

松川地熱発電所の長時間運転実績と信頼性

(Long Time Operation and Reliability of Matsukawa)
Geothermal Power Plant

大西 幸作*・多胡 武雄**・兵頭 教正**

(Kosaku Onishi)

(Takeo Tago)

(Norimasa Hyodo)

まえがき

地熱蒸気を直接蒸気タービンに導いて、機械的エネルギーを得る形式の地熱発電では、タービン内の各部品は腐食性物質を含む湿り蒸気に曝される。蒸気の発生源が地下水であり、含有異物の完全な除去は期待し得ぬので、固形物の流入による打痕、浸食の発生、スケールの堆積などの現象が、火力用蒸気タービンとは比較にならないくらい発生しやすい。

このような地熱という厳しい条件下において、松川地熱発電所は昭和41年10月の営業運転開始以来14年間運転され、その運転時間は10万時間を優に越え11万時間に達しており、順調に運転が続けられている。今までの累積利用率は83%にも達し、我が国初

の本格的な地熱タービン発電プラントとして、また石油代替エネルギーとしてその任を十分果たしているといえる。

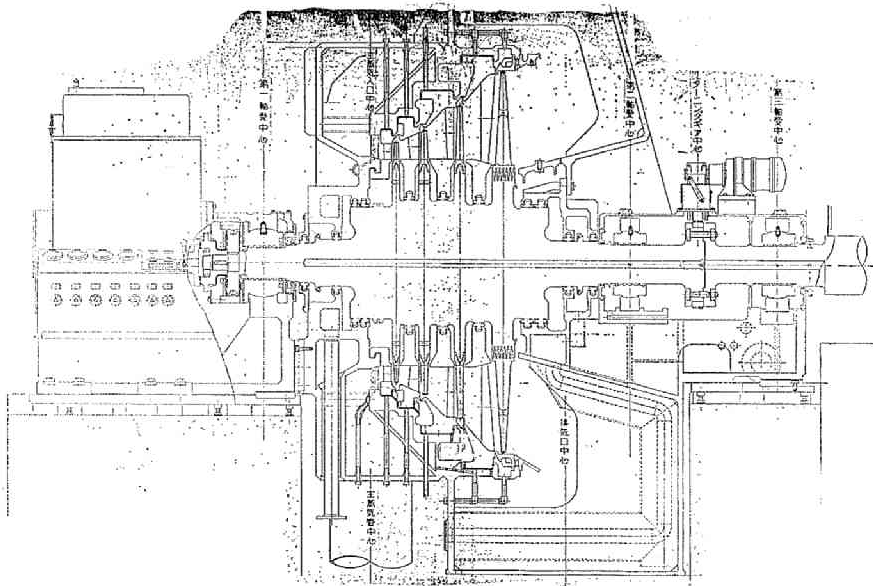
ここに松川地熱発電所における今までの問題点およびそれらに対する改善策を述べ、地熱蒸気タービンの信頼性向上に役立てたい。

1. 発電所の概要と運転経緯

1.1 発電所の概要

1.1.1 計画仕様

昭和41年10月の営業運転時においては、定格出力は20,000 kWであったが、昭和48年4月に一部改良を行ない定格出力を22,000 kWまで上げている。出力変更後のプラント計画仕様は以下に示すとおりであ



第1図 タービン組立図

* 日本重化学工業株式会社松川地熱発電所
(Japan Metals Co., Ltd.)

(Toshiba Corp.)

** 東京芝浦電気株式会社京浜事業所

原稿受付 昭和56年4月13日

る。

形式	くし形単流排気式復水タービン
定格出力	22,000 kW
回転数	3,000 rpm
主蒸気圧力	3.5 kg/cm ² G
主蒸気温度	147.4℃ (1%湿り)
主蒸気流量	211,700 kg/h (最大 23,000 kg/h)
真空度	110 mmHg abs
最終段翼長	584 mm (23 in)
段落数	4 段
调速装置	機械遠心重垂式
主蒸気止メ弁	スウィングチェック形
加減弁	バタフライ形 (500φ×2)
復水器形式	バロメトリックジェットコンデンサ (昭和 55 年 10 月からローレベルジェットコンデンサ)
冷却塔形式	自然通風

第 1 図にタービン断面図を、また松川における実績を加味して計画し、現在運転中の当社製地熱タービンの主要項目を第 1 表に示す。

1.1.2 蒸気系統

現在地熱蒸気は 8 本の深さ 945 m~1,500 m の蒸気井から噴出している。これら蒸気井の構成を第 2 表に示す。蒸気井から噴出した蒸気は総延長 2,200 m の蒸気管でスチームセパレータに導かれ、そこで地下から持ちこまれた固形物および湿分等が処理される。スチ

ームセパレータを出た蒸気は、主蒸気止メ弁、加減弁を通りタービンに流入するが、タービン入口で圧力 3.5 kg/cm²G、温度 190℃ の過熱蒸気となっている。

タービン内で仕事をした蒸気はバロメトリックジェットコンデンサに入り復水となる。そこで不凝結ガスはエゼクタで大気へ放出される。蒸気の復水化とエゼクタによりコンデンサ内は常に真空に保たれる。復水はホットウェルに一時溜められ、ここから揚水ポンプで冷却塔へ送られる。冷却塔で冷却された復水は、冷却水としてジェットコンデンサ、油冷却器、エゼクタ用クーラ、発電機空気冷却器で使用される。これらの系統を第 2 図に示す。

1.2 運転経緯

昭和 41 年 10 月に定格出力 20,000 kW で営業運転に入っているが、初期の約 1 年半は蒸気量が少ないために平均 10,000 kW 程度で運転され、その後昭和 43 年 3 月より定格出力である 20,000 kW の運転がなされてきた。昭和 47 年 4 月より 22,000 kW の試運転を行なったが、良好な結果が得られたため、昭和 48 年 4 月から定格出力を 22,000 kW に上げ現在にいたっている。昭和 41 年 10 月から昭和 55 年 10 月までの 14 年間に 11 万 3,800 時間運転され、21 億 6,000 万 KWH の発電を行ない、この間の暦日での利用率は 83% となっている。各年度ごとの平均稼働率および利用率は第 3 図のとおりである。運転初期において稼働率および利用率が低くなっているが、初期の 1 年半はほ

第 1 表 地熱タービンの主要計画項目

国名	日本	メキシコ	アメリカ			フィリピン	日本
会社名	日本重化学工業(株)	C.F.E	PG & E			NPC	日本重化学工業(株) 東北電力(株)
発電所名	松川	Cerro Prieto	Geysers			Tiwi	葛根田
定格出力 (kW)	22,000	37,500	55,000	110,000	114,000	55,000	50,000
回転数 (rpm)	3,000	3,600	3,600	3,600	3,600	3,000	3,000
入口蒸気圧力 (kg/cm ² G)	3.5	5.27	7.04	7.04	7.04	5.65/0.73	3.5
入口蒸気温度 (°C)	147.4	160.0	179.4	179.4	179.4	162.3/115.6	147.4
入口蒸気流量 (kg/h)	211,700	285,450	411,600	820,110	849,700	336,790/ 141,400	478,000
真空度 (mmHg-abs)	110	89	102	102	102	102	100
タービン形式	SCSF 23°	SCDF 20°	SCDF 23°	SC4 F 23°	SC4 F 23°	SCDF 23° (混圧式)	SCDF 23°
タービン段落数	4	6×2	6×4	6×4	6×4	6×2	6×2
製作台数	1	4	6	2	1	4	1
運転開始年月 または備考	S 41-10 たゞし 48-4 まで 20,000 kW で運転	No.1 47-8 2 47-6 3 54-2 4 54-4	No.5 46-2 6 46-4 7 47-8 8 47-10 9 48-7 10 48-10	No.11 49-11 12 54-3	No.14 55-9	No.1 54-4 2 54-9 3 55-3 4 55-5	53-5

第2表 蒸気井の構成

坑井 No.	深度 (m)	竣工年 (昭和)	温度 (°C)	圧力 (kg/cm ² G)
1	945	47	150	4.5
2	1,080	39	203	4.5
3	1,050	48	214	4.9
5	1,190	43	191	4.2
6	1,203	44	188	4.8
7	1,280	45	188	4.8
8	1,200	52	199	4.2
9	1,500	54	210	4.75

とんどスケール流入に起因する問題であり、その後の1年は地熱タービンの特殊性による初期故障で特に羽根関係の問題が多い。その後稼働率および利用率が上がり、ここ10年は非常に好調な運転がなされている。

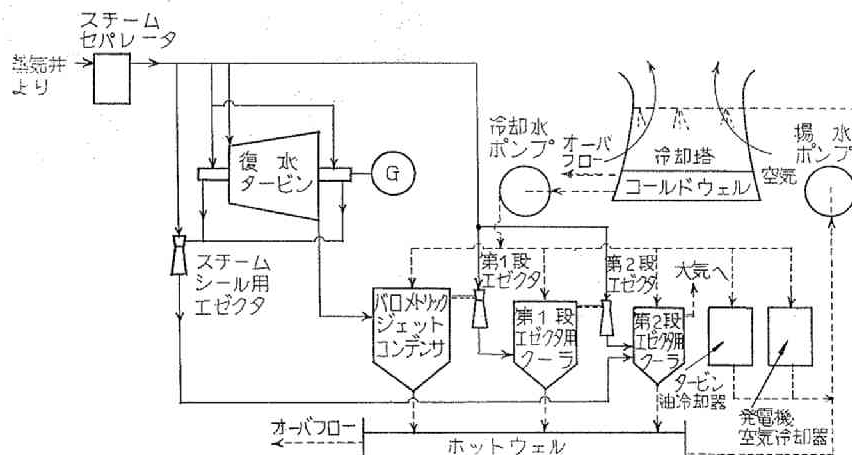
2. タービン運転上の問題とその解決

地熱蒸気中には、相当量の腐食性ガスや固形物が混入している。このため地熱タービンでは、通常の火力タービンに比べ、スケールの付着、腐食、浸食等を受ける度合が著しく大きく、特にこの傾向は松川のような過熱蒸気井の場合に強い。

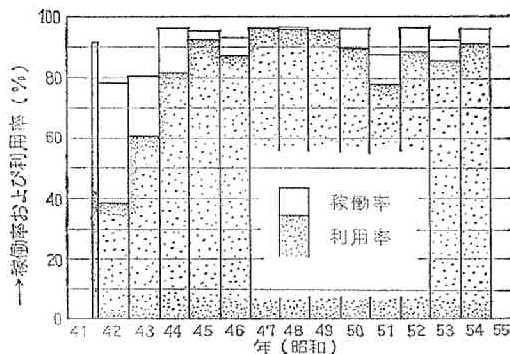
これらに対する配慮は、計画設計段階でも十分なされているが、当時における経験の少ないこともあり、種々の問題が発生した。この種の地熱特有の問題をタービン運転操作上で回避することは不可能な場合がほとんどであるが、運転状態の変化状況を分析検討することにより、必要な処置の判断が可能となる。松川地熱発電所で経験されたタービン運転上での問題とそれらへの対策について述べる。

2.1 タービン内部蒸気通路部の閉塞

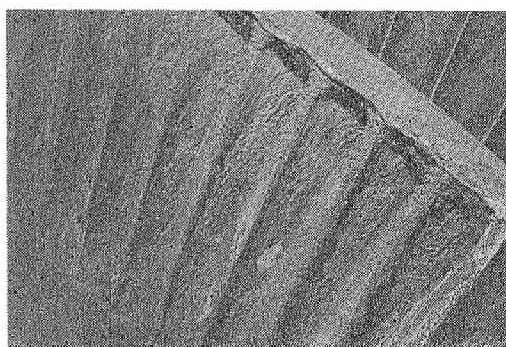
タービン内部で蒸気が膨張する過程において、圧力



第2図 蒸気系統図



第3図 年平均稼働率および利用率



第4図 羽根に付着したスケール

温度が変化するが、スケールによってある定まった圧力温度で凝縮し羽根ノズルに付着する場合が多い。したがってスケールは、上流側のみならず下流段にも及ぶことになる。スケール付着の状況を第4図に示すが、タービン内部でスケールが付着すると、蒸気通路部面積が減少し内部の圧力が変わってくる。その一つの例として、加減弁開度および主蒸気圧力が一定であるのに対して、加減弁後の圧力は漸増し、主蒸気流量も漸減する。すなわち加減弁で制御されていた主蒸気流量が、タービン内部蒸気通路部の閉塞進行によって、次第にタービン内部蒸気通路部において、制限を受けるようになって行く。

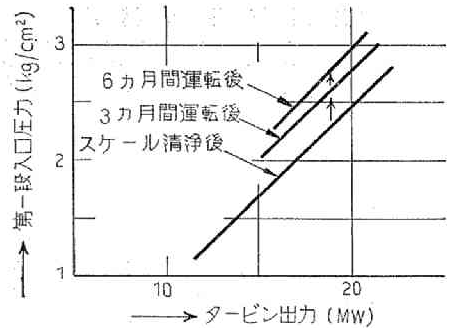
スケールによる閉塞進行によって、出力と第1段入口圧力が時間とともに変化する様子を第5図に示すが、タービン内部蒸気通路部が清浄である場合の両者への関係を、把握しておくことによって、タービン内部でのスケール付着程度を判断している。また第1段入口圧力を負荷および加減弁カム角度と対比させることによってスケールの付着状況を知ることができるため、適切に清浄時期（一般には定期検査）を決めることができる。

2.2 軸受振動の変化

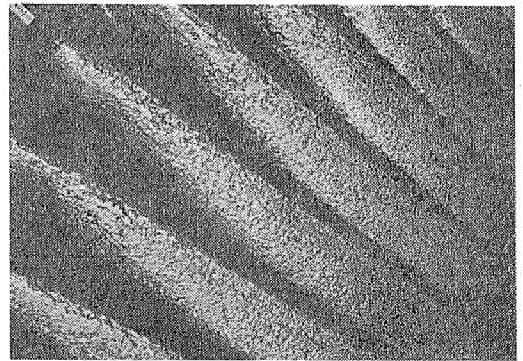
徐々にスケールが流入し比較的長い間に閉塞が進行する場合には、特に回転部においては円周平均化して進行するため、通常軸受振動は問題にならない。営業運転初期において、一度に多量の泥状物質が流入し、ノズルおよび羽根が部分的に埋まった状態となり、大きな振動を発生させトリップした例があった。その後も5~6カ月にわたって数回多量の泥状物質が噴出したが、その場合は、直ちに該当蒸気弁をラインより切り離し、蒸気弁の安定をまってタービンに蒸気を流入させるようにしている。現在はこのような急激な変化はなくなったが、安全のため蒸気弁より試料を取り出し凝縮水を作り、その透過度計測により多量のスケール噴出をチェックしている。また運転初期において羽根の飛散事故が発生し、振動が突変したことがある。これは、地熱蒸気雰囲気中での羽根材料の疲労耐寿命の低下およびNPF（ノズルからの励振周波数）との離調不足によるものであるが、詳細については後に述べる。これらの損傷は設計の改善により最近では完全になくなっている。

2.3 弁類のスティック

スケールの付着は、弁類のしゅう動部でも生ずるため、可動部分がスティックすることがある。このスティックを防止するために、主蒸気止メ弁および加減弁をそれぞれスウィングチェック形およびバタフライ形



第5図 運転時間とスケール付着による第1段入口圧の上昇



第6図 羽根の腐食、孔食

式としている。運転操作上スティック防止のために、

- (1) 主蒸気止メ弁は定期的（毎日）に弁の開閉テストを行なう。
- (2) 加減弁については、定期的（毎日）に開度を変える。すなわち負荷変化を行なうことを実施している。

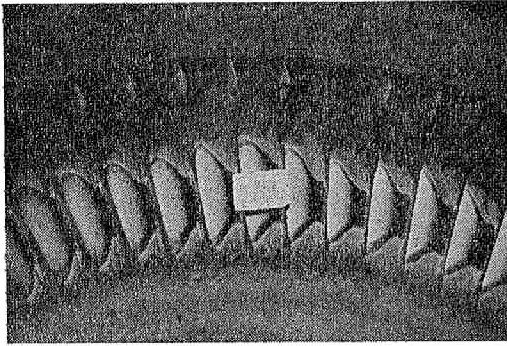
3. 地熱タービン機器の問題点と改善策

3.1 タービン本体

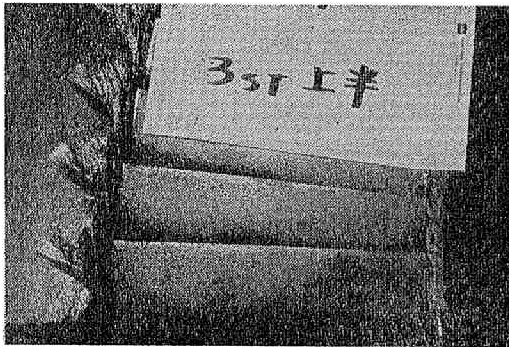
松川における地熱蒸気中には、硫化水素 H_2S を主体とした腐食性ガスや微粉を含み、また温度が低いためにタービン内部はほとんど湿り蒸気に曝され、排気段では普通13%程度の湿度となる。このような条件下において各部品は、水滴や微粉による浸食、スケールの堆積および腐食性ガスによる腐食が少なからず発生する。計画時点において、それらの蒸気性状を確認しタービン本体の材料選定および形状を決めているが、それでも種々の問題点が発生している。ここでは、それらの事例と改善案について述べることにする。

3.1.1 羽 根

営業運転から3カ月後の昭和41年1月、運転中々



第7図 ノズルダイヤフラムに付着したスケール



第8図 ノズルダイヤフラムの腐食、孔食

ービンが異常振動を発生してトリップしたため開放点検したところ、第3、4段羽根ノズルが泥状物質によって埋まった状態になっており、第4段羽根が損傷していることが発見された。これは、1号蒸気井からのセパレータで除去できないほどの多量の微粉が一時的に噴出しタービンの湿り領域の第3～4段に泥状になって付着したものと判明した。対策としては、蒸気井よりサンプリングし凝縮水を作り、その透過度を計測して微粉噴出をチェックしている。微粉噴出を認めた場合は直ちにその蒸気井をラインから切り離し、蒸気井の安定を待って再びタービンに蒸気を流入させている。

またその後約2年の間に、羽根、シュラウド、テノンの切損事故を経験した。これらの原因は、いずれも地熱雰囲気中での羽根材料の耐久限の低下、NPFとの微小な共振および孔食による切欠感受性の鋭敏化によるものであった。対策としては、羽根の肉厚を増し強度を上げ（一般火力タービンの約2倍）、極力NPFとの共振を避けた羽根とし、シュラウドはシャープな形状を避けたものに変えた。その後事故は発生せず、満足な結果を得ているが、腐食孔食の著しい羽根（第6図参照）に対しては、あらかじめ寿命を推定し新製交換している。すなわち先行補修で羽根の信頼性を更

に完全なものとしている。

3.1.2 ノズルダイヤフラム

ノズルダイヤフラムの問題点としては、スケールの付着とノズル板の孔食、腐食が主なものである。運転開始後10年以上にわたり、いずれもあまり問題となっていなかったが、最近（ここ3年程度）になって、特に第3段ノズルにおけるスケールの付着および孔食、腐食が問題となり、ひどい場合には、ノズル板背腹貫通の孔食までにいたった例がある。これらの状況を第7、8図に示す。蒸気通路部壁面、水平継手面の浸食も発生しているが、必要に応じ溶接肉盛を行なっている。溶接補修が行ないやすい材料の選択、および構造の採用も地熱タービンにとっては重要なことである。

3.1.3 ロータ

ロータは、硫化水素 H_2S に対する耐食性を考慮して、ニッケル (Ni) を含有しないクロムモリブデン鋼を使用している。14年間使用後のホイール部の状況を第9図に示すが、ほとんど腐食は発生していない。しかしながら地熱蒸気と空気が混じる低压グラウンド部においては、腐食が著しい（第10図参照）ために一部腐食部を削整している。腐食速度によっては、該当部の耐食性合金によるメタライジングまたはメッキが必要になるう。

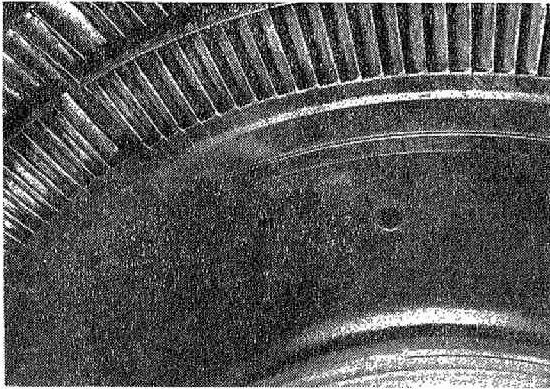
3.1.4 ケーシング

鋼板溶接製の一重構造であり、ドレンやダストが効率よく排出できるようにしている。構造用炭素鋼板製であるため、ノズルダイヤフラム嵌め合い部および水平継手面等の蒸気シール面、またドレン排出部およびドレンの衝突する部分に浸食、腐食が発生している。それらの状況を第11、12図に示す。これらの改善策として、浸食部にステンレス板を取り付けるか、またはステンレス系溶接棒で溶接肉盛を行なっているが、最近ではほとんど問題はなくなっている。

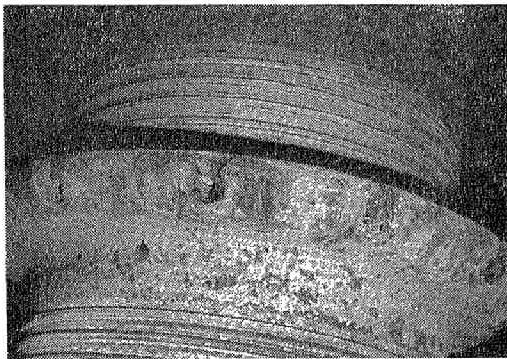
また排気室側グラウンド部における浸食が進行したために、グラウンド部をほぼ全体にわたりステンレス鋼材で製作し交換した。下半部はケーシングに直接溶接されていたが、浸食された場合の補修を考慮し、上半と同様ケーシングへボルトにて締め付ける構造とした。

3.1.5 主要蒸気弁

主蒸気の通路となる主蒸気止メ弁および加減弁は、スケール付着によるしゅう動部の焼付防止を考慮し、スウィングチェック形およびパタフライ形を使用しているが、加減弁弁棒および蒸気入口シール部の一部浸食がみられた程度でほとんど問題点はない。スケールも灰白色のものが均一に見られる程度で問題とならな



第9図 ロータホイール部



第10図 ロータ(低圧グラント部)の腐食

い。

3.1.6 調速装置および主油ポンプ

調速装置としては、機械遠心重垂式を採用している。調速装置の重垂は、一般的に銅合金で作られているが、地熱蒸気中には硫化水素 H_2S が含まれているために銅合金製重垂が腐食され、正確な調速機能を損なう可能性があるために、表面に硬質クロムメッキを施し表面の腐食を防止している。

主油ポンプにおいても、通常インペラは銅合金で作られているが、 H_2S に対する腐食を防止する目的でステンレス製としている。

3.2 熱交換器

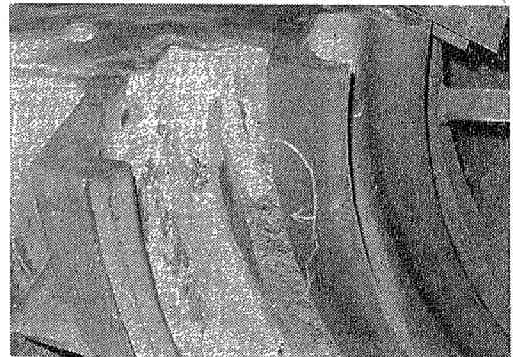
タービンに付属する熱交換器として、復水器、ガスエゼクタおよび冷却器、タービン油冷却器等の熱交換器が設置されている。腐食性物質や固形物を含む蒸気で、復水を回収する必要のない地熱発電所の復水器(ガスエゼクタ用冷却器も同様)には、冷却水を散水して蒸気に直接接触させ、熱交換させる直接接触式の復水器が採用された。

直接接触式復水器の形式には、機器自身で復水および冷却水の溜を持たず、復水、冷却水を10 m以上の

長さのテールパイプを流下させ、封水槽に放流して大気とのシールを行なうパロメトリックジェットコンデンサと、機器自身で復水溜を有するローレベルジェットコンデンサがある。

松川地熱発電所では、昭和41年10月の営業運転開始から昭和55年10月までの14年間はパロメトリックジェットコンデンサ(第13図参照)が採用されてきたが、昭和55年10月以降復水器容量の増加を主体として新設されたローレベルジェットコンデンサ(第14図参照)で運転されている。なお復水器の形式は設置場所および復水器切替のための工期等を考慮して、ローレベルジェットコンデンサとした。

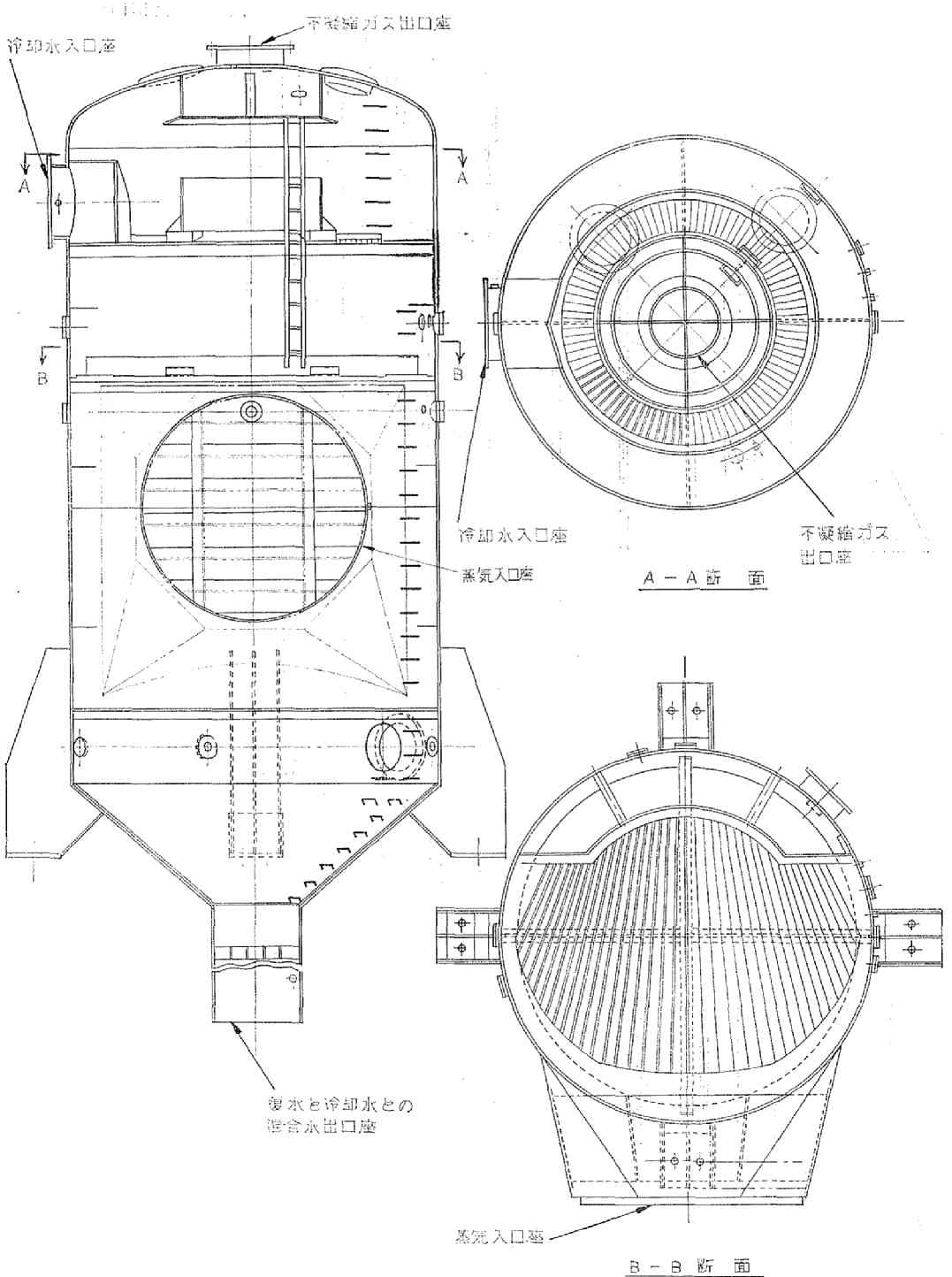
ガスエゼクタは蒸気噴射式が採用され、エゼクタは直列2段に配置(第2図参照)され、各段それぞれに直接接触式のパロメトリック形の冷却器が設置されている。またタービン油冷却器は、多管式の熱交換器が採用されている。ここでは、これら熱交換器の腐食、浸食およびスケール付着等問題点の事例とその改善策について紹介する。



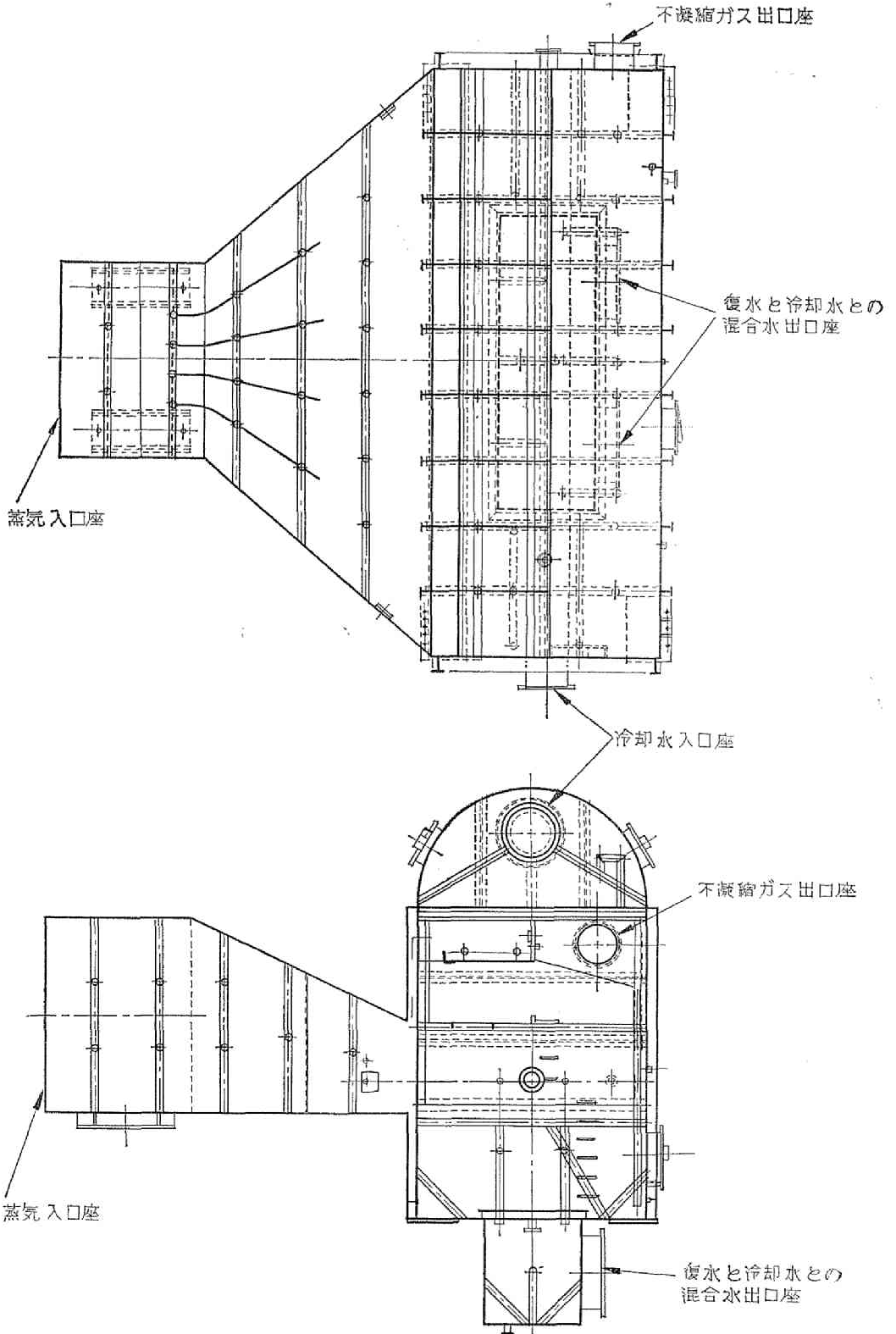
第11図 ケーシング(ノズルダイヤフラム嵌め合い部)の浸食、腐食



第12図 ケーシング(ドレン抜き孔部)の浸食、腐食



第13図 パロメトリックジェットコンデンサ構造図



第14図 ローレベルジェットコンデンサ構造図

3・2・1 復水器 (バロメトリックジェットコンデンサ)

復水器は、腐食性の高い蒸気、冷却水による腐食を防止するため、本体部分については炭素鋼鋼板の内面にエポキシのコーティングを施してある。なお本体下部の円錐胴部分には、復水と冷却水の落下によるエポキシコーティングの損傷防止のため、ステンレス鋼の保護板が取り付けられている。一方、内部構造物については冷却水の散水棚をステンレス鋼とし、補強および支持板等は、本体と同様炭素鋼板にエポキシコーティングが施されている。このような腐食防止対策が実施されていたが、運転開始約5年経過後ごろから、内面エポキシコーティングの損傷と剝離、損傷部分での腐食が発生した。コーティングの損傷は内部構造物の補強や支持板等の構造上技術的にコーティング施行の困難な箇所を主体に、冷却水と蒸気の一部が直撃すると思われる本体部分についても発生した。

対策としては、定期的 (定期点検ごと) な内部点検と損傷部の補修が実施されてきたが、内部構造物の中で炭素鋼製部材については、順次ステンレス鋼への取替えが進められ解決された。

3・2・2 ガスエゼクタおよび冷却器

ガスエゼクタは、すべてに耐食性に優れるステンレス鋼が採用されていて、腐食、損傷等は14年経過後も全く問題ない。しかしノズルおよびディフューザ内面には、強固な黒色のスケールの付着が見られる。このスケールは、定期的に除去することで問題なく運用されている。

ガスエゼクタ用冷却器は、復水器と同様の腐食防止対策が考慮されていたが、本体内面には全面に灰白色の粘土状のスケールが付着し、一部エポキシコーティングの剝離、損傷も発生した。対策としては定期的な内部点検と損傷部の補修が実施され、内部構造物の中で炭素鋼製部材については、順次ステンレス鋼への取

替えが進められ、問題なく運用されている。

3・2・3 タービン油冷却器

水室 (冷却水側) は铸铁製で、内面にはエポキシのコーティングが施されている。冷却管としては、応力腐食割れ感受性の低い脱酸銅 (DCuT-O) が使用されている。運転開始10年経過後において、水室については軽微なエポキシコーティングの剝離、損傷による腐食が発生した程度であったが、冷却管については、黄褐色のスケールが全面に付着し、内面全体に軽微な孔食の発生が認められた。冷却管のインレット部については、激しいインレットアタックと孔食を受けており、冷却管の取替えが実施された。管内面のスケール付着については、冷却器の性能低下防止を含め、定期的な清掃が実施されている。

まとめ

いままで14年間の状況を見ると、運転開始初期の2~3年の間は、地熱蒸気特有のスケール付着や疲労強度低下による問題点が多く発生している。これらの改善がなされた後は、経年的に少しずつ進行する浸食および腐食による問題が発生してきているが、これらの多くは、将来の状況が比較的明確に把握できるものである。したがって将来の損傷を予測し前もって部品の新製または対応策を考えるいわゆる先行補修 (Advanced Maintenance) を行なうことができる。松川地熱発電所における高稼働率の実績は、地熱タービンとしての経験をベースとした信頼性技術の発展と上記先行補修によるものと考えている。また松川の経験は火力および原子力プラントにおいても、発展的に利用されている部分もあり広く蒸気タービン技術に寄与しているといえる。地熱蒸気は、地域によって異なるため、これらの技術がすべての地熱タービンに適用できるとは思わないが、少しでも地熱タービン関係者の参考になれば幸いである。