

3. 2 タービン設備関連

3. 2. 1 地震によるトラブル概要

蒸気タービンロータは、70 トン～170 トン、発電機ロータは 220 トンという重量のロータが全長約 50mにわたり接続・配置され、毎分 1,500 回転の高速で運転されているもので、地震発生時に、回転体が受けた地震動は、それぞれのチャートに記録されており、確認できた。こうした地震動による回転体への影響が懸念されたが、これらについては次ページ以降に示すように、概ね良好な状態に維持され、安全に停止されたことが確認できた。

蒸気タービンについては、表-1 に示すように、運転中および起動中の蒸気タービンの地震発生時に於ける地震動の影響は予想外に小さく、軽微な接触痕及び摩耗が見られる程度で、運転停止作業に支障を来たすような不具合はなかった。

詳細点検が始まった 7 号機の低圧タービン 14 段の植込み部のフォーク部の破損が発見され、原因調査が続けられている。4 月 17 日現在の状況を (6) 項で紹介する。また、7 号機の間軸受台の基礎コンクリートにひび割れが目視で見つかっており、今後、ケーシングを吊上げ、基礎コンクリート及びボルトの詳細調査を行うことになっている。更に、複水器の基礎ボルトにも損傷が確認されており、現在詳細調査中である。

表-3.2.1 タービン内部の点検状況¹⁾

	高圧タービン	低圧タービン(A)	低圧タービン(B)	低圧タービン(C)
1号機 (定検中)	地震発生時 開放状態	地震発生時 開放状態	地震発生時 仮組込状態 軽微な接触痕有り	地震発生時 開放状態
2号機 (起動中)	軽微な 接触痕有り	軽微な 接触痕有り	順次点検を実施	
3号機 (運転中)	軽微な 接触痕有り	摩耗箇所有り		
4号機 (運転中)	軽微な 接触痕有り	摩耗箇所有り		
5号機 (定検中)	軽微な 接触痕有り	軽微な 接触痕有り		
6号機 (定検中)	軽微な 接触痕有り	軽微な 接触痕有り		
7号機 (運転中)	軽微な 接触痕有り	摩耗箇所有り	摩耗箇所有り 動翼フォーク部一部破損 (点検中)	軽微な接触痕有り 動翼フォーク部一部破損 (点検中)

(東京電力(株)提供)

3. 2. 2 機器別被害概要について

(1) 運転中の3、4、及び7号機の高圧タービン動静翼の接触痕の状況

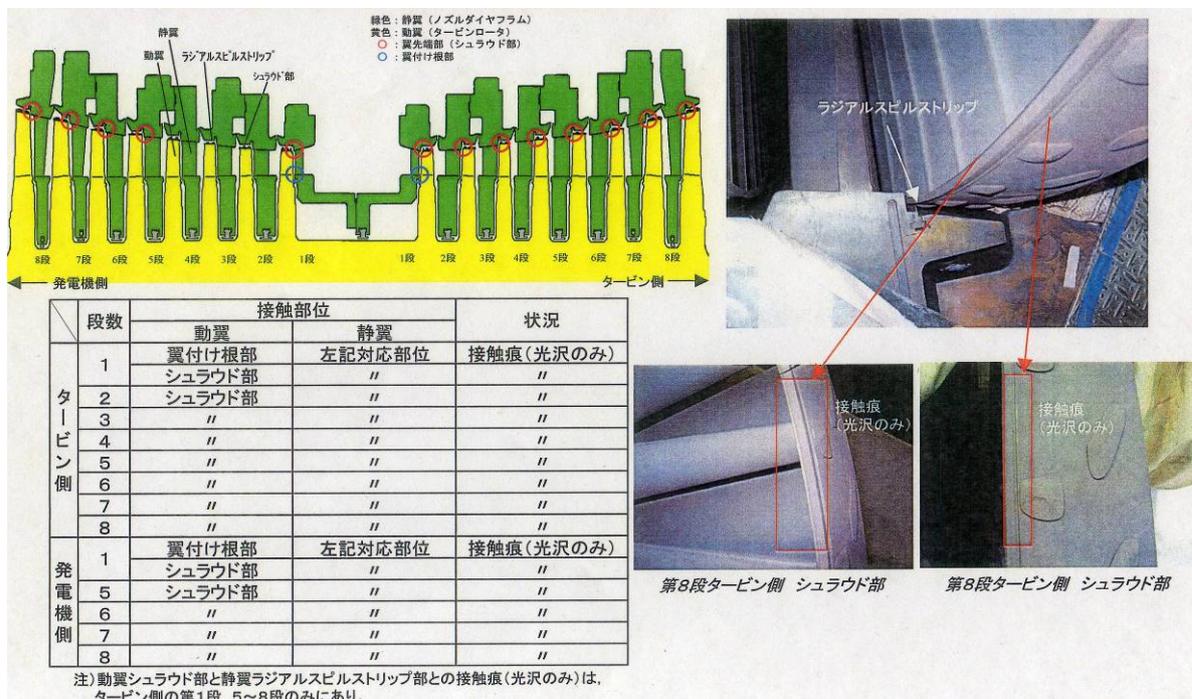


図-3.2.1 代表例として4号機の高圧タービン動静翼の接触痕状況²⁾ (東京電力(株)提供)

タービン建屋のクレーンの点検が終了し、大型重量物を移動できるようになり、タービンの分解点検が可能となった。3号機から、ケーシング内部状況確認が始まり、4号機、7号機と順次進められた。上記の図は、ケーシング内部状況確認時の4号機の例を示す。

震度6強の地震動にかかわらず、動翼と静翼の接触の程度は軽微であり、機能・振動防止等へ影響するものではないが、念のため今後の詳細点検時に非破壊検査を実施する予定とのことである。尚、他の3号機及び7号機についても同様であり運転停止や機能上に影響を与えるような不具合は見つかっていない。

また、7号機からタービンケーシング内部の詳細点検が始まり、内部ケーシング、ロータ、動静翼、ラビリンスパッキンなどの状況が把握できるようになった。

(2) 運転中の3、4、及び7号機の低圧タービン (A)、(B)、(C)動静翼の接触痕の状況

運転中の7号機、3号機、4号機のタービンケーシングの内部状況の確認が開始され、その後、7号機の高圧、低圧A, B, C ケーシングが詳細点検のため、順次分解点検された。7号機では、平成20年3月3日に低圧タービンCケーシングの第14段の動翼の植込フォーク部に破損が見つかった。破面の観察より、表面には金属疲労を原因とする場合に特徴的に見られるビーチマーク（縞状の模様）を確認している。今後、更に原因究明を実施する予定（詳細は(6)項目で説明）。

3号機及び4号機では、動翼の先端部（湿分分離翼部）と付け根部に接触し、摩耗（最大4~6mm）したと思われる部分が確認され、7号機でも同様に湿分分離翼先端部と付け根部に接触摩耗した部分が確認されている。

次に、各号機のAケーシングの内部点検結果を示す。

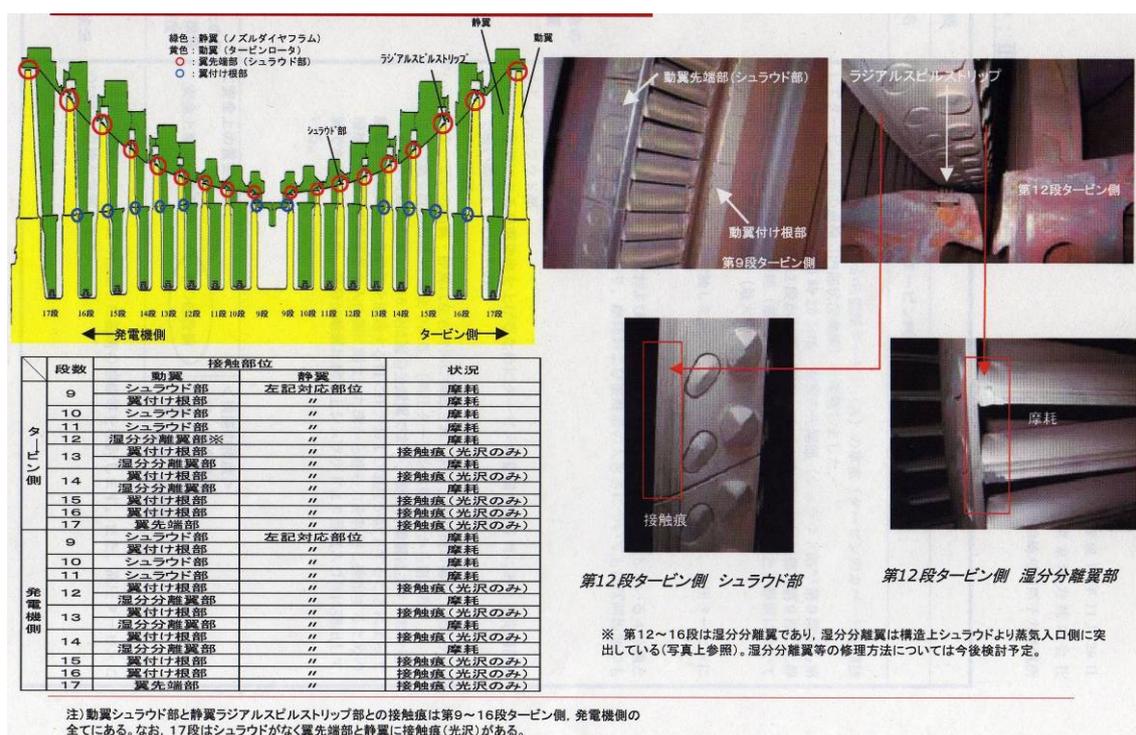


図-3.2.2 3号機の低圧タービンAケーシングの動静翼の接触痕状況³⁾ (東京電力(株)提供)

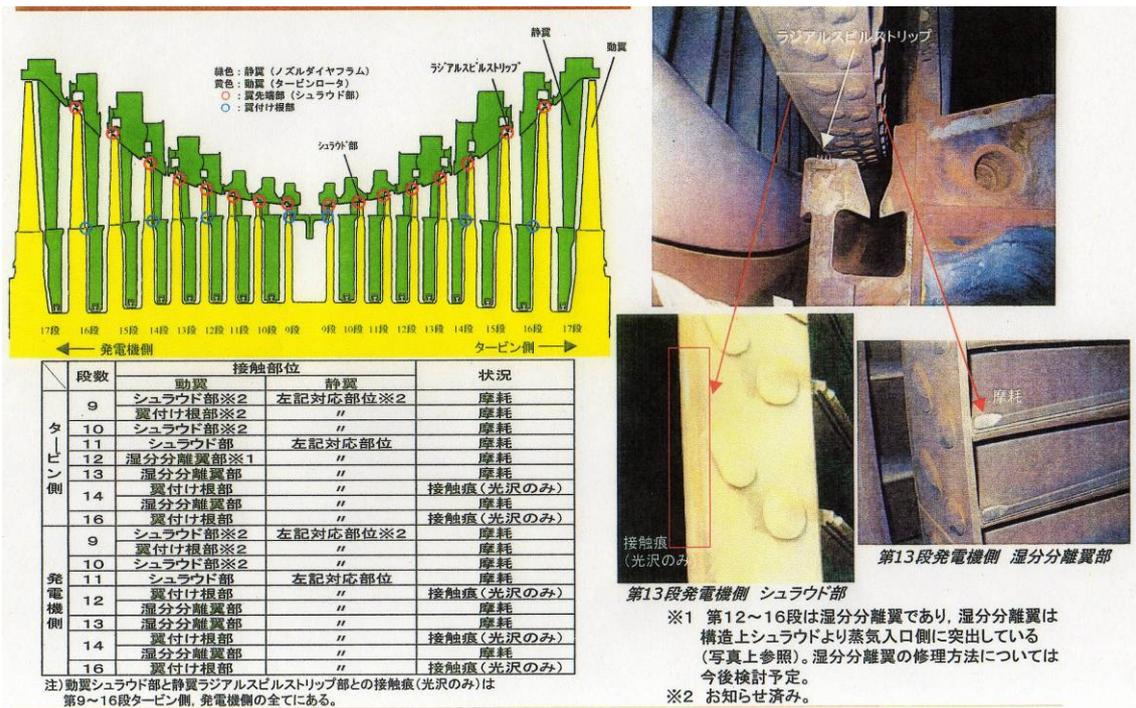


図-3.2.3 4号機の低圧タービン A ケーシングの動静翼の接触痕状況⁴⁾ (東京電力(株)提供)

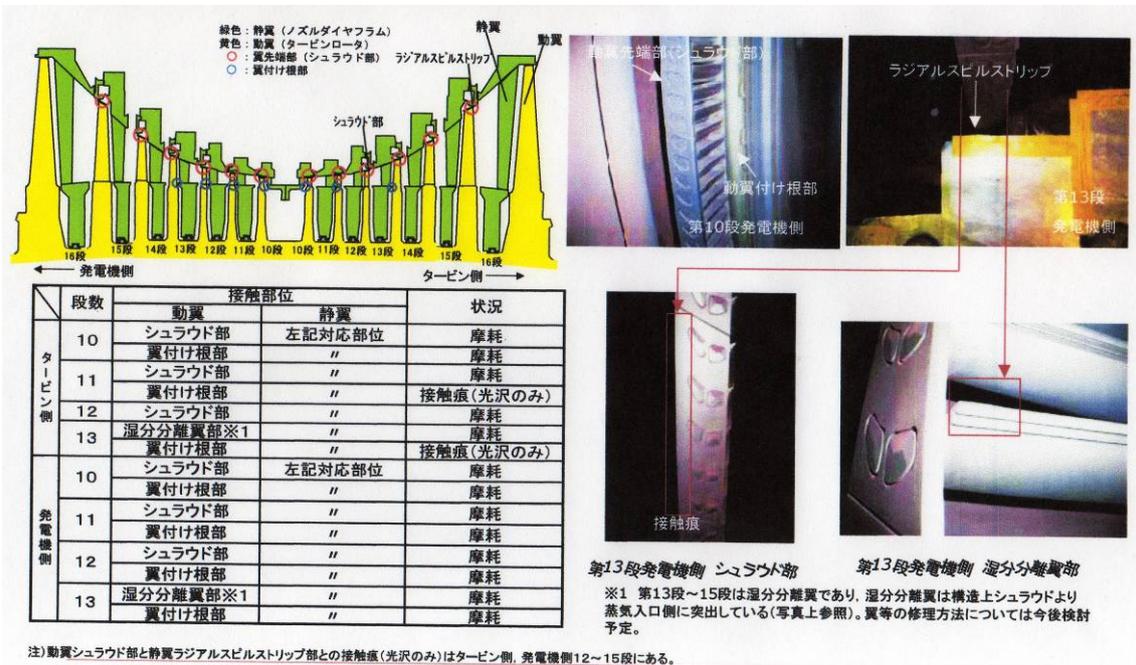


図-3.2.4 7号機の低圧タービン A ケーシングの動静翼の接触痕状況⁵⁾ (東京電力(株)提供)

(3) 運転中の3, 4, 及び7号機の高低圧タービン軸受の接触痕状況

7号機及び4号機を中心に調査を実施し、分解点検中の高圧、低圧タービンロータを目視で確認したところでは、動翼の接触程度もそれほどきついものではなく、また、グランドパッキンの当たりもフィンの摩耗程度に見え、ジャーナル軸受は下記の写真に示すように若干の強い当たりが見られるが、ほぼ健全な状況である。7号機の間軸受台の基礎コンクリートにひび割れが発見されているので、想定外の軸方向の力が働いたと思われ、スラスト軸受にも異常が表示されており、スラスト軸受に、大きな負荷がかかったと思われる。

スラスト軸受の異常に伴い、軸方向のクリアランスが比較的狭い、Aケーシングの10段の動翼のシュラウド部に摩耗が見られる。

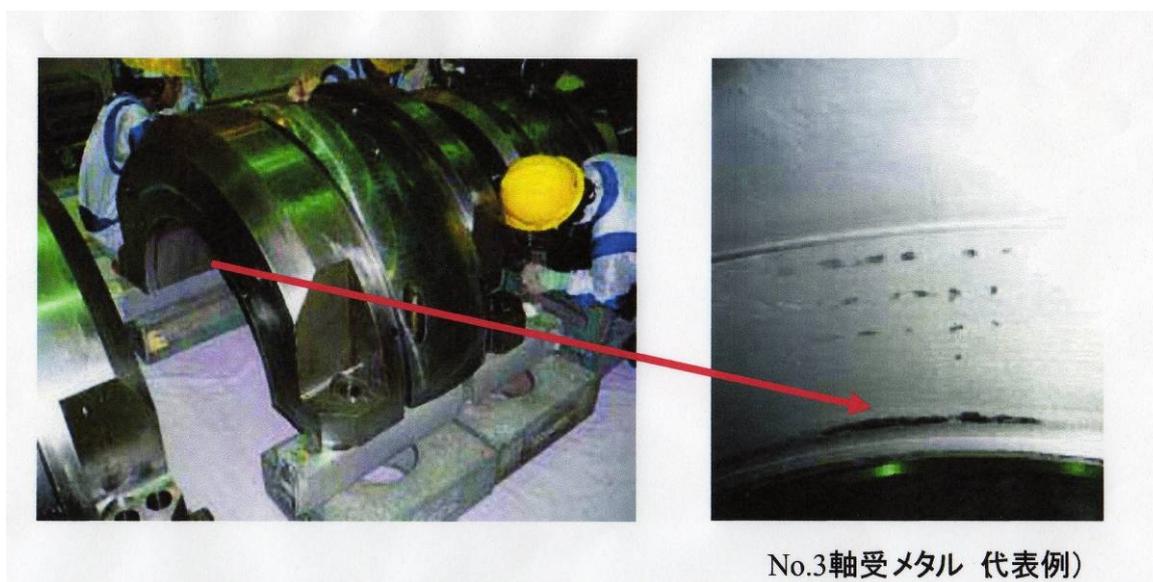


写真-3.2.1 代表的な軸受メタルの接触痕⁶⁾ (東京電力㈱提供)

ジャーナル軸受については、ロータシャフトと軸受メタルの接触の程度は軽微であり、機能(シャフトと軸受の潤滑)に影響するものではない。手入れ作業で復旧する予定。

- (4) 運転中の3、4、及び7号機の高低圧タービングランドパッキン、油切りフィンの接触状況

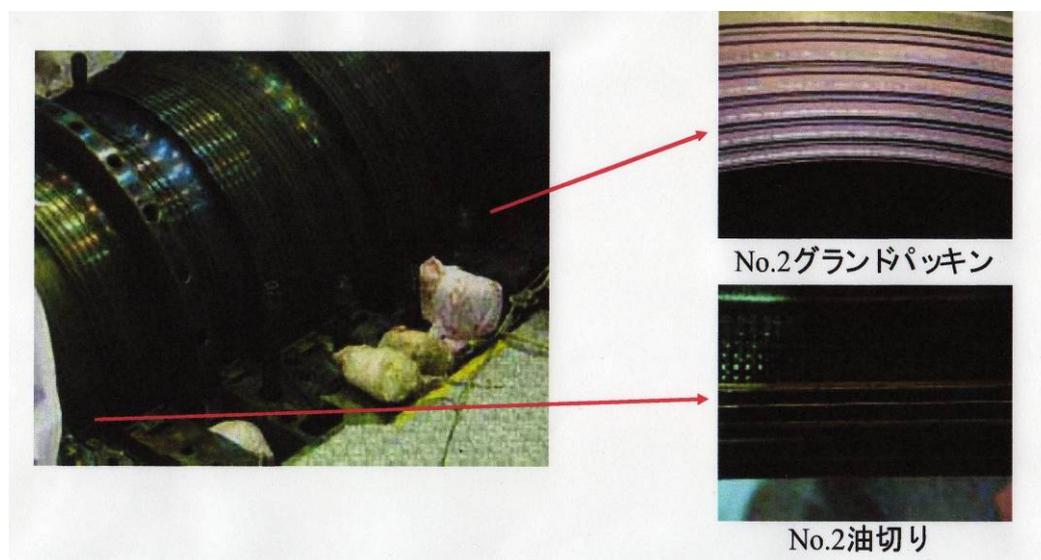


写真-3.2.2 代表的なグランドパッキン及び油切りフィンの接触痕状況-1⁷⁾ (東京電力㈱提供)
(主タービングランドパッキン及び油切り)

グランドパッキン、油切りフィンとも接触の程度は軽微であり、機能（漏えい防止）に影響するものではなく、手入れ若しくは部品交換にて復旧する予定である。

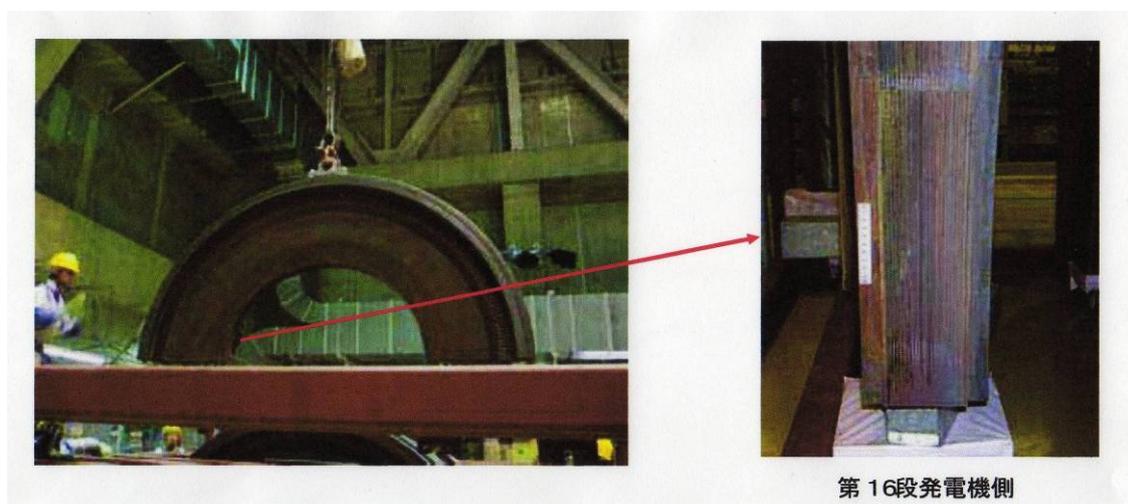


写真-3.2.3 代表的なグランドパッキン及び油切りフィンの接触痕状況-2⁸⁾ (東京電力㈱提供)
(主低圧タービン (A) ダイアフラムノズルパッキン)

ノズルパッキンの接触の程度は軽微であり、機能（漏えい防止）に影響するものではなく、手入れ若しくは部品交換にて復旧する予定である。

(5) 蒸気タービン機器の健全性の確認

タービン建屋内の機器について、今回の見学で確認した7号機及び4号機のタービンロータおよび補機の例を下記の図に示す。



写真-3.2.4 7号機高圧タービンロータ詳細点検中⁹⁾ (東京電力㈱提供)

上図に示すように7号機高圧タービンロータには外観を見たところ、多少の接触痕は見られるが、殆ど無傷の状態で見解され、詳細点検を行っていることが確認できた。



写真-3.2.5 7号機低圧タービンロータ詳細点検中⁹⁾ (東京電力㈱提供)

上図に示すように、7号機低圧タービンロータには若干の接触痕が見られるが、殆ど無傷の状態で見解されており、タービンロータは健全な状態であったことが確認できた。



写真-3.2.6 代表的な補機ポンプの例⁹⁾ (東京電力㈱提供)

上図に示すように、補機ポンプ類については震度6強という極めて強い揺れであっても、補機の基礎、基礎ボルト、ポンプ本体、などには全く異常は見られないことを確認した。



写真-3.2.7 4号機低圧タービンロータ詳細点検中⁹⁾ (東京電力㈱提供)

上図に示すように、4号機低圧タービンロータについては7号機の低圧タービンロータと同様に、多少の接触痕は見られるものの、ほぼ健全な状態で分解され、詳細点検を行える状態であることを確認した。

(6) 7号機低圧タービン 14 段動翼植込フォーク部の破損状況

7号機の低圧14段の羽根の植込フォーク部の破損は2枚で、磁粉探傷検査及び一部浸透探傷検査を実施し、指示模様が確認されたものは合計90枚が確認されている。

表-3.2.2 7号機低圧タービン(A)(B)(C)の第14段動翼フォーク部の点検結果¹⁰⁾

(東京電力(株)提供)

・低圧タービン(A)(B)(C)第14段(タービン側・発電機側)の全ての動翼(各152枚、計912枚)を取り外し、フォーク部について外観目視点検を実施した結果、2枚(低圧タービン(B)(C)に各1枚)に折損を確認した。

・折損が確認された翼2枚を除く、計910枚の動翼フォーク部について非破壊検査*を実施した結果、合計90枚に指示模様を確認した。

* 非破壊検査とは、材料表面の微小な傷などを確認する検査手法。
今回の点検では「磁粉探傷検査」および一部で「浸透探傷検査」を実施。

対象機器		折損が確認された翼	指示模様が確認された翼 (折損が確認された翼を除く)
低圧タービン(A) 第14段	タービン側	0枚	1枚
	発電機側	0枚	0枚
低圧タービン(B) 第14段	タービン側	1枚	50枚
	発電機側	0枚	22枚
低圧タービン(C) 第14段	タービン側	1枚	17枚
	発電機側	0枚	0枚
合計		2枚	90枚

：お知らせ済み箇所

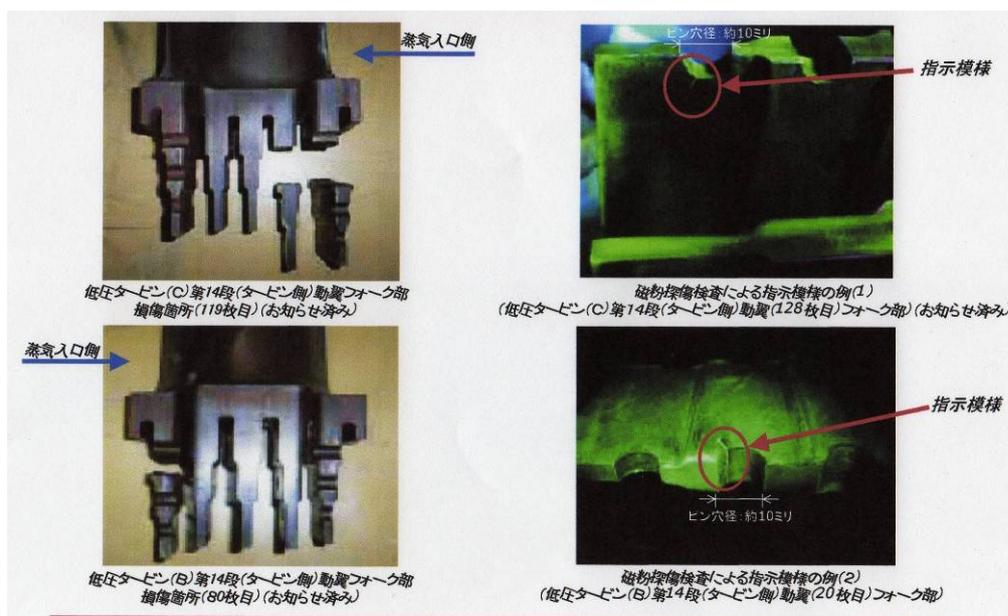


写真-3.2.8 7号機 低圧タービン第14段動翼植込フォーク部の破損状況⁽¹¹⁾

(東京電力(株)提供)

7号機の14段動翼のフォーク部の破損は、破面検査から金属疲労の時に特徴的にみられる縞状の模様が見られるが、この破損が、今回の新潟中越沖地震と何らかの関係があるのかわからないのか、破損に至った原因の調査が行なわれる予定である。7号機は、運転開始が1997年7月2日と云われているので、約10年にわたって運転されてきたことになる。また、3号機は、1993年8月11日、4号機は、1994年8月11日にそれぞれ運転開始されているので、運転時間は7号機よりも長い。3号機と4号機の低圧ケーシングの詳細点検は今後に予定されているので、これらの結果と併せて原因調査がなされると思われる。現在は、7号機の詳細点検が進められているところであり、順次3機、及び4号機へと点検作業が進められる予定である。

(7) 地震発生時の振動値の変化

運転中の蒸気タービン発電機のロータの振動は、3号機、4号機、および7号機共に、振動大でトリップ値を越えており、3号機には、スラスト異常の警報も出ている。4号機及び7号機では、発電機継電器異常の信号が見られるが、同時に基準値を超える警報が出ている。トリップ後約2時間程度で停止しており、各号機とも停止カーブはスムーズに推移しており、通常停止との差異がないことを、地震発生時を中心に実際のチャートを見て確認した。

発電機も同様の動きをしており、トリップ値を越す振動を示している。振動のアラーム値は、17.5/100 mm、トリップ値は、25/100mmと設定されている。

(8) 基礎ボルト

7号機の蒸気タービンの中間軸受台（スラスト軸受）基礎部のコンクリート表層にひび割れが目視にて確認されている。今後、中間軸受台を吊り上げて詳細点検を行うことを計画している。

低圧ケーシングの基礎ボルトについては、点検を実施中である。また、複水器の基礎ボルトについては、2号機で損傷が確認されており、詳細点検を継続中である。

今回の震度6強という地震動により、基礎ボルトが破断した主変圧器に比べ、蒸気タービン軸受台及び低圧ケーシング、発電機などの基礎ボルトの設計については余裕のある設計となっているが、今回の調査結果を反映し、さらに信頼性の高い基礎設計への反映が必要である。



写真-3.2.9 7号機 中間軸受台基礎コンクリート部 及び ボルト⁹⁾ (東京電力㈱提供)

(9) 耐震設計の基本的な考え方について

①タービン発電機の耐震設計の考え方

機械設備の設計時の地震加速度応答値は、表-3.2.3に示す通りであり、
主要な機械設備の具体的な設計地震力は、耐震クラスに従って、以下のように
設定されている。

当該設備は、JEAG-4601-1987(原子力発電所耐震設計技術指針)において、耐震ク
ラスB(主タービン発電機等)及びC(タービン発電機補機等)の設備として設計し
ている。

<主タービン発電機>

[主タービン]

耐震クラス：B

設計手法：基礎ボルトの応力計算は、基礎ボルトの応力は地震による震度、
タービンによる引張力とせん断力について計算する。

設計地震力：静的水平加速度 0.36 G (3号機、建屋毎に異なる)

[発電機]

耐震クラス：C

設計地震力：静的水平加速度 0.24 G (3号機、建屋毎に異なる)

<主タービン発電機補機>

耐震クラス：B、C

今回の地震により各号機で実測された地震加速度は、表-3.2.3に示すように、設計時の加速度応答値と大きく異なっている。設計時に各号機ごとにそれぞれ設定されているが、今回の地震によって観測された最大加速度値は、例えば、1号機及び2号機の東西方向では、設計時の加速度応答値をはるかに超えて大きく、また、設計時に考慮した不確かさ（バラツキも含む）とも異なっている。実際に観測された値と設計時に想定されていた値との違いを究明しておく必要があると指摘されている。

主変圧器の基礎ボルトの破断、及び復水器の基礎ボルトにも損傷が確認されており、これらの問題を解決するためには、この最大加速度の設計時の想定が最も重要となる。

表-3.2.3 発電所の地震観測記録と設計時の加速度応答値¹²⁾（東京電力㈱提供）

観測された最大加速度（単位：ガル）

観測値		南北方向	東西方向	上下方向
1号機	最下階（B5F）	311	680	408
2号機	最下階（B5F）	304	606	282
3号機	最下階（B5F）	308	384	311
4号機	最下階（B5F）	310	492	337
5号機	最下階（B4F）	277	442	205
6号機	最下階（B3F）	271	322	488
7号機	最下階（B3F）	267	356	355

【スクラム設定値】
水平方向120ガル，上下方向100ガル

設計時の加速度応答値（単位：ガル）

観測値		南北方向	東西方向	上下方向
1号機	最下階（B5F）	274	273	(235)
2号機	最下階（B5F）	167	167	(235)
3号機	最下階（B5F）	192	193	(235)
4号機	最下階（B5F）	193	194	(235)
5号機	最下階（B4F）	249	254	(235)
6号機	最下階（B3F）	263	263	(235)
7号機	最下階（B3F）	263	263	(235)

静的水平地震力は $3C_i \times 0.8 = 0.48G = 470Gal$

上記の「観測された最大加速度」は、原子炉建屋最下階の地震計で記録された数値である。この為タービン建屋のタービン据付面の地震による加速度とは異なるものである。しかし、参考として地震による加速度を知る上では貴重なデータである。

今回の柏崎刈羽原子力発電所で観測された記録を詳細に調査検討し、その原因を明確にして、今後の原子力発電所等の重要構築物設計の基礎資料とすることが重要である。

②観測された最大加速度と機械設備の設計

今回の地震により、柏崎刈羽原子力発電所で実測された最大加速度は、いずれも設計時に考慮されていた値よりも、南北方向で 1.8 倍、東西方向で 3.6 倍、上下方向で 2.1 倍と大幅な違いがでている。

前項の想定を超える地震動を受け、設計時に考慮された S₁ 及び S₂ 地震で考慮されている地震動との差異が生じた現状において、その原因を現在調査確認中である。

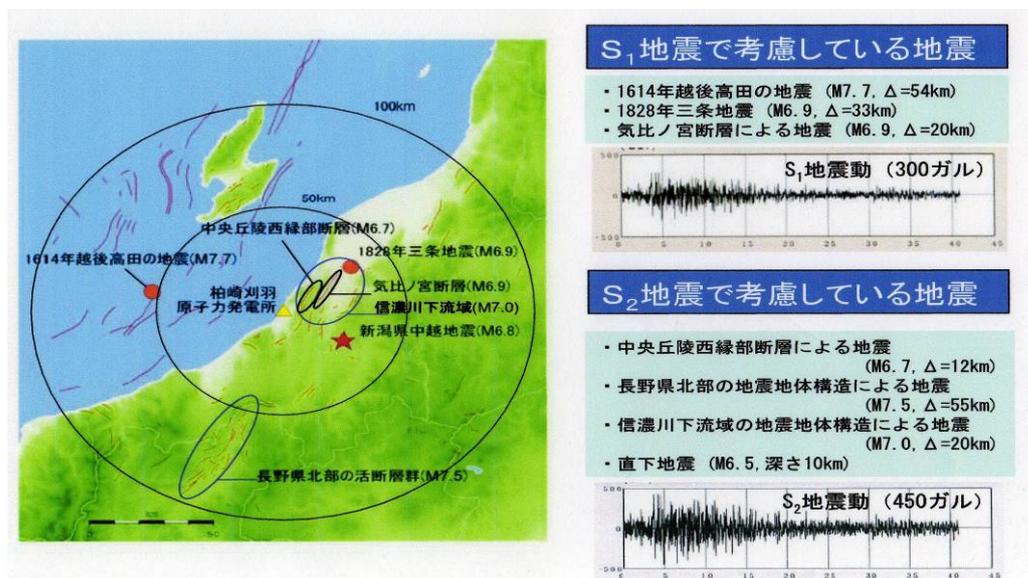


図-3.2.5 旧耐震設計指針による柏崎刈羽原子力で考慮された地震強度¹²⁾

柏崎刈羽原子力発電所については、地質調査が新規に実施されており、これらの調査から得られるデータや知見と、震度 6 強という実際に大地震に遭遇した当該発電所の貴重なデータや経験等を、今後の発電所の耐震設計・改修に役立てて頂きたい。

参考文献；

下記の番号は、本文中に付けた図及び表の上付き) に対応。

- 1) 新潟県中越沖地震の影響について、2008年4月16日、
東京電力(株)、柏崎刈羽原子力発電所にて打合せ時入手
- 2) 第4号機 高圧タービン内部状況確認(速報)、2007年11月26日付
2008年4月17日、柏崎刈羽原子力発電所にて個別打合せ時入手
- 3) 第3号機 低圧タービン(A)内部点検状況、2007年11月29日付
東京電力(株)、柏崎刈羽原子力発電所にて個別打合せ時入手
- 4) 第5号機 低圧タービン(A)内部点検状況、2007年11月29日付
東京電力(株)、柏崎刈羽原子力発電所にて個別打合せ時に入手
- 5) 第7号機 タービン内部の点検状況について、2007年11月29日付
東京電力(株)、柏崎刈羽原子力発電所にて個別打合せ時に入手
- 6) News Release、経産省、2007年10月25日、参考資料2
代表的なグランドパッキン及び油切りフィンの接触痕状況-1
- 7) News Release、経産省、2007年10月25日、参考資料2
代表的なグランドパッキン及び油切りフィンの接触痕状況-2
- 8) 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所、現地復旧状況確認調査時入手(2008年4月16日)
- 9) 東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所、現地復旧状況確認調査時入手(2008年4月16日)
- 10) TEPCO ; プレスリリース、新潟中越沖地震後の点検復旧作業の状況および不適合について、第7号機低圧タービン第14段点検状況、2008年4月10日付
- 11) TEPCO ; プレスリリース、新潟中越沖地震後の点検復旧作業の状況および不適合について、低圧タービン第14段動翼フォーク部点検状況(折損および指示模様)、2008年4月10日付
- 12) 新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の被害状況について、耐特委第1-7号資料、2007年12月27日付
- 13) 新潟県中越沖地震、柏崎刈羽原子力発電所の観測記録、耐特第3-4-1号資料、2007年8月10日付