

# 不適合事象に関する報告について

平成20年9月25日



東京電力

---

# 今回の報告対象

- 使用済燃料貯蔵プール水の溢水並びに6号機の系外放出に関する対策について
- 6号機 原子炉建屋天井クレーンを駆動させる軸の継手の破損について
- 柏崎刈羽原子力発電所7号機 蒸気タービン翼の接触事象に関する解析結果について

使用済燃料貯蔵プール水の溢水  
並びに  
6号機の系外放出に関する対策について

平成20年9月25日

東京電力株式会社



東京電力

---

# 使用済燃料貯蔵プール水 溢水事象

- 中越沖地震時に使用済燃料貯蔵プール水がスロッシングにより溢水し、全ての号機において使用済燃料貯蔵プール水が原子炉オペレーティングフロア全域に広がる事象が発生

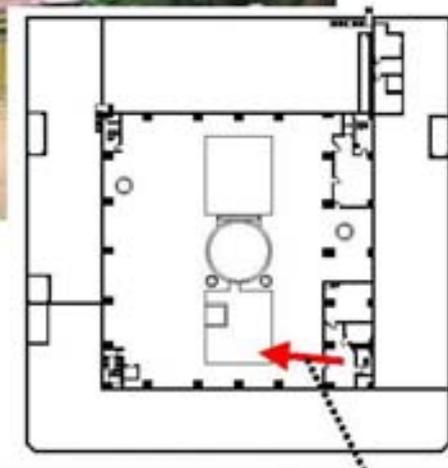
(地震発生前)



(地震発生時)



※ ビデオデッキ時刻ずれ (約2分遅れ)

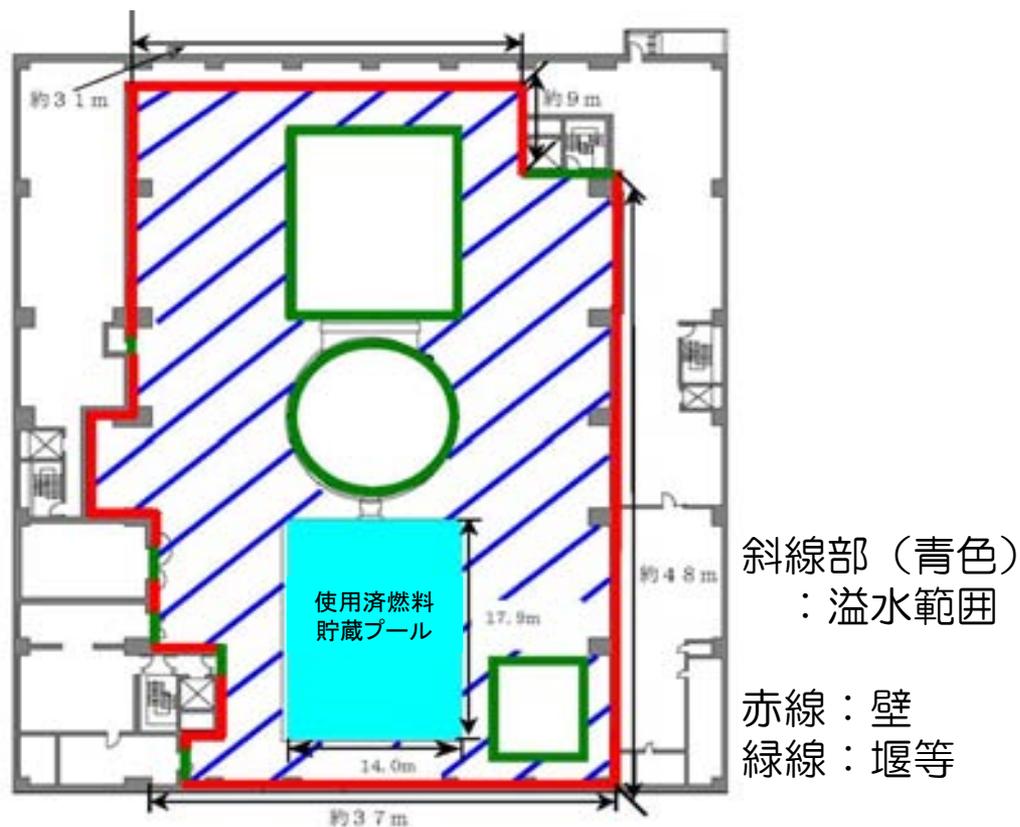


撮影アングル

スロッシング (K-3の例)

# 使用済燃料貯蔵プール水 溢水事象

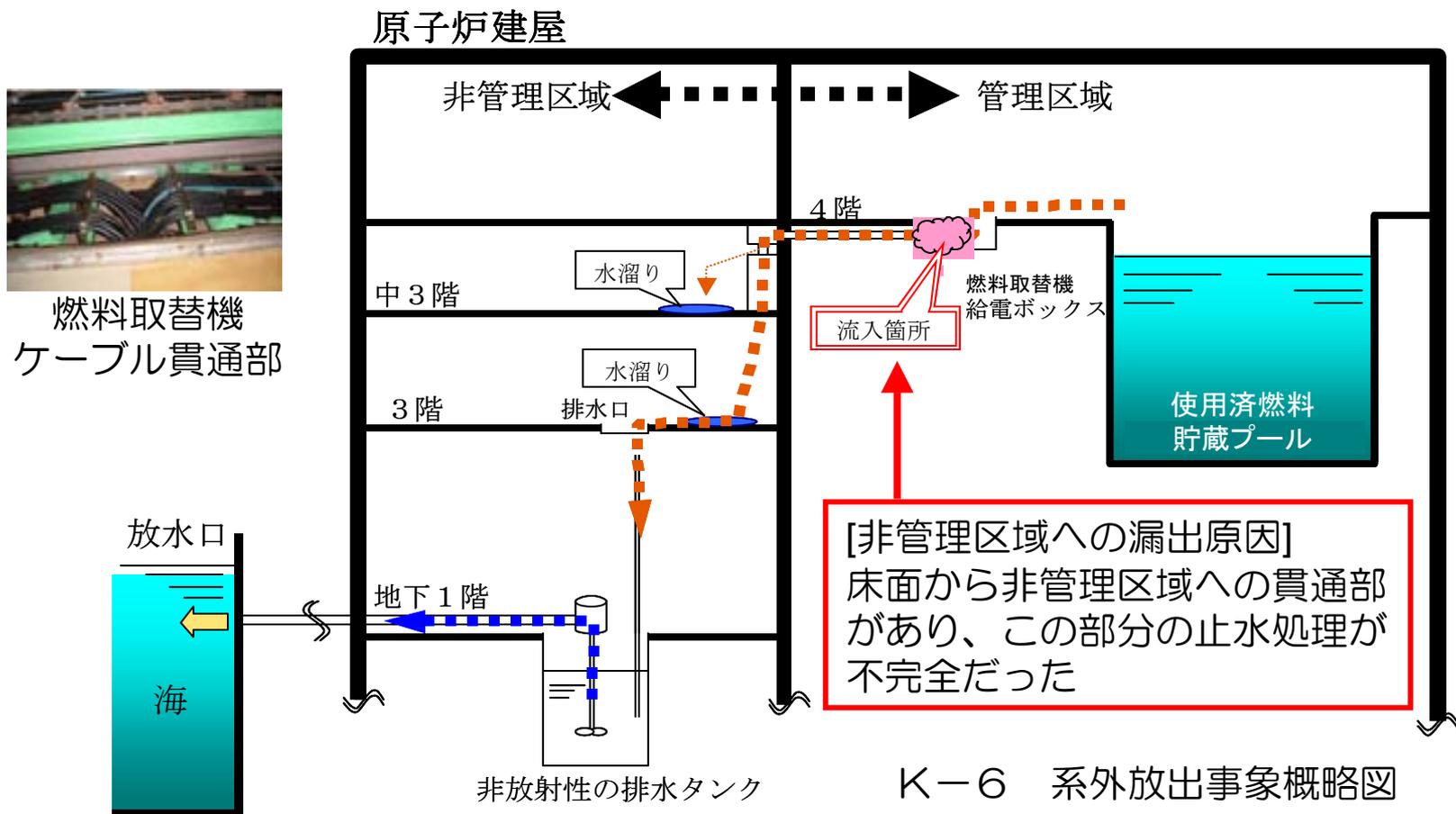
- 中越沖地震時に使用済燃料貯蔵プール水が**スロッシング**によりオペレーションフロアに溢水



オペレーションフロア溢水状況（6号機の例）

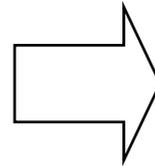
# 使用済燃料貯蔵プール水 系外放出事象 原因

- 6号機では、溢れた使用済燃料貯蔵プール水が燃料取替機のケーブル貫通部を通じて**非管理区域**へ漏えいし、非管理区域の排水設備から放水口を經由して**発電所外に放出**



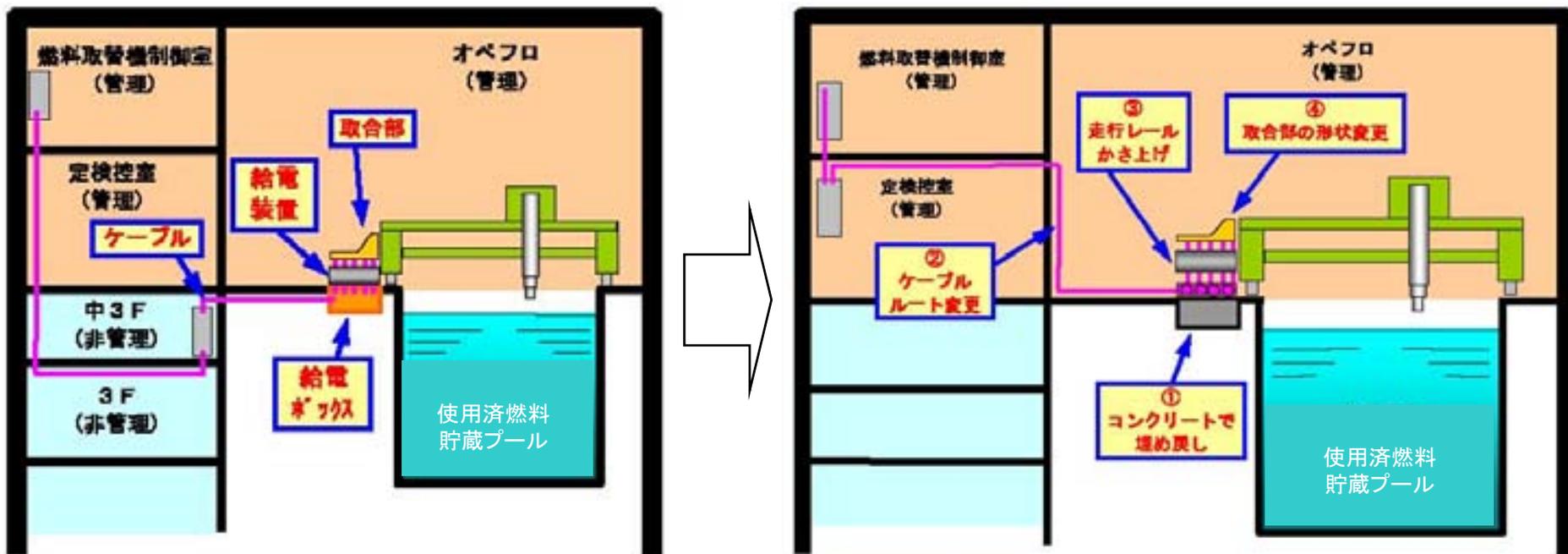
# 使用済燃料貯蔵プール水 系外放出事象 暫定対策

- 暫定対策として、オペレーションフロアの水については拭き取りおよび除染を実施。燃料取替機ケーブル貫通部については止水処理を実施



# 使用済燃料貯蔵プール水 系外放出事象 恒久対策

- 恒久対策として、6号機のケーブル敷設ルートを変更するとともに、従来のケーブルルートを埋め戻す



対策前のケーブルルート

対策実施後のケーブルルート

- ※ 燃料取替機のケーブルがオペレーションフロア（管理区域）から非管理区域に向けて敷設されていたのは6号機のみ

# その他の実施事項について

- 本事象は、6号機のみ燃料取替機のケーブルが原子炉オペレーションフロア床面（管理区域）から非管理区域に向けて敷設されていたために発生したものであることから、ケーブルルートの変更を実施することにより、再発防止対策は図れているものと考えている。
- しかし、事象の重要性を考慮し、自主的な取り組みとして系外放出のリスクを低減させるために、1～7号機において以下の項目を実施する予定である。
  - ① ケーブル貫通部の止水処理の実施
  - ② 使用済燃料貯蔵プール周囲への柵の設置
  - ③ 非管理区域で発生するドローンの放射能測定

# その他実施事項① ケーブル貫通部の止水処理

- 原子炉オペレーションフロアに存在する配管・ケーブルの貫通部のうち、高さ20cm以下にある貫通部について、現在の止水処理状況を確認するとともに、必要に応じて追加の止水処理を実施

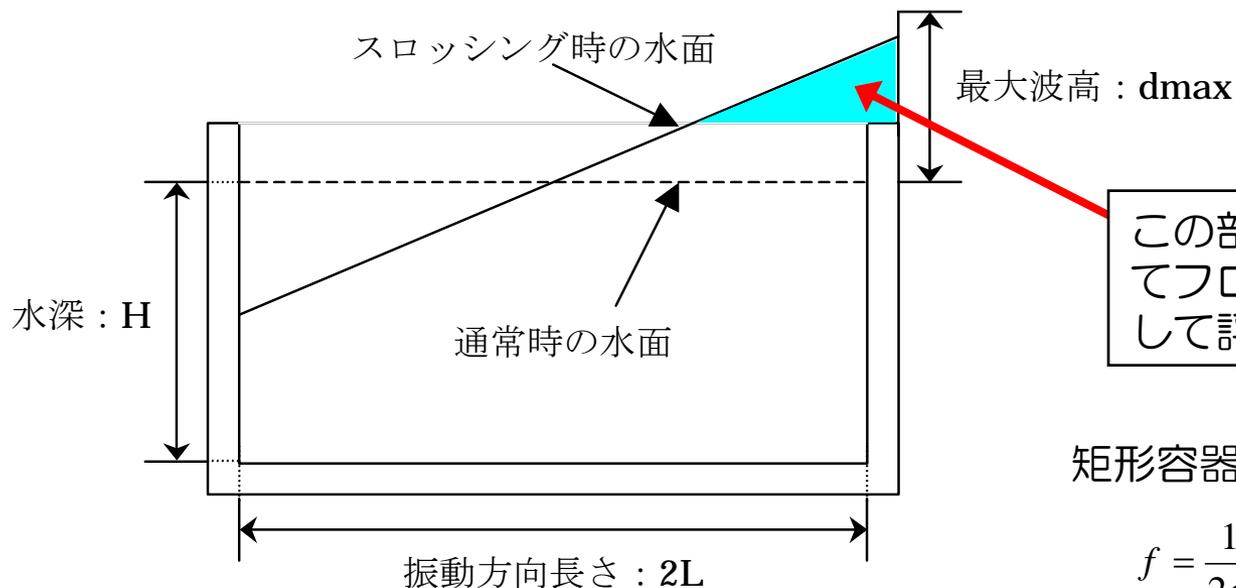
高さ20cm以下の範囲に限定できる根拠

→ 理論式に基づき、溢水量を想定

速度ポテンシャル理論により中越沖地震時の観測波を元に溢水量を評価したところ、1～7号機において床面から10cm程度の溢水が発生するものと評価

# その他実施事項① ケーブル貫通部の止水処理

## ■理論式による溢水量評価（参考）



この部分の体積の水が、全てフロアに溢水すると仮定して評価

プールの固有周期と地震波の周期から、スロッシングによって生じる最大の波高（dmax）を求め、床面以上の水が全てフロアに溢水するとして評価を実施

矩形容器における固有周波数

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.571}{L} g \times \tanh \frac{H}{1.571L}}$$

f：矩形容器の固有周波数

g：重力加速度

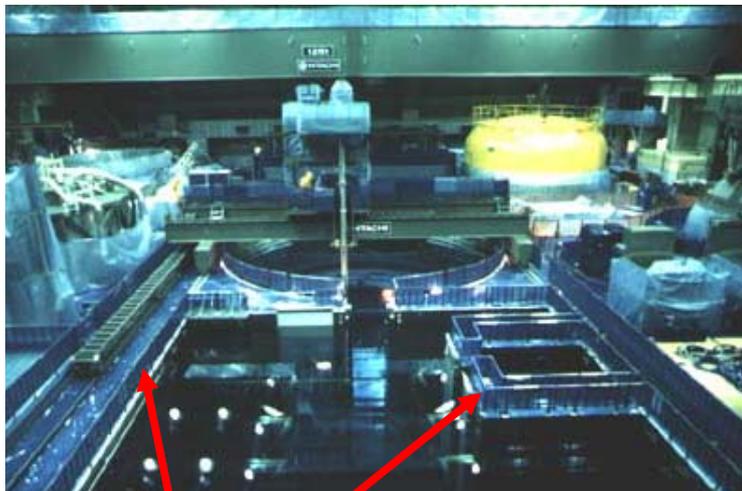
最大波高

$$d \max = 0.811 \frac{L}{g} \alpha$$

$\alpha$ ：固有周波数に対応する震度

## その他実施事項② 柵の設置

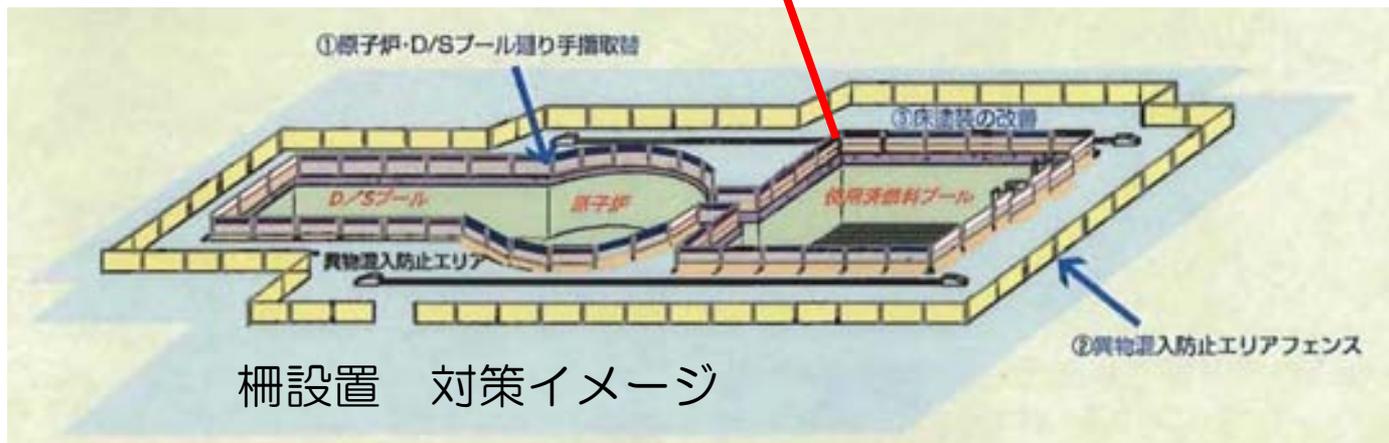
- 使用済燃料貯蔵プールからの溢水量を低減させるための柵を設置（地震時の水圧に対する強度を適切に考慮）



従来は手摺りのみ

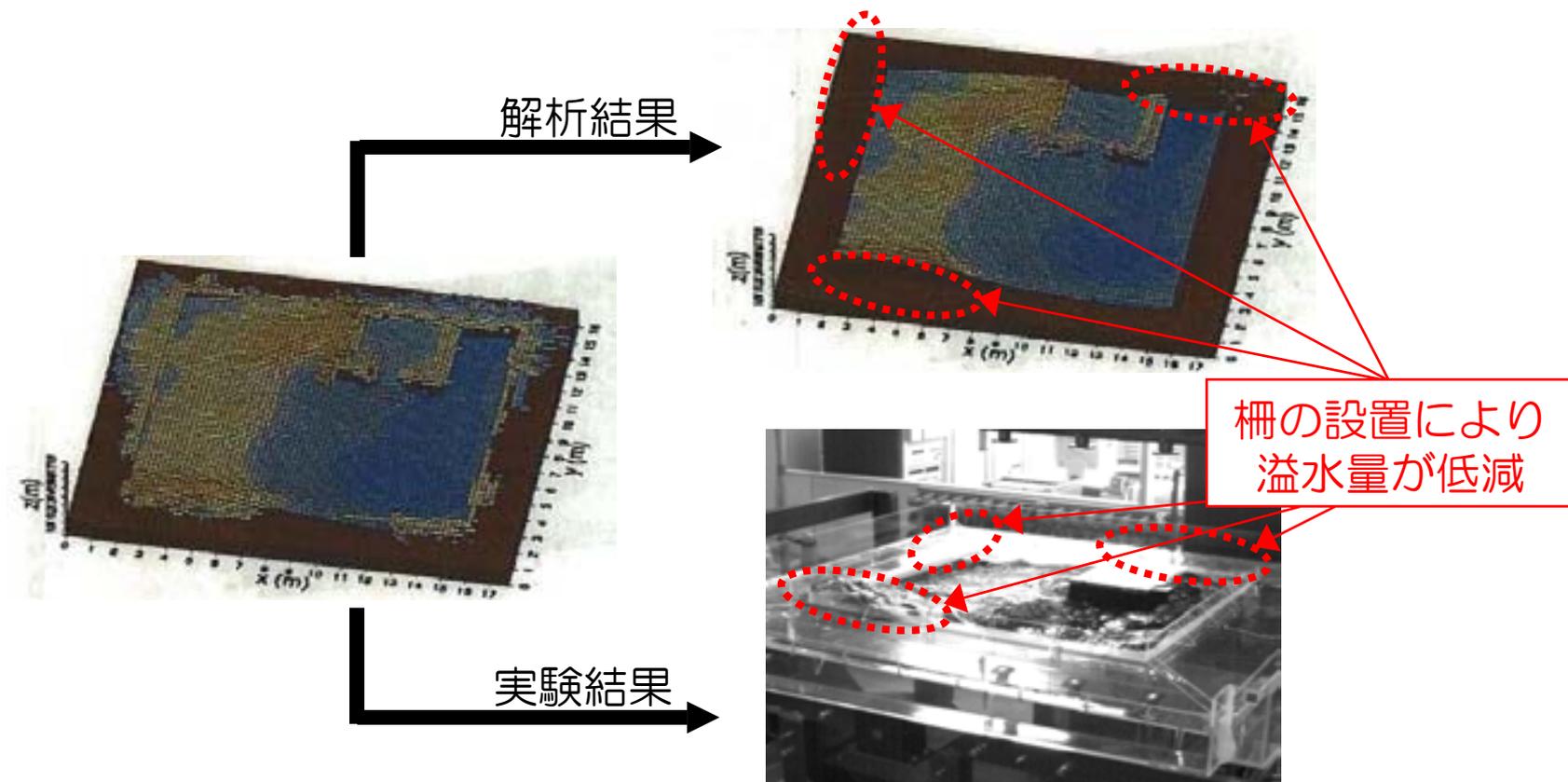


柵を設置し溢水量を低減させる



## その他実施事項② 柵の設置（有効性確認）

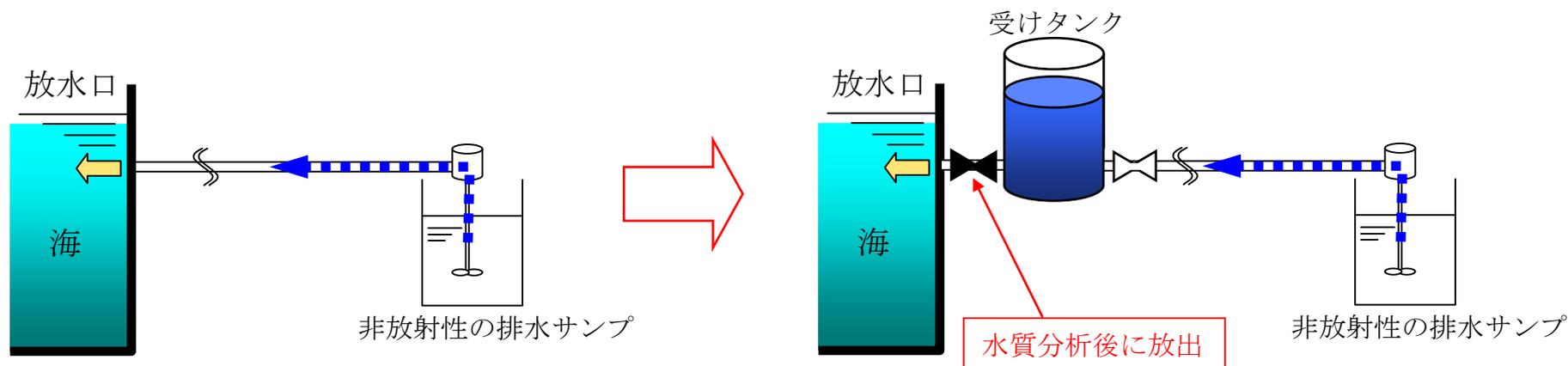
- （財）電力中央研究所によるスロッシング事象の解析の結果および当社研究所における加振実験から柵の有効性を確認



溢水量が1～3割程度に低減できるとの評価結果が得られた。

## その他実施事項③ ドレンの放射能測定

- 非管理区域ドレンについて、放射性物質混入の恐れが否定できるものを除き、念のために一旦タンクで受け、放射能測定を行った後、放出する運用に変更



非管理区域ドレンには、放射性物質が混入することは基本的にはないが、今回の事象に鑑み、空調凝縮水等で放射性物質の混入が否定できるものを除き、非管理区域からの排水についても念のために一旦タンクで受け、放射能測定を行った後、放出する運用に変更

# 6号機 原子炉建屋天井クレーンを 駆動させる軸の継手の破損について

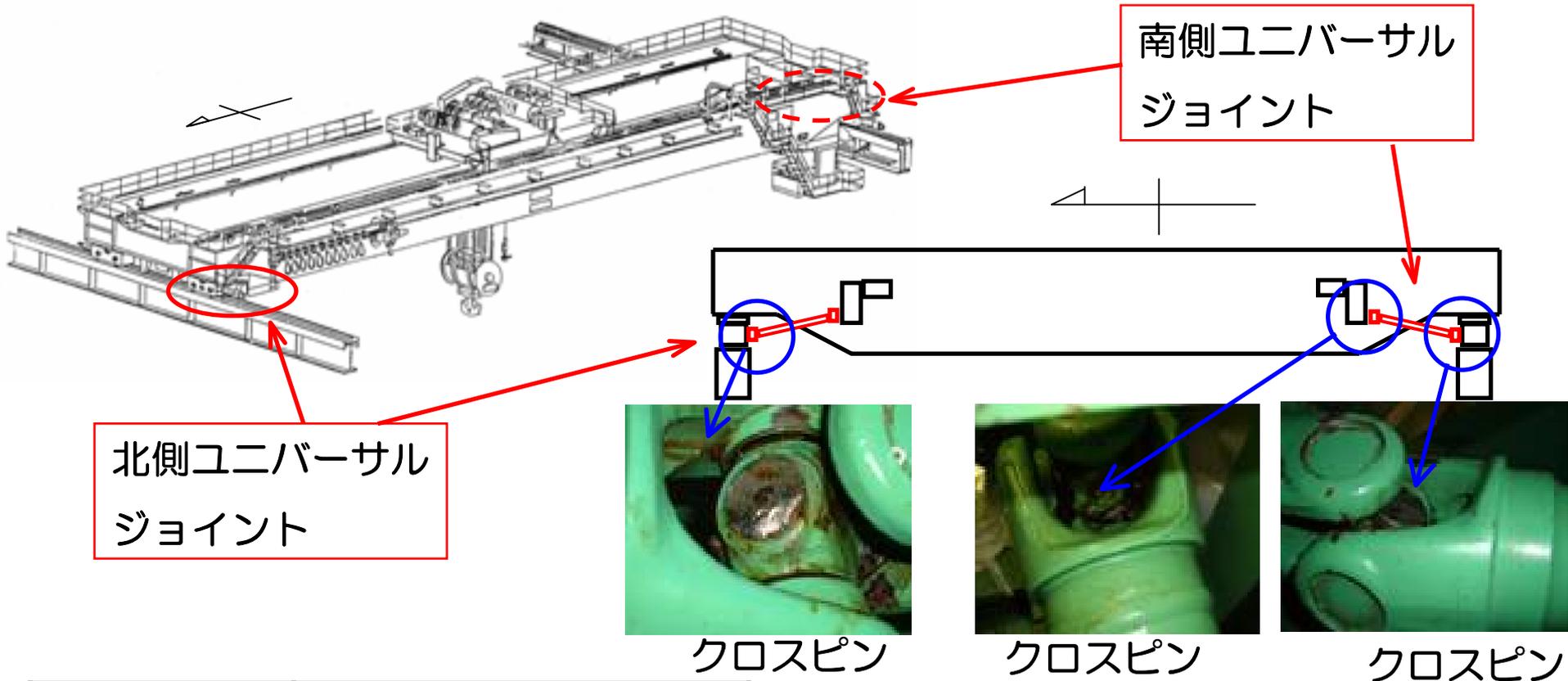
平成20年9月  
東京電力株式会社



東京電力

---

# 事象の概要 (1 / 2)



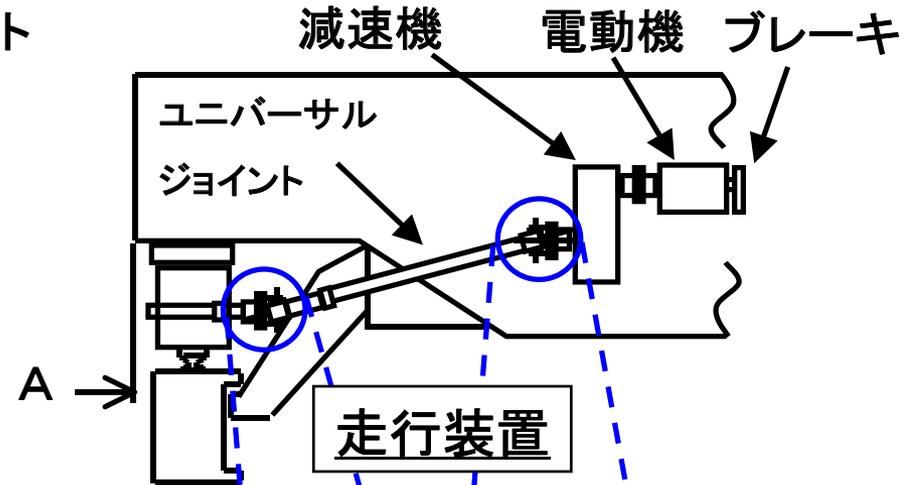
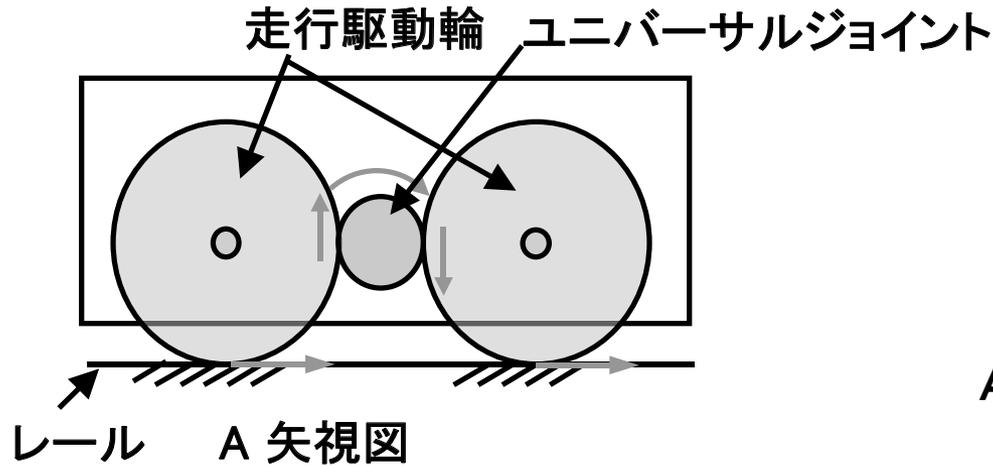
ユニバーサルジョイント	クロスピン	状態
北側	車輪側	×
	電動機側	○*
南側	車輪側	×
	電動機側	×

○ : 正常

× : 異常

※目視点検に加え、浸透探傷検査を行い、指示模様が無いことを確認した

# 事象の概要 (2/2)



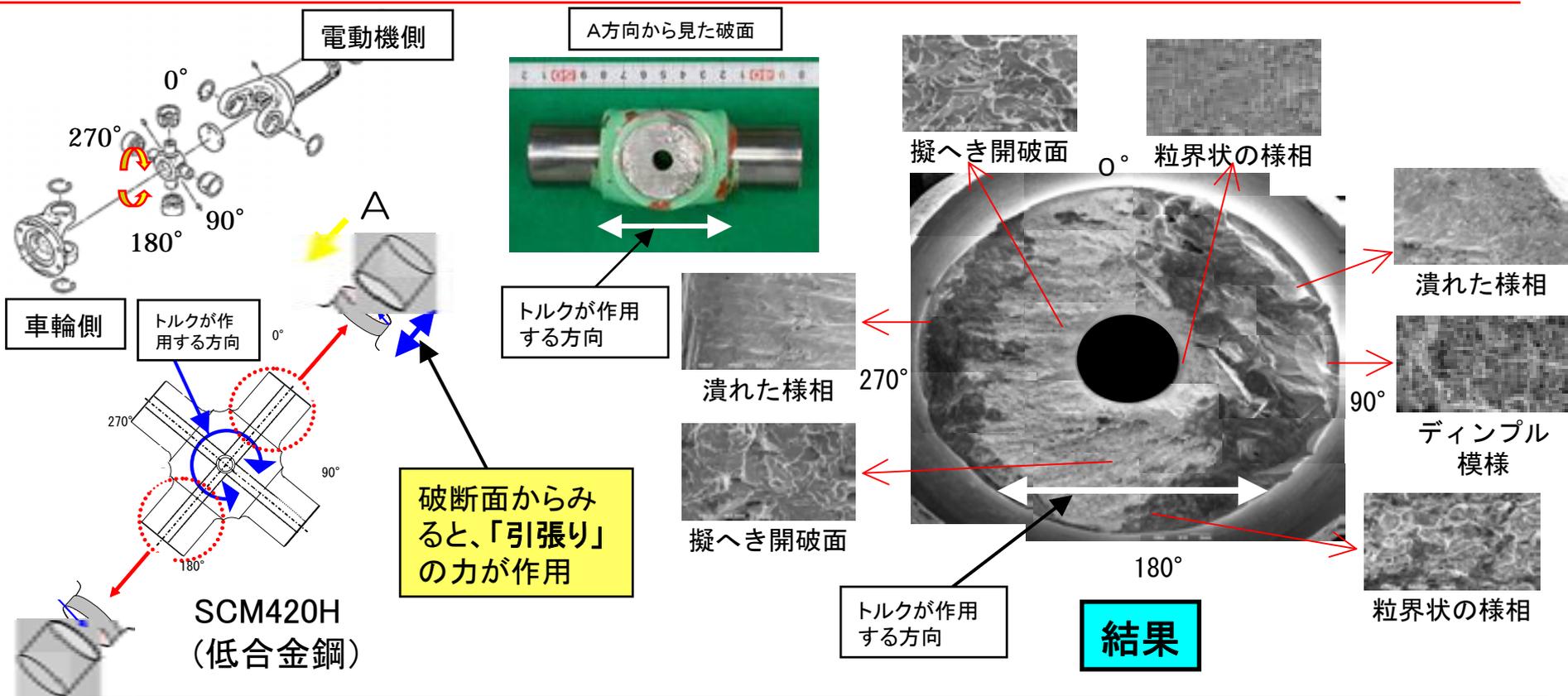
電動機側

走行車輪側

クロスピン  
(破損箇所)

A detailed diagram of a cross pin, which is a component of the universal joint. A blue dashed line points from the cross pin to the damaged area in the universal joint assembly shown in the photograph.

# 調査結果



破断面同士が接触したことによるものと考えられる「潰れ」が多いが、破面の大半は若干の延性破面が混在した擬へき開破面\*1であった。

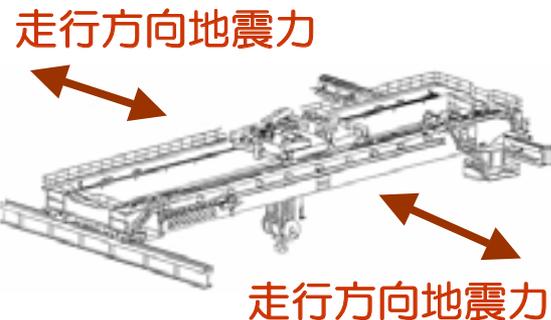
また、延性破断の様相を示すディンプル\*2模様が認められた。これらより今回の破断はいずれも大きな荷重が負荷されたことによるものと判断される。

\* 1 : 擬へき開破面 : 若干の塑性変形を伴った過大荷重等により脆性的に破壊が生じた際に見られる破面形態。

\* 2 : ディンプル : 多数の凹みが観察される、延性破面のミクロ的特徴

# 推定原因

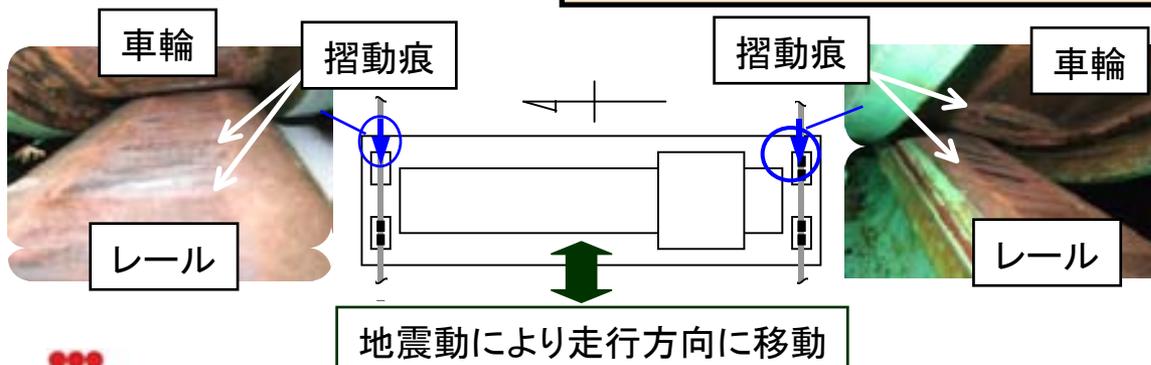
地震発生時、原子炉建屋天井クレーンは停止している状態であり、走行車輪はブレーキ（電動機側に設置されている）が掛かっている状態であった



地震動により、原子炉建屋天井クレーンの走行車輪にブレーキが掛かった状態で、強制的にクレーンの走行方向（東西方向）の力が発生した。

クレーンの走行方向（東西方向）の力により走行車輪に回転しようとする力が作用したが、電動機側の回転を阻止する力（ブレーキ）の相反する作用により、走行車輪と電動機の間位置するユニバーサルジョイントに過大なトルクが発生し、クロスピンが破損した。

走行車輪、レール



解析により地震時の  
挙動を評価する

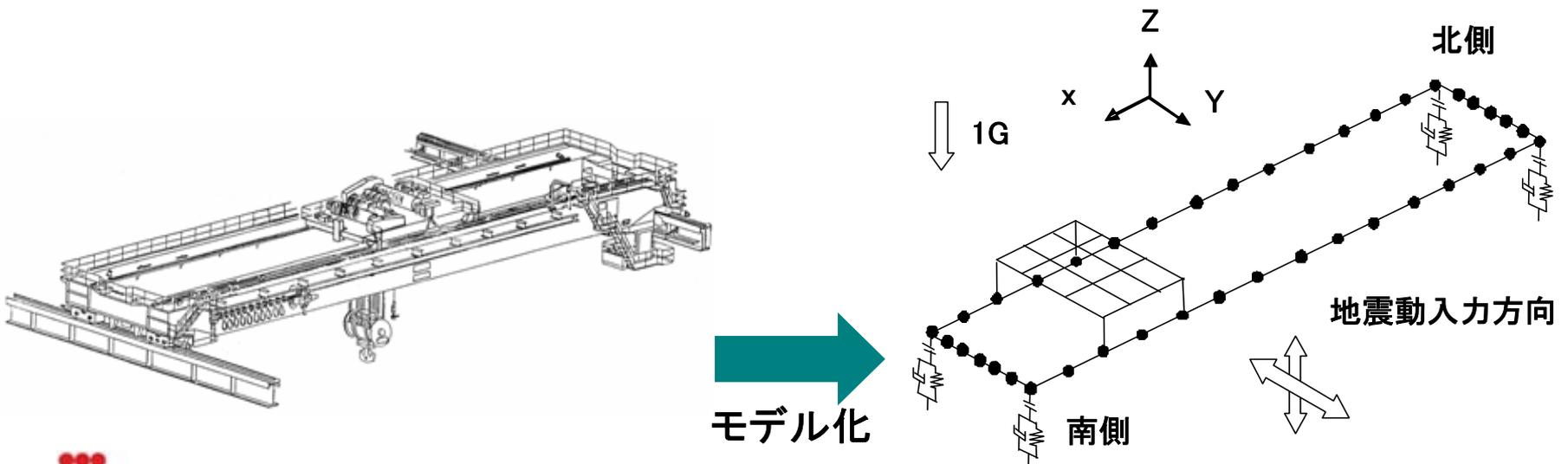
# クレーンの地震時挙動解析

## ■目的

クレーンの地震時挙動を解析で再現し、損傷箇所に発生した応力を評価する

## ■解析条件

- クレーン本体は、梁要素と集中質量でモデル化
- トロリ位置については、地震発生時のトロリ位置（南側）とする
- 地震応答解析は走行方向と上下方向の2方向同時入力



# 解析結果

	6号機	
	北側駆動輪	南側駆動輪
クレーン自重[kg]	310000	
車輪部摩擦係数※ <sup>1</sup>	0.11	
駆動軸に生じるトルク[N・m]	30390	34810
破断位置での発生応力[MPa]	<u>1520</u>	<u>1741</u>
損傷部材の引張強度[MPa] ※ <sup>2</sup>	1017	
材料引張強さ[MPa] (JIS)	930以上	

※<sup>1</sup>：既往研究により  $\mu = 0.11 \sim 0.32$ （摺動面が荒れていない場合は  $\mu = 0.11 \sim 0.15$ ）

※<sup>2</sup>：損傷した北側駆動輪のクロスピンから得られた試験片に対する引張試験により確認

解析により、破断位置において材料の強度を上回る応力が発生したことを確認

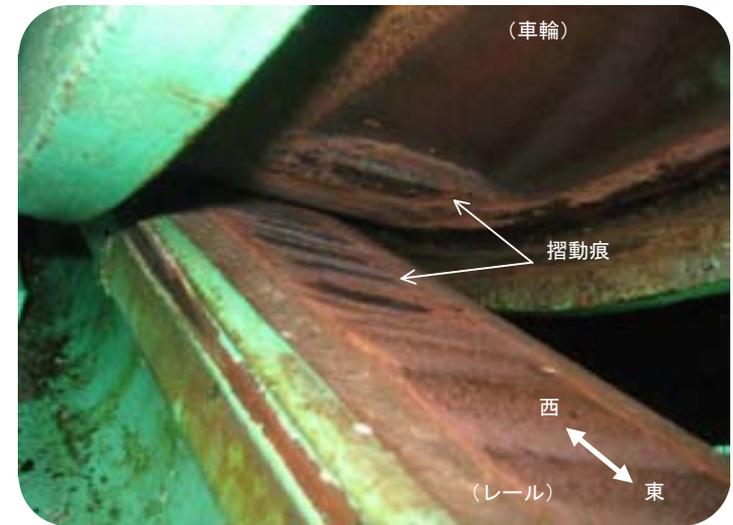
# 解析結果の評価

## ■ 解析結果の評価

解析結果より、6号機の破断位置（ユニバーサルジョイント）において、引張り強さを上回る応力が発生しており、地震動による過大な荷重により損傷したことを示す解析結果となった。

## ■ 解析の検証

- 現場調査の結果、走行レールと走行車輪にクレーン自体が強制的に移動したと思われる擦動痕が約30cmに渡り確認されている。



南側走行従動輪摺動痕

- 今回の解析結果では、想定移動距離が約50cmであり、実態と同程度の値となった。

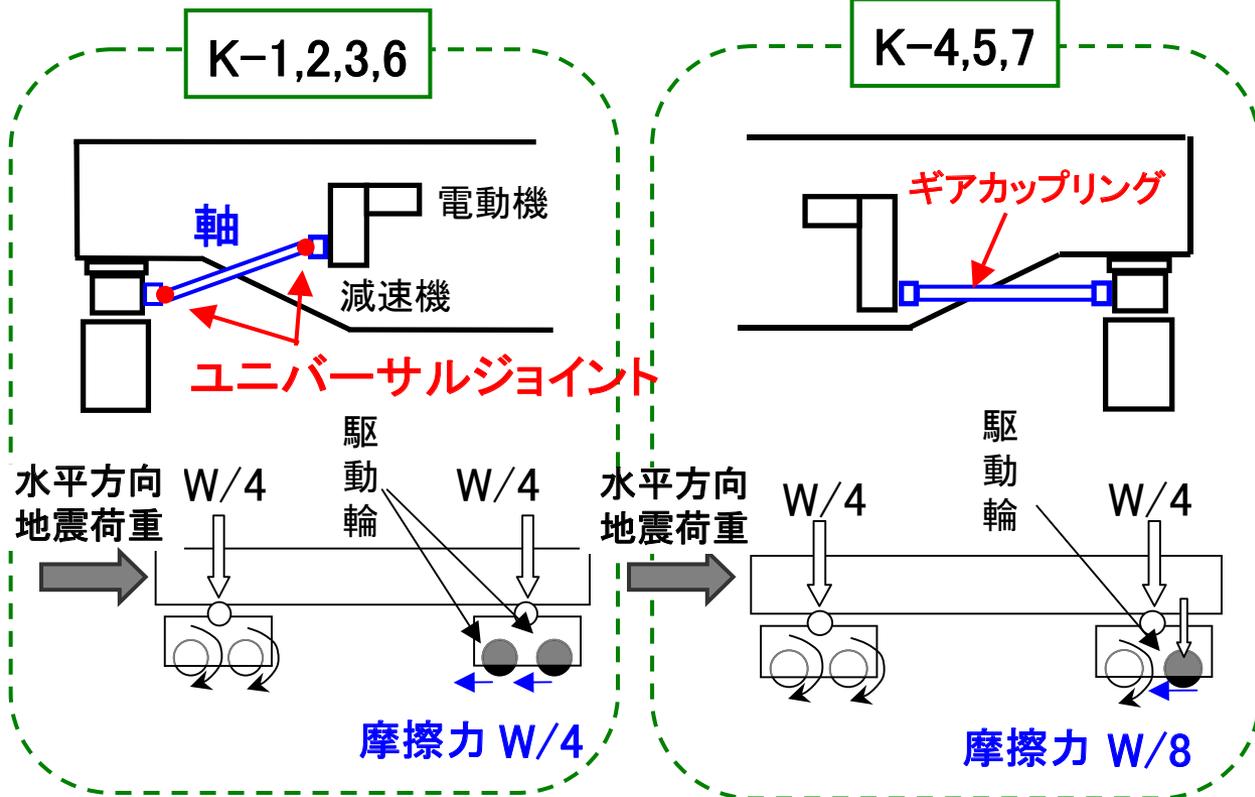
# 他号機との構造上の違い

接続部にユニバーサルジョイントを使用している

K1,2,3,6号機は駆動側と車輪側の接続部に構造上応力が集中するユニバーサルジョイントを使用している。

1軸で2車輪を駆動している

2車輪を駆動させるK1,2,3,6号機の軸は1車輪を駆動させるK4,5,7号機の軸に比べ約2倍のトルクを受ける。



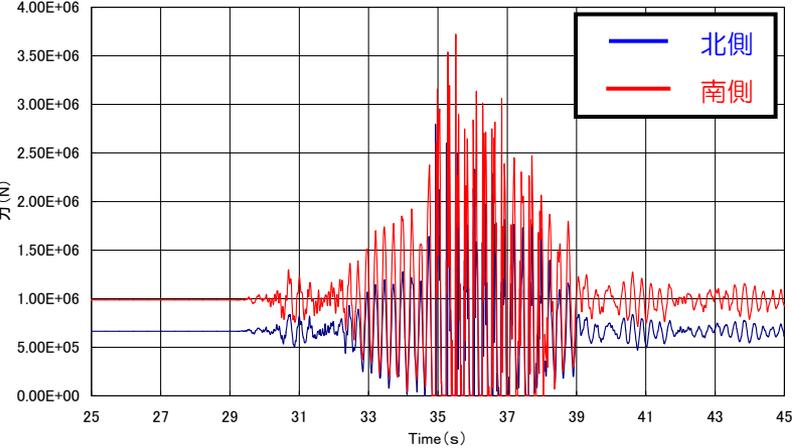
構造上の違いにより

K1,2,3,6はトルクに対して比較的弱い部位（ユニバーサルジョイント）が存在する

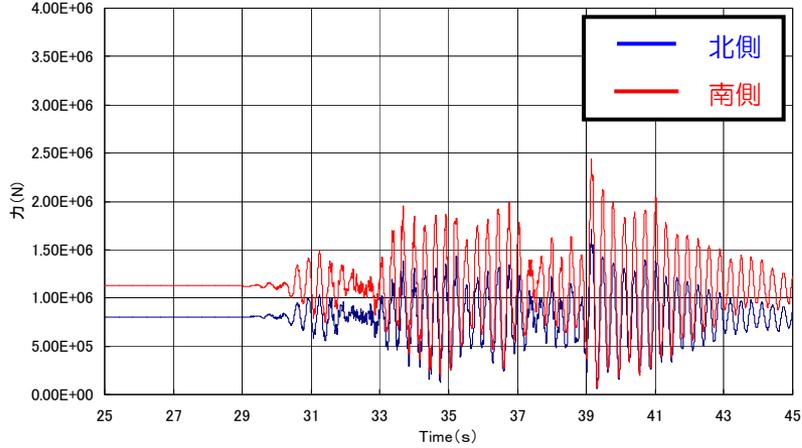
K1,2,3,6の車輪駆動軸はK4,5,7よりも強いトルクを受ける

# 解析結果 (1 / 2) 車輪に発生する下向き押付力

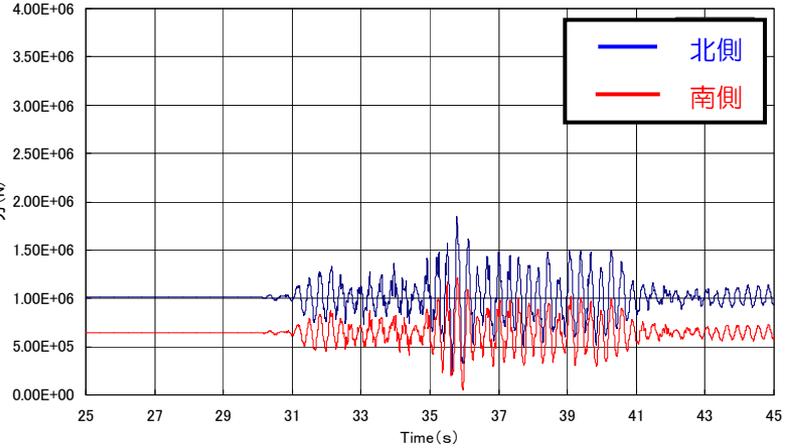
## K6



## K1



## K2



K6はK1,2よりも下向き押付力が大きい



車輪にかかる摩擦力が増加  
 $\text{摩擦力} = \text{摩擦係数} \times (\text{荷重} + \text{下向き押付力})$



水平方向により駆動軸に想定以上のトルクが発生した

# 解析結果（2 / 2） 損傷箇所が発生応力

	6号機		1号機	2号機
	北側駆動輪	南側駆動輪	南側駆動輪※ <sup>1</sup>	北側駆動輪※ <sup>1</sup>
クレーン自重[kg]	$3.1 \times 10^5$		$3.6 \times 10^5$	$3.2 \times 10^5$
下向き押し付け力 (N)	<u><math>3.25 \times 10^6</math></u>	<u><math>3.72 \times 10^6</math></u>	$2.44 \times 10^6$	$1.84 \times 10^6$
車輪部摩擦係数※ <sup>2</sup>	0.11		0.11	0.11
駆動軸に生じるトルク[N・m]	30390	34810	22840	17230
破断位置での発生応力[MPa]	<u>1520</u>	<u>1741</u>	910	862
損傷部材の引張強度[MPa] ※ <sup>3</sup>	1017			
材料引張強さ[MPa] (JIS)	930以上			

※<sup>1</sup>：発生応力が大きかった駆動輪側

※<sup>2</sup>：既往研究により  $\mu = 0.11 \sim 0.32$ （摺動面が荒れていない場合は  $\mu = 0.11 \sim 0.15$ ）

※<sup>3</sup>：損傷した北側駆動輪のクロスピンから得られた試験片に対する引張試験により確認

**6号機のみ破断位置に材料の強度を上回る応力が発生するという解析結果が得られた**

# まとめ（1 / 2）

## ■原因

新潟県中越沖地震を受けて6号機の原子炉建屋クレーンユニバーサルジョイントが損傷した原因は以下の通りであることを確認した。

- 車輪にブレーキがかかった状態で走行方向の荷重が載荷された
- 上下方向地震動により想定以上の摩擦力が働き駆動軸に過剰なトルクが発生した
- 構造上、K1,2,3,6 は K4,5,7よりも駆動軸の発生トルクが大きくなり、K6はK1～K3より上下方向地震動が相対的に大きかったと考えられる

# まとめ（2 / 2）

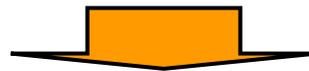
## ■ 耐震設計技術指針との適合性

原子力発電所耐震設計技術指針（JEAC4601・補-1984）における、原子炉建屋クレーンの設計要求は以下の2点であり、本事象は、設計要求を逸脱する事象ではないことを確認した。

- 耐震Bクラス設計である
- クレーンが基準地震動 $S_1$ に対し落下しない

## ■ 対策

- ユニバーサルジョイント部については、走行機能を目的としたものであり、ノンクラスで設計されている
- 当該部が損傷することで、発生応力が緩和され減速機や電動機等の重要部位の損傷が回避された側面がある
- 当該部損傷により、構造的に部品の落下する可能性はほぼ無いと考えられる



早期復旧の観点から、当該部品の予備品を確保する

# 柏崎刈羽原子力発電所7号機 蒸気タービン翼の接触事象に関する解析 結果について

平成20年9月25日



東京電力

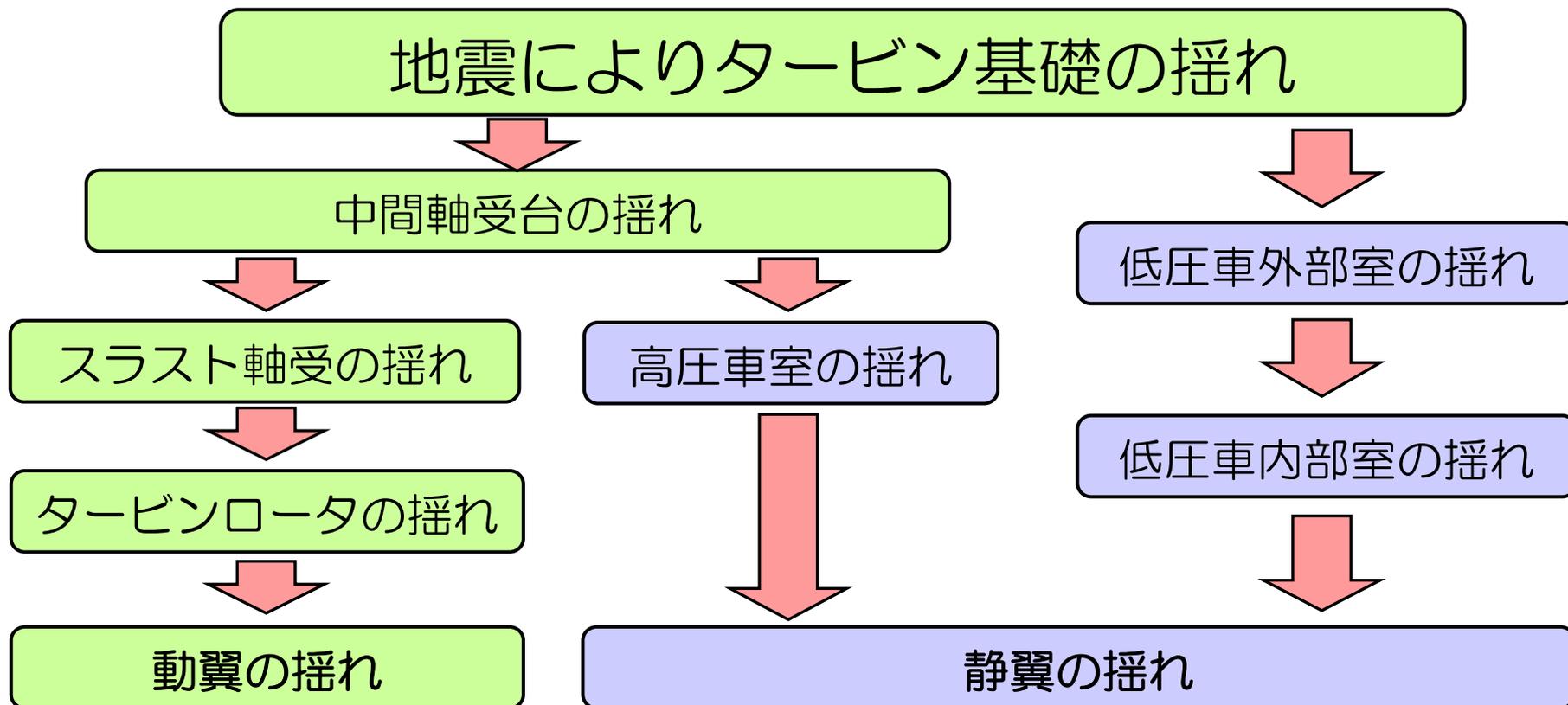
---

# 蒸気タービン翼接触の解析について

- ・新潟県中越沖地震発生時、柏崎刈羽原子力発電所 7号機は運転中であった。
- ・分解点検の結果、蒸気タービンの動翼と静翼に地震の影響と考えられる接触痕が確認された。
- ・蒸気タービンは静翼と動翼の接触を避けるため、各ロータはスラスト軸受けで軸方向を拘束し、さらに静翼と動翼間に間隙を設けている。
- ・蒸気タービンの地震の影響による接触に至るメカニズムをFEM解析により評価する。

# 動翼—静翼の接触の推定原因

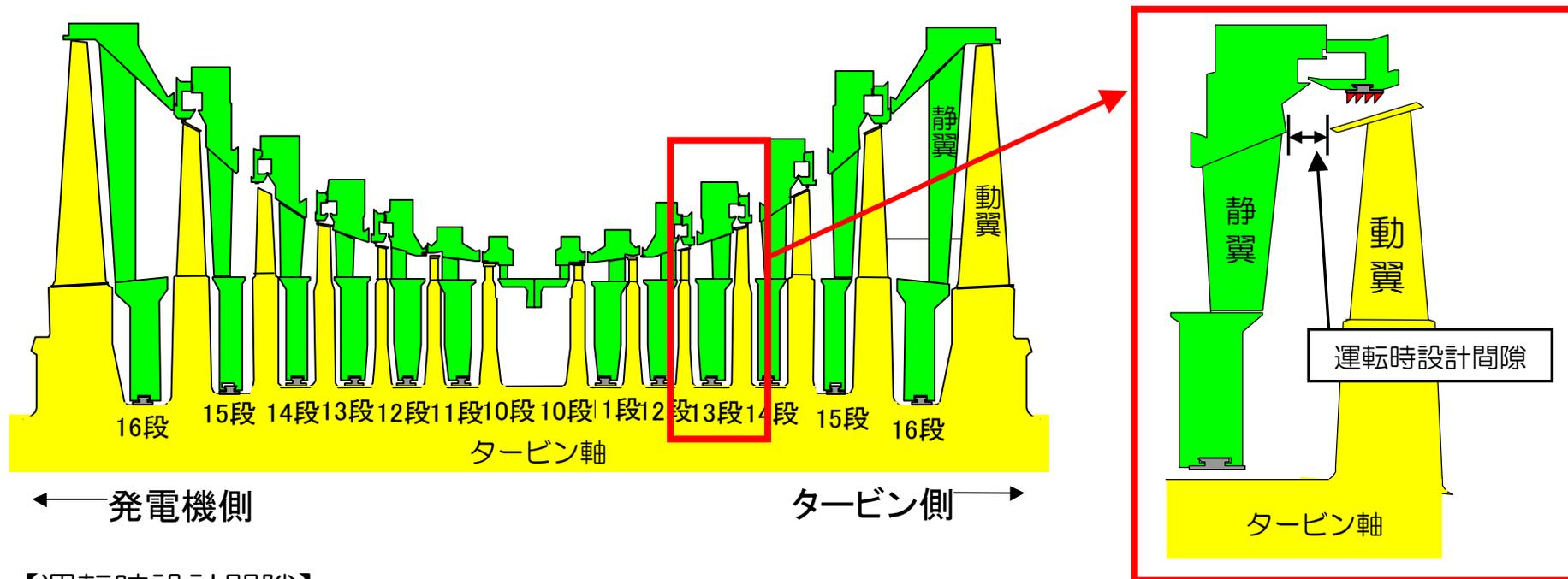
■ 蒸気タービンの接触の状況から以下のメカニズムが推定される。



上記のように動翼と静翼が揺れ接触した。

# 動翼—静翼の接触状況について

## 地震時、柏崎刈羽発電所7号機は定格熱出力運転中



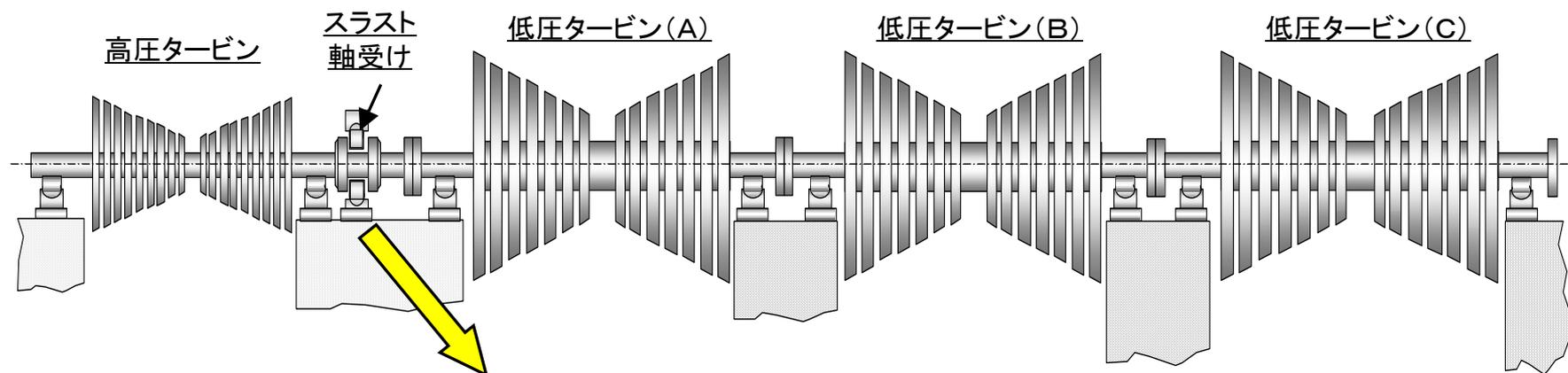
【運転時設計間隙】

- ・ 接触のあった高圧タービン（1～9段平均）→約3.5mm
- ・ 接触のあった低圧タービンA（10～12段平均）→約5.5mm

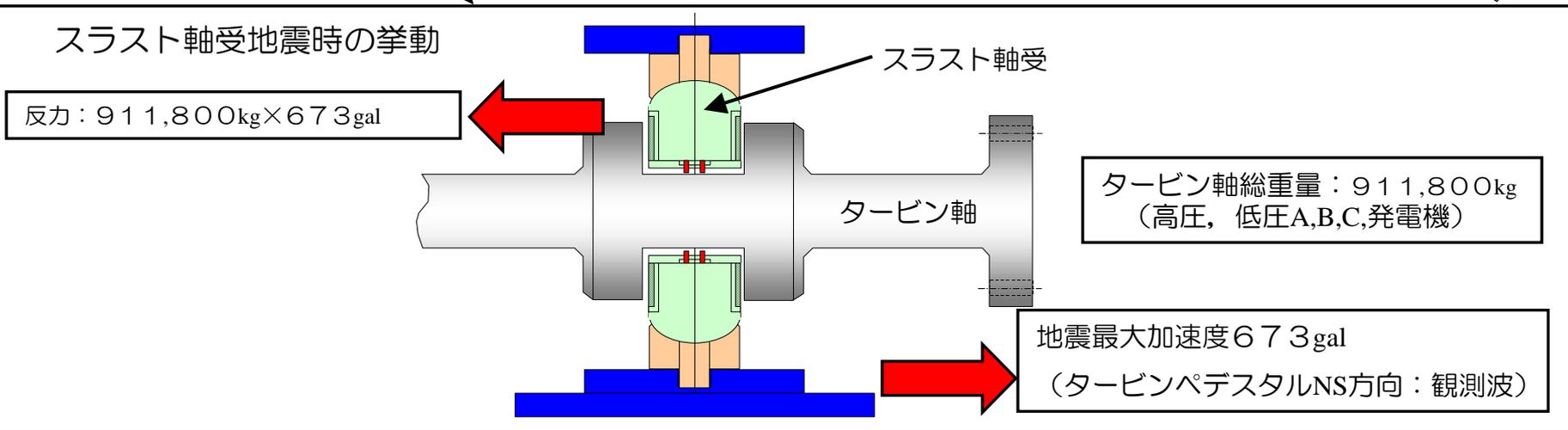
【7号機タービンペデスタルNS地震最大加速度（観測波）】

- ・ 673gal（軸方向）

# 7号機 動翼の変位に関する解析について

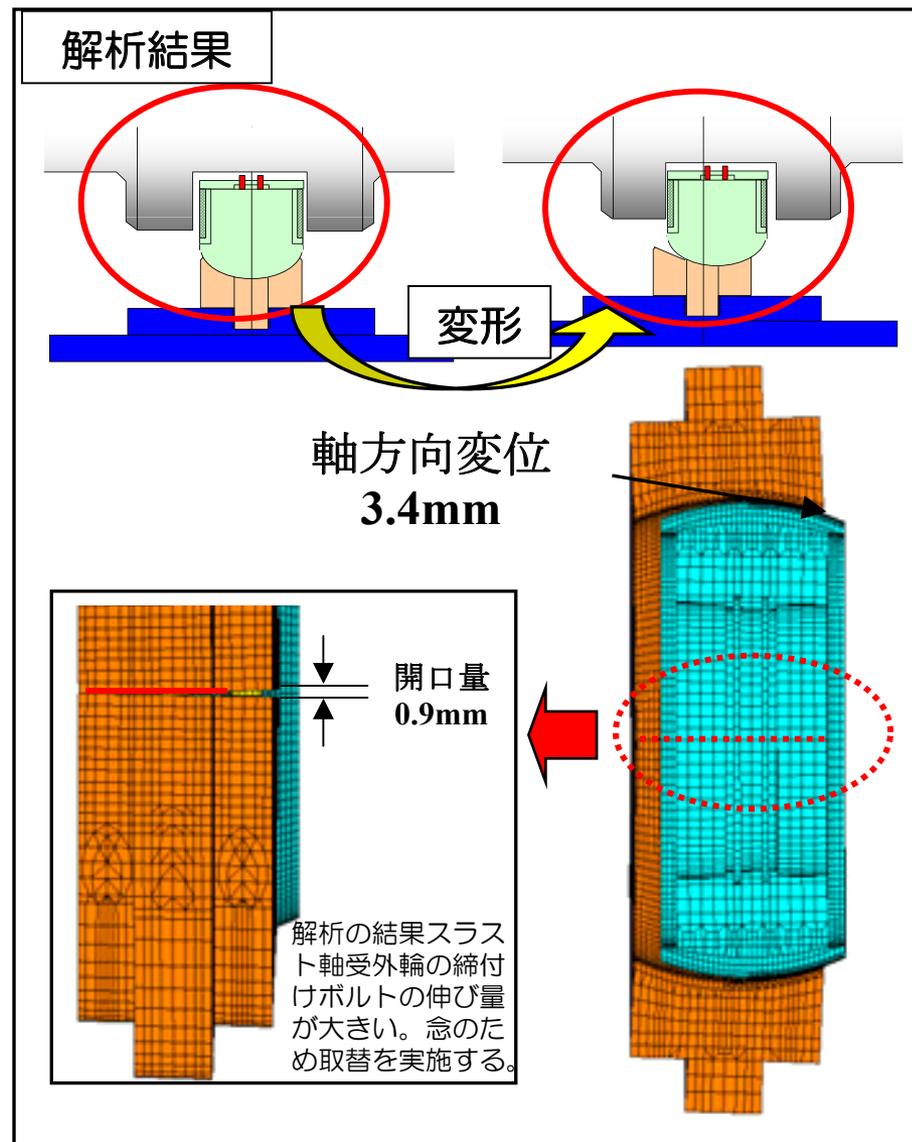
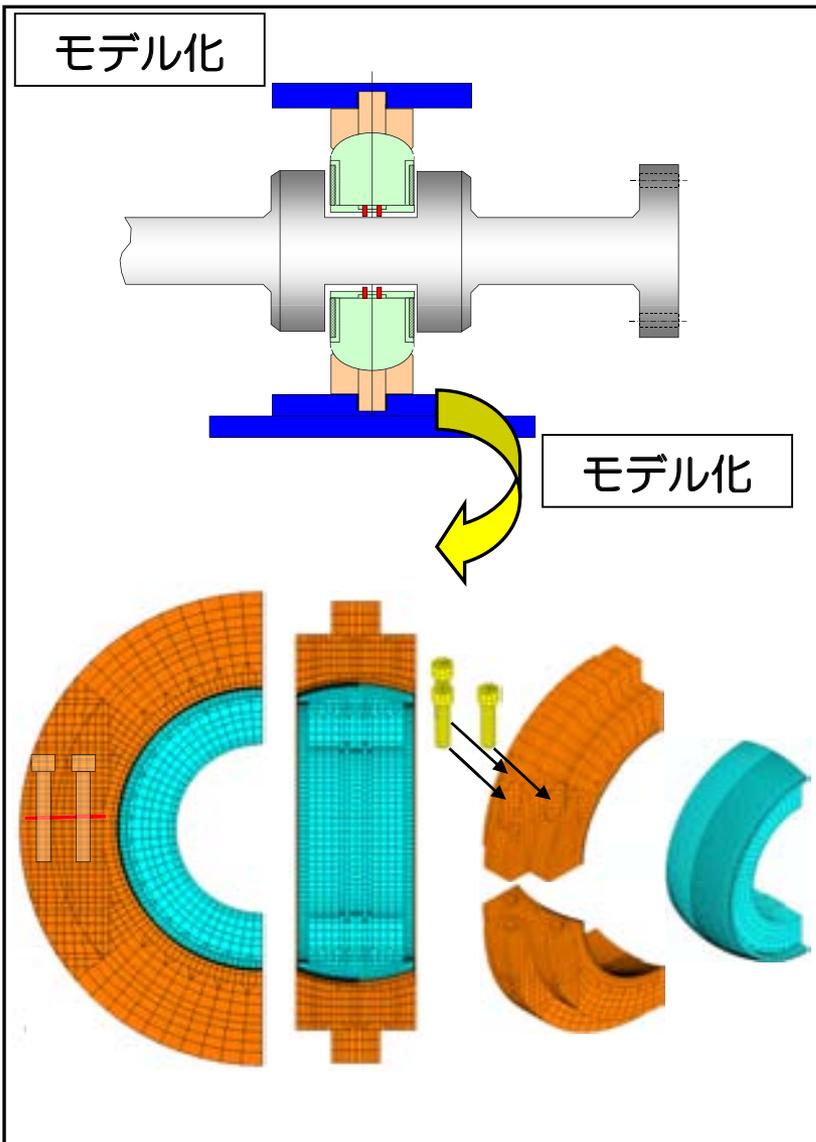


スラスト軸受け地震時の挙動



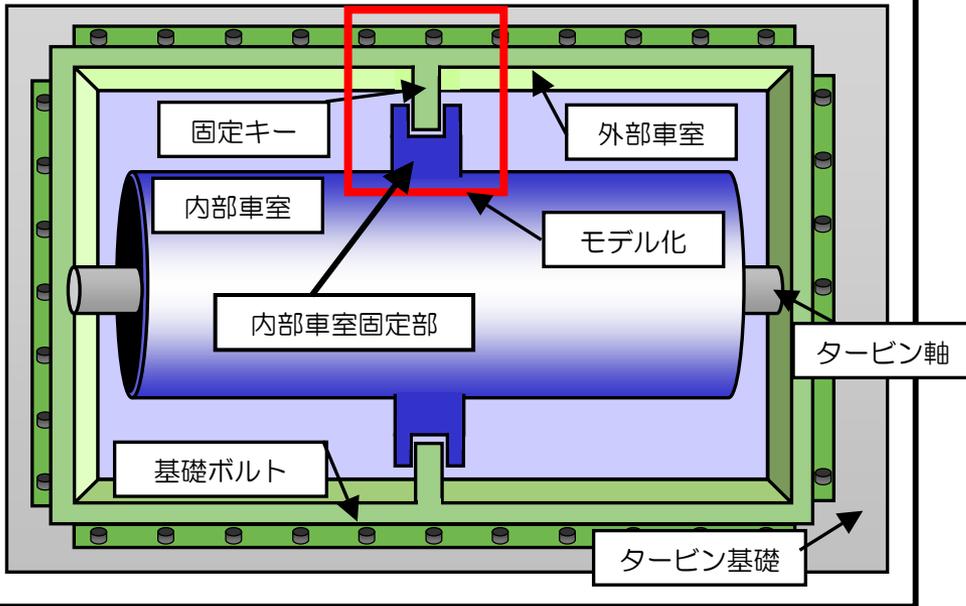
- ・ 7号機動翼（タービン軸）の変位はスラスト軸受け変形量により決まる。
- ・ スラスト軸受けは高圧タービンと低圧タービン（A）～（C），発電機ロータを含めた地震荷重を受ける。
- ・ 地震最大加速度に対するスラスト軸受けの挙動に対してFEM解析を実施

# 7号機 動翼の変位に関する解析結果 (スラスト軸受の変形)



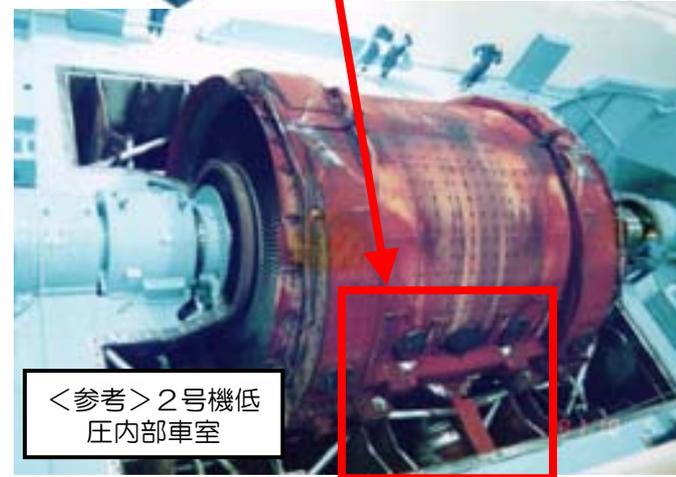
# 7号機静翼の変位に関する解析について

低圧タービン車室支持構造概略図(鳥瞰図)



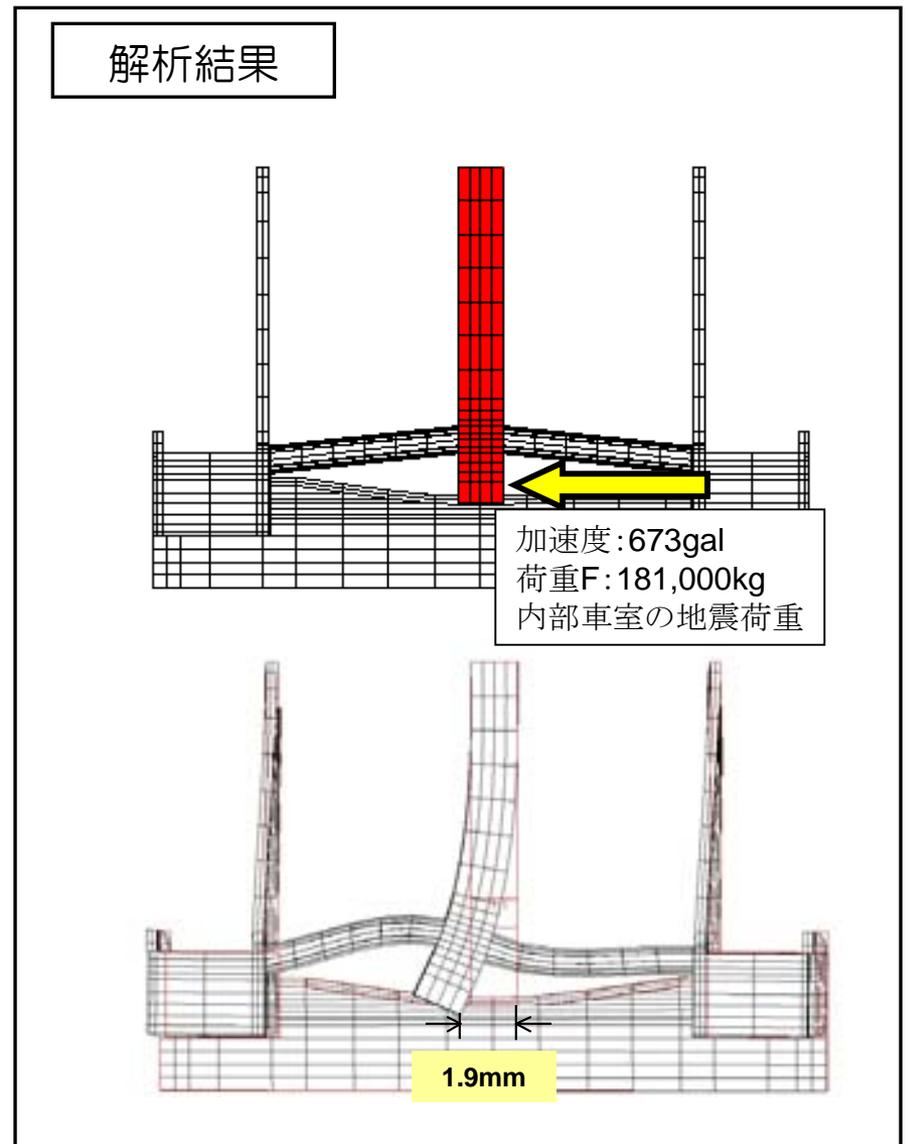
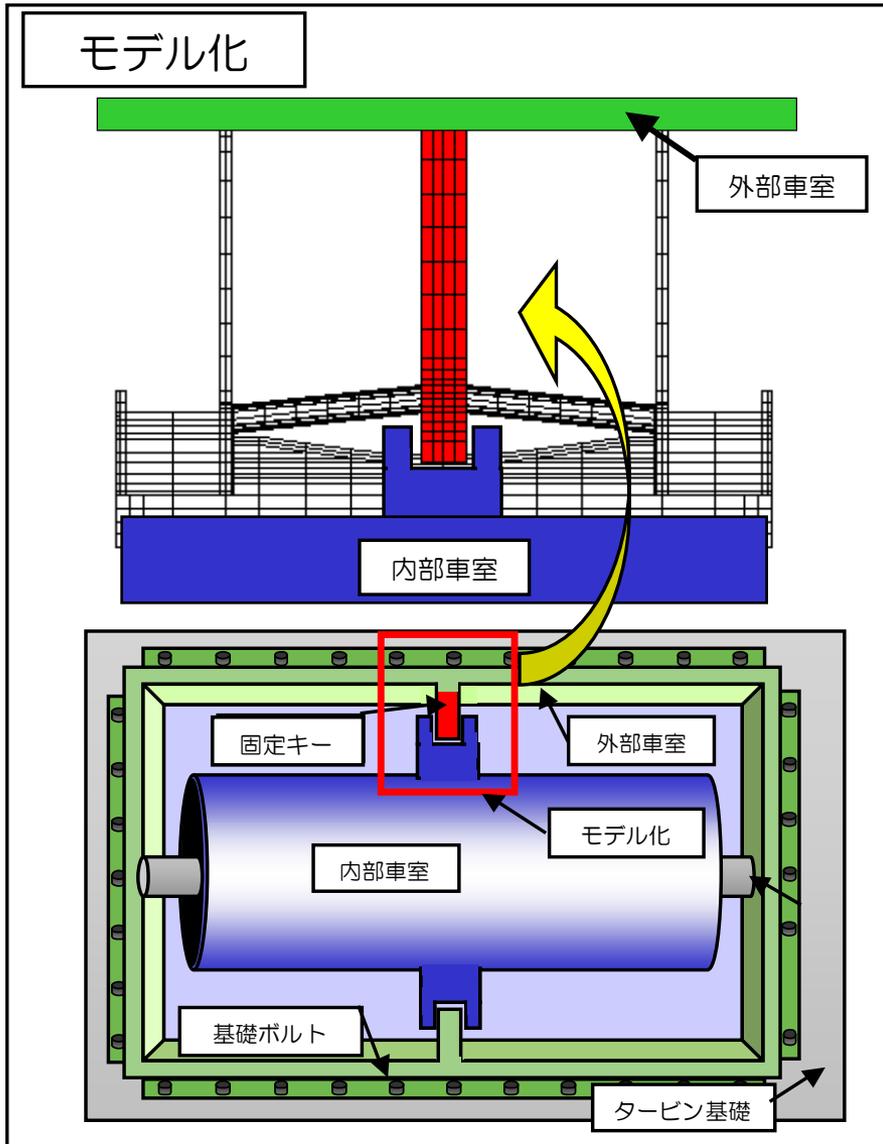
内部車室

内部車室(下半)



- ・ 内部車室は静翼を固定している。従って静翼は内部車室と一緒に揺れる
- ・ 低圧タービン静翼（内部車室）の移動量は固定キーの変形の寄与が大きい
- ・ 固定キーは低圧タービン内部車室の地震荷重を受ける
- ・ 地震最大加速度に対する固定キーの挙動に対してFEM解析を実施

# 7号機静翼の変位に関する解析結果 (内部車室固定キーの変形)



# 解析結果のまとめ及び評価

	運転時間隙 (mm)	解析結果(mm)		
		動翼の変位	静翼の変位	合計
		スラスト軸受の 変形の寄与	低圧内部車室キ一 変形の寄与	
高圧タービン翼の接触	約3.5	3.4	※1	3.4 <sup>※2</sup>
低圧タービン翼の接触	約5.5	3.4	1.9	5.3 <sup>※2</sup>

※1：高圧タービンの静翼はスラスト軸受と同じ基礎に固定されているため動翼との変位が発生しない。

※2：解析結果の合計は主な変位の寄与であって全ての変位の合計ではない。なお、スラスト軸受とロータ間隙は約0.3mmであり、解析結果には考慮していない。

- 地震時、静翼と動翼の間隙は運転時設計間隙からスラスト軸受、低圧内部車室固定キーの変形量（解析結果の合計）を差し引いた値となる。
- 解析の結果、スラスト軸受と低圧内部車室固定キーの変形量と静翼と動翼運転時の間隙がほぼ一致したため、スラスト軸受と低圧内部車室固定キーの変形が主な要因で翼が接触したものと考えられる。
- 主タービンの耐震計算時の加速度420gal（Bクラス）に対して今回の地震が673galと大きかったため翼が接触したと考えられる。
- 運転時間隙と解析結果を比較すると設計時の地震力420galに対しては今回接触に至った翼の移動量は約2/3になると考えられるため接触しないと考えられる。
- 今回の地震において接触事象により翼の折損はなかった。また、設計時においても翼の折損等により、燃料等の破損の可能性が非常に低いことを評価している。

# 3号機 主タービンの動解析について (変位の寄与が大きい部位の特定)

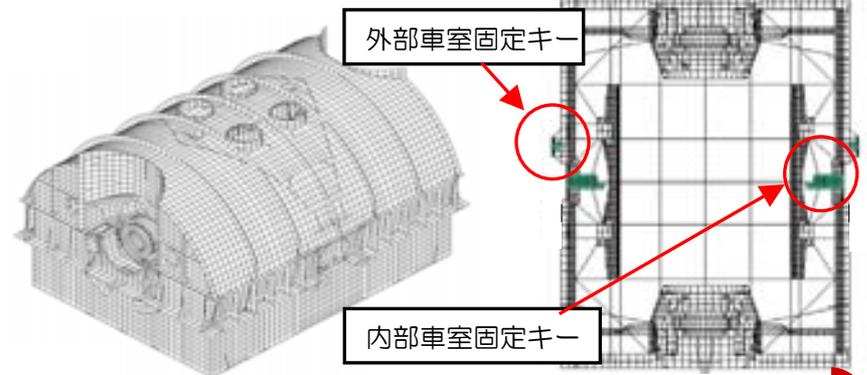
FEM解析より剛性を設定

- ・スラスト軸受, 中間軸受台
- ・低圧外部車室固定キー
- ・低圧内部車室固定キー

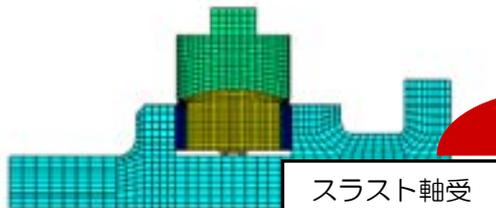


解析

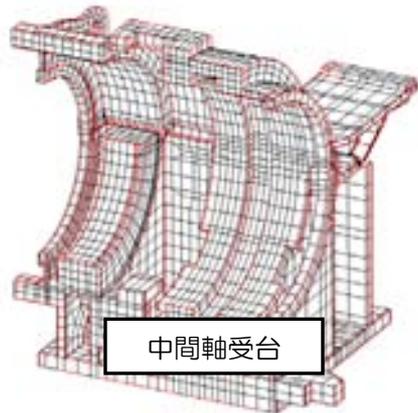
低圧内外車固定キーFEMモデル



スラスト軸受, 中間軸受台  
FEMモデル



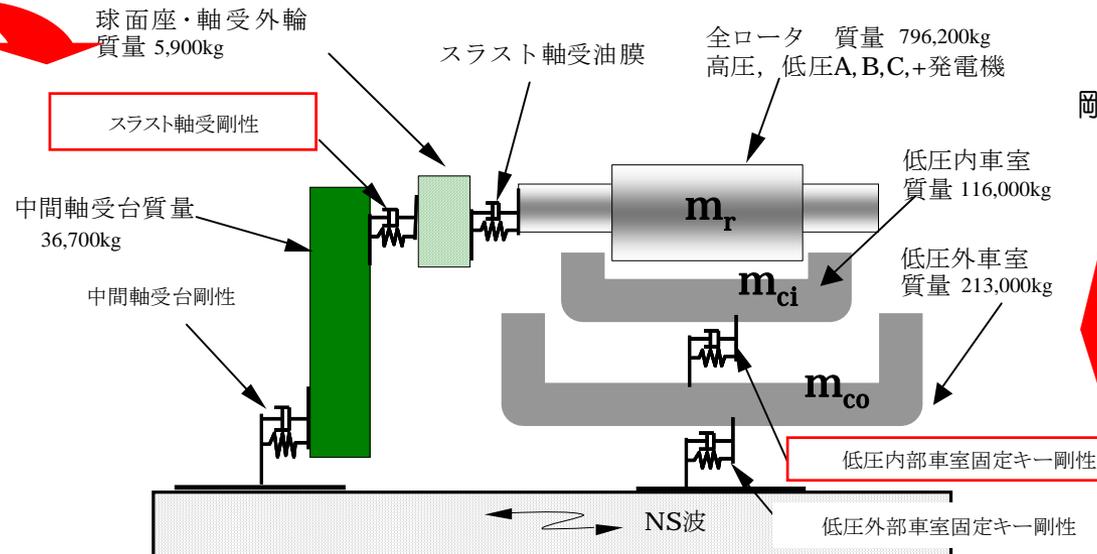
スラスト軸受



中間軸受台

剛性

主タービン動解析モデル

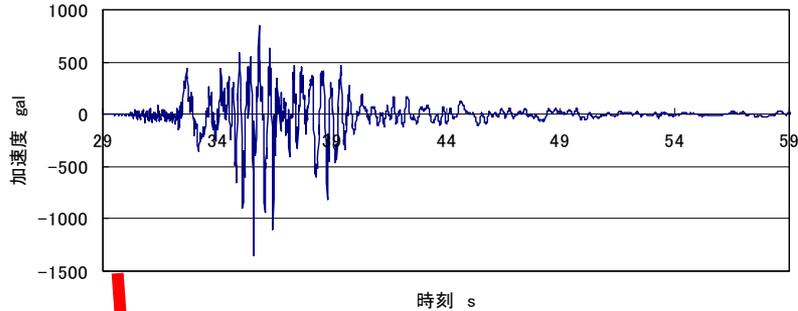


剛性

# 3号機 主タービンの動解析の結果 (変位の寄与が大きい部位の特定結果)

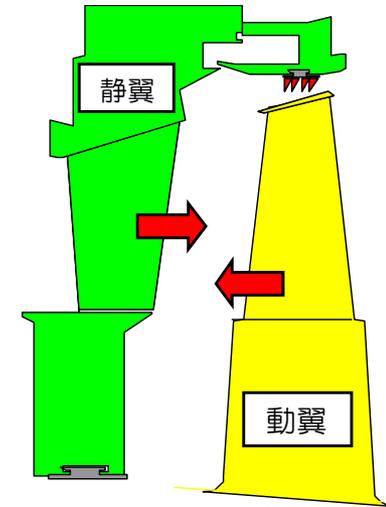
3号機タービン基礎台（ペDESTAL）観測波

・NS方向（最大加速度1350Gal）



3号機については運転していた他号機と比較して軸方向に最も大きな加速度をうけた。そこで、動解析を行った。結果、7号機と同様スラスト軸受けと内部車室固定キーの変形が主な要因であることが分かった。

動翼と静翼は11.9mmの相対変位の可能性がある。



最大7.1mm

最大4.8mm

NS波

# 低圧タービン動翼及び内部車室の解析結果について

タービン動翼及び内部車室自体の地震による変位について動的解析を実施し評価を行った。

<4号機ペDESTALNS方向観測波（最大加速度614gal）にて解析>

