

火力機器の将来への展望

Some Prospects of Future Steam Power Plants

柴田 万寿太郎*
Masutaro Shibata

内 容 梗 概

めざましい進歩と発展を続けている火力発電機器に、今後実現されるであろうと思われるものとして、超臨界圧蒸気プラント、データ処理装置を備えて運転員を極度に節減したプラント、そして、プラント効率の向上を計るためにガスタービンを蒸気タービンと複合したプラントの出現を期待することができる。

超臨界圧蒸気プラントの実現には、超臨界圧ボイラの設計に画期的な技術が要求され、データ処理装置を発電所運転に応用して記録ならびに計算を自動的に行わせるには、計測器部門と電子管技術を基礎にした電子計算機技術の発達に期待しなければならない。また蒸気の圧力と温度を増し、機器を大形化することによって向上させられてきた火力発電プラントにガスタービンを複合されることによって新しい効率向上の道が開けてくるが、かかるプラントの実現には、ガスタービン自体の性能の向上と同時に、新しい形式のボイラを必要とする。

筆者はこれらの新しいプラントとその問題点について述べている。

1. 緒 言

1954年の“火力発電号”に“火力発電の新しい方向”と題して当時まだわが国において実現されていなかった新しい方向を三つ示した。それは、タービンに関しては Reheat Turbine の方向、発電機については Direct Cooling の実現、そしてボイラでは Cyclone Burner の出現に関してであった。あのとき筆者は、進歩発展の流れの激しい火力発電の技術界においては、これらの事がらも二、三年もたてばすでに旧聞に属し、それに代ってまた、まったく革新的な題目が脚光を浴びて現われるであろうことを予言した。

いま、後を振り返って見てどうであったろうか。まず Reheat Turbine についていえば、Reheat Turbine は今日わが国においてはまったくの常識となり、現在計画中の大容量火力発電所は例外なく Reheat Turbine を採用していることは周知の事実であり、1954年に発表した筆者自身の紹介はいま読んでばかばかしく感ずるほどのあたり前の事実となってしまった。

発電機における Direct Cooling と、ボイラにおける Cyclone Burner の実現は、Reheat Turbine ほどにあざやかに予言が適中はしていないが、わが国においては昭和34年に完成した発電機は Direct Cooling が採用され、また Cyclone Furnace ボイラは今

年度日本における第一号機が運転にはいる。

この両者はアメリカにおいてはすでに常識となっているが、わが国においても大容量発電機には例外なく Direct Cooling が採用され、石炭の質に応じて Cyclone Furnace を採用したボイラの実現の数が増大することは間違いのないと見てさしつかえない。

それならば、これからの5年間に発展を遂げる火力発電技術の題目は何であろうか。

火力発電所プラントの技術は総合技術である。主機と称されるボイラ、タービン、発電機の技術の発展と歩調をそろえて、復水器、給水加熱器類の熱交換装置、給水ポンプ、冷却水ポンプなどのポンプの技術、送風機の技術、配電盤、電気機器、制御装置、計測器類、そしてこれらを連結させる配管配線の技術などあらゆる部門が進歩発展することによってはじめて新しい火力発電所プラントの実現が可能であり、このためにその専門分野においてはたえず努力が傾けられているのである。

しかしながら本文においてはこれらの分野の発展について一つ一つ取上げて述べることはやめ、これらのうち最も大きな革新をもたらすであろうと思われる三つの題目について以下少しくわしく述べることにしたい。

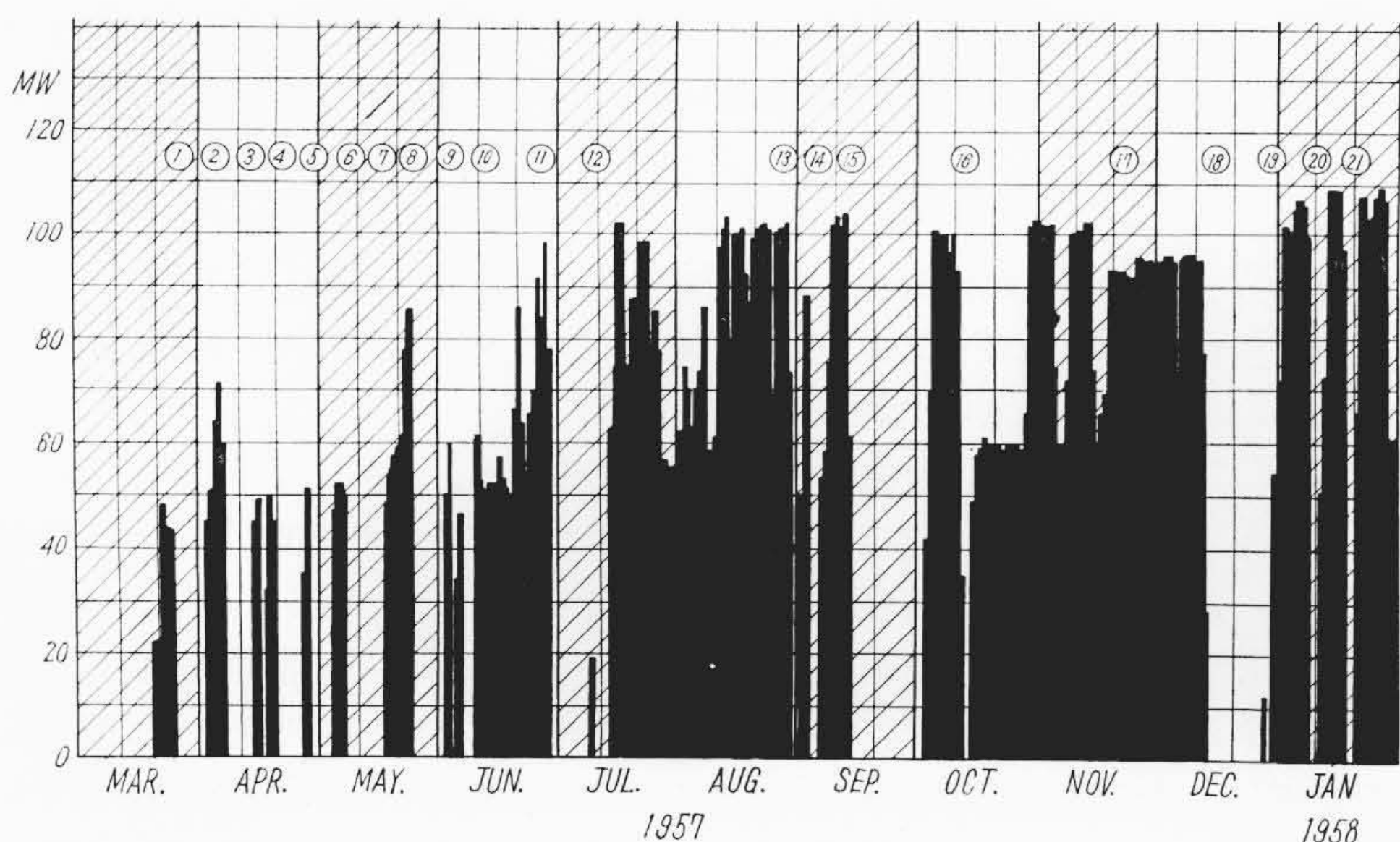
この三つの題目とは、ボイラにおける超臨界圧蒸気の利用、制御機構におけるデータ処理装置の適用、そしてガスタービンを蒸気タービンサイクルに複合させたプラントの実現についての3題目であり、これらの新しい技術における問題点について述べてみたい。

2. 超臨界圧ボイラ

超臨界圧蒸気を採用した事業用発電プラントをアメリカにおいて初めて実現されたのは Philo の発電所である。

Philo 発電所が1957年の3月に運転にはいってからすでに3年を経過したが、この発電所の運転実績は今後の超臨界圧蒸気プラントの計画にきわめて多くの指針を与えた。

最も重要な事実、超臨界圧プラントとしては Philo で採用した125MWという容量は小さ過ぎたということと、4,500 psig という蒸気圧力は高過ぎたということであろう。



第1図 Philo 発電所の運転実績

* 日立製作所本社

第1表 超臨界圧ボイラの給水純度制限

Total dissolved Solids	0.250 ppm
Dissolved Oxygen, (O ₂)	0.007 ppm
Silica (SiO ₂)	0.020 ppm
Iron, (Fe)	0.010 ppm
Copper, (Cu)	0.005 ppm
pH Value	9.5

第2表 火力発電所人員率の例

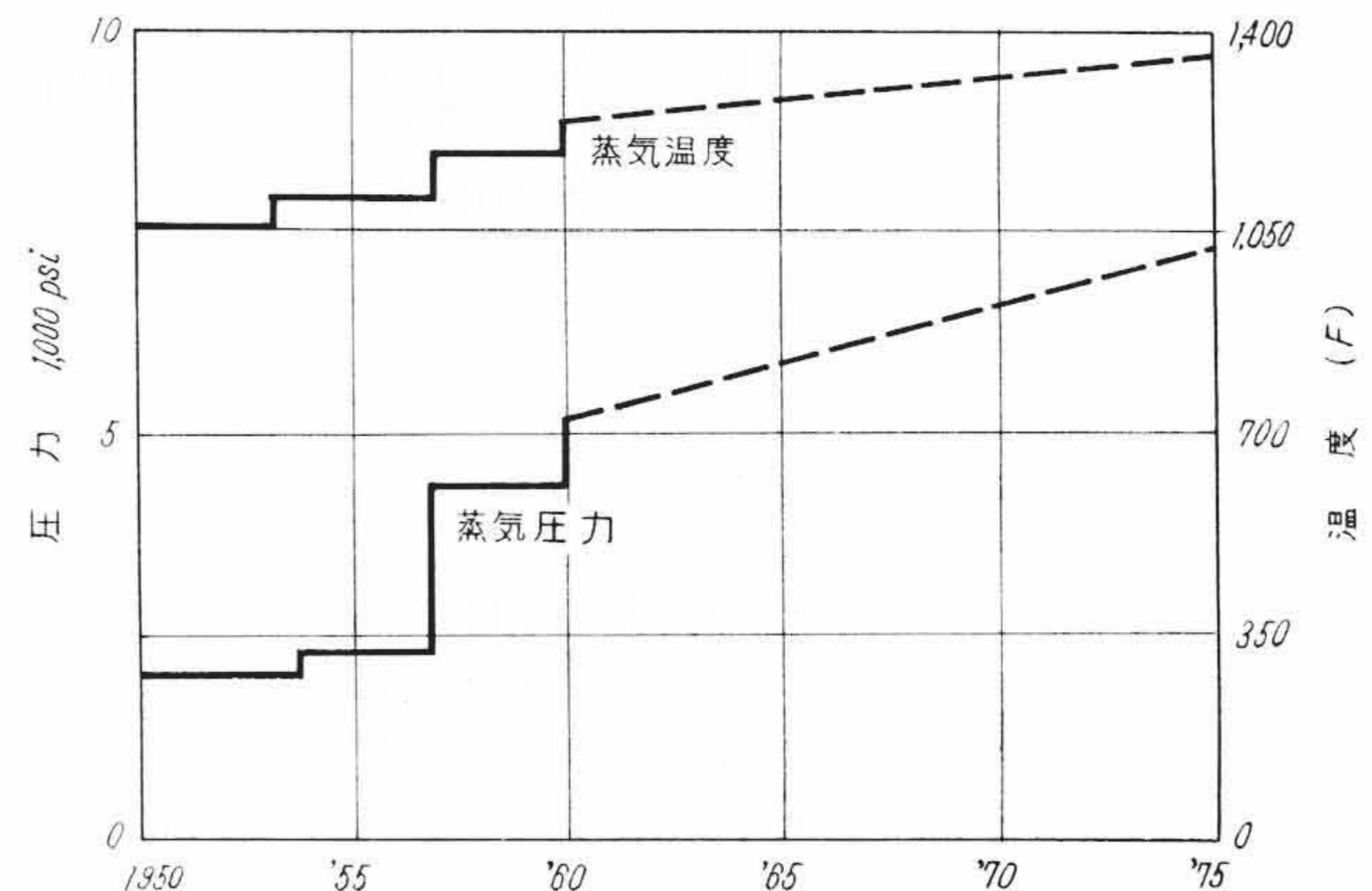
Name of P.S.	Installed Capacity (MW)	Unit Capacity (MW)	Employees	Men/MW
East Lake	577	(122.5×3 208×1)	137	0.238
River Rouge	520	260×2	126	0.242
Muskingum River	651	(213×2 225×1)	167	0.256
Clifty Creek	1,302	217×6	349	0.268
Kygen Creek	1,086	217×5	316	0.291
Kanawha River	426	213×2	126	0.295
St. Clair	500	125×4	172	0.344
Oak Creek	500	(120×2 130×2)	179	0.358
Tanner Creek	518	(152.5×2 213×1)	202	0.390
Colbert	720	180×4	281	0.391
Philip Sporn	610	152.5×4	251	0.412
John Sevier	540	180×3	243	0.450

超臨界圧プラントとして125 MW という容量を採用したため、補機の所用動力の比率が予想外に大きく出て、送電端効率が予期ほどでなく、発電コストを上げるように影響を与えている。また 4,500 psig という高圧を採用したことは、試運転時ならびに、運転開始後の事故が多く、1957年3月に運転開始後1958年1月に至る間、事故、点検などによって運転を休止した回数は21回あり、10箇月の平均負荷率は60%以下になっている。

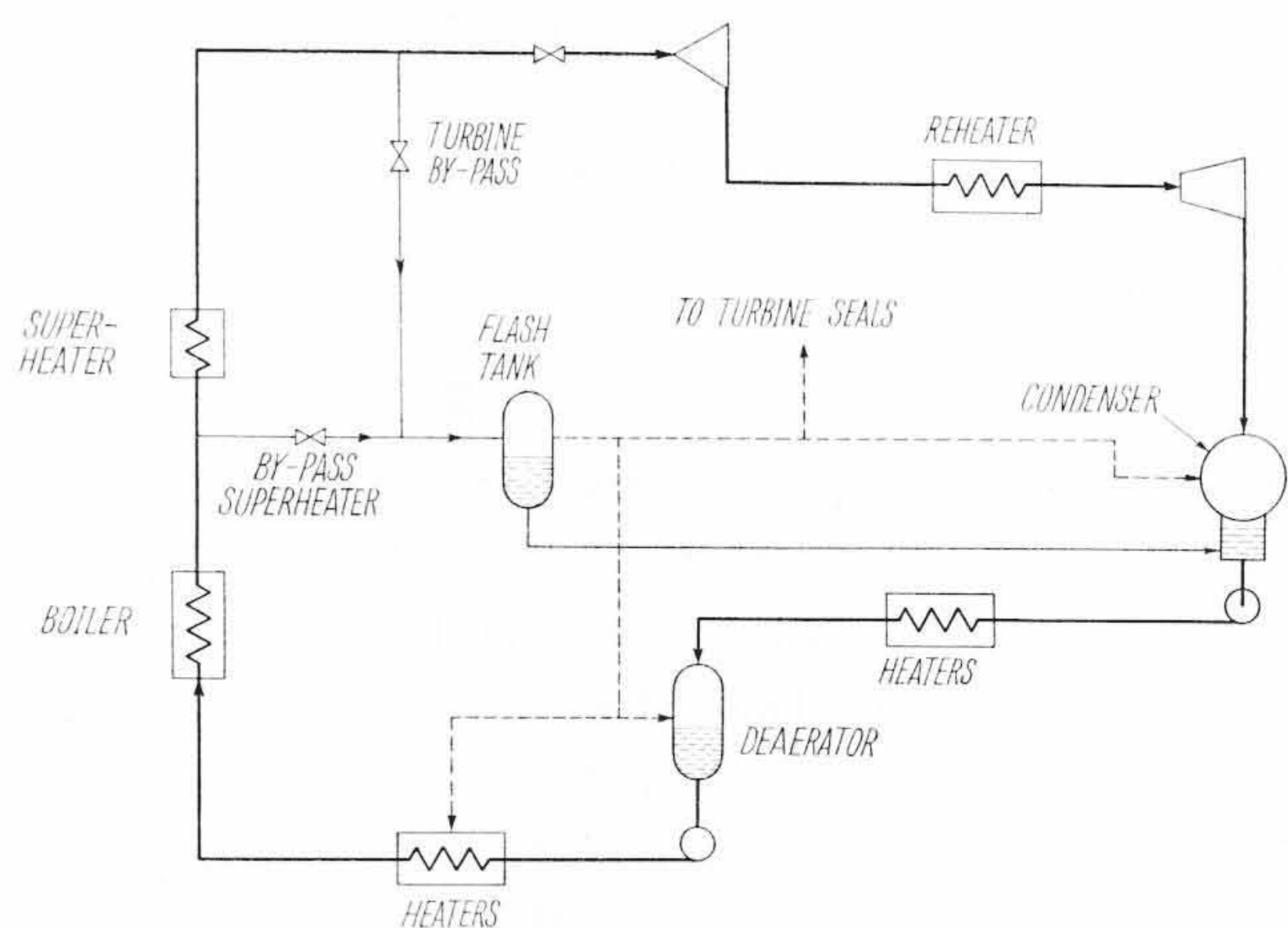
philo 発電所の超臨界圧プラントのパイオニアとしての意義は大きく、この発電所の経験によって次々に超臨界圧発電所が計画されているが、現在の段階においては、一歩退いて、3,500 psig 1,050 F の蒸気を使用するのがまず妥当なところと考えられ、容量も超臨界圧プラントとしては、300 MW 以上が適当なところであろう。アメリカにおいてはことし初め Breed No. 1 450 MW 3,500 psig 1,050/1,050/1,050°F などの超臨界圧発電所が運転にはいったと報ぜられているが、燃料費の高いわが国において発電コストを試算して見ると、もう少し小さい容量のところに限界点がある。

超臨界蒸気の圧力温度をいかに採用するかについて、Philo 発電所で採用した 4,500 psig より一歩退いて 3,500 psig がいまの段階では適当と述べたが、これをさらに長い視野をもって将来をながめると、過去の技術発展の歴史から考え合わせると、使用蒸気圧力と温度はさらに上昇し、それに適した技術が開発されてゆくことは間違いなく、視野を約15年にとって1975年当りをながめた場合の予想の一例を第2図に示す。いうまでもなく、このような上昇は発電所の単位熱消費率の低下を目的としたものであり、もしこのような上昇の度合が実現されれば、1975年におけるその発電所の単位熱消費率は1960年のものより約16%良くなると推定される。

第2図で示された予想蒸気圧力と温度は、その年度において計画される発電所の最高蒸気圧力と温度の予想であって、実際に発電所が運転にはいるのはさらに数年の先のことになるのではあるが、いずれにしても超臨界圧を採用した発電所が増加して行くことはまちがいない、第2図に示されたような 7,000 psig 以上の蒸気圧力を



第2図 蒸気圧力および温度の上昇予想



第3図 起動バイパス系統

採用した超臨界圧プラントの出現も15年先の将来に見通すことができる。

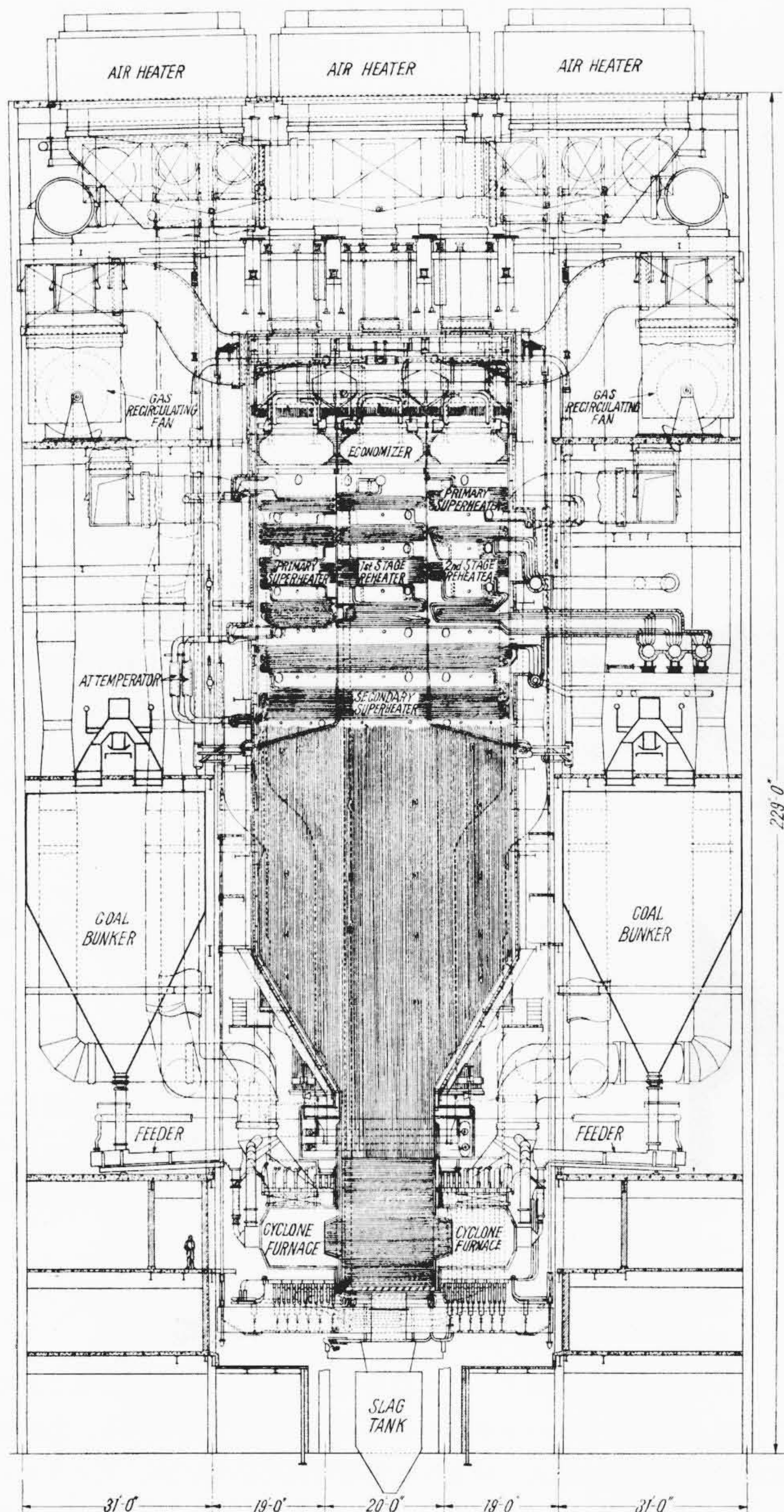
現実に振りもどって見て、超臨界圧プラントが、従来のプラントと比較してむずかしい点はどこにあるであろうかという点、まず第一に蒸気発生装置の設計が従来のボイラとまったく異なることをあげなければならない。

臨界圧以上においては水と蒸気の比重がほとんど同じであるという点、基本的にボイラの設計をむずかしくするところであり、従来のボイラでは蒸気は水より軽い比重を持つという点に立脚して、水から蒸気を分離すること、すなわちボイラドラムの中で比重の軽い蒸気を分離して取り出し、水はふたたび循環させることがボイラ設計の基本であった。超臨界圧においては蒸気は水から分離しないで混在しているのでまったく異なった設計が必要である。

超臨界圧以上における蒸気の性質をはあくし、まったく新しい構想のもとに蒸気発生装置を設計するために、1952、3年ごろから欧米のメーカーによってパイロットプラントが作られて実験が進められていたものである。

上記のような蒸気の性質を満たすため、ボイラは必然的に once-through 形が採用され、ドラムのないボイラの管群の一端から水がはいり他端から蒸気が出る形になる。ドラムがないために、水中に含まれる不純分の除去が困難になり、一方ボイラ管群は肉厚の細いものになるため、ボイラ水の純度に関しては従来とまったく異なった過酷な標準を与え、これから得られるような純水装置が必要であり、同時に水の純度のきびしい管理が要求される。第1表は超臨界圧ボイラの給水純度制限値の例である。

運転技術上から見て超臨界圧ボイラの従来とまったく異なってい



第4図 Breed 火力発電所のボイラ

るのはその起動の方法である。

ボイラにドラムがないため、ボイラ管群を通った水はそのまま過熱器を通り、タービンの中に流れ込むことになり、起動の際十分高温にならない蒸気や水がボイラ過熱器やタービンにそのまま流れ込むことは危険であり、これを防止するために過熱器バイパスとタービンバイパスの系統で水と蒸気をのがしてやる必要がある。

第3図はこのプラントにおける起動バイパス系統を示す。まず起動に際しては、約1/3負荷に相当する給水を系統に循環させる。過熱器バイパス弁はボイラの水と蒸気の温度が過熱器部分通過してもさしつかえない程度に上昇するまで開かれてある。この段階においては、蒸気のバイパス弁も開いて置き主蒸気管を暖めると同時に、低温の蒸気がタービンに流入するのを防ぐ。

タービンに許される最低の温度にまで蒸気温度が上がれば主蒸気は除々にタービンに流入される。タービンバイパスと過熱器バイパスから導かれた水と蒸気は図に示すようにフラッシュタンクを通り復水器、脱気器、給水加熱器に導かれる。

第4図は本年初め運転にはいった Breed 発電所の超臨界圧ボイラの断面図である。ボイラは蒸発量 1,330 T/h, 使用蒸気 3,500 psig,

第3表 データー処理装置によって自動記録された
発電所日誌

1.	2.	...	26.	27.	28.	29.	...	48.	49.	50.	...	61.	62.	63.	64.
罐	過		復	主	再	排		送	発	発		所	プ	タ	ボ
胴	熱		水	蒸	熱	気		電	電	電		内	ラ	ー	イ
圧	器		器	気	蒸	室		電	機	機		比	ント	ビン	ラ
力	出口		真空	温度	温度	温度		力量	電圧	電流		率	総合	発電	効
	圧力												効率	機効率	率
12°・00'	180	170	724	565	539	36		175	120	8800		60	3887	4480	8745
12°・30'	180	170	724	565	538	36		175	120	8800		61	3887	4479	8746
13°・00'	181	171	724	567	538	36		175	121	8750		61	3888	4478	8746
13°・30'	181	171	725	567	539	36		175	121	8750		61	3888	4479	8746
14°・00'	180	170	725	566	539	36		175	120	8800		60	3889	4479	8747
14°・30'	180	170	724	565	538	36		175	120	8800		60	3890	4480	8748
15°・00'	180	170	724	565	538	36		174	120	8700		61	3889	4480	8747

1,050/1,050/1,050°F である。

3. データー処理装置

火力発電所における単位出力当りの所要人員数を減らして発電原価の切下げを行うために、新しく計画される発電所の設計に当っては次々に新しい装置が採用され、極力人手の不要なものに作られて行っている。4,5年前までは発電出力 1,000 kW 当り一人という人員率の値は目新しいものであったが、今日ではアメリカにおける実例を調べて見ると第2表に示すように、0.23~0.25 人/1,000 kW という発電所もあり、一般に 0.5人/1,000 kW は常識となってきた。

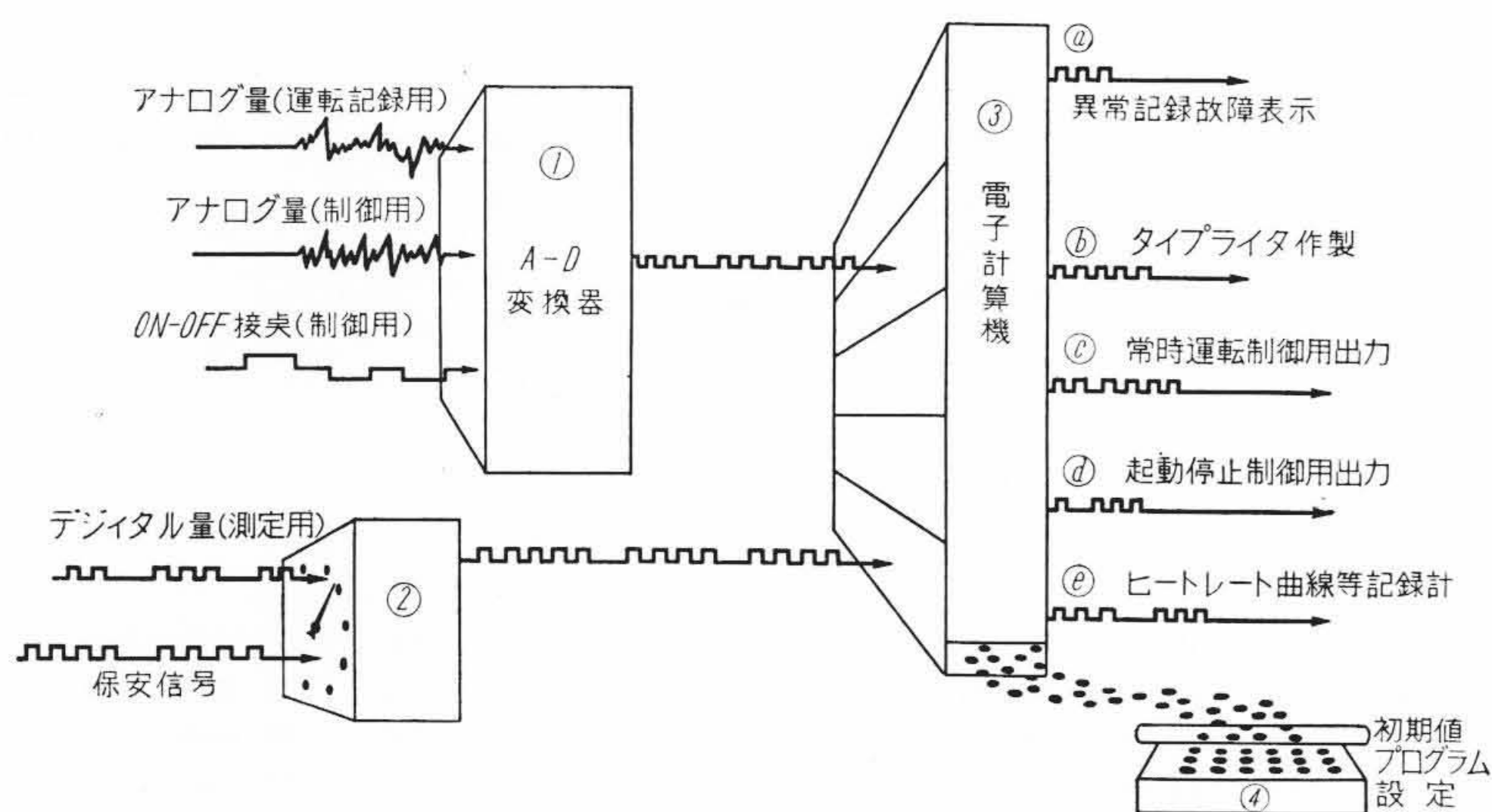
これらの数字はいうまでもなく、発電所の容量、ユニットの大きさ、機械の性能、立地条件などによって異なるもので、アメリカと国情の異なる日本においては現在これまでの数字は出てきていないが、新しく建設されつつある発電所の人員率はおおむねこの数字に近づいてきている。

それでは、第2表に示されたような人員をさらに節減するためにはいかなる方法があるであろうか。

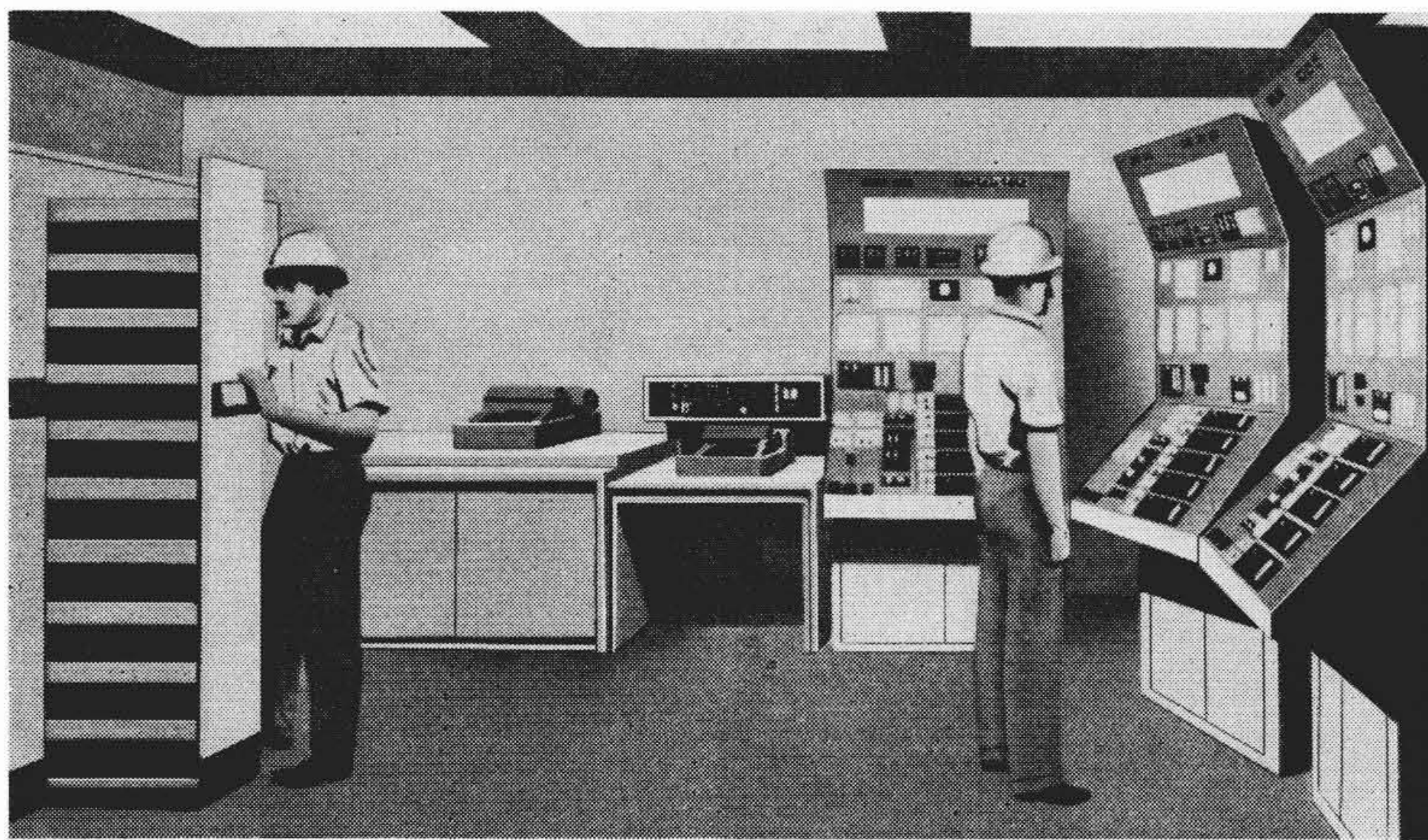
まずこの人員の構成を分析し、その仕事の内容を見ると、機械の起動停止の仕事は別にすれば、機器の監視と運転データーの記録がその大部分の仕事である。これを自動的に行わせることができれば人員がさらに削減できることは明らかである。この目的を達するためにデーター処理装置を使用することができる。すなわち現在どこの発電所でも実施している運転日誌を自動的に記録させ、同時に必要な計算たとえばタービン効率、ボイラ効率、プラント効率などの計算を計算機によって行わしめてこれを自動的に記録させることにデーター処理装置を利用できる。

第3表はデーター処理装置によって自動的に記録された運転日誌の例で、各30分ごとに、1. 罐胴圧力、2. 過熱器出口圧力から65点のデーターがタイプライターによって自動的に打込まれる。61, 62, 63, 64, などの所内比率、効率の数字は計算式にあらかじめ記憶させて置いて、この式に従って自動的に計算した結果が記録されるものである。

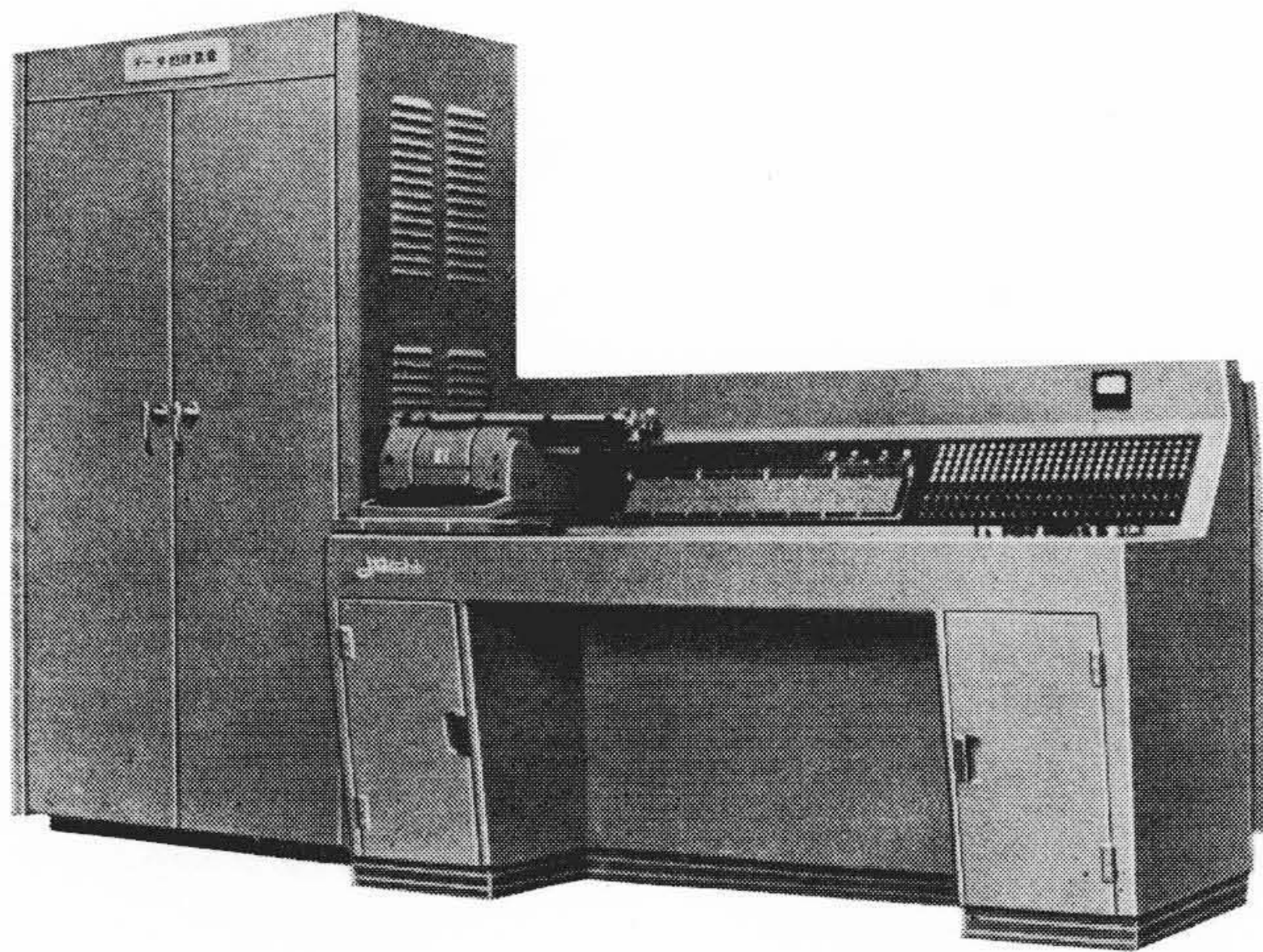
データー処理装置を採用して火力発電所の自動制御を行った実例はアメリカにおいてもまだきわめて数が少なく、一、二の実例しか発表されていないが、その第1号ユニットとして発表されているのは Little Gypsy の 225 MW ユニットであって、この発電所の運転開始は本年半ばといわれている。第5図は Little Gypsy 発電所



第5図 Little Gypsy 火力発電所の自動制御方式



第6図 最も新しい火力発電所制御室



第7図 データー処理装置

の自動制御の概念を示したものである。

運転記録用アナログ量と制御用アナログ量ならびに ON-OFF 接点からの信号は①のA-D変換器にはいってデジタル量に変換されて③の電子計算機にはいる。運転記録用デジタル量と保安回路信号は②のタイマーリレーを通して③の電子計算機にはいる。

③の電子計算機からは④異常記録と故障表示、⑤運転記録のタイプライター打込み、⑥常時運転制御用出力、⑦起動停止制御用出力、ならびに⑧熱消費量、プラント効率などの、運転状況記録への表示が与えられる。

このシステムにおいては、発電機の起動も自動的に行わせること

ができる。約800のステップを踏んでボイラの起動から発電機の負荷までが4時間半で行われるが、この起動の過程は単に“Start up”のボタンを押すことによって自動的に進行する。

800のステップのプログラムは④によって与えられ、一つ一つのステップからの出力は③の④から出て①、②にフィードバックされ、次のステップへ移行する。正当なフィードバックの届くまでは電子計算機は次のステップへ移行するのを待ち、定められた時間たとえば2分間待っても正当なフィードバックのこないときは警報の系統が働く。正しいフィードバックを入力すればはじめて次のステップへ移行する。この電子計算機を使用する起動は人力によるものより1時間半早いと予想されているが、定められたプログラムによる以外の変則的な起動を行わせることは無理である。

発電機の停止もまったく逆に“Shut down”のボタンを押すことによってまったく自動的に行われ、約4時間でホットスタートの状態にまでもどすことができる。

第6図はこのシステムを使って極度に制御室スペースと人員を節減した最も進歩した中央制御室で、①は電子計算機、②は記録用タイプライター、③は計器盤である。

わが国で初めて電子計算機を採用してデーター処理を行う火力発電所は北海道電力滝川火力発電所で、このデーター処理装置は通常運転中のデーター処理と故障表示を行うものであるが、まだ起動停止をプログラムによって行わせる装置にはなっていない。第7図はこの種のデーター処理装置である。

4. ガスタービン複合サイクル発電所

ガスタービンを蒸気タービンのサイクルの中に複合させることによって、発電所全体の効率を上昇させることが考えられる。わが国には現在まだこの形式の発電所は実現されていないが、アメリカにおいてはすでに二、三の発電所に実現され、期待した効率の上昇を見ている。

ガスタービンを蒸気タービンのサイクルの中に複合させる方法としては大別して二通りの方法が考えられる。

1. 第8図aに示す排気燃焼ボイラサイクル。
2. 第8図bに示す過給ボイラサイクル。

第8図aに示されたサイクルでは、ガスタービンの排気をすべてボイラの炉内に送り込み、排気ガスの持つ熱量と余剰酸素をそのまま利用するものである。ガスタービンの出力に必要な燃料は一般のガスタービンのように燃焼器に噴入され、ボイラ用燃料は別にボイラバーナを通してボイラの炉内に噴出される。このサイクルにおけるガスタービンの容量は、ボイラの要求する余剰空気量によって定められてくるが、約15～30%の発電容量が増し、同時に一般発電所に必要なボイラ用強圧通風機を必要としないので、補機の動力が節減される。

第8図bに示すサイクルでは、ガスタービンの燃焼器は存在せず、ボイラの炉が燃焼器として使用される。

空気圧縮機(C)で圧縮された空気は直接ボイラにはいり、ここで燃料が吹込まれて燃焼を行いボイラの機能を果たしたのちボイラの排気がガスタービンに導かれて発電を行う。この場合ガスタービンの入口において燃焼ガスは5～6気圧、700～800°Cの温度を持たな

