

東京電力・大井火力3号機のプラント計画と成果

Plant Engineering and Operation Result of No. 3 Unit of Ohi Thermal Power Station, Tokyo Electric Power Co.

宮 川 清* 福 田 陸 朗*
Kiyoshi Miyagawa Rikuro Fukuda

I. ま え が き

大容量の火力および原子力発電所の建設が進むにつれ、従来ベースロード用と考えられた300~600MW級の火力ユニットにも、大幅な負荷変動や毎日の起動停止が望まれるようになってきた。このような発電設備は従来のベースロードやピークロードの概念にはあてはまらないもので、ミドルロードまたは中間負荷火力と呼ばれる。

中間負荷火力は高い熱効率を維持しつつ毎日の起動停止に耐えなければならないので、従来のベースロード中心の大容量火力技術をそのまま適用することはできない。東京電力・大井火力3号機はわが国ではじめて中間負荷を目的として変圧運転をはじめとする新しい運転方式をとり入れ高度に自動化されたプラントとして設計製作され、昭和48年12月20日に営業運転に入った。これまでの約1年間の運転経験から、このユニットは中間負荷火力として十分な性能をもつことが実証された。また、わが国初の変圧運転について貴重な多くの知見を得ることができ、この方式の優秀さに対する確信を深めた。

II. プラント計画と構成

1. 基本計画

大井3号は定格出力350MWの原油専焼ユニットである。このプラントは西独クラフトベルクユニオン社(KWU)、川崎重工業および富士電機からなるコンソーシアムが一括受注し、基本設計から建設まで担当した。

中間負荷火力として運用するために次のような基本条件が想定された。

- 1) 利用率は45%でベース火力の約70%より若干低い。
- 2) 8時間停止後の起動時間は点火から全負荷まで60分程度
- 3) 負荷変化速度5%/分以上

条件1)は熱効率とコストとの関連から主蒸気条件の決定要因となる。在来の米国系ユニットでは169atg 566

℃が350MW級ベース火力の標準となっているが、経済性試算の結果、中間負荷火力の熱効率はベース火力なみのものであるべきで、利用率が多少低いからといって効率の低下を伴うプラントの簡略化を行うことは不利であることがわかった。一方、条件2)、3)から要求される高度の運転性のため主蒸気温度は538℃におさえるべきであるから、これによる効率低下を補うためには主蒸気圧力を在来より高くとる必要があった。幸いにもわれわれが従来から採用しているベンソンボイラとつぼ形タービンの組合せは高压化に適していたので定格蒸気条件として250atgの超臨界圧を採用した。

高い効率と運転性を満足するには在来の運転方式では十分な成果が得られないので、最近、西独で広く採用されている変圧運転をわが国ではじめて取り入れることにした。この方式は在来のタービン加減弁による負荷制御にかかわって、主蒸気圧力を負荷に応じて変化させるもので後述のように多くの利点をもっている。

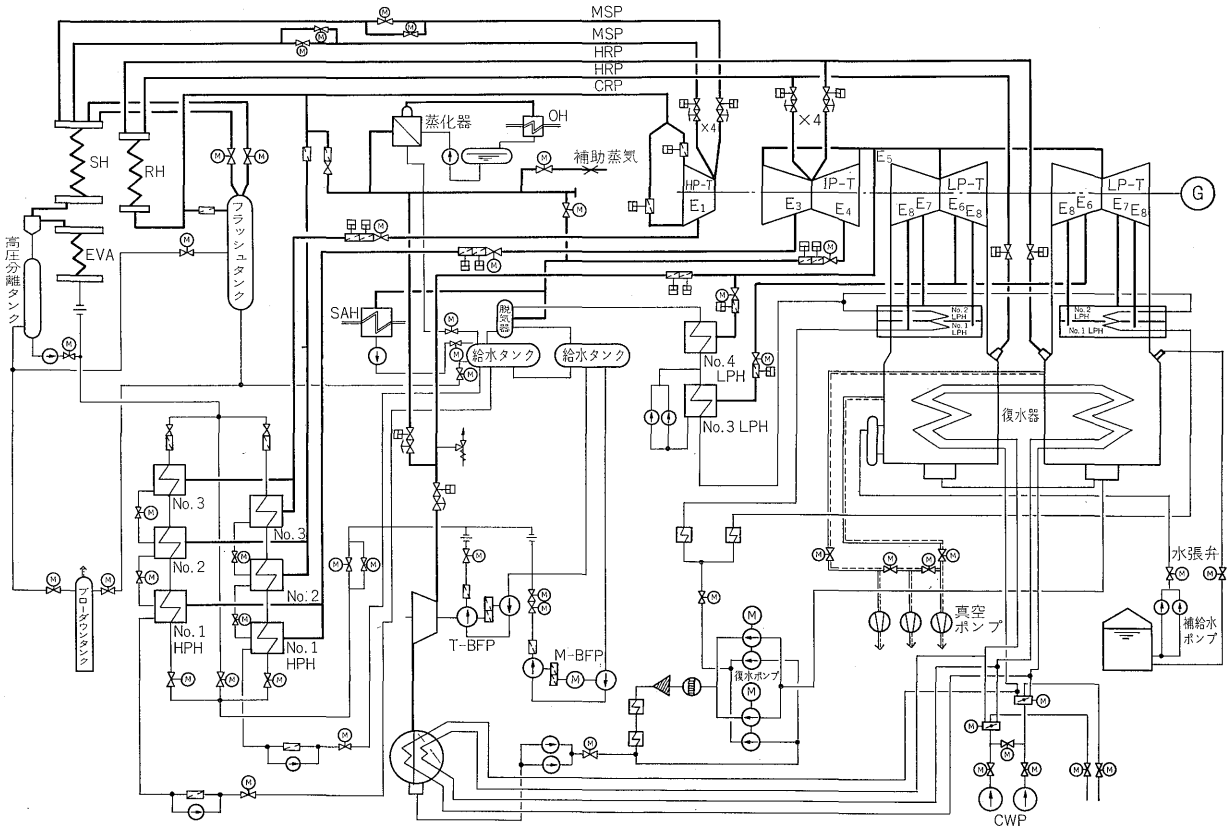
基本配管系統を第1図に示す。

2. ボイラ

ボイラは川崎重工により製作されたベンソンボイラで最大蒸発量は1,200t/hである。在来の火力プラントと異なり、ユニットの出力は主蒸気圧力の増減によって行うため、このボイラは圧力を263atgから62atgの範囲で自由かつ急速に変化できなければならない。このため蒸発器にはスパイラル構造が採用された。

在来のベンソンボイラは最低負荷を約33%までしか下げられないことが欠点であった。これは蒸発器の管内流速を33%以上に保たないと並行する蒸発管の流れに不均一が起こるためである。大井3号ではこれを解決するために蒸発器出口に分離タンクをおき、低負荷時にはここで分離した水分をポンプでボイラ入口に戻す最低負荷装置を設置した。これによって中間負荷火力として必要な25%負荷(87.5MW)の最低負荷運転が可能となった。ボイラを起動するときもこの装置を使えば過熱器に水張りをする必要がなく、ホットスタートの際、高温に保たれていた過熱器を水で冷却するという不利をさけること

* 火力プラント部



第1図 基本配管系統図
Fig.1. Basic flow diagram

ができるので起動時間は大幅に短縮された。

米国系のベンソンボイラではエコマイザから過熱器出口に至る主回路に調節弁、止め弁、流量調節オリフィスなどが設置され、これらの操作がかなり複雑であるが大井3号のベンソンボイラはこれらがまったくなく、非常に単純である。

3. タービン

タービンは4ケーシング4流排気のタンデム形で定格出力は350MW、これに対応する主蒸気条件は250atg 538℃、再熱温度も538℃である。主蒸気圧力を263atgまで上げると出力は367MWとなる。またユニット最低負荷の87.5MWでは主蒸気圧力は62atgである。このような圧力および出力変化の全範囲にわたってタービンの蒸気加減弁は原則として全開に保たれる。このためタービンはノズルガバニングの必要がなく、構造が単純なスロットルガバニングが用いられている。最終段翼長は680mmで二つの低圧ケーシングは復水器も含めて完全に分離している。循環水は二つの復水器を直列に流れるので両復水器の内圧には差が生じていわゆる多段圧力復水器となっている。

4. 発電機

発電機容量は448MVAで回転子固定子とも直接水素冷却である。回転整流器と交流励磁機によるブラシレス励磁を採用している。

5. タービンバイパス

このユニットは起動弁(蒸気変換弁)による高圧タービンバイパスとスピルオーバー弁による低圧バイパスとを備えている。これらのバイパスは10秒以内に全開してボイラの100%蒸発量を流し得る能力があり、かつ再熱器を経由しているから、タービンが急激に無負荷になってもボイラは再熱器を含めて蒸気流量が確保される。このため燃料の急激なしぼり込み(ファストカットバック)を行う必要がない。系統事故がおこって発電機が解列されたときは、この装置によりバイパス運転をして所内負荷のみの単独運転を継続できる。この装置の詳細については参考文献(1)をご参照頂きたい。

6. その他の補機

給水ポンプは西独、KSB社製で復水タービン駆動の全容量のもの1台と電動機駆動1/2容量のもの1台とで構成されている。この構成は従来あまり例を見ないが、この種の高圧ポンプでは信頼性は主としてポンプ各部のすきまの大小によって左右されるので同一効率で比較すれば50%ポンプ2台よりも100%1台の方がむしろ信頼性が高いとの見地からこの方式が採用された。事実この1年間の運転において給水ポンプの信頼性は非常に高いことが実証された。大井火力には他ユニットと共通の補助蒸気系統があり、通常ユニット起動のときにはこの蒸気が利用できる。したがって大井3号では100%ポンプ

でユニットを起動することを原則としている。これによって起動過程は非常に単純となった。

変圧運転であるから50%ポンプを運転する場合にはポンプ吐出圧力も50%以下で良い。したがって50%容量の電動ポンプといっても動力は25%相当ですむことになる。運転の機会が少なく、かつ吐出圧力も低いことからこのポンプは誘導電動機で直接駆動され、流量制御は給水制御弁で行っている。

復水脱塩装置は栗田工業製で混床式フィルタにプレコートフィルタを前置した。容量は100%で常時全量の復水を通してている。

7. 自動化

起動回数の多い中間負荷火力では高度の自動化が不可欠である。このため大井3号では次のような自動化を行った。

- 1) ボイラ起動停止
- 2) ボイラ最低負荷装置
- 3) ボイラパージおよび燃料系リークテスト

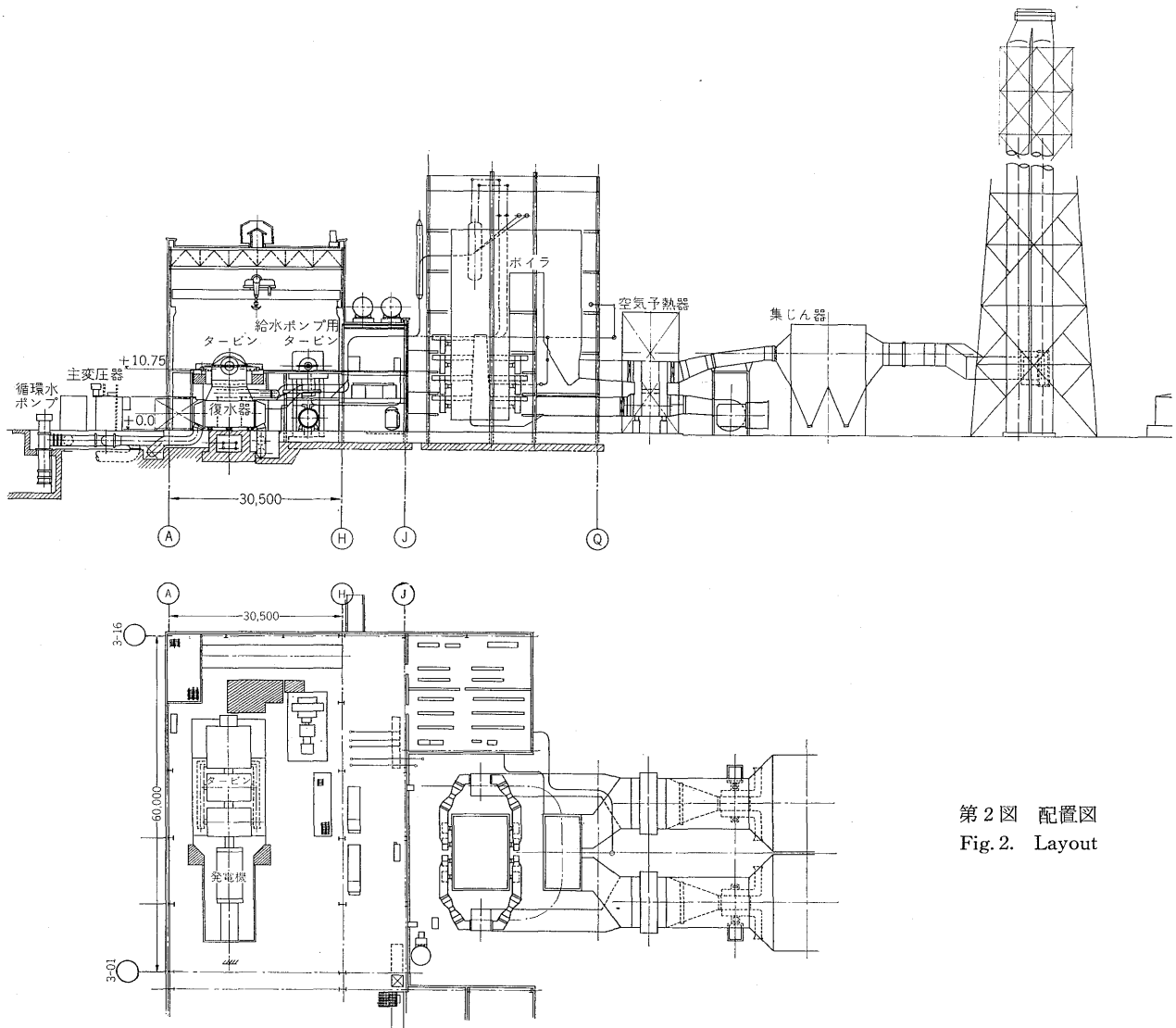
- 4) バーナ操作
- 5) 給水ポンプ (駆動タービンを含む)
- 6) 主タービン起動停止

これらはすべて完全に独立のプログラムを持ついわゆるファンクショングループシステムによってプログラミングされた。

論理素子としてはトランジスタによるワイヤードロジックを使用した。

自動化を容易にするために新しいアナログ制御装置も導入された。ボイラとタービンにはそれぞれの熱応力に応じて制御するシステム (出力余裕計算装置, 壁温監視装置) が装備され, 両者の調整と系統制御インターフェイスのためのユニットコーディネータが設置された。またタービンには電子油圧ガバナが採用された。

広範囲のデータを中央で監視し操作するために24×48mmを基本寸法とするコンパクト監視装置が使用され, 小さい中央制御盤にもかかわらず発電所のほとんどすべての監視操作を中央で行うことができる。



第2図 配置図
Fig. 2. Layout

コンパクト化のために機器の操作信号，表示燈などには従来の110V，220VにかわってDC 24Vが採用された。

8. 配置

第2図に配置の概略を示す。建屋の幅（A-H間）は30.5mである。この幅は既設1，2号機（クロスコンパウンド形）に合わせたもので，3号機では給水ポンプタービンを3階に設置したにもかかわらずかなり余裕がある。

建屋長さ（3.01—3.16間）は60mで1，2号機と同一である。すなわちタンデムであるにもかかわらず，タービン全長はそれほど長くなっていない。

III. 変圧運転の特長と運転実績

1. 変圧運転の特長

変圧運転のボイラとスロットルガバニングのタービンとの組合せは次のような利点をもっている。

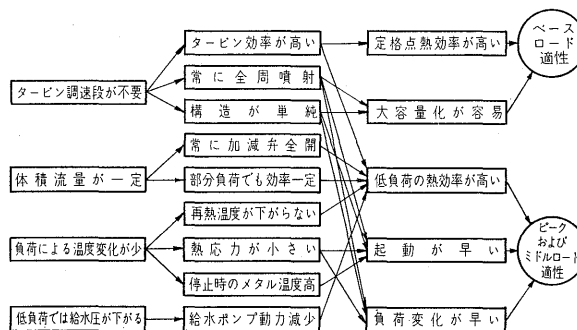
- 1) タービンの調速段が不要であるからタービンの内部効率が高い。試算によるとこの影響によって定格点の熱効率が0.4%改善される。
- 2) 高圧タービンの構造が単純となる。
- 3) タービンは常に全周噴射である。このため熱応力や周期的衝撃力が少ない。
- 4) タービン加減弁は常に全開であるから，部分負荷でもタービンの内部効率は低下しない。
- 5) タービン内の蒸気温度分布が負荷によって変化しないため熱応力が少ない。
- 6) 部分負荷でも高圧タービン出口の蒸気温度が高いので在来のユニットにくらべて部分負荷での再熱温度の低下が少なく，熱効率が高い。
- 7) 停止時のタービンメタル温度が高いので再起動が早い。
- 8) 部分負荷の給水ポンプ動力が少ない。

第3図にこれらの特徴をまとめた。変圧運転はいろいろな運用方式に対してもすぐれた性能を発揮できる運転方式である。これらの特徴の詳細については参考文献(2)をご参照頂きたい。

2. 変圧運転の実例

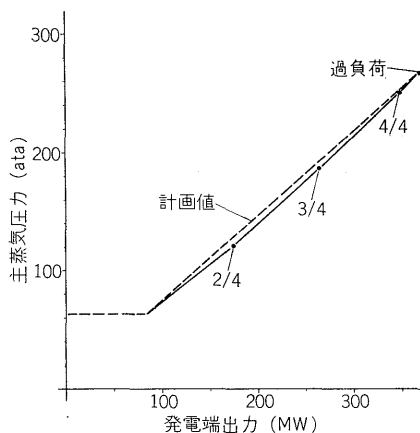
大井3号は試運転当初から常にあらゆる負荷範囲に対して当初計画どおりの純変圧運転を行ってきた。第4図は性能試験における出力と圧力の関係を示す。

超臨界圧から亜臨界圧への移行によりボイラ内では大幅な相変化がおきるにもかかわらず流動不安定などの現象はまったくなく，円滑な変圧運転が行われた。第5図は負荷変化試験時の蒸気圧力と蒸気流量の一例で超臨界から亜臨界圧にわたる変圧運転が自由に行われていることがわかる。



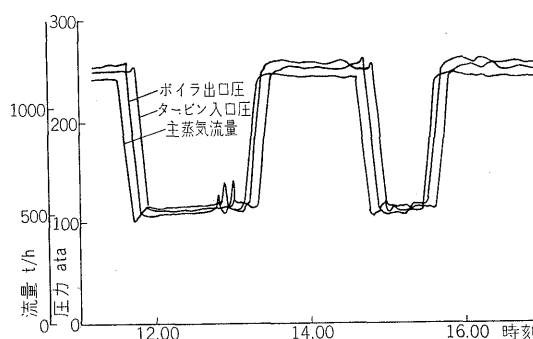
第3図 変圧運転の特長

Fig. 3. Advantage of sliding pressure operation



第4図 主蒸気圧力と出力の関係

Fig. 4. Main steam pressure vs. load



第5図 変圧運転の一例

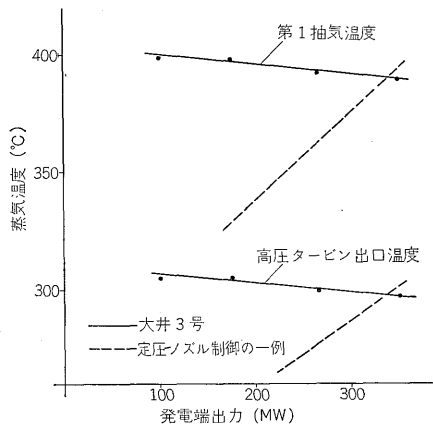
Fig. 5. Steam pressure and flow

3. タービン内部の蒸気温度変化

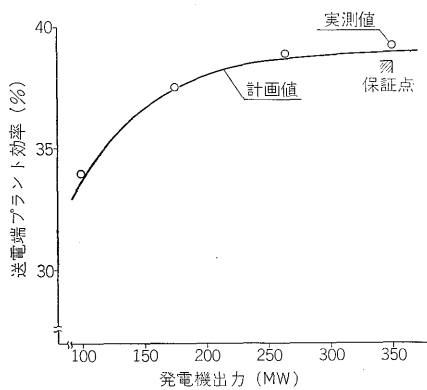
第1抽気（高圧タービン中段）と高圧タービン出口の蒸気温度の発電端出力による変化を第6図に示す。参考として在来の定圧運転の場合を付記した。変圧運転ではタービン内の蒸気温度があまり変化しないので大幅な負荷変化をしてもタービンの熱応力は定圧運転と比べてはるかに少ない。実際の運用上でもタービンが負荷変化の制限要因となることはまったくなかった。

4. 熱効率

第7図は性能試験における送電端プラント熱効率であ



第 6 図 高压タービン内の蒸気温度変化
Fig. 6. Steam temperature in HP-turbine



第 7 図 送電端熱効率
Fig. 7. Net plant efficiency

る。4/4 負荷では 39.28% で保証値 38.6% に対し 1.76% 良かった。この値は在来形の 169atg, 566/566°C の 350MW ユニットと同程度であり、蒸気温度を 538/538°C としして運転性を向上し超臨界圧により効率の向上を図った大井 3 号の設計意図は十分達成された。

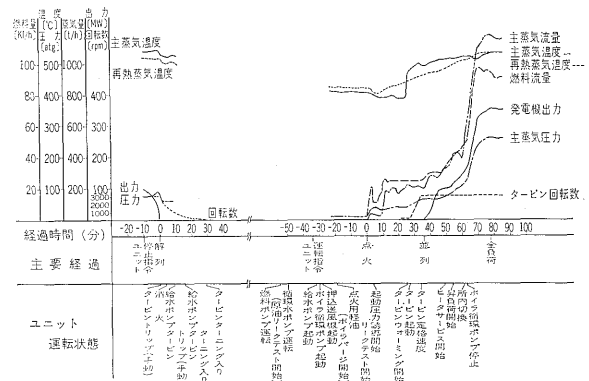
部分負荷効率は従来のプラントにくらべてはるかに高く変圧運転の効果を明らかに示している。

5. 起動時間

中間負荷火力が運用上もっともベース火力と異なる点は毎夜停止が行われることである。このためにはすぐれた起動性能が必要であり、主機がこれに耐え得るものであることはもちろん、運転操作上也大幅な自動化を行うなどして起動時間を短縮しなければならない。

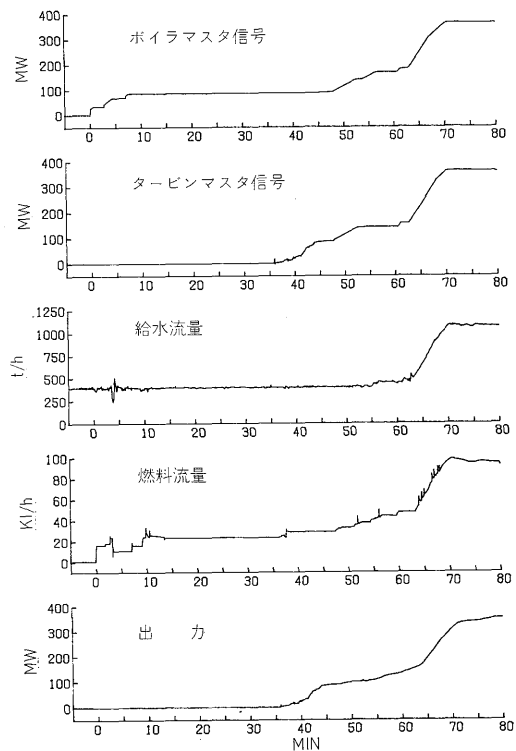
大井 3 号の 8 時間停止後の起動時間は点火から定格速度まで 30 分、並列から全負荷まで 30 分、合計 60 分として計画された。ただしこれには同期投入およびヒータサービス（これらは自動化されていない）の時間は含まれていない。

実際の起動実績を第 8 図、第 9 図に示す。前記の非自動化操作の時間を含み点火から 330MW まで 70 分、350MW



第 8 図 8 時間停止後の起動実績(1)

Fig. 8. Start-up diagram after 8h shut-down (1)



第 9 図 8 時間停止後の起動実績(2)

Fig. 9. Start-up diagram after 8h shut-down (2)

W まで 78 分であった。160MW から 330MW までの負荷上昇中の最大変化率は 26MW/分 (7.4%/分) この間の平均変化率は 23.5MW/分 (6.7%/分) であった。

この起動時間は従来の常識を大幅に短縮したものである。当社はすでに東京電力・川崎火力 5 号機 175MW で 74 分と短時間起動の実績をもっているが大井 3 号は容量が 2 倍であり超臨界圧であることを考えあわせると変圧運転の優秀性を知ることができる。

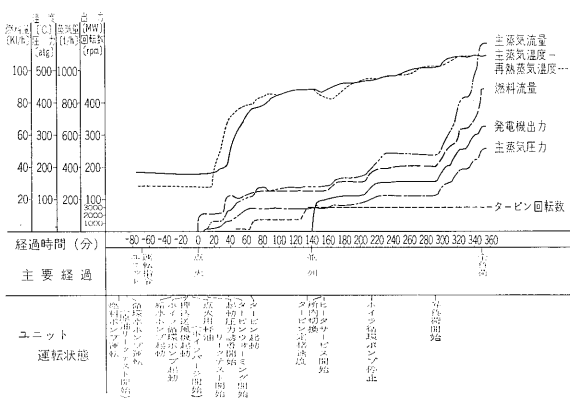
在来形ユニットの負荷変化率が通常運転中에서도 3%/分程度であるのに、大井 3 号では起動過程という不利な条件のもとでも 7% の負荷上昇率を示したことも注目

値する。この変化率は主として燃料などの制御系の条件によってきまり、ボイラとタービンの熱応力はまだ余裕をもっていた。この点は主機によって負荷上昇率が制限される在来機とはまったく異なり、変圧運転プラントではより早い起動の可能性もあることを示している。

起動操作に先だつプレボイラ系のクレンジングのための給水ブローはまったく行っていない。従来の超臨界圧プラントではこの操作に長時間を要するのが普通で、毎夜停止を実現する上で大きな障害となっていた。

しかしながら西独形のベンソンボイラは鉄分による影響を受けにくく、一時的な鉄分の増加は許容できる。この特性は起動のみならず急速かつ大幅な負荷変化をおこなう場合にも有利である。

冷機起動の場合の計画起動時間は360分であった。80時間停止後の起動実績を第10図に示す。これもまた従来の実績を大幅に短縮した好結果を示している。



第10図 80時間停止後の起動実績

Fig. 10. Start-up diagram after 80h stopping

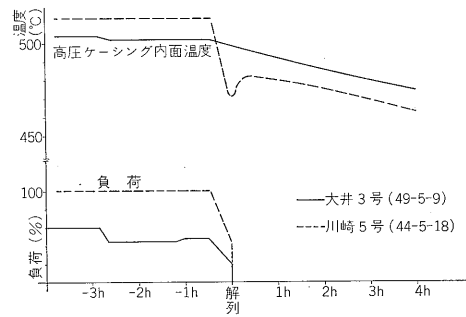
6. 負荷変化率

負荷変化率の保証値は最低負荷装置を使用しない範囲で5%/分、最低負荷装置使用範囲で3%/分であった。前項に述べたとおり、負荷上昇については起動時の不利な条件下でも7%/分程度の変化率が達成されている。通常運転中には主機はさらに余裕があり、負荷上昇の限度は主として制御系によってきまる。

350MWから5%/分の負荷降下を行った場合160MW付近でボイラの高圧分離タンクに限度に近い熱応力が発生することがわかった。したがって負荷降下の場合にはこれが限度で、実運用ではこの付近の変化率をゆるやかにする必要がある。西独における実例ではこのような制限はみられなかった。このちがいは主として材料の許容応力規格によるもので、分離タンクの肉厚を日本ではかなり厚くしなければならないことに原因している。今後の計画にあたってはこの点は検討の余地がある。

7. 停止時の高圧タービン温度

毎夜停止の運用では短時間起動のためには高圧タービンの停止時間中の温度をできるだけ高く保っておく必要がある。在来のノズル制御定圧運転のタービンでは、3.で述べたように負荷を下げるにつれてタービンの温度が下がるので、このような運用のためには比較的高い負荷から急激に停止するなどの方法をとらなければならなかった。変圧運転ではこのような不便はなく、通常の操作でも停止時の高圧タービン温度を高く保つことができる。定圧運転の例(川崎火力5号機)と比較した冷却曲線を第11図に示した。定圧運転の場合、急激に負荷を下げ、しかも40%負荷から負荷しゃ断したにもかかわらず高圧ケーシング温度は大幅に低下している。変圧運転ではこのような現象はおこらないので再起動を高い温度から行うことができ、起動時間が短縮され、タービン寿命への影響も小さくできる。



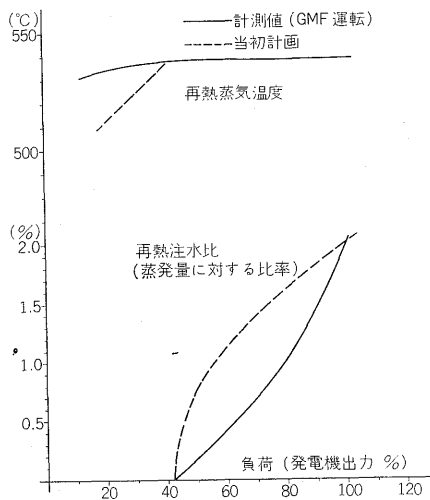
第11図 高圧タービンの冷却曲線

Fig. 11. Temperature run-down of HP-turbine after shut-down

8. 再熱温度の維持

変圧運転プラントでは部分負荷における低温再熱(高圧タービン出口)温度が在来形に比べて高いために部分負荷での再熱温度低下が少なく、部分負荷効率が高い一因となっている。また、再熱器面積をあまり大きくする必要がないので再熱温度を注水で制御しても注水量を比較的少なくおさえることができ、熱効率に対する悪影響をあまり大きく受けずに制御性の良い注水制御を採用することができる。

大井3号では建設の途中でNOx対策のためにボイラの燃焼ガス再循環を行うように設計変更された。ガス再循環により再熱温度は上昇する傾向をもつので再熱器面積を削減した。この結果再熱器特性は変化し当初計画よりさらに好ましいものとなった。第12図に再熱器特性を示す。低い負荷まで再熱温度が一定に保たれ、また40%負荷以下での温度低下が非常にゆるやかである。また最大負荷での注水比も2%程度と非常に少なく注水によるプラント効率の低下は0.4%程度以下となっている。定



第12図 再熱温度特性

Fig. 12. Reheat temperature characteristic

圧運転ユニットでは注水比は 4%以上に達するのでこれによる効率低下も大きい。

IV. 1 年間の運転実績から

大井 3 号は 1 年間の営業運転を終え 50 年 1 月に定期点検に入った。この間の運転時間は 8,240 時間、稼働率は 94.05%であった。運用は主として日中は全負荷、夜間は 30~25%負荷であり、利用率、負荷率とも 65%前後であった。

計画当初は超臨界圧の採用による弁類の故障に若干の懸念があったが、実際には在来ユニットに比べて弁のリーク等の故障は特に多くなかった。変圧運転ユニットで

は部分負荷時には圧力が下がり、弁類のさらされる圧力の平均値がかなり低くなることにも原因があるかも知れない。

100%容量の給水ポンプの実績は非常に良好でこの方式の信頼性が高いことが実証された。

超臨界圧ユニットでは給水中の鉄分がきびしく制限され、運用上の大きな障害となっていたが、このユニットでは起動時の一時的な鉄分の上昇に対する裕度がかかなり大きく、48時間以下の停止ではプレボイラ系のクリーニングは必要がなかった。定検時のボイラ蒸発器チューブ内面検査の結果、鉄分の堆積はごく少なく良好な状態であった。ヨーロッパタイプのベンソンボイラでは鉄分の堆積しやすいオリフィスや調節弁が蒸発器内に存在しないため、給水中の鉄分の一時的な増加による影響を受けることが少ない。

V. あとがき

わが国初の超臨界変圧運転ユニットとして建設された大井 3 号機は多くのすぐれた特色をもつことが実証された。変圧運転方式は今後の火力発電設備に要求される特性を完全に満たすものであり、将来ますます広範囲に採用されることが期待される。

参考文献

- (1) 宮川：「再熱器を経由するタービンバイパスシステム」
火力発電, Vol. 26, No. 4 (昭50)
- (2) 宮川：「変圧運転方式を採用した大井 3 号機の計画」
火力発電, Vol. 23, No. 4 (昭47)



*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。