

最近の火力発電設備と性能

関西電力 K K* 佃 俊 雄**

1. まえがき

近年のわが国における電力需要は日本経済の進歩とともに異常な伸びを示し、各電力会社ではこれに対処するため積極的に電源の開発に努め、昭和26年九電力会社発足時水力、火力併せて860万KWの電源が、昭和36年度においては1,900万KWを超え、九電力だけで実に1,000万KW余が開発されたことになる。この中、火力発電所の開発は700万KWに及び、昭和26年における火力発電設備280万KWの2.5倍の開発量となつている。昨年来の設備投資抑制政策により幾分電力需要の伸長率が下つたとはいいながら年間なお10%以上の伸びを示しており、昭和45年度末までに火力だけで九電力において約3,000万KW相当の開発が必要とされている現状である。

これ等火力開発の状況を展望すると、蒸気条件は既に2,400 psi, 1,050°F/1,000°F級が普通となり、これより更に超臨界圧に向つて進み、ユニット容量も156MW, 250MW級は既に中型化して、325MW, 375MWの大容量ユニットの建設が行なわれつつあり、更には400MW~500MWユニットの出現も近い将来と考えられる。誠に戦後の火力発電技術は偉大な飛躍をとげ、その進歩は今後も日進月歩の勢で続くことであらう。

本稿においては、技術的進歩の跡をたどりながら最近の火力発電設備についてその現状、特に設計上の問題点をとりあげて説明し、更に若干将来の展望を試みたい。

2. 全 般

電力会社において電源を開発する場合まず考慮することは、如何にして発電原価を安くするかということである。そのためには、発電設備の効率向上—安価な燃料を焚くことによる燃料費の節約と、建設費の節減による資本費の抑制、機器設備の合理化による人件費の節約及び送電ロスを少なくするための適切な位置の選定等が十分検討され、最も合理的なものがそれぞれ開発される。

以下その問題点をとりあげて考察する。

(1) 蒸気条件

効率向上のための蒸気条件を上げることは反面建設費も嵩むことになるが、発電原価の約60%が燃料費で占め

ている関係上効率のよい設備を必要とし、現状では蒸気条件として既に2,400 psi, 1,050°F/1,000°Fが最も普通であり、近く3,500 psi, 1,000/1,025/1,050°Fまたは3,500 psi 1,000/1,050/1,000°F等超臨界圧ユニットの採用が真剣に考慮されるであらう。

(2) ユニット容量

ユニット容量がどんどん大型化される傾向にあるのもKW当り建設費を安くするための方策である。第1図はユニット容量と建設費の関係を示したもので、図示の通りユニット容量増加に従いKW当り建設費は遞減するものと考えてよい。

前述の通り156MW, 250MWは既に中型化し、現在では325MW, 375MWのユニットが建設されつつあり、非常に近い将来に450MW~500MWとなるのは確実である。

(3) 重油専焼火力

建設費を安くするために重油専焼火力が採用されつつあることも特筆されねばならない。一般に重油専焼火力建設費は石炭専焼火力の85%でよいといわれる。実に現状では燃料単価が重油の方が安いことは発電原価がそれだけ安くなり、重油専焼火力が採用される理由となつている。

(4) コンビナート重油専焼火力

コンビナート重油専焼火力の出現も大きな特徴である。重油専焼火力発電所と石油精製プラントとをコンビナートすることにより、用地、揚油設備、貯油タンク等の設備を節減できるとともに、運賃がかからないためそれだけ重油の単価も安くなり発電原価を下げ得る上に安定した重油の供給源を確保できるメリットがある。

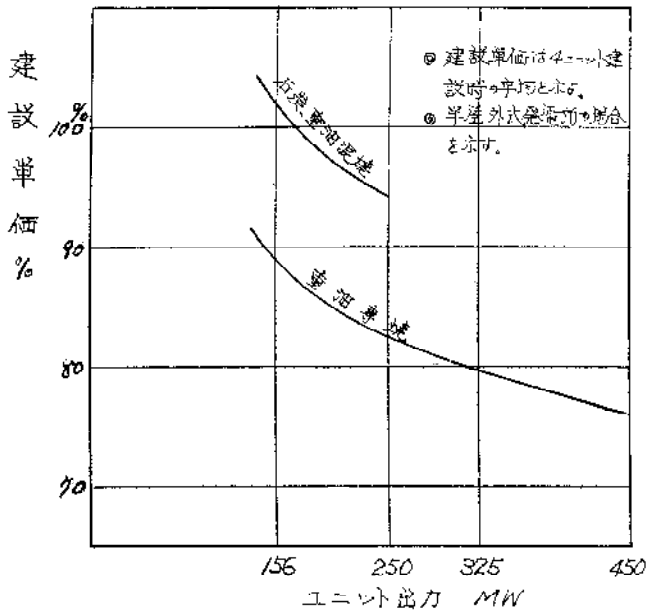
コンビナートの形式として発電所より石油精製に必要な蒸気を供給し、石油プラントより燃料の供給をうける形式と、単に燃料のみの供給を受ける形式があるが、現在建設されつつあるのは後者の例が多い。しかし前者の形式のコンビナート火力も早晚表われるであらうし、更に進んで自社で軽易なトッピングプラントを持つことも考えられつつあり、近い将来に出現するものと思う。

(5) ピークロード発電所

現在建設されつつある発電所はともに大容量のベースロード火力であり、水力と既設老朽火力発電所の起動停止または負荷変動によりピークロードを賄っているが、

* 北区中之島3の5

** 火力部長



第1図 ユニット容量と建設単価の関係

これ等老朽火力が新鋭火力におきかわつた時には、新鋭の再熱タービンユニットでもピークロードを持つ運転の必要が生ずるので、不容量の再熱タービンプラントにも将来の頻繁な起動停止を考慮した設計が必要となる筈である。また一方初めからピークロード用発電所としての性格を持った発電所、たとえばかなりの過負荷運転がきくよう設計した発電所とか、ガスタービンプラント、ディーゼルプラント等の出現も考えられる。

特にガスタービンプラントは起動停止が容易なばかりでなく、蒸気タービンプラントと結合するいわゆるコンバインドサイクルの採用によりプラント全体の効率を高めうるので、近い将来には必ず脚光を浴びるものと推定する。

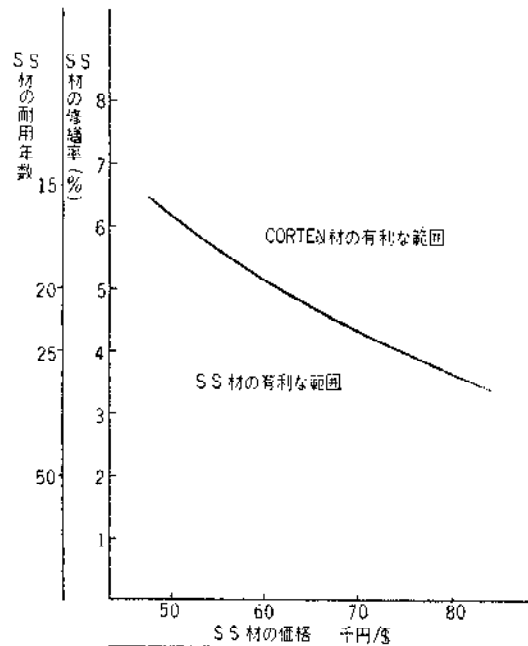
3. ボイラ

(1) 重油専焼ボイラの高低温部防食対策

重油専焼ボイラでは重油を焚くことによつて生ずる障害の除去に設計上の特徴がある。重油中に含まれるバナジウム (V_2O_5) は高温部のメタルを腐食しこれをバナジウムアタックと呼ぶ。バナジウムアタックはメタル温度 $1,400^\circ F$ ($650^\circ C$) 以上において激しいため、設計上特に高温部の過熱器管、再熱器管が高温ガスにさらされないよう配置が考慮され、またチューブスペーサはできるだけ蒸気冷却または水冷却のものを使用し、或はスペーサの長さを短かくしてメタル温度が高くないよう考慮しているのが一般的な傾向である。その他適当な添加剤の注入口を考えたり、火炉内が水洗できるよう水洗用座を設けている例も多い。

重油を焚くことによつて生ずる今一つの障害は、重油

中に含まれる硫黄分が SO_2 に変わり、さらにその1部が SO_3 に転換することによつて生ずる低温部エアーヒータや煙道の腐食である。対策としてはエアーヒータ部で燃焼ガス温度を露点以下に下げないように蒸気式空気予熱器を設けたり、エアーヒータ材質に耐食性の強いコルテンメタルを大中に採用する等の方法がとられている。なお第2図にSS材とコルテン材の経済比較を示した。煙道の防食についても同様材質の選定、防食塗料等の検討がなされつつある。



第2図 SS材とCorten材の経済比較AHエレメントについてのみ適用

(2) 加圧燃焼方式の採用

従来の押込通風機と誘引通風機をもつ平衡通風方式から誘引通風機を除き、押込通風機だけを使用する加圧燃焼方式が重油専焼ボイラの設置が盛んになるとともに脚光を浴びて来た。その利点とする所は冷空気の洩れ込みを防ぎ、過剰空気率を少くして燃焼中硫黄から生成する SO_2 の SO_3 への転化を防ぎ、低温腐食防止の有力な手段とするとともに、ボイラ効率の向上をもたらす。また誘引通風機をなくすることによる制御の簡易化と所内動力の節減が計り得る等である。

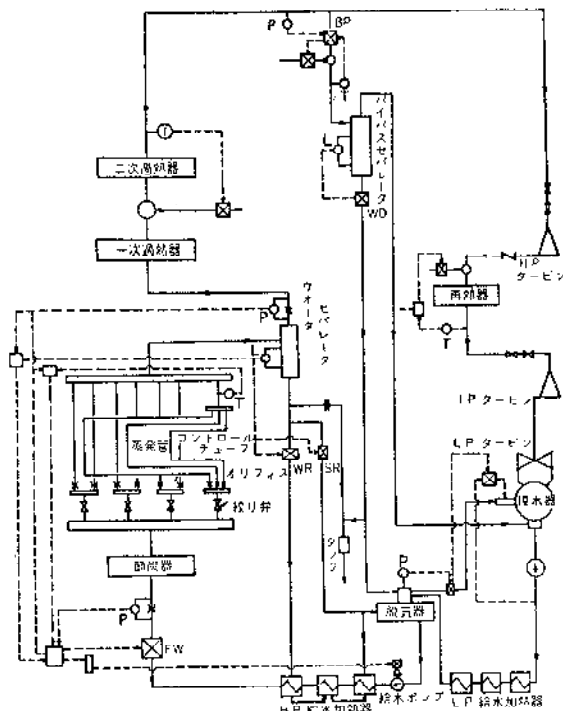
この方式は単に重油専焼ボイラだけでなく、石炭焚の大型ボイラにも採用される傾向にあり、既に米国においてはこの例も多く、国内でも尼崎第三発電所のように将来石炭を焚くことを考慮した重油専焼発電所で実際に加圧燃焼方式を採用しており、今後の新鋭プラントではこの方式のボイラが普通化して行くものと考えられる。

(3) モノチューブボイラの採用

ドイツ等ヨーロッパで過去25年採用されて来たモノチ

チューブボイラが最近米国やわが国にも使用される傾向になった。自然循環ボイラにおいて循環力の根本となる飽和水と飽和蒸気の比重差が圧力増加と共に減少し、臨界圧力では0となるので、超臨界圧域では循環ボイラは存在せず、また亜臨界圧域においても自然循環式では次第に循環力が不足する。現在圧力 200kg/cm² までは循環ポンプを置いて強制的に循環させる強制循環ボイラと共に自然循環ボイラも採用されているが、前述の通り超臨界圧においては必然的にすべて強制貫流ボイラ（モノチューブボイラ、ワンススルーボイラ）となる。モノチューブボイラでは蒸発伝熱面の配置が自由で、循環方式のボイラと比べてドラムが不要であり、火炉水冷壁ヘッダ、連絡管も少なく、かつ急速起動も容易なため亜臨界圧にも使用される傾向にある。既に超臨界圧ユニットへの準備段階として亜臨界圧でのモノチューブボイラ運転の経験を得るため、東電五井、閃電姫二、九電新小倉等で夫々モノチューブボイラが採用されていることも注目すべきであらう。

モノチューブボイラの特徴として、特に運転上からも重要なのはバイパス系と呼ばれる系統である。モノチューブボイラでは起動時のみならず、低負荷時においてもファーンスウォールをオーバーヒートから保護するため、全負荷時の30%以上の水または蒸気を循環させる必要があるとされている。このため蒸気を過熱器出口からタービンをバイパスして復水器に導き、給水系統に送る系統を持つ。これをバイパス系と呼び、ボイラチューブの焼損防止と共に、フィルタ、純水装置を併用して起動時系統を洗滌し、水の純度を数ppbに高める役目を果たさせて



第3図 モノチューブボイラの系統

いる。(第3図参照)

モノチューブボイラについて初期にはまだ若干問題もあらうが、蒸気条件が超臨界圧に向いつつある事実や運転操作の容易性、建設費の節減等から、将来は火力発電所のボイラの大部分がモノチューブボイラへと移行するものと考えられ、既に米国の1部メーカーでは200psi級以上にはすべてモノチューブボイラを推奨している事実などこの間の事情を物語っているものといえよう。

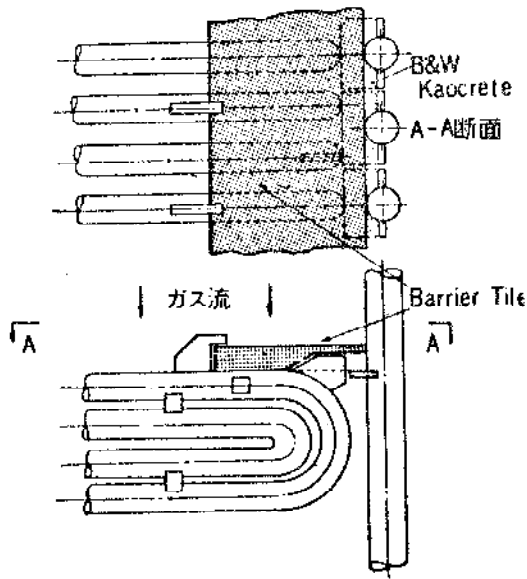
(4) 石炭焚ボイラ

重油専焼火力のメリットについては既に述べた通りであるが、燃料対策上、特に石炭産業の強化対策の一環としても或る程度石炭焚火力発電所の建設を進めねばならないのが現状である。石炭ボイラについては燃料炭の種類による燃焼問題、火炉構造の選定、接触伝熱面のエロージョン対策等が大きな問題である。また燃焼装置についてもボイラの大形化に追従して多くの改造を必要としているが、特に2, 3の問題点をとりあげ以下に説明する。

火炉構造と通風方式：ボイラの接触伝熱面入口におけるガス温度を灰の軟化温度以下に抑え、かつまた過熱器、再熱器で必要とする十分な熱量を与えるために、ガス再循環、副射過熱器の設置、火炉容積の検討等がなされて来たが、最近では炉内を酸化雰囲気保ち灰の軟化点をあげる方法が採りあげられている。即ち、石炭灰溶解特性として、その軟化温度は還元雰囲気にあるよりも酸化雰囲気にある方が約100°C 高く、この傾向は灰中の鉄分含有量が多い程著しいことを考えて、スキンケーシングを採用し炉外から漏洩空気を低く抑えて燃焼に必要な過剰空気をバーナで十分与え、同じ温度に対してスラッキングトラブルを少なくする方法がとられている。また更に進んで加圧燃焼方式の項で述べたように、石炭焚ボイラでもスキンケーシング構造の平衡通風方式から強圧通風方式を採る傾向が見えており、今後は石炭焚ボイラにも重油専焼ボイラ同様強圧通風方式が普通化されるであらう。

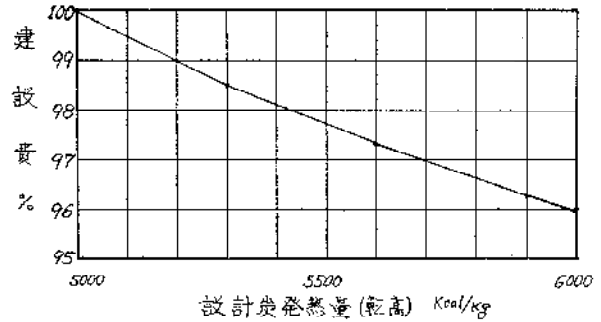
フライアッシュエロージョン対策：最近の傾向として灰分の多い低品位炭を使用する計画が多くみられるが、この場合問題となるのはフライアッシュによる接触伝熱面のエロージョンである。灰による侵食率は一般にガス速度の3, 5乗に比例するといわれており、このため灰の含有量とその組成に関連する適正なガス速度を選び、かつ管群中を偏流しないよう適切な偏流防止板を設けたりまた侵食のさけられない場所にはプロテクタを設ける等の考慮が払われている。第4図に偏流防止板の一例を示す。

設計炭：石炭焚ボイラを設計する場合、その根本となるのは設計炭の分析値である。戦時中の経験から従来実際に使用する石炭よりかなりの相悪炭で以て設計さ



第4図 偏流防止板既略図

れ、非常の事態にも対処し得るよう考慮される傾向にあつた。粗悪炭で設計したボイラで良質炭を焚いた場合と、初めから良質炭を焚く設計のボイラで良質炭を焚いた場合では効率にはほとんど差はないが、補機動力を介



第5図 設計炭発熱量とボイラ設備建設費との関係

めて考えた場合、実際に使用する石炭で設計する方が当然経済的である。更に補機類も含めた建設費は第5図に示す通り良質炭の方が安くなる。勿論将来の石炭事情を十分考慮して設計炭を決定すべきであるが、少くとも今後は実際焚石炭に近いもので設計されるようになるものと考えらる。

4. タービン

タービンの単機容量が増大すると、最終段動翼を通過する蒸気量が増すので、排気損失を減少らすために必然

第1表 タービン形式と定格出力の関係

	タービン形式	回 転 数 (r.p.m)	車 室 数	排気分流数	最終翼長 (I N)	定 格 出 力 (MW)
60 サ イ ク ル 機	TC 2 F-20	3,600	2	2	20	60~100
	TC 2 F-23	3,600	2	2	23	100~125
	TC 2 F-25	3,600	2	2	25	125~156
	TC 2 F-28	3,600	2	2	28	156~250
	TC 3 F-23	3,600	3	3	23	156~200
	TC 3 F-25	3,600	3	3	25	175~250
	TC 4 F-23	3,600	3	4	23	200~275
	TC 4 F-25	3,600	3	4	25	250~300
	TC 4 F-28	3,600	4	4	28	350~500
	CC 4 F-23	3,600/3,600	4	4	23	200~275
	CC 4 F-25	3,600/3,600	4	4	25	250~350
	CC 4 F-28	3,600/3,600	4	4	28	350~500
	CC 2 F-40	3,600/1,800	3	2	40	300~400
CC 2 F-44	3,600/1,800	3	2	44	350~500	
50 サ イ ク ル 機	TC 2 F-20	3,000	2	2	20	60~100
	TC 2 F-23	3,000	2	2	23	100~156
	TC 2 F-28	3,000	2	2	28	156~220
	TC 3 F-23	3,000	3	3	23	175~250
	TC 4 F-23	3,000	3	4	23	220~300
	TC 4 F-28	3,000	4	4	28	300~450
	CC 4 F-23	3,000/3,000	4	4	23	220~300
	CC 4 F-28	3,000/3,000	4	4	28	300~500
	CC 2 F-40	3,000/1,500	4	4	40	300~500

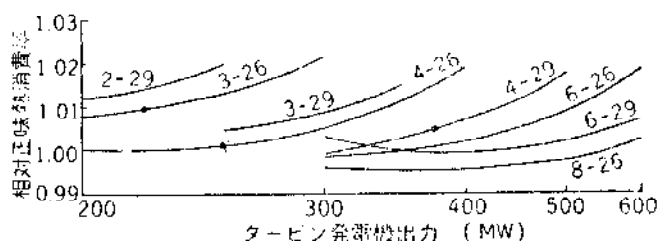
第2表 我が国の大容量タービンの実例

発電所, ユニ ット No.	型 式	単室数	容 量
関電姫二 #2	TC4F-25"	4	325,000kW
〃 堺港 #1	TC4F-26"	3	250,000 "
〃 〃 #2	TC4F-25"	3	250,000 "
中電新名古屋 #2	TC3F-26"	3	220,000 "
〃 尾鷲 #1	TC4F-29"	4	375,000 "
東電横須賀 #1	CC4F-23"	4	265,000 "
〃 〃 #3	CC4F-26"	4	350,000 "

的に長い翼が必要となり、これがタービンメーカー各社の競つて長大な翼の開発に努力する所以であり、既に3,000rpm, 3,600rpm用として28", 29"の開発が完了されている。またタービンを構成する高圧タービン、中圧タービン、及び低圧タービンの各エレメントを適当に組み合わせることによつて出力はかなり大きい所まで設計が可能であつて、これ等各エレメントの標準設計を整備し、これを合理的に組み合わせることをコンポーネント設計と呼び設計の基本方針として重要な問題である。このように長大な低圧最終段動翼の開発とコンポーネント設計の確立により、わが国のタービンメーカーにおいてもタンデムコンパウンド型では50万kW、クロスコンパウンド型では100万kW程度の設計も可能な状態である。第1表はタービン型式と最終段翼長及び定格水力の関係の1例を示したものでまた第2表にわが国で現在建設中の大容量タービンの代表例を示す。

第6図にはタービンの型式が正味熱消費率にどのような関係があるかの例を示した。

タービン型式として一般によく知られている通り、串型配置(タンデムコンパウンドTC)と併列型(クロスコンパウンドCC)とがあり、また併列型には各軸の回転数が同一(3,600rpmまたは3,000rpm)のシングルスピード形と、高圧、中圧軸が高速(3,600rpm又は3,000rpm)で低圧軸が低速(1,800rpmまたは1,500rpm)のツウスピード形があるが、後者は米国の北部寒冷地の高



第6図 タービン形式をパラメータにした出力と正味熱消費率の関係(3,600rpm)

注 蒸気条件 169kg/cm²g 588/638°C 真空 1.5"Hg 補給水率0% 給水温度0%

真空地域で使用される大容量機に採用されるのみで、わが国では今後も採用の機会は乏しいと考える。またシングルスピード形でも、発電機容量が設計上、工作上的の理由から制限を受ける場合とか、発電所の増設機等で据付面積や形状に制約を受ける場合に採用されるが、発電機も単機で500MWを出すことが可能となつた今日では、今後特殊な場合を除いてあまり普及しないのではないかと考える。すなわち効率と価格を考えた経済性から併列型よりも串型へ、またエレメント数減少の方向へと進んで行くものと思われる。

5. 復水器

タービン容量の増大につれてその排気を処理するため必然的に復水器の容量も大型になつた。従来150mW~220MWまでは復水器の型式としてトラバース型2パス型式が多く採用されて来たが容量の増大とともに冷却管をタービン軸に平行に配置するアキシヤルフロー型の1パス式が多く採用される傾向にある。その利点とする所は、

- ① 価格が安い
- ② 冷却管本数が大巾に減少し、管板部より漏洩事故の減少が期待できる。
- ③ 復水器流動損失の減少により循環水ポンプ揚程が軽減でき、動力費も少くすむ。
- ④ 半区向流式に設計できるので、タービン型式が4分流式以上になつてもタービン排気のバランスがとり易い。
- ⑤ タービン室機器配置が好都合となる等である。

今後は更に米国の2, 3の例に見るように大容量タービン用としてユニット容量が増大すると、復水器を2分割して低圧車室両側方に復水器を配置し、タービン基礎を低くするような設計も普及して来るものと思われる。

なお、わが国では1部を除きほとんどが海水で復水器を冷却しているが、最近のように都市の下水、工場の排水等によつて海水が汚染されてくると、復水器管の寿命が短く漏洩事故が多くなるとともに、管の汚染によつて真空度が低下する問題が生じている。このため従来使用されてきたアルミニウムプラス系統の管よりも汚染海水に強い新合金の開発に努力が払われており、また復水器管を常に清浄な状態に保つため、運転中も連続的に管を掃除できるような洗滌装置される傾向にある。

6. 給水ポンプ

プラントが高圧、大容量の途をたどるとともに、給水ポンプも高圧大容量のものが開発されて来た。

給水ポンプの吐出圧力を高めるためには、その段数を増すか回転数をあげる必要がある。段数を増すことは軸受間の距離を長くしシャフトの撓みが大きくなるので、撓み防止のためにはシャフトの径を太くするか回転部と停止部の間隙を大きくする必要があるが、何れもポンプ効率を低下する不利があるので、回転数を上げて段数の増加を抑え、しかも十分なシャフトの径を取つて信頼度を高めようとするのが一般傾向である。

次に注目すべきはその駆動方式であらう。火力発電所の給水ポンプに蒸気タービンを用いることは古くから行われて来たが、その初期には電動機駆動ポンプの予備と考えられることが多かつた。その後予備ポンプも電動となり、久しい間電動機駆動が用いられて来たが容量、圧力の増大により電動機駆動の不経済性が着目され、その結果再び蒸気タービン駆動方式（指圧蒸気タービン、又は復水式蒸気タービン）が復活したばかりでなく、さらに主タービン軸或は発電機軸直結のポンプも採用される傾向にある。

給水ポンプの駆動方式としては上述のプラントサイクル上の位置による区別の他に、給水量制御方式による区

別がある。即ちポンプを定速運転して給水量を調節弁によつて制御する方法と、ポンプを変速運転して給水量を変化させる方式である。変速運転の方法として、流体接手を用いる場合、蒸気タービンを用いる場合および巻線型電動機を用いて抵抗による変速運転を行なう場合などが考えられる。

これ等の問題を取りあげた文献は欧米ともに多数発表されているが、わが国においても燃料費、ポンプ設置台数等いろいろ日本の特殊事情を考慮に入れた再検討が必要であらう。

7. 電気設備

(1) 発電機

ユニット容量が増大するに伴い必然的に発電機も大容量のものが要求される。発電機の大容量化に最も貢献しているのは新しい冷却方式の開発である。

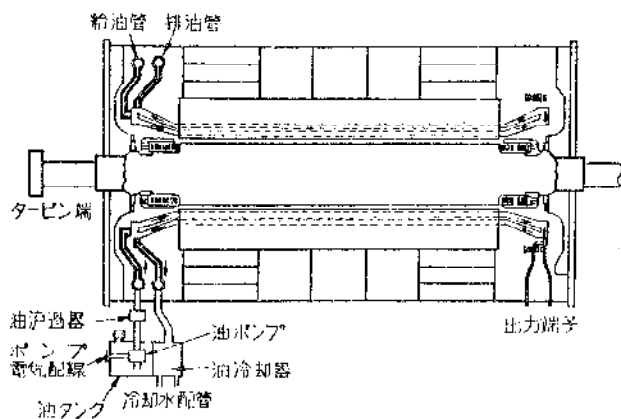
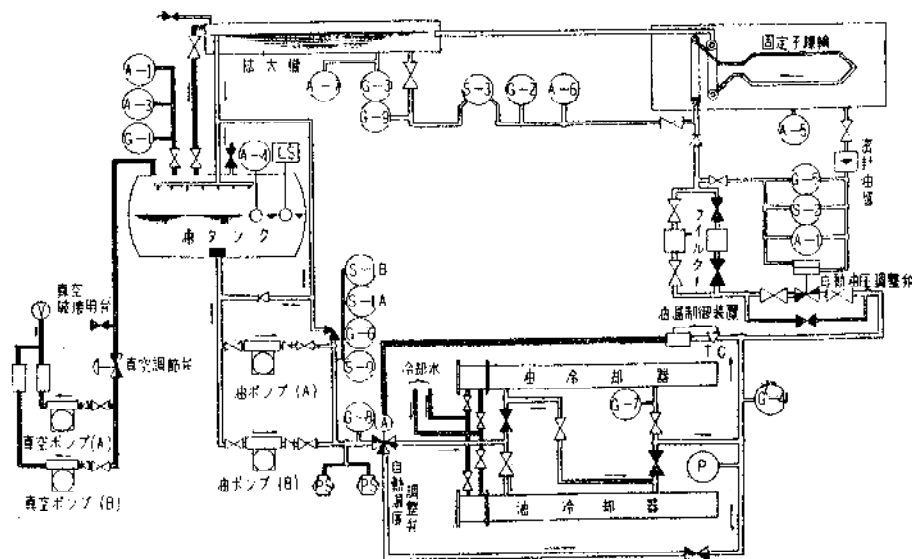
発電機の冷却方式は空気冷却から戦後は水素冷却（普通冷却方式）が採用され、更に導体内に孔を設け、その中に水素又は液体（油又は水）を通して導体を直接冷却する方式（内部冷却方式）が開発されたため、大容量の発

電機でも比較的小型になり製作が可能となつた。第7図に固定子線輪の油冷却の説明図を掲げ、また第8図に内部冷却線輪の断面図を示した。

米国では現在水素内部冷却発電機では 486,400KVA、水内部冷却発電機では 525,000KVA のものを何れも1965年運転開始の計画をしている。一方わが国の大容量発電機の実例及び運転開始予定は第3表に示す通りである。

(2) 発電機母線

ユニット容量が大きくなると発電機と主変圧器の間を連絡する母線の電流も1万アンペアを超えるようになる。最近の発電所では数千アンペアのものから相分離母線(Isalated Phase Bus Duct)を採用しているが、1万アンペア以上のものでは送風機で強制的に冷却する方式が採用される。第9



第7図 固定子線輪油冷却説明図

第3表 我が国の大容量発電機の实例

発電所名	ユニット容量	発電機出力	冷却方式			運転開始予定
			固定子	回転子	水素圧力	
姫路第二発電所	325MW	396MVA	水素 内部冷却	水素 内部冷却	4kg/cm ²	昭39
堺港発電所	250MW	300MVA	油 内部冷却	"	2kg/cm ²	昭39
尾鷲発電所	375MW	442MVA	水 内部冷却	"	3kg/cm ²	昭40

図は風冷式相分離母線の説明図である。

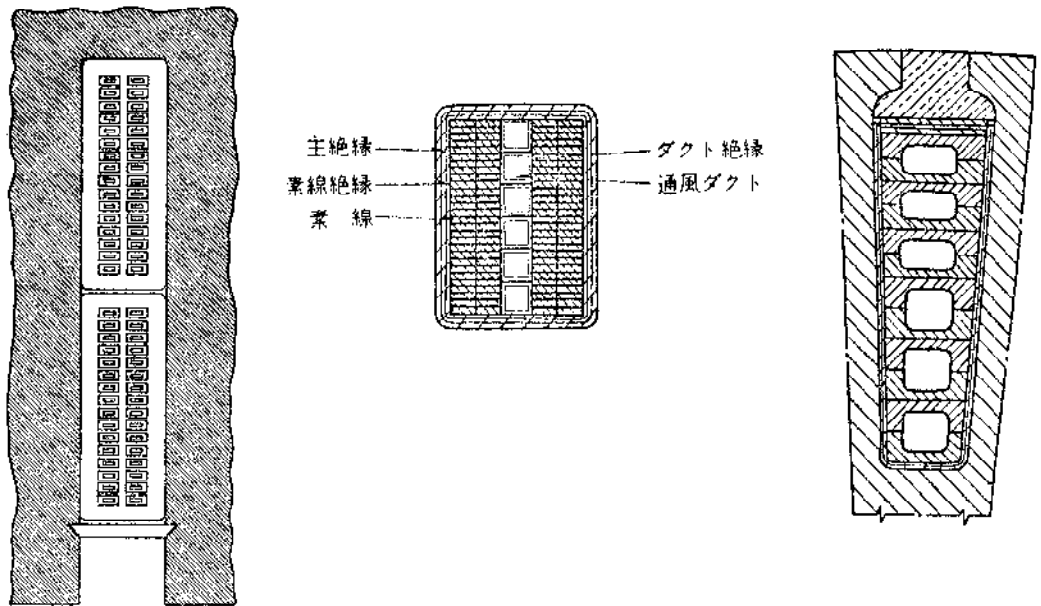
8. 制御装置

最近の電力系統内における火力容量比の急増と火力発電ユニットの高性能、大容量化に伴い、系統上要求される大巾な負荷変動、安全迅速な起動停止を行なうことは、大容量火力発電所の場合運転方式の複雑化と相俟って非常に困難となつて来た。このような窮状を打開するため最近世界的に計算機制御の研究が進められ、米国では既に1961年よりフルオートメ化された発電所が運転に入り、1963年にかけて10指に余る計算機制御のユニットが運転に入る予定である。

一方わが国の電力会社においても、将来の計算機制御の基礎研究を主目的とし、同時に発電所熱効率の向上、起動停止、負荷変動の迅速化及び事故率の減少を計るため計算ロガの設置が計画されつつあり、既にデータロガを設けて運転に入っている所もあるが、完全に計算機制御に移るまでにはまだ解決しなければならない幾多の問題点が残されているようである。

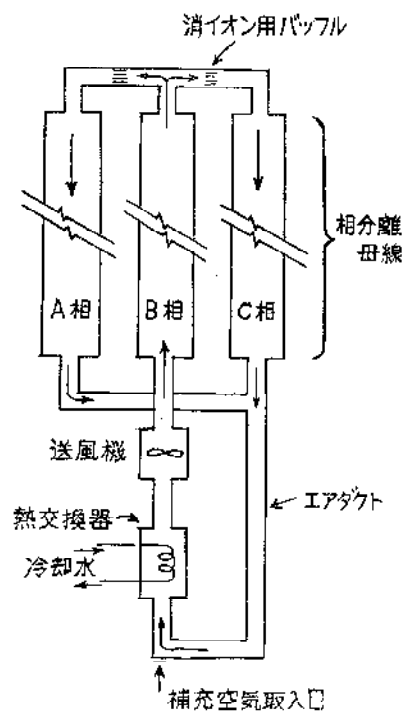
9. あとがき

以上、最近の火力発電設備について、主機関係を主体に設備の現状と将来の展望を試みた。何分にも設備が広範囲に亘り、紙面の関係上個々の問題について十分掘り下げに説明がなされなかつたきらいがあるが、最近の火力発電設備について若干でも御理解戴ければ幸いである。



第8図 内部冷却線輪断面図

(a) 液体内部冷却固定子線輪 (b) 水素内部冷却固定子線輪 (c) 水素内部冷却回転子線輪



第9図 風冷式相分離母線の説明図