

最近の地熱発電設備

江崎 融樹丞(えさき ゆりあ)

① まえがき

本誌で地熱発電技術特集号が発行されたのは1982年8月(Vol.55 No.8)で、それから約5年が経過している。この間に世界の地熱発電容量は表1⁽¹⁾のように増加したが、富士電機の地熱発電部門もこの間、新技術の開発、新規プラント受注に活躍している。また初期に納入したプラントの運転時間も蓄積され、それに応じて高い信頼性を示す運転データも豊富になりつつあるので、以下に現況をまとめて紹介する。

表1 世界の地熱発電所容量増加の推移⁽¹⁾

年次	発電容量 (MW)
1979年央	1,758.9
1980 //	2,110.536
1981 //	2,493.086
1982 //	2,558.886
1983 //	3,190.286
1984 //	3,769.686
1985年末	4,763.981
1986 //	4,733.446

② 地熱発電の現状

石油価格が安定している今日では、石油代替エネルギーの開発を急務とする声は石油危機当時のように高くはないが、地熱エネルギーが水力エネルギーとともにリサイクル可能なエネルギーで、特に我が国のように石油資源に乏しい国にとって貴重な国産エネルギーであることには変わりなく、政府でも調査井、生産井の掘削、多目的利用などに助成策を講じているが、大形発電プラント建設の面からみると、有望地点が自然公園内にあるものが多いこともあって、急速な発電容量の増加は望めない。むしろ富士電機が霧島国際ホテル向けに先鞭をつけたような、中小地熱発電

所が普及してゆくのではないかと考えられる。

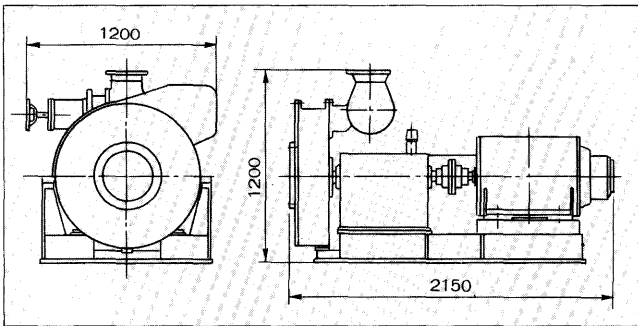
現在、地熱発電所の建設が最も活発なのは米国であって、電力会社には買電を義務づける PURPA 法や、1988年末までにプラントの運転を開始すれば法人税の節税ができる優遇策のためもあり、建設ラッシュの観を呈している。富士電機でも最近、オクスボウ社(ネバダ州)向け及びマグマパワー社(カリフォルニア州)向けに計3台、銘板出力で合計132.1MWを受注した。表2は1987年3月末現在での富士電機の製作・受注実績表である。

③ 新規プラントの説明

3.1 霧島国際ホテル自家用小形地熱発電所

このプラントについては地熱エネルギー誌⁽²⁾などで既に詳しく報告されているが、1960年箱根小涌園に納入した30kW(現在は廃止)に続き、温泉蒸気利用による小形地熱発電の可能性を具体化したものである。運転開始当初はタービン入口付近でのシリカの析出が激しく、清掃除去のためプラントを時々停止させる必要があったが、高性能サイクロンセパレータを設置後は極めて好調に運転中である。図1に外形寸法を示すようにタービンと発電機は共通台床上に据え付けられ、可搬式構造となっている。富士電機ではこの経験を生かし、出力1,000kWまでのものをミニGPUシリーズとして標準化している。この種の地熱発電には建設資金の利子補給制度もあり、既存の温泉蒸気を利用する

図1 100kW地熱発電ユニット外形図



江崎 融樹丞

昭和30年入社。地熱発電プラントの取りまとめに従事。現在、川崎工場火力技術部プロジェクト部長。

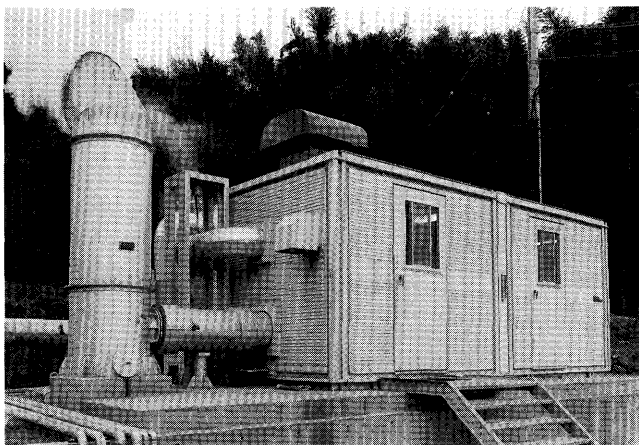
表2 富士電機の地熱発電プラント製作・受注実績表

略号説明 SF: シングルフラッシュ, DF: ダブルフラッシュ, NS: 天然蒸気

発電プラント名	藤田観光(株) 箱根小涌園	電源開発(株) 鬼首	CEL アウアチャパン 3号機	NCPA No.1 1&2号機	NPC オコイ No.5&7	SRH	NPC バリンビノン 1,2&3号機	DWR ボトルロック	SCE ソルトンシー
国名	日本	日本	エルサルバドル	米 国	フィリピン	アイスランド	フィリピン	米 国	米 国
運転開始年度	1960	1975	1980	1983	1980	1980	1983	1984	1982
台数	1	1	1	2	2	1	3	1	1
タービン形式	衝動単気筒 背 圧		反動単気筒 混圧 復水	反動単気筒 復 水	反動単気筒 背 圧 可搬式抗口発電	衝動単気筒 背 圧 可搬式抗口発電	反動単気筒 復 水	反動単気筒 復 水	反動単気筒 復 水 パッケージ形
プラントサイクル	SF		DF	NS	SF	SF	SF	NS	SF
出力									
定 格(kW)	30		35,000	55,000	1,500	6,000	37,500	55,000	10,000
最 大(kW)	30		40,000	56,000	1,875	6,000	40,100		10,250
入口蒸気圧力(ata)	2.4		5.6/1.5	7.9	7.0	5.1	5.77	7.4	7.4
入口蒸気温度(℃)	130		155/111	169	164	152	156.2	166	166
ガス含有量(wt%)	—		0.2/0	0.4	0.1	0.2	3.0	1.0	2.0
排 気 圧 力 (ata)	1.2		0.085	0.104	1.05	1.22	0.144	0.121	0.138
回 転 速 度 (rpm)	3,000		3,600	3,600	5,500	3,000	3,600	3,600	3,600
翼 列 段 数	1		7×2	7×2	4	カーチス 1	7×2	7×2	8
低圧最終段翼長(mm)	—		553	553	57	125	551	553	314
蒸 気 流 量 (t/h)	2.9		170/145	386	26	134	327	405	79
発電機容量(kVA)	40	28,000	40,000	63,950	1,875	7,500	46,875	61,110	11,390
電 圧 (kV)	0.22	11.0	13.8	13.8	13.8	6.3	13.8	13.8	13.8
力 率	0.8	0.9	0.875	0.86	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
回 転 速 度 (rpm)	3,000	3,000	3,600	3,600	1,800	3,000	3,600	3,600	3,600
冷 却 方 式	空 気	空 気	空 気	水 素	空 気	空 気	空 気	水 素	空 気
励 磁 方 式	静 止	ブラシレス	ブラシレス	ブラシレス	ブラシレス	ブラシレス	ブラシレス	静 止	ブラシレス

発電プラント名	大和紡観光(株) 霧島国際ホテル	NPC バリンビノン 3,4&5号機	NZE オハアキ	DWR サウスガイザース	羊八井	オクスボウ地熱 デキシバレー	マグマパワー デルランチ	マグマパワー J.J. エルモア
国名	日本	フィリピン	ニュージーランド	米 国	中 国	米 国	米 国	米 国
運転開始年度	1983	未 定	未 定	未 定	1986	1988(予定)	1988(予定)	1988(予定)
台数	1	3	2	1	1	1	1	1
タービン形式	衝動単気筒 背 圧 可 搬 式	反動単気筒 復 水		反動単気筒 復 水	反動単気筒 復 水 可 搬 式	反動単気筒 混圧反転流 復 水	反動単気筒 混圧 復水	反動単気筒 混圧 復水
プラントサイクル	NS	SF		NS	DF	DF	DF	DF
出力								
定 格(kW)	100	37,500		55,000	3,180	60,500	35,800	35,800
最 大(kW)	100				3,180			
入口蒸気圧力(ata)	2.5	5.6		7.8	1.83/0.52	6.33/1.46	7.87/1.20	7.87/1.20
入口蒸気温度(℃)	126.8	155.4		172.2	118/83	162/113	169/106	169/106
ガス含有量(wt%)	0.06	4.0		0.25	1.0/0	134/0.06	0.012/0	0.012/0
排 気 圧 力 (ata)	1.2	0.138		0.104	0.0518	0.056/0.092	0.17	0.17
回 転 速 度 (rpm)	3,600	3,600		3,600	3,000	3,600	3,600	3,600
翼 列 段 数	1	7×2		8×2	8	7+3	9×2	9×2
低圧最終段翼長(mm)	—	551		553	358	658	553	553
蒸 気 流 量 (t/h)	6	325		382	22/17.7	317/178	234/88	234/88
発電機容量(kVA)	125	46,875	55,444	61,110	4,000	67,230	42,120	42,120
電 圧 (kV)	0.44	13.8	13.8	13.8	3.15	13.8	14.4	14.4
力 率	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.85	0.85
回 転 速 度 (rpm)	3,600	3,600	3,000	3,600	3,000	3,600	3,600	3,600
冷 却 方 式	空 気	空 気	空 気	水 素	空 気	水 素	空 気	空 気
励 磁 方 式	ブラシレス	ブラシレス	ブラシレス	静 止	ブラシレス	静 止	ブラシレス	ブラシレス

図2 霧島国際ホテル自家用小形地熱発電所外観



場合には4年程度で建設費の回収が可能で、また浴用など温泉の在来利用にも全く影響を及ぼすことがない。

本機は背圧式であるが、計画の初期には復水式との比較検討もなされた。復水式では総出力は240kWとなるが、補機動力の増加により、正味出力は150kWと背圧式に比べて50kW増にとどまり、一方、建設費は約1.7倍となるので運転保守の容易さ、可搬性への配慮などから最終的には背圧式が採用された。図2は発電所外観で建屋自体も可搬式である。

3.2 羊八井 (Yang Ba Jing) 地熱発電所

羊八井は中国青島工場製の既設プラントもある中国では有数の地熱地帯であるが、チベットの首都ラサから北西約90kmのところであり、ヒマラヤ山麓に近く世界の屋根とも呼ばれる地域である。標高4,300mの世界最高地にある地熱発電所で、また我が国から中国への地熱発電設備輸出の第1号でもある。富士電機の供給範囲はタービン、発電機及び第1段フラッシュであるが、高地対策のほか、年間最低気温が -25.7°C であるので凍結防止対策、更に現地が世界でも最も隔絶した地域の一つであり、輸送のための道路事情も悪いので、製作着手前の事前検討、発送前の検査など特に入念に行った。本プラントは1984年10月受注後約9か月の短期間で製作し、1985年7月工場出荷した。その後約2か月かけて中国側によって現地へ搬入され、1986年1月早々から据付工事が開始された。

富士電機の据付指導員、試験員は高山病に苦しみながら中国側と協力し、同年3月無事営業運転を開始した。図3は現地で梱包を解かれ据付を待つタービン、図4は発電所外観である。

本プラントの特長の一つは3段フラッシュサイクルを採用していることで、第1段フラッシュで熱水を5.8ataまで減圧蒸発し、ガス抽出のエゼクタ駆動用に2 t/hの蒸気を発生している。第2、3段で発生した蒸気はタービンの高圧、低圧段にそれぞれ導かれる。

高地対策としては発電機の絶縁距離を標準設計の1.5倍以上としているほか、補機用電動機、ソレノイド類に至るまで、大気圧453.7mmHgのもとでの温度上昇を考慮した

図3 据付を待つ羊八井向けタービン

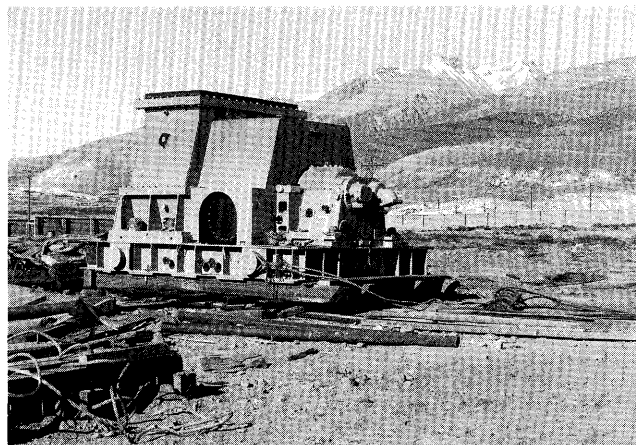


図4 羊八井地熱発電所外観



設計となっている。低温対策はソ連向け輸出品などで既に実績があるが、軸材に低温脆性の低いものを使用し、主油タンクにはヒータを設置したほか、排油の凝固を防ぐため停止時には系統内の残油がすべて油タンクに戻るような構造となっている。また、遠隔地での信頼性の向上と据付時フラッシング時間の短縮のため、油配管はすべてSUS304Lが使用されている。

3.3 米国向けの新規受注プラント

一つはオクスボウ社がネバダ州デキシバレーに建設されるもので、富士電機の供給範囲はタービン、発電機のほか、復水器、ガス抽出設備、ホットウェルポンプをはじめとする冷却水ポンプ類を含んでいる。プラントは1988年中ごろには据付を完了する予定で、現在鋭意製作中であるが、このプラントには後に新技術の項目で述べるような、混圧反転流式タービンと直接接触式複圧式復水器の二つの新技術が採用されている。また、タービンの最終段有効翼長は658mmで、地熱用としては最大級である。

最新の米国向け受注品は、マグマパワー社が南カリフォルニアのインペリアルバレーに建設される銘板出力35.8 MW 2台で、それぞれデルランチ及びJ.J.エルモア地熱発電所と呼ばれているが全く同形品である。同社としては同じ地域での第2、3号機にあたるが、既設の第1号機はダ

ブルフラッシュサイクルの高压・低压それぞれが別個の単流式ユニットとなっており、今回初めて混圧2流排気形が採用されたものである。1987年末から1988年初めにかけて出荷され、1988年中には運転開始の予定である。

④ 新技術

前記のオクスボウ社向け60.5MW にはじめて採用される、複圧式復水器と混圧反転流式タービンについて概略を述べる。

地熱蒸気はエンタルピーが小さいので、プラント出力の増大には復水器真空を高めることが大きな意味を持つ。一方、ダブルフラッシュサイクルでは、第1段フラッシュ又はセパレータからの高压蒸気には相当量の非凝縮性ガスが含まれているが、第2段フラッシュからの低压蒸気には全

く含まれていない。出力を増大するために真空を高くすると必然的に復水器からガスを抽出するための仕事量も増大し、エゼクタ駆動用の蒸気消費量の増加、あるいは圧縮機又は真空ポンプ駆動用の補機動力の増加を来してプラント正味出力の増加分を少なくすることになる。そこでそれぞれ真空度の異なる2基の復水器を設置し、高压蒸気側の排気は低真空復水器へ、ガスを含まない低压蒸気側の排気は高真空復水器へ導いて、平均真空として単圧式よりは高い値を得ながら補機動力の増加を避ける方法が考えられる。このような複圧式復水器の概念自体は新しいものではないが、今回製作されるものは図5に示すように、高真空部と低真空部を合体させて1基の復水器内に設け、冷却水ははじめ上部の高真空部に入って複数の多孔板トレイを通して排気を冷却しながら落下し、中間仕切部を経て次に下方の低真空部を同様に冷却する。中間仕切部の水深 H は上下

図5 直接接形複圧式復水器

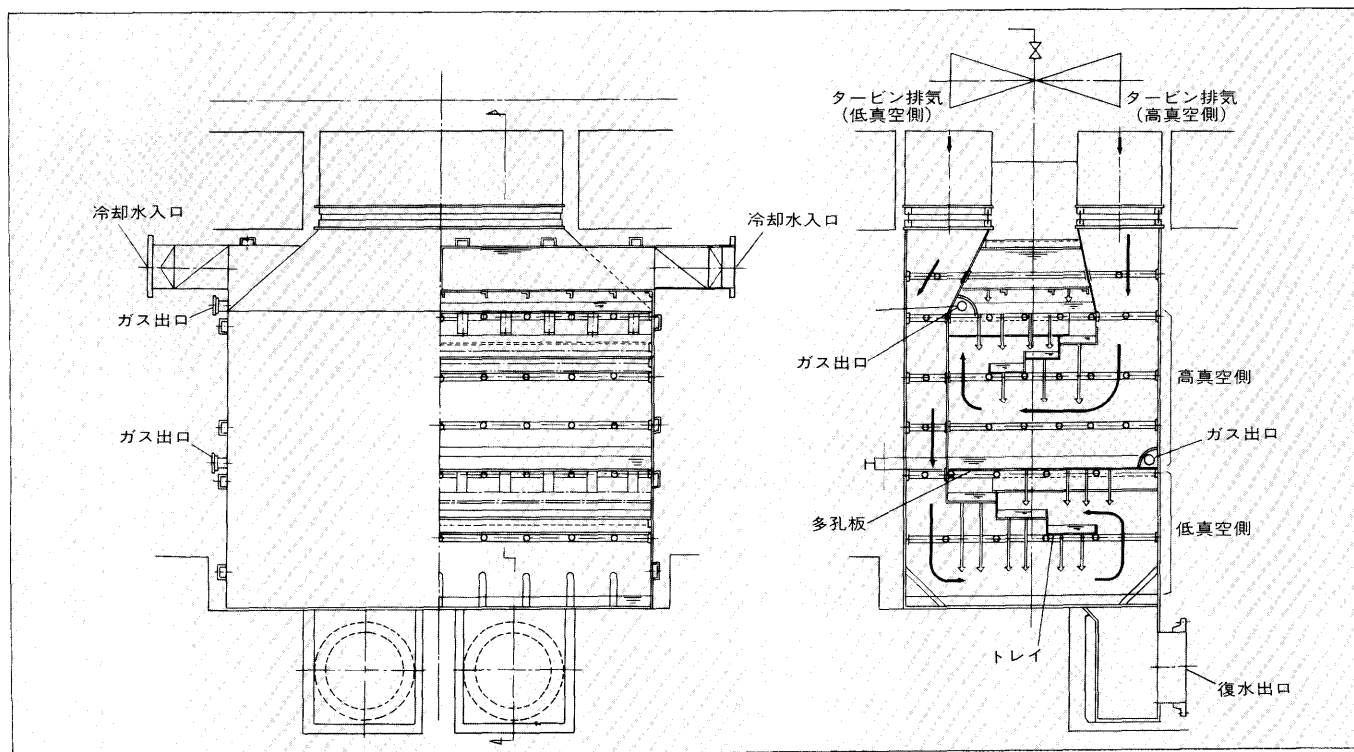


図6 単圧式復水器と複圧式復水器の温度（真空）の関係

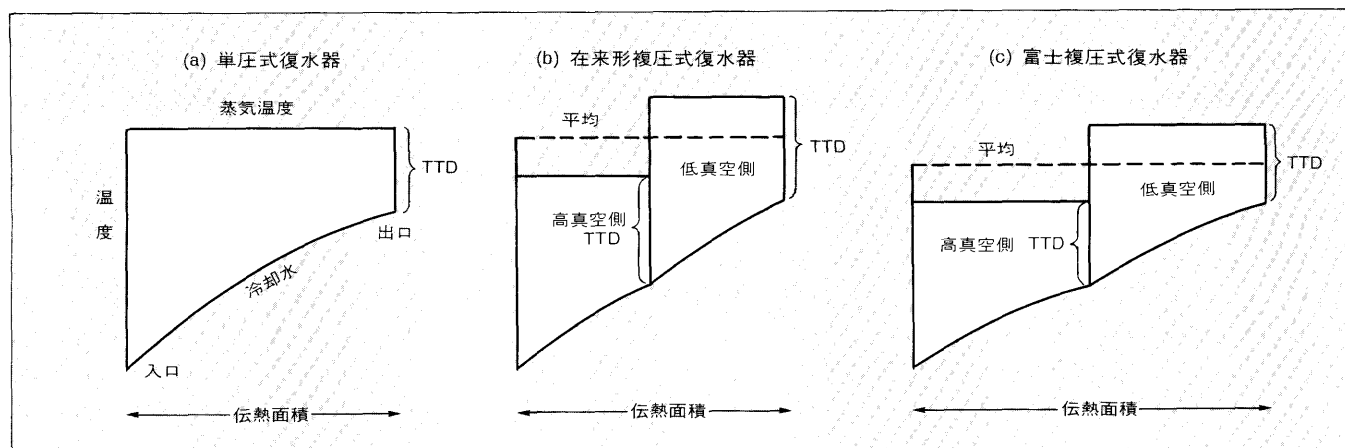
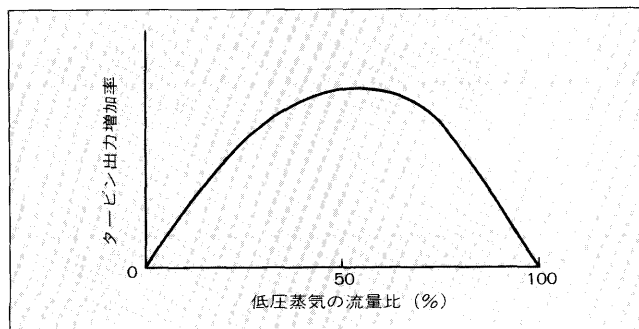


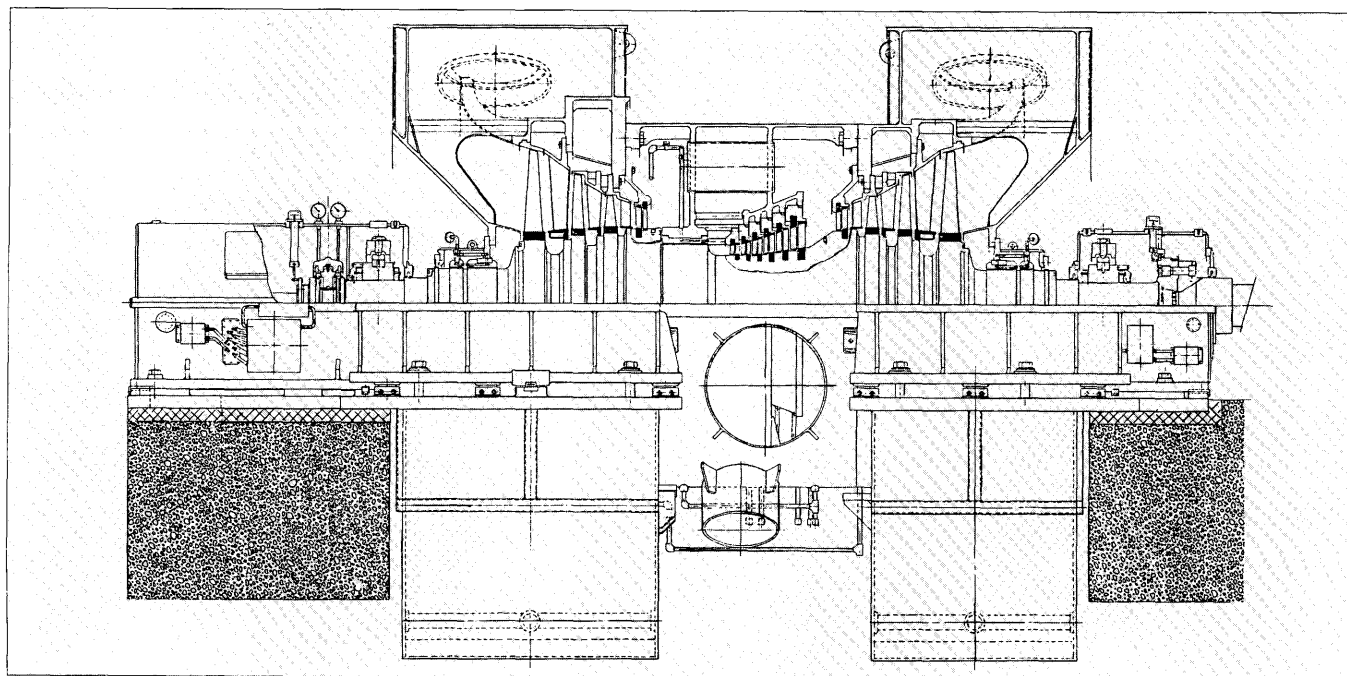
図7 高低両真空側の排気流量比と出力増加の関係



両室の圧力差に相当する。この方式によれば復水器の据付面積を小さくできるほか、高真空側から低真空側へ冷却水を移送するためのポンプも不要であり、補機動力の増加を最小限に抑えることができる。復水器を設計する場合には冷却水入口温度が与えられ、全体のシステムを考慮して出口温度を決めると図6(a)に示すように、真空は実現可能範囲内での終端温度差(TTD)により決定される。在来形の複圧式復水器では同図(b)のように、単圧式よりわずかに高い平均真空が得られるが、富士電機の設計のものは冷却面積を約30%大きくし、図6(c)に示すようにTTDは単圧式と同じ値で高い平均真空値を得ることができる。

複圧式復水器使用によるタービン出力の増加割合は図7に示すように、高真空側と低真空側の排気量が1:1の時に最大となる。しかし、一般にダブルフラッシュサイクルの場合は高圧蒸気量の方が低圧蒸気量よりも大きいので、タービン内部でほぼ低圧蒸気の入口圧力と同じ圧力まで膨張仕事をした高圧蒸気の一部を低圧蒸気の入口部へ反転合流させ、排気量を1:1に近づけるようにしたものが混圧反転流式タービンであって、一体形複圧式復水器とともに富士電機の特許となっている。図8にその構造を示す。

図8 混圧反転流式タービン



5 既納プラントの運転実績

富士電機が最初に納入した大形地熱発電プラントの運転開始から既に6年以上の時間が経過し、富士電機のエンジニアリング能力、設計・製作技術について客観的な判断を下しても良い時期であると思われる。

5.1 アウアチャパン(Ahuachapan)地熱発電所

ダブルフラッシュサイクルで主要諸元は表2に示したとおりであるが、富士電機の供給範囲はタービン、発電機だけでなく、バロメトリック式スプレージェット形復水器、ガス抽出設備、抗ロセパレータ、低圧蒸気フラッシュャ、蒸気ヘッダ、湿分分離器、冷却塔、配管設備までを含んでいる。1980年12月に営業運転が開始され、現在までに2度の定検が実施されている。

プラント信頼性の目安として、米国の信頼性評議機関であるNERCの定義に従って、

$$\text{強制停止率 (FOR)} = \frac{\text{強制停止時間}}{\text{運転時間} + \text{強制停止時間}}$$

$$\text{利用可能率 (AF)} = \frac{\text{運転時間} + \text{計画停止時間}}{\text{計算期間の総時間}}$$

をとると、富士電機の供給品だけでなく、生産井、送電線も含めたプロジェクト全体の数字は、手元にデータのある1986年4月末までで表3のとおりであって、非常に優れたものである。1986年4月30日までのこのプラントの総運転時間は約45,000時間であるが、この間にタービンに起因するとされたトリップは12件、合計9時間18分で、いずれもタービン本体ではなく、弁など付属品のトラブルに起因するもので、最も長いものでも3時間弱で復旧されている。したがって、富士電機の責に帰すべき事故に限れば、プラ

表3 アウアチャパン地熱発電所の強制停止率及び利用可能率

年 度	FOR(%)	AF (%)	備 考
1980	0.41	99.59	
1981	0.26	95.83	定検670時間
1982	1.04	93.08	デマンド無し156.5時間
1983	0.28	99.21	
1984	0.35	92.65	排水運河清掃610時間
1985	0.92	93.13	// 309時間
1986(4月まで)	0.21	99.59	

〈注1〉 排水運河清掃も計画停止時間に含めると、1984、1985両年のAFはそれぞれ99.50%及び96.66%となる。

〈注2〉 第2回定検は1986年4月以降に行われているので、本表には含まれていない。

表4 NCPA 第1地熱発電所の利用可能率⁽³⁾
(1983年10月～1984年1月)

停 止 理 由	停 止 時 間		
	1号機	2号機	合 計
PG & E(電力会社)送電線事故	17.6	17.55	35.15
復水器クリーニング	16.75	48.75	65.5
硫化水素除去装置の故障	17.25	8.25	25.5
生産井修理	—	5.75	5.75
蒸気供給設備不具合	19.75	19.75	39.5
送電設備故障	4.5	4.5	9
合 計	75.85	104.55	180.4
総運転時間(48時間/日×123日)			5,904
停止時間合計			180.4
プラント利用率			97%
蒸気に関する停止時間合計			136.25
プラント利用可能率			97.7%

ントの利用可能率はほとんど100%であるといえる。

5.2 NCPA 第1地熱発電所

カリフォルニア州北部のガイザース地域にある米国最初の公営地熱発電プラントで、当初は第2発電所と呼ばれていたが、第1発電所の計画が放棄されたので名称が変更された。主要諸元は表2に示したとおりで、富士電機の供給品はタービン及び発電機各2台である。

このプラントについては、1985年のGRC大会で、NCPAから詳しい報告がなされているが、その中でも短期間の統計ではあるが、表4に示すように利用率の高いことが示されている。プラント運転開始は1号機が1983年1月、2号

表5 NCPA 第1地熱発電所の強制停止率及び利用可能率

年 度	FOR (%)		AF (%)	
	1号機	2号機	1号機	2号機
1983	0.003	0.002	94.36	96.17
1984	0	0.06	99.70	99.89
1985	0.03	0.03	99.34	99.78
1986(6月末まで)	0	0.26	99.13	92.71

〈注〉 強制停止率(FOR)は富士電機の供給品に起因するもののみの数字

機が同2月であるが、それ以後年度別に富士電機の供給品に起因する強制停止率及びプラント利用可能率を示すと表5のようになり、先の例と同様に富士電機の地熱発電技術が極めて信頼性の高いものであることを示している。

⑥ あとがき

富士電機が納入した地熱発電設備が上記2例だけでなく、いずれも高い信頼性を発揮しているのは、優れた製造技術と品質管理体制によるのもちろんであるが、反動式タービンであるためタービン内部の蒸気流速が低く、エロージョンに対しても有利で、長期にわたって安定した運転が期待できること、シュラウド一体形高圧翼、完全自立形低圧翼の採用によりタービン動翼には溶接部、リベット部、ワイヤリングなどが皆無であることなど、根本的な設計思想の寄与しているところが大きいと考えられる。既納品の定検などの機会に得られた知見は次の製品に反映され、更に品質を高める努力がなされているのは当然である。

地熱発電は世界全体の発電量から見れば微々たるものであるが、地熱エネルギーが賦存している地域に焦点を絞って見れば相当の割合となり、ローカルエネルギーとしての意味は大きい。富士電機は今後とも地熱エネルギーの有効活用の分野で、いっそうの貢献をしてゆく所存である。

参考文献

- (1) Dipippo, R.: Geothermal Power Plants, Worldwide Status—1986, BULLETIN, Geothermal Resources Council, Vol.15, No.11 (1986)
- (2) 大窪三郎：霧島国際ホテルにおける地熱エネルギーの利用について、地熱エネルギー、Vol.9, No. 3 (1984)
- (3) Fontes, R.A.: NCPA Geysers Geothermal Development of Integrated Steam Field Management System, GRC Transactions, Vol.8 (1984)



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。