

福島第一原子力発電所6号機における液滴衝撃エロージョンによるタービン抽気配管損傷とその対応について

Through wall degradation problem of the turbine extraction steam drain piping due to liquid drop impingement and measures taken for this problem at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Unit 6

東京電力(株)	稲垣 武之	Takeyuki INAGAKI	Member
東京電力(株)	小林 照明	Teruaki KOBAYASHI	
東京電力(株)	島田 森	Shigeru SHIMADA	
東京電力(株)	井上 龍介	Ryousuke INOUE	
東京電力(株)	薄葉 智	Satoshi USUBA	
東京電力(株)	木村 剛生	Takeo KIMURA	

Through wall degradation was found on the extraction steam drain piping of Unit 6 of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant owned by Tokyo Electric Power Company after replacement of the turbine rotors with those of higher thermal efficiency. The mechanism of this degradation was loss of material due to liquid drop impingement. Since the estimated life time of the piping based on wall thickness measurements before the replacement was at least 9 years, the rapid wall thinning occurred after the replacement. This paper describes a summary of the phenomenon, its degradation mechanism and root cause, a temporary measurement taken for an immediate action and permanent measures taken during the next refueling outage.

Keywords: erosion, liquid drop impingement, loss of material, extraction steam piping, turbine rotor replacement

1. 緒言

2010年3月、東京電力(株)福島第一原子力発電所6号機(以下、1F-6という)のタービン抽気ドレン配管に貫通穴が生じ、空気が同穴を通じて復水器内に流入していることが判明した。調査の結果、貫通穴は液滴衝撃エロージョンによる減肉であることがわかった。

同配管の当該部は、以前から液滴衝撃エロージョンの影響を受ける可能性がある部位として認識されており、計画的な肉厚測定が実施されていた。2009年に実施された前回の測定結果からは、当該部の余寿命は9年以上と評価されていた。従って、今回の事象は、当初の想定を大きく上回る速度で減肉が進行したことを示している。

6号機では2009年に実施された前回の定期検査において、高圧、低圧全てのタービンロータの取替が実施されており、取替後のタービンは従来のものに比べ熱消費率が向上されている。この取替により、タービン系のヒートバランスも多少ではあるが変わっている。

本稿では、損傷部位の調査に基づく本事象の原因究明の結果、タービン取替を含む背景要因の検討、対応策や類似事象発生防止対策について説明する。

2. 事象発生までの経緯

2.1 1F-6タービン取替の概要

1F-6では、2009年3月から6月までの間に実施された第21回定期検査において、高圧タービンロータ、低圧タービンロータ、ノズルダイヤフラム及び低圧タービン内部車室の取替が実施された。取替の主目的はタービンのエロージョン・コロージョン等の経年劣化対策である。

この取替の際、新しいタービンは、最新設計を取り入れると共に、低圧タービンの最終段翼を長翼化することで約4%の熱消費率向上を図っている。

Fig.1 に取替前後の低圧タービンの比較を示す。この変更により、タービン系全体のヒートバランスも多少ではあるが変わっている。

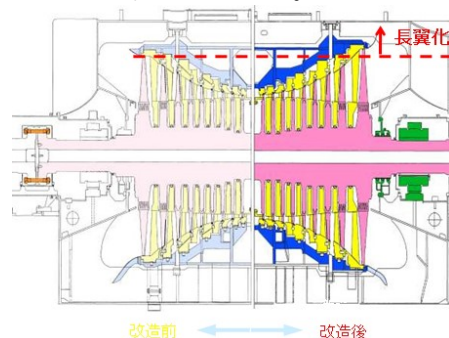


Fig. 1 1F-6タービン取替における前後比較

2.2 タービン取替後のタービン抽気系ドレン量の増加と運転モードの変更

第 21 回定期検査後のプラントの起動操作を行っていたところ、「HP TURB 5TH STAGE EXT STEAM DRIP LEG LEVEL HIGH」（高圧タービン第 5 段抽気ドレン水位高）の警報が頻発する事象が発生した。

高圧タービン第 5 段抽気ドレン配管は、抽気配管で連続的に発生する湿り蒸気を含む凝縮水（以下、ドレンという）を排出させる目的で設置されている。Fig.2 に示すように、通常ラインとバイパスラインで構成されており、どちらも主復水器へ接続されている。

通常ラインおよびバイパスラインには、それぞれに主復水器近傍にオリフィスが設置されており、それぞれのオリフィス口径は通常ラインが 8.5mm、バイパスラインが 16.2mm となっている。発生したドレンは通常ラインに設置されたオリフィスを介して急激に減圧されて膨張し、流速を増して連続的に主復水器へ流れるようになっている。

両ラインの上流部には抽気配管で発生するドレンが溜まる場所（以下、ドレンポットという）が設けられている。また、ドレン量の増加を検出する水位制御器が設けられている。

バイパスラインに設置されている水位制御弁は、運転中、起動操作初期を除き常時閉である。通常ラインにあるドレンポット内のドレン量が増加し、ドレンポットの水位が上昇すると水位制御器から「水位高」信号が発信して、水位制御弁が自動開閉するよう制御すると共に中央制御室に「ドレンポット水位高」警報が発報する。

今回の警報頻発事象は起動操作中、水位制御弁を閉にした直後に発生した。原因はタービン取替に伴いドレン量が増加し、通常ラインで処理しきれなくなったものと推定された。

水位制御弁を頻繁に開閉させることは同弁の駆動部等に悪影響を与えることから、同弁を常時開とする運転モードに変更することとした。

2.3 気体廃棄物処理系系統流量増加と貫通穴の発見

2010 年 2 月 5 日、気体廃棄物処理系の「排ガス粒子フィルタ出口流量高」警報が単発的に発生する事象が確認され、その要因について検討を行ったところ、主復水器内に非凝縮性ガスの滞留または主復水器内への空気の流入が考えられたことから調査を開始した。

2 月 24 日、上記調査の一環で水位制御弁を開操作したところ、気体廃棄物処理系の系統流量が減少した。このため、水位制御弁付近の配管に空気の流入がないか現場調査を行っていたところ、通常ライン（以下、当該ドレン配管という）のオリフィス付近から蒸気と水の漏えいが発見された。

当該ドレン配管から漏えいが発生したこと、また水位制御弁を開閉することにより、気体廃棄物処理系の系統流量が変動することから、当該ドレン配管に何らかの不具合があり、主復水器の真空度や系統流量に影響を与えていると想定された。このため、プラントの運転を停止し、当該ドレン配管の保温材を外して調査したところ、配管を貫通する穴が発見された。

3. 貫通穴の調査及び原因、背景要因の究明

3.1 外観目視点検結果

プラントを停止後、主復水器を大気圧にして、当該配管の外観目視点検を実施した結果、以下のことが確認された。

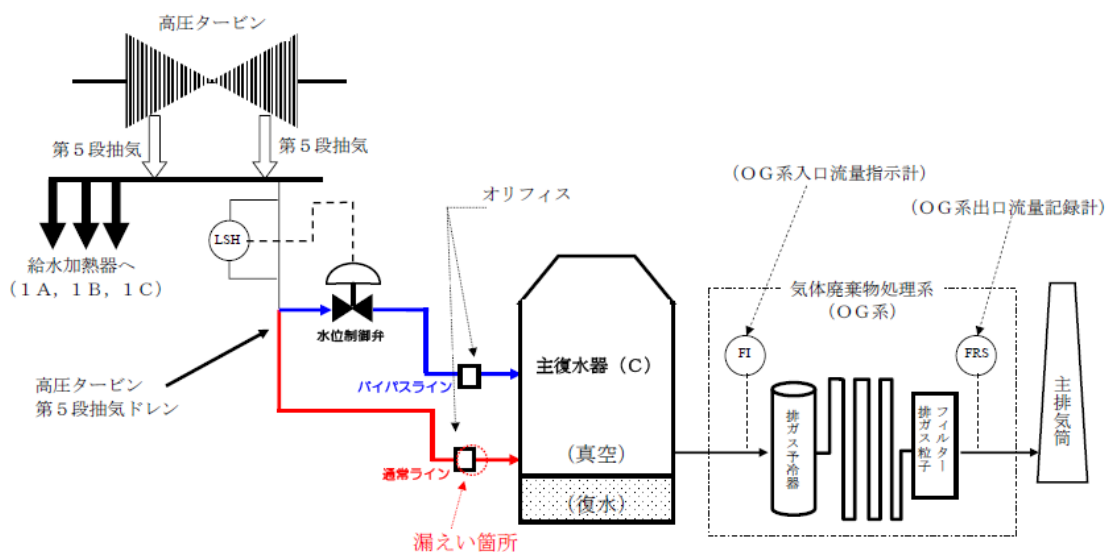


Fig. 2 高圧給水加熱器ドレン系統概略図

- a. 当該ドレン配管（管外径：114.3mm）は、主復水器に接続され、また、主復水器近傍にオリフィスが設置されており、漏えい箇所はそのオリフィス近傍で確認された。
- b. 漏えい箇所はオリフィス中心から約 53mm 下流側であり、配管の上面に発生していた。また漏えい箇所の大きさは幅 2mm（最大）、長さ約 34mm のスリット状で、配管の周方向に発生した貫通孔であった。
- c. なお、貫通孔は当該箇所の 1 箇所だけであり、当該ドレン配管の他の部分には異常は認められなかった。

3.2 配管内面及びオリフィスの目視観察結果

当該箇所を切り出して半割にし、配管内表面を観察した結果、**Fig.3** に示すように著しい減肉が見られ、貫通孔が確認された。また、減肉が認められない部分は薄い黒色の皮膜に覆われていた。当該箇所近傍には、流体の流れ方向と概ね直角のステップ状の模様が見られ、流れ方向に対して何段にも分布していた。

一方、配管内表面には、腐食、孔食は認められなかった。貫通孔にもエロージョン・コロージョンに特徴的なウロコ状や馬蹄形模様は認められなかった。オリフィス内部を観察した結果、異物は無かった。また異物が存在したと考えられる痕跡も認められなかった。

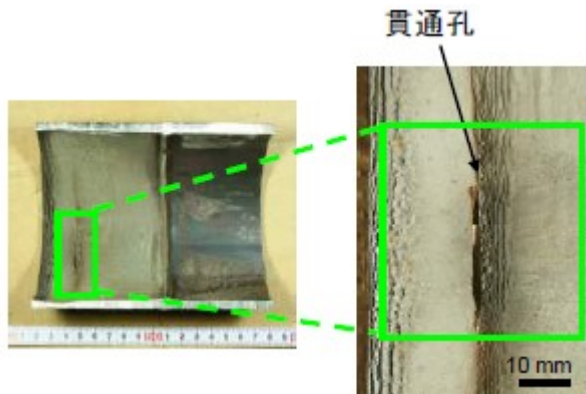


Fig.3 損傷部の内面観察結果

3.3 超音波を用いた配管肉厚測定結果

超音波を用いて、オリフィス上流部および、貫通孔周囲も含めたオリフィス下流部の配管肉厚測定を実施した結果、以下のことがわかった。

- a. 貫通孔が確認されたオリフィス上面部貫通孔周囲の減肉量は著しく大きかった。
- b. 貫通孔反対側（オリフィス部下面）には、有意な減肉は認められなかった。
- c. オリフィス上流側配管およびオリフィス下流側配管（主復水器側）についても、有意な減肉は認められなかった。

また、当該系統のその他偏流が生じる部位について、配管肉厚測定を実施した結果、十分な余寿命を有していることを確認した。

3.4 劣化原因に関する考察

上記の状況調査および要因調査の結果から、以下の事実がわかった。

- a. 当該ドレン配管は、湿り蒸気を含むドレンが連続的に流れる配管であり、設置されたオリフィス下流部では、オリフィスを介して急激に減圧・膨張し、ドレンの流速が増して連続的に主復水器へ流れる配管であること。
- b. 貫通孔はオリフィス下流部に発生しており、その周囲の減肉が著しく進展していた。また、調査した貫通孔近傍の領域ではステップ状の模様が見られたこと。
- c. オリフィスのように、急激な減圧・膨張が発生するメカニズムを有する部位が配管に介在している場合、その下流において減肉の発生が報告されていること。
- d. 減肉部に確認されたステップ状の模様は、液滴による影響が支配的なエロージョンに特徴的な現象であること。

これらの事実から、当該箇所の減肉はエロージョンにより貫通孔に至ったものと考えられた。

3.5 エロージョンによる減肉発生メカニズムの推定

これまでの調査に基づきエロージョンによる減肉が発生し、貫通孔に至るメカニズムについて検討した。その結果、通常運転サイクル期間中は、**Fig. 4** 上段に示すようにオリフィス下流の配管には上面、下面ともに保護液膜が形成されるのに対し、今サイクル運転中のほとんどの期間は、バイパスラインに設置されている水位制御弁を開運用にしたことで当該ドレン配管に流入するドレン量が減少し、**Fig. 4** 中段に示すように下流配管の上面は保護液膜の少ない状態になっていたと推定された。

水位制御弁の構造上、ドレン流量は一定とはならず、**Fig.5** に示す息継ぎのような現象が繰り返されていた。このような状況において、**Fig.5** の状態①と②ではドレンは主にバイパスラインを流れ、状態③においては、一時的ながら当該ドレン配管に大量のドレンが流れた。この結果、**Fig. 4** 下段に示すように保護液膜のないオリフィス下流配管上面にドレンが間欠的にあたり、著しいエロージョンが発生したものと推定される。

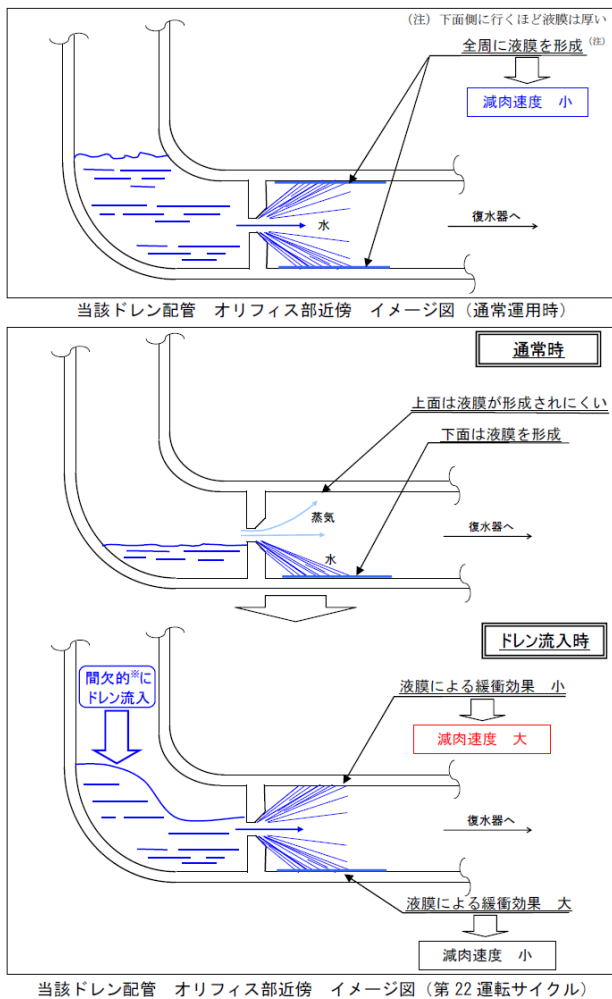


Fig. 4 当該ドレン配管オリフィス部近傍の推定状況

以下に本メカニズムの詳細を述べる。

- 貫通孔が発生した当該箇所は、元々、オリフィスによるフラッシュを発生するメカニズムを有する部位であり、エロージョンが起りやすい環境下であった。(Fig.4 上段図参照) ただし、オリフィスによりドレンがほぼ均等に拡散されていたため、オリフィス下流配管は上面も下面も保護液膜が形成されていた。
- タービン取替工事の影響により、当該ドレン配管への流入ドレン量が増加した。
- プラントを起動し定格出力に到達後、「ドレンポット水位高」警報の頻発により、運転中は水位制御弁を「開運用」とした。
- 水位制御弁の「開運用」とし、バイパスラインを併用したことにより、当該ドレン配管に流れるドレン量が減少したため、当該ドレン配管のオリフィス上流部では、蒸気（気相）の割合が大きい状態で蒸気とドレンがオリフィスを通る状態となった。
- オリフィス上流部内の蒸気の割合が大きい状態では、オリフィス上流部の水位は通常運用時よりも水面位置が低くなるため、蒸気がオリフ

- イスを通過する際、オリフィス孔近傍まで満たされた水がオリフィス下流部の下面に飛ばされてドレンの液膜が形成された。(Fig.4 中段)
- オリフィス下流部の下面はドレンによる液膜が形成された状態であったが、オリフィス下流部の上面は蒸気により比較的液膜が形成されにくくエロージョンが進みやすい状態（液滴が直接配管表面に作用する状態）となった。(Fig.4 中段)
- バイパスラインに設置されている水位制御弁が玉型弁で弁座部分の構造が堰と同様の効果を持つため、バイパスラインを通過するドレン量は一定とはならず、Fig.5 に示す息継ぎのような現象が発生した、このため、同図の状態③において間欠的にドレンが通常ラインに流れる結果となった。(Fig.4 下段)
- オリフィス下流部の上面は液膜が形成されにくくエロージョンが進行しやすい状態にあったため、通常運用時でも比較的減肉していた上面側が、間欠的なドレンの流入に伴いさらに著しくエロージョンが進み、貫通孔に至った。(Fig.4 下段)

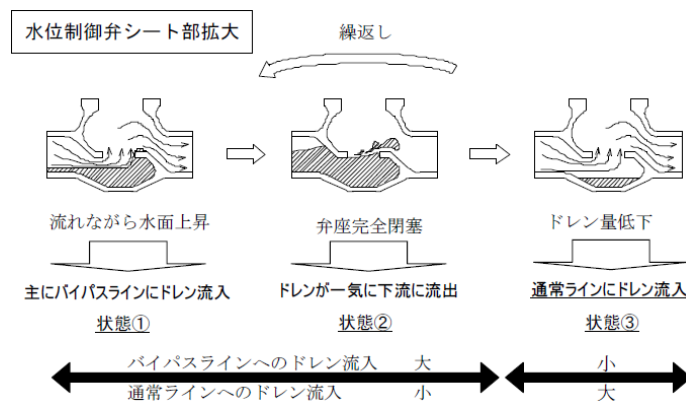


Fig.5. 通常ラインに間欠的にドレンが流れるメカニズム

4. 今回の事象に対する対策

4.1 応急対策

(1) オリフィス下流部近傍の配管肉厚変更

今回確認された減肉は、プラント起動から約半年を経過した段階で貫通まで至っていることから、2010年8月に予定されている次回定期検査開始までの運転期間中（約5ヶ月）に配管貫通まで至らないよう十分な余裕を見込んで、従来のものよりも肉厚が厚い配管に変更することとした。

オリフィス下流部は、2009年の第21回定期検査にて肉厚測定を実施しており、保守的な評価を行うべく、当該肉厚測定結果の最大値から第22運転サイクルで配管貫通に至ったと仮定して算出した減肉率を用いることとした。

なお、貫通孔が認められなかったオリフィス下流側配管についても、念のため従来のものよりも肉厚が厚い配管に変更することとした。当該配管部については、今回測定した肉厚を基に減肉率を算出し、当該算定値の最大減肉率を用いた。

算出した減肉率を用い、オリフィス下流部、下流配管部それぞれについて、6号機次回（第22回）定期検査までの運転時間を基に次回定期検査時の残肉量および必要最小肉厚（tsr）に至るまでの余寿命評価を行った。その結果、それぞれについて、以下の肉厚変更を実施することとなった。

- オリフィス下流部：公称肉厚 6.0mm から 15.0mm に変更
- オリフィス下流配管：公称肉厚 6.0mm から 8.6mm に変更

（2）当該ドレン配管のオリフィス口径の変更

当該ドレン配管へのドレン流入量を多くし、バイパスラインの使用を極力抑える観点から、当該ドレン配管のオリフィス口径を従来の口径よりも大きいものに変更することとした。

既設オリフィスは、過去の流入ドレン量測定値（6,171kg/h）に約30%の余裕を採って7,983kg/hの流量確保が可能なオリフィス径：φ8.5mmとしていた。

今回の不具合対応の中で、当該オリフィスに流入するドレン流量を実測データ（ドレンポット水位高ANN発生間隔や水位制御弁閉後のANN発生までの時間等）を基に算定した結果、最小7,994kg/h、最大10,174kg/hであることを確認している。

通常ラインによる抽気ドレンの排出を優先し、保守的にドレン流入量の最大値10,174kg/hに既設オリフィス径設定時の裕度（30%）を採用したドレン流入量（13,226kg/h）を排出可能なオリフィス径を算定すると、φ11.2mmとなる。

一方、第21回定検時にタービンの改造を行っており、各種パラメータに実績を反映したヒートバランス上、第5段抽気的全ドレン量が改造前と比較して10.0%増量することを確認している。また、オリフィス上流側の圧力として抽気圧力（第1給水加熱器器内圧力）が、2.31MPaであることを確認している。

改造前後に、ドレン流量、抽気圧力が変化していると想定できることから、タービン改造に伴う流入ドレン量の増加を考慮した流入量（6,788kg/h）、抽気圧力を前提とし、既設オリフィス径設定時の裕度（30%）を採用したドレン流入量（8,824kg/h）を排出可能なオリフィス径を算定するとφ9.2mmとなる。

今回の不具合は、流入するドレンを通常ラインで排出することが困難となり、バイパスラインを常時使用したことが原因で発生した事象であり、設定したオリフィス径が小さく、バイパスラインを常時使用せざるを得なくなった際は、本事象のメカニズムと同様、通常ラインでの過度な減肉を助長すること

となる。また、大きなオリフィス径（16.2mm）を有するバイパスラインの使用に伴う熱損失も大きい。

タービン改造に伴うヒートバランスの変更をもとに設定されたオリフィス径（9.2mm）では、8,824kg/hのドレンを排出可能であり、これは、測定されたドレン流入量（7,994kg/h～10,174kg/h）に対してほぼ妥当な値といえるが、

- 第5段抽気のドレンはNo.1給水加熱器と抽気ドレンラインに分配されており、当該比率を評価するのは技術的に困難であること
- 建設時での設計においても評価できていないことを確認していること
- 不具合の原因となったバイパスラインの使用を極力抑えるという点において、不十分である可能性を否定できないこと

から、通常ラインでの抽気ドレン排出を優先し、実測のドレン流入量をもとに算定されたオリフィス径（11.2mm）を採用することとした。

4.2 恒久対策

4.1で講じた対策ではオリフィス下流におけるエロージョンの発生を完全になくすことは不可能である。このため、2010年8月から予定されている次回定期検査において、オリフィスを主復水器へ直接接続（主復水器内へ移設）することとした。本対策を実施することにより、万が一オリフィス下流からの漏えいが発生したとしても、ドレンによるアタックを考慮して設計した復水器内であることからプラントの安全性、信頼性が損なわれることはない。

5. 今回の事象から得られた知見の反映

今回の事象は、タービン取替に伴うヒートバランスの変化、抽気ドレン量の変化を設計時に十分考慮できなかったことに起因しており、以下の事項が新たな知見として得られた。

- タービン取替による抽気ドレン量は評価できるものの、ドレンの流れ方については、設計と実機では必ずしも一致せず、場合によりドレン排出不良に至るリスクが潜在していること。
- 復水器につながる系統配管でオリフィスが設置されている場合には、バイパスラインを常時使用する等の運用変更を行うことで、急激なエロージョンが発生するリスクが潜在していること。

今後のタービン取替工事等において、今回得られた知見を反映することとする。