

# 柏崎刈羽原子力発電所第7号機 低圧蒸気タービン取替計画について

---

2022年3月8日

## ・目的

低圧蒸気タービンの車軸、円盤、翼、噴口、及び隔板を設計改良し取り替えることにより信頼性の向上を図る。  
なお、基本設計方針、適用基準又は適用規格の変更を伴うものではない。

## ・申請範囲

今回の申請範囲は、柏崎刈羽原子力発電所第7号機の次の部分である。  
(実用炉規則 別表第二より)

### 3. 原子炉冷却系統施設

蒸気タービンに係るものにあつては、次の事項

#### 1 蒸気タービン本体に係る次の事項

(1) 種類、定格出力、気筒数、主蒸気止め弁の入口の圧力及び温度、再熱蒸気止め弁の入口の圧力及び温度、抽気圧力、抽気量、排気圧力、回転速度並びに被動機一体の危険速度

(2) 車室、円盤、隔板、噴口、翼、車軸の主要寸法及び材料並びに間の最高使用圧力、最高使用温度、外径、厚さ及び材料

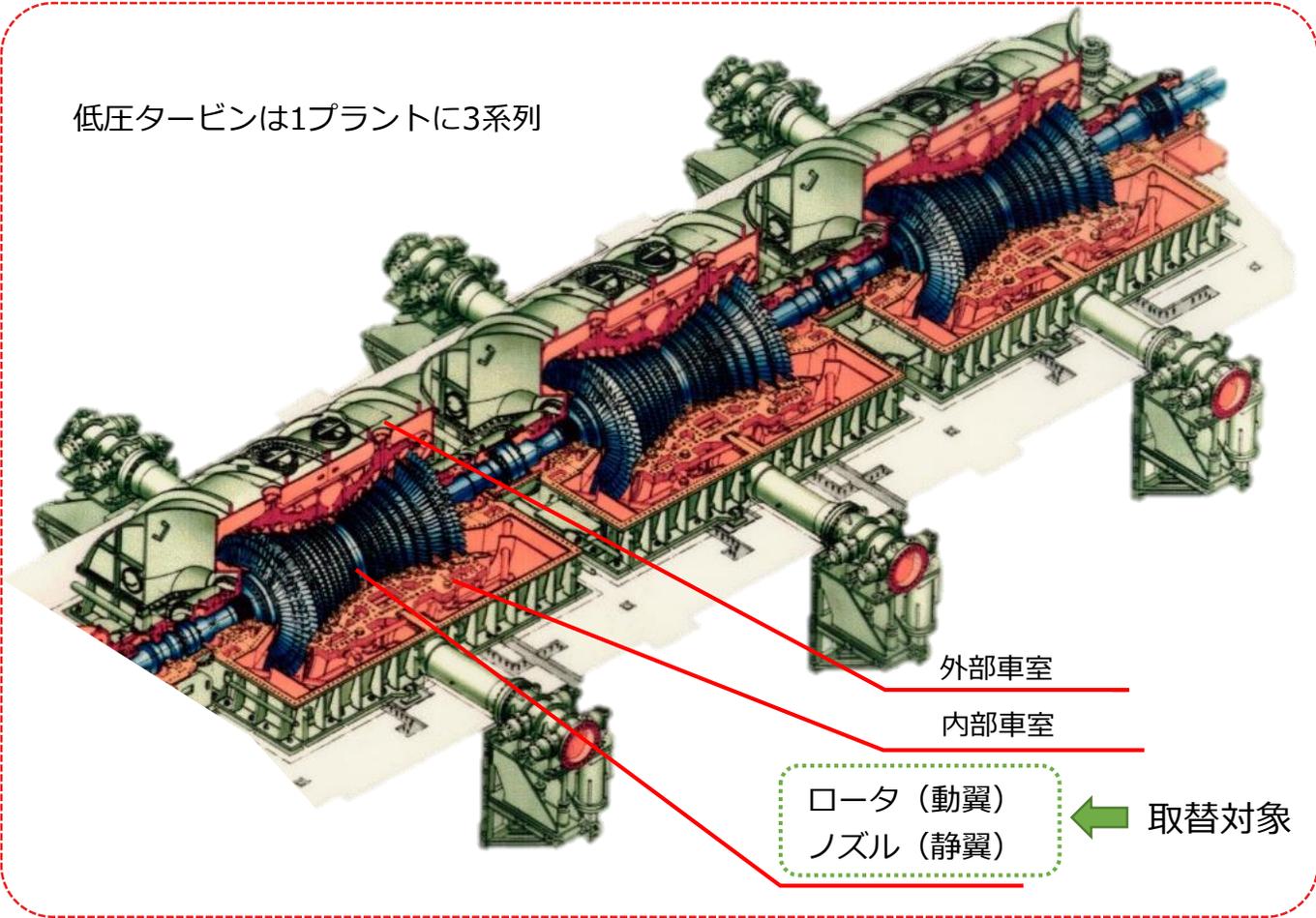
# 工事概要

7号機低圧蒸気タービンについて、設計改良したものに取替を行う。

ノズル (静翼)



ロータ、(動翼)



# 柏崎刈羽原子力発電所6・7号機における 低圧タービン動翼の損傷事象に関する 点検結果ならびに原因と対策について

平成20年9月19日

東京電力株式会社

柏崎刈羽原子力発電所



東京電力

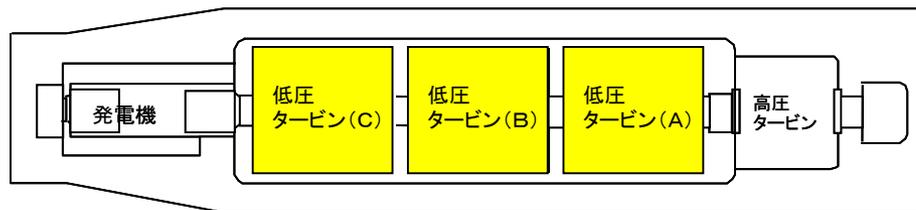
---

---

低圧タービン動翼の  
損傷事象に関する点検結果  
(平成20年7月31日お知らせ済み)

・6・7号機低圧タービンは3台の低圧タービンで構成

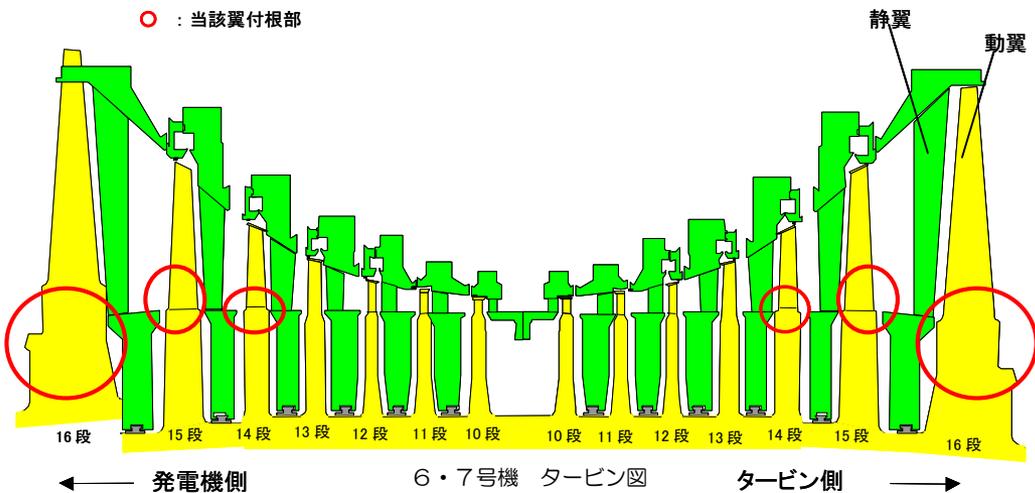
低圧タービンの翼は第10段～第16段の7段で構成されており、翼植込み部については鞍型構造(第10段～第13段)とフォーク型構造(第14段～第16段)の2種類がある。



緑色：静翼（ノズルダイヤフラム）

黄色色：動翼（タービンロータ）

○：当該翼付根部



鞍型構造  
(第10段～第13段)



フォーク型構造  
(第14段～第16段)

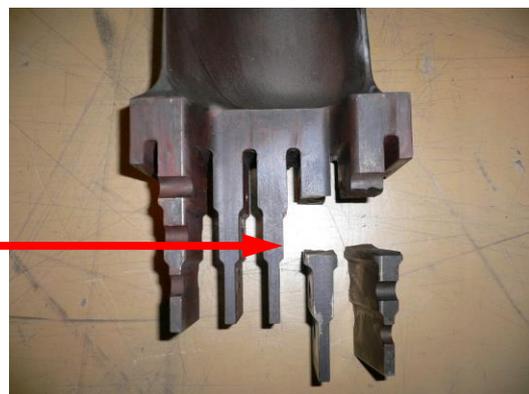
# ◆ 経緯

- 7号機第14段～第16段フォーク型翼についてフォークピンの超音波探傷検査(UT)を実施した結果、低圧タービン(C)第14段タービン側翼フォークピンに1箇所が確認された。
- フォークピンに指示が確認された翼を抜き取って点検したところ、フォークの折損が確認された。
- なお、第10段～第13段の鞍型翼について翼付け根部の外観点検および超音波探傷検査(UT)を実施した結果、異常は確認されなかった。
- この結果を踏まえ、当該箇所の詳細な点検と同型翼(フォーク型翼)の7号機および6号機※の類似箇所(第14段～16段翼)の点検(翼の抜き取りおよび磁粉探傷検査(MT))を実施した。
- 折損箇所および非破壊検査指示箇所については破面の調査も併せて実施した。

(※同様の構造の翼を採用しているプラントは、柏崎刈羽原子力発電所6、7号機(ABWR)のみ)



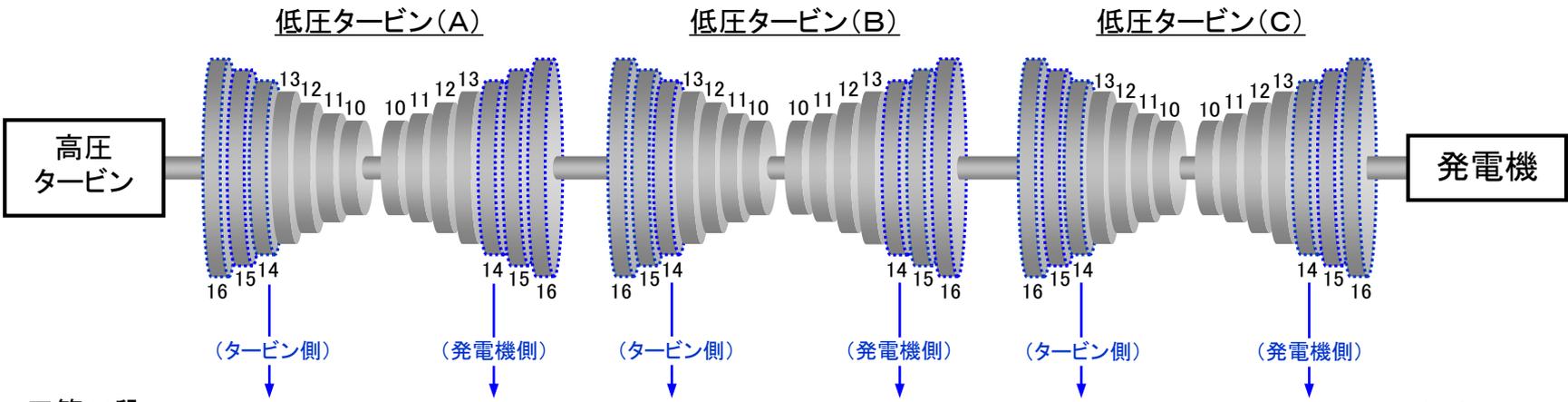
フォーク型翼  
(第14段の例)



低圧タービン(C) 第14段翼折損状況(119枚目)

# ◆ 6号機 低圧タービン点検結果

☐ : 点検範囲



## ■ 第14段

折 損	0枚 / 152	0枚 / 152
指示模様	12枚 / 152	0枚 / 152

0枚 / 152	0枚 / 152
63枚 / 152	28枚 / 152

0枚 / 152	0枚 / 152
1枚 / 152	33枚 / 152

## ■ 合計

0枚 / 912枚 (総数)
137枚 / 912枚 (総数)

## ■ 第15段

折 損	0枚 / 126	0枚 / 126
指示模様	0枚 / 126	0枚 / 126

0枚 / 126	0枚 / 126
0枚 / 126	0枚 / 126

0枚 / 126	0枚 / 126
0枚 / 126	0枚 / 126

0枚 / 756枚 (総数)
0枚 / 756枚 (総数)

## ■ 第16段

折 損	0枚 / 130	0枚 / 130
指示模様	0枚 / 130	0枚 / 130

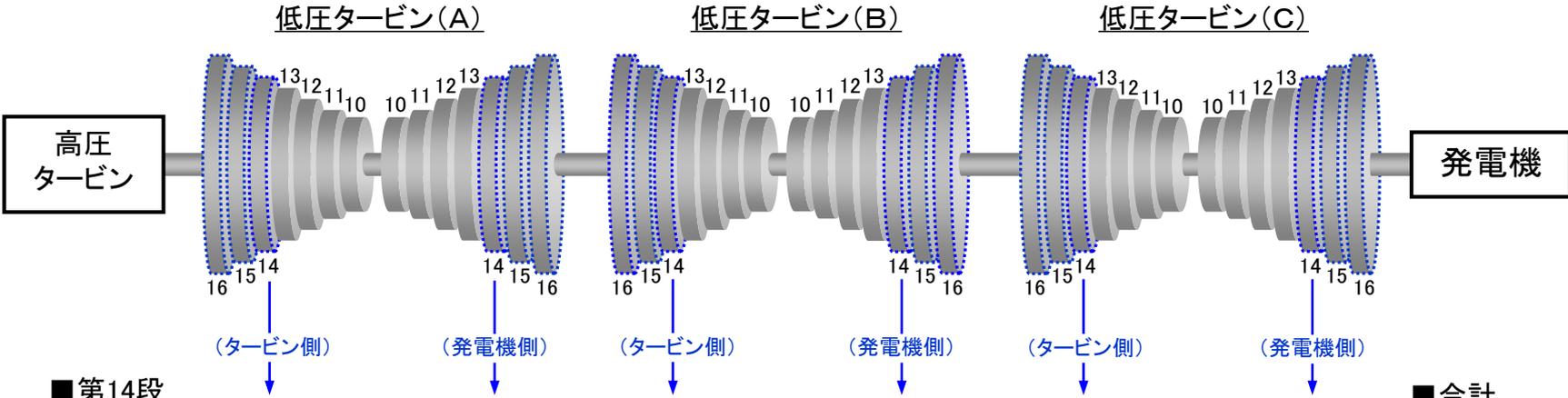
0枚 / 130	0枚 / 130
1枚 / 130	0枚 / 130

0枚 / 130	0枚 / 130
4枚 / 130	0枚 / 130

0枚 / 780枚 (総数)
5枚 / 780枚 (総数)

# ◆7号機 低圧タービン点検結果

点検範囲



## ■第14段

折損	0枚 / 152	0枚 / 152
指示模様	1枚 / 152	0枚 / 152

1枚 / 152	0枚 / 152
50枚 / 152	22枚 / 152

1枚 / 152	0枚 / 152
17枚 / 152	0枚 / 152

## ■合計

2枚 / 912枚 (総数)
90枚 / 912枚 (総数)
0枚 / 756枚 (総数)
1枚 / 756枚 (総数)

## ■第15段

折損	0枚 / 126	0枚 / 126
指示模様	0枚 / 126	0枚 / 126

0枚 / 126	0枚 / 126
0枚 / 126	0枚 / 126

0枚 / 126	0枚 / 126
1枚 ※ / 126	0枚 / 126

## ■第16段

折損	0枚 / 130	0枚 / 130
指示模様	1枚 / 130	18枚 / 130

0枚 / 130	0枚 / 130
19枚 / 130	18枚 / 130

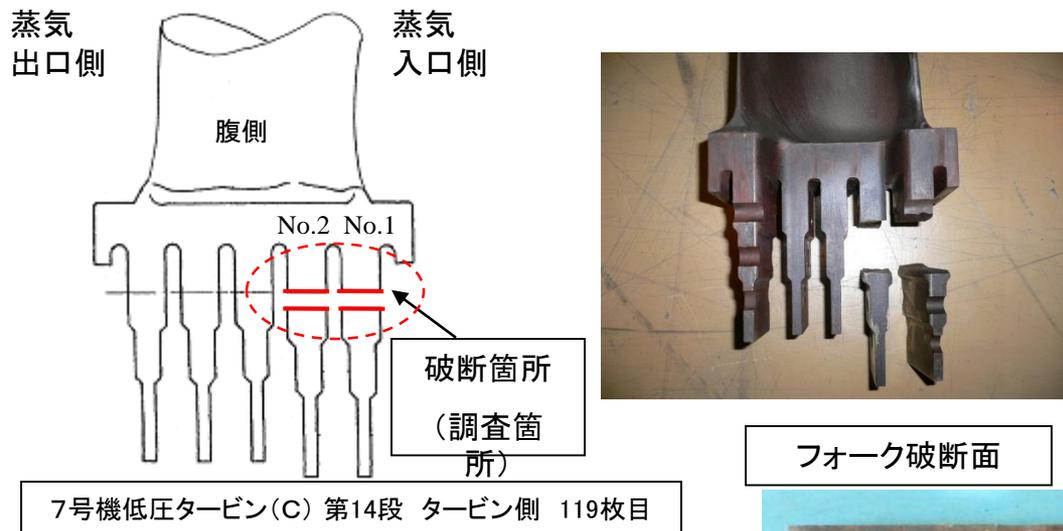
0枚 / 130	0枚 / 130
9枚 / 130	31枚 / 130

0枚 / 780枚 (総数)
96枚 / 780枚 (総数)

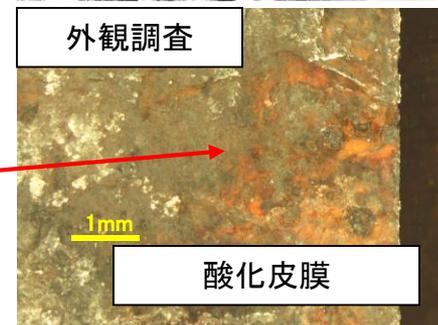
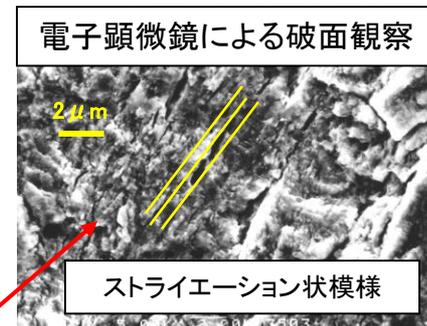
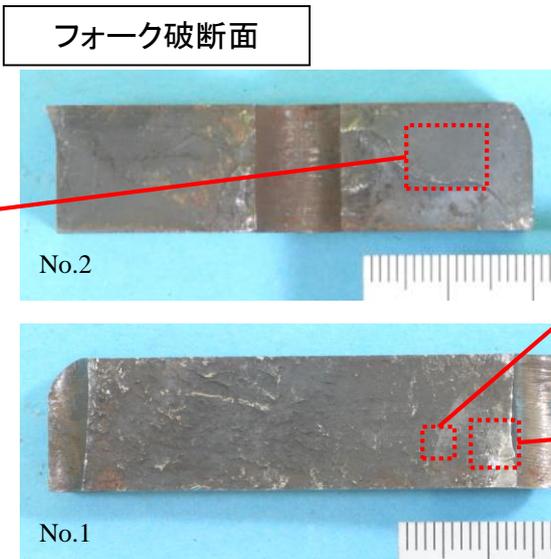
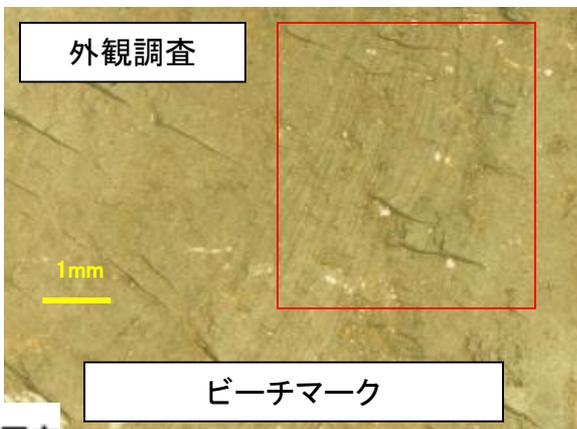
※第15段は指示が微小であり、かつ、系統的な指示模様の発生が見られず第14段および第16段と様相が異なる。製造過程や翼の取り外し作業等に伴って生じたものと考えられる。

# ◆低圧タービン第14段動翼フォーク部の調査結果（損傷箇所）

● 低圧タービン第14段の折損した動翼フォーク部について破面調査を行った結果、高サイクル疲労破面に見られるような縞状の模様（ビーチマークおよびストライエーション状模様）が確認された。また、破面には酸化皮膜が形成されていた。これらのことから、今回のプラント停止（新潟県中越沖地震発生）以前に高サイクル疲労により損傷に至ったものと考えられる。



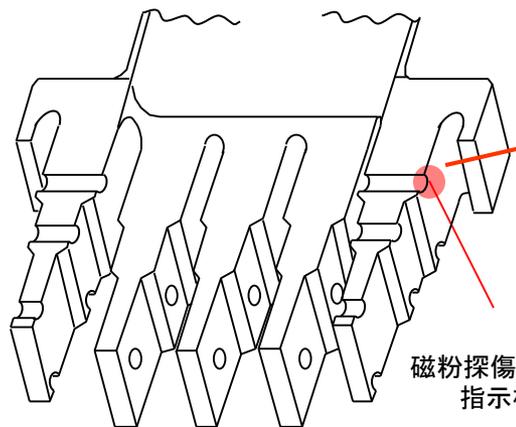
金属調査実施項目	調査結果
・外観調査	・ビーチマークを確認 ・酸化皮膜を確認
・破面観察(走査型電子顕微鏡)	・ストライエーション状模様を確認



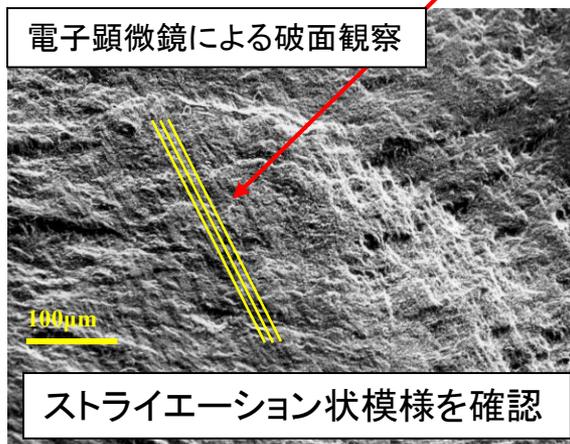
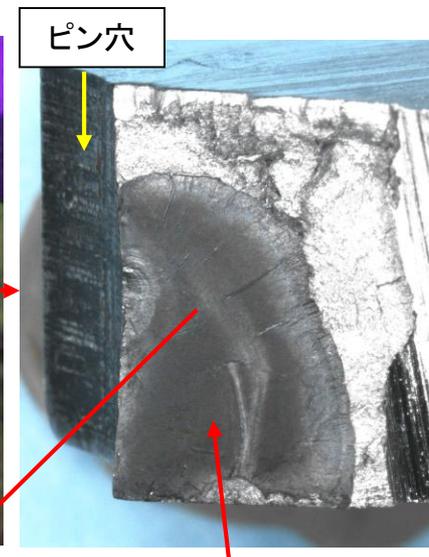
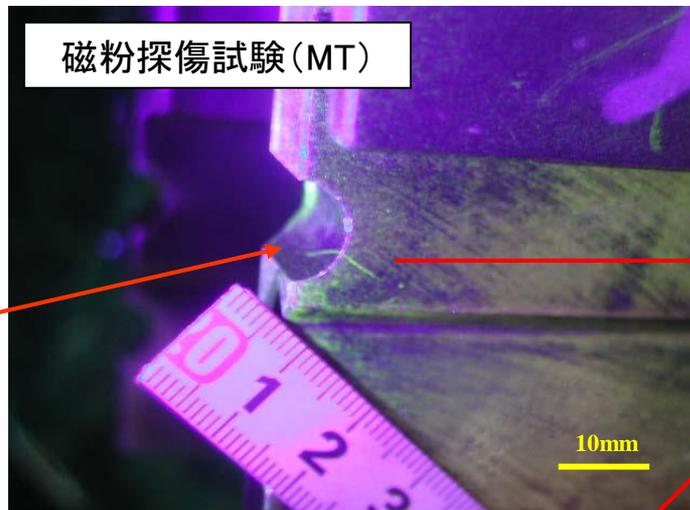


## ◆低圧タービン第14段動翼フォーク部の調査結果（磁粉探傷試験による指示模様部）

- 低圧タービン第14段の磁粉探傷試験による指示模様部について破面調査を行った結果、高サイクル疲労破面に見られるようなビーチマークおよびストライエーション状模様が確認された。また、破面には酸化皮膜が形成されていた。これらのことから、今回のプラント停止（新潟県中越沖地震発生）以前に高サイクル疲労により損傷に至ったものと考えられる。



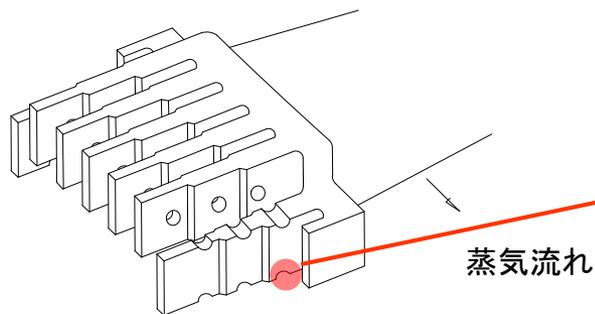
7号機低圧タービン(C) 第14段 タービン側 120枚目 (代表例)



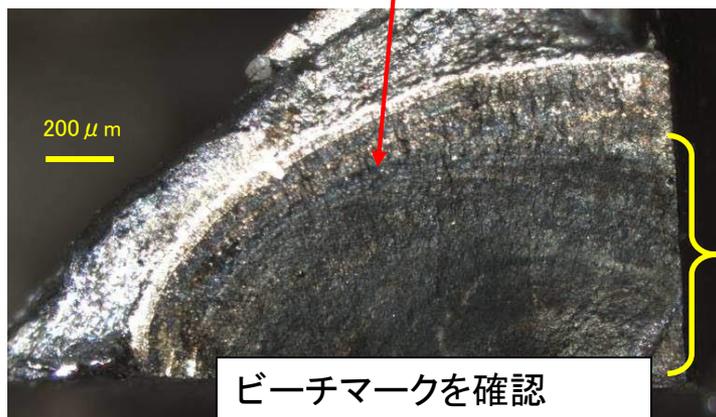
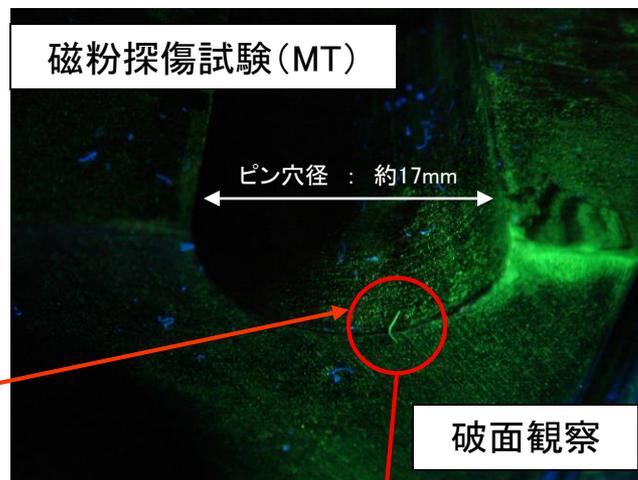
黒色部は亀裂破面 (酸化皮膜が形成)

## ◆低圧タービン第16段動翼フォーク部の調査結果（磁粉探傷試験による指示模様部）

- 低圧タービン第16段の磁粉探傷試験による指示模様部について破面調査を行った結果、高サイクル疲労破面に見られるようなビーチマークが確認された。また、破面には酸化皮膜が形成されていた。これらのことから今回のプラント停止（新潟県中越沖地震発生）以前に高サイクル疲労により発生したものと考えられる。



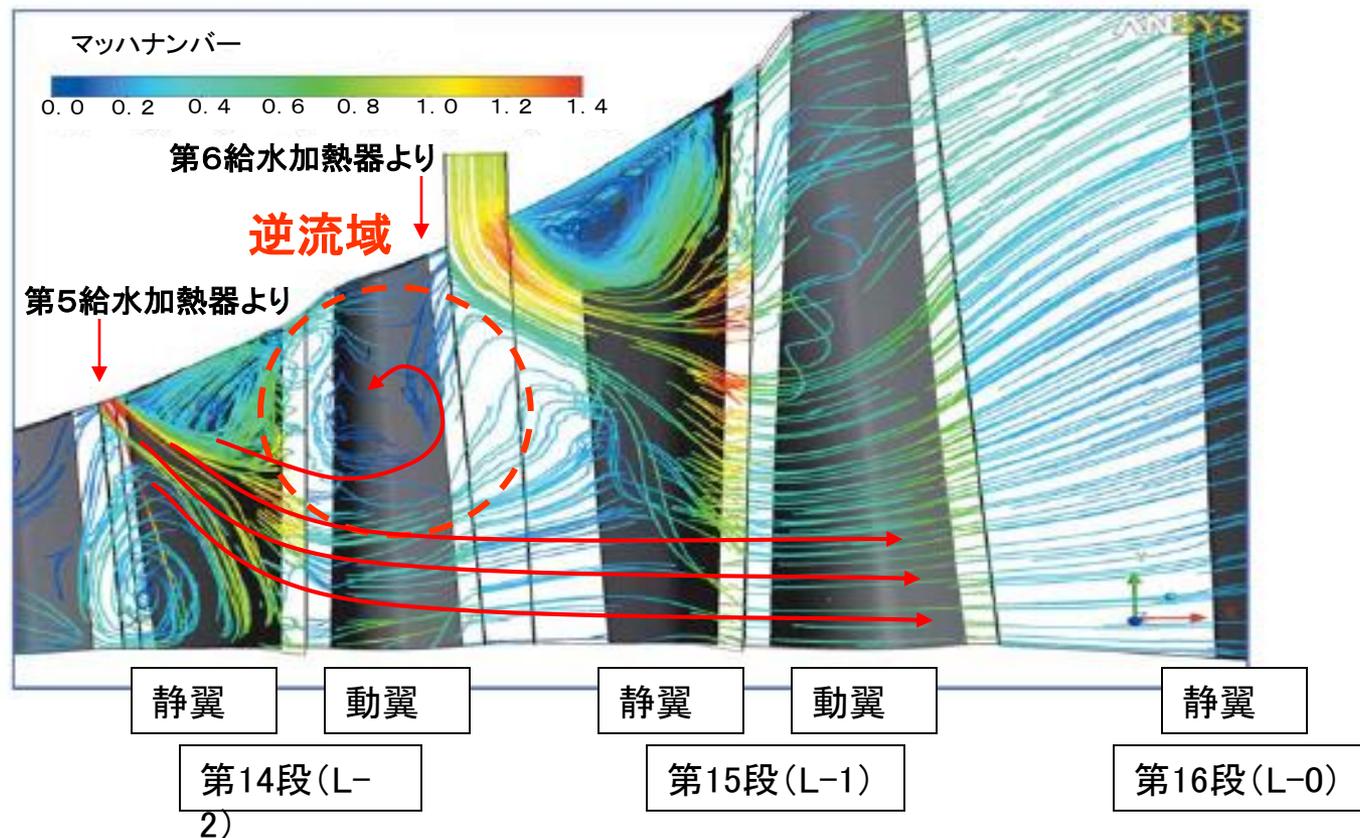
7号機低圧タービン(B) 第16段タービン側 102枚目  
(代表例)



# 低圧タービン動翼の損傷事象に関する 推定原因および対策

## ◆推定原因（第14段）

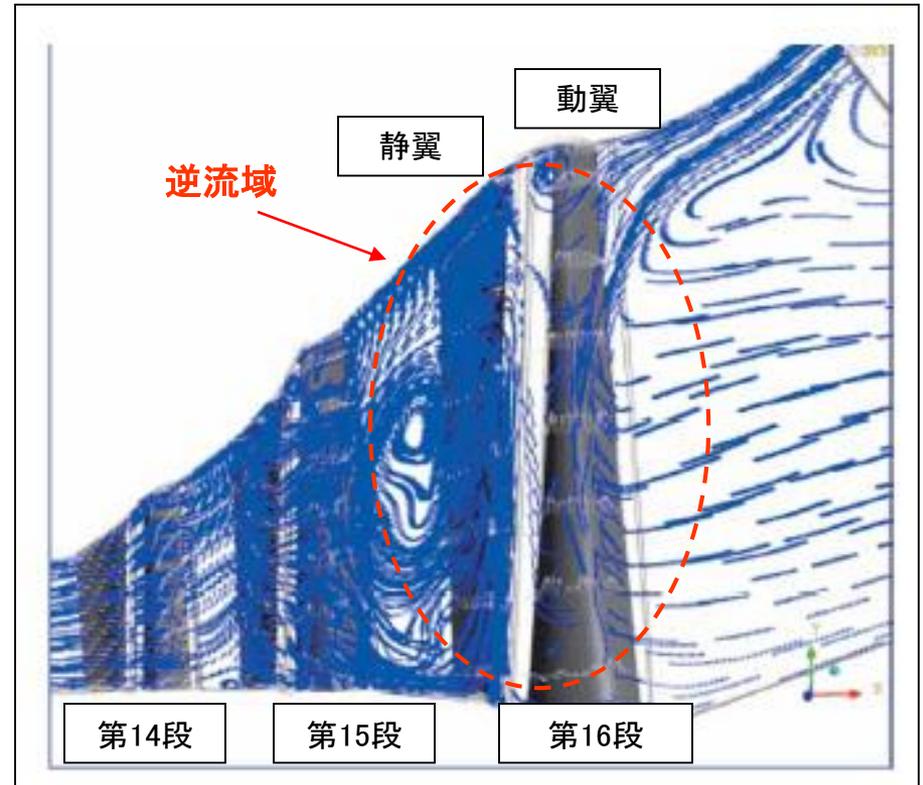
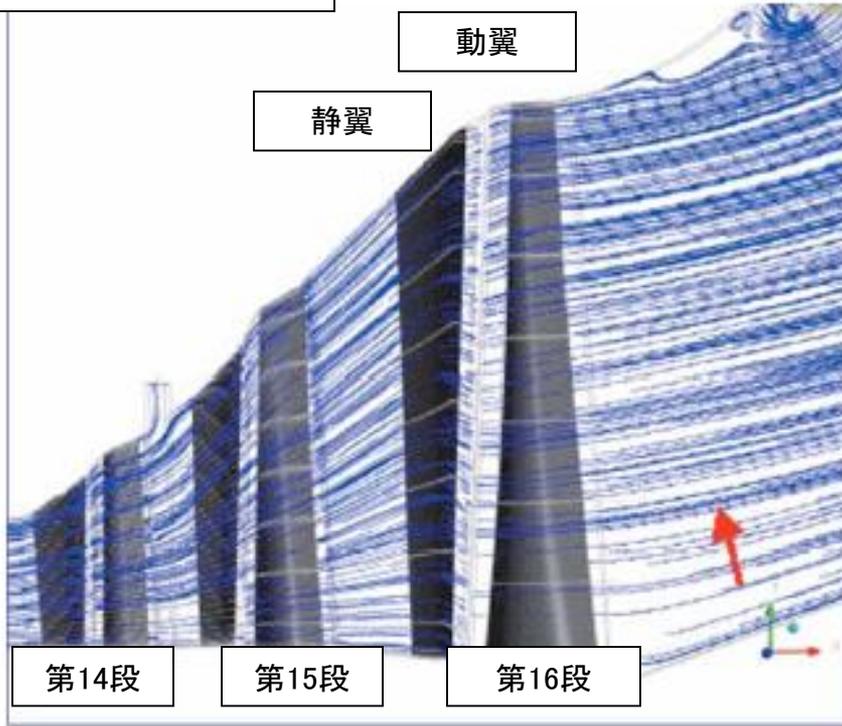
- 流れ解析の結果等から負荷遮断時の抽気系（第5・6給水加熱器）からの逆流（フラッシュバック：資料1）により第14段動翼先端部が不安定な蒸気の逆流域となり、第14段動翼に振動させる力を発生させたものと推定した。  
また、損傷破面観察の結果から、フラッシュバックによる発生応力は疲労限を上回り、これによりき裂が発生・進展したものと推定した。



# ◆推定原因（第16段）

流れ解析の結果等から、低負荷時（蒸気流量が少ない段階でタービンを定格回転数で運転している状態：FSNL）に第16段動翼付近に蒸気の逆流域が発生し、これが、第16段動翼に振動させる力（ランダム振動）を発生させたものと推定。また、損傷の破面観察の結果等から通常の起動時における復水器真空度ではき裂の発生進展には至らないと想定されるため、き裂は試運転時に発生および進展していたものと推定。

## 流れ解析結果



100%負荷時

5%負荷時

## ◆対策（第14段）

1. 第14段動翼は全数、同設計の新翼に交換する
2. 負荷遮断が起こらなければ傷は発生せず、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)およびフォーク部の損傷状況を考慮し、負荷遮断が4回に達した時点で点検を計画する。
3. 負荷遮断回数が4回に達しない場合にあっても、最も傷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数の20%程度とする)を行い、本事象に対する原因・対策の妥当性を検証する。
4. あわせてフラッシュバック発生時のタービンの挙動をより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。)

※タービン開放点検頻度は、

- ・ 累積運転時間が10万時間以上であれば最長3年毎に1回実施
- ・ 累積運転時間が10万時間未満であれば最長4年毎に1回実施

## ◆対策（第16段）

1. 第16段動翼は傷がごく小さいことから全ての傷を除去するとともに、ピン穴への応力集中を低減するため、全ての翼の蒸気入口および出口側の外側(上部)ピン穴端部の面取り加工(資料2)を実施する。
2. FSNL運転時に発生する振動応力を低減するために、起動時の復水器真空度を高く設定するとともに、FSNL運転時間を可能な限り短縮する。
3. あわせてプラントパラメータ(タービン回転数、復水器真空度等)をモニタリングする。
4. 上記の対策により傷は発生せず、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FSNL時間(約240時間)およびフォーク部の損傷状況を考慮し、FSNL時間が80時間に達する前に点検を実施する。
5. FSNL時間が80時間に達しない場合にあっても、傷が多く確認された7号機低圧車室(B)タービンの開放点検に合わせて、動翼フォーク部の点検(サンプリング率を翼数の20%程度とする)を行い、本事象に対する原因・対策の妥当性を検証する。

## ◆更なる信頼性向上への取り組み

- 今回損傷が確認された第14段および第16段については動翼の交換および傷の除去、フォーク部の点検、プラントパラメータのモニタリング等により、健全性を確保できるものと考えられるが、これらの点検やモニタリングの結果を適宜、分析・評価し、今回の対策の有効性を確認していくこととする。
- 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、7号機低圧タービン(B)に対し第15段動翼フォーク部の点検(サンプリング率を翼数の20%程度とする)を行い、今後の知見拡充に努める。
- 将来的なタービン翼付け根部(フォーク部)の検査技術として、超音波探傷試験(UT)による欠陥検出性の検証を行い、信頼性向上を図る。
- 第15段(L-1)翼への非定常流の影響評価などを中期的な課題として整理し、継続して詳細評価を進めるとともに、今後のタービン設計・開発段階においては、今回事象の原因となった負荷遮断時のフラッシュバックや低負荷運転時の非定常な蒸気流れによってタービン翼に発生する応力について詳細な評価を行っていく。また、今回の6、7号機についてもこれらの知見にもとづき、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、これまでの運転実績も考慮し、10年程度以内の実用化を目標に検討していく。なお、これらの評価にあたっては学識者からによる客観的なレビューを反映していくことを検討する。

# ◆対策・更なる信頼性向上への取り組み（まとめ）

## ■対策

	第14段	第16段
設計	・全ての翼を、同設計の新翼に交換	・全ての翼の所定のピン穴端部に面取り加工を実施し、傷を除去
運用	・プラントパラメータのモニタリング （フラッシュバック発生時）	・起動時の復水器真空度を高く設定 ・FSNL運転時間を可能な限り短縮 ・プラントパラメータのモニタリング
点検	・負荷遮断が4回に達した時点で点検を計画 ・負荷遮断が4回に達しなくても、6、7号低圧車室（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数の20%程度）を行う	・FSNL運転時間が80時間に達する前に点検を実施 ・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数の20%程度）を行う

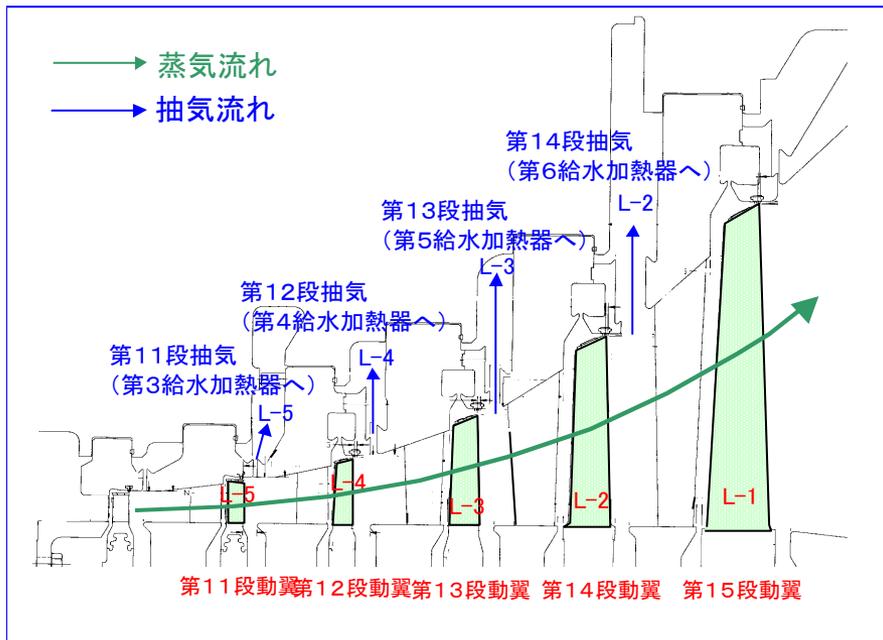
## ■更なる信頼性向上への取り組み

	項目	取り組み事項
短期的	運用	・第14段および第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。 ・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数の20%程度）を行い、今後の知見拡充に努める。
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。 ・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。

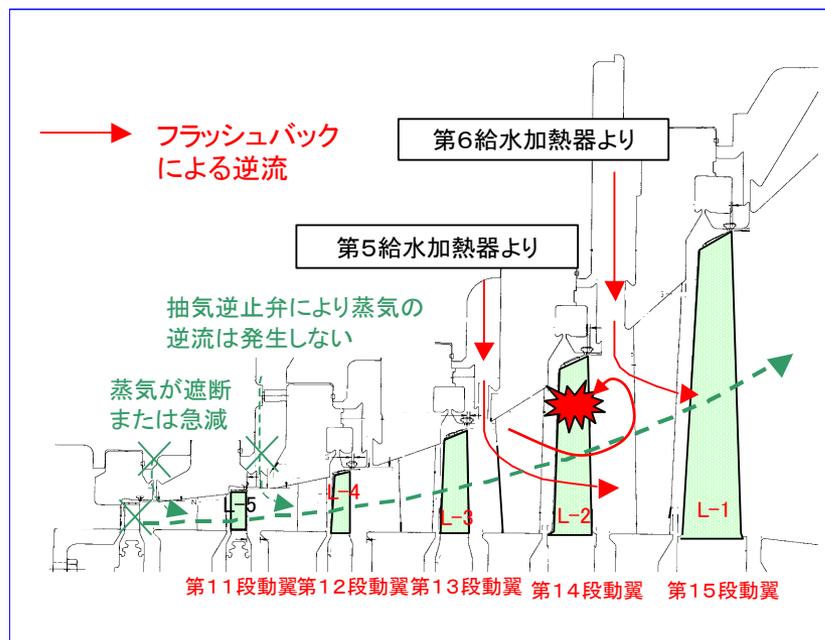
# ◆フラッシュバックとは

(資料  
1)

## 通常運転時の蒸気の流れ



## フラッシュバック時の蒸気の流れ



## フラッシュバックの挙動

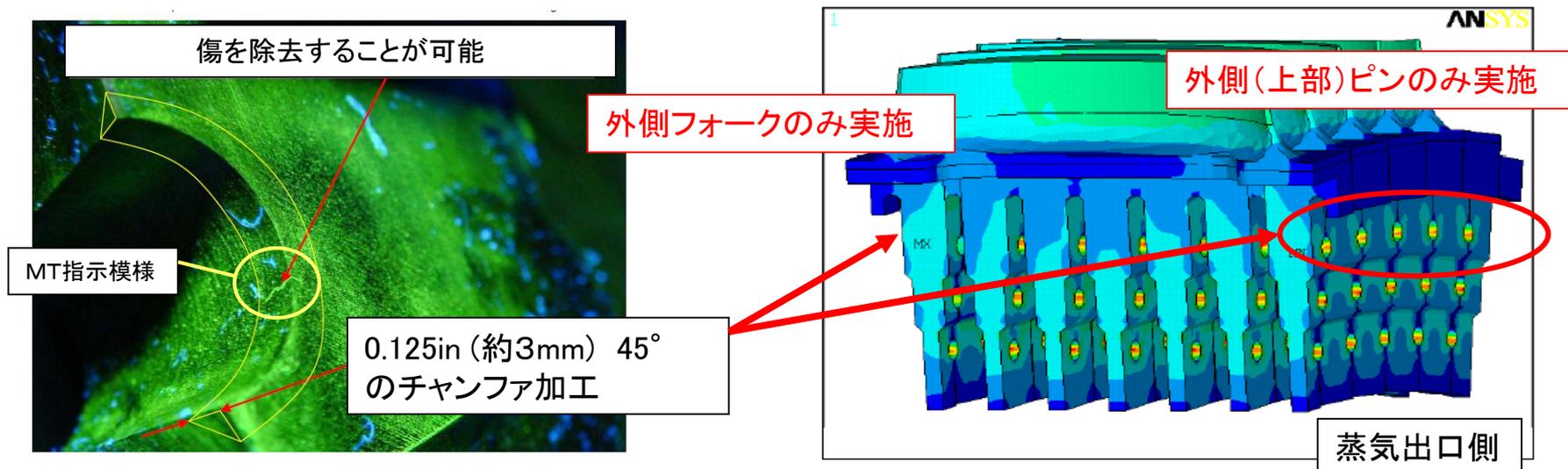
- ①蒸気量が急減または蒸気が遮断
- ②タービン内の圧力が低下
- ③給水加熱器の圧力が低下し、加熱器内で減圧沸騰が発生し、蒸気が高速で逆流する

# ◆面取り加工とは

(資料  
2)

■第16段動翼は傷がごく小さいことから面取り加工により全ての傷を除去する。

■面取り加工は全ての翼の蒸気入口および出口側の外側(上部)ピン穴端部に対して行い、これにより傷の除去に加えてピン穴への応力集中低減を図ることができる。



面取り加工イメージ

面取り加工実施位置