

強制貫流ボイラ起動時の諸特性

Starting-up Characteristics of the Once-Through Boiler

田村善助* 細川義和** 荒川忠男***
Zensuke Tamura Yoshikazu Hosokawa Tadao Arakawa

内 容 梗 概

清水共同発電株式会社新清水火力発電所納 1, 2号 75 MW プラントはわが国最初の大容量ペンソソボイラで現在きわめて順調な営業運転を行なっている。本プラントの試運転時すなわち昭和 37 年 9 月に大規模な特性試験を行ない、強制貫流ボイラに関する諸特性を解明した。

本論文はこの特性試験のうちの起動特性について紹介する。またそれと同時に強制貫流ボイラに特有な膨出現象を取り上げ、膨出現象に及ぼす設計上、運転上の諸因子の影響についても言及した。

1. 緒 言

強制貫流ボイラプラントではドラム形ボイラプラントにないバイパス回路を有し、プラントの起動時にはこのバイパス回路によって水循環を行なう。また強制貫流ボイラにはドラムのような肉厚部がないため急速起動が容易であるなど数々の利点を持っている。これらの特長をいかに発揮させるにはまず起動時の諸現象ならびに諸機器の特性を明らかにする必要がある。

幸いわが国最初の事業用大容量ペンソソボイラを有する新清水火力発電所75MWプラントの試運転時に清水共同発電株式会社関係者の協力を得て起動特性試験を行なった。この試験により過熱器減圧装置を有するユニークな起動バイパスシステムの妥当性が確認できた⁽¹⁾。また強制貫流ボイラ起動時の諸現象および諸機器の挙動が明確となり、安定した起動運転方法を確立することができた。

強制貫流ボイラの起動時には、必ずかん水の膨張による膨出現象 (Pdrop 現象) が起こる⁽²⁾⁽³⁾。この膨出現象時の流出量を知ることはバイパス回路の設計上およびプラントの運転上必要なことである。先に著者らは膨出現象時の流出量を電子計算機によって求める数値計算法を開発した⁽⁴⁾。この計算法に従って膨出現象時の流出量を算出し、バイパス位置、燃焼率変化、給水温度変化、熱吸収量分布、起動圧力などの各因子の膨出現象に及ぼす影響について検討を加えた。

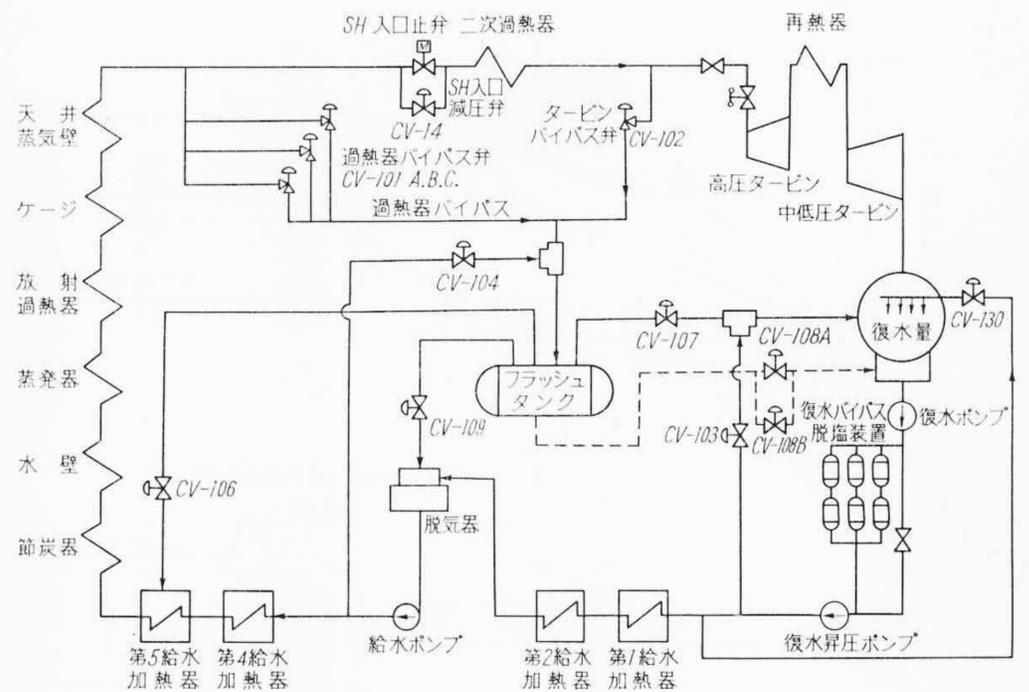
本報告は新清水火力発電所 75 MW ペンソソボイラプラントにおける起動試験結果の紹介と膨出現象に及ぼす設計上、運転上の各因子の影響について述べる。

2. 75 MW ペンソソボイラによる実測例

2.1 起 動 方 法

第 1 図は新清水火力発電所 75 MW ペンソソボイラプラントの全体の概略系統図である。

起動時の初期においては過熱器入口止弁および過熱器入口減圧弁を全閉とし、過熱器バイパス回路によって水循環を行なう。起動時の水循環の順序としてはまずボイラ給水ポンプ 1 台によって 1/3 MCR の給水流量を高圧給水加熱器を通してボイラに押し込む。ボイラにはいった給水は節炭器、水壁、蒸発器、放射過熱器、ケージ、天井蒸気壁を順次通り抜け、過熱器バイパス弁 CV-101 によって減圧され、フラッシュタンク内にフラッシュする。フラッシュし



第 1 図 全 体 系 統 図

たドレンはドレン弁 CV-108 を通り復水器にはいる。この間ボイラ内の圧力は過熱器バイパス弁 CV-101 開度により 125 atg 一定に調節される。

燃焼率の増加によりフラッシュタンク内に蒸気が発生し、内圧が 0.2 atg に達すると、CV-109 を開き脱気器に通気する。それまでは所内ボイラから脱気器に蒸気を導き、給水の脱気を行なう。さらにフラッシュタンク内圧が上昇し、8 atg に達すると高圧給水加熱器調整弁 CV-106 を開き、高圧給水加熱器に通気する。その後さらにフラッシュタンク内圧が 20 atg に上昇するとダンプ弁 CV-107 を開き、蒸気を復水器におとす。

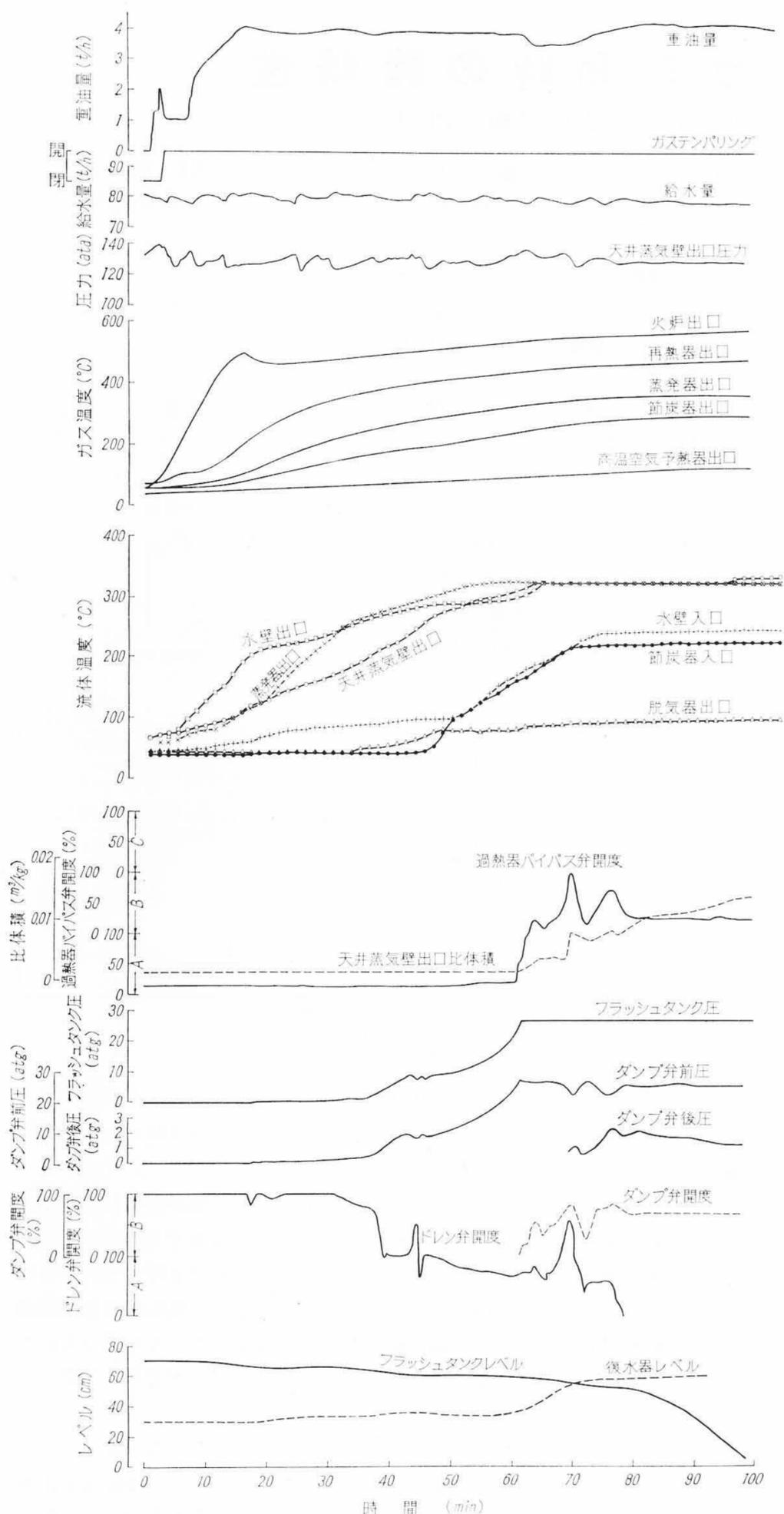
フラッシュタンク内圧はダンプ弁 CV-107 により 20 atg 一定に調節し、膨出現象終了後 CV-107 の設定圧力を徐々に 33 atg まで上昇させる。なお後述の測定時には CV-107 の設定圧力を 27 atg 一定として測定を行なった。フラッシュタンクレベルはドレン弁 CV-108 開度により調節される。過熱器バイパス弁 CV-101 はバイパス回路への流入量増加にともない A, B, C の順に開く。

天井蒸気壁出口蒸気が過熱状態になると、過熱器入口減圧弁を徐々に開き二次過熱器に通気する。二次過熱器を出た蒸気はタービンバイパス弁 CV-102 を通りフラッシュタンクにはいる。

2.2 起 動 時 の 温 度 変 化

第 2 図は冷かん起動の一実測例である。給水流量は 80 t/h、天井蒸気壁出口圧力は 125 atg に手動または自動にて調節する。重油量は最下段バーナ 3 本を順次点火し、起動後 15 分までに 4 t/h に増加する。その後 4 t/h 一定に保持し、過熱器バイパス弁 CV-101 が急激に開き始めた時に 3.5 t/h に減少させ、CV-101 弁が閉じはじめた時から再び増加させた。ガステンパリングは点火後 3 分からきかせた。

* 日立製作所日立研究所 工博
** 日立製作所日立研究所
*** 日立製作所日立工場

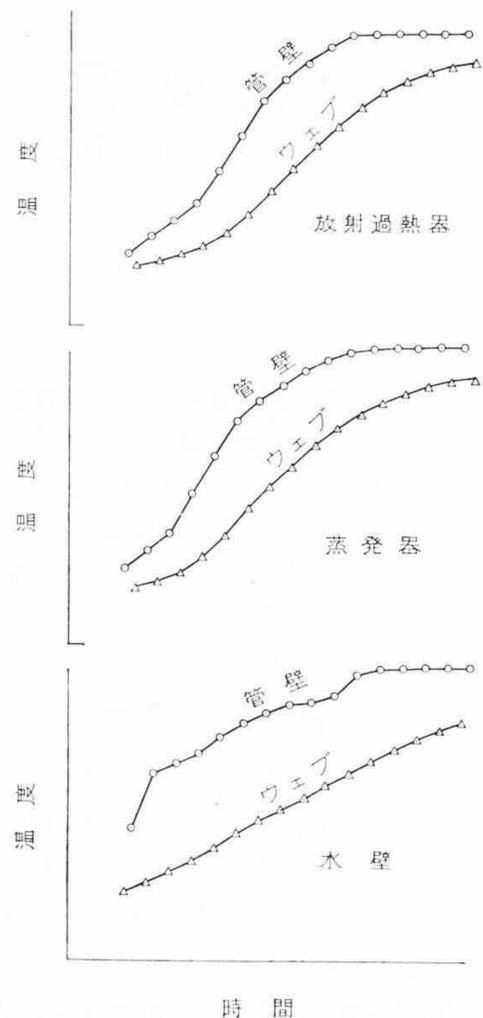


第2図 起動試験結果の一例

火炉出口ガス温度は重油量変化とほぼ同様な変化となっているが再熱器、蒸発器などの出口ガス温度は二次遅れに近い変化となっている。そして起動後約85分で一定値に落ち着いている。

水壁は火炉にあるため燃焼率変化の影響を最も受けやすく、水壁出口流体温度は点火後、約2分遅れで540°C/hの上昇率にて急上昇する。しかし20分ごろから上昇率は低くなり、50分ごろに一定値に落ち着きはじめる。その後給水温度の上昇によって55分ごろから再び上昇し、65分に飽和温度に達する。

蒸発器出口流体温度は点火後約15分ごろから540°C/hの上昇率にて急激に上昇している。この温度上昇率は水壁出口の最高温度上昇率と同じで、これらの温度上昇率開始時間の差は水壁出口の高温水が蒸発器出口に達するいわゆる流動遅れの時間と一致している。



第3図 バックスティ加熱時間遅れ

そして蒸発器出口流体は他のバンク出口に比べて最も早く飽和温度に達する。

天井蒸気壁出口流体温度は約270°C/hの上昇率ではほぼ直線的に上昇し、水壁出口のように温度が急激に上昇する個所はない。このことは水壁出口の高温水が天井蒸気壁出口に達するまでに途中のバンクによって冷却するためと考えられる。

節炭器入口流体温度は高圧給水加熱器が作動する約46分ごろから約440°C/hという割合大きい上昇率にて上昇する。

第3図は前記の試験時に測定したバックスティ加熱時間遅れである。これらの温度は水壁、蒸発器、放射過熱器各出口におけるボイラつり下げ用垂直バックスティのウェブとバックスティ加熱管管壁の温度である。

ウェブの温度は水壁出口ではほぼ直線の上昇となっているが、蒸発器および放射過熱器出口ではS字状の上昇となっている。この水壁出口ウェブ温度が直線の上昇となったのは起動開始時の流体温度急上昇によるものと考えられる。

測定は水壁出口では前壁、後壁、側壁右左の4個所、蒸発器出口では2個所、放射過熱器出口では3個所にて行なわれたが、各バンクではいずれも同じ値となりアンバランスは認められなかった。また管壁—ウェブ温度差は水壁出口が最も高く、その最高温度差でも十分許容範囲内にはいることが確認された。このことよりもっと起動時間を短縮できる可能性がある。

2.3 バイパス回路の諸現象

第2図にバイパス系統の弁開度、圧力、レベルの変化も一緒に示してある。これらの値はスライド抵抗およびプレッシャヘッドとオシロの組み合わせにて測定した。一方天井蒸気壁出口比体積はγ線ボイドメータによって測定した。

起動後38分ごろからフラッシュタンク内圧が急激に増加し、ドレン弁CV-108Bは急激に閉じ、開閉を2,3回繰り返して一定値に落ち着く。このころはボイラ出口付近の流体温度上昇率が高く、し

たがって過熱器バイパス弁 CV-101 以降のバイパス回路内の蒸気量が多くなる。このようにフラッシュタンク内圧が急激に上昇し、ドレン弁開度が急激に減少した後増減を繰り返す現象はバイパス回路配管内の汽水混合物の蒸気-水相対速度の変化によって起こるものと思われる。すなわち水に比べて蒸気の流速が早いため蒸気体積率の大きい汽水混合物がまずフラッシュタンクに流入し、その後蒸気体積率の小さい汽水混合物が流入するために起こる。この現象はバイパス回路配管内の蒸気体積率が比較的小さい場合に顕著に起こり、蒸気体積率が大きくなるとほとんど起きない。

起動後 44 分に高圧給水加熱器調整弁 CV-106 が開き、フラッシュタンクから加熱用蒸気が高圧給水加熱器にはいった。その結果、フラッシュタンク内圧は減少し、ドレン量は多くなった。しかしその後フラッシュタンクに流入する汽水混合物のエンタルピが上昇するため内圧は再び上昇し、ドレン量は減少する。

過熱器バイパス弁 CV-101 は蒸発器出口流体が飽和温度に達する 61 分ごろから急激に開き始め、その後弁開度が 3 回極大値を示す経過をたどり、80 分ごろから弁開度一定値に落ち着く。したがってこの場合には 3 回の膨出現象が起こっている。

第 1 回目の膨出現象は蒸発器内で蒸発がはじまり、蒸発器以後の水が一時的に押し出されたために生じた。この場合重油量を減少させたため流出量は割合少なかった。第 2 回目の膨出現象は給水温度の上昇によって蒸発域が拡大したために生じた。過熱器バイパス弁の開度および流量係数、圧力降下、比体積よりボイラからの流出量を計算すると流出量は、第 2 回膨出現象時が最大で、給水流量の 3 倍強すなわち 250 t/h になっている。第 3 回目の膨出現象は再度重油量を増加したために起こったものである。

膨出現象時には過熱器バイパス弁 CV-101 とダンプ弁 CV-107 はほとんど同時に作動するが、ドレン弁 CV-108 はこれらの弁より 30 秒～1 分早く最大開度に達している。これらの弁の挙動および比体積の変化から膨出現象時にはまず最初にエンタルピの低い水がボイラから押し出され、しかる後に高エンタルピ水が押し出されるものと思われる。また膨出現象時にはフラッシュタンク-ダンプ弁間の管内圧力損失が急激に増大している。特に第 2 回、第 3 回膨出現象のように蒸気体積率の大きい汽水混合物がフラッシュタンクに流入する場合に大きくなる。

3. 膨出現象

膨出現象時の流出量を知ることはバイパス回路の計画上およびプラントの運転上重要である。そのため膨出現象時の流出量に及ぼす計画上および運転上の各因子の影響について考察を加えてみる。以下に述べる計算値は先に発表した数値計算法⁽⁴⁾に従って電子計算機によって計算した値である。

3.1 一般的説明

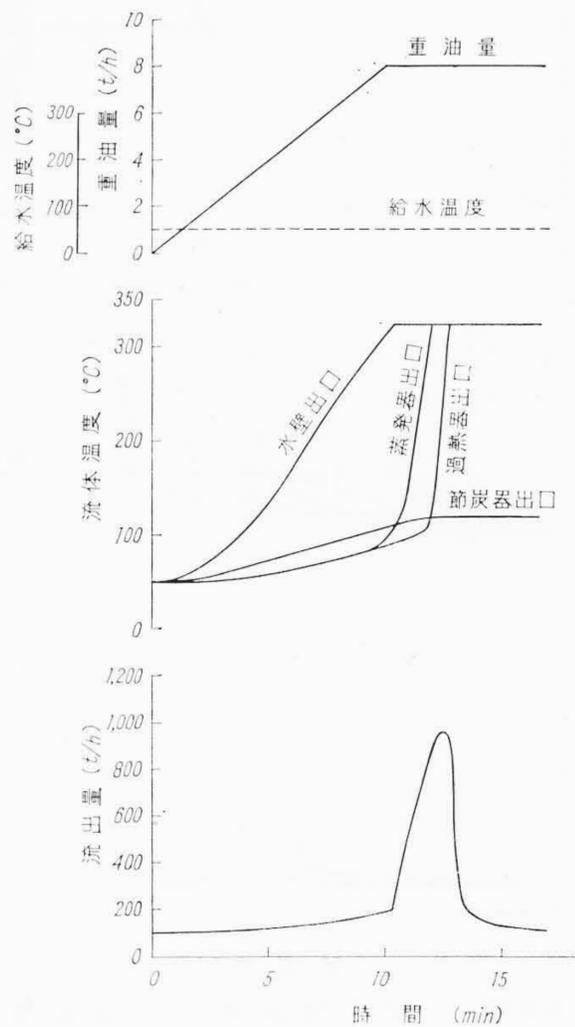
計算に使用したボイラ仕様を第 1 表に示す。すなわちボイラは節炭器、水壁、蒸発器、過熱器から構成されており、各バンクの吸収熱量は燃焼率のいかにかわらず比率一定とする。そしてこのボ

第 1 表 基準状態のボイラ仕様

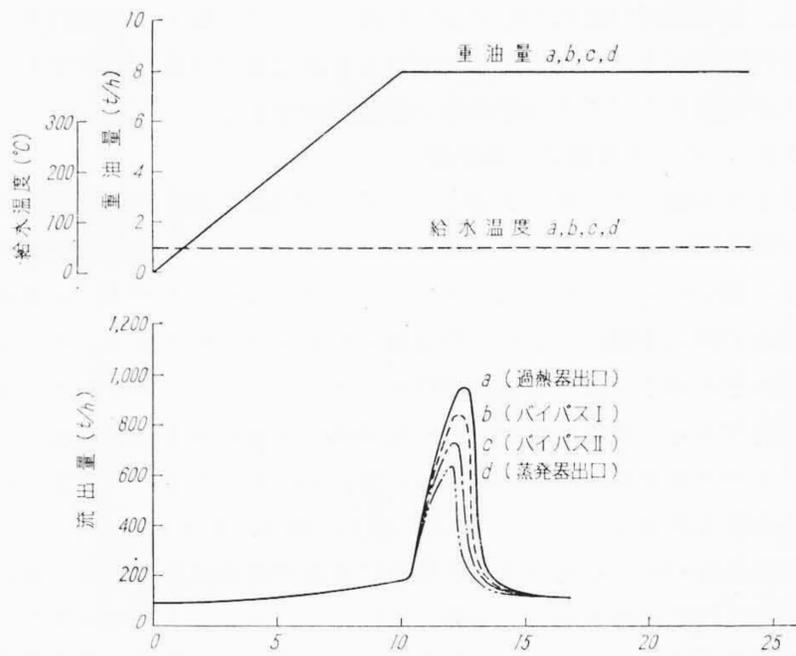
	管 長(m)	管内容積(m ³)	代表管内径(mm)	吸収熱量比(%)
節 炭 器	120	6	252.4	12
水 壁	200	10	252.4	63
蒸 発 器	380	19	252.4	14
過 熱 器	300	15	252.4	14

第 2 表 基準状態の運転条件

圧 力	給 水 流 量	給 水 温 度	最大重油量
120 ata	100 t/h	50 °C	8 t/h



第 4 図 基準起動時の流出量、流体温度変化

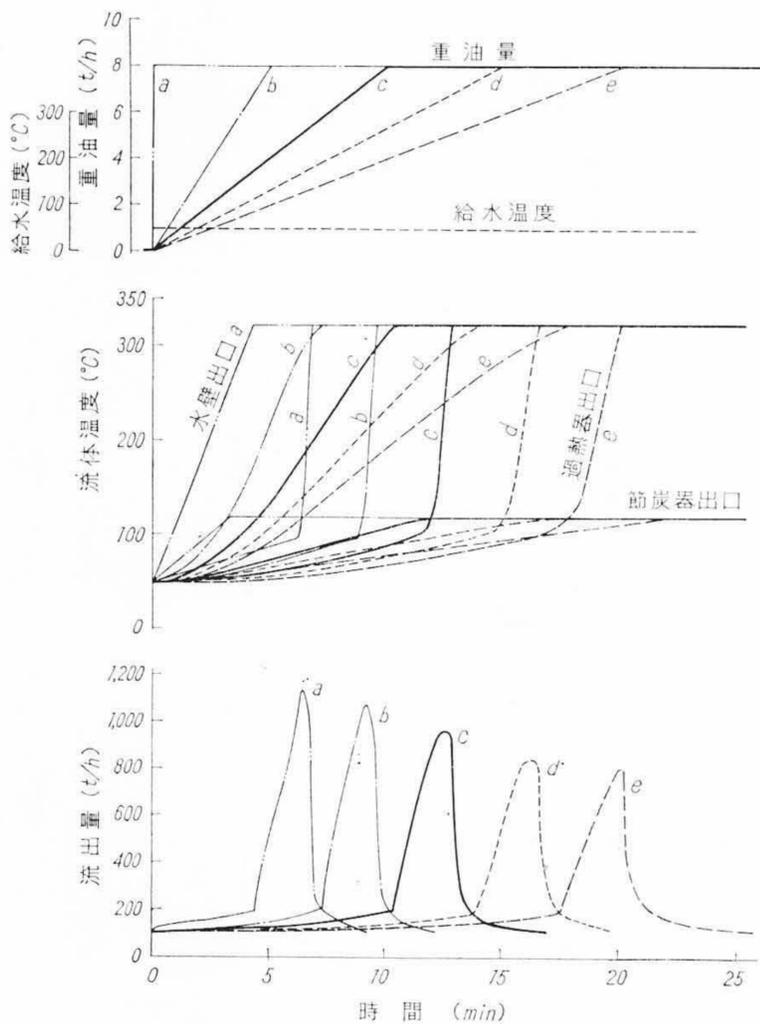


第 5 図 バイパス位置の影響

イラの基準運転条件を第 2 表に示す。起動時の給水温度、給水流量は起動時間に関係なく、50°C、100 t/h 一定に保つ。重油量は点火後 10 分間で 8 t/h まで直線的に増大し、その後 8 t/h 一定に保持する。その間ボイラ圧力はバイパス減圧弁にて 120 ata 一定に調節する。

以上の運転条件によって起動させた場合の流出量および各バンク出口の流体温度変化を第 4 図に示す。

水壁は熱吸収量が最も大きいため、水壁出口流体温度は急激な上昇率にて上昇し、最も早く飽和温度に達する。水壁出口流体温度が飽和温度に達すると膨出現象が始まり、蒸発にとまなう体積膨張によって蒸発域以後の水が急激に押し出される。蒸発器出口流体温度は蒸発器の熱吸収量が少ないため、はじめは温度上昇率が低いが、膨出現象開始とともに急激な上昇率にて上昇する。これは高温の水壁出口流体が蒸発器出口に達したことと、水壁および蒸発器内の蒸発によって管内流速が増大したためである。過熱器出口流体温度も



第 6 図 重油量増加率による影響

同様に流動遅れと膨出現象によって途中から急激な上昇率にて上昇する。過熱器出口流体が飽和温度に達し、水壁以後ボイラ出口までの管内流体がすべて汽水混合物になると流出量は急激に減少する。以上が強制貫流ボイラ起動時の一般的傾向である。

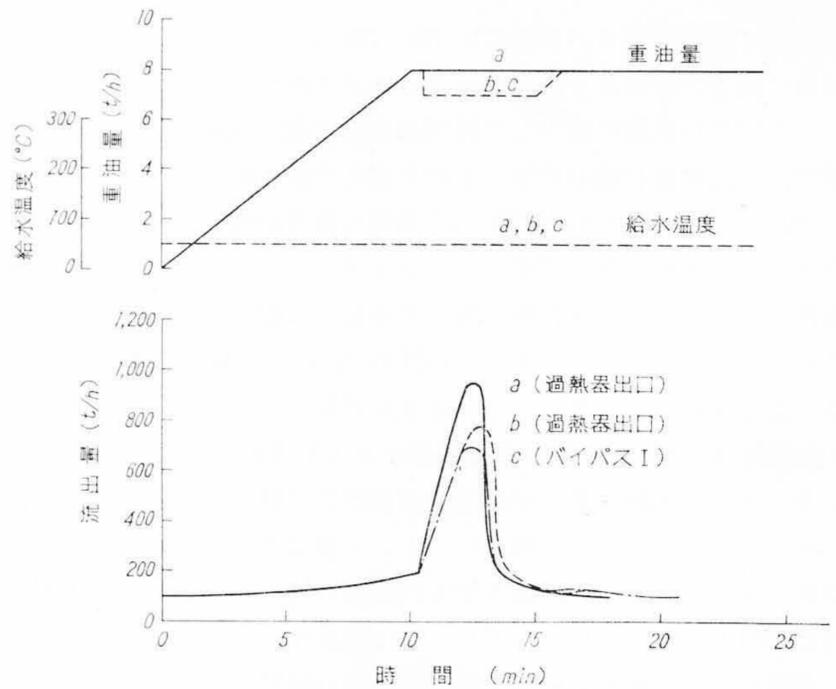
3.2 バイパス位置による影響

ボイラの設計上、ボイラ途中にバイパス回路を設置する場合がある。第 5 図はこのバイパス回路設置点を変えた場合の流出量変化を示す。図中の a は過熱器出口すなわちボイラ出口からバイパスさせた場合で第 1, 2 表に示した基準状態と同じ場合に相当する。b, c はそれぞれボイラ出口の手前 100 m, 200 m の点からバイパスさせた場合である。d はボイラ出口から 300m 手前にある蒸発器出口よりバイパスさせた場合である。a, b, c, d のバイパス点までのかん内保有水量はそれぞれ 50 t, 45 t, 40 t, 35 t になる。

膨出現象の起こる時期は、水壁出口流体の飽和温度に達する時期がすべて同じため各場合とも等しくなっている。一方バイパス位置がボイラ入口に近い場合ほど膨出現象の持続時間が短く、最大流出量は少ない。この計算ではかん内保有水量が 5 t 減少すると、各場合とも最大流出量が約 110 t/h 減少している。節炭器および水壁入口部では蒸発が起こらないため、それらの管内保有水量は運転条件によってほとんど変わらない。しかし蒸発器、過熱器の管内保有水量は起動時間の経過とともに大幅に減少する。これらのことからボイラ出口手前にバイパス回路を設置することは膨出現象緩和に対する有効な方法である。先述の新清水火力発電所のベンソンボイラでは従来のベンソンとは違って二次過熱器をバイパスする過熱器バイパス回路を設置したが、実測結果から従来のベンソンボイラに比べて膨出現象が小さいことが実証できた。

3.3 燃焼率変化による影響

第 6 図は重油量増加率を変えた場合の流出量の変化である。重油量増加率以外の計算条件はすべて基準状態と同じとした。図中の a は点火と同時に重油量を 8 t/h に増加した場合、b, c, d, e はそれぞれ点火後 5 分間、10 分間、15 分間、20 分間に重油量を直線的に 8 t/h まで増加し、その後 8 t/h 一定に保持した場合に相当する。



第 7 図 重油量変化による影響

膨出現象時の最大流出量は重油量増加率の減少とともに少なくなる。しかし重油量増加率がある程度ゆるやかになると、重油量増加率の最大流出量に及ぼす影響は少なくなる傾向にある。a, b のように重油量増加率の急激な場合、流出量は水壁出口流体が飽和温度に達するとともに急激に増大するが、増大率は途中で一たん鈍ぶり再び急激となって最大値に達する。一方 c, d, e のように重油量増加率がゆるやかな場合には流出量は膨出現象開始とともにほぼ直線的に増大し最大値に達する。これらの差異は重油量増加率による蒸発率の大小と蒸発領域の変化によって起こるものと思われる。a, b の最大流出量時にはいまだボイラ出口付近に多量の未飽和水が含まれているため、最大値に達した後の流出量減少率は低い。しかし過熱器出口が飽和温度に達すると流出量は急激に減少する。e の場合には、流出量が最大値に達した時にすでに過熱器出口温度が飽和温度近くに達しているため、最大値からの流出量減少率が大きくなっている。

第 7 図は膨出現象時に重油量を減少した場合の計算結果である。図中の a は基準状態、b は膨出現象開始時に重油量を 8 t/h から 7.5 t/h に減少し、起動後 15 分から再び 8 t/h に増加した場合である。c は前述の過熱器出口手前 100 m の点からバイパスする場合で、重油量は b と同じ変化をさせた場合である。

b は a に比べて最大流出量が約 170 t/h, 18% 減少し、c は a に比べて約 260 t/h, 27.4% 少なくなっている。これらのことから膨出現象時に重油量を減少させることは流出量を減少させる有効な方法といえる。また重油量を再度増加すると、それに伴う小さな膨出現象が起こっている。

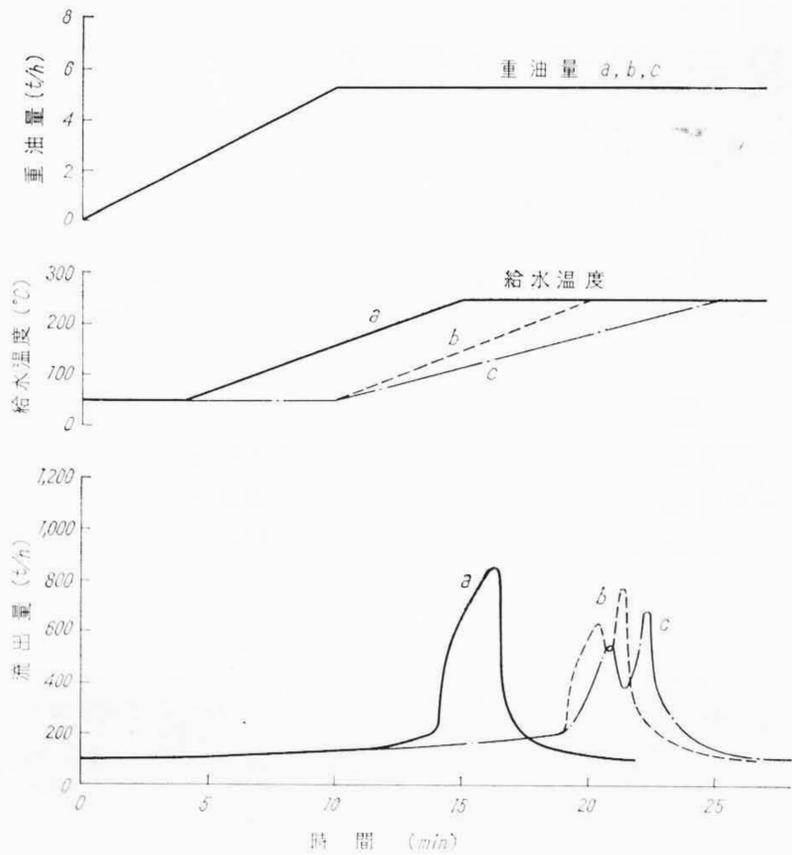
3.4 給水温度変化による影響

起動時の給水温度は高圧給水加熱器への加熱蒸気の量と圧力によって変わる。第 8 図はこの給水温度変化が膨出現象に及ぼす影響について計算したものである。

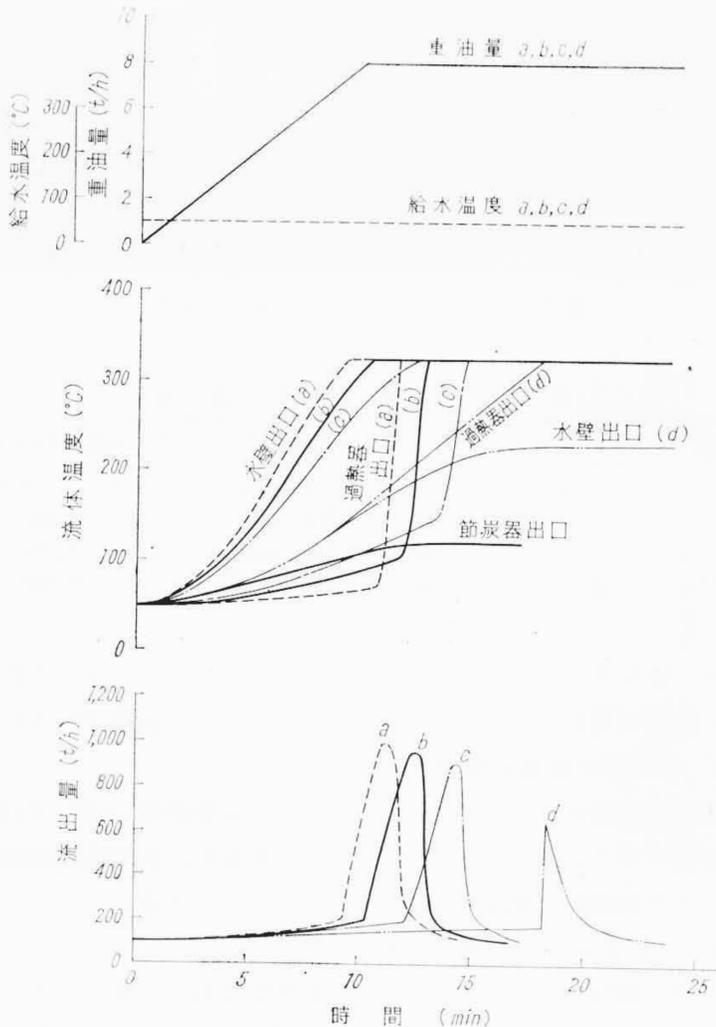
今までの計算はすべて給水温度が起動時間中 50°C 一定に保持されているものとして取り扱った。これらの場合には流出量の極大値は 1 回しか現われていない。しかし第 8 図の b, c のように給水温度が変わる場合には流出量の極大値は 2 回起こる。b, c の場合、流出量の第 1 回目極大値は重油量増加による蒸発によって起こったもので、第 2 回目極大値は給水温度上昇による蒸発域の拡大と蒸発率の増大によって起こったものである。a の場合には重油量増加と給水温度上昇の影響が同時に作用したため、極大値は 1 回しか起こらずまた流出量も多くなっている。

3.5 熱吸収量分布による影響

第 9 図はボイラ各バンクの熱吸収量分布を変えた場合の計算結果



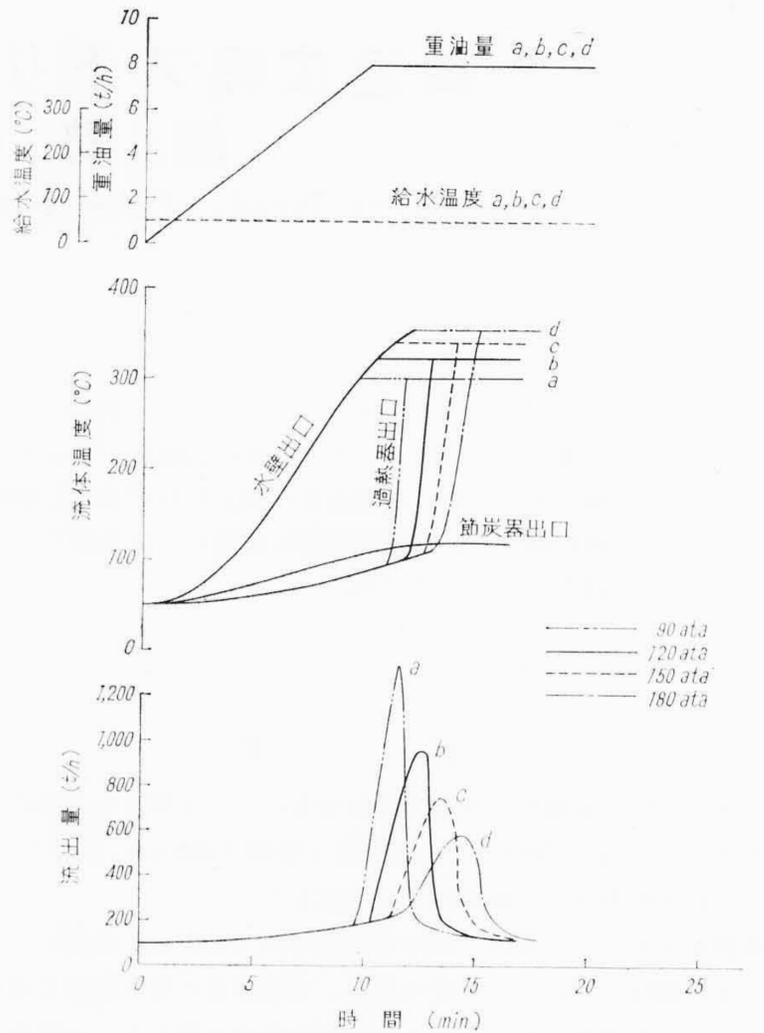
第8図 給水温度変化による影響



第9図 熱吸収量分布による影響

である。図中のbは基準状態である。aは水壁の熱吸収量を基準状態の場合より20%多くし、その代わり蒸発器および過熱器の熱吸収量が水壁の増加分だけ少ない場合である。cはaの逆に水壁の熱吸収量が基準状態のそれより20%少なく、蒸発器および過熱器の熱吸収量が水壁の減少分だけ多くなった場合である。すなわちaは基準状態に比べて火炉の熱吸収量が多くなり、煙道部の熱吸収量が減少した場合、cはその逆に相当する。dはボイラ各バンクの単位管長当たりの熱吸収量が等しい均一加熱の場合である。a, b, c, d各場合ともボイラの全熱吸収量は等しいとしている。

火炉の熱吸収量が多いほど膨出現象が早く起こり、流出量も多い。これは火炉の熱吸収量が多いと、水壁の温度上昇率が高く蒸発が早くはじまることと、定常状態に達した後のかん内保有水量が少



第10図 起動圧力による影響

なくなるためである。dの流出量は今までの流出量変化と異なり、過熱器出口流体が飽和温度に達した時に最大となり、その後は徐々に減少する。またdの流出量積分値は他の場合に比べて少ないが、これは蒸発開始点がボイラ出口近くにあつて定常状態時のかん内保有水量が他に比べて多いからである。

3.6 起動圧力による影響

第10図は流出量に及ぼす起動圧力の影響について計算したものである。起動圧力以外の計算条件はすべて基準状態に等しくとつてある。また起動圧力は起動時間中バイパス減圧弁によって所定値一定に保持されているものとする。

起動圧力が低いほど、膨出現象開始時期が早く、持続時間が短く最大流出量が多くなる。これは圧力が低いほど、飽和温度が低いことと蒸発時の体積変化が大きいためである。これらのことから起動圧力を初め低く、温度上昇とともに徐々に上げ、所定圧力にて蒸発が起こるようにもつてゆくと、膨出現象およびバイパス減圧弁摩耗の少ない運転が可能である。

4. 結 言

わが国最初の事業用大容量ベンソンボイラを有する新清水火力発電所75MWプラントにて起動特性試験を行ない、強制貫流ボイラ起動時の諸現象を解明するとともに過熱器減圧装置を有するユニークな起動バイパスシステムの妥当性を実証することができた。また起動時の膨出現象に及ぼす設計上、運転上の各因子の影響について考察を加えた。

終わりに臨み現地試験に賜わった清水共同発電株式会社、中部電力株式会社関係各位のご好意に対し深じんの謝意を表わす。

参 考 文 献

- (1) 鈴木, 内藤, 浦田, 広吉: 日立評論 45, 555 (昭38-3)
- (2) H. Opladen: Energie, 10, 362 (Sept. 1958)
- (3) R. Michel: VGB 63, 402 (Dec. 1959)
- (4) 田村, 坂井, 細川: 機学誌 66, 627 (昭38-5)