

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2報, 新洗浄方法)

秦 聡^{*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 (2nd Report, Basic Experiment and Analysis for Actual Operation of Washing System)

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

^{*4} Graduate School of Life Science and Systems Engineering, 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 contamination. As a result, turbine performance tends to be deteriorated gradually. The first paper introduced this fouling phenomena and actual conventional washing procedure in order to prevent the fouling problem and its practical disadvantage. In this second report, regarding new washing method to resolve above disadvantage, the results of detail analysis for erosion damage, thermal stress evaluation of internal parts due to injected water and heat balance of steam/water mixture are introduced in comparing online washing test results.

Key Words: Steam Turbine, Thermodynamics, Numerical Analysis, Pressure Distribution, Reliability, Steam Impurity, Deposition, Fouling, On Line Washing, Design

1. 緒 言

第1報では、蒸気中に含まれる SiO_2 , 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各成分の化合物が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ファウリングの現象^{(1)~(5)}と従来洗浄方法^{(6)~(8)}について考察した。本報では、新洗浄装置の設計について構造・強度解析を行い、洗浄条件を把握するために要素試験を実施し解析結果と比較し設計の妥当性および効果を考察した。

2. ターボ機械運転中の新しい洗浄方法

第1報で示した従来洗浄方法の問題点である蒸気入口温度低下によるタービン全体の出力低下などを解決し効率的に洗浄可能な新洗浄方法として、定格運転時に低圧段蒸気量を調節する抽気調圧弁の压力容器部にボイラ給水を注入して低圧部のみの有効熱落差を下げ

て湿り度を大きくする方法を検討した⁽⁹⁾。

新しい洗浄装置を蒸気タービン低圧部に設置した断面図を図1に示す。低圧部蒸気量を調節する弁の前流側に压力容器内部に水を噴射する複数の特殊ノズルを設置している。その水噴射ノズルの構造図を図2に示す。

ノズルの先端には微細な水粒子を適正な広がり角度で噴霧可能な特殊ノズルピースが溶接されており、上流側からの蒸気と短時間に混合し、さらに水粒子が過

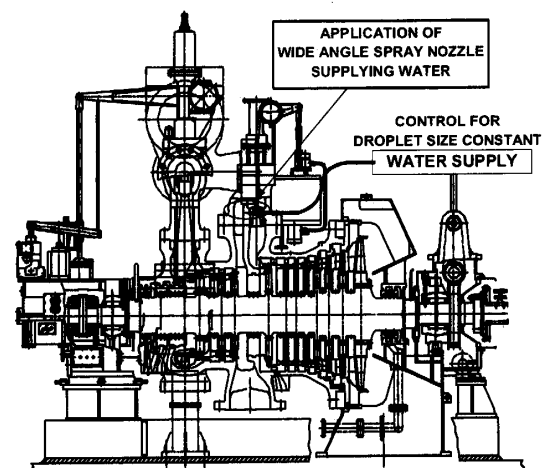


Fig. 1 New online washing device for LP section

* 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

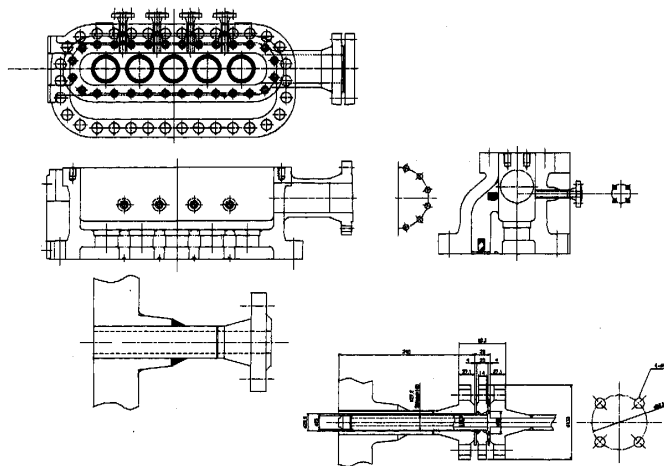


Fig. 2 LP section pressure vessel with water injection nozzles

熱蒸気まで効率的に蒸発するよう設計されている。ノズルから噴出する水量、設置するノズルの個数は、低圧部に必要な湿り度が得られるように決定され、精度よく水量の制御ができるようにシステム化されている。蒸気通路内部にスケールが付着し始めると、抽気段後の圧力が上昇し始めるため、これを検知して、定常運転中にプラント全体のロードを低下させることなく、定期的に必要な蒸気タービンを選択し安定して洗浄を行うことが可能となる。

3. 設計検討項目とリスクアセスメント

新しい洗浄装置を設計するうえで検討が必要な項目を表1に示す。

まず、流入する過熱蒸気と噴射する水の混合状態を把握するために、熱的なエネルギーバランスを計算する。この場合、洗浄に必要な湿り度を条件として設定し、どの段まで湿り状態にするかを洗浄実績とタービン内部の解析結果から決めておく必要がある。このエネルギーバランス計算により、必要な水噴射量を求める。

ノズルから噴出される水粒子は過熱蒸気から加熱され、ある助走距離と時間で蒸気となる。水粒子径が小さいほど短時間で蒸発するが、噴射ノズルの特性上、この水粒子径は水量が増加すると大きくなる。したがって、水粒子径と全体の水量のバランスを設置する圧力容器の形状に応じて最適設計する必要がある。また、噴射され蒸気の主流といっしょに流れる水粒子の直径は主流速度によって決まる。水粒子の表面張力よりもその移動し蒸気と相対速度を有する粒子に作用する慣性力が大きければ、水粒子にせん断力が作用し、粒子がより小さい粒子に碎かれて、両者の力が balan

Table 1 Design and evaluation items

ITEM	DESCRIPTION
REQUIRED MASS FLOW FOR WATER INJECTION	<ul style="list-style-type: none"> ● HEAT BALANCE ANALYSIS ● EVALUATION FOR MASS FLOW OF WATER INJECTION
EROSION DAMAGE EVALUATION OF CASING NOZZLE AND BLADE	<ul style="list-style-type: none"> ● WATER EVAPORATION DURATION TIME ANALYSIS ● PREDICTION OF IMPACT PRESSURE OF DROPLET ● OPTIMUM DROPLET DIAMETER FOR EROSION PREVENTION
SELECTION OF NOZZLE SIZE AND STRUCTURE DESIGN	<ul style="list-style-type: none"> ● NOZZLE TYPE SELECTION ● NOZZLE ATTACHMENT DESIGN ● THERMAL STRESS ANALYSIS OF CASING PROVISION

スする状態になる。このように水粒子の蒸発と主流中の挙動を検討する必要がある。

一方、噴射された主流中の水粒子が完全に蒸発する前に、蒸気タービンのノズルや動翼に高速で衝突する場合が考えられる。この水粒子が高速で翼表面に衝突することによって発生する衝撃圧力でプロファイル表面が浸食されるドレンエロージョンの損傷度合を評価することによってノズルおよび動翼の強度に関して影響がないことを検討しておく必要がある。これらをすべて考慮して、最適な水粒子直径を選択し、水噴射ノズルを設計する。

また、420°C程度の高温蒸気の温度とほぼ同一温度となっている圧力容器内部に150°C程度の低い温度の水を噴射することになるが、その場合の温度差による圧力容器部および水噴射ノズルの設置取付部における非定常および定常時の応力を解析し、寿命評価をする必要がある。さらに、運転中に想定されるリスクを洗い出し、それに対処する項目を検討し洗浄装置システムを設計した。

図3にその洗浄装置システムの概要を示す。蒸気と水が混合される蒸気タービンの蒸気調整弁圧力容器に5個の水噴射ノズルが設置され、その圧力容器内部の混合温度を計測する温度計を2個設置している。水噴射量は流量調節弁で行い、圧力容器と水供給ラインとの差圧を計測し一定差圧になるよう制御することで流量調節弁を作動させ、水噴射量を一定値に保っている。この差圧設定値を大きくすれば、水噴射量を増加できる。水供給系の圧力が配管強度設計値よりも増加した場合は、圧力リリーフ弁が作動しバイパスラインに水を放出し圧力を安全なレベルまで低下させる。また、インタロックが作動し、水供給を緊急遮断するトリップ弁も設置してある。

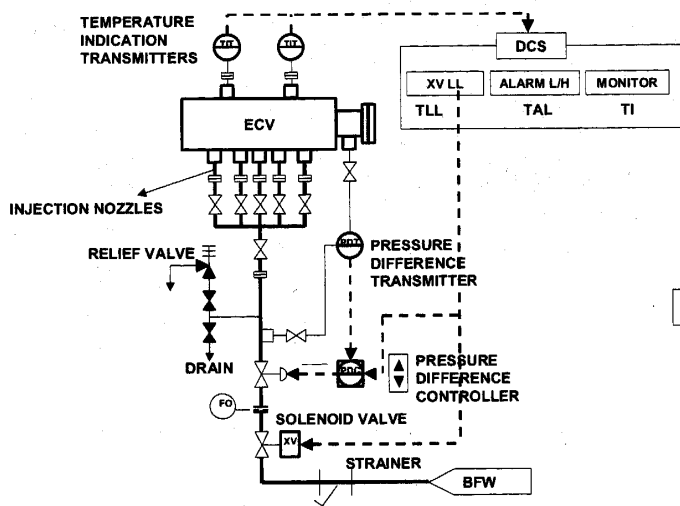


Fig. 3 Schematic of online washing system

4. 洗浄装置の設計開発

4・1 エネルギーバランスと洗浄条件の検討 新洗浄装置の設計では、まず、流入する過熱蒸気と噴射する水の混合状態を把握するために、熱的なエネルギーバランスを計算する。この場合、洗浄に必要な湿度を条件として設定し、どの段まで湿り状態にするかを洗浄実績とタービン内部の解析結果から決めておく必要がある。このエネルギーバランス計算により、必要な水噴射量を求める。図4に流入蒸気と水噴射のヒートバランスにおける水噴射量の算出モデルを示す。

4・2 構造・強度解析 压力容器として静的な圧力に対する応力評価を行い、基本体格を決定する必要がある。水噴射ノズル用フランジを設置した抽気調圧弁压力容器を三次元モデル化し応力分布(Von-Mises)を解析し使用温度でのクリープ寿命も考慮した許容応力値以下となるように設計している。

水噴射時における温度差により压力容器部および水噴射ノズルの取付部に熱応力が繰返し作用し、低サイクル疲労によりき裂が発生するリスクがある。これに関しては、非定常時の温度変化および熱応力解析を行い、実際の要素試験で計測した各部温度変化との比較を行い、過渡的な温度変化の解析値の妥当性を確認し、それから求めた非定常応力を用いる。年数回の洗浄を行うごとに、この非定常応力が作用するが、その低サイクル疲労について寿命評価を行い、必要使用期間に対し十分な寿命余裕をもつことを確認する。まず、水噴射ノズルと設置するフランジを設けた压力容器の肉厚部を二次元でモデル化し、水噴射ノズルに水を供給した直後の温度分布変化を解析した。その結果を図5に示す。○で囲んだ箇所が、温度こう配とそれに

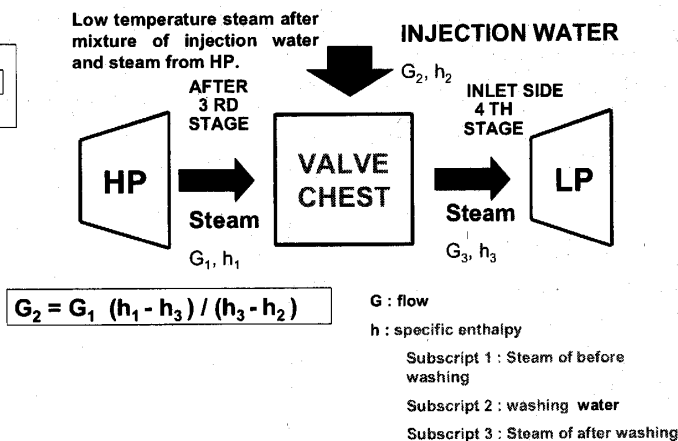


Fig. 4 Heat balance of online washing for LP section

対応し熱応力が大きくなっている部分を示す。

水供給開始から 60 s 後に水噴射ノズル取付フランジ部の内径部に最大応力が発生する。また、各部温度が定常になった状態では、水噴射ノズル挿入用パイプを取付けた压力容器のパイプ溶接部に最大応力が発生する。非定常時では、压力容器内部の蒸気温度でほぼ同じであった水噴射ノズルのパイプフランジ部に水が供給され、急激に冷却され、そのフランジ部分のみが収縮するために高い応力値を示す。定常時では、高温側の压力容器にある水噴射ノズル挿入用パイプ溶接部から供給される水温と同じになる水噴射ノズル取付フランジ部の間で定常温度分布が生じ、最も温度変化こう配の大きい部分である水噴射ノズル挿入用パイプ溶接部で熱応力が最大となっている。水噴射ノズル設置部の定常および非定常応力の発生部位をまとめ、図6に示す。

水噴射ノズル挿入用パイプ溶接部の熱応力を低減するために、压力容器側にボスを設けることによって、断面積を大きくし、熱伝導性をよくして、温度分布を改善した。また、剛性を大きくして熱変形量の減少による応力緩和を図った。

最大応力が発生するのは、非定常時における水噴射ノズルのパイプフランジ部であり、その局所応力は 85 kgf/mm² である。解析は完全弾性モデルで行っており、計算値は降伏応力よりも大きくなっている。塑性応力域での低サイクル疲労評価は、全ひずみを用い、この局所応力は 85 kgf/mm² に相当する全ひずみは、0.43% となる。ASME Section VIIIの原子力压力容器の設計基準に基づき、低サイクル疲労の安全余裕度を評価した結果を図7に示す。使用頻度の要求仕様である洗浄回数を年 12 回で 30 年間、合計 360 サイクル実施は、運転から想定される回数に対し 6 倍程度の余裕

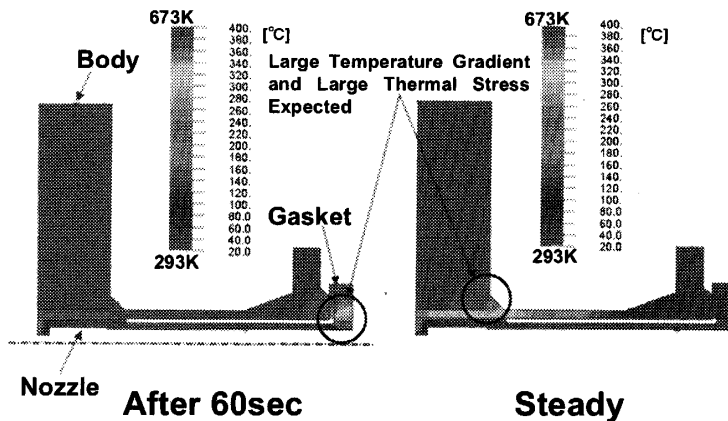


Fig. 5 Vessel temperature profile during water injection

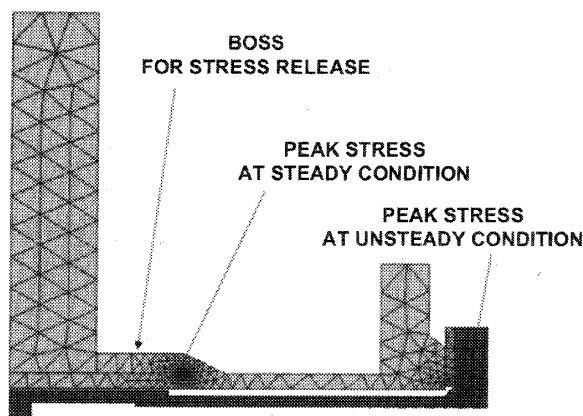


Fig. 6 Steady and transient stress location on vessel during water injection

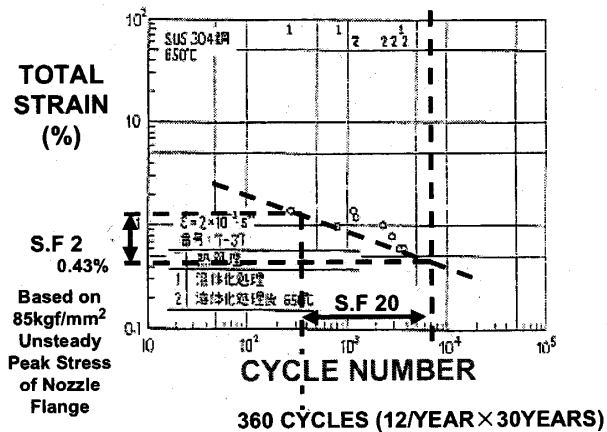


Fig. 7 Low cycle fatigue life evaluation for vessels and nozzles

がある。まず、水噴射ノズル挿入用パイプ溶接部に使用する材料の低サイクル疲労試験結果から全ひずみ0.43%に対する疲労破壊までのサイクル数は7200回であり、30年間の洗浄回数に対してサイクル数に関する安全余裕は20となる。また、この洗浄回数360回

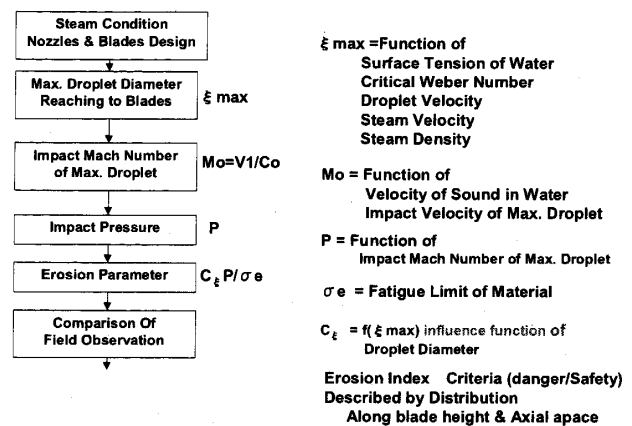


Fig. 8 Methodologies for erosion damage evaluation

に対する全ひずみは、1.2%であり、洗浄時の全ひずみ0.43%に対し全ひずみに関する安全余裕は2以上となる。これらの安全余裕は、ASME Section VIIIの原子力圧力容器の設計基準を満足しており、十分な低サイクル疲労に対する安全性を有している。

4.3 噴射された水粒子の影響評価 ノズルから噴射された主流中の水粒子が完全に蒸発する前に、蒸気タービンのノズルや動翼に高速で衝突する場合が考えられる。この水粒子が高速で翼表面に衝突することによって発生する衝撃圧力でプロファイル表面が浸食されダメージを受ける。このドレンエロージョンの損傷度合を評価することによってノズルおよび動翼の強度に関して影響がないことを検討する。このエロージョンの損傷度合を表す評価値(エロージョンインデックス)^{(10)~(13)}を用いた水粒子の翼表面への衝突による損傷度合の評価方法のフローチャートを図8に示す。

静止体への水滴挙動解析をもとに耐エロージョン性を評価するエロージョンインデックス Im は次のように表される。

$$Im = \text{水滴直径の影響係数 } C \times \text{最大直径水滴の衝撃}$$

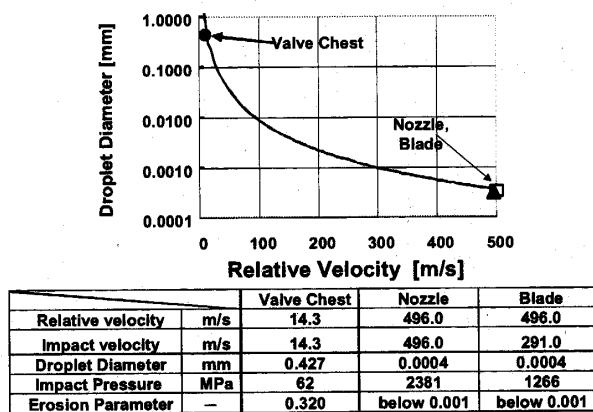


Fig. 9 Results of drain erosion damage evaluation

圧力/湿り蒸気中の材料疲労限度

水滴直径の影響係数 C は最大水滴直径 ξ_{\max} の関数で表す。

各実機エロージョン損傷状態とエロージョンインデックス Im を比較し耐エロージョン性を有するしきい値を求めエロージョンインデックスの相対的評価基準値として1を設定した。エロージョンインデックスの相対的評価基準値 I が1以下であればエロージョンは発生しない。

これらの評価方法を用い、実際の蒸気タービンの内部について、水粒子の翼表面への衝突による損傷度合を評価した結果を図9に示す。評価の対象は水噴射後の抽気調圧弁の压力容器内から低圧段の第一段ノズルおよび動翼とし、各部の相対速度、水粒子径、水粒子が対象に衝突する速度と衝撃圧力を求め、最終的にエロージョンインデックスを計算した。

压力容器内では蒸気流速が14 m/sから30 m/sと翼素に比較すると小さいが、水粒子径は約0.4 mmと水噴射ノズルから噴霧される粒子径とほぼ同じ程度である。したがって、速度は小さいが、水粒子径が大きいため、衝突時の衝撃圧力は高く、エロージョンインデックスも0.3程度と比較的大きいが、許容値である1.0以下であり、ドレンエロージョンは発生しない。

一方、ノズルや動翼においては、相対速度は500 m/s近くあるが、水粒子は細分化され直径1 μm 以下と非常に小さく、運動エネルギーも非常に小さい。このため衝撃圧力は非常に高いが、エロージョンインデックスは非常に小さく、ほとんど影響がないレベルである。これらの評価から水噴射による翼素への影響はないと考えられる。

5. 洗浄条件を把握するための試験

抽気蒸気量を調節する弁の压力容器内部に水を噴射

する複数の特殊ノズルを設置する新しい洗浄装置を設計するうえで検討が必要な項目については、特に、流入する過熱蒸気と噴射する水の混合状態を把握し、熱的なエネルギーバランス計算により求めた混合時の蒸気温度を実測し検証する必要がある。また、設計した噴射ノズルが必要水量を適正に噴射できるか、その流量特性を実測しておくことも重要である。水噴射時における温度差により压力容器部および水噴射ノズルの取付部に熱応力が繰返し作用し、低サイクル疲労によりき裂が発生するリスクがあるが、これに関しては、非定常時の温度変化および熱応力解析結果と、実際の要素試験で計測した各部温度変化との比較を行い、過渡的な温度変化の解析値の妥当性を確認する必要がある。その温度解析値の妥当性を確認することで、それから求めた非定常応力の予測精度も確認でき、洗浄による低サイクル疲労に対する寿命余裕が把握できることになる。さらに、実際に実機使用条件と同じ高温の蒸気に水を噴射することで、他の構造強度的な問題の有無を確認することができ、よりリスク回避が可能となる。これらの必要性から、実際の抽気調圧弁と压力容器、水噴射ノズルを用い要素試験を実施した。以下に、試験装置、結果および解析結果との対比について述べる。

5.1 試験装置 試験装置は压力容器内部・外部の蒸気および構造物の表面の各温度、水混合蒸気の流路位置での温度分布と水噴射量との相関を計測することを第一の目的にしている。図10に新洗浄システム要素試験装置の系統線図を示す。蒸気および水供給の圧力、温度、流量を計測する計器を設置している。図11に新洗浄システム要素試験装置の温度計測位置の詳細を示す。

記号kの位置が、実際の低圧部第一段ノズルが組み込まれている位置に相当する。実施した試験条件は、表2に示すように、実機の使用条件に合わせた。実際の水噴射ノズルは複数設置されるが、試験では1本のみ設置し、圧力、温度、流量、流速を実機条件と同じとした。

5.2 試験結果 蒸気条件と蒸気流量を一定にした状態で、水噴射量を徐々にステップ上に増加した場合の低圧部第一段ノズル設置位置相当部の温度変化を図12に示す。

抽気調整弁がある压力容器内部に水を噴射し、その蒸気と水が混合しながら、弁のディフューザを通過して、最初の蒸气流路の温度計測点に到達する。この位置から後流側に各計測点があるが、水噴射位置に近いほど、小流量で温度が、蒸気の飽和温度近くまで下が

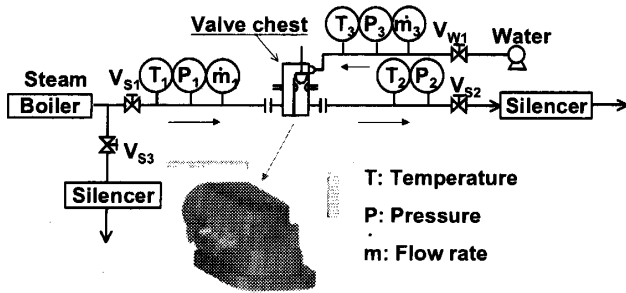


Fig. 10 Schematic of water injection test set up

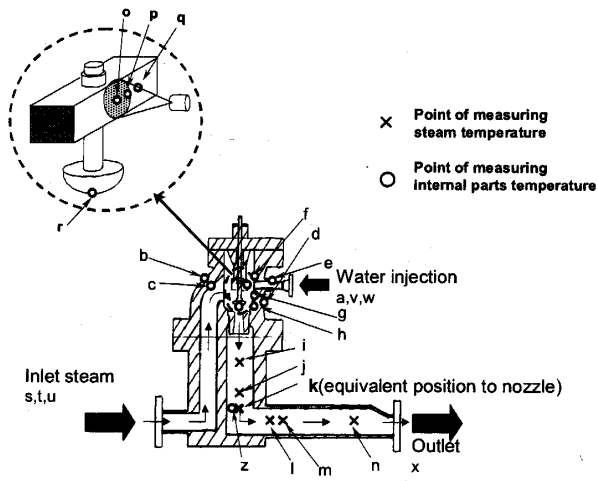


Fig. 11 Mixture temperature measurement location

る。これは、蒸気中の水粒子がまだ十分蒸発せず、流路の壁面に水が付着しているためであり、そのさらに後流側では、十分混合蒸発し計算したヒートバランス条件と同じ状態になっていると考えられる。水噴射量は 25 kg/min までは安定した温度変化を示すが、35 kg/min 以上まで増加すると、低圧部第一段ノズル設置相当位置から後流側の温度も蒸気の飽和温度まで低下する。

5・3 解析結果の比較と考察 低圧部第一段ノズル設置相当位置とその後流側における、蒸気と噴射した水との混合後の温度と水噴射量との関係を、実測値とヒートバランスによる解析値を比較し、図 13 に示す。計測値と解析値はよく一致しており、低圧部第一段ノズル設置相当位置での混合後の温度は、ヒートバランス計算でほぼ予測が可能と考えられる。

実際の要素試験で計測した各部温度変化と過渡的な温度変化の解析値の比較を行い、その妥当性を評価した。圧力容器の水噴射ノズル周辺の非定常温度実測値と解析値を比較した結果を図 14 に示す。各部の温度は、予測した解析値とほぼ一致しており、その温度解析値の妥当性が確認できた。また、実測値のほうが温度低下初期の変化率が小さいことから、実際の過渡的

Table 2 Test condition for water injection

Item	Testing machine	Actual turbine
Steam pressure[MPa]	4.6	4.6
Steam temperature[K]	651	651
Steam flow rate[kg/s]	4.7	23
Water pressure[MPa]	4.9	4.8
Water temperature[K]	373	373
Water flow rate[kg/s]	0.38	1.9

* Same steam velocity as the actual turbine

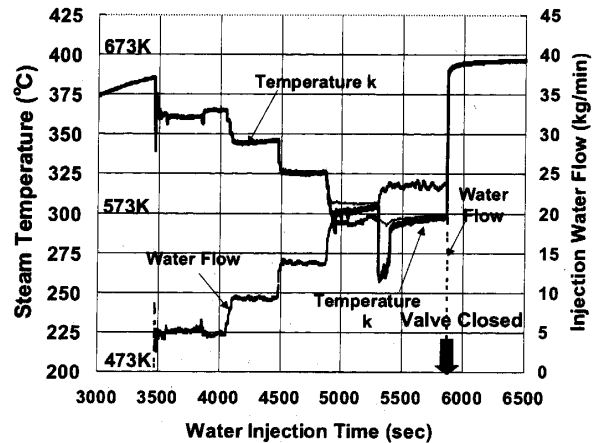


Fig. 12 Injection flow and mixture temperature

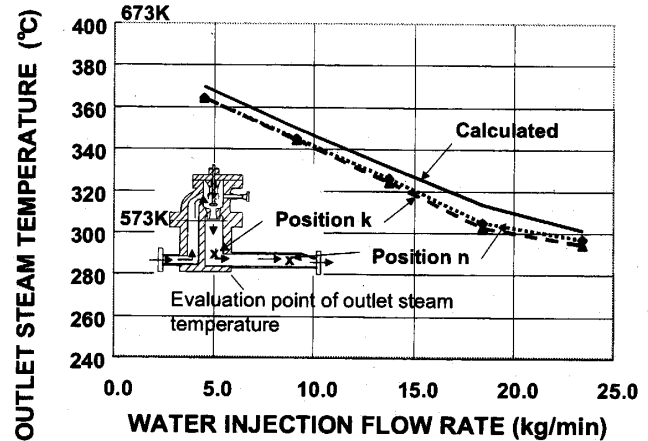


Fig. 13 Comparison of calculated and measured mixture temperature

な熱応力値は解析値よりも低いと考えられ、洗浄による低サイクル疲労に対する寿命余裕は十分あると考えられる。

第1報にて高圧部入口温度を低下させ低圧部を主体に洗浄する従来洗浄方法での洗浄効果は実測されており、低圧部がその状態と等価となるよう新洗浄方法で低圧部入口に水噴射を行えば、同等の出力回復率が得られる。従来洗浄方法での高圧部入口温度に対して等

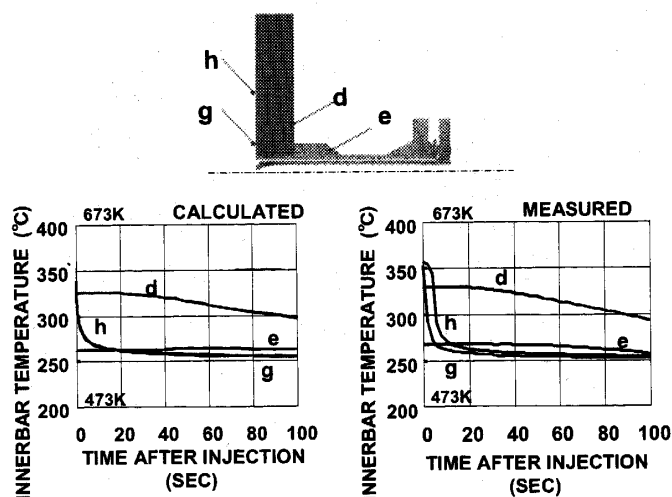


Fig. 14 Transient temperature of vessel during water injection

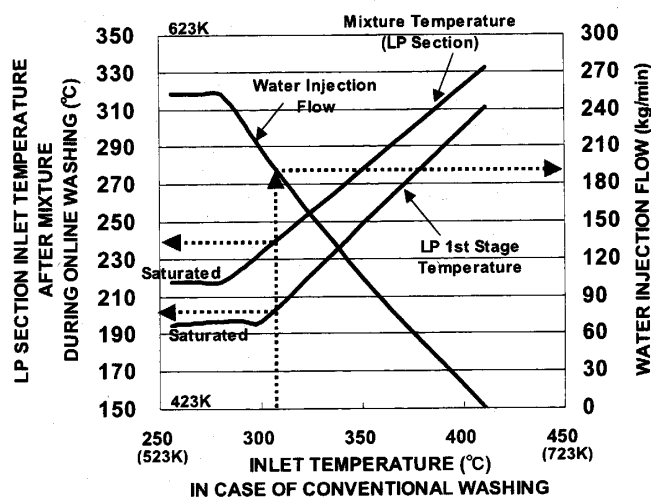


Fig. 15 Analysis results of equivalent online washing condition with conventional washing

価な洗浄状態となる実際の水噴射量と抽気調圧弁室内の混合温度および低圧部第一段ノズル後流部の温度を等価マップとして図15に示す。この等価マップと第1報で示した内部各段の湿度分布を用いて最適な洗浄条件の設定が可能となる。

6. 結 言

第1報で検討した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の洗浄効果と問題点に対し、本報では、蒸気タービン運転中に付着物を効率的に洗浄する新しい洗浄方法を提案し、その新洗浄装置の構造・強度解析、洗浄条件を把握するため試験を実施し解析結果との対比と考察を行った結果、以下の結論を得た。

混合状態の予測と洗浄効果については、

(1) 新洗浄方法で低圧部抽気調圧弁室内に水噴射し蒸気と混合させた温度は計測値と解析値はよく一致しヒートバランス計算で予測が可能と考えられる。

(2) 新洗浄方法で低圧部入口に水噴射を行えば、高圧部入口温度を低下させ低圧部を主体に洗浄する従来洗浄方法と等価な内部状態が実現でき、従来と同等の出力回復率が得られると考えられる。

(3) 上記の等価条件と内部各段の湿度分布予測値を用いて噴射水量により低圧部の湿度を洗浄に必要な値に調整でき最適な洗浄条件の設定が可能となる。

また、新洗浄装置の構造と信頼性については、

(4) 低圧蒸気量を調節する弁の前流側に水を噴射する新洗浄装置により高圧部の有効熱落差とタービン全体出力を維持したまま、選択的に低圧段の湿度を大きくし定常運転中に洗浄が可能となる。

(5) 水噴射時に発生する非定常熱応力による低サイクル疲労に対し十分な安全率を有している。

(6) 水粒子衝突による翼エロージョン損傷評価を粒子径と速度を考慮し行いダメージが生じないことを確認した。

(7) 過剰な水噴射を防止できる洗浄システムにより蒸気タービン内部へのドレン混入と損傷のリスクを最小限にできる。

これにより安全かつ効率的に蒸気タービンを洗浄可能な新しい洗浄装置を具現化することができた。石油化学プラントのプロセスで重要な機器である圧縮機を駆動する蒸気タービンは長期にわたり運転されるが、この新しい洗浄装置を用いることにより、性能劣化を防止し翼素性能維持を図ることができる。大出力のターボ機械を効率的に長期間運転することは、地球資源を有効に活用しエネルギーロスを最小限にする観点からみて非常に重要である。この技術は、すでにいくつかの実機に設置され、本格的な運用が行われるが、その実際の効果を把握し分析していくことが重要であり、今後、エンドユーザの協力も得て結果を報告していく予定である。

三菱重工業(株)広島製作所の津留崎有三氏には試験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) Saito, S. et al., Development of Scale Deposit Inhibition Technology Using Turbine Water-Cooled Nozzle, *Geothermal Resources Council Transaction*, Vol. 19 (1995), pp. 469-474.
- (2) Daniels, D., Turbine Deposits Rob Megawatts, But you

- can catch the thief, *Power*, March/April (1999), pp. 83-87.
- (3) Lindinger, R. J. and Curran, R. M., Experience with Stress Corrosion Cracking in Large Steam Turbines, *Materials Performance*, (1982), pp. 22-26.
 - (4) 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.
 - (5) Jonas, O., Understanding Steam Turbine Corrosion, *Corrosion*, 84 (1984), pp. 55.2-55.28.
 - (6) Turner, B., On-Stream Cleaning of Turbomachinery, *Proceedings of the 2nd Turbomachinery Symposium*, (1973), pp. 91-93.
 - (7) Watson, A. P. et al., Cleaning Turbomachinery without Disassembly, Online and Offline, *Proceedings of the 24th Turbomachinery Symposium*, (1995), pp. 117-127.
 - (8) Tarabrin, A. P. et al., An Analysis of Axial Compressors Fouling and a Cleaning Method of Their Bladeing, *Transactions of ASME*, 96-GT-363 (1996), pp. 1-7.
 - (9) 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.
 - (10) Kadoya, Y. et al., Estimation and Prevention of Low Pressure Steam Turbine Blade Erosion Problems Caused by Water Droplets in Wet Steam, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 22, No. 3 (1985), pp. 355-360.
 - (11) Smith, A. et al., Erosion of Steam Turbine Blade Shield Materials, *ASTM STP Erosion by Cavitation or Impingement*, Vol. 408 (1967), pp. 125-151.
 - (12) Krzyzanowski, I. and Szprengiel, J., On the Influence of Erosion onto Profile Losses and Steam Turbine Stage Efficiency Deterioration, *Transactions of ASME Fluid Division*, Vol. 37 (1986), pp. 143-151.
 - (13) Menguturk, M. et al., Blade Boundary Layer Effect on Turbine Erosion and Deposition, *Symposium on Particulate Laden Flows in Turbomachinery*, (1982), pp. 71-78.