

関原発第429号
平成25年 3月18日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
取締役社長 八木 誠

美浜発電所1号機 A-非常用ディーゼル発電機過給機の損傷について

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第19条の17の規定により、
別紙のとおり原因ならびにその対策について取り纏めたので報告します。

原子炉施設故障等報告書

平成25年 3月18日

関西電力株式会社

件名	美浜発電所1号機 A-非常用ディーゼル発電機過給機の損傷について
事象発生の日時	平成25年2月6日13時15分(必要な機能を有していないと判断した日時)
事象発生の場所	美浜発電所1号機 中間建屋1階(A-非常用ディーゼル発電機室)
事象発生の原子炉施設名	非常用予備発電装置
事象の状況	<p>美浜発電所1号機(定格電気出力34万キロワット)は第25回定期検査中のところ、平成25年2月5日、A-非常用ディーゼル発電機(以下、A-DGという。)の定期負荷試験のため、9時24分に現地にて運転員がA-DGを起動した。</p> <p>その後、現地にてA-DGから発電所内へ送電する系統へ接続し、9時47分に100%電気出力に到達したが、9時48分に電気出力の低下(3,120kWから約2,000kWへ低下)が認められ、屋外の排気筒では黒煙を確認したため、運転員によりA-DGを手動停止した。その際、ディーゼル発電機室内において煙により煙感知器が動作した。</p> <p>2月6日、原因調査のためA-DGを目視点検したところ、4台ある過給機のうち、1台の過給機(以下、当該過給機という。)で排気出口配管との接続部が外れて開口していることを確認した。この開口部からファイバースコープを挿入し当該過給機内部を点検したところ、過給機のタービンロータ(翼と軸からなる構造物)が損傷していることを確認した。また、当該過給機の下部に複数の金属片を確認した。</p> <p>なお、本事象は、B-DGおよび空冷式非常用発電装置により保安規定第75条の運転上の制限(ディーゼル発電機2基が動作可能であること)は満足している。</p>
原因調査	<p>1. 聞き取り調査結果</p> <p>事象発生時に現場で立ち会った当社運転員から聞き取り調査を実施した。</p> <p>(1) 100%出力到達後、現地のDG制御盤にて発電機負荷が低下したことに気付き、屋外の排気筒を確認したところ黒煙の発生が認められたため、DGの異常と判断し、DGの停止操作を指示した。</p> <p>(2) 過給機付近で異音が発生し、黒煙を確認したが、DG機関停止により黒煙は止まった。</p> <p>2. 現地および工場調査結果</p> <p>過給機に損傷が発生した原因について、点検調査を実施した。</p> <p>(1) 現地状況調査結果</p> <p>a. 当該過給機外観目視点検結果</p> <p>当該過給機を取外す前においては、タービン室フランジ面が外れ、タービン出口伸縮継手がつぶれていることが認められた。また、取外した後においては、タービン側のフランジ取付ボルトが全て外れ、ロックプレートが脱落していることが認められるとともに、タービンロータの破損が認められた。</p> <p>b. 運転状況確認結果</p> <p>A-DG負荷試験における負荷上昇の推移に異常は認められず、過去の負荷試験における運転パラメータにおいても、異常を示す記録は認められなかった。</p> <p>c. 前回点検結果</p> <p>前回(第23回定期検査)の分解点検状況に異常は認められなかった。</p> <p>(2) 工場調査結果</p> <p>当該過給機とA-DGに取付けられていた残りの3台の過給機をメーカーの工場に搬送し、詳細調査を行った。</p> <p>a. 外観目視点検結果</p> <ul style="list-style-type: none"> コンプレッサカバー内面の内周部に、全周に渡りすじ状の接触跡が認められた。 ロックナットのコンプレッサホイール側座面に、光沢が確認され周方向の摺動跡が認められた。また、締付け状態を確認したところロックナットは緩んでおりトルクがかかっていない状態であることが認められた。 コンプレッサホイールの翼部に、コンプレッサカバーと接触したと思われる接触跡が認められた。また、コンプレッサホイールのシャフト部端面に、ロックナットおよびフリガスリーブとの接触によるものと思われる摺動跡が認められるとともに、コンプレッサホイールシャフト貫通部内面に、シャフトとの接触によるものと思われる摺動跡が認められた。 フリガスリーブに、コンプレッサホイールとの接触面に摺動跡が認められたが、異常は認められなかった。 フランジ取付ボルトは、8本中、1本の脱落が認められ、その他の7本は、ネジ部途中にて折損が認められた。

原因調査

- ・フランジの内周部に、損傷および一部欠損が認められた。
 - ・ノズルリングは、全ての翼が損傷しており、全体が大きく変形していた。
 - ・タービンハウジングは、一部に貫通したひび割れが認められた。・タービンロータのシャフトは、タービンホイールとの溶接部で折損しており、コンプレッサホイール取付け部において、周方向に複数の摺動跡が認められた。また、タービンホイールの翼は大きく破損していた。さらに、中心部（ハブ部）付近からの破損も認められた。
 - ・タービンバックプレートは、一部が欠損するとともに、ひび割れ、変形等が認められた。
 - ・ラビリンスプレートに、欠損および軸貫通部近傍に接触跡が認められた。
 - ・ベアリングハウジングのタービン側のフランジ外周部の一部に、欠損が認められた。
- b. 材料確認結果
過給機主要部品の使用材料についてミルシート等を調査した結果、異常は認められなかった。
- c. 各部寸法計測結果
今回の事象による損傷・変形と思われるもの以外に異常は認められなかった。
- d. 浸透探傷試験結果
当該過給機のシャフトおよびタービンホイールの浸透探傷試験（以下PTという。）を実施した結果、タービンホイール背面（コンプレッサ側）ハブ部に、中心から約20mmの位置に円周状のPT指示が漸続的に認められ、最も長いものは約10mmであった。
- e. 破面観察結果
当該過給機のシャフトおよびタービンホイールなどについて、破面観察を実施し、それらの破面を走査型電子顕微鏡にて拡大観察を実施した。
- ・シャフトは、溶接部が全周に渡って破断しており、損傷部には破断面全体に渡り擦り傷が多数認められ、一部の破断部には延性破壊の特徴であるディンプルが認められた。
 - ・タービンホイールは、タービンホイール側シャフト折損部に破断面全体に渡り擦り傷が多数認められ、一部にディンプルが認められた。また、タービンホイール破損部の破面は、全体的に凹凸が大きく、デンドライト境界に沿った割れの模様が認められるとともにディンプルと推定される破面が部分的に認められた。また、タービンホイールPT指示部破面は、ディンプルが認められた。
 - ・フランジ取付ボルトの折損部は比較的平坦であり、破面は、ディンプルが認められた。
- f. 断面マイクロ組織観察結果
当該過給機のシャフトおよびタービンホイールなどの断面マイクロ組織観察を実施した。
- ・シャフトネジ部は、コンプレッサホイールとの取り合い付近に付着物が認められた。なお、付着物を分析した結果、アルミニウムであることが確認された。
 - ・タービンホイールは、割れがジグザグ状で概ねデンドライトの境界を進展していた。コンプレッサ側表面に微小なき裂が認められたことから、コンプレッサ側を起点としたき裂が発生した可能性が考えられる。
 - ・フランジ取付ボルトは、破断部近傍に著しい変形に伴うすべり線が多く認められた。
- g. 硬度測定結果
当該過給機のシャフトおよびタービンホイールなどについて、硬さ試験を行い異常は認められなかった。
- h. 材料成分分析結果
電子線マイクロアナライザーによる成分分析を行い、異常は認められなかった。
- i. 残り3台の過給機の点検結果
外観目視点検・寸法測定・ロックナットの緩み等について、異常は認められなかった。

以上の工場調査結果から、当該過給機のタービン側が大きく損傷しており、コンプレッサ側のロックナットに緩みが認められ、コンプレッサホイールにはシャフトとの取付け部に周方向の摺動跡が認められるとともにナット締付け部に摩耗が認められた。また、破面調査の結果、デンドライトに沿った破面および延性破面が認められ、タービンロータのシャフトとタービンホイールおよびフランジ取付ボルトは強制的に破壊したものと考えられる。

(3) 破片回収結果

現地および工場にて回収した破片を合わせた総重量から、破片は全て回収したと判断する。

(4) 過給機設計に関する調査

過給機は、回転部の構造として両ホイールをシャフトでつなぎ、その間に軸受機構を設置することでコンパクトな構造とし、メンテナンスのため、コンプレッサホイールを脱着可能なロックナット構造としている。

また、タービンホイールとシャフトは、電子ビーム溶接で一体接合し、万が一、高速回転でタービンホイールが損傷した場合でも、電子ビーム溶接部が折損することで、内部潤滑油の漏えいによる火災が発生しないよう設計されている。

当初の設計では、全ての過給機のロックナットは標準的なネジ加工である右ネジを採用していたが、平成元年以降、トラック・乗用車向けエンジンの出力アップに伴い、過給機の高速回転化要求が生じ、ロックナットの緩みによる損傷事例、並びにユーザからの改善要望を踏まえ、小型過給機については左ネジに変更してきた。過給機のロックナットを左ネジとした場合は、過給機の起動時・運転時・停止時ともロックナットにかかる回転力はロックナットが締まる方向に力が働くこととなる。しかし、当該過給機は小型過給機に比べ回転数が低く左ネジへの変更対象外であり、ロックナットは設計上、右ネジのままであることを確認した。

なお、A-DGの出力低下について評価した結果、4台中1台の過給機の機能喪失により、出力が約32%低下することがあり、今回3,120kWから約2,000kW(2,136kW)への約32%低下は、1台の過給機が損傷したことによるものと考えられる。

(5) メーカー知見の調査

当該過給機製造メーカーにおいて過去に経験した過給機の損傷事例の損傷部位は主に「タービンホイール翼部」「タービンホイールハブ部(以下、ハブ部という。)」 「シャフト溶接部」であるが、「ハブ部」からの損傷のみ翼部ならびにシャフト溶接部の損傷を伴っていた。なお、他の損傷部位については、ハブ部の損傷はなかった。

また、メーカーによるタービンロータ損傷時の挙動を確認するためのタービンロータの過回転による実証試験によると、当該タービンロータはハブ部から損傷するとともに、翼部ならびにシャフト溶接部の損傷を伴っていた。

なお、この際フランジ取付ボルトの折損、フランジの外れ、タービンホイールの外部への飛び出しおよびタービンハウジングのき裂も認められた。

(6) 当該過給機の点検履歴

当該過給機は、ローテーション運用のため2台を追加購入した内の1台であり、第15回定期検査にてA-DGへ取付け、その後、4定期検査毎に点検を実施しており、その点検結果に異常は認められなかった。

なお、過給機の点検は、第21回定期検査までは、メーカー工場において分解点検を行っていたが、第22回定期検査以降は、現地にて分解点検を行っていた。

(7) 原因調査のまとめ

工場調査における破面調査の結果、タービンロータのシャフトとタービンホイールには延性破面およびデンドライトに沿った破面が認められたことから、強制的に破壊したものと考えられる。

現地調査において当該過給機タービン上流側の機器に損傷や異物は認められず、下流側にて回収した破片についても当該過給機のものとして判断できることから異物による損傷の可能性は低い。

工場における分解時にコンプレッサホイールのロックナットに緩みが認められたこと、ロックナット等に摺動跡が認められるとともにコンプレッサホイールの材質であるアルミニウムがロックナットに付着していたこと、また、タービンロータのシャフト部(コンプレッサホイール取付け部)に周方向の摺動跡が認められアルミニウムの付着が認められたことから、ロックナットが緩み、コンプレッサホイールが空回りした可能性が考えられる。

当該過給機の損傷部位とメーカー知見の調査結果を比較するとタービンホイールのハブ部、翼部、シャフト溶接部が損傷していることから、今回の損傷は過回転によるハブ部からの損傷に類似している。

以上より何らかの原因によりロックナットが緩み、タービンホイールが過回転となったことが当該過給機の損傷につながったと考えられることから、ロックナットの緩みおよびタービンホイールが過回転となる要因について検討を実施した。

原因調査

3. 損傷要因の検討

原因調査結果を踏まえ、損傷に至る要因について試験や解析により確認・検証を行った。

(1) 緩みに対する検討

a. 前回点検時の締付方法

当該過給機分解時、ロックナットにトルクがかかっていなかったことからロックナットの締付けについて着目し、過給機組立時の作業方法の調査を行った。

1) 作業要領書について調査を行った結果、過給機の分解点検作業は、定期点検工事用の作業要領書に基づき実施しているが、当該過給機の具体的な作業手順はDG機関本体の一連の作業ではなく、過給機単体で施工されることおよび過去に当該過給機における不具合が発生していないことから、分解・組立に関する詳細な手順はメーカー推奨のノウハウ等である「整備解説書」に基づき実施している。なお、各部の寸法、組み込み、非破壊検査等は点検記録として保存されているが、ロックナット等の締付記録は保存されていなかった。

2) 締付方法について調査を行った結果、上述の整備解説書では、ロックナット締付方法として過給機を床面に横置きにした図が示され、タービンホイールを固定しロックナットを規定トルクで締付けることとされているが、前回(第23回定期検査)の点検についてメーカー指導員へ聞き取りしたところ、組立時にメーカー工場での締付方法(専用受台を用い縦置き)を考慮して過給機を縦置きとしたが、専用受台を使用せず、補助作業員が過給機を手で支える不安定な状態で締付けを行っていたことが分かった。このため、ロックナットの適正なトルクによる締付けができなかった可能性が考えられる。

b. 締付作業状態の違いによる締付力のばらつきを確認するため、前々回まで実施していた横置きによる締付作業と、前回実施した専用受台を使用しない縦置きによる締付作業による締付軸力の差を確認する試験を実施した。その結果横置きであれば、ほぼ適正軸力の45kNの軸力を得ることができたが、縦置きの場合は過給機を支える部位によりばらつきが大きく、30kNより小さい軸力となる場合があることが分かった。よって、前回の分解点検において専用受台を使用せずに過給機を縦置きにしてコンプレッサホイールを支えた状態で締付た際には、コンプレッサホイールの抵抗により適正なトルクによる締付けができないため、締付力が不十分であった可能性があることが分かった。

(2) 締付力不十分により過回転となることの検討

a. 締付力が不十分なことにより、ロックナットの締付けによる軸力が100%負荷時に必要な軸力を下回る場合には、コンプレッサホイールが回転に追従できず、滑りが生じる可能性がある。この滑りについて、試験を行った結果、滑りの発生が確認され、その際の軸力は約29kNと計算された。また、コンプレッサホイールが微小に滑ることにより摩擦が生じ、これが繰り返されることで軸力がさらに低下する。その結果、コンプレッサホイールが連続的に滑ることにより、追従不良につながったと考えられる。

<p>原因調査</p>	<p>b. コンプレッサホイールが追従不良となったことにより、タービンホイールの回転数より遅れが生じ、当該コンプレッサが吐出する空気の圧力、流量が低下する。解析結果では、タービンホイールの回転数に対して、滑り率約5%以上で吐出圧力が健全な他のコンプレッサ3台に押し負け、健全な3台の過給機からの高温の空気が滑りを起こしたコンプレッサへ逆流してくることとなる。この影響により、ロックナットネジ部に塗布されていた緩み止め剤の緩み抑制効果が低減され、また、ロックナットの締付けが回転力により緩む方向（右ネジ）であることと相まってロックナットが緩んだ可能性が考えられる。これにより、コンプレッサホイールの滑りが増大しタービンホイールの過回転に至ったと考えられる。</p> <p>(3) 過回転による応力評価 応力解析を行った結果、タービンホイールに負荷される応力は遠心力が支配的であり、定格運転時（46, 600rpm, 584℃）において、ハブ部の応力が最も高く、半径方向平均応力は260MPaであった。一方、当該材料の降伏応力は811MPaであり、定格運転時にタービンホイールの損傷が発生することはない。しかし、タービンホイールが過回転になると発生応力は回転数の2乗に比例するため、回転数が84,000rpmを超えると平均応力が材料の降伏応力を超え、ハブ部の損傷に至る可能性があることが分かった。なお、当該過給機においてタービンホイールハブ部にPT指示が認められており、応力解析結果と整合することが確認された。</p> <p>4. 損傷メカニズムの推定 上記の調査結果等から、損傷メカニズムについて以下の通り推定を行った。</p> <p>(1) 前回点検時、コンプレッサホイールのロックナット締付け作業において、専用受台を用いずに不安定な状態で作業を行うなど締付け方法に不備があり、締付けトルクが適正に作用せずコンプレッサホイールの締付け力が不十分であった。</p> <p>(2) 締付け力が不十分な状態で負荷試験を行うことで、コンプレッサホイールの微小な滑りにより摩耗が生じ、負荷試験を繰り返すことで徐々に軸力が低下した。</p> <p>(3) 軸力の低下により、今回の負荷試験における100%負荷時にコンプレッサホイールの追従不良が発生し、当該過給機の空気圧縮機能を喪失した。これにより、A-DGの出力が低下したものと考えられる。</p> <p>(4) ロックナットの緩みによりコンプレッサホイールが空回りし、タービンホイールの回転に対するコンプレッサの負荷（抵抗）が減少したため、タービンホイールの回転数が上昇しタービンホイールが過回転となった。</p> <p>(5) タービンホイールが過回転となることで、遠心力による過大な応力がタービンホイールに発生し、応力集中部であるハブ部よりタービンホイールが損傷した。</p> <p>(6) タービンホイールが損傷した衝撃により、シャフト溶接部が折損するとともに、破損した部品により周囲の部品が損傷した。</p>
<p>事象の原因</p>	<p>過給機の分解・組立に関する詳細な手順については、メーカー指導員が運用している整備解説書に基づいていたが、前回の分解点検復旧時に専用受台がないにもかかわらずメーカー工場での締付け方法を考慮して過給機を縦置きとした。このため不安定な状態となったことから、コンプレッサホイールを支えて締付けを行った結果、締付けたトルクが適正に軸力として作用せず初期軸力が低くなった。</p> <p>その後、A-DGの運転に伴い軸力が次第に低下し、今回の負荷試験においてコンプレッサホイールが連続的に滑り始めた。締付け力が不十分であったことと、ロックナットの締付けが回転力により緩む方向（右ネジ）であることが相まって、ロックナットが緩み、タービンホイールが過回転となった。過回転によりタービンホイールのハブ部に過大な応力が発生・損傷し、さらに、タービンホイールが破損した衝撃により、シャフト溶接部が折損するとともに、破損した部品により周囲の部品が損傷したものと推定される。</p>
<p>保護装置の種類及び動作状況</p>	<p>なし</p>
<p>放射能の影響</p>	<p>なし</p>
<p>被害者</p>	<p>なし</p>
<p>他に及ぼした障害</p>	<p>なし</p>
<p>復旧の日時</p>	<p>平成25年3月下旬（過給機の復旧およびA-DG負荷運転予定）</p>
<p>再発防止対策</p>	<p>1. 今後の分解点検は、当該ロックナットに対し確実に締付けトルクを付与することができるよう、適切な専用受台を用いて組立てを行う。</p> <p>2. 締付け作業において、コンプレッサホイールを把持しない等適切に締付けを行うための注意事項を作業手順書に明記し、関係者に周知徹底する。</p> <p>3. 当該DG全ての過給機について、ロックナットの締付けを回転方向と逆にすることにより緩み防止措置を行ない、当該DGに取付けた後、DGの健全性を確認する。</p>