度依存性、材料 Vol.51 No.5 (2002) p.549



鷺森啓



大山宏治



古川達也



大田黒浩