

大容量再熱タービン用全周噴射起動装置

Full-Arc Admission Device for Large Reheat Turbines

桑 野 幸 三* 小 島 晨 敬*
Kōzō Kumeno Akihiro Ojima

内 容 梗 概

蒸気タービンを起動する際、車室の部分的加熱に起因する熱応力を軽減するために、最近全周噴射起動装置が開発された。本文はこの装置について検討を加えたものである。

1. 緒 言

蒸気タービン起動時に従来の加減弁による部分噴射起動を行うと、車室は部分的に加熱されて高い熱応力が発生し、き裂の原因となる。これを防止するため開発されたのが全周噴射起動装置であり、主さい止弁に改造を加え、起動および低負荷時に加減弁を全開とし、主さい止弁で蒸気流量を制御することにより、熱応力的にきわめて満足すべき運動が可能となる。ここでは東北電力株式会社仙台火力発電所納 175,000 kW 再熱タービン用として製作された全周噴射起動装置について、その特長、構造および運転法について述べる。

2. 全周噴射起動の必要性

タービン車室において、熱応力に対して最も危険な部分は加減弁および第1段ノズル付近の高温部である。

すなわち、起動時には加減弁によって円周の一部にのみ蒸気が流れるため、この部分が局所的に加熱され大きな熱応力を生ずる。この熱応力が過大となるのを防止するための目安として、従来第1表のように各部温度および温度差が、ある制限値内にはいるように蒸気温度を調節しつつ、ボイラタービンを起動する方法が採用されていた⁽¹⁾。このことは起動時の監視を煩雑にし、運転の方法が不適当であれば制限値を越えてしまうことも見受けられる。第1図にその例を示す⁽²⁾。本図においては第1加減弁室内外壁温度差が制限値83°C以内に対して最大実測値117°Cと制限値を越えている。また第1加減弁室と第2加減弁室の内壁温度の差も161°Cに達している。

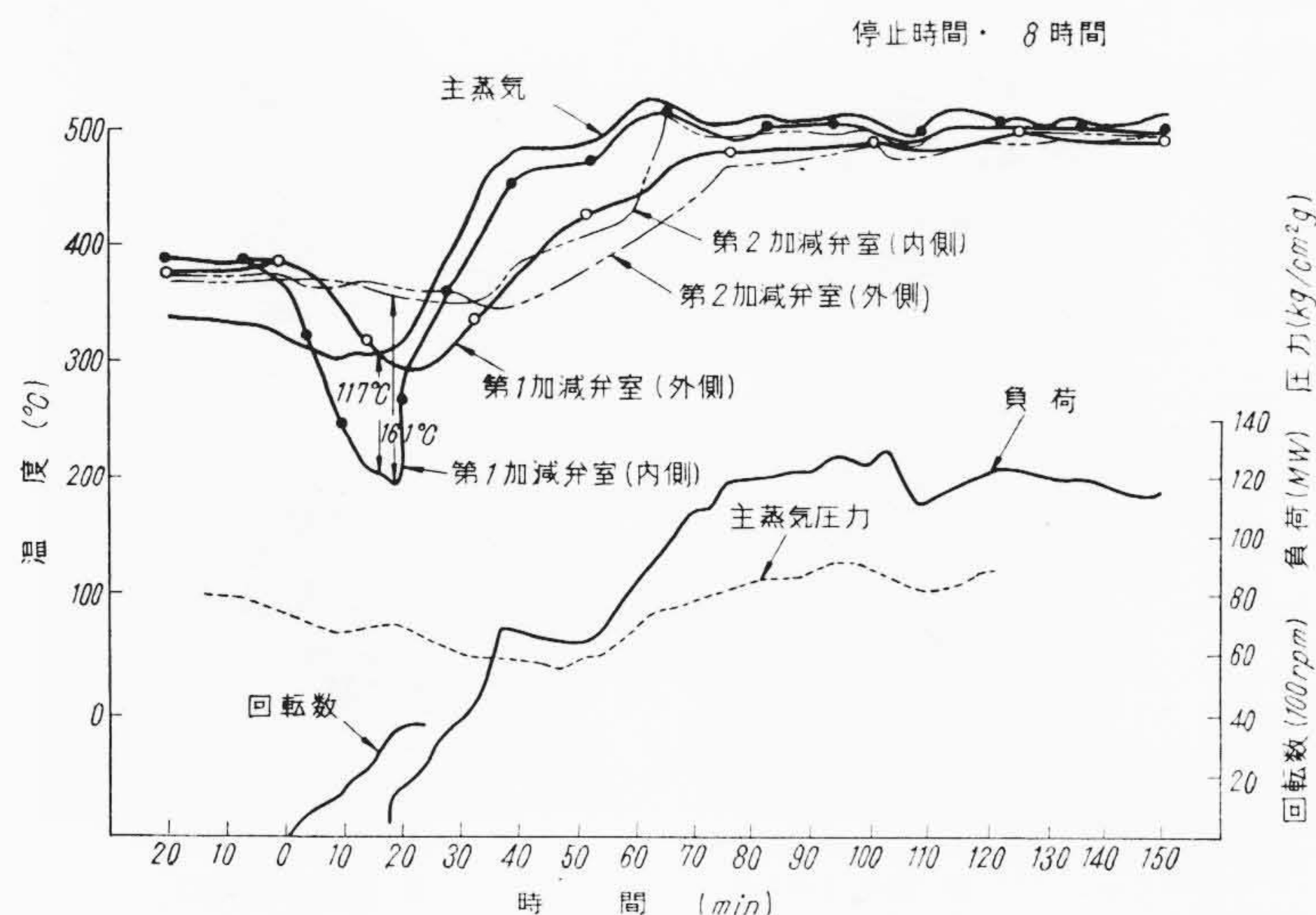
このような運転法がしばしば繰り返されると前記高温部には第2図に示すようにクリープひずみの集積によるき裂が生ずることがある⁽²⁾⁽³⁾。かかるき裂は当然、タービンの寿命に悪影響を及ぼすので、

第1表 タービン起動時の温度の制限

監 視 項 目	制 限 値
蒸気配管、蒸気室そのほかすべての蒸気およびメタルの温度変化率	$\leq 278^{\circ}\text{C/h}$
初 段 落 出 口 内 外 壁 温 度 差	$\leq 139^{\circ}\text{C}$
蒸 気 室 内 外 壁 温 度 差	$\leq 83^{\circ}\text{C}$
初蒸気温度-タービンメタルの最高温度（加減弁出口付近）	約 42°C

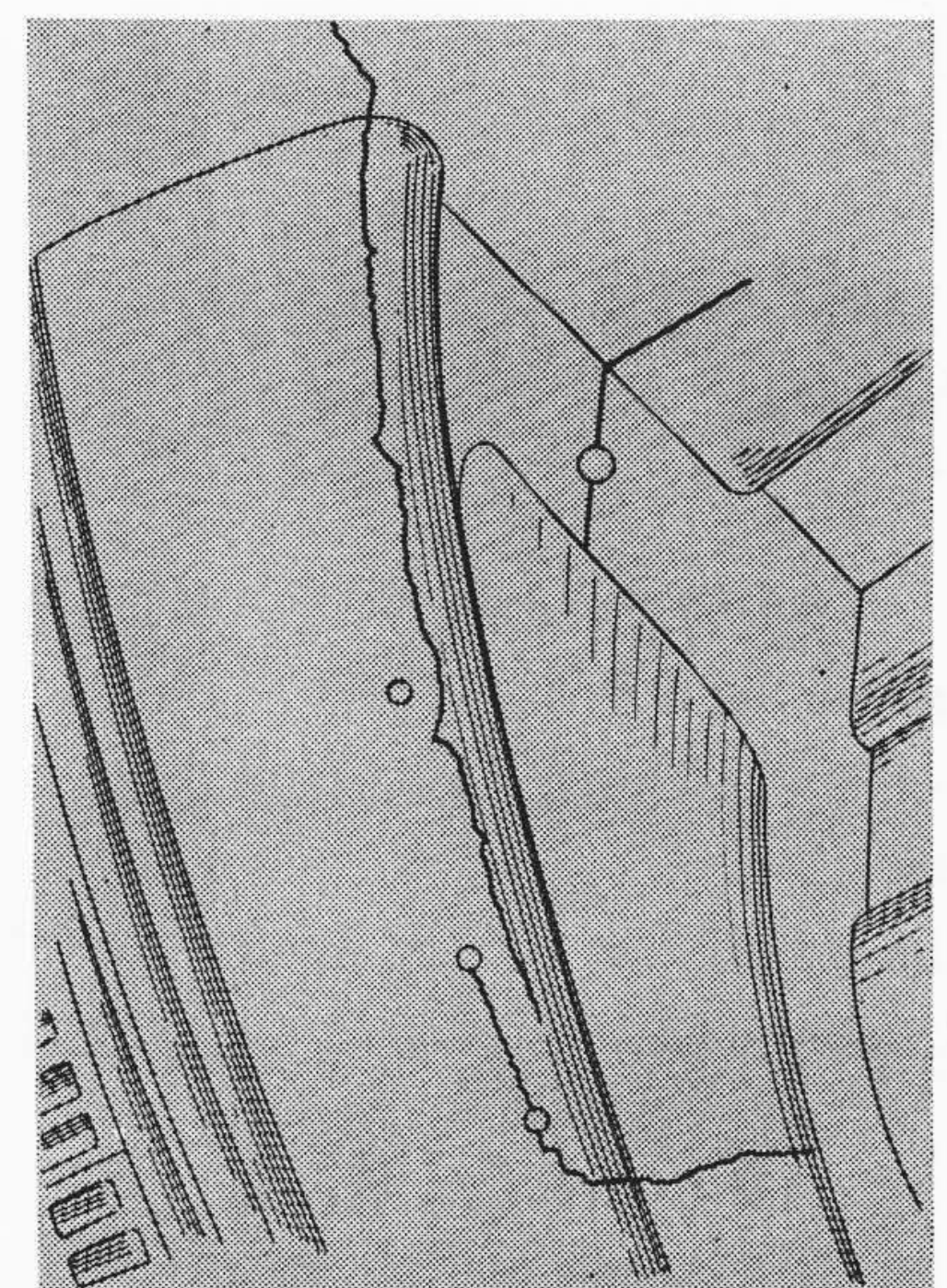
これを回避するためにタービン起動時に車室に熱の不均衡が生じないように配慮が必要となる。このためにはタービンに通常4～8個取付けられている加減弁のうち、上部車室にある第1加減弁と下部車室にある第2加減弁とを同時に開くよう加減弁カムを設計するとか、1個1個の加減弁に対応している第1段ノズル群を分割形とする、いわゆるノズルボックスを採用するとかの方法が考えられ実用化されているが、より根本的な解決策としては、起動時において加減弁によるノズル締切り调速を止め、全加減弁を全開とし、主さい止弁によって蒸気流量を制御する方法がある。この方法を用いると、すべての蒸気通路にわたって蒸気の流れは一樣になるとともに各通路の蒸気流速が小さくなるので熱伝達係数が小となり、したがって車室壁面の温度差が急激に変化する可能性が除かれ、満足すべき運転結果が得られる。

主さい止弁によって蒸気流量を制御するには主さい止弁そのものを用いるのではなく、弁の内部に設けたバイパス弁（子弁）によって行う。そして起動時において全加減弁を全開としバイパス弁により流量制御を行い、バイパス弁全開後に加減弁制御に切り換える。したがってこの方式の全周噴射起動装置を主さい止弁バイパス装置と称する。

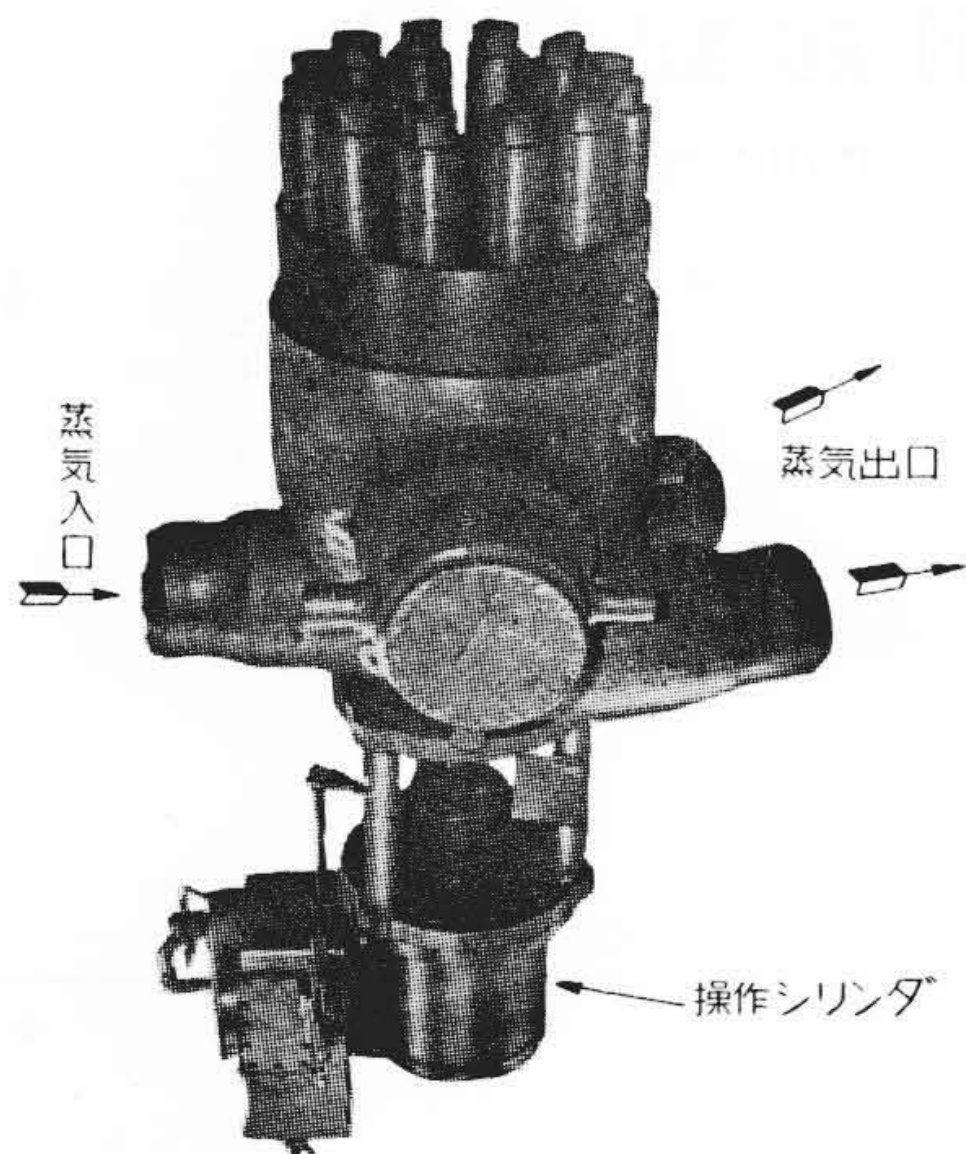


第1図 ホットスタート時の加減弁室温度変化状態

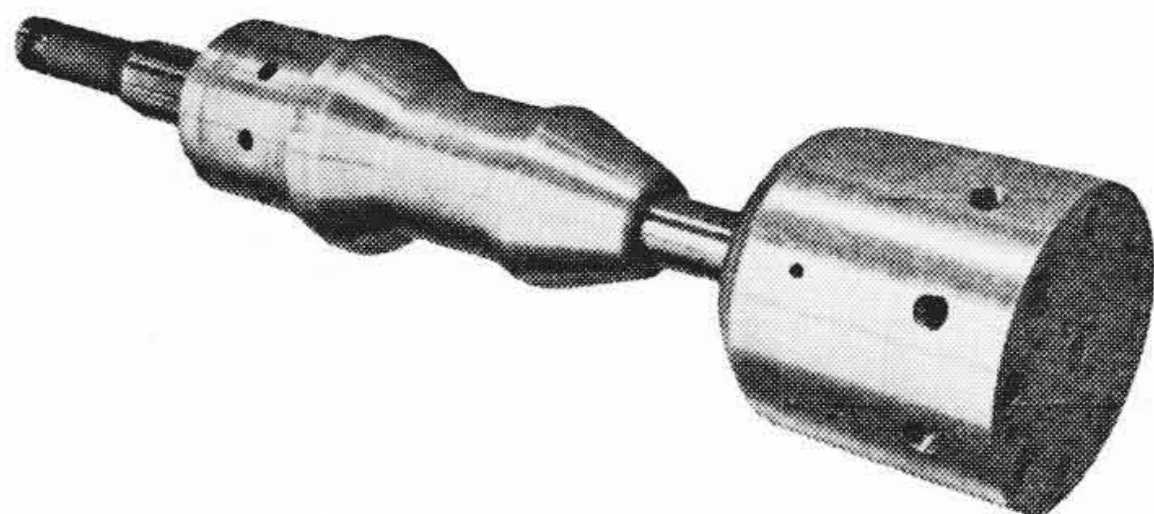
* 日立製作所日立工場



第2図 高圧車室第1段ノズルかん入部のき裂状態



第3図 主さい止弁外観図



第5図 主弁(バイパス弁内蔵)

3. 主さい止弁バイパス装置の構造

第3図に主さい止弁の外観写真，第4図にバイパス弁付主さい止弁の組立図，第5～6図にその実物写真を示す。左右2個の主さい止弁のうち1個は第4図のようにその主弁体①の中にバイパス弁②を内蔵している。このバイパス弁の弁座は主弁体の一部が形成している。全周噴射を行うときは①は閉じており，蒸気はキャップ③の側面の穴より流入し，バイパス弁を通り，①にあげられた穴を通過して①の下部に流出し，全開された加減弁を通してタービンへはいる。このバイパス弁は全開時に，定格蒸気条件にて加減弁全開時流量の約20%を通過せしめうる容量をもっている。バイパス弁のリフトは主さい止弁操作シリンダ④の上に設けられた起動装置⑤によって制御せられる。

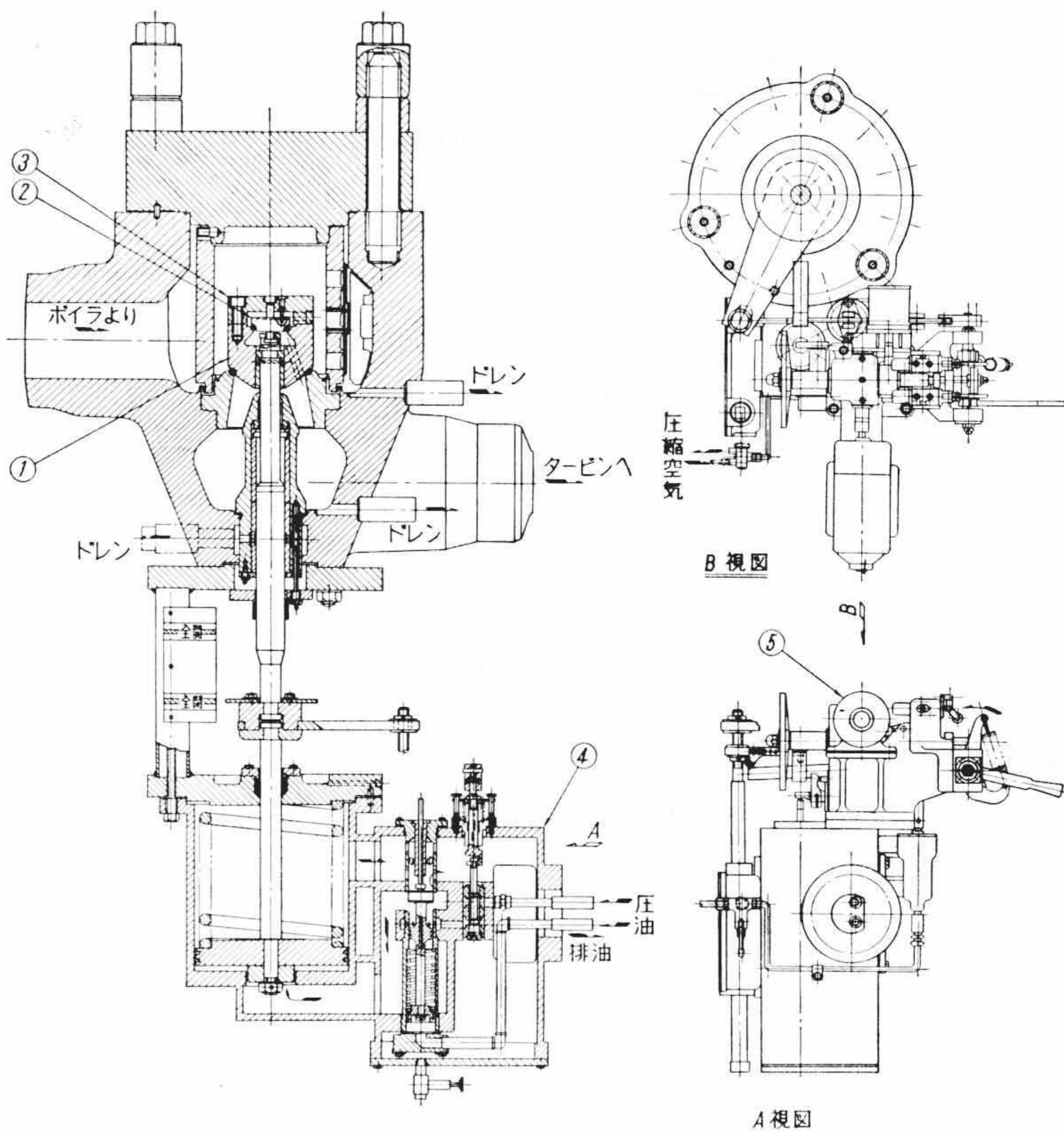
第5図は組み立てた状態の主弁を，また第6図は組立前の状態を示す。第6図には比較のためバイパス弁を持たない主弁をも示した。2個の主弁のうちのほかの1個はバイパス弁を内蔵していないが，両主弁は弁出口においてイコライザパイプにより連結されており，弁後の蒸気条件はバイパス弁を内蔵しているほうのそれと同一に保たれる。

4. 主さい止弁バイパス装置運転法

4.1 操作順序

主さい止弁バイパス装置の系統図を第7図に，また第8図に起動曲線を示す。

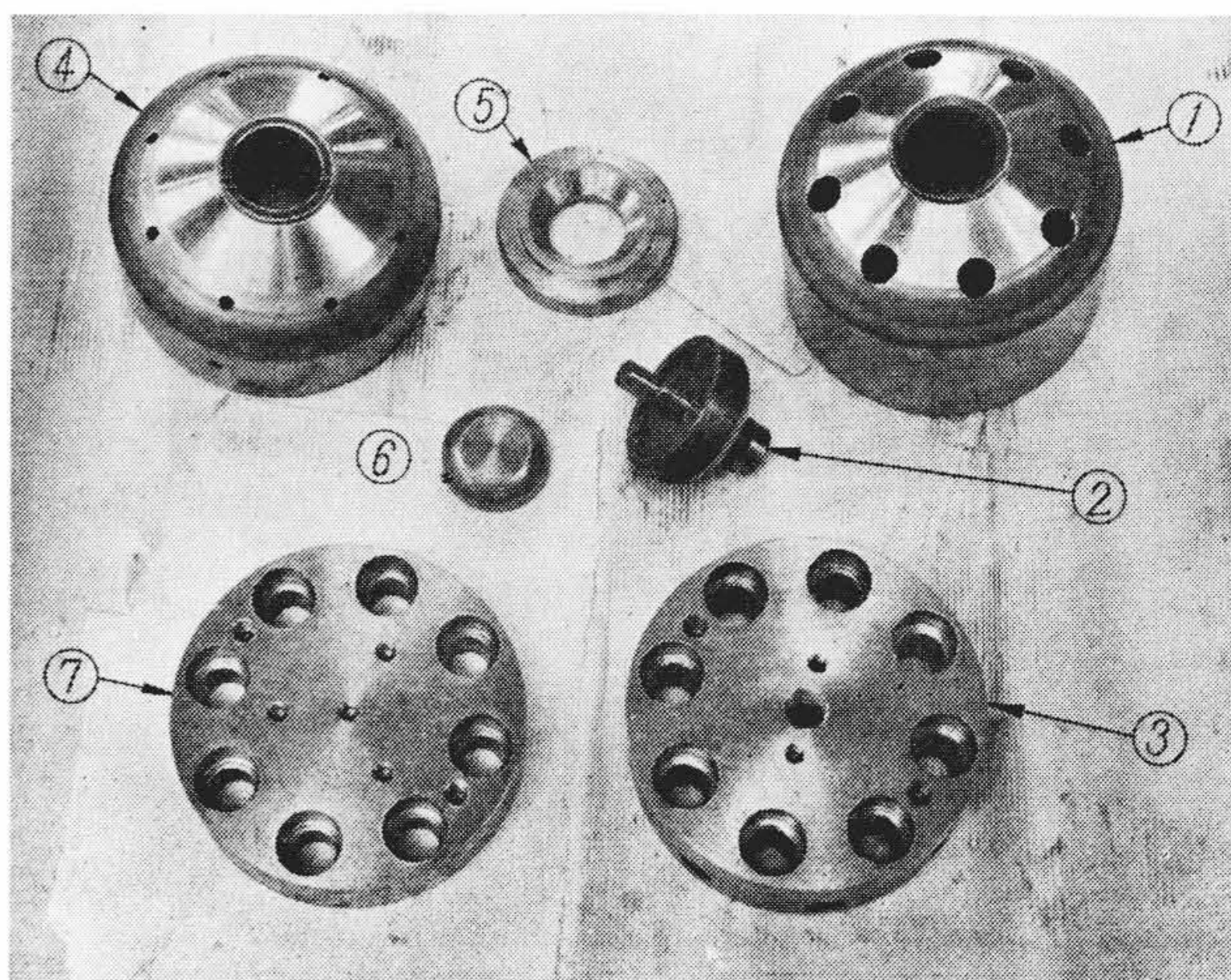
全周噴射起動を行うに先だってまずガバナの同期装置を高速ストップの位置にセットし，負荷制限器ハンドルは全開として全加減弁を全開しておく。左右主さい止弁は全閉しているからタービンに蒸気を入れるにはバイパス弁を開かなければならない。バイパス弁は現場操作用ハンドル(第7図の①)または遠隔操作用直流モータ②によって制御され，ネジ機構によってその位置が決められる。この



第4図 バイパス弁付主さい止弁組立図

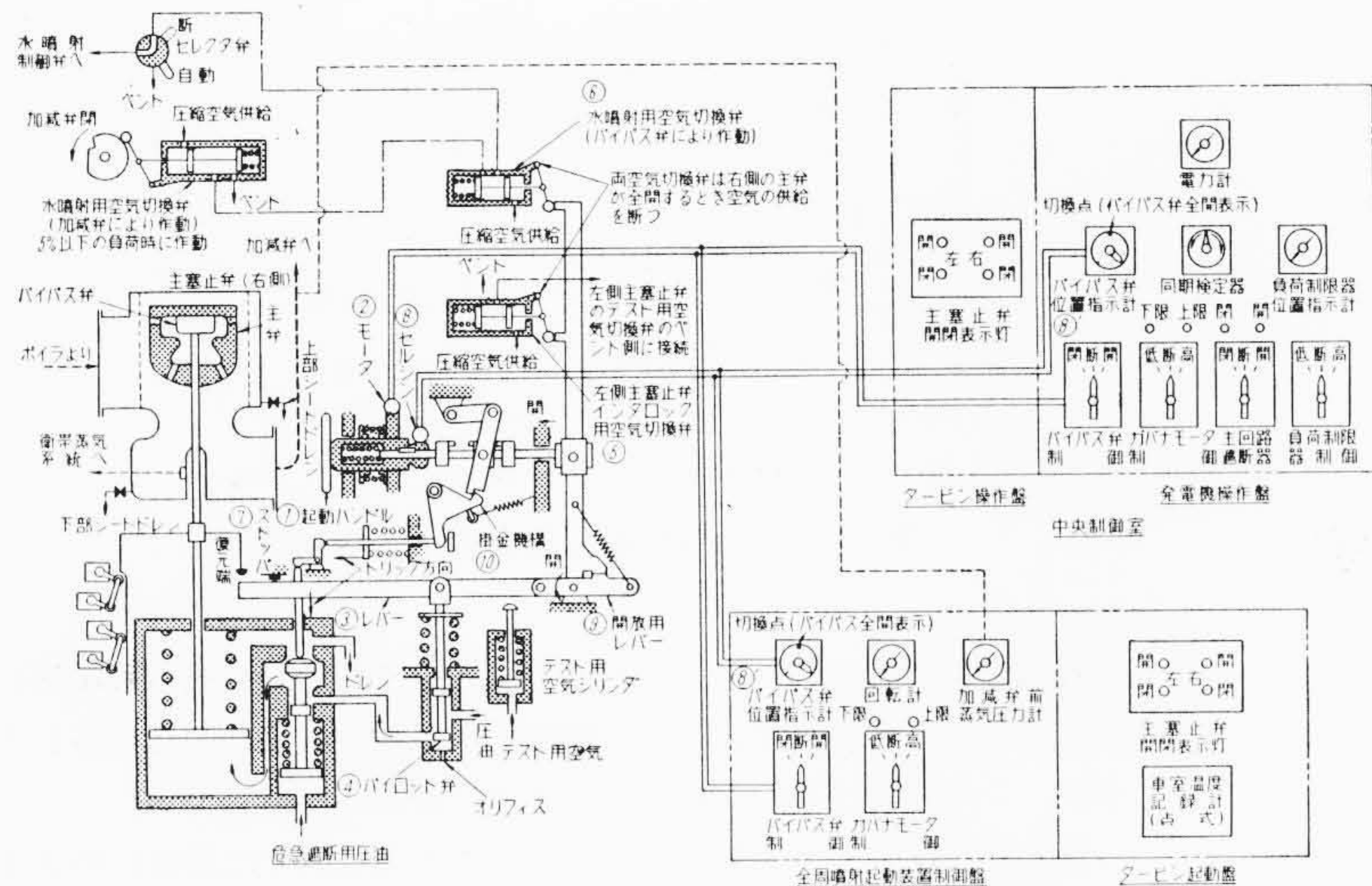
ネジ機構はレバー③を介してパイロット④を操作し，バイパス弁のリフトを決める。2個の主さい止弁はそれぞれタービン運転中に全閉試験を行いうるようテスト機構をもっているが，このテスト機構の間にインターロック用空気切換弁⑤を設け，バイパス弁によって蒸気流量が制御せられている間には他方の主さい止弁は開かないようになっている。また排気室水噴射用空気切換弁⑥を設けバイパス運転中は水噴射を行う。

バイパス弁が全開したときレバー③はストップ⑦に接触する。このとき起動ハンドルの開度を示すセルシン指示計⑧，⑧'は切換位置を示している。蒸気流量は前述のとおり定格蒸気条件に換算して，加弁全開時流量の約20%であり，タービン発電機はある程度の



バイパス弁付主弁用
① 親弁(主弁本体)
② バイパス弁
③ キャップ
バイパス弁なし主弁用
④ 親弁(主弁本体)
⑤ 子弁座
⑥ 子弁
⑦ キャップ

第6図 主弁用部品



第7図 全周噴射起動装置系統図

負荷を取っている（後述）。

さらに負荷を増加させるためには全周噴射から加減弁による部分噴射に切り換えなければならない。それには起動ハンドルまたはモータを用いてさらにレバー③を操作しパイロット弁④を開く（この操作で上記2個の空気切換弁は動作が切り換えられ他方の主さい止弁を閉じておいたインターロックが切れるとともに排気室噴射もやむ）。次にガバナ設定位置を下げて加減弁を徐々に閉じる。加減弁が閉じるに従って主さい止弁前後の圧力差は減じ、この値が定格蒸気圧力の約15%（約25at）となると2個の主さい止弁はシリンダの油圧により自動的に全開する。以後のタービンの制御は調速機または負荷制限器によって行われる。

両主さい止弁を全開しての定常運転中に、他方の主さい止弁に影響を及ぼさず、バイパス弁を備えた主さい止弁の全閉テストが行えるように、レバーの入力端には開放用のレバー⑨とバネが設けられている。これによりテスト時に空気切換弁⑤が作動して他方の主さい止弁も閉じてしまう不都合が避けられる。

タービントリップののち、マスタートリップをリセットすることによってバイパス弁が急激に開くことを防ぐために掛金機構⑩が設けられている。主さい止弁がトリップすると掛金はずれ、ネジ機構が閉の方向にもどるようになっている。マスタートリップをリセットしたのち、主さい止弁をふたたび開くためには、モータによってネジ機構を全閉位置までもどして掛金を掛けたのち、改めてモータを開方向に回す。

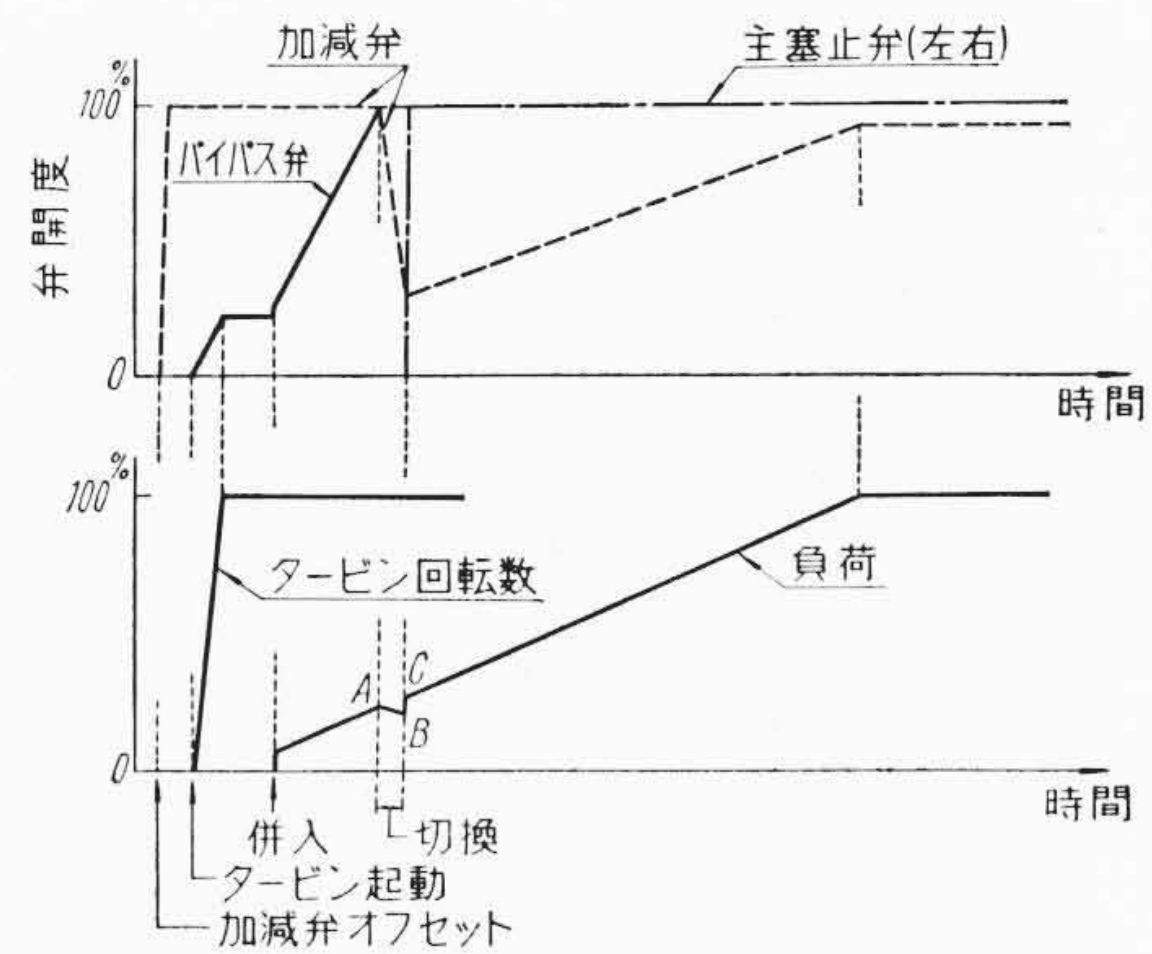
4.2 回転数の調整

起動装置のモータを使用してバイパス弁を通過する蒸気流量を制御しタービン回転数を調整すること、特にタービン発電機を系統へ併入する際回転数の微調整を行うことは運転上重要なことである。本装置ではこの点を十分に考慮してモータの減速比を選定した。一例として第9図に示したのは、工場試運転時に定格回転数付近においてモータを1秒間動作させたときのタービン回転数変動の記録である。この図が示すように回転数の応答は最大0.31rpm/s程度の速さで行われ、図右下に示した従来の同期装置を用いたノズルガバニング方式による回転数の応答速度2~3rpm/sに比較し、こう配が小さいため同期はまったく問題なく行いうる。

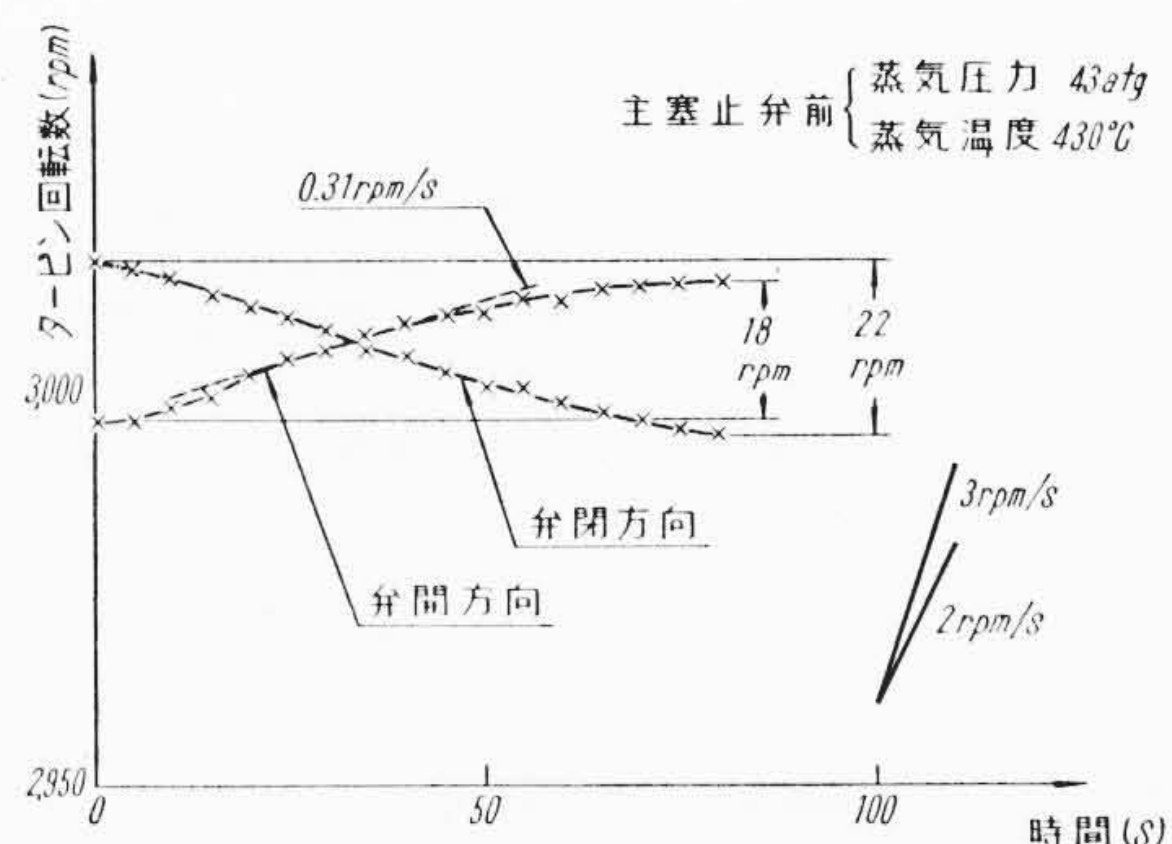
なお主さい止弁をトリップした場合には本図の動作とは無関係に急速に油圧が遮断されて弁を閉じることができる。

4.3 最大負荷と切換時の負荷変動

バイパス弁が全開したときどの程度の負荷を取りうるかはタービ



第8図 全周噴射起動線図



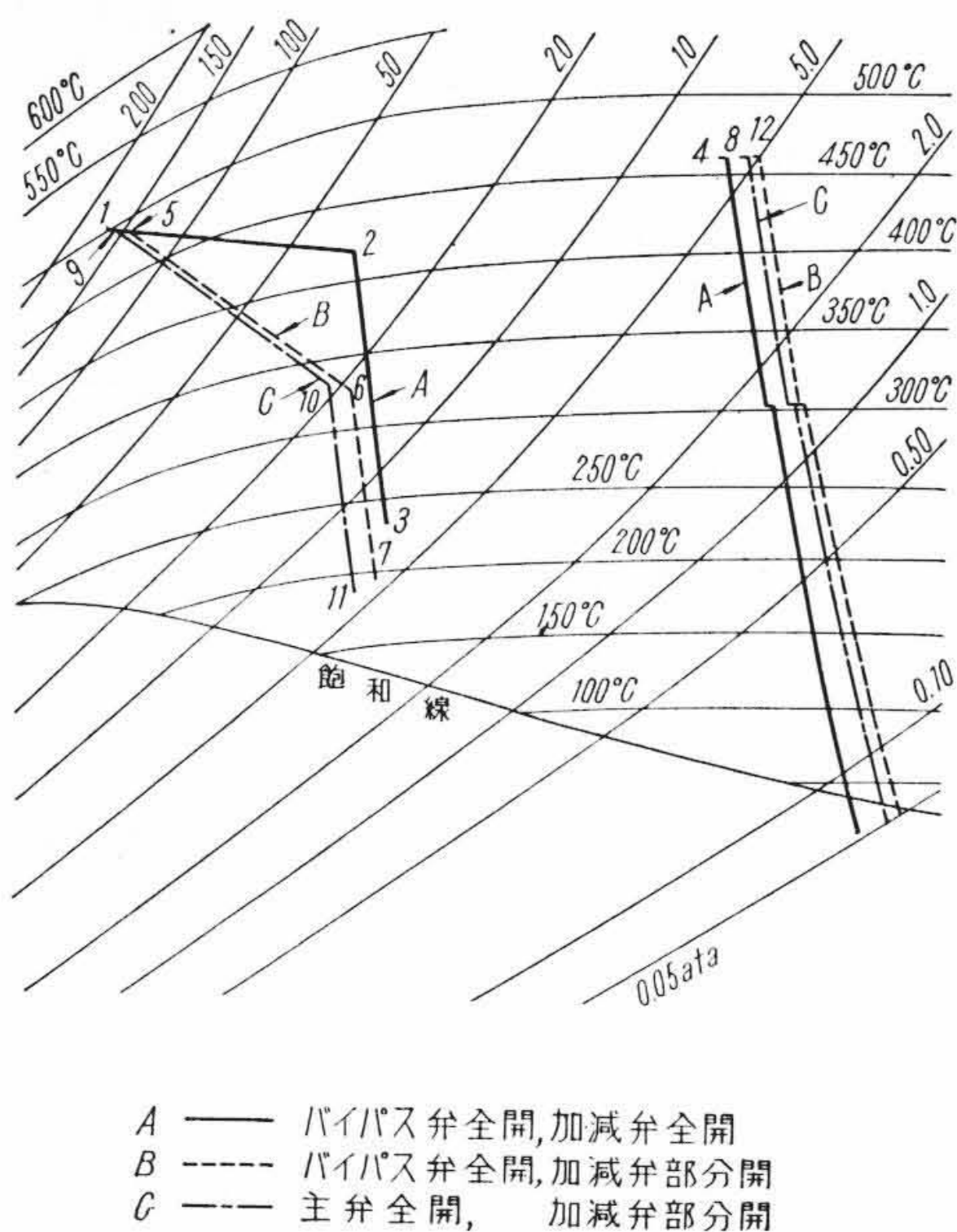
（バイパス弁制御用モータを弁開または閉方向に1秒間動作させてその状態に保った場合のタービン回転数の応答）

第9図 バイパス弁による速度調整

ン入口蒸気の圧力、温度ならびに再熱蒸気の温度いかにによって異なる。一例としてボイラを定圧運転し、蒸気条件が170atm、500°C/460°Cに保たれた場合の計算結果は約30,900kW（定格出力175,000kWの17.6%）である（第8図のA点）。運転法を変え蒸気条件を変えればこの値も変ることはいうまでもない。次にこの状態から加減弁を徐々に閉じてゆくと流量は減少するため第8図B点のようになって出力は約3.4%（6,000kW）減少する。次の段階として左右両主さい止弁が同時に全開すると出力はC点のように急激に増加するがその値は約2.1%に過ぎず特に問題とはならない。（工場試運転においては、この切換点における変動が負荷でなく回転数として生ずるはずであるが実際にはまったく問題にならないほど小さなものであった）。

上記切換時の三つの段階におけるタービン各段落の蒸気状態を示したのが第10図である。図における実線Aは、バイパス弁が全開となった状態を示す。蒸気は主さい止弁前の点1の状態からバイパス弁によって点2の状態まで絞られ高圧タービンに流入する。この蒸気は点3で高圧タービンを出て再熱され、点4の状態で中圧タービンへ流入し、低圧タービンを経て復水器にはいる。破線Bは部分噴射に切り換えるために、加減弁を閉じてゆき、主さい止弁前後の圧力差を減じた場合を表わし、点5が主さい止弁後の圧力を、また点6が調整段落出口の圧力を表わす。鎖線CはBに引き続いて主弁を全開した状態であり、Bと同様な形状であるが流量が増加するため圧力分布も多少高くなっている。

A, B, Cを比較すると、再熱以後にはあまり差が見られないが、高圧タービンでは、AとB, Cとの形状がかなり異なっている。したがってAからBへ切り換える際、主さい止弁直後の蒸気温度は点2から点5へ、短時間の間に約60°C変化する。しかしながら、全周噴射起動を行う場合は、さきにも述べたように熱伝達率が小さくなるので“初蒸気温度-タービンメタルの最高温度”の制限値を、111

第 10 図 全周噴射運転時 $i-s$ 線図

～222°C とすることができるので（部分噴射の場合は約 42°C，第 1 表参照），慎重な運転を行えばなんら問題を生じないであろう。

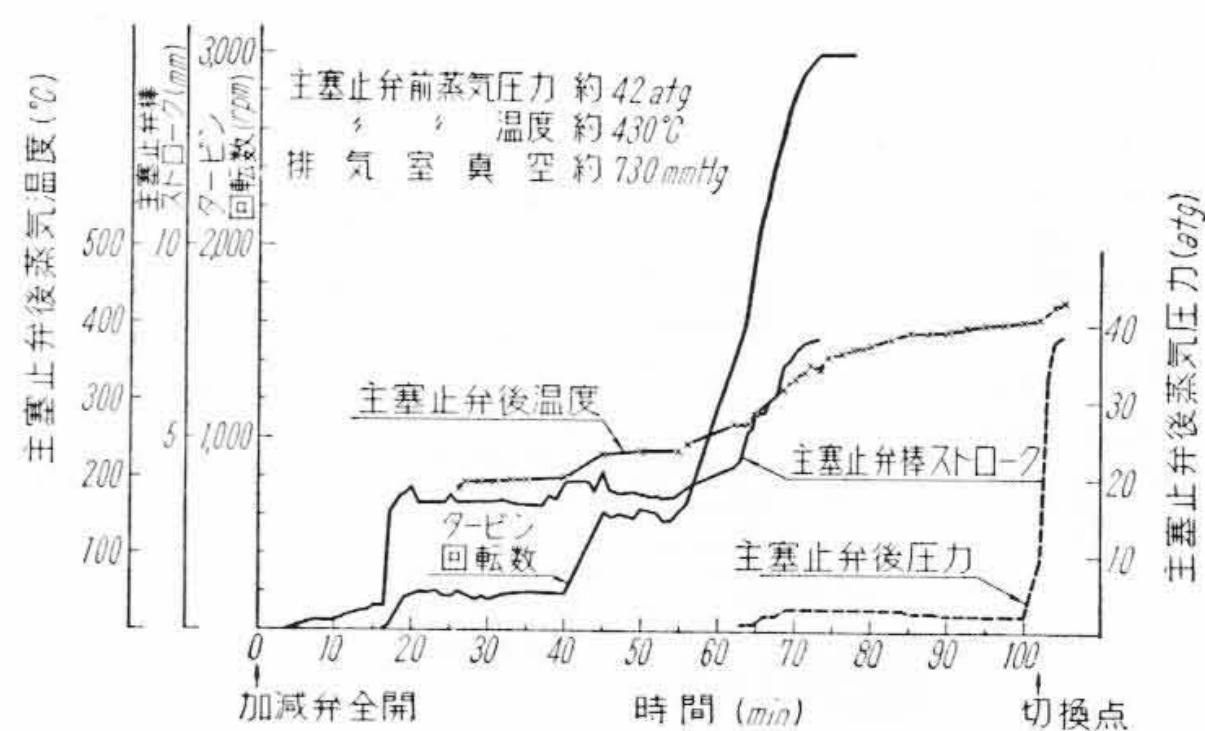
4.4 バイパス運転時の負荷遮断

全周噴射起動装置はタービンの速度検出を行っているわけではなく，また全周噴射を行う状態では調速機は高速ストップ位置（107%）にセットしておくため不動作状態にある。この状態でタービン発電機が負荷をとっているとき，発電機が外線から遮断されるとタービン回転数は上昇し，定格回転数の 103% に達するまでは加減弁は全開のままである。（もちろんそれ以前に約 101% から閉じはじめるようにセットされた中間阻止弁は閉じる）。前記の蒸気条件におけるバイパス弁による最大負荷 30,900 kW が遮断された場合の最大速度上昇率を計算すると，定格回転数の 107% となり非常調速機を作動させるに至らない。すなわちバイパス弁全開時出力が定格出力の 20% にも満たないので，その負荷を遮断しても，（オフセットされていて）103% の速度からききはじめの調速機により速度上昇を非常速度以下に押えることが可能である。

第 11 図 に工場試運転時に全周噴射起動を実施した測定記録を示す。横軸に時間，縦軸に圧力，温度，主さい止弁弁棒ストロークをとりタービン起動から定格回転数までの測定値をプロットした。試運転の結果は良好であり弁は安定で速度制御も円滑に行われた。

5. 急速起動と最低負荷運転

タービンの起動所要時間は，第 1 表に述べた車室壁温度上昇率や伸び差などの制約を受けるため，あまり短縮することはできず，冷えた状態のタービンに全負荷をかけるまでには，数時間を要するの



第 11 図 全周噴射起動曲線（工場試運転）

が普通である。主さい止弁バイパス装置を用いた全周噴射起動法によりこれら条件が緩和され，起動時間が短縮されることを期待するが，この問題は運転実績を含めて別の機会に検討したい。

豊水期には電力が余剰となるため，火力発電所では深夜に停止または最低負荷までロードダウンしての運転がしばしば行われる。しかし，タービンを毎日起動停止することは，操作が煩雑であるばかりでなく，タービンの寿命のうえからも好ましくないことであり，可能な限りタービンを停止せず最低負荷にて運転継続することが要求される。この最低負荷はなるべく小さい値まで取りうることを有利であるが，運転上の種々の要因に制約されて，あまり小さくできないのが現状である⁽¹⁾。全周噴射起動装置を起動時のみでなく，低負荷連続運転時にも使用すれば，低負荷運転を制約する各種要因のうちの一つであるタービン高圧部の熱応力の問題が解決されることになり，最低負荷を小さくする点に関して一つの大きな前進であるといえる。したがってそのほかの要因，たとえばボイラの ABC の問題が解決され，さらにタービンの振動，偏心，伸び差，低圧部温度上昇などが実験的に異常がないことが確認されれば，従来の最低負荷より格段に小さい最低負荷での連続運転が可能となる。

さらに，著しい部分負荷においては，蒸気速度が部分噴射のときは非常に高くなるが，全周噴射ではこれを小さくすることができるため，ノズル，翼などの浸食を極端に減少することができる。

6. 結 言

以上，全周噴射起動装置についてその構造，運転および利点を，設計上および工場試運転結果より検討し，運転操作上の諸問題が容易に克服されることを確認した。

本装置は従来の主さい止弁にわずかの改造を加え，起動操作を一部変更するだけで，タービンケーシングの熱応力およびき裂発生防止にきわめて有効な対策となるので新設のタービンはもちろん既設のタービンにも広く適用することができる。

参 考 文 献

- (1) 火力発電技術協会：火力発電 12, 123 (1961)
- (2) 桑野：日立評論 43, 483 (1961)
- (3) S. B. Coulter, R. L. Jackson: ASME Paper 59-PWR-10