

## 2. 2 タービン設備関連機器の修復状況

### 2. 2. 1 低圧タービン第 14 段動翼植込部フォークの折損

本事象については、前回の第一次調査時は、7号機の低圧タービン(A),(B),(C)第14段動翼の非破壊検査の結果が出ており、破面検査の所見では金属疲労で破壊したという推定段階で、最終的な原因究明はまだ行われていない時期であった。

今回の調査時には、各号機の動翼植込部フォークの詳細な点検が進んでおり、原因の特定、対策、更なる信頼性の向上に関する説明が東京電力からなされたので、以下にその概要を記す。

#### (1) 6号機及び7号機低圧タービン動翼の検査結果

ここでは、6号機及び7号機を中心に、東電が行った動翼の欠陥調査結果を以下に示す。

表-2.2.1 6号機及び7号機低圧タービン動翼の検査結果

6号機低圧タービン(A),(B),(C)合計			7号機低圧タービン(A),(B),(C)合計		
第14段	折損	0枚/912枚(総数)	第14段	折損	2枚/912枚(総数)
	磁粉指示模様	137枚/912枚(総数)		磁粉指示模様	90枚/912枚(総数)
第15段	折損	0枚/756枚(総数)	第15段	折損	0枚/756枚(総数)
	磁粉指示模様	0枚/756枚(総数)		磁粉指示模様	1枚/756枚(総数)
第16段	折損	0枚/780枚(総数)	第16段	折損	0枚/780枚(総数)
	磁粉指示模様	5枚/780枚(総数)		磁粉指示模様	96枚/780枚(総数)

7号機低圧タービンの、第15段については、指示模様が微小であり、かつ、系統的な指示模様の発生が見られず、第14段及び第16段と様相が異なる。製造過程や翼の取り外し作業に伴って生じたものと考えられる。

#### (2) 7号機低圧タービンの折損及び指示模様発生翼の破面観察結果

14段翼植込フォーク部の折損部の破面及び14段及び16段の翼植込フォーク部磁粉指示模様部を観察した結果：

- ① 高サイクル疲労破面に見られるようなビーチマーク及びストライエーション状模様が確認された。
- ② 破面観察において酸化皮膜が確認された。また、破面上の酸化皮膜について分析を実施した結果、高温(運転中)において形成するマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )等が検出された。

従って、動翼の植込みフォーク部は、高サイクル疲労による損傷であって、今回の地震とは直接の関係がなく、次ページ以降に示すように、今回の地震発生によるプラント停止以前に損傷に至ったものと推定された。

なお、高サイクル疲労の原因と対策については、参考文献（１）で公表されているが、その概要を本章末尾の参考資料に示す。

参考文献；１）資料 No.2、6・7号機における低圧タービン動翼の損傷事象について  
平成20年11月19日付け、東京電力株式会社

### 2. 2. 2 7号機の間軸受台基礎モルタルのひび割れ

本事象については、前回の調査時点では、中間軸受台及び高圧ケーシング下半、低圧（A）タービンケーシング下半が取り付けられている状態であったので、基礎ボルト及びボルト周辺の基礎コンクリートの状態は十分に観察できなかった。

今回の調査時点では、修理作業がほぼ完了した段階であり、次のような説明があった。

- ・ ひびが確認された中間軸受台基礎表面のモルタル部分をはつり点検したところ、基礎（ペDESTAL）に至るひびではないことを確認できた。従って、当該部は変更を加えることなく、地震前の状態に復旧した。
- ・ 中間軸受台の基礎ボルトについては、目視検査及び超音波探傷試験を実施し、異常のないことを確認した。

以上の調査結果から、中間軸受台基礎コンクリート及び基礎ボルトについては、震度6強の地震にも拘わらず、補修や改造を必要とするような問題を引き起していないことを確認した。

### 2. 2. 3 復水器の基礎ボルト

前回の調査時点では、復水器の基礎ボルトの当たりや変形が見られるとの情報のみであったが、今回の調査時点では現場確認はできなかったものの以下の回答があった。

<東電回答>

2号機の復水器については、一部の基礎ボルトに軽微な変形が確認されているが詳細調査の結果、機能上問題ないことを確認しており現状復旧することにした。また、他号機については基礎ボルトの損傷は確認されていない。尚、一部のワッシャの固着が確認されたが、点検の結果は塗装によるものと判明した。

主変圧器の基礎ボルトの損傷と同じ現象が発生していることを心配していたが、今回の説明により、復水器の基礎ボルトには大きな問題が発生していないことが確認された。

### 2. 2. 4 蒸気タービン動翼のシュラウド部の損傷について

前回の調査時点では、7号機及び4号機について、一部シュラウドの摩耗、接触などが見られ、このままでは蒸気タービンの内部効率の維持には問題があるように見受けられた部分があった。また、シュラウドのテノン部付近に接触痕のある動翼については、強度上の

問題について、調査・確認がなされたのか確認をしていた。

今回調査時の説明では、そのような恐れのあるシュラウドについては、新しいものに交換を行い、テノン部については、超音波探傷試験を行って異常の無いことを確認し、蒸気タービンの内部効率の維持に努めていることが確認できた。

<東電回答>

#### 動翼シュラウド部の摩耗・接触について

7号機；低圧タービン（A）の10段～12段（交換済み）

低圧タービン（B）の10段（交換済み）

3号機、4号機；低圧タービン（A）（B）の9段～11段（実施予定）

#### 動翼シュラウドテノン部について

7号機のテノン部は超音波探傷検査を実施し、異常のないことを確認しているが、低圧タービン（A）の10段～12段、及び低圧（B）タービン10段については翼とともに交換を実施した。他号機については現在調査中である。

注）低圧タービンロータの動翼、シュラウドなどの取換えや補修の終了後、現地ではバランスの調整を行っていた（写真-2.2.1）。

### **2. 2. 5 蒸気タービンのラビリンスパッキンの接触・摩耗について**

蒸気タービンのラビリンスパッキンについては、前回の調査時点では、一部号機について光沢のある接触が見られた。しかし、調査・点検が全て完了している段階ではなかったため、今回の調査では、その後の調査・点検により新たに把握した状況の有無について確認した。

<東電回答>

高圧タービンのラビリンスパッキンについては一部歯先の欠損が確認されたため交換を実施したが、低圧タービンについてはわずかに光沢が確認された程度であったため前号機について通常の手入れにて復旧することにした。

以上の調査・確認の結果、高圧タービンの一部のラビリンスパッキンの交換を除いて、特に新しい知見や接触、摩耗などが見つかっていないことが確認できた。

注）高圧タービンロータは、補修・手入れ等の作業が終了し保管されていた（写真-2.2.2）。

### **2. 2. 6 蒸気タービン発電機の軸受アライメントの変化について**

今回の地震により、7号機の間軸受台基礎モルタル部分にひび割れが発生した。従って、蒸気タービン発電機の軸方向にかなり強い力が働いたものと想定された。また、上下方向の地震動により、蒸気タービン発電機ペデスタル（岩盤支持の鉄筋基礎コンクリート）上の蒸気タービン発電機の軸受アライメントに変化が生じていないか、今回の調査時に確認することとした。

### <東電回答>

発電機とソールプレート間には前後左右にキーが設置されている。今回の地震により、各キーについて若干変形が確認されており、発電機本体へも大きな荷重がかかったものと推測できる。

しかし、地震後分解する前に実施した発電機と低圧タービン（C）とのアライメント計測では、若干の管理値外れが確認されたが、組立後の調整の範疇で復旧可能なものであった。また、発電機の内部についても、回転子軸とのギャップが極めて小さい油切り等で接触が確認されたが、それ以外の部品等において内部に損傷等の異常はなかった。

以上の回答から、蒸気タービン発電機の軸受アライメントに異常の発生は見受けられないということが確認できた。地震の上下動によって、鋼板の溶接構造である低圧タービンケーシング軸受部分の変形を心配していたが、組立後の調整で解決できる程度のもので、問題となるような変形がないことが確認できた。



写真-2.2.1 低圧タービンロータの現地バランス  
(東電提供)



写真-2.2.2 補修後の高圧タービンロータ  
(東電提供)

### 2. 2. 7 まとめ

タービン設備に関しては、詳細な点検調査がなされ、復旧に向けた技術的管理的な体制が構築されていると判断する。

参考： 低圧タービン第 14 段動翼植込部フォークの折損の原因と対策について

(1) 推定原因と対策

① 第 14 段動翼について

A. 推定原因

過去に行われた負荷遮断時のフラッシュバック蒸気（フラッシュバックの発生メカニズムは図-2.2.1を参照のこと）の逆流により、第 14 段動翼の先端部に逆流域が生じ、約 30 ksi～50 ksi(約 210MPa ～350MPa)の振動応力が発生し、それによりき裂が生じた。その後も負荷遮断を繰り返す毎に、フラッシュバックが発生し、更にき裂が進展していったものである。

B. 対策

- ・ 設備としては、全数を同設計の新翼に交換する。
- ・ 負荷遮断が起こらなければき裂は発生せず、ほとんど進展もしないと考えられることから、これまでの負荷遮断回数（約 12 回）及びフォーク部の損傷状況を考慮し、負荷遮断回数が 4 回に達した時点で点検することを計画する。
- ・ 負荷遮断回数が 4 回に達しない場合であっても、最もき裂が多く確認された低圧車室（B）タービンの開放点検に合わせて、動翼フォーク部の点検（サンプリング率を翼枚数の 20%程度）を行い、本事象に対する原因・対策の妥当性を検証する。
  - ・ フラッシュバック発生時のタービンの挙動を正確に把握するため、プラントパラメータをモニタリングする（発電機出力、タービン回転数、給水加熱器圧力、復水器真空度、タービン軸振動など）。

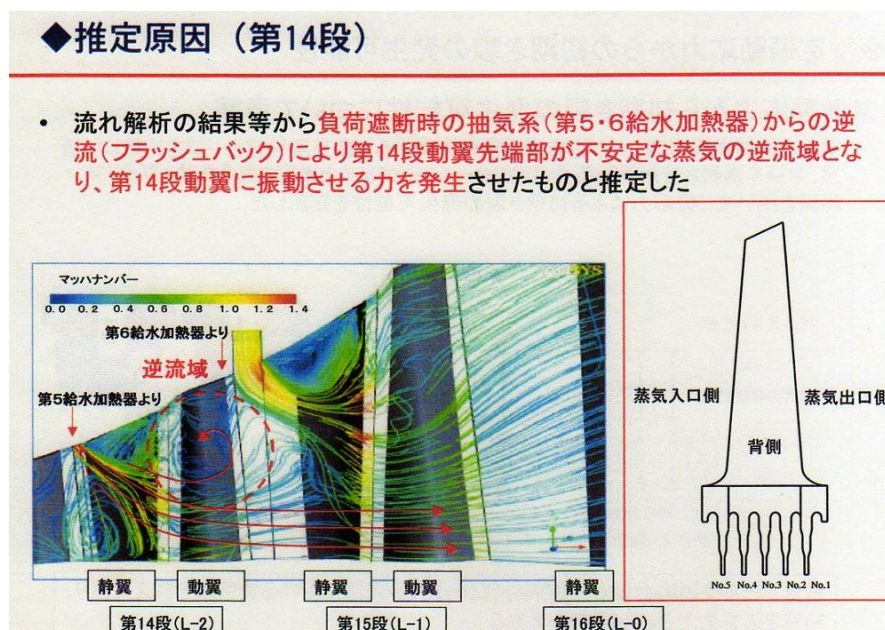


図-2.2.1 第 14 段動翼の植込部フォークの推定原因（東電提供）<sup>1)</sup>

## ①第 16 段動翼について

### A. 推定原因

復水器真空度が低下した状態で低負荷運転をした際に、蒸気の逆流によりランダム振動（ランダム振動発生メカニズムは図-2.2.2 を参照のこと）が発生し、初期き裂を発生させた。その後、約 24ksi ~ 30ksi（約 170MPa ~ 210MPa）の振動応力が発生したことにより、そのき裂が進展していった。

また、通常の復水器真空度での低負荷運転ではき裂が進展する可能性は現段階の評価においては殆どないと推定されることから、このき裂の殆どが試運転時に発生し、進展していったものと推定される。

### B. 対策

今回確認したき裂は非常に小さく、翼に及ぼす振動応力もき裂進展しきい値以下であることから、従来 of 運転方法で今後運転したとしてもき裂が進展することはないと考えられるが、信頼性に万全を期すために以下のような対策を講じる。

- ・ 現行翼の蒸気入口及び出口側の外側ピン穴端部に面取り加工を実施する。
- ・ 起動時の復水器真空度を高く設定する。
- ・ FSNL(Full Speed No Load)の運転時間を短縮する。
- ・ FSNL 運転時のランダム振動に関する運転パラメータのモニタリングを実施する。
- ・ FSNL 運転時間が 80 時間に達する前に点検を実施する。
- ・ FSNL 運転時間が 80 時間に達しなくても、7 号機低圧車室 (B) タービンの開放点検に合わせて動翼フォーク部点検（サンプリング率は翼枚数の 20%程度）を行う。

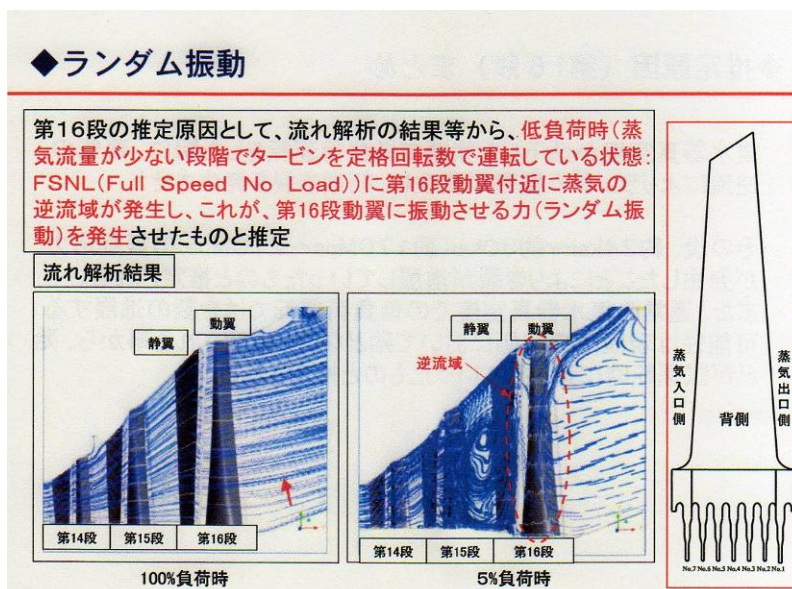


図-2.2.2 第 16 段動翼の推定原因（東電提供）<sup>1)</sup>

## (2) 信頼性向上への取り組み

### ① 短期的

- ・ 運用；第 14 段及び第 16 段についての点検やモニタリング結果を適宜、分析・評価し、今回の対策の有効性を確認する。
- ・ 点検；タービン動翼フォーク部の検査技術として、超音波探傷試験（UT）の信頼性向上を図る。更に、7 号機低圧（B）タービン第 16 段動翼のフォーク部点検に合わせて、第 15 段動翼のフォーク部点検（サンプリング率は翼枚数の 20%程度）を行い、今後の知見拡充に努める。

### ② 長期的

- ・ 設計；負荷遮断時のフラッシュバックや低負荷運転時のタービン動翼に発生する応力について詳細な評価を行う。更に、フォーク部に発生する振動応力が一層低減するような設計改良について 10 年程度以内の実用化を目標に検討する。

## (3) まとめ

以上の調査結果から、推定原因や対策については色々な角度から専門家の検討がなされ、十分な結果が得られていると判断される。短期的な対策として、今後は、運転中の十分なモニタリングが必要である。また、今回の点検、評価で得られた教訓から必要と考えられる長期的な対策については、できるだけ早期に着手されることを期待する。