

蒸気タービン翼素への不純物付着による性能低下と新洗浄方法*

(第1報, 付着現象と従来洗浄方法の検討)

秦 聰^{*1,*3}, 平野 竜也^{*2}
若井 宗弥^{*2}, 塚本 寛^{*3}

New On Line Washing Technique for Prevention of Performance Deterioration due to Fouling on Steam Turbine Blades

(1st Report, Fouling Phenomena, Conventional Washing Technique and Disadvantages)

Satoshi HATA^{*4}, Tatsuya HIRANO,
Tokiya WAKAI and Hiroshi TSUKAMOTO

^{**} Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Department of Biological Functions and Engineering
Biofluid Mechanics Laboratory,
Kyushu Institute of Technology, 1-1 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 808-0196 Japan

Mechanical-drive steam turbines have the heavy deposition of fouling materials on blade and nozzle path surfaces due to contaminated materials such as silica and sodium in steam. As a result, turbine performance tends to be deteriorated gradually. This first paper introduces this fouling phenomena and actual conventional washing procedure in order to prevent the fouling problem and its practical disadvantage by showing thermodynamics analysis. In the second report, the new online washing technology by water injection nozzles is introduced and the most important design factors of this washing system are discussed by showing the results of detail analysis and online washing test results.

Key Words: Steam Turbine, Thermodynamics, Numerical Analysis, Steam Impurity, Deposition, Fouling, On line Washing

1. 緒 言

石油化学プラントにおいてプロセスガス圧縮機を駆動する蒸気タービンは、500°C以上の高温、100 atm以上の高圧の蒸気を高エネルギー作動流体として用いた軸流ターボ機械である。この蒸気タービンは通常、長期運転され、場合によっては20年近くメンテナンスを実施せず運転される。この長期運転中に蒸気のフローパスはいろいろなダメージを受け、流体性能・強度に関して経年劣化が生じる。特に、蒸気中に含まれるSiO₂、Na、Clの化合物が、蒸気が膨張していくフローパスの各段の蒸気圧と温度に対応して析出しプロファイル表面に付着し、翼素性能を低下させる^{(1)~(16)}。付着物を洗浄する従来方法は、プラント全体の連続運転と生産性の観点から、効率的でない部分があり、その洗浄方法を構造も含めて改良する必要がある。

本論文では、蒸気中の不純物が翼素へ付着する現象

と性能への影響、従来浄化方法による洗浄効果について考察し、その問題点を検討した。この問題点を解決するための新しい洗浄方法については、第2報で報告する。

2. 翼素への不純物付着

蒸気タービンのノズルや動翼に付着するスケールの組成、分布、発生要因は、蒸気中の不純物の種類、タービンの型式、蒸気条件⁽¹⁷⁾などで異なり、非常に複雑であるため、スケールの分析値は原因の推定と対策を検討するうえで重要である。付着するスケールの種類には基本的に次のものがある。(1)SiO₂(シリカ)を主体とするもの、(2)配管内部洗浄剤とけい酸ソーダを主体とするもの、(3)酸化鉄を主体とするもの、(4)塩素成分を含むもの、(5)特殊成分(C, Pb, Zn)を含むもの。これらのスケールは、ボイラ水、給水、純水を処理する段階で入る不純物が析出したものである。か性処理や低pHりん酸処理の場合は、シリカが高圧部に付着しやすく、ヒドラジンなどを使用するVolatile処理では低圧段に付着する。また、か性処理や低pHりん酸処理の場合は、蒸気中にナトリウムやけい酸ソーダが多くスケールとして付着しやすい。高圧部では、りん酸ソーダ(Na₃PO₄)やけい酸ソーダ(Na₂

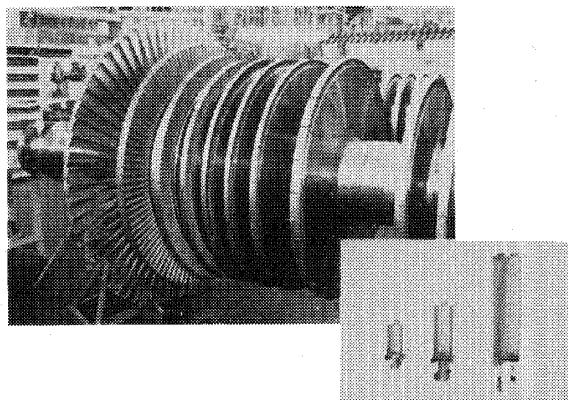
* 原稿受付 2005年12月26日。

*¹ 正員、三菱重工業(株)広島製作所ターボ機械技術部(☎733-8553 広島市西区観音新町4-6-22)。

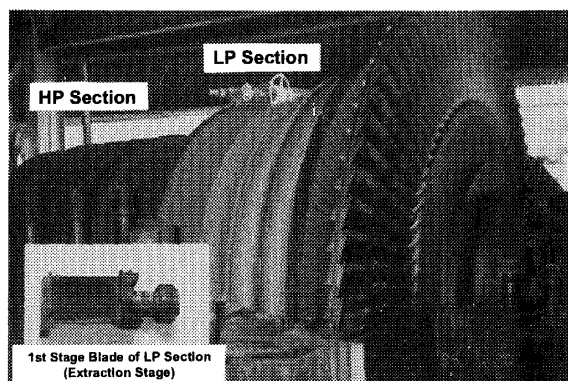
*² 三菱重工業(株)広島研究所機械プラント研究推進室。

*³ 正員、九州工業大学大学院生命体工学研究科(☎808-0196 北九州市若松区ひびきの1-1)。

E-mail: satoshi_hata@mhi.co.jp



(a) Ion Plating coated new rotor at assembling



(b) After 7 year long-term operation

Fig. 1 Fouling condition of turbine internals

SO₃)の形で付着しており、低圧部は蒸気の膨張に従い溶解度が低下し、けい酸(SiO₂)の形で析出している。

蒸気中でppbレベルの低温度の不純物が、高濃度レベルで表面に付着するメカニズムとしては次の項目が考えられる。(1)過熱蒸気中での溶解からの沈殿と表面への付着、(2)高温となっている表面での蒸気と乾燥、(3)吸収、毛細管現象、イオン変化による表面酸化による集中、(4)浮遊固形物の直接衝突による付着。

実際に機械的な問題もなく7年間長期間運転後のロータに付着したスケールの状況を図1に示す。第一段ノズルから中間段、低圧段にわたりスケールが付着していることがわかる。各物質の蒸気中における溶解度は、蒸気の温度と圧力によって決まっており、より高温・高圧であれば溶解度が大きくなり、蒸気タービン膨張過程で圧力・温度とも低下し溶解度は小さくなる。加熱域で乾いた状態では、蒸気中の濃度が、その圧力・温度での溶解度と同じになった時点から析出が始まり、より膨張すれば、溶解度との差が大きくなり析出量が増加する。

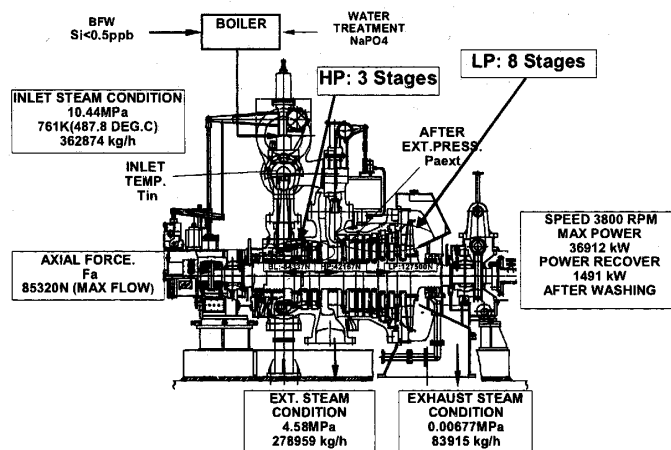


Fig. 2 Operation condition of extraction condensing turbine

3. スケール付着による影響

翼素プロファイル表面にスケールが付着することによって性能に与える影響を考察した。図2に示す蒸気タービンの高圧段および低圧段において、ノズルスロート部にスケールがある厚さで付着し、前流側あるいは後流側のノズル面積が減少すると、スロート幅が減少しノズル通過面積が設計値よりも小さくなる。各段の圧力分布と熱落差の分担が変わり、入口圧力が上昇し臨界速度が増加する。この面積の減少と各段圧力分布変化によって、ノズル通過蒸気速度と回転周速度との比である速度比が適正な値からずれて結果的に段効率が低下する。

また、スケールが付着する厚さ分布は一様でなく、プロファイル上の蒸気速度、圧力・温度分布に影響されるため、速度分布を制御してプロファイルロスを低減した適正形状からプロファイル形状が変化し、さらに損失が増加する。さらに長期間の運転中に、プロファイル表面に蒸気中の不純物が析出し、また、蒸気中に流入した固体・水粒子によるエロージョン、腐食性物質による表面のコロージョンなどにより、プロファイル表面の粗さが粗くなっていく。これに伴い、タービン効率も低下していく。

ノズル・動翼の全損失係数は、プロファイル損失と二次流れ損失に分けられ、プロファイル損失は表面粗さあるいは流速を基準にしたレイノルズ数で変化する。また、二次流れ損失はプロファイル高さとの比であるアスペクト比と表面粗さ、あるいは流速を基準にしたレイノルズ数で変化する。基本式を以下に示す。

全損失 ζ_t = プロファイル損失 ζ_p + 二次流れ損失 ζ_s であり、それぞれ、

ζ_p = 基本損失 \times レイノルズ数修正係数 C_{Re} ,

ζ_s = 基本損失 $\times C_{Re}$ / アスペクト比

で表される。ここで、 Re = 翼列出口速度 $C \times$ 翼列コード長 L / 翼列出口比体積 ν 、表面粗さの影響が主体となる臨界値 Re_{cr} = 係数 / (表面粗度 / L) とすると $Re < Re_{cr}$ の場合は、 $C_{Re} \propto 1/Re^{1/4}$ 、 $Re > Re_{cr}$ の場合は、 $C_{Re} \propto 1/(1/\text{表面粗度 } R_{max})^{1/4}$ となる。表面粗さが小さい場合、低レイノルズ数域では表面粗さよりもレイノルズ数に影響され、レイノルズ数が増加すると損失が低下するが、高レイノルズ数域ではレイノルズ数に関係なく表面粗さで損失が決まり、表面粗さが大きいほど損失が大きくなる⁽¹⁸⁾。

したがって、プロフィール形状やプロフィール間のピッチが小さい高圧段では表面粗さの影響を低圧段より大きく受け、アスペクト比が小さいので二次流れの影響も大きくなる。通常、数十 μm の表面粗さで、数%程度の効率低下が発生する。

また、蒸気タービンのノズルは多段オリフィスと等価に置き換えられる。スケールがノズルプロフィール表面に付着した後流側のノズルスロート面積が減少するが、一定の蒸気流量(質量流量)を流すために、前流段のノズル出口側圧力が上昇する。一方、圧力容器であるケーシングの耐圧設計は、高圧段一段および低圧段一段のノズル出口圧力をもとに強度評価し必要なケーシング厚さを決定している。そのため、スケール付着により前流段のノズル出口側圧力が上昇し、ケーシングの耐圧設計圧力に近くなった場合は、蒸気流量を減少させ、出力を落として運転することになり、結果的にプラント生産量に影響を与える。

図3は、低圧段ノズルスロート部でのスケール付着量とノズル出口圧力への影響を解析した例である。低

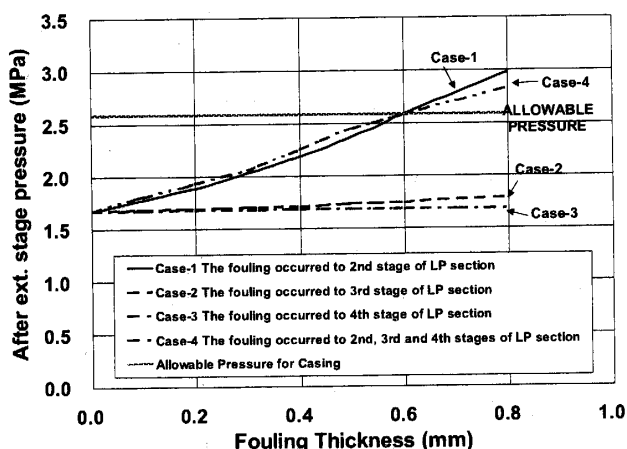


Fig. 3 Nozzle pressure increase due to deposit on profile (Effect of throat area reduction: design 4.16 mm)

圧段二段めからその後流段、それぞれについて設計スロート幅(設計値 4.16 mm)からスケールが付着する厚さを変化させ、低圧一段ノズル出口圧力の変化を求めている。Case 1 は低圧段二段めのみ面積が減少した場合、Case 2 はその後流段のみ、Case 3 はさらに後流段のみ、ケース 4 は低圧段二段めから二段後流まですべての段で同一厚さのスケールが付着し面積が減少した場合である。この結果からノズル出口圧力は、そのすぐ後流側のノズル面積が減少することに大きく影響されることがわかる。

Case 1 と Case 2 の結果がスケール付着厚さ 0.6 mm (許容圧力近傍) 以上で低圧一段ノズル後の圧力が逆転している。これは低圧二〜四段ノズルを同時にスロート幅を減少させた場合、0.6 mm 以下では低圧二段面積減少による圧力上昇に低圧三段の面積減少による圧力上昇が上乘せされているが、0.6 mm 以上では低圧二段と三段の面積比率に関係し多段ノズルの面積比と質量バランスから各段圧力分布が微妙に変化したため一定スロート幅減少に対する低圧二段の圧力上昇率が小さくなったものと考えられる。

4. 付着物の従来洗浄方法

スケール除去方法は、大きく分けて、機械的な除去と洗浄がある。液体による洗浄方法には、再スタートの際、タービン内部各表面で蒸気が凝縮しスケールが洗浄される効果を利用したタービン停止によるクリーニング方法、約 80~100°C の温水温度中で低速ターニングしながら洗浄するタービン停止時温水洗浄、飽和蒸気中で低速回転を実施し洗浄する無負荷低回転時洗浄、ドレン侵入を避けるため過熱温度余裕をもった蒸気を流入させ、80%以下負荷をとりながら洗浄する方法がある⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

ここでは、実際に蒸気タービン運転中に実施されている従来洗浄方法として、負荷をある程度とる定格回転数運転中の洗浄について具体的な方法を述べる。図4に蒸気タービン運転中における従来洗浄方法であるオンラインワッシングの洗浄パターンを示す。

この洗浄方法は図2で示した高圧部と低圧部に分かれた抽気復水タービンに適用されており、高圧部蒸気入口圧力を定格近傍で一定とし、蒸気入口温度を 755 K {482.2°C} から徐々に低下していく方法を取り、低圧部の湿度を大きくすることにより内部洗浄を行う。

図4に○で示す入口温度条件について蒸気タービン洗浄中におけるタービン低圧段での内部各段の湿度の変化を解析した結果を図5に示す。蒸気入口温度を

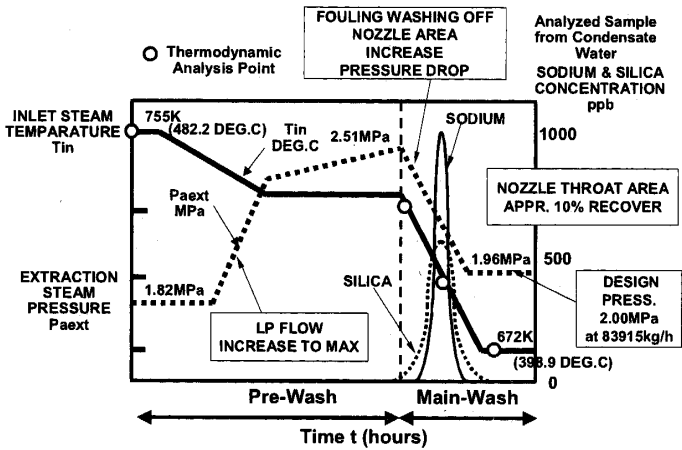


Fig. 4 Conventional online washing procedure (Wash pattern of pre-wash and main-wash)

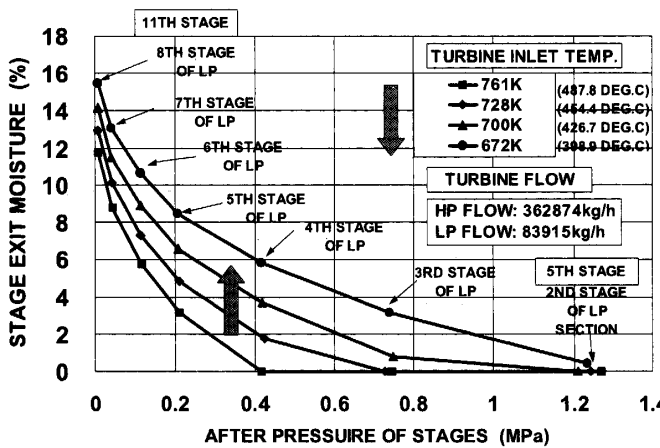


Fig. 5 Calculated moisture profile of LP (Low Pressure) section during conventional online washing

755 K {482°C} から 672 K {399°C} まで徐々に低下していくことによって、もともと定格圧力温度では過熱域にあった上流側の段も湿り域に入り、湿り度が大きくなっていることがわかる。洗浄は準備段階に相当するプレワッシュと十分に洗浄を行うメインワッシュの2段階に分かれている⁽²¹⁾。

この5時間から6時間の間、実施するプレワッシュの後に、低圧側蒸気流量を最大とした状態で蒸気入口温度をさらに 672 K {399°C} まで徐々に低下させ1時間から2時間メインワッシュを行う。メインワッシュの間で、水溶性のスケールが洗浄され、復水から採取したサンプルをオンラインで成分分析を実施することにより、図4のようにナトリウムやシリカの発生するピークが確認できる。スケールが洗浄されることで、ノズルスロット面積が増加し、同じ最大低圧側蒸気流量に対して低圧段第一段ノズル出口圧力が低下

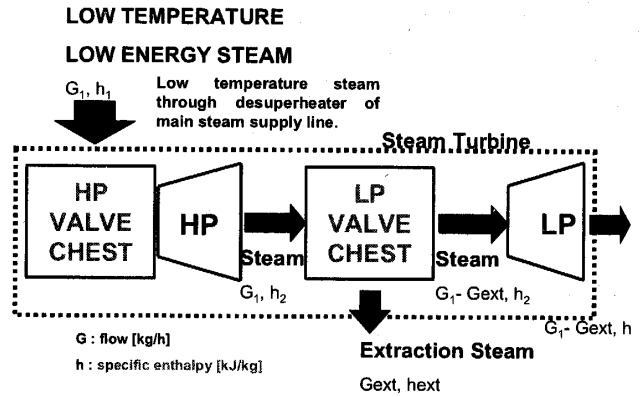


Fig. 6 Schematic heat balance of conventional online washing

し、洗浄が正常に完了したことが確認できる。

洗浄中入口温度が低下しても湿り度は変化するが各段の圧力がほとんど変化しない。これは実際の洗浄条件に合わせて高圧部入口圧力(主蒸気ライン)と低圧部入口圧力(抽気ライン)、排気圧(復水器接続ライン)は一定に保持して、蒸気高圧部入口温度のみを低下させ、タービン内部の蒸気条件の変化を計算しており、洗浄中は高圧部と低圧部の蒸気線図上の膨張カーブは入口出口一定圧力のまま低温側に移動し、各段の効率変化による各段出口温度と圧力の変化はあるが小さく、ほぼ一定の圧力比を保ちながら低温度あるいは高湿度側に各段の運転点が移動していくためと考えられる。

5. 従来洗浄方法の問題点

図6に従来の洗浄方法でのタービン高圧・低圧部のヒートバランス図を示す。タービン内部に注水せず主蒸気ラインに設置された減温器により高圧部に流入する蒸気の温度を下げるため、高圧部と低圧部の両方の有効熱差が小さくなり、タービン全体の出力が低下してしまう。基本的に低圧部の湿り度を大きくして洗浄するので、つねに過熱域にある高圧部のエネルギーレベルを下げるのは避ける必要がある。

また、高圧蒸気供給ライン全体で温度を下げるため、その蒸気配管ラインから蒸気を供給されている他の蒸気タービンの出力、プラント全体の負荷も低下してしまう。さらに、高圧蒸気供給ライン全体を蒸気飽和温度近くまで低下させるため、温度および圧力の制御が難しく、温度や圧力の変動が大きいと蒸気供給ラインにドレンが混入し、蒸気タービンに過大なスラスト力が作用し、ドレンによる急冷のためにロータの熱曲がりなどが発生し、ダメージを与える危険性がある。

プラント全体の負荷を低下させ、蒸気条件を調整する洗浄準備と洗浄後の静定に時間を必要とし、生産効

Table 1 Typical turbine specification and operation condition for ethylene plant

| Case | 1 | 2 |
|------------------------|----------------------------------|---|
| Ethylene Plant Service | Process Gas LP Compressor Driver | Propylene Refrigerant Compressor Driver |
| Turbine Model | 8EH-11-BD Both End Drive | 9EH-11-BD Both End Drive |
| Max Speed | 4250rpm | 3600rpm |
| Inlet Steam | 10.4MPa/760.2K | 10.5MPa/760.2K |
| Extraction Steam | 4.58MPa | 1.55MPa |
| Total Stage No. | 11Stages | 11Stages |
| HP/LP Stage No. | 3Stages / 8Stages | 5Stages / 6Stages |
| Design HP FLOW | 363000kg/h | 84000kg/h |
| Design LP FLOW | 240000kg/h | 110000kg/h |
| Design Max Power | 36913kW | 37286kW |

率の点から洗浄実施回数が制限される。このため、蒸気流路で翼プロファイルに付着が生じ、性能が低下しても次の洗浄まで運転せざるを得ない。

6. 洗浄時の翼素流路内蒸気条件と洗浄効果の考察

実際の洗浄において洗浄の完了を確認し、その効果を評価することが必要である。その場合、洗浄中での翼素流路内の蒸気条件、特に湿度が各段においてどの程度あれば、洗浄効果があるのか、また、洗浄効果として何を指標にするのかという点について述べる。基本になるのは、従来の洗浄方法による結果の分析である。洗浄効果が確認された蒸気入口温度で解析を行い、内部の各段湿度を求め、洗浄が可能となる湿度の最低値と湿度となる段の領域を把握する。またドレンエロージョンが発生する最終段の最高湿度も実機状態と対比し、この状態を実際の実験結果から考察する。また、一定蒸気流量で洗浄中に、徐々に付着したスケールがとれ、洗い流されることで、最初の段における段後の圧力が低下していくが、この圧力低下が止まりほぼ一定値となった状態が、その洗浄条件での効果が飽和した状態と考えられる。実際の洗浄事例として表1に示すケース1とケース2について考察してみる。

6・1 ケース1：プロセスガス圧縮機用蒸気タービンの洗浄事例 図4に示す洗浄スケジュールで運転中に洗浄を実施した前後でのタービン出力回復量と運転状態を図7に示す。高圧部と低圧部の蒸気流量と各出力との関係を解析した結果と実測蒸気流量から求めた全出力計算値 P_{tc} と蒸気タービンと圧縮機のカップリング部に設置したトルクメータで計測したトルクと回転数から求めた全出力実測値 P_{tm} の差 $P_{td} = P_{tc} - P_{tm}$ を洗浄前後で比較した。洗浄前 P_{td} に対する洗浄前 P_{td} と洗浄後 P_{td} の差、すなわち出力増分の比を

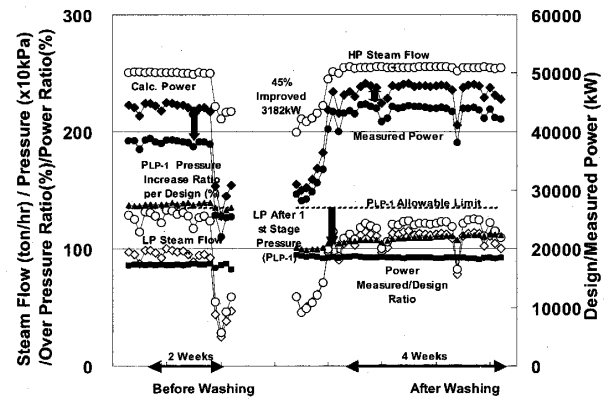


Fig. 7 Power recovery after conventional online washing (Case 1)

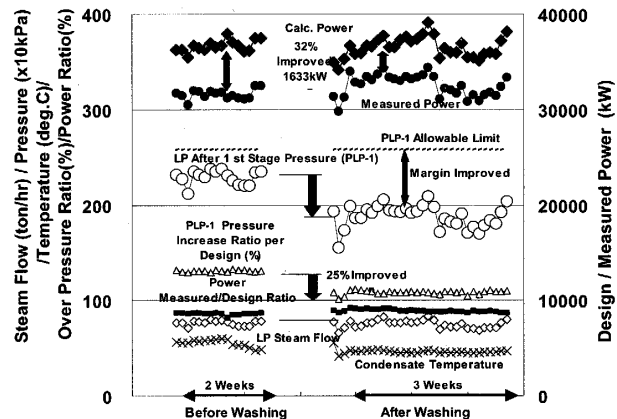


Fig. 8 Power recovery after conventional online washing (Case 2)

出力回復率とすると、ケース1では出力回復率32%、約1600kW改善されており、大きい洗浄効果となっている。1時間から2時間、実施されるメインワッシュの間で、水溶性のスケールが洗浄され、復水から採取したサンプルをオンラインで成分分析を実施することにより、ナトリウムやシリカ濃度のピークを確認している。この濃度と蒸気量から洗浄によって除去できたナトリウムやシリカの量を算出できる。その結果、合計で約200gとなるが、実際に付着している析出物の量を化合物として評価すると洗浄量はさらに増加すると考えられる。

6・2 ケース2：プロピレン冷凍圧縮機用蒸気タービンでの洗浄事例 抽気圧力がケース1の4.58MPaより低い1.55MPaで設計された蒸気タービンについて運転中に洗浄した結果を図8に示す。

ケース2では出力回復率45%、約3200kW改善されており、ケース1よりも大きい洗浄効果となっている。

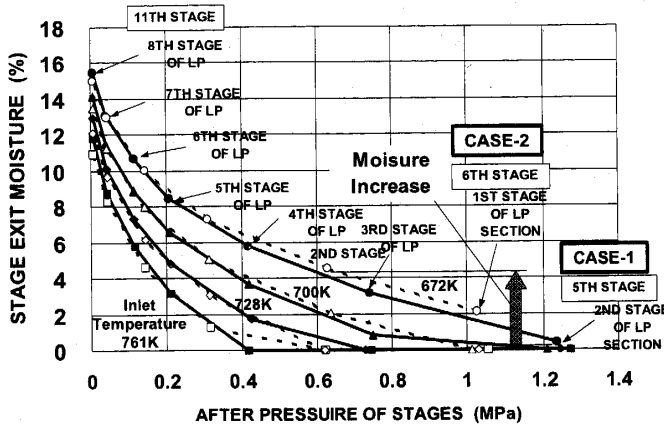


Fig. 9 Calculated moisture profile of LP section during online washing for Case-1 and Case-2

6.3 ケース1とケース2の比較 ケース1とケース2では蒸気入口条件と設計最大全出力はほぼ同じで回転数以外に抽気圧力と低圧部段数が異なる。出力回復率は抽気圧力が低いケース2のほうが高く、洗浄後の低圧部一段後の圧力低下割合が大きく、低圧段二段以降のノズルがより洗浄され付着物が除去されていることがわかる。この低圧部一段後の圧力低下によりケーシング耐圧設計上の許容圧力に対する余裕度が増え、より低圧部蒸気流量を流すことが可能となり出力を増加することができる。

両ケースについて実際の蒸気タービン洗浄時における入口蒸気温度を用いて解析を行い求めた内部湿度分布を比較し図9に示す。

ケース1の場合、洗浄中は低圧部二段から八段まで飽和域にあり、低圧三段以降で湿度が3%以上となっている。また、低圧段一段後は過熱域にあり、二段後も0.5%と湿度が低く、洗浄効果が得られるのは低圧部三段から後流段と考えられる。ケース2の場合、洗浄中は低圧部一段からすでに飽和域となり2%以上の湿度になっている。このことから、抽気圧力が低いケース2においてノズル付着物がより除去されて低圧部一段後圧力もより低下し出力も増加したと考えられる。

入口蒸気温度をさらに低下させ低圧部上流段側へ湿り域を広げ全体的に湿度を上げれば、洗浄効果は向上するが、従来洗浄方法では、ドレン混入のリスクを回避する必要性から高圧部の入口蒸気温度を下げるには限界があり、低圧段の湿度を大きくすることができない。

7. 結 言

蒸気中に含まれる化合物が析出しプロファイル表面

に付着することで、翼素性能を低下させるファウリングの現象に着目し、また、長期連続運転中における蒸気タービンの性能低下を防止する観点から、作動流体中不純物の翼素への付着現象と性能への影響および従来の浄化方法について検討を行った。その結果、洗浄効果と問題点について、以下のことが明らかになった。

(1) 洗浄効果に関して

(i) 実際の洗浄効果は出力回復率で30%から45%程度であり、低圧部入口(抽気)圧力が低いほうが洗浄後の低圧部一段後の圧力低下割合が大きく、低圧段二段以降のノズルがより洗浄され付着物が除去されている。

(ii) 洗浄効果を得るためには内部湿度を2%から3%以上にする必要があると考えられる。

(2) 従来方法の問題点として

(iii) 高圧部に流入する蒸気温度低下によって高圧部と低圧部の有効熱落差とタービン全体出力が低下する。

(iv) 高圧蒸気供給ライン全体で温度が低下し、他の蒸気タービンの出力が低下する。

(v) 高圧蒸気供給ラインの温度と圧力の変動および飽和温度近くでの不安定な制御による蒸気タービン内部へのドレン混入のリスクが高い。

(vi) ドレン混入のリスク回避のため入口蒸気温度低下には限界があり低圧段湿度を下げることはできない。

(vii) ドレン混入時に蒸気タービンに過大なスラスト力が作用することによる軸受損傷、ドレンによる急冷によるロータの熱曲がりなどが発生し、蒸気タービンにダメージを与える危険性が高い。

(viii) プラント負荷、蒸気条件を調整する洗浄準備と洗浄後の静定に時間を必要とし、生産効率の点から洗浄実施回数が制限される。

今回明らかになった洗浄条件と効果を考慮し、これらの問題点を解決し蒸気タービン内部付着物をより効率的にかつ安全に洗浄可能な方法が明確になれば、運転を継続しながら性能劣化を防止し翼素性能維持を図ることができると考える。次報で上記問題を解決する新洗浄方法について報告する。

三菱重工業(株)広島製作所の森知広氏には解析に関してご助力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Silvestri, G. J., Chapter 1 Steam Cycle, *The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power*

- Systems, pp. 12.
- (2) Lindsay, W. T., Behavior of Impurities in Steam Turbines, *Power Engineering*, May, (1979), pp. 68-72.
 - (3) Steltz, W. G. et al., The Verification of Concentrated Impurities in Low Pressure Steam Turbines, *Steam Turbine-Generator Technologies Symposium*, (1980), pp. 1-10.
 - (4) Maruyama, Y. et al., Deposition of Aluminum Oxide on Turbine Blade of Tamashima No.3 Unit and it's Prevention, *Nuclear Power*, Vol. 38, No. 12 (1982), pp. 1305-1307.
 - (5) Allmon, W. E. et al., Deposition of Salts from Steam, *International Water Conference*, (1983), pp. 127-138.
 - (6) Allmon, W. E., Dynamic Deposition and Solubility of Sodium Chloride in Superheated Steam, *International Water Conference IWC-83-19* (1983), pp. 189-193.
 - (7) Jonas, O. et al., Dynamic Deposition and Solubility of Sodium Chloride in Superheated Steam, *International Water Conference IWC-83-19* (1983), pp. 174-188.
 - (8) Japikse, D., Special Problems in Steam Turbine Design, *Lecture on Advanced Steam and Gas Turbine Design and Performance*, (1984), pp. 7.1-7.18.
 - (9) Godfery, D. J., A Solution to Severe Turbine Scaling at the Blundell Geothermal Plant, *Proceedings of the 10th Annual EPRI Geothermal Conference and Workshop*, (1986), pp. 5.37-5.54.
 - (10) Godfery, D. J., A Solution to Severe Turbine Scaling at the Blundell Geothermal Plant, *Proceedings of the 10th Annual EPRI Geothermal Conference and Workshop*, (1986), pp. 5.37-5.54.
 - (11) Wenglarz, R. A., An Approach for Evaluation of Gas Turbine Deposition, *Transactions of ASME*, Vol. 114 (1992), pp. 230-234.
 - (12) Saito, S. et al., Development of Scale Deposit Inhibition Technology Using Turbine Water-Cooled Nozzle, *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 19 (1995), pp. 469-474.
 - (13) Daniels David, Turbine Deposits Rob Megawatts, But you can catch the thief, *Power*, March/April, (1999), pp. 83-87.
 - (14) Lindinger, R. J. and Curran, R. M., Experience with Stress Corrosion Cracking in Large Steam Turbines, *Materials Performance*, (1982), pp. 22-26.
 - (15) Passell, T. O., The Transport of Corrosive Salts in Steam: The Steam Purity/Turbine Experience of three PWRs, *Water Chemistry*, March, (1983), pp. 287-293.
 - (16) Jonas, O., Understanding Steam Turbine Corrosion, *Corrosion* (1984), pp. 55.2-55.28.
 - (17) Jonas, O. and Blas, L. G., Analyzing Steam-Turbine Deposits, *Power*, December, (1975), pp. 25-26.
 - (18) Forster, V. T. et al., Performance Loss of Modern Steam-Turbine Plant due to Surface Roughness, *Proc Instn Mech Engrs*, Vol. 181 Pt 1 No. 17 (1966), pp. 391-419.
 - (19) Turner, B., On-Stream Cleaning of Turbomachinery, *Proceedings of the 2nd Turbomachinery Symposium*, (1973), pp. 91-93.
 - (20) Watson, A. P. et al., Cleaning Turbomachinery without Disassembly, Online and Offline, *Proceedings of the 24th Turbomachinery Symposium*, (1995), pp. 117-127.
 - (21) Bhat, G. I. et al., New Technique for Online Washing of Large Mechanical-Drive Condensing Steam Turbines, *Proceedings of the 33rd Turbomachinery Symposium*, (2004), pp. 57-65.