

蒸気タービン・デポジットの飽和蒸気による除去

Removal of Deposits from Steam Turbine by Saturated Steam

柴 藤 英 造*
Eizō Shibatō

要 旨

蒸気タービンのシリカ・デポジットなどによる効率低下現象は最近各方面で問題になっているが、今回昭和電工株式会社横浜工場納 3,600 kW 背圧タービンおよび信越化学株式会社直江津工場納 25,000 kW 抽気復水タービンについて湿り蒸気によるデポジットの洗浄(スチーム・ウォッシング)を行ない、ほぼデポジットが付着する前の状態まで性能を回復させることができ、タービン保守技術を一步前進させることができた。

1. 緒 言

従来ボイラ給水水質のわずかな変化のためタービンのノズル、ブレードにデポジットが付着し、その表面状態を悪化させスチーム・パスをせばめるためタービン各段落圧力が上昇しタービン効率を低下させることに対して、定検時開放して機械的に除去することが一般的な方法であった。理論的には今回われわれが行なったスチーム・ウォッシングをはじめ種々の方法が考えられ、部分的に実施されていたが、危険性を考慮して各メーカー、各ユーザーとも実施に当たってはやや敬遠ぎみであったことが実状である。しかし最近になってタービンを開放せず短時間でデポジットを除去するタービン保守技術が各方面から強く要望されているので、これにこたえるために今回国内的には初めての背圧タービン軽負荷定格回転によるスチーム・ウォッシングを行なった。その結果、ほぼ所期の目的を達することができたので以下に報告する。

なお参考のために、はじめに今まで種々考えられてきた方法について列記するとともに、最近行なった復水タービン無負荷低回転によるウォッシングについても追記する。

2. 種々のデポジット除去法

2.1 タービン停止による除去

一般に各種のデポジットは高負荷時に形成される傾向があり、負荷をよく変化させたり停止したりするタービンでは、水溶性のデポジットは付着しにくいという現象がある。これはタービンを停止することによってノズル、ブレードおよびケーシングが冷却された後再スタートする際にタービン内部の各表面で蒸気が凝縮し、それによってデポジットが洗い流されるためである。本方法はきわめて簡単であるが少なくとも一日程度停止しなければならないという欠点がある。

2.2 無負荷低回転によるウォッシング

完全にドレン切りを行なった飽和蒸気によって適当個の加減弁をそのときの蒸気条件に応じて絞りによって過熱することがないように全開し、定格の 1/5~1/6 回転程度で運転しデポジットが多く付着している低圧段を湿度の大きな蒸気で洗い流す一般的かつ安全な方法である。しかしタービン入口の蒸気条件によってその効果が左右されるので利用できる蒸気源によって適否が制限されるが、図 1 に示すように水と蒸気のみキサを設置して数%程度の湿度を持った蒸気をつくりウォッシングを行なえばより効果的である。

復水タービンの場合は排気室真空を保ちコンデンサに十分冷却水を送りながら正常運転では過熱域で運転されデポジットが付着している段を湿り蒸気によって洗い、背圧タービンではパッキングからの漏えいをできるだけ少なくするため排気圧力を大気圧まで下げて

* 日立製作所日立工場

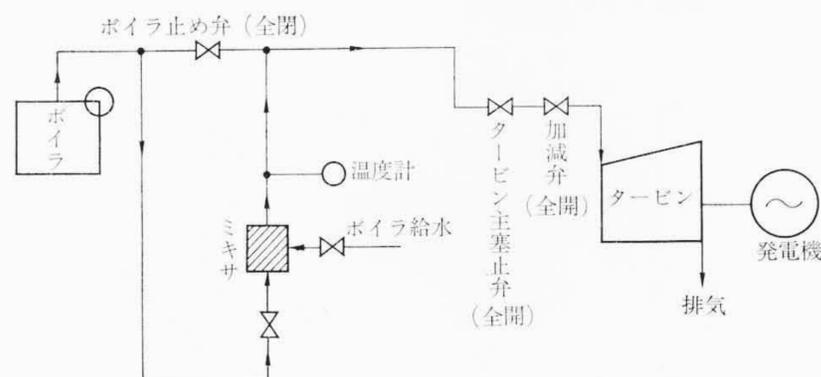


図1 ミキサ設置によるウォッシング

全段落を湿り蒸気で運転し洗い流す必要がある。

この方法はわれわれが今まで経験したところでは入口をかなり湿った状態にしなければ効果が少なく、水抵抗器などによって負荷を取りタービン中を蒸気が湿った状態のまま通過するようにつとめる必要がある。

2.3 軽負荷定格回転によるウォッシング

一般にボイラは軽負荷になると発生蒸気の温度をかなり下げることができ、さらにタービンに負荷をかけると各段が仕事を分担するので湿り域で運転される可能性および範囲が大となる。もちろんほかに利用できる適当な蒸気源がある場合はいうまでもない。

運転方法は絞り効果を与えない程度に加減弁の適当個を全開し定格回転させながら軽負荷をかけて行なうものであり、効果は低回転で行なう場合より大であるが、回転数が高いためタービンにドレンが直接とび込むことの危険性は低回転の場合にくらべてはるかに大である。本方法の実施に当たってはこの点に十分なる注意を要する。

2.4 その他の方法

ターニングさせながら行なう温水によるウォッシング、か性ソーダなどデポジット除去剤添加による方法などはデポジット除去効果のみを考えればよい方法だと考えられるが、ウォッシング後にパッキング部、ブレード・ダブテール部、ボルト部などタービン内部の複雑形状部に水、薬剤および洗浄されたデポジットがつまり、エロージョンの原因となるおそれがあるので慎重なる検討が必要である。

2.5 各方法の比較

一般性がある 2.2 および 2.3 で述べた方法について比較すると次のとおりである。

- (1) 安全性を考慮すれば低回転による方法が望ましい。
- (2) 効果を考えれば定格回転による方法が望ましい。

このように相反する性質を持っているので一概に比較はできないが今までわれわれが経験したところによれば復水、背圧の各形式ごとに次のように考えられる。

- (1) 復水タービンの場合 デポジットはいつも湿り域で運転されている低圧段にはほとんどなく、高圧段側に形成されて

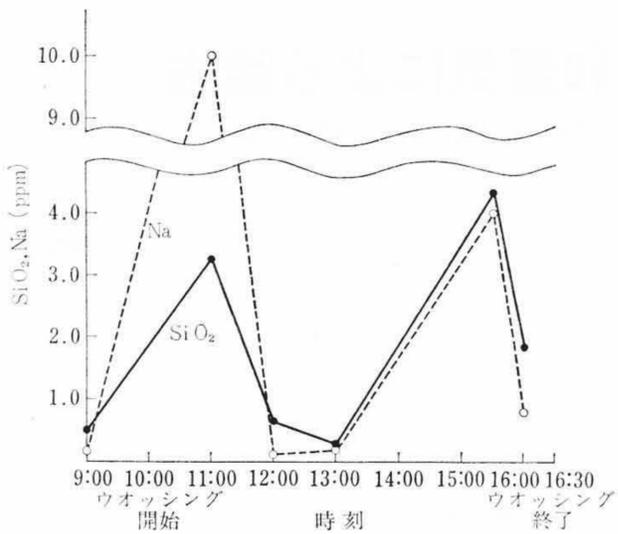


図2 背圧タービン無負荷低回転ウォッシング時の排気ドレン分析値

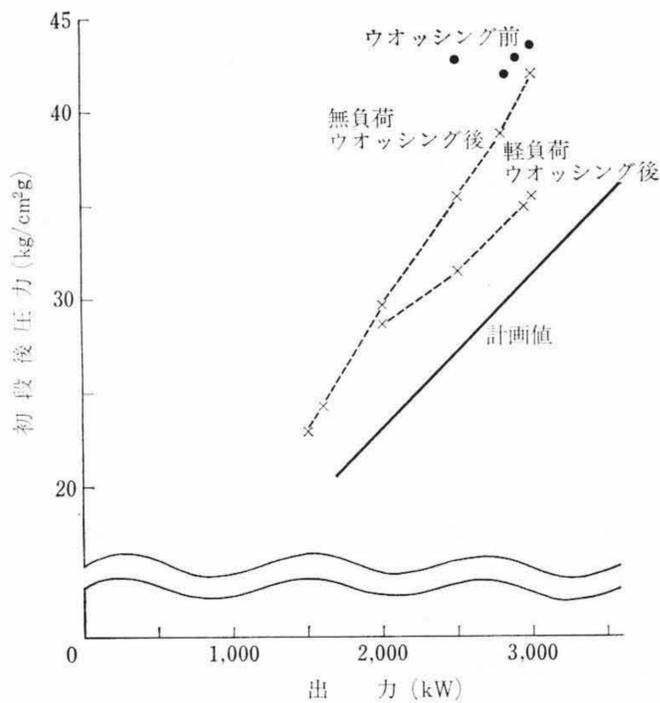


図3 ウォッシング前後の初段後圧力の変化

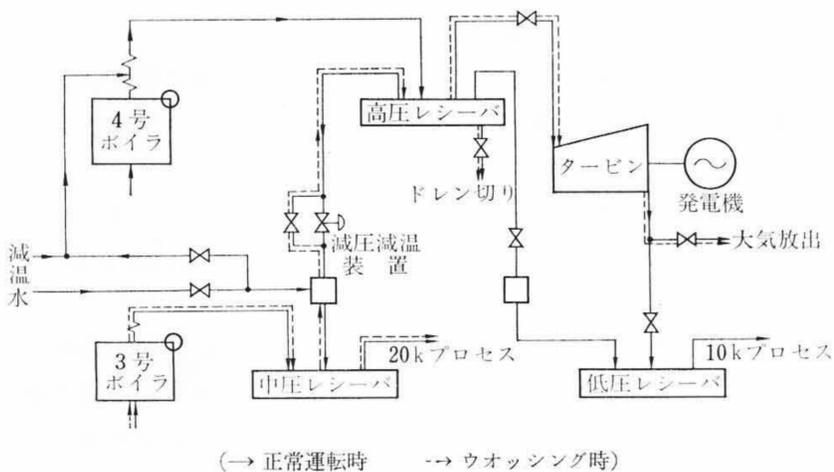


図4 背圧タービン・プラント運転系統図

いるので入口蒸気を数%程度湿らせることができれば安全性を考慮して低回転で行ない、排気温度の上昇をコンデンサの冷却水で十分流すことによって防げば効果がある。

(2) 背圧タービンの場合 デポジットは比較的低压段に多く形成されているので出口まで十分湿った蒸気状態を保持させる必要上、入口蒸気条件が低回転による方法の効果が期待できるほどかなり湿っている場合を除いて、安全性を考えて入口を乾き状態に保持しながら軽負荷定格回転によって行なえば効果がある。

しかしこれはあくまで一般論であって個々のタービン・プラント

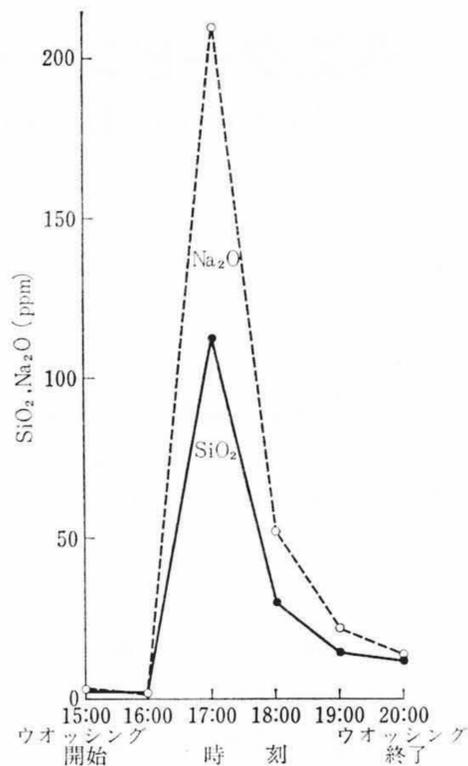


図5 背圧タービン軽負荷定格回転ウォッシング時の排気ドレン分析値

表1 背圧タービン・ウォッシング中の運転経過

時刻	負荷 (kW)	蒸気条件		初段後圧力 (atg)	排気条件		加減弁開度 (度)	回転数 (rpm)
		圧力 (atg)	温度 (°C)		圧力 (atg)	温度 (°C)		
15:00	100	15.0	200	(4.0)	1.0	(125)	90	3,000
15:30	150	15.5	206	3.7	1.0	118	94	3,000
16:00	100	15.5	204	3.3	0.9	115	87	3,000
16:30	150	15.3	203	3.1	0.8	115	88	3,000
17:00	100	15.8	204	3.1	0.8	114	87	3,000
17:30	110	15.5	198	3.2	0.8	114	93	3,000
18:00	110	15.6	198	3.2	0.9	114	92	3,000
18:30	120	15.0	198	3.2	0.9	114	91	3,000
19:00	120	15.0	198	3.2	0.9	115	93	3,000
19:30	120	14.9	200	3.2	0.9	115	90	3,000
20:00	120	15.0	198	3.2	0.9	115	91	3,000
平均	120	15.3	201	3.2	0.9	115	91	3,000

の利用できる蒸気源の性質によって採用する方法を考えなければならない。

3. スチーム・ウォッシングの実施例

3.1 背圧タービンのウォッシング実施例

(昭和電工株式会社横浜工場納 3,600 kW)

ウォッシングを行なったタービンの仕様は次のとおりである。

入口蒸気条件 60 atg/400°C 排気圧力 10.5 atg

タービン段数 カーチス 1段 ラトー 9段

本タービンは過去 SiO₂ 38.11%, Na₂O 20.50%, Fe₂O₃ 17.01%, Al₂O₃ 7.37% の厚さ約 0.3 mm のデポジットが付着し性能が低下した経験があるが、昭和40年後半ふたたび同様の現象が起ころほかに異常現象がないことからデポジット付着によるものと判断し、昭和41年1月に無負荷低回転によるウォッシングを行なったがあまり効果がなく、2月に軽負荷定格回転によるウォッシングを実施しほぼ所期の効果をあげたのでそのときの状況を詳述する。

(1) 無負荷低回転によるウォッシング

入口蒸気条件 ~65 atg/305°C

出口蒸気条件 ~1.0 atg/240°C

表2 背圧タービン・デポジットの付着量と組成

段落	付着量		定性分析結果											定量分析結果 (%)									
	mg/dm ²	g/段	Na	Cu	Ca	Mo	Al	Fe	Cr	Mg	Si	Mn	可溶SiO ₂	全SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CaO	MgO	PO ₄	Na ₂ O		
ブレイド	1	43	2.5	卅	卅		+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	8.3	20.1	47.2						(可溶) 13.0
	2	133	2.4	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	9.1	22.3	38.7	3.0		2.1			
	3	1,445	26.7	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	11.0	23.2	30.1						18.4
	4	1,715	33.8	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	12.3	25.9	28.7	2.1		1.1			16.3
	5	2,480	52.5	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	8.0	25.7	29.9						17.4
	6	2,480	56.3	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	10.1	27.2	26.0						18.2
	7	155	2.7	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	15.1	25.1	30.4						26.1
	8	77	2.0	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	6.7	34.5	27.9	3.7	2.3	1.7	0.9		(可溶) 11.8
	9	118	3.3	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	13.4	25.0	23.3						25.1
	10	75	2.2	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	11.6	25.3	25.0						16.3
ノズル	2	92	0.8	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	11.5	24.5	20.0	3.3	2.2	1.1	0.1	0.9	22.2
	3	310	2.8	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	12.5	24.0	20.0						23.6
	4	790	7.6	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	9.6	25.3	29.9						18.9
	5	745	7.9	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	7.0	26.3	28.9	2.0	Tr	0.9	0.6	0.6	17.5
	6	245	2.9	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	8.0	27.2	29.1						20.2
	7	397	5.1	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	10.2	25.9	16.0						25.6
	8	214	3.0	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	11.1	40.7	10.0	1.6	4.4	0.3	0.1	0.5	29.7
	9	46	0.7	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	16.0	21.1	24.0						27.0
	10	60	1.0	卅	卅	卅	+	卅	卅	卅	卅	卅	卅	卅	17.9	34.6	8.9						32.4

回転数 ~500 rpm
蒸気量 ~5t/h (加減弁 1個全開)

なる運転条件の下でウォッシングを行ない図2に示す排気ドレンの分析結果を得た。本ウォッシングの結果を初段後圧力について見れば図3に示すように定格 3,000 kW 点で設計値より 12.5 kg/cm² の圧力上昇が 11.0 kg/cm² まで下がっただけで所期の成果が得られなかった。この原因はボイラの安全運転上タービン入口蒸気はかなり過熱された状態にあり、最終段までほとんど大部分の時間乾き域で運転されたことによる。

(2) 軽負荷定格回転によるウォッシング

前述のように主として入口蒸気条件の制限から無負荷低回転による方法ではほとんど成果が得られなかったので、軽負荷定格回転によるウォッシングをほかのボイラで発生した低圧の飽和蒸気を用いラインを逆送して行ないかなりの成果を収めた。そのときのタービン・プラント運転系統は図4に示すとおりである。

はじめ減温装置を利用する予定であったがボイラの運転がうまくいきそれを使用せず、さらに高圧レシーバのドレン切りを十分行なったのでタービンに直接ドレンがとび込むおそれはほとんどなくなった。運転経過を表1に、排気ドレンの分析結果を図5に示す。

これから判断して入口蒸気はほぼ乾き飽和状態、排気は4~5%程度の湿り飽和状態と考えられ、排気ドレンの分析結果が示しているように給水処理されたボイラ発生蒸気からは想像もできないほど汚れたドレンがタービンから流出し、タービンがかなり汚れていたことおよびわずかに数%の湿り蒸気によってそれが効果的に洗い流されることが明らかになった。なおドレンの分析結果の時間的経過は次に行なった信越化学株式会社直江津工場納の復水タービンについてもほぼ同様で、ウォッシング開始後1~2時間目に多量のデポジットが急に洗い流され、開始後5~6時間で一定値に落ち着くことがわかりウォッシング時間の目安が与えられた。

ウォッシングの効果を初段後圧力について見れば前掲の図3に示してあるように実施前の約60~70%程度回復していることがわかる。残りは非水溶性の化合物であろう。

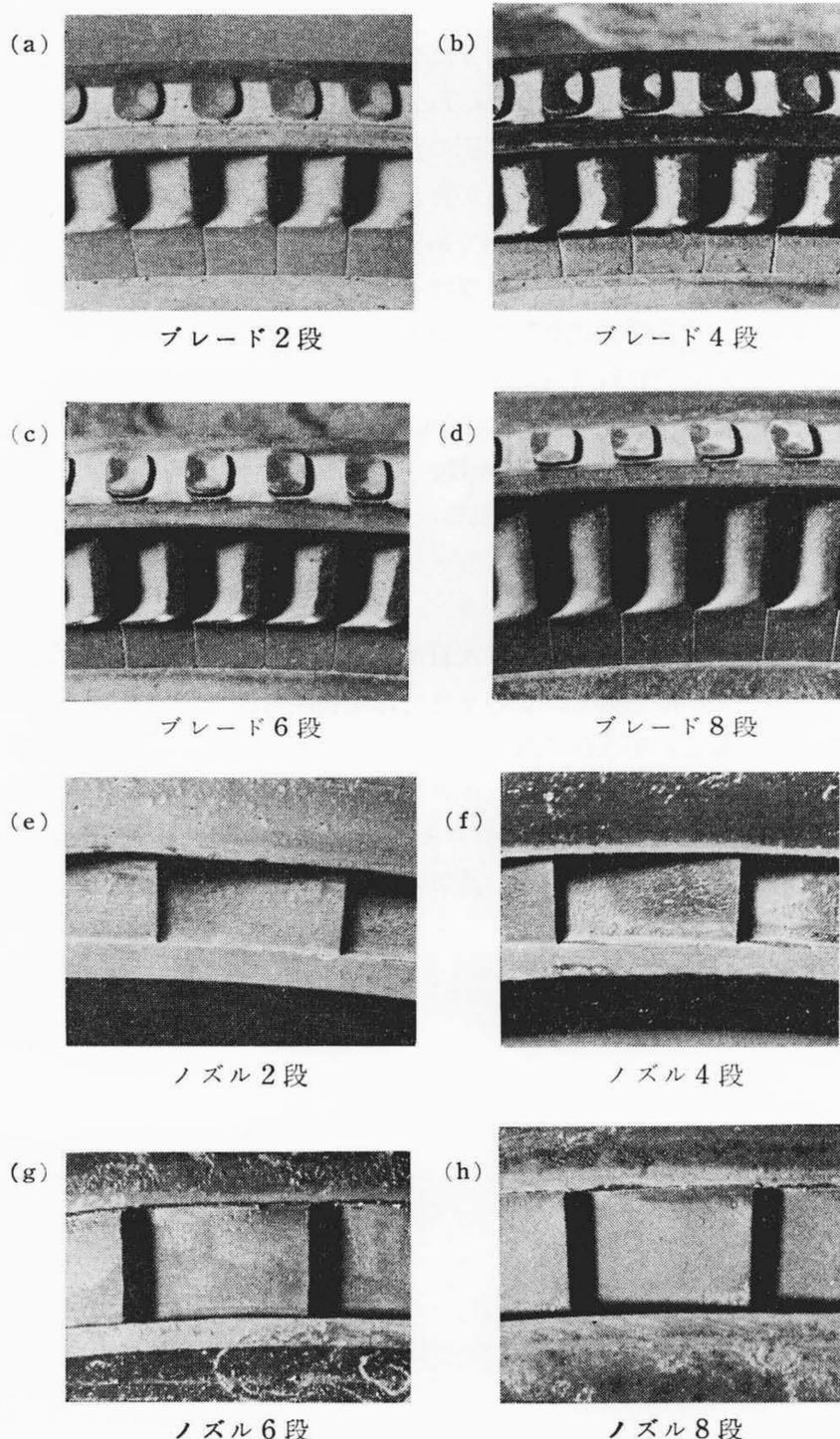


図6 定検時のデポジット付着状態

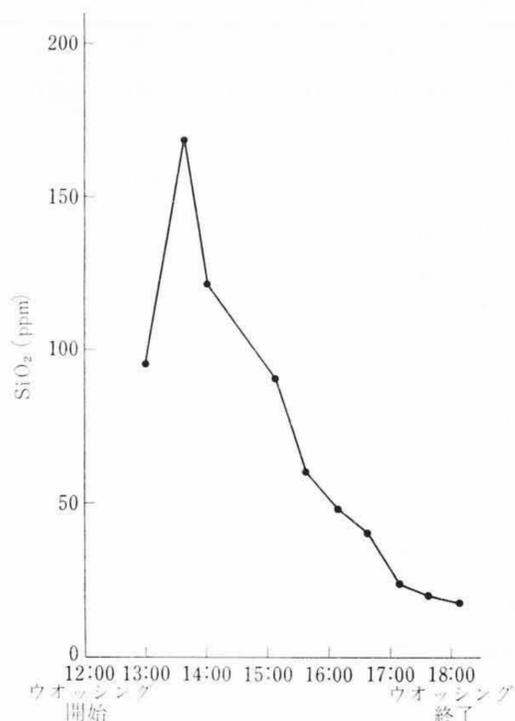


図7 復水タービン無負荷低回転ウオッシング時の排気ドレンの分析値

表3 復水タービン・ウオッシング中の運転経過

時刻	蒸気条件		抽気段温度				圧力 (mm Hg)	排気圧力 (mm Hg)	回転数 (rpm)
	圧力 (atg)	温度 (°C)	第一 (°C)	第二 (°C)	第三 (°C)	第四 (°C)			
13:00	23	218	78	76	29	45	560	530	600
14:00	26	223	79	101	29	48	620	620	560
15:00	30	226	85	120	25	40	600	600	650
16:00	30	226	86	121	24	50	600	600	580
17:00	32	230	86	128	22	42	640	640	600
18:00	33	229	89	129	22	45	640	610	600

表4 復水タービン・ウオッシングの効果比較表

状態	出力 (kW)	主蒸気量 (t/h)	抽気量 (t/h)	抽気圧力				排気圧力 (mm Hg)
				第1 (atg)	第2 (atg)	第3 (atg)	第4 (mm Hg)	
デポジット付着前	25,000	140	40	30.2	8.75	2.40	100	700
デポジット付着後	25,000	150	40	35.0	8.70	3.12	0	700
ウオッシング後	25,000	137	30	30.5	8.70	2.80	50	710

なお昭和41年7月定検時にデポジットがかなり付着した状態で開放されたので資料を採集し分析を行なったが、その結果は表2に、そのときのブレード、ノズルの代表的な写真は図6に示すとおりである。

この結果から明らかなようにデポジットは第4, 5, 6段に多く析出していてその組成はSi, Fe, Naが大部分である。当初予想していたより比較的高温高压の部分に多く析出し、Na₂SiO₃などの可溶性シリカが多いことが特長である。このことは湿り蒸気によるウオッシングが効果的であることを裏付けている。

3.2 抽気復水タービンのウオッシング

(信越化学株式会社直江津工場納 25,000 kW)

ウオッシングを行なったタービンの仕様は次のとおりである。

- 入口蒸気条件 88 atg/482°C
- 排気圧力 722 mmHg
- 抽気段数 4段(調整抽気は第二抽気のみ)
- タービン段数 高压 カーチス 1段 ラトー 8段
 低压 ラトー 10段

昭和41年8月ごろ工業用水水質が変化して以来、各無調整抽気の圧力がしだいに上昇し、このままでは定検開放前に全負荷かけられなくなるおそれが大きくなったが、種々検討したところほかに異常現象がないことからデポジットの付着と判断し、11月にウオッシングを行なった。当初、ほかのプロセス・ラインより低压の蒸気を逆送して行なう予定であったが、蒸気駆動の補助油ポンプの吐出圧が不

足であったので、主ボイラを利用して安全性を十分考慮しながら運転し、低压の飽和蒸気を安定して発生させることができ、表3に示すような運転経過で無負荷低回転によるウオッシングに成功した。

ウオッシング中の排気ドレンのSiO₂濃度変化は図7に示すとおりで、前述の昭和電工株式会社横浜工場納タービンの場合とほぼ同様の経過でデポジットが洗い流される様子を確認できた。

表4はデポジットが付着する前、後およびウオッシング後の運転状態を示したものであるが、抽気量の違いを考慮してもほぼ90%程度回復できた。

4. 結 言

今まで安全性を考慮して各方面で検討されながら実施に当たっては敬遠されてきたスチーム・ウオッシングを、今回二種の異なる形式のタービンについて違った方法によって行ない、前述したようにほぼ所期の成果を得ることができた。今後さらに多くの経験を積み重ねてスチーム・ウオッシング技術の確立を図りたい。

しかしながら蒸気タービン・プラントの運転に当たっていちばん大切なことは、このようなウオッシングを行なわないですむように給水処理を完全に行なうことであることはいうまでもない。

最後に、ウオッシングの実施に当たりご配慮をいただいた昭和電工株式会社の関係各位および信越化学株式会社直江津工場の関係各位に深甚なる謝意を表す。