

蒸気タービン電子油圧式ガバナの開発

Development of Electro-hydraulic Governor for Steam Turbine

柴 藤 英 造*
Eizō Shibato

竹 村 克 己**
Katsumi Takemura

要 旨

蒸気タービンプラントの制御方式の複雑化、高度化に対処するために、われわれは、従来からのレバーと油圧機構の組合せからなる機械油圧式ガバナに代わる電子油圧式ガバナ (Electro-hydraulic Governor) の開発にいち早く取り組み、その試作装置の完成をみるとともに、昭和電工株式会社横浜工場納 3,600 kW 抽気背圧タービンによる負荷試験において満足できる結果を得た。

1. 緒 言

蒸気タービンプラントの制御方式は年々複雑に、要求される制御性能もきびしくかつ高度になり、近い将来全自動化に進むことは必至であるといえよう。これに対処するためには、従来からのレバーと油圧機構の組合せからなる機械油圧式ガバナではむずかしいことを考慮して、われわれは電子油圧式ガバナ (一般的にはより広い意味で電子油圧式制御装置 Electro-hydraulic Control System 略称 EHC というべきであるが、ここでは、これまでのガバナという呼び方に従う) の開発にいち早く取り組み、検出演算部分の電子回路化、不燃性高圧油系統の採用などによって、取り扱い、保守の容易な高性能の制御装置を国内で最初に開発することができ、昭和電工株式会社関係者のご好意により、実機に取り付けて運転する機会を得た。負荷試験の結果その優秀性を立証することができたので報告する。

なお、外国メーカーについては、特にアメリカ GE 社において開発が進んでおり、本年始め筆者らがアメリカで行なった調査によると、100 MW 以下の中形タービンにおいては、すでに EHC 付が標準になっており、また現在計画中の超大型タービンの大半が本方式を採用する予定で、GE 社製だけでも現在約 50 台稼働中で、顧客の評判もきわめてよいようである。

2. 電子油圧式ガバナの概要

2.1 制 御 方 式

開発に当たりわれわれは、基本的な制御方式として従来の機械油圧式ガバナと全く同様の方式の採用を決定し、検出装置、設定器、演算増幅装置などを機械的な機構から電子回路化してモジュール化、ソリッドステート化を図り、制御油系統を従来の潤滑油系統から分離し、不燃性油使用の高圧油系統へと置換して小形ユニット化を図った。これによって制御性能を向上させるとともに、信頼性を増すことに努めた。

ここでは、一例として一段抽気背圧タービンの基本的な制御方式について説明する。衆知のように抽気背圧タービンでは、本タービン単独での単調調速運転と、系統と並列する並列調圧運転の二つの運転方式があるが、前者の場合には、それにつながっている工場内の所要電力および所要抽気量に応じてタービン回転数および抽気圧力を高圧、低圧二つの加減弁によって制御するのが目的であり、背気圧力はタービン自体によって制御されず、必要ならば適当なバイパスラインによって行なわれる。たとえば、工場所要抽気量が増加して抽気圧力が低下した場合には、回転数に影響を与えないように高圧加減弁を開、低圧加減弁を閉方向に動かして抽気圧力を上昇させ、所要電力が増加して速度が低下した場合には、抽気圧力に影響

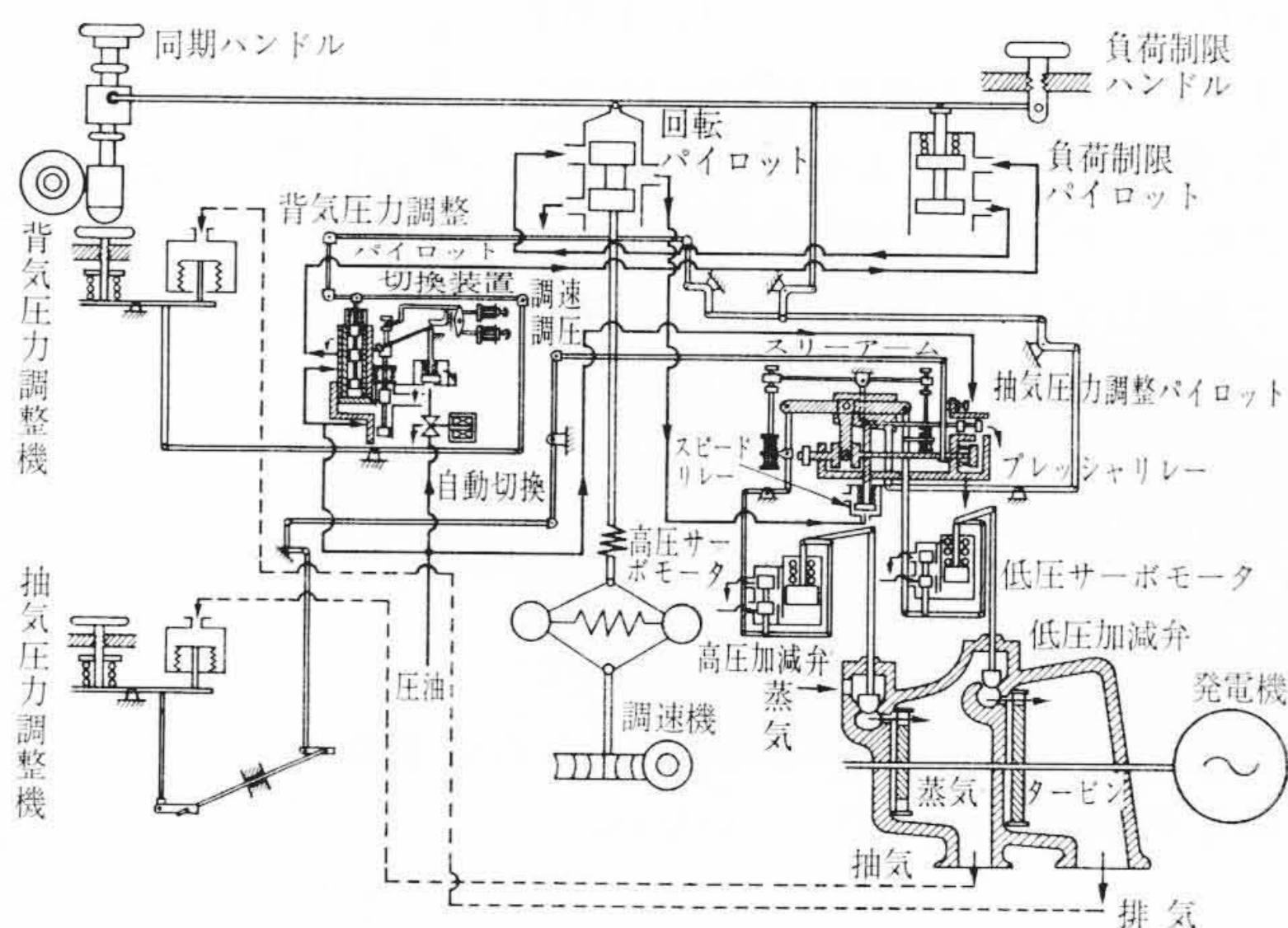


図1 抽気背圧タービン機械油圧式ガバナ制御系統図

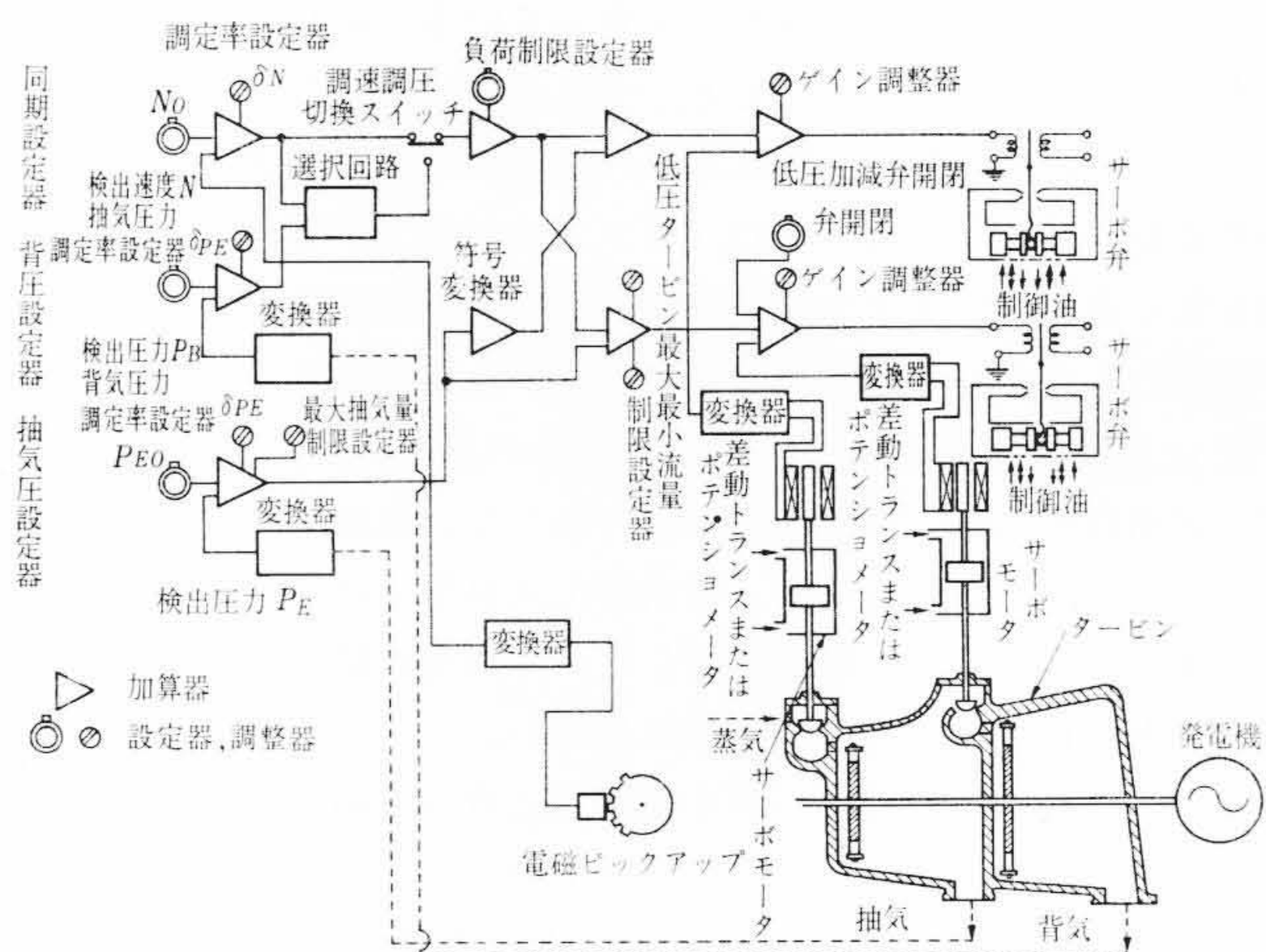


図2 抽気背圧タービン電子油圧式ガバナ制御系統図

を与えないように高圧、低圧加減弁ともに閉方向に動かして速度を上昇させる。一方後者の場合には、タービン回転数は系統によって制御されるので、抽気および背気圧力を二つの加減弁によって制御するのが目的で、抽気圧力の制御方式は前述の場合と同様である。たとえば工場所要背気量が増加して背気圧力が低下した場合には、抽気圧力に影響を与えないように高圧、低圧加減弁をともに開方向に動かして背気圧力を上昇させる。

2.2 制 御 装 置

前述の制御目的を達成する方法として現在実用化されているものは、図1に示す従来からの機械(油圧式)ガバナと、図2に示す新しい電子(油圧式)ガバナの二形式であり、以下この系統図に従って説明する。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

(1) 調速系統

機械ガバナでは、タービン軸よりウォームギヤを介して駆動される遠心体により回転パイロット機構のパイロットを動かして速度を検出し、同期ハンドルによって同機構のブッシュを動かして速度を設定し、両者のギャップによって設定値と検出値の比較を行ない、負荷制限パイロットを経てきた油によって油圧信号に変え、スピードリレーへと調速信号を導く。一方電子ガバナでは、タービン軸に直結された電磁ピックアップ(または PMG) によって検出後、変換回路によって回転数に比例する直流信号に変換し、同期設定器(ポテンショメータ)の与える設定値とトランジスタオペアンプ(TOA)を用いた加算回路によって比較し、適当な速度調定率を与えるために加算器のゲインを調整して発生した調速信号を次段の TOA を用いた負荷制限回路へと導くが、このとき後述の背気調圧信号は調速運転中、切換スイッチにより除外されている。

(2) 抽気調圧系統

機械ガバナでは、抽気管に連結された抽気圧力調整機の検出ベローにより圧力を検出し、設定ハンドルの与える圧力との比較を加算レバーを動かして行ない、このレバーの動きによって抽気圧力調整パイロットを作動して油圧信号にかえ、プレッシャリレーへと調圧信号を導く。一方電子ガバナでは、抽気圧力検出器のブルドン管またはベローの変位を検知するストレンゲージにより圧力を検出し、変換回路によって抽気圧力に比例する直流信号に変換後、抽気圧力設定器(ポテンショメータ)の与える設定圧力に比例する信号と TOA を用いた加算回路によって比較し、適当な抽気圧力調定率を与えるために加算器のゲインを調整して調圧信号を発生する。

(3) 背気調圧系統

機械ガバナでは、背気圧力調整機によって検出、設定および比較を行ない、加算レバーを動かし、調速運転中、切換装置により殺されているレバーの動きを、調圧運転中は背気圧力調整パイロットにより油圧信号にかえ、負荷制限パイロットおよび同期ハンドルをその上限に置き正常運転中は不作動状態の回転パイロットを経由してスピードリレーへと調圧信号を導く。一方電子ガバナでは、背気圧力検出器および変換回路によって検出後背気圧力に比例する直流信号に変換し、背気圧力設定器(ポテンショメータ)の与える設定圧力に比例する信号と TOA を用いた加算回路とによって比較し、適当な背気圧力調定率を与えるために加算器のゲインを調整して発生した背気調圧信号を、調圧運転中は同期設定器をその上限に置いて選択回路により正常運転中調速信号を殺し、次段の負荷制限回路へと導く。

(4) 負荷制限装置

機械ガバナは、設定ハンドルおよびパイロット機構よりなり、スピードリレーへと導かれる油圧信号を制限することにより最大負荷を制限する。電子ガバナは、設定器(ポテンショメータ)および TOA を用いたリミット回路よりなり、入力信号の最大値を制限する。

(5) スリーアーム装置

調速または背気調圧信号に対しては高、低圧加減弁を同方向に、抽気調圧信号に対しては異方向に動かす抽気タービンの基本動作を、機械ガバナでは、スリーアーム機構を用いて、調速または背気調圧信号に対してはスピードリレーを介してスリーアームレバーを平行移動させ、抽気調圧信号に対してはプレッシャリレーを介して回転運動させて、その先につながるレバー機構により高、低圧加減弁駆動用サーボモータのパイロットを動かし、油圧シリンダ・ピストンの圧油を変化させて加減弁を必要方向に動か

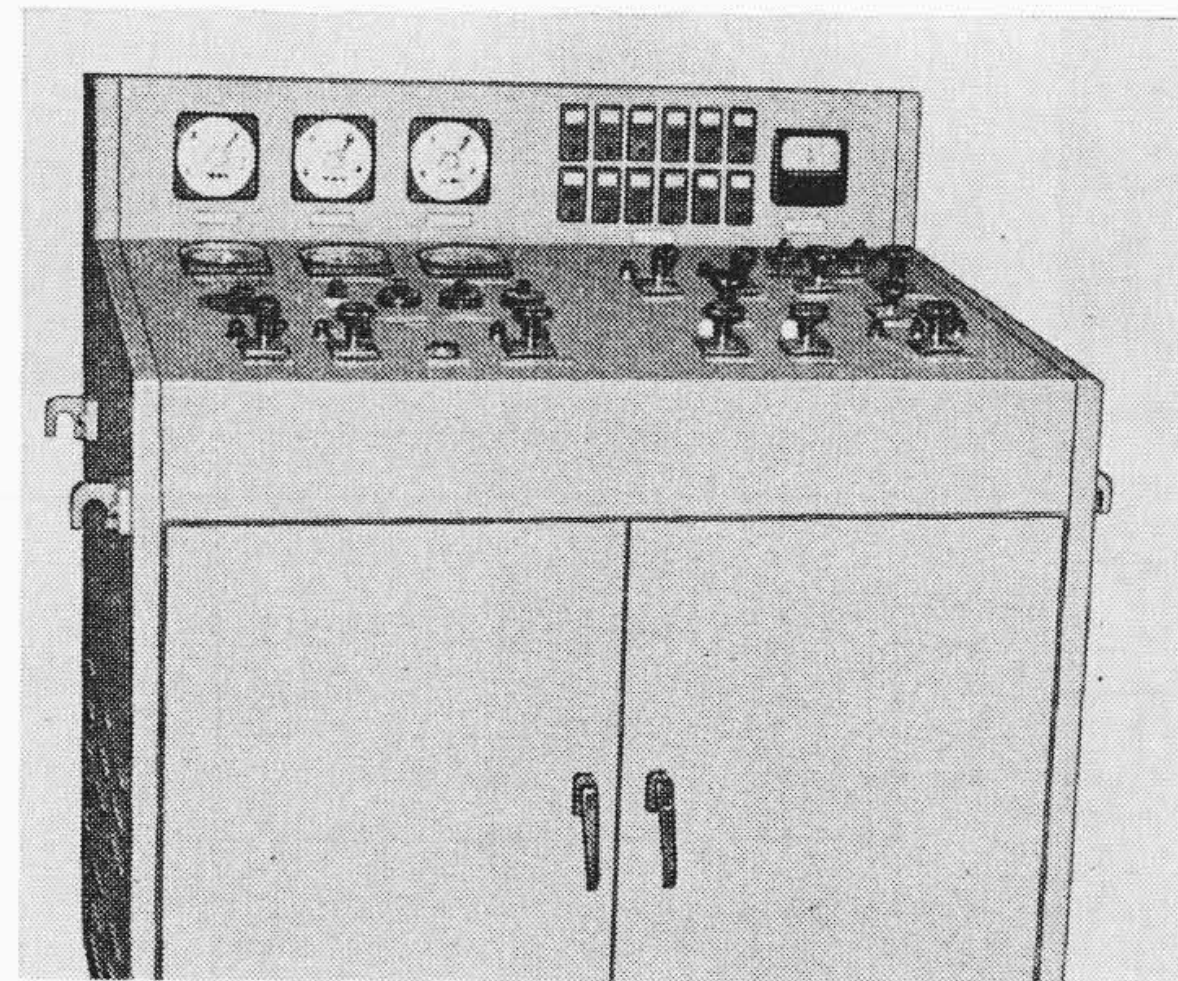


図3 電子油圧式ガバナ制御盤

す。一方電子ガバナでは、TOA を用いた加算回路および符号変換回路の組合せにより、調速または背気調圧信号に対しては同符号のまま、抽気調圧信号に対しては一方の符号を変換し、異符号として高、低圧サーボ系駆動のための信号を発生し、最終増幅段にてサーボ弁のゲインを調整後、機械ガバナのサーボモータのパイロットに相当するサーボ弁へ電流信号として送る。たとえばノズルフラップ式のサーボ弁では、この電流信号をうけてトルクモータ部の作用により可動フラップを変位させ、一方のノズルの背圧を高め、スプールを一方に変位させて制御油を油圧シリンダの上または下に導き、他方を戻りラインにつなぎ加減弁を駆動する。

(6) フィードバック装置

機械ガバナでは、油圧シリンダの動きをレバーによりパイロットに帰還することにより定置制御を行ない、電子ガバナでは、差動トランスまたはポテンショメータにより油圧シリンダの動きを検出し、最終増幅器すなわちサーボ弁の前段増幅器に帰還することにより行なっている。

(7) その他

電子ガバナでは、調圧運転から調速運転へ切り換わった場合の速度変化を小さく押えるために、調圧運転中に同期設定器を現在の調圧信号のわずかに上に追従させる追従制御装置(FUC)および単独調速運転中の正確な回転数制御装置(AFC)を内蔵している。これと同様なことが機械ガバナでも行なえるが、電子ガバナのほうが簡単な回路の追加によって、これら自動機能を持たせることができる。さらに、電子ガバナでは、タービン起動時に用いる、機械ガバナの抽気抽外ストッパ相当の最大抽気量制限装置を設定器および TOA を用いたリミット回路により構成するとともに、タービン低圧段最小流量制限装置も同様な電子回路によって構成することができる。

電子回路部分は図3に示す制御盤に収められており、運転操作に使用する切換スイッチ、設定器類は盤面に、初期調整用設定器などは盤内前面に、後述の制御油圧供給装置の運転操作スイッチは盤面右側に取り付けられている。

2.3 制御油圧供給装置

制御性能の向上、各装置の小形ユニット化および取り扱いの簡単化を図るために、制御油は従来の $10 \sim 14 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の潤滑油との共用系統から、 $100 \sim 120 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ のリン酸エステル油使用の別系統へと改めた。本作動油は、引火点 $\sim 500^\circ\text{F}$ 、燃焼点 $\sim 700^\circ\text{F}$ 、自然発火点 $\sim 1,180^\circ\text{F}$ の耐火性油で、火災の危険性はなく、シール材、塗料などの影響を除いて一般鉱油と同等以上の作動油としての性能を持っている。

高圧油の発生方法としては、今回われわれが試験を行なった固定

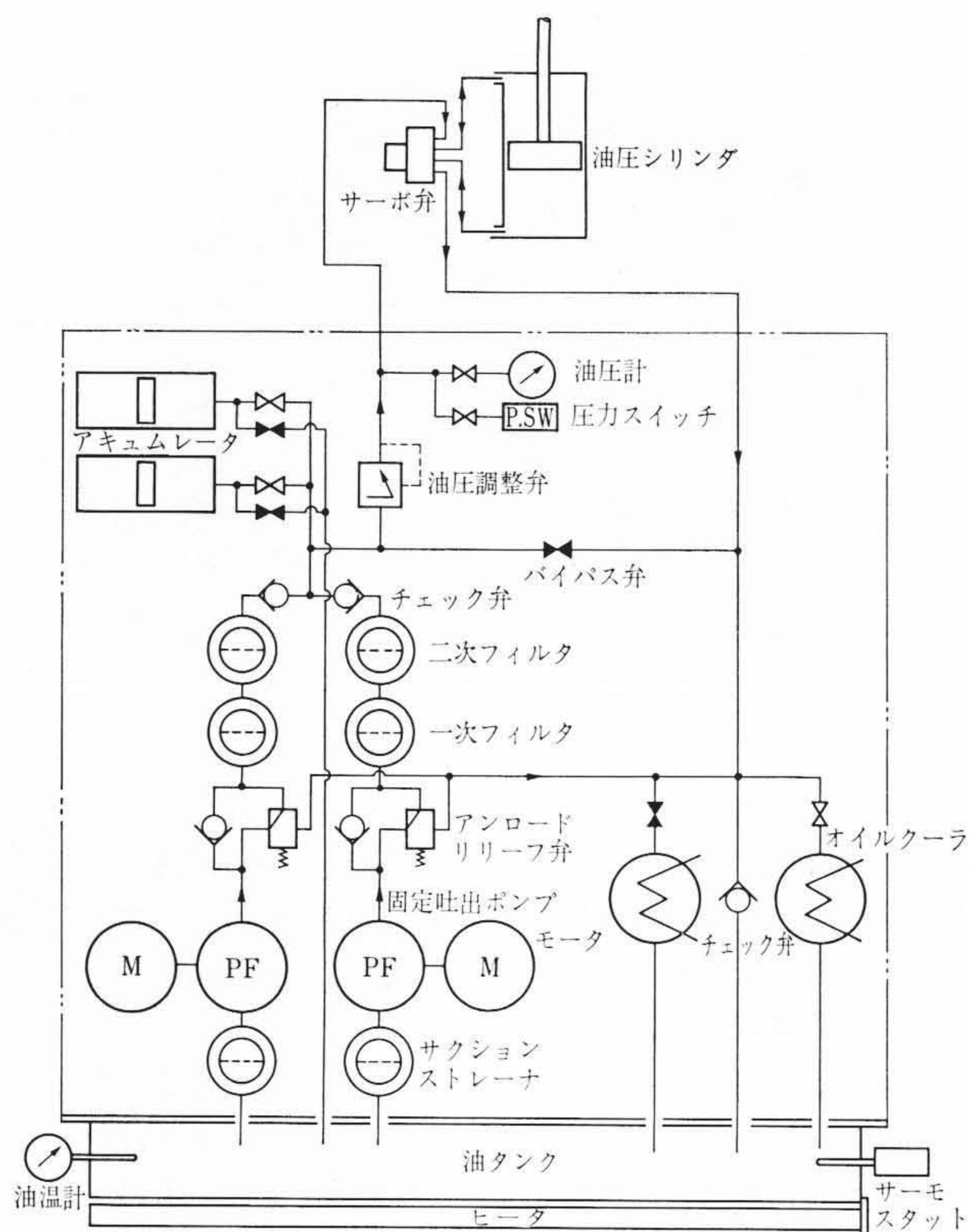


図4 断続油圧制御方式制御油圧制御装置系統図

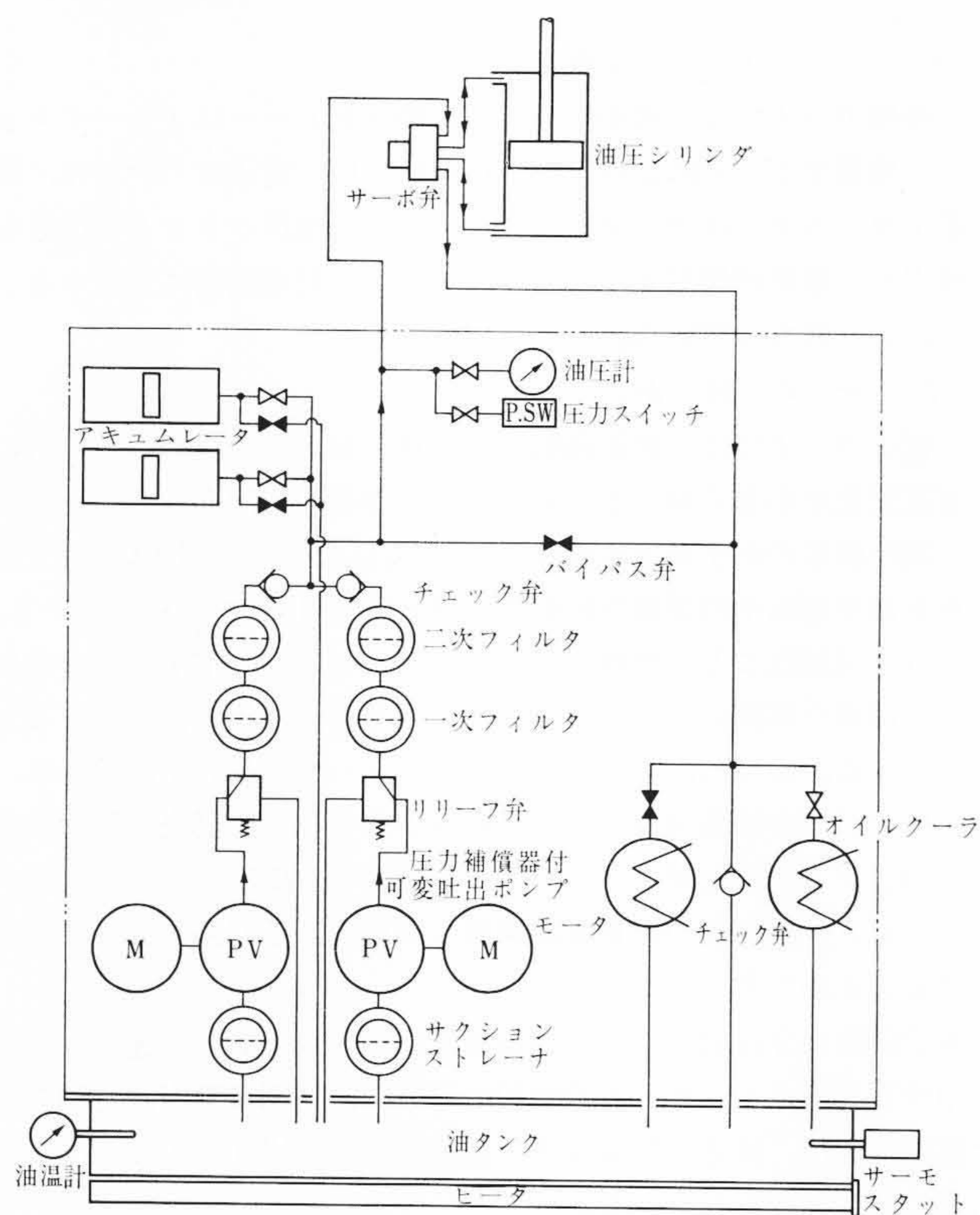


図5 連続油圧制御方式制御油圧供給装置系統図

吐出ポンプ、アンロードリリーフ弁およびアキュムレータの組合せからなる断続油圧制御方式と、圧力補償器付可変吐出ポンプおよびアキュムレータの組合せからなる連続油圧制御方式とがある。前者は図4に、後者は図5に示す系統である。調査の結果、アメリカにおいては現在ほとんど後者の方式が用いられているが、今後価格および耐久力を考慮して決定されるべきものである。

現在運転中の装置は図6に示すとおりで、油の浄化には、サーボ

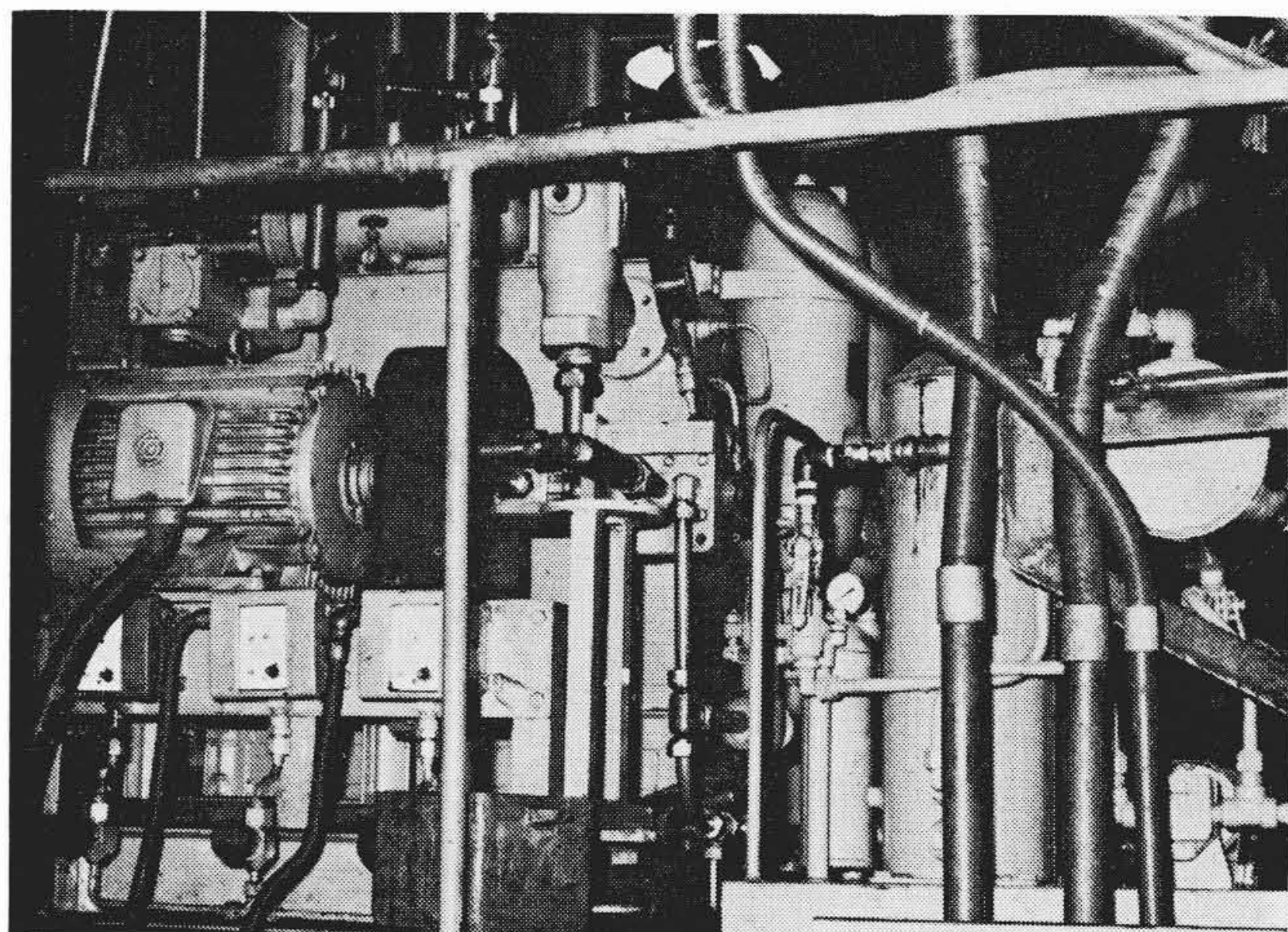


図6 電子油圧式ガバナ制御油圧供給装置

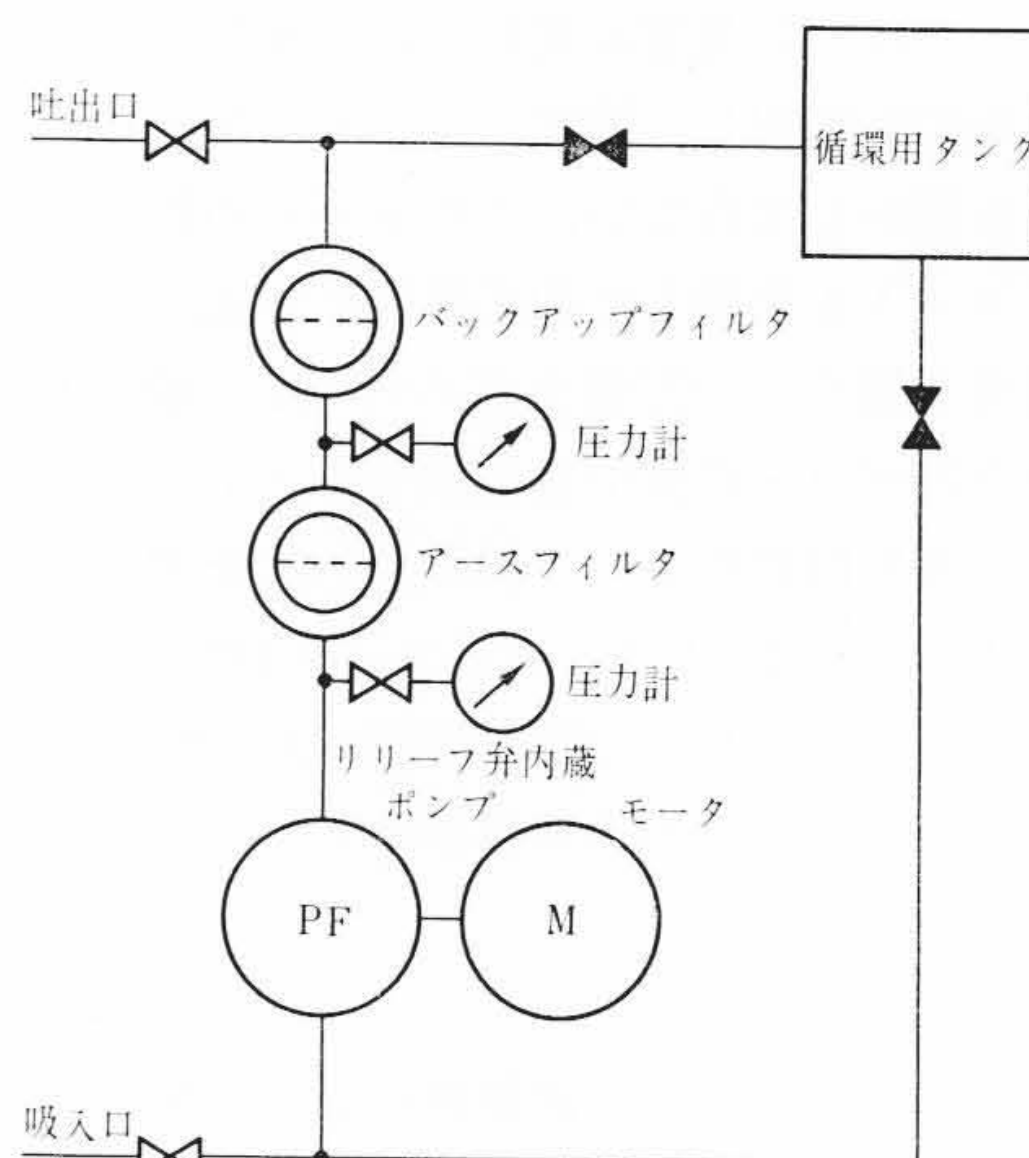


図7 アース・フィルタ装置系統図

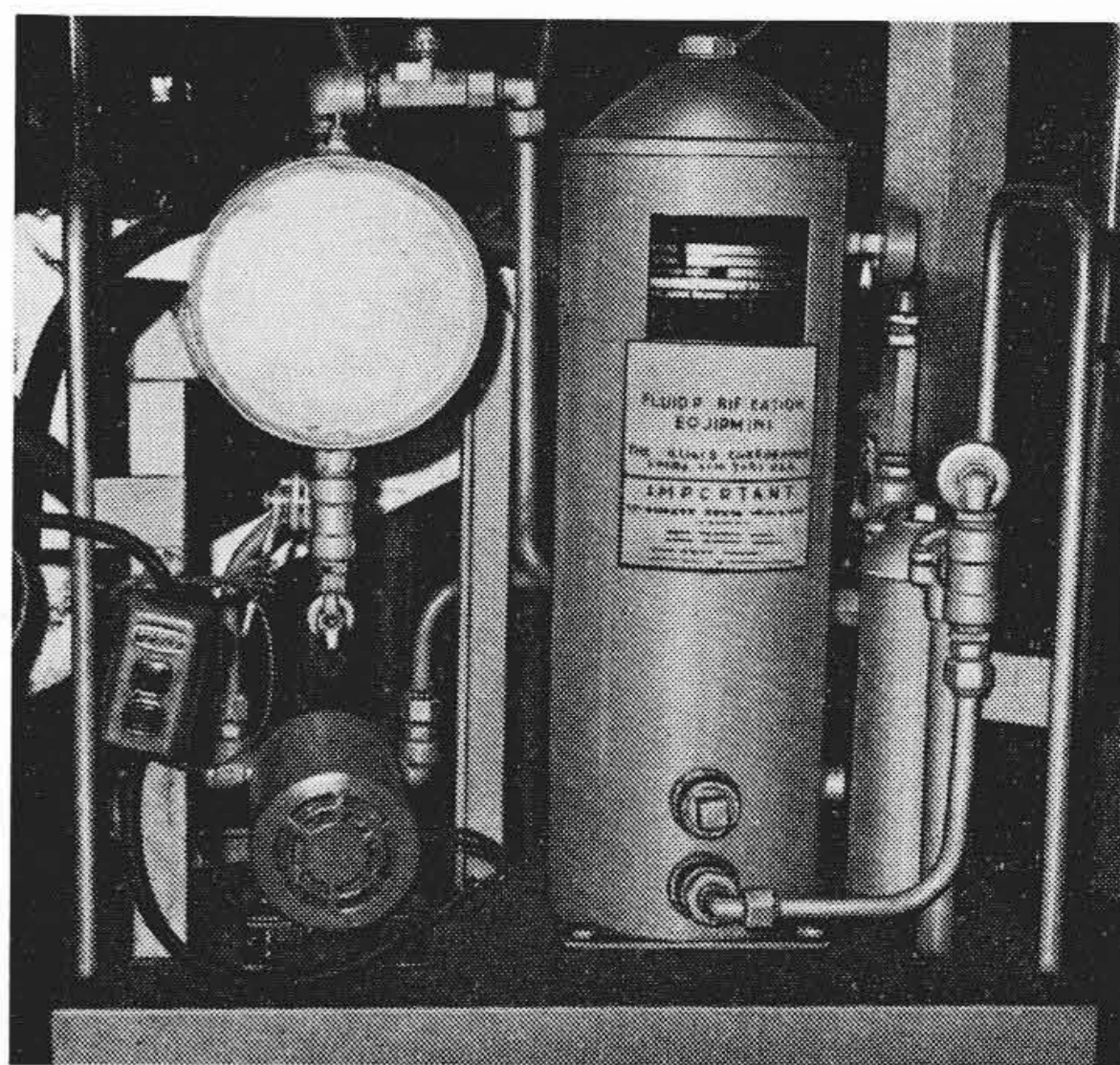


図8 アース・フィルタ装置

弁使用の場合の常識となっている10 μ フィルタを使用している。ポンプ系統は図に示すように相互補助の意味で二系統あり、運転中のポンプ系統の不測の事故に備えている。

電子ガバナは高圧油使用のサーボ弁をその心臓部とするシステムであることから、油の管理には特に注意がたいせつである。供給装置を完全密閉形にしてゴミの混入をさけるとともに、上記10 μ の主ラインフィルタで常に清浄化するほかに、作動油の酸化劣化および塩素など有害不純物の活性化によるサーボ弁の侵食に備えるために、フラーズアースフィルタと呼ばれる化学的なフィルタエレメン

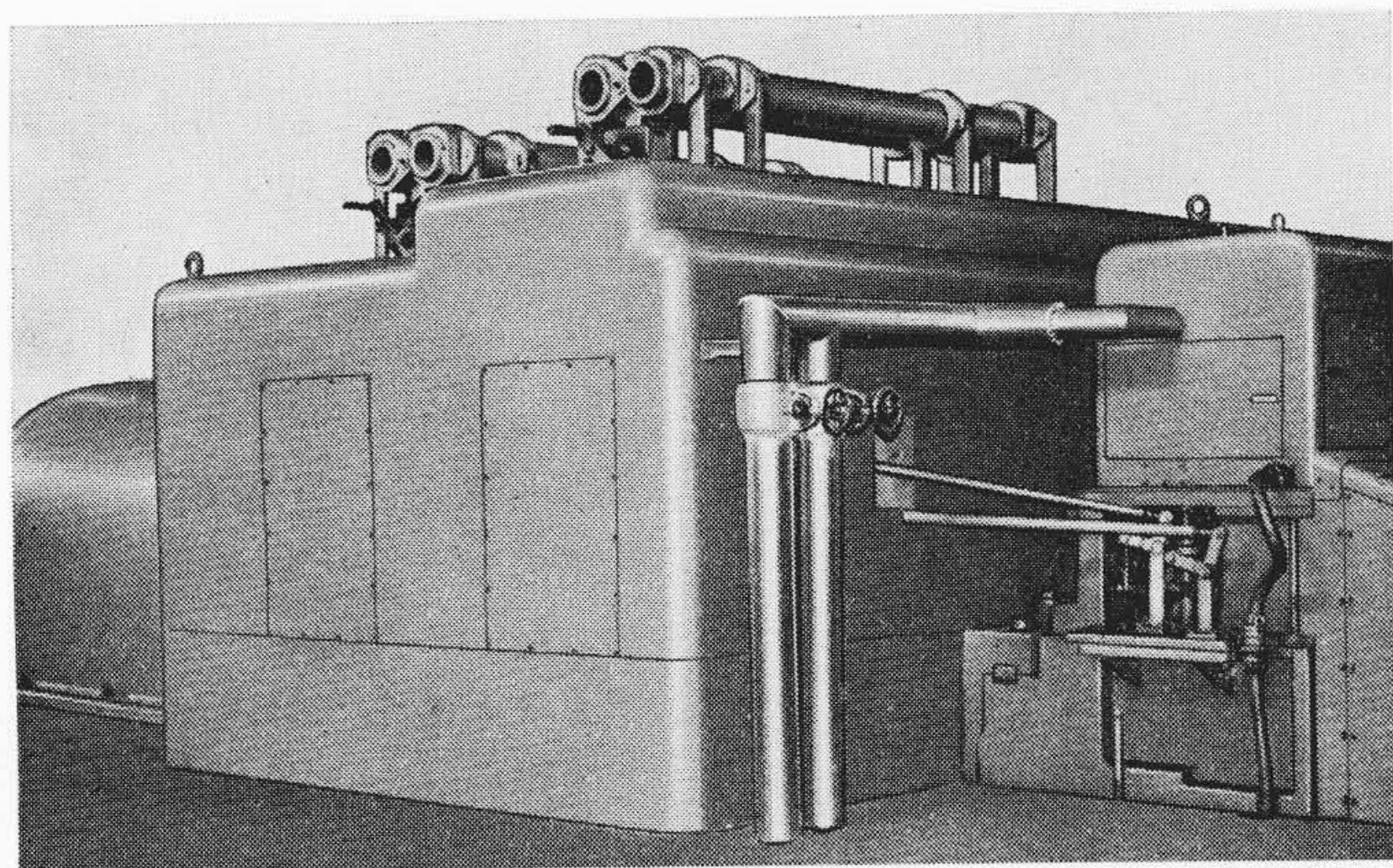


図9 運転中の蒸気タービン

トを主構成要素とするアースフィルタ装置を使用し、油タンク中の油をバイパス浄化し、酸価、水分含有量、鈹油含有量および夾雑物(きょうざつぶつ)数などを一定限度以下に管理している。図7はその系統を、図8は装置そのものを示している。

3. 電子油圧式ガバナによる運転結果

3.1 タービン概要

今回本装置を実装したのは、昭和電工株式会社横浜工場納タービンで、これには機械油圧式ガバナと電子油圧式ガバナが並置され、切換ハンドルにより両サーボモータの連結をつなぎかえて両ガバナを運転中に切り換えることができるようになっている。なお、運転中の本タービン外観は図9に示すとおりで、そのおもな仕様は次のとおりである。

出力	MCR 3,600 kW
回転数	3,000 rpm
形式	一段抽気背圧
蒸気条件	入口 60.0 kg/cm ² ・g 400℃ 抽気 21.0 kg/cm ² ・g 背気 10.5 kg/cm ² ・g
加減弁	高压 4個 パーリフト式ストローク 60mm 低压 4個 パーリフト式ストローク 50mm
サーボモータ	高压 4B (機械ガバナ 10B) 低压 3¼B (機械ガバナ 10B)

3.2 運転結果

機械ガバナではレバーおよびパイロット機構などにより不感帯、ヒステリシスを生じ、応答速さが限られていたのに対して、電子ガバナでは、その電子回路による構成のため不感帯、ヒステリシスも無視できる程度で、応答速度も2~3倍早くなっている。

起動特性は良好で、機械ガバナでは、調速機の線形範囲が定格回転の前後10%程度のため負荷制限器による非調速起動を行なっているのに対して、電子ガバナでは、約100回転の低速から調速運転でき、起動も同期設定器により容易に行なわれ、自動起動装置などへの連結が簡単である。

連続運転における状況は、たとえば速度制御は定格±1 rpm程度とすぐれており、同期投入も容易で、調圧制御も定格±0.5%程度とすぐれている。機械ガバナではその安定性の点から圧力調定率を10%程度と大きな値に設定していたのを、0~10%の間に設定でき、それと連結されるプラントからの要求により、たとえば比例+積分動作を行なわせることができる。

蒸気タービンのガバナとしていちばん過酷な負荷遮断試験の結果は、図10および図11に示すとおりである。

調速運転での負荷遮断では、当然設定した4%調定率分の回転数変化があり、機械ガバナおよび電子ガバナともに定常時における差

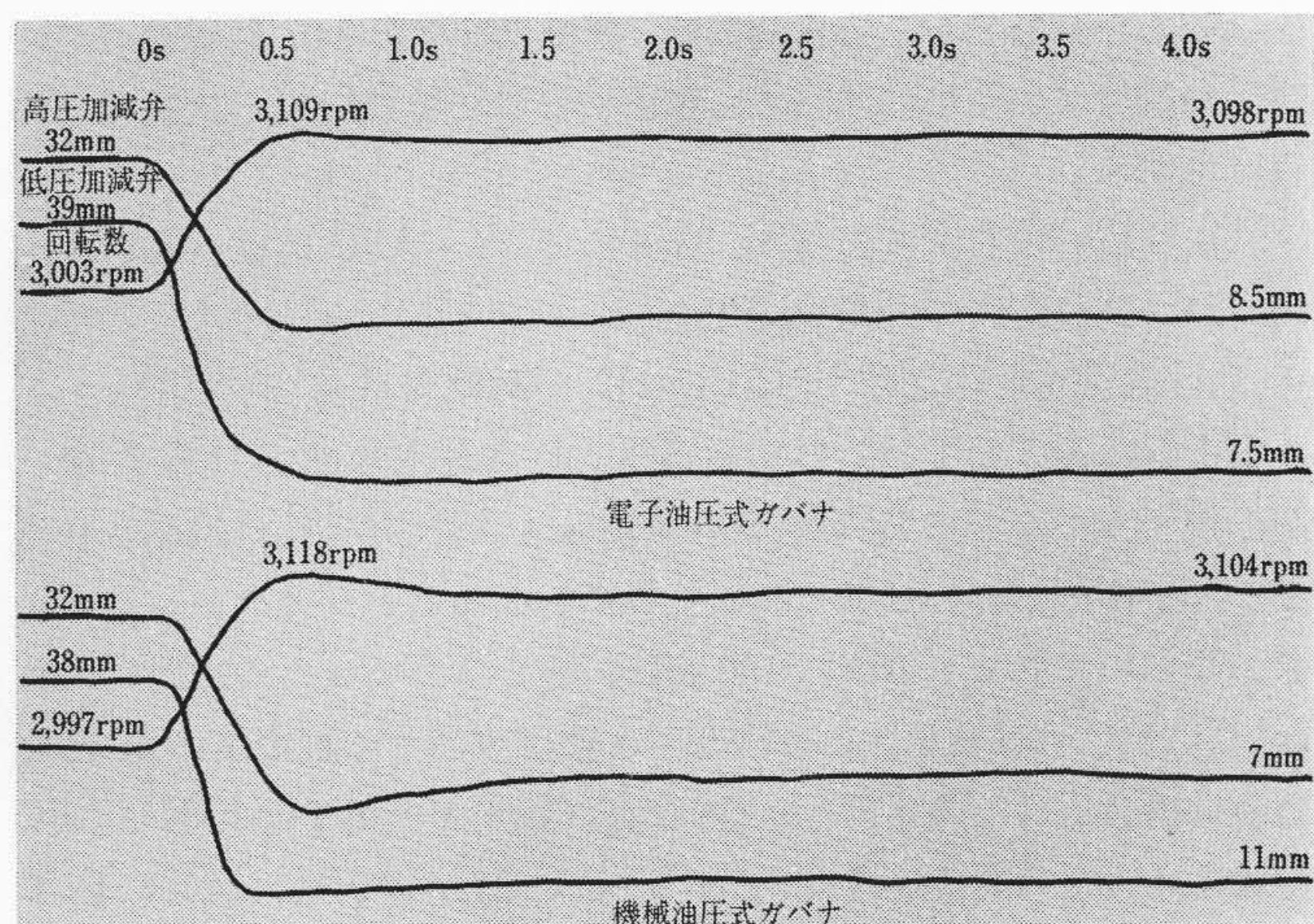


図10(a) 負荷遮断試験オシログラム (4/4 調速)

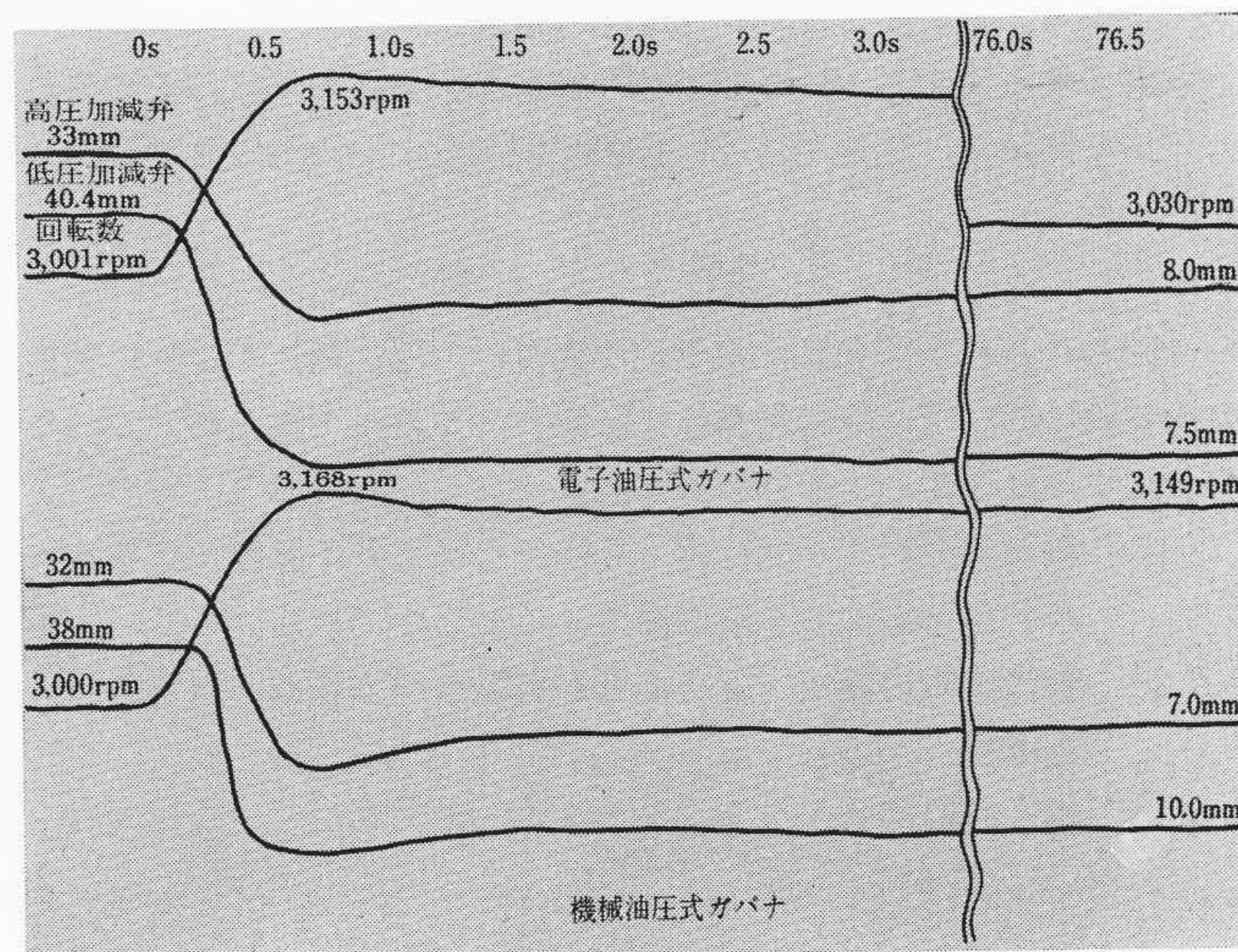


図10(b) 負荷遮断試験オシログラム (4/4 調圧)

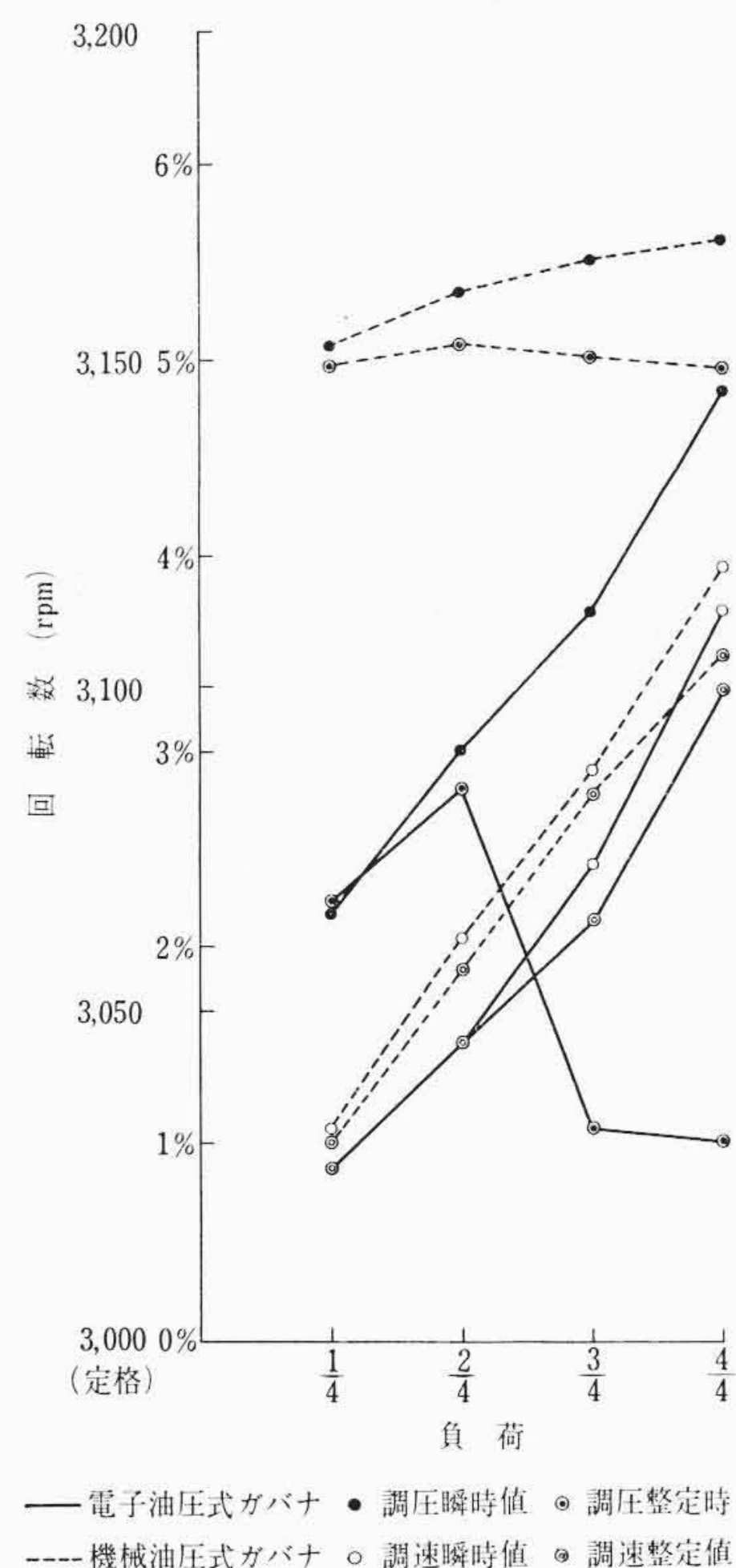


図11 負荷遮断結果まとめ図

異は認められないが、過渡的には、機械ガバナが 0.07 秒程度の不動時間を持っていたのに対して、電子ガバナではほとんど無視できる程度である。

調圧運転での負荷遮断では、前述の FUC・AFC 装置が働いて、瞬時および整定時の回転数変化を小さく押えることができる。たとえば 1/4 負荷からの遮断で、FUC が無い機械ガバナでは同期ハンドルを上限に設定しているので約 5% の回転数上昇は避けられないが、電子ガバナでは FUC を 1% オフセットを持たせて追従させると、調定率分と合わせて 2% の上昇に押えることができる。このとき、AFC のオフセットは約 100 回転に設定されていたので働いていない。また、1/4 負荷からの遮断で、機械ガバナの整定値は 1/4 負荷遮断の場合とほとんど同じであるが、電子ガバナでは FUC・AFC の働きによって約 1% 速度上昇に押えることができる。この FUC のオフセット量は、比較器などの特性にもよるが、現在の装置では調定率の 1/20~1/10 程度で、調圧から調速への運転切り換えによって生ずる回転数変化は 0.1~0.2 Hz 程度である。

本電子油圧式ガバナは、制御油の管理を十分行なえば、その寿命の点でも問題ないことが、その後の連続運転において立証された。

4. 結 言

今回われわれが開発した電子油圧式ガバナは、前述のように実機負荷試験において、その優秀性を証明することができたが、これらを要約すれば下記のとおりである。

- (1) 機械部分の電子回路化、高油圧化により、感度、応答速さなどの制御性能を数倍向上することができる。
- (2) 各設定値の設定、変更などが簡単かつ広範囲に行なわれ、運転操作が容易である。
- (3) 電子回路部分がソリッドステート化、モジュール化され、

信頼性が高く、点検、保守が容易である。

- (4) プラントの要求に応じた制御方式が採用でき、将来の全自動化、計算機制御などのより高度の制御システムへの適応が容易である。
- (5) 高圧不燃性油系統の採用により、ユニット全体が小形化され、火災の危険性がない。

今後、アメリカの例にならってわが国においても、本方式が標準になる日も近いことと考え、さらに完全なものを作り上げるために各方面のご協力をお願いする次第である。

最後に、本装置の実機取り付けを快く承諾され、本装置完成のため多大のご努力を賜った昭和電工株式会社横浜工場香坂工場長、氏家部長、伊藤電気課長および武係長ならびに同本社鈴木電気部長、福山前課長、高井課長および吉田課長補佐の諸氏をはじめ関係各位に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) J. B. Wagner, K. O. Strainey, T. E. Pounds: Proc. of the Ame. Power Conf., 26, 687 (1962)
- (2) M. A. Eggenberger: Proc. of the Ame. Power Conf., (April 1965)
- (3) E. G. Noyes, M. Birnbaum: Westinghouse Engineer 49, (March 1966)
- (4) 柴藤, 今井, 竹村: 日本機械学会創立 70 周年記念東京講演会前刷, 181, 69 ('67-10)
- (5) 竹村, 柴藤, 岡田: 昭和 42 年電気学会東京支部大会前刷, 302, ('67-9)
- (6) 柴藤, 今井, 竹村: 火力発電, 19, 55 (昭 43-1)
- (7) 柴藤, 竹村: 日本機械学会九州支部総会講演会前刷, 37, ('68-3)
- (8) 内山, 安藤, 岡田: 日本機械学会総会講演会前刷, 191, 151 ('68-4)

Vol. 50

日 立 評 論

No. 10

目 次

■論 文

- ・外部事故による同期機の界磁電流
- ・回生ブレーキ付チョップ式電気車を採用した直流電鉄の主電系統の計算
- ・ガスタービンの制御装置
- ・スカイアルミニウム株式会社納圧延機用電気設備
- ・最近のビル電気設備
- ・三相リラクタンスモータの非同期特性の解析
- ・分散中継台方式にも使える小容量クロスバ自動交換機—DAX 1 形クロスバ自動交換機の開発—

- ・電気冷蔵庫外装用プラスチック被覆鋼板の物性
- ・220 kV OF ケーブル線路の諸特性
- ・電装用モータへのフェライト磁石の応用
- ポンプ特集
- ・遠心ポンプの安定特性曲線に関する研究
- ・アメリカ開発局スネーククリークポンプ場納ポンプ模型試験
- ・化学プラント用ポンプの特性とメカニカルシール
- ・超臨界圧火力発電所用給水ポンプおよび循環水ポンプ
- ・超高層ビル用防振装置付ポンプ

発行所 日 立 評 論 社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内 1 丁目 4 番地
郵便番号 100
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地
郵便番号 101
振替口座 東京 20018 番