

柏崎刈羽原子力発電所 1号機 非常用ディーゼル発電機（B）の異常に係る東京電力ホールディングス株式会社からの報告に対する評価及び今後の対応について

令和元年6月19日
原子力規制委員会

1. 経緯

平成30年8月30日、東京電力ホールディングス株式会社（以下「東京電力」という。）は、柏崎刈羽原子力発電所1号機非常用ディーゼル発電機（以下「D/G」という。）（B）を定例試験のために起動・運転していたところ、異音が発生するとともに発電機出力が0kWまで低下したため、手動停止した。

調査の結果、2台ある過給機のうちR側過給機の軸が固着していることを確認、更なる調査はメーカー工場にて実施することが必要となり、速やかな復旧が難しいことから、同年9月6日に本事象が実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条第3号に定める報告事項¹に該当すると判断し、原子力規制委員会に報告した²。（別紙1参照）

なお、本事象に伴う外部への放射能の影響はなかった。

2. 事業者からの報告内容

原子力規制委員会は、東京電力から上記1.の事象に関する報告を受けた。その概要は以下のとおりである。

2.1 故障箇所特定のための原因調査

当該D/Gに異常が発生した際、異音及び発電機出力低下を確認したことから、事象の状況を踏まえた要因分析表を作成し、発電所においてD/G潤滑油系統等の各系統について要因分析表に基づく調査を行った。

調査の結果、燃焼機関係系統のR側過給機ロータ軸に固着を確認し、その他には異常が確認されなかったことから、当該D/Gの出力低下の要因は過給機であると判断し、原因特定のための調査を行った。

¹ 「発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき」に該当すると判断。

² 平成30年9月12日原子力規制委員会「原子炉施設におけるトピックス」参照。

2.2 過給機に関する調査

2.2.1 R側過給機の調査

R側過給機をメーカー工場にて調査の結果、タービンブレードの折損、レーシングワイヤの破断、軸受の損傷及び各部位の接触痕等を確認した。(別紙2(1/2、2/2)参照)

タービンブレードの折損面及びレーシングワイヤの破断面について、走査型電子顕微鏡(以下「SEM」という。)観察を行ったところ、タービンブレードの折損面に疲労破壊を示すストライエーション模様³が確認された。一方、レーシングワイヤの破断面については、ストライエーション模様は確認されず、延性による破断を示すディンプル模様⁴が確認されたことから、レーシングワイヤの破断はタービンブレード折損に伴うものであると判断した。

また、軸受の損傷及び各部位の接触痕等について調査を行ったところ、いずれもタービンブレード折損に伴う従属的な事象であると推定されることから、タービンブレードの疲労破壊がR側過給機ロータ軸の固着要因であると判断した。

2.2.2 L側過給機の調査

発電所内の調査では異常が確認されなかったL側過給機についても、工場にて点検を行ったところ、1枚のタービンブレード及びそのブレードが組み込まれたロータのファツリー部⁵に亀裂が確認された。そのため、タービンブレード及びロータのファツリー部の亀裂面のSEM観察を行ったところ、いずれもストライエーション模様が確認された。

また、L側ロータファツリー部の側面に打痕と見られる変形が確認されたことから、過去の作業履歴の確認や作業員への聞き取りを実施したところ、過去の不適合事象の水平展開⁶として、タービンブレードの取り外し・再取付け作業を行ったこと及び当該作業の際に金属製ハンマーで打撃を実施⁷したことが確認された。

このことから、L側タービンブレードの亀裂及びロータファツリー部の亀裂は、タービンブレードの取り外し・再取付け作業に伴う打撃によって発生したファツリー部間の変形による当たり状態の変化によってファツリー部の応力が増加し発生したものと推定した。

³ 疲労亀裂が進展する際に破面に形成される疲労破壊に特徴的なしま模様のこと。

⁴ 金属材料が延性破壊をしたときに見られるくぼみ模様のこと。

⁵ タービンブレードとロータを連結させることを目的としたくびれ形状の構造部のこと。

⁶ 平成3年、柏崎刈羽原子力発電所2号機にて発生したD/G過給機の不具合に関する水平展開として、平成6年にD/G過給機のレーシングワイヤ孔の再加工工事を実施。

⁷ 通常、取り外し・再取付け作業の際は、樹脂製ハンマー及び黄銅棒にて打撃するが、ファツリー部間に堆積したスス等により接触抵抗が増大していたこと等から、金属製ハンマーを使用して作業をし、その際にロータファツリー部の側面を誤って打撃し、変形したものと推定した。

ただし、タービン破損にまでは至っていなかったことから、L側過給機において確認された亀裂及び変形は当該D / Gの出力低下の要因ではないと判断した。

2.3 過給機タービンブレードの疲労破壊に関する調査

R側過給機軸固着の起点はタービンブレードの疲労破壊であると判断したことから、疲労破壊に関連する追加調査として、材料、設計、加工、組立て、外的要因の観点から破損要因を検討した結果、加工不良、組立て不良、外的要因から破損要因を抽出した。

2.3.1 加工不良に関する調査（レーシングワイヤ孔位置の設計値逸脱）

当該過給機レーシングワイヤの孔位置を計測したところ、設計値を逸脱している箇所が確認された。特にL側過給機で亀裂が確認されたタービンブレードの孔位置は隣り合うブレード孔位置との差が大きく、設計値を逸脱していた。

その後の聞き取り調査などから、レーシングワイヤ孔位置の設計値逸脱の原因は、製造時の孔の加工不良である可能性があるかと判断した。

レーシングワイヤ孔位置が設計値を逸脱し、隣接するタービンブレード間を貫通しているレーシングワイヤが傾くことで、ファツリー部の応力を高め、亀裂を発生させる要因となる可能性があることから、タービンブレード亀裂発生の要因の一つとなった可能性があるかと判断した。

2.3.2 組立て不良に関する調査（タービンブレードの取り外し・再取付け作業）

タービンブレードの取り外し・再取付け作業について、過去の点検記録の確認及び外観目視点検を実施したところ、上記2.2.2のとおり、L側過給機ロータファツリー部において、過去の取り外し・再取付け作業にて実施した打撃によるものと見られる変形が確認された。これにより、ファツリー部間の当たり状態が変化し、タービンブレード亀裂発生の要因の一つとなった可能性があるかと判断した。また、取り外し・再取付け作業は、当該D / GのL側過給機だけでなく、R側過給機や他号機のD / Gにおいても同様に行われていたことを確認した。

2.3.3 外的要因に関する調査（腐食・汚れ等）

腐食・汚れや経時的変化の状態を確認するため、外観目視点検を行ったところ、タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部にススや腐食生成物の付着を確認した。

また、タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の寸法測定を行ったところ、一部のファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認したことから、応力解析を行ったところ、D / G運転によりタービンブレードファツリー部は弾性限度を逸脱し、寸法変化が生じることが判明した。

2.4 事象の推定メカニズム

前項の調査結果を踏まえ、タービンブレードが折損に至った原因は主に 製造時のレーシングワイヤ孔位置の設計値逸脱と、塑性変形したタービンブレードの取り外し・再取付けの複合要因であると判断し、R側過給機のタービンブレードの疲労破壊メカニズムを以下のとおり推定した。(別紙3参照)

- レーシングワイヤ孔加工の際にレーシングワイヤ孔位置の設計値逸脱が発生。これにより、隣接するタービンブレードレーシングワイヤ孔位置に高低差が生じ、レーシングワイヤの作用角度が変化してタービンブレード背面側の応力が増大。
- タービンブレードファツリー部は、D / G運転に伴う熱応力等により塑性変形が発生。
- 塑性変形したタービンブレードの取り外し・再取付け及びその際の汚れ等の付着物の除去により、タービンブレード再取付け後のファツリー部間の当たり状態が変化。
- タービンブレード背面側応力の増大とファツリー部間の当たり状態の変化に伴う応力集中が生じた状態で排気脈動による応力振幅が加わることによって、ファツリー部くびれ部に亀裂が発生進展し、最終的にタービンブレードがファツリー部で折損。

その後、タービンブレードの折損に伴い、レーシングワイヤの破断や各部位の接触、脱落等が発生しロータの軸がアンバランスとなり、軸の振れ回りによって軸受を破壊した結果、R側過給機は軸が固着し、燃烧用空気の送気機能が喪失、R側シリンダが未燃焼状態となり発電機出力が急激に低下した。

2.5 再発防止対策及び水平展開

本事象の発生原因が 製造時のレーシングワイヤ孔位置の設計値逸脱と、ファツリー部が塑性変形しているタービンブレードの取り外し・再取付けの複合要因であると判断し、以下の再発防止対策を行う。

当該D / G過給機については、タービンブレード、ロータ及びロータの軸を新製して復旧する。また、D / G過給機の新製及び既設の保守管理を以下のとおりとする。

レーシングワイヤ孔加工時の検査において、レーシングワイヤ孔高さが設計要求値以内であることの確認を作業要領書に定めて実施する。

タービンブレードの取り外しが必要となった場合は、当該タービンブレードを再利用しないこととする。

また、水平展開として、過去にタービンブレードの取り外し・再取付けの実績がある過給機を対象として点検を実施し、レーシングワイヤ孔高さ測定及びタービンブレードファツリー部の亀裂の有無の確認を行い、本事象と同様な事象が発生する可能性を評価して、必要に応じタービンブレード等の交換を実施する。なお、これら以外の全過給機に対し、通常点検の中でレーシングワイヤ孔高さ測定を実施し、必要に応じて対策や水平展開等に反映する。

3．原子力規制委員会の評価及び考察

3．1 D / Gの安全機能に及ぼす影響について

本事象により、柏崎刈羽原子力発電所1号機のD / G (B)は機能喪失したが、同1号機にはD / GがA系、B系、高圧炉心スプレイ系の3台設置されており、運転上の制限「原子炉が冷温停止又は燃料交換モードにおいては、非常用交流高圧電源母線に接続するD / Gを含め2台⁸の非常用発電設備が動作可能であること」について、東京電力は事象発生後もA系D / Gと高圧炉心スプレイ系D / Gの定例試験により確認したとしている。また、他号機等からの電源融通も可能であるとしている。しかしながら、A系D / G及び高圧炉心スプレイ系D / Gも故障した当該D / Gと同様、過去にタービンブレードの取り外し・再取付け実績があることや、レーシングワイヤ孔の位置ずれの状況が確認できていないことを踏まえると、科学的・技術的に十分な根拠を持ってこれらD / Gが「動作可能⁹」な状態であることが証明されているとは言えず、これらD / Gについても対応が必要である。

3．2 原因調査結果、再発防止対策等について

東京電力は、上記2．4のとおり、今回の原因はタービンブレードレーシングワイヤ孔の加工不良(孔位置の設計値逸脱)と塑性変形したファツリー部を有するタービンブレードを再取付けした複合要因によってタービンブレードファツリー部に応力集中した結果、疲労破壊が発生しブレードが折損したと推定しているが、これら要因のどちらか一方によるタービンブレード破損の可能性については排除できていない。また、東京電力はタービンブレードを取り外すことなくファツリー部の亀裂等を検出できる非破壊検査手法を開発中としているが、D / Gの安全機能維持への影響判断のためには、ファツリー部1～3段目くびれ部の確実な亀裂検出や

⁸ 非常用発電設備は、D/G及び必要な電力供給が可能な非常用発電機をいう。なお、非常用発電機は複数の号機で共用することができる

⁹ 動作可能とはD/Gの安全機能として、7日間の外部電源喪失を仮定しても連続運転により必要な電力供給ができることが要求されており、これを満足することを言う

亀裂の検出限界の検証が必要である。こうしたことを踏まえると、本事象は安全上重要な設備であるD / Gの安全機能に与える影響が大きいことから、その機能を確実に維持するためには以下の対策が必要と考える。

運転上の制限を考慮して動作可能であることが求められるD / Gにおいて、取り外し・再取付けしたタービンブレードは速やかに新しいものに交換する。また、タービンブレードを取り付けていたロータについてもファツリー部の点検を行い、亀裂等の異常が確認された場合には新しいものに交換する。計画的に、同様構造のD / G過給機のタービンブレードレーシングワイヤ孔の位置測定を行い、隣り合うブレードの孔位置の差が一定の基準を逸脱しているものは、タービンブレードを新しいものに交換する。

及び の交換に伴い、取り外すタービンブレード及びそのタービンロータの検査を行い、今後の保守管理に役立てる。

同じ構造の過給機を有するD / Gを設置している他事業者においても同じ対策を講じることが必要である。(別紙4参照)

4 . 今後の対応

東京電力及び同様の過給機を備えたD / Gを設置している他事業者に対して3 . 2の対策を求め、公開会合等においてその後の取組状況を確認するとともに、原子力運転検査官がその実施状況を現場にて確認する。

5 . I N E S (国際原子力・放射線事象評価尺度) 評価

当該事故・故障等に係るI N E S評価について、以下のとおり確定する。

最終評価：0

判断根拠： 本件は、定期検査中で全燃料が原子炉内から取り出された状態で、D / G (B) の定例試験のために起動・運転していたところ、異音が発生するとともに、発電機出力が0 kWまで低下したため、手動停止し、その後の調査により速やかな復旧ができないことが確認された事象。

人と環境への影響、施設における放射線バリアと管理への影響については、放射性物質の放出、被ばくはない。

深層防護については、外部電源や他の所内電源が確保され、必要な安全機能となる設備への電源供給が可能であることから、原子炉施設の安全に影響を与えない事象であるため、I N E Sレベル0の「安全上重要でない事象」と評価する。

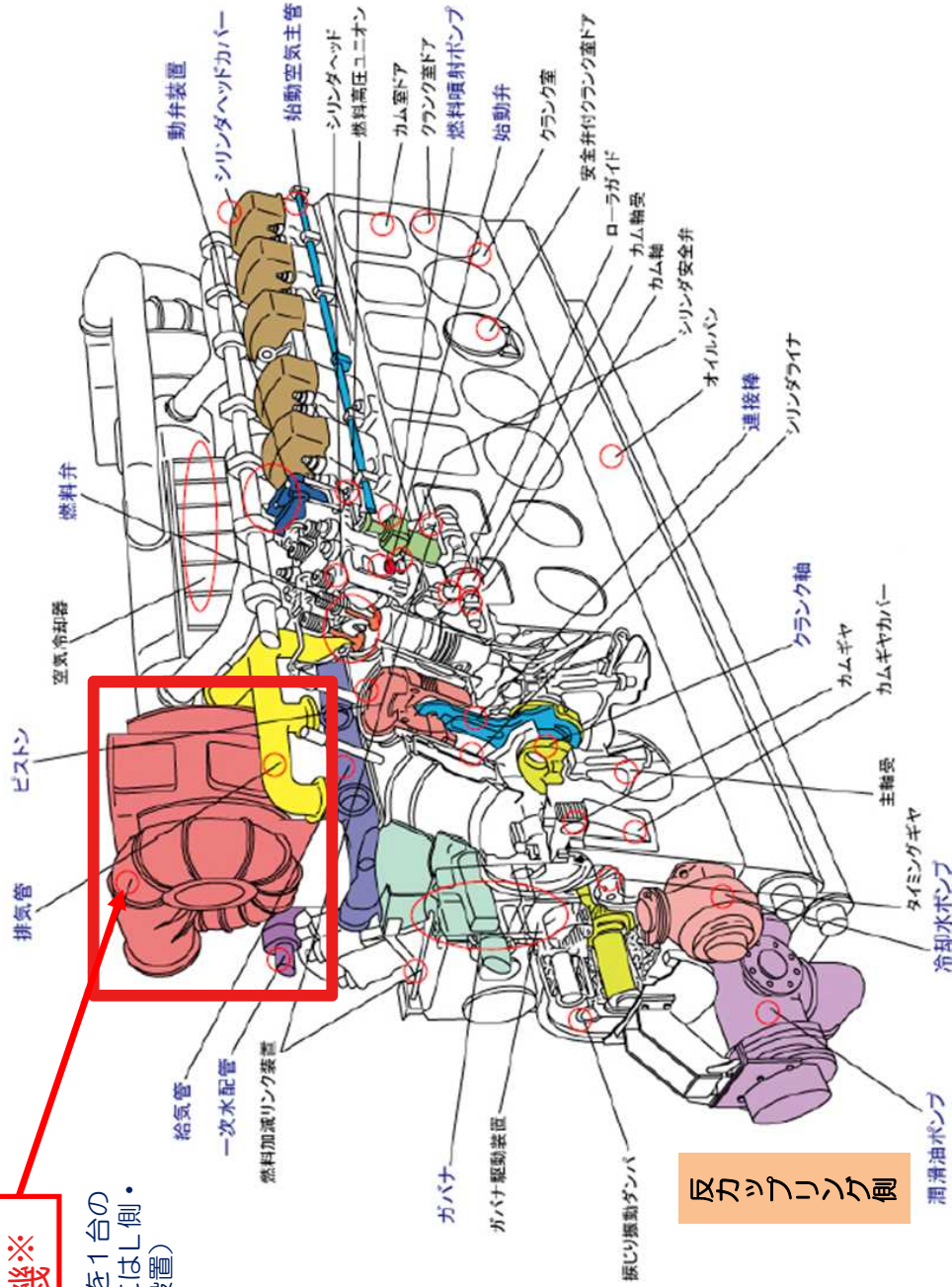
I N E S ナショナルオフィサーは、長官官房総務課事故対処室長

1-6. 機器概要 (2/6) D/G機関 概要図

過給機※

※本図はL側過給機を1台のみを図示（実機にはL側・R側の全2台が設置）

カップリング側（発電機側）

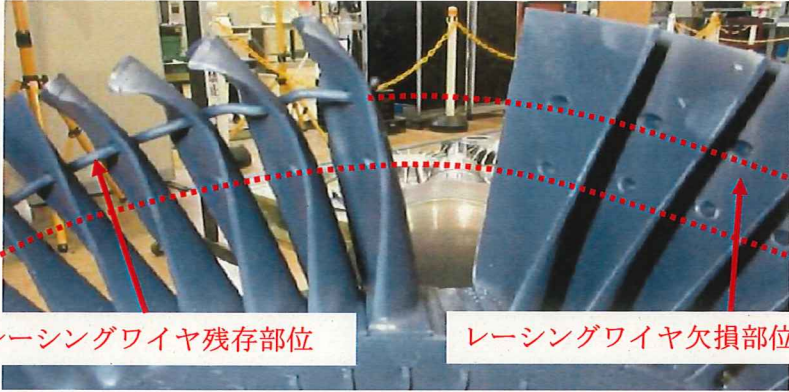


区カップリング側

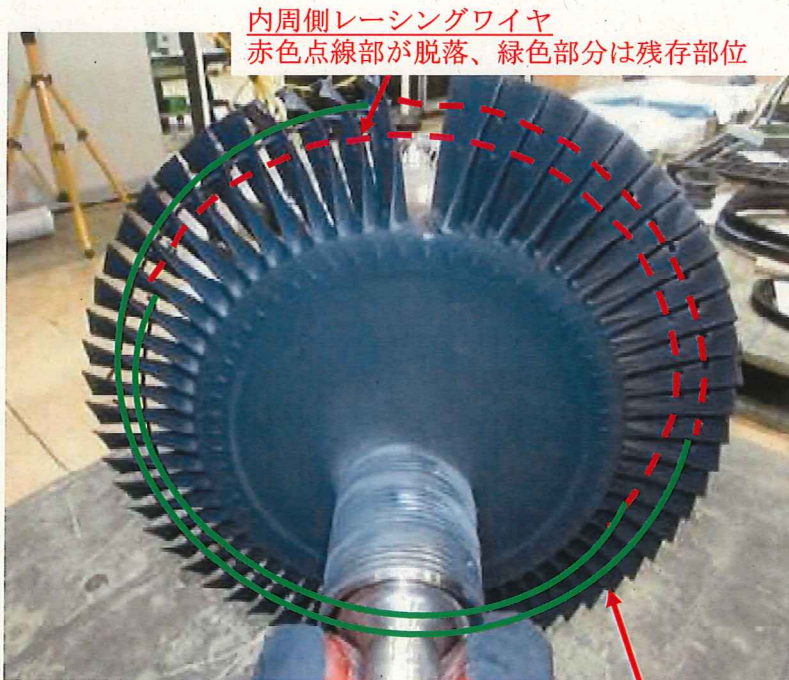
D/G機関 概要図



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

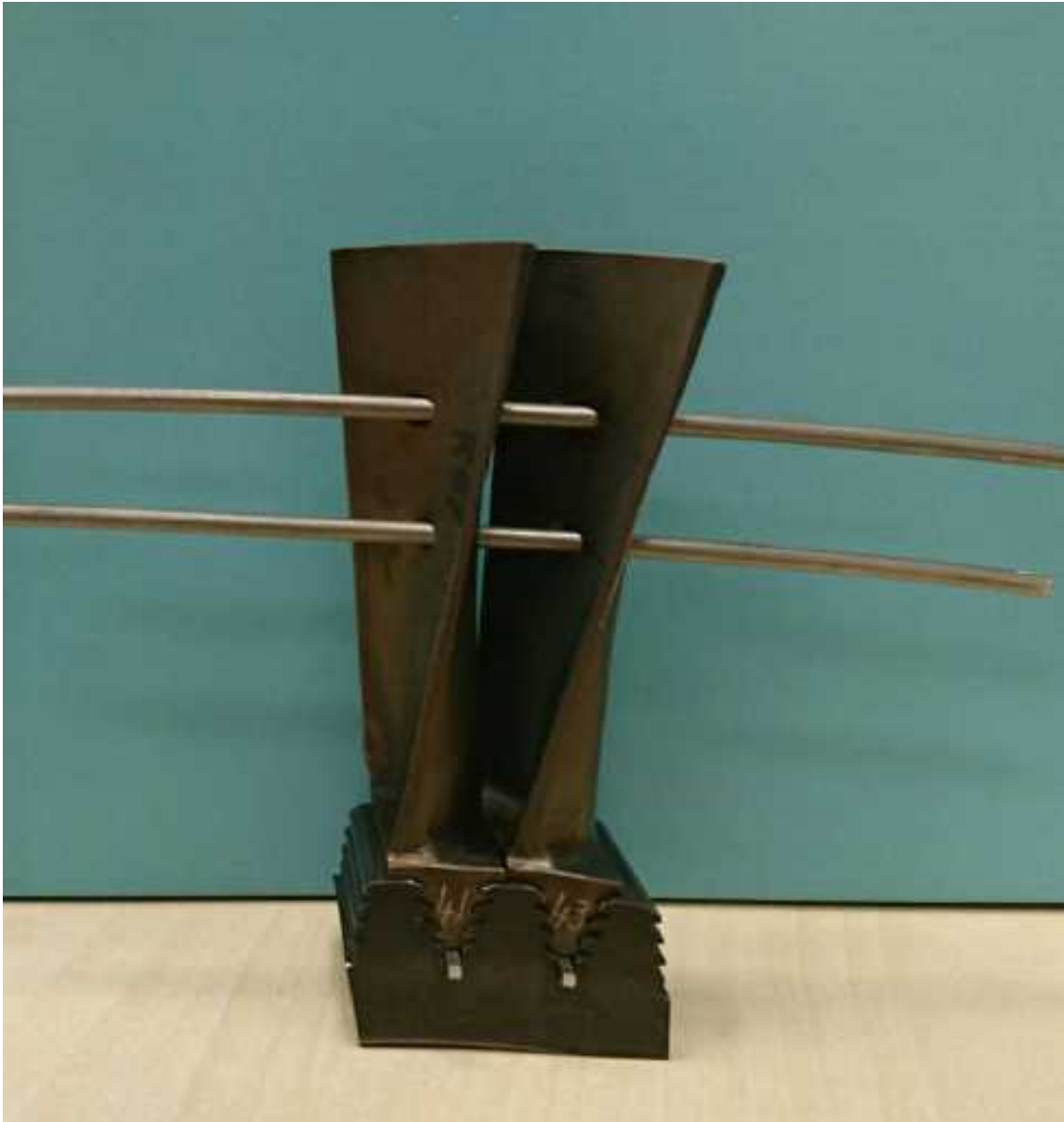


R側過給機の外周側レーシングワイヤの脱落と止端部の破断を確認

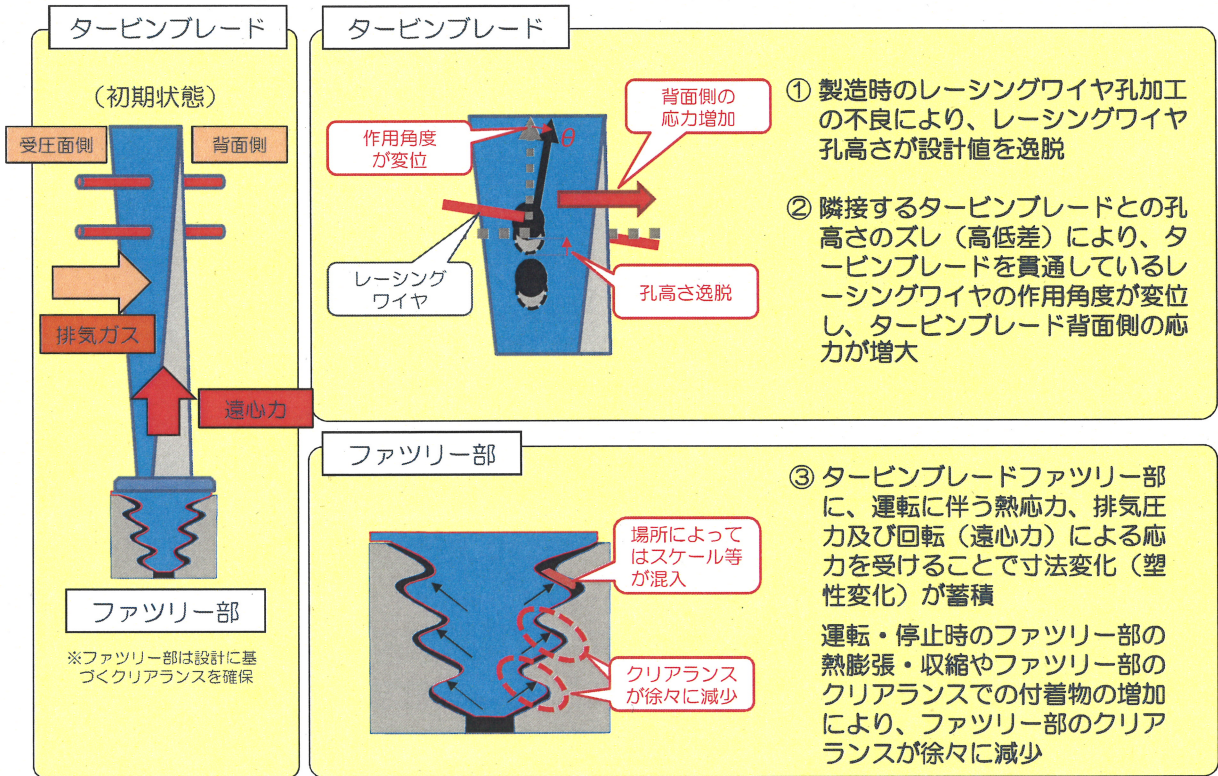


R側過給機の内周側レーシングワイヤ■本のうち1本の脱落を確認

外周側レーシングワイヤ
赤色点線部が脱落、緑色部分は残存部位



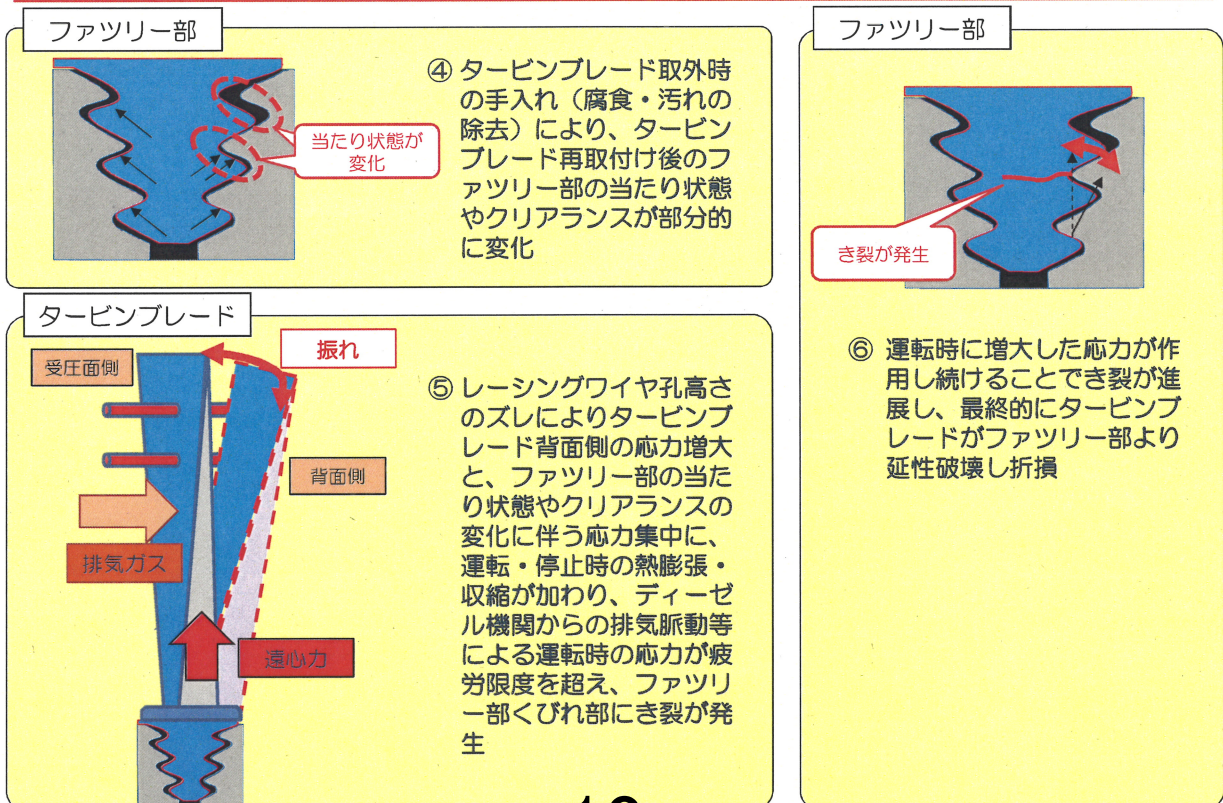
4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム (1/2) 13/23



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.



4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム (2/2) 14/23



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.



事業者	プラント	運転開始年	メーカ	D/G台数	タービンブレード取外し・再取付け実績	その他
東北電力	東通1	2005	新潟原動機	3	実績無し	
	女川1	1984	新潟原動機	2	"	
	女川2	1995	新潟原動機	3	"	
	女川3	2002	新潟原動機	3	"	
中部電力	浜岡1	1976	新潟原動機	3	—	廃止措置中
	浜岡2	1978	新潟原動機	3	—	廃止措置中
	浜岡3	1987	新潟原動機	3	取外し後、新品に交換(1992年)	注1
	浜岡4	1993	新潟原動機	3	取外し・再取付け実施(1992年)	注2
原電	東海2	2005	新潟原動機	3	実績無し	
	敦賀1	1978	新潟原動機	3	実績無し	
北陸電力	志賀1	1970	新潟原動機	1	—	廃止措置中
	志賀2	1993	新潟原動機	3	実績無し	
中国電力	志賀2	2006	川崎重工	3	"	
	島根1	1974	新潟原動機	2	実績無し	廃止措置中(電源融通あり)
	島根2	1989	日立造船	3	"	
東京電力	島根3	建設中	新潟原動機	3	"	
	福島第二1	1982	新潟原動機	3	実績無し	
	福島第二2	1984	新潟原動機	3	"	
	福島第二3	1985	新潟原動機	3	取外し・再取付け実施	注3
	福島第二4	1987	新潟原動機	3	取外し・再取付け実施	注3
	柏崎刈羽1	1985	新潟原動機	3	取外し・再取付け実施(1994年)	注3
	柏崎刈羽2	1990	新潟原動機	3	取外し・再取付け実施	注2、注4
	柏崎刈羽3	1993	新潟原動機	3	取外し・再取付け実施	注3
	柏崎刈羽4	1994	新潟原動機	3	実績無し	
	柏崎刈羽5	1990	新潟原動機	3	取外し・新品に交換	注4
北海道電力	柏崎刈羽6	1996	新潟原動機	3	実績無し	
	柏崎刈羽7	1997	新潟原動機	3	実績無し	
	泊1	1989	三菱重工	2	実績無し	
	泊2	1991	三菱重工	2	取外し後、新品に交換(2006年)	注5
関西電力	泊3	2009	新潟原動機	2	実績無し	
	美浜1	1970	三菱重工	2	—	廃止措置中
	美浜2	1972	三菱重工	2	—	廃止措置中
	美浜3	1976	三菱重工	2	実績無し	
	大飯1	1979	三菱重工	2	実績無し	
	大飯2	1979	三菱重工	2	実績無し	
	大飯3	1991	三菱重工	2	実績無し	
	大飯4	1993	三菱重工	2	実績無し	
	高浜1	1974	三菱重工	2	実績無し	
	高浜2	1975	三菱重工	2	実績無し	
原電	高浜3	1985	三菱重工	2	実績無し	
	高浜4	1985	三菱重工	2	実績無し	
四国電力	敦賀2	1987	三菱重工	2	実績無し	
	伊方1	1977	三菱重工	2	実績無し	廃止措置中(電源融通あり)
	伊方2	1982	三菱重工	2	実績無し	
九州電力	伊方3	1994	三菱重工	2	実績無し	
	玄海1	1975	三菱重工	2	—	廃止措置中
	玄海2	1981	三菱重工	2	実績無し	
	玄海3	1994	三菱重工	2	実績無し	
	玄海4	1997	三菱重工	2	実績無し	
	川内1	1984	三菱重工	2	実績無し	
	川内2	1985	三菱重工	2	実績無し	

過給機タービンブレード点検状況

注1: 浜岡3号機D/G2台(A、B)は柏崎刈羽2号機水平展開工事としてタービンブレードを取外し、全数を新品ブレードに交換した。D/G(H)は評価を行い実施不要と判断。

注2: 柏崎刈羽2号機D/G(A)及び浜岡4号機D/G2台(A、B)は柏崎刈羽2号機水平展開工事としてタービンブレードを取外し、孔内面加工精度の悪い一部ブレードを新品に交換し、残りは取外したものを再取付けした。D/G(H)は評価を行い実施不要と判断。

注3: 福島第二3/4号機、柏崎刈羽1号機の各D/G3台(A、B、H)及び柏崎刈羽3号機のD/G2台(A、B)は柏崎刈羽2号機水平展開工事としてタービンブレードを取外し・再取付けを実施。なお、柏崎刈羽3号機のD/G(H)は評価を行い実施不要と判断。

注4: 柏崎刈羽2号機のD/G(B)及び柏崎刈羽5号機D/G(A、B)は柏崎刈羽2号機水平展開工事としてタービンブレードを取外し、全数を新品ブレードに交換した。D/G(H)は評価を行い実施不要と判断。

注5: 泊2号機D/G(A)過給機はタービンブレード先端付近に傷が見られたため、取外し後に全数を新品に交換した。

注6: 表中の色 は取外したタービンブレードを再取付けしたプラントを示す。

注7: 表中の色 は取外したタービンブレードを新品と交換したプラントを示す。