

図2 再循環流量制御系統図

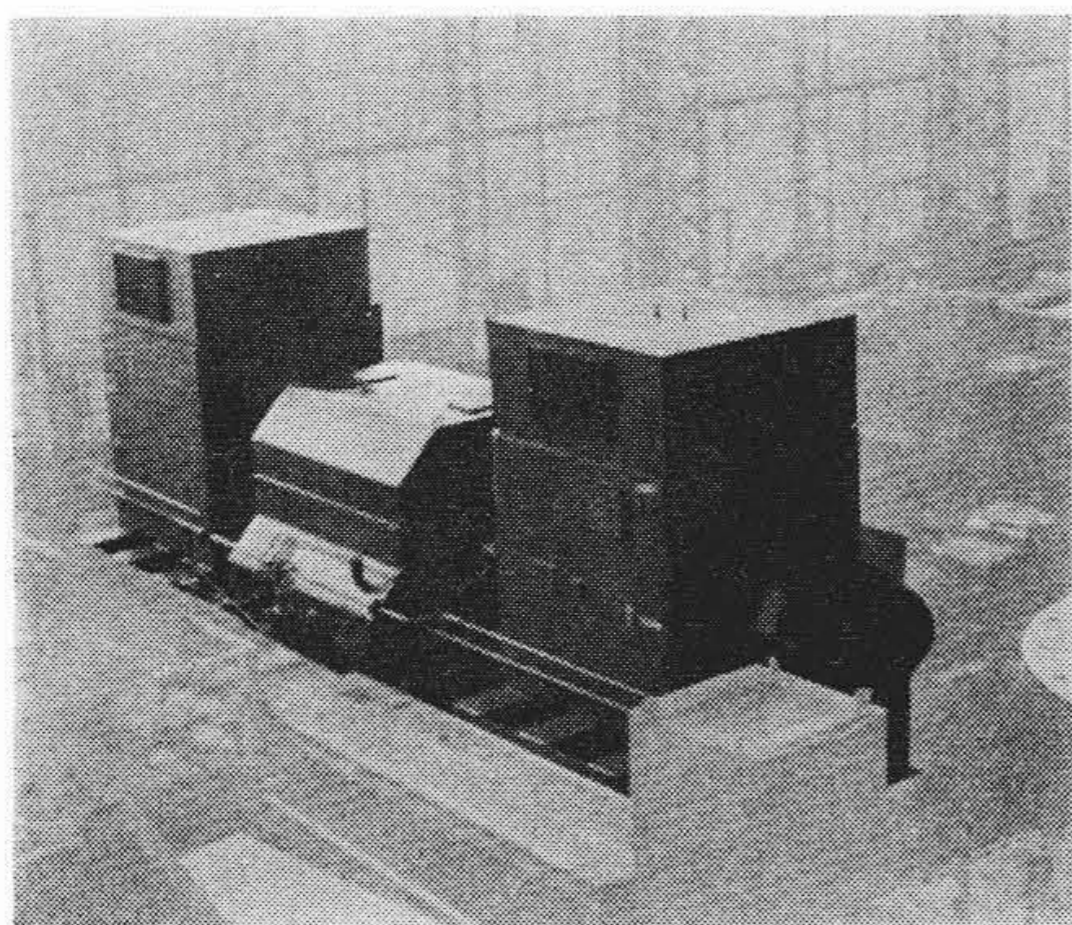


図3 MG セット

程度の広い出力範囲をカバーするもので、通常はCRは定格出力引きぬき位置ゆえマスタコントローラによる自動出力調整範囲は100~75%程度になる。このとき再循環ポンプの回転数は60%程度から100%まで速度制御する必要がある。たとえば10%の出力変化が必要な場合には再循環ポンプの回転数は14%程度の変化が必要となる。ただし再循環ポンプの回転数調整範囲としては20%程度から100%まで可能なようにして、CRのあらゆる位置における運転が行なえるようにする必要がある。

再循環系の流量制御系統は図2に示されるとおりであり、負荷要求信号と速度計発電機よりの速度信号との偏差が比例積分器を経て、関数発生器により矯正されてから流体継手のすくい管の駆動信号となるものである。

BWRの場合はこの再循環流量制御により、ランプ状の出力変化指令に対し30%/分程度という非常にすぐれた応答特性が得られる点が大きな特長で、他の形式の原子炉には例をみない。また火力プラントの数パーセント/分程度をもはるかに凌駕(りょうが)するものである。

3. MGセットを構成する各機器の特長

3.1 MGセットの構成機器

MGセットの構成機器は誘導電動機、流体継手と交流発電機、交流励磁機、整流装置、自動電圧調整器(AVR)、速度計発電機さらに図2に示した流量制御装置、また流体継手その他の補機としての油ポンプセットと油冷却器セットとからなる。

またMGセットの出力を公称するときには駆動電動機の馬力にて表示することが多く、たとえば中国電力株式会社島根原子力発電所1号機(以下島根1号機と略す)のMGセットは公称3,500HPとなる。図3は同機の工場試験中の外観写真である。

3.2 交流発電機

発電機は運転速度範囲が100~20%と広く、そのため一次危険速

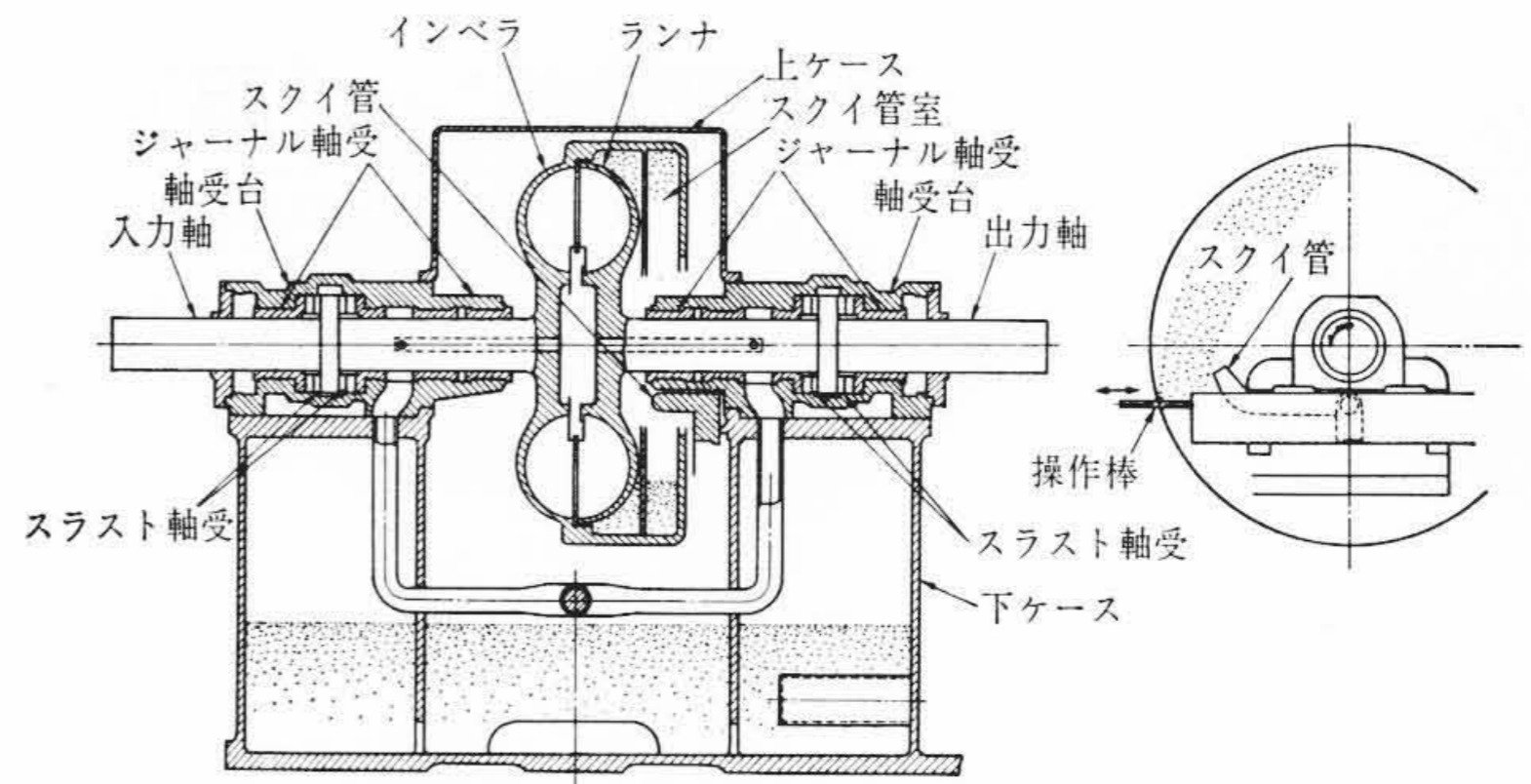


図4 流体継手の構造

度を定格回転数より上に置き、また低速度時における電機子、界磁巻線の温度上昇に留意した設計となるのが普通で、突極同期発電機が採用されることが多い。開放防滴の通風方式とすることが多いが、大容量機では空気冷却器付きとし、コモンベース中に内蔵することなどもある。

3.3 誘導電動機

誘導電動機は定速回転であり普通のかご形である。ただしMGセットと再循環ポンプおよび電動機は全体として大きな慣性定数をもつことが必要で、これは所内全停時などにも再循環流量が減少して自然循環のみになってしまうまでの時間(コーストダウン時間)を10秒以上にしたいためである。

3.4 流体継手

流体継手は直線放射状の羽根をもった2個の対向羽根車(入力軸をインペラ、出力軸をランナとよぶ)を組合わせ、油を媒体とした流体クラッチであり、両羽根車の回転速度差に基づく遠心作用により油が循環し、油の流れによる運動量の変化からトルクの伝達が行なわれるものである。代表例の構造断面図は図4に示すとおりである。

これらの図中に示されたように出力軸のトルク、回転数を定める油量はインペラとともに回転しているすくい管室の中にそう入されたすくい管の位置のみにより定められ、出力軸の速度は連続無段階に調整可能となる。増速のときにはすくい管を内径側に移動させて油量を増してやればよく、減速のときはその反対となるわけで、過渡的な応答特性を改善するためにはすくい管が油を運び去る能力を増大したり、給油ポンプ(別置が普通)および配管を大きくすることが有効となる。

流体継手は従来、一般産業用としてブロウ用などに用いられ、また火力発電プラントのボイラ給水ポンプ、ボイラファンの速度制御などに広く用いられてきたが(文献(3),(4)),いずれも速度制御範囲は100~70%程度のもので大部分である。再循環ポンプ用のように20%速度までの範囲で使うという例は少なかったし、速度応答特性でもそれほどきびしい要求はないことが多かった。再循環ポンプ用電源MGセットの流体継手は、原子力用ということによる高信頼性の要求に加えて、上記の新しい性能を要求されるため多くの先行試験と解析によって特性確認を行なったがそれについては次章にて述べる。

流体継手の補機としては作動油および軸受油の供給用の油ポンプおよび油冷却器がある。これは普通は発電機および誘導電動機の軸受油供給装置を兼ねており、流体継手中には油ポンプは設置せず、常用1台(交流)予備1台(交流)さらに所内全停時にMGセットが停止するまでの間、軸受油を供給するための非常用(直流)が1台の合計3台のポンプをもつ油ポンプセットを別置として設けるのが原子力用の標準である。なお貯油タンクは流体継手のケーシングが兼用する。

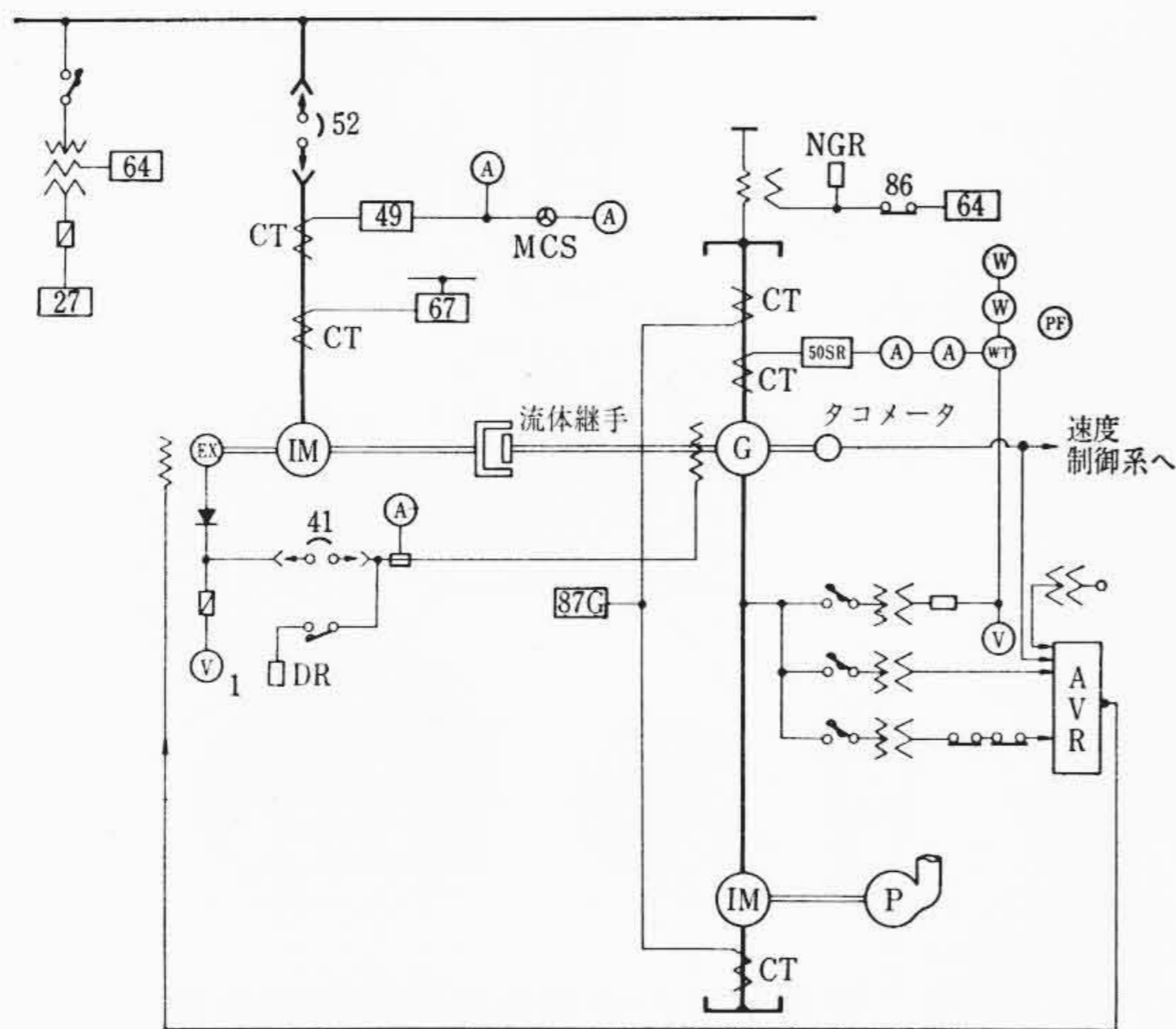


図5 MG セット単線結線図

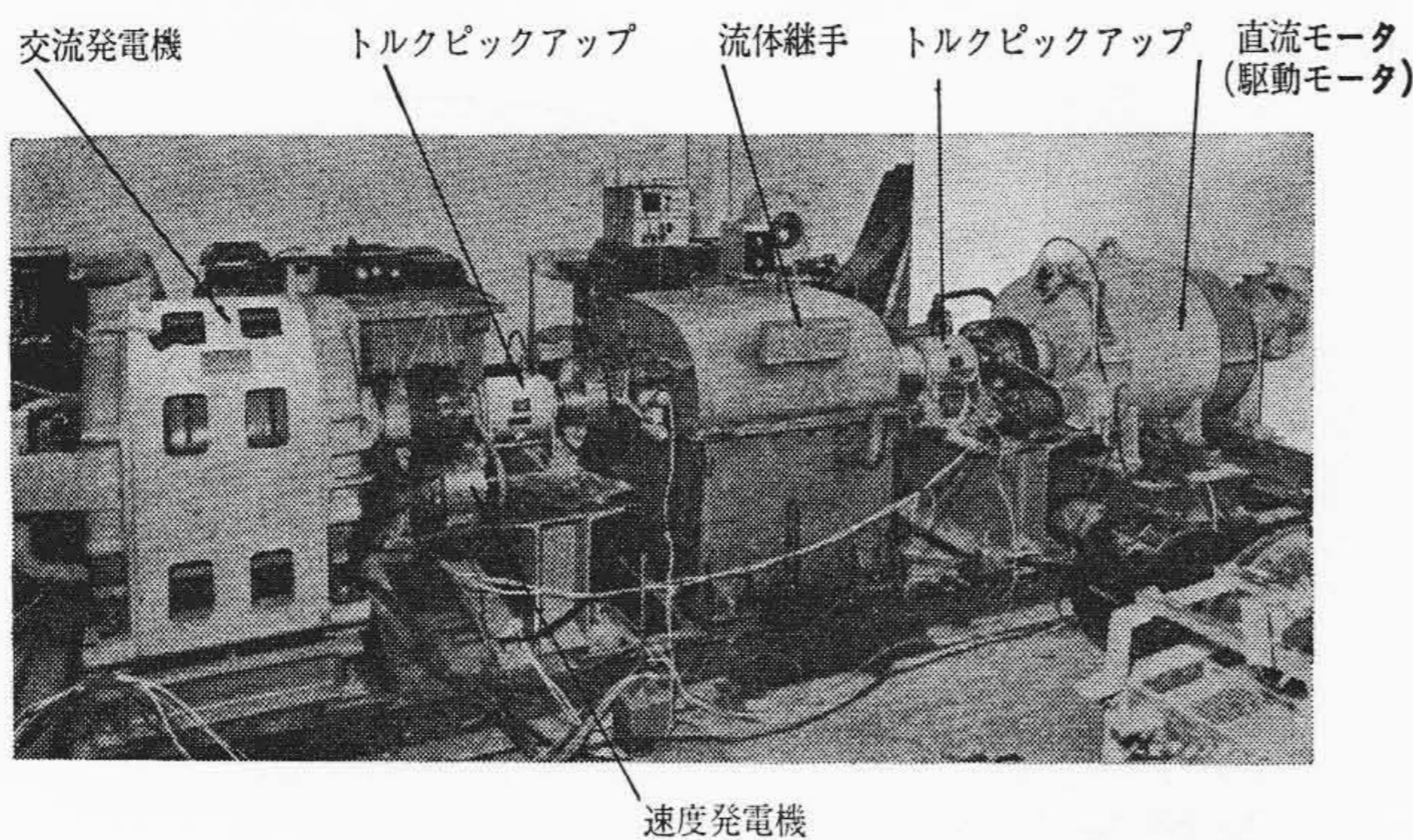


図6 再循環流量制御系第3次モデル実験装置

油冷却器は作動油の温度の異常上昇を防止するためのものであり、流体継手のトルク曲線は油温の変化にわずかしか影響されることが確認されているため、冷却水量調整によるクーラ出口油温一定保持方式は採用されないことのほうが多い。

島根1号機の流体継手は3,500 HPで、インペラおよびランナには特殊鋼鋳鋼を使用し、特に応力の高い内径部にはX線・超音波による探傷を行ない、また機械加工部には磁気探傷を施すなど徹底した品質管理を行なっている。またすくい管室は回転応力および作動油の遠心応力に耐えるよう高張力圧延鋼板の溶接構造としてある。すくい管自身は普通鋼管であるが、作動油による繰返し曲げを考慮して設計製作されている。

3.5 AVR

本発電機は図5にあるように発電機を検出してAVRの入力信号とし、発電機電圧と周波数の比を常に一定値とするよう制御する自励式の励磁方式である。したがって、発電機界磁電流は低周波時も電機子電流ほどには低下しないので、界磁巻線の温度上昇は設計上留意を要するし、またAVRの設計上も自励式のため低速度時が問題になる。

島根1号機ではこの電圧と周波数の比は50であり、工場でのMGセットとAVRの組み合わせ試験において低速度時にも問題がないことが確認された。

3.6 MG セット保護方式

図5の単線結線図および表1に示されているように、MGセットの保護方式は駆動用電動機をトリップする場合と、発電機界磁をもあわせて開く場合とがあり、またすくい管駆動への制御機構の故障もしくは流体継手自身の故障のときに限り、故障の拡大を防ぐためすくい管はその位置でブレーキによりロックする。

表1 MGセットの保護方式

| | | | |
|------------------------------------|-------------------|------------|------------|
| 1. MGセット | 駆動用IMの52をOFFとする事故 | MGセット駆動用IM | 母線接地 |
| | | MGセット駆動用IM | 過電流 |
| | | 母線電圧低 | (限時) |
| | | 潤滑油圧力低 | (限時) |
| | | 潤滑油温異常高 | |
| | | ポンプ入口弁開度 | 90%以下 |
| | | ポンプ出口弁 | 90%開度以下 |
| | | かつ | バイパス弁全開でない |
| | | 原子炉水位低 | |
| 2. 上記52もOFFし、かつACG界磁シャ断器41もOFFする事故 | | ACG | 中性点過電圧 |
| | | ACG | 界磁過電流 |
| | | ACG | 界磁喪失 |
| | | ポンプモータ | ロックドロータ |
| | | ポンプモータ | ACG差電流 |
| | | 起動渋滞 | |
| 3. 同時にFCのすくい管をロックする事故 | | MGセット駆動IM | 母線電圧低 |
| | | 潤滑油圧力低 | |
| | | 潤滑油温 | 異常高 |
| | | 関数発生器 | 出力信号異常 |

表2 モデル試験

| 試験番号 | 試験機器 | おもな内容 |
|------|----------------|--|
| 試験#1 | 4,000 HP MGセット | 低負荷域 速度安定性 低負荷域 静特性 低負荷域 速度応答特性 |
| 試験#2 | 4,000 HP MGセット | 全負荷域 速度安定性 全負荷域 静特性 全負荷域 速度応答性 ポンプ 起動模擬試験 |
| 試験#3 | 40 HP MGセット | 静特性と動特性の関連性 ポンプ起動の解析 |

なお図5において発電機とポンプ用電動機間にシャ断器がないが、これはコストダウン時間保持ということで発電機よりの動力伝達を突然シャ断できないようにするためである。

4. 再循環ポンプ用電源としてのMGセットの特性

4.1 先行試験および解析

島根1号機用MGセットの設計製作に関しては、アメリカなどにおける実績をじゅうぶんに調査した。次いで表2に示すような3次にわたるモデル試験を約1年間にわたって実物大モデル(4,000 HP)と縮小モデル(40 HP)について行ない、特に特性上寄与するところが多くかつ明らかにされていなかった点も多い流体継手の特性解明を完了した。図6は第3次モデルの外観を示したものである。また主として動特性や再循環ポンプの起動特性に焦点をおいて、電子計算機による解析をすすめ、直軸横軸の微分方程式、運動の方程式を時間きざみごとに解く方法により、各機の回転数、トルク、動力その他の過渡値を求めるという解析体系を確立した。

島根1号機用MGセットは以下に述べるような再循環ポンプの電源として要求される各種特性を満たすことを工場試験において確認したあとさらに3ヶ月におよぶロングラン試験を行なってその高い信頼性を確認した。

4.2 静特性

図7は流体継手の出力軸トルクと出力軸回転数とをすくい管位置をパラメータとして描いたもので島根1号機の実測例である。同図の点線は再循環ポンプの所要軸動力をベースにして流体継手軸の出力トルクを各回転数につき求めたもの、すなわち負荷トルク曲線であり、交点が動作点となる。

4.3 動特性(速度応答特性)

流体継手はその動特性が明らかになっていない面が多かったが、

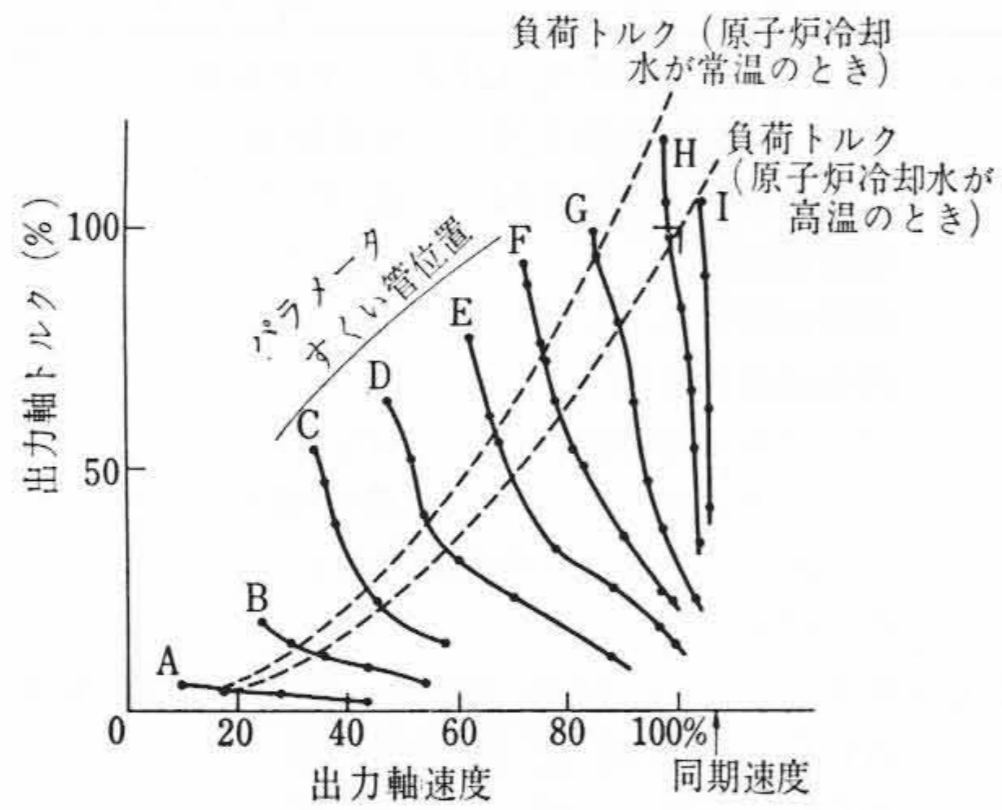
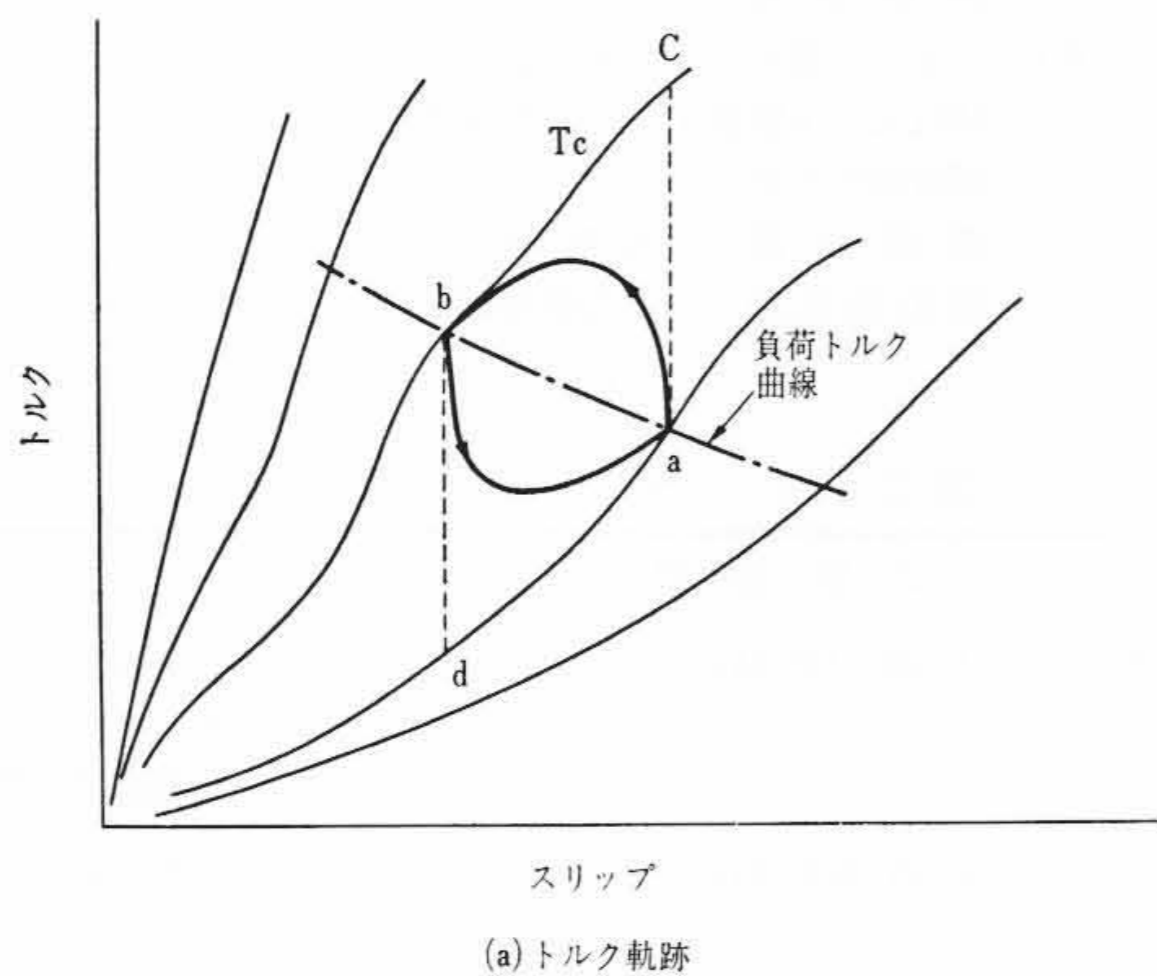
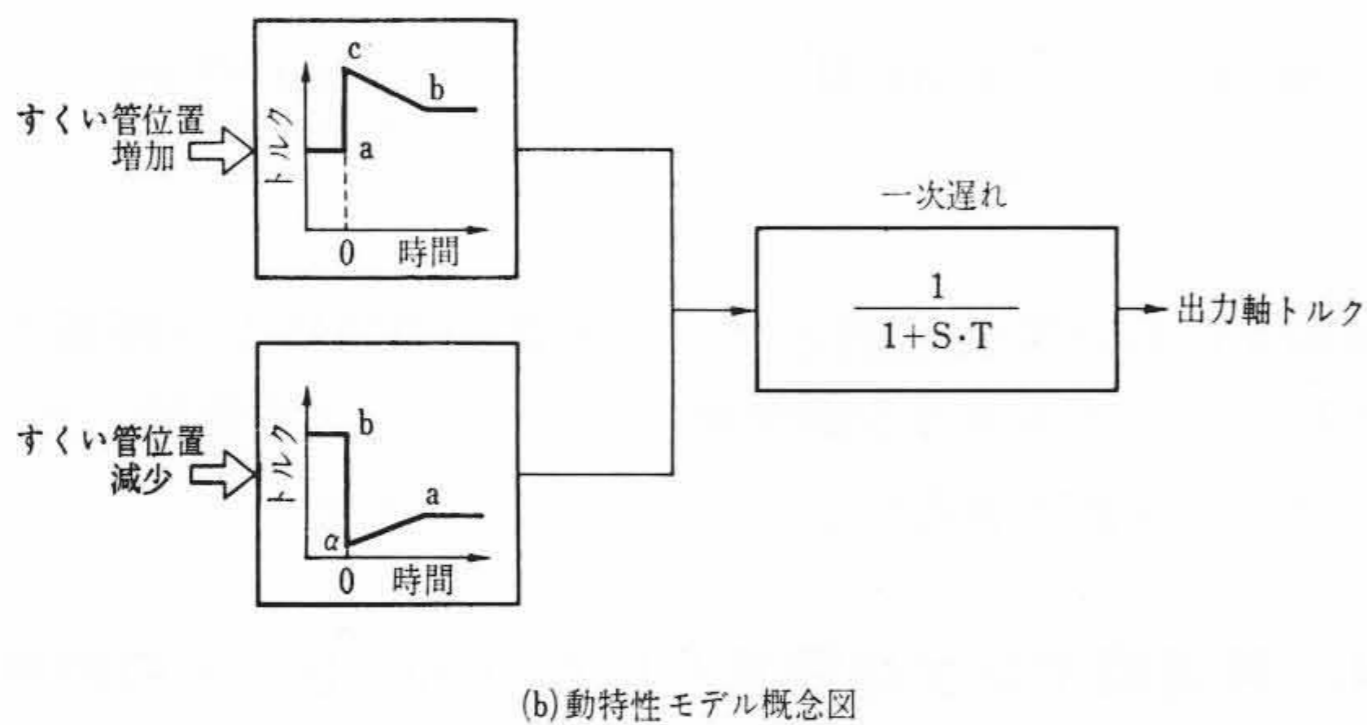


図7 流体継手のトルク速度曲線



(a) トルク軌跡



(b) 動特性モデル概念図

図8 流体継手すくい管変化に対する動特性モデル

たとえばすくい管の位置を急変した場合には図8の点線のように a → c → b または b → d → a のように静特性曲線上を変化するのではなく実線のように変化することが実測されており、したがって流体継手の動特性モデルは図8-(b)のように静特性の曲線と1次遅れの系を組み合わせることにより得られることが判明した。これを用いて図11の解析も行なわれている。また図9において速度変化範囲の広いときには過渡トルクは定格速度時のトルクよりはるかに大きくなることもあり、これは軸の機械設計時などに注意を要する点である。

BWR の出力変化はおおよそ 30%/分程度を目標としているが図1より判明したように 10% の出力変化に対し再循環ポンプの回転数は 14% 程度変化させねばならないのでおおよそ 15秒/10% 出力変化の割合で発電機の回転数を変化することが必要となる。MG セットとしてはこれにじゅうぶんの余裕をみて (数~十秒/10% 出力変化) を目標にして設計製作しており、島根1号機もじゅうぶんにこの目標を達成したことが、工場試験の結果判明している。

なお昇速変化と降速変化を比較すると前者の場合の応答特性は主としてポンプの能力で定まり、後者の場合は主としてすくい管の作動油排出能力で定まるので、後者のほうが時間がかかることが多い。

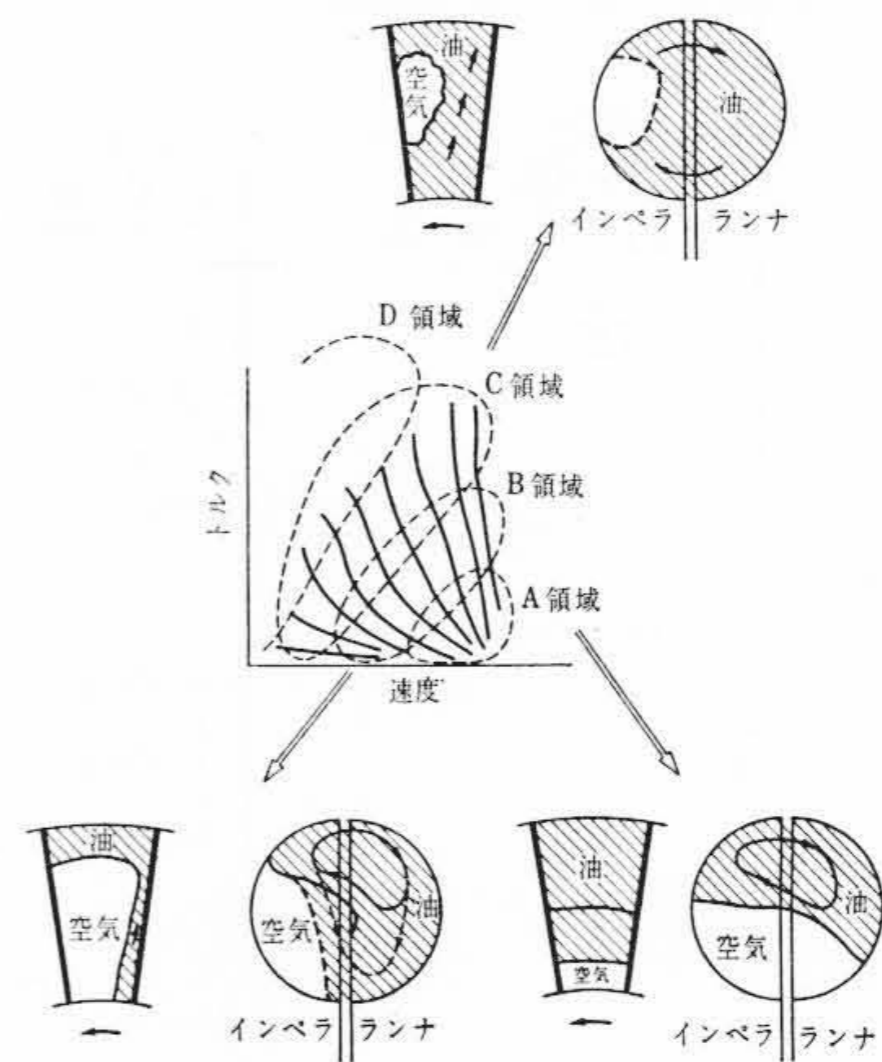


図9 流体継手の安定性と作動油の状態

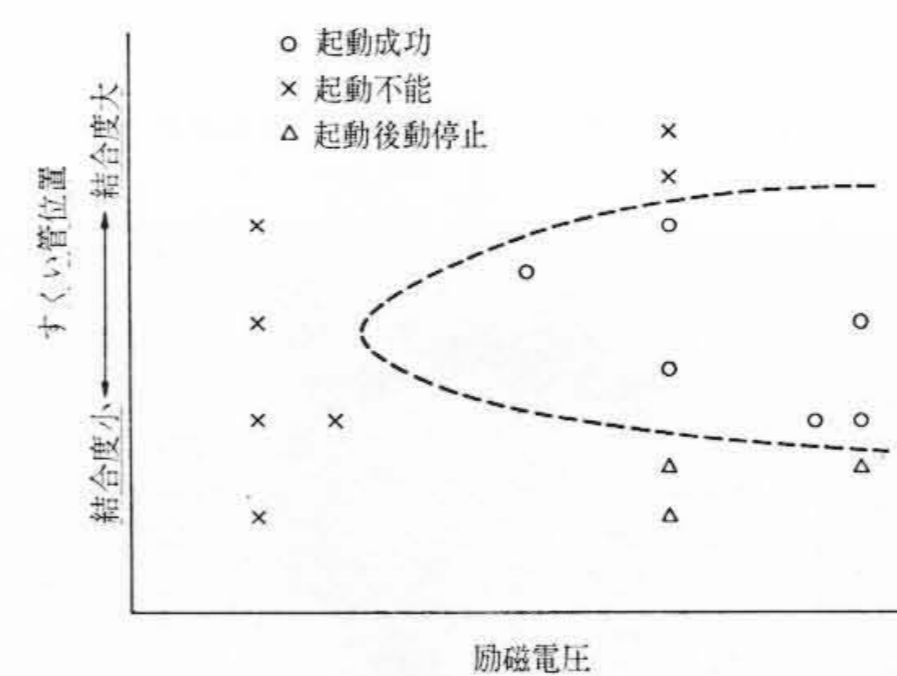


図10 再循環ポンプ起動可能範囲

4.4 速度安定性

流体継手のすくい管を一定に保持しかつ負荷が一定のときにもし発電機回転数が一定値に保持されないとしたら、ポンプの流量が脈動しそれがそのまま炉の中性子束の脈動につながるの好ましくない。したがって流体継手は全運転領域にて速度脈動のないことが必要であるが、図9のD領域はトルク速度曲線のこう配が正となるため本質的な不安定域で運転範囲がこの領域にはいらぬようにすることが肝要である。またC領域はインペラとランナとの速度差が大きくインペラ羽根車によるポンプ作用が大きいため強流形の域であり、一方A領域はインペラ・ランナがほぼ同速度で遠心力差も少なく弱流形の領域である。B領域はその中間で遷移形であり、速度脈動の起りうる領域であるが、島根1号機に対しては羽根車の設計に特に配慮してこの領域が運転領域外になるようにし不安定性のまったくない流体継手とすることができた。

4.5 再循環ポンプの起動

再循環ポンプは立形の遠心ポンプであり、その軸端は炉内の圧力をそのまま受け炉内が 70 kg/cm² 程度の正規圧力であれば軸方向のスラスト力は数十トンにもなることがあり、これが上置のポンプ用電動機のスラストメタルに加わるためその摩擦トルクはポンプ定格の 80~120% 程度の大きなものとなる。このため炉内に圧力が確立した状態(1台がすでに運転していて2台目が追かけるときなど)からポンプを起動するときは次に述べるような特殊な起動方式を採用する。

まずポンプ用電動機が停止しているときこれに電圧を印加して発生する起動トルクは、印加電圧を周波数に比例して低下させてもなお低周波時のほうが大きくなりかつ起動電流も小さくてすむという特性があるため、低周波の電圧をポンプ電動機に印加することが有効である。ただしすくい管による結合度を小さくしておいて励磁を加えてポンプ電動機に電圧を印加したのでは発電機が停止してしまうし、またすくい管による結合度を大きくし過ぎておくと、電動機に

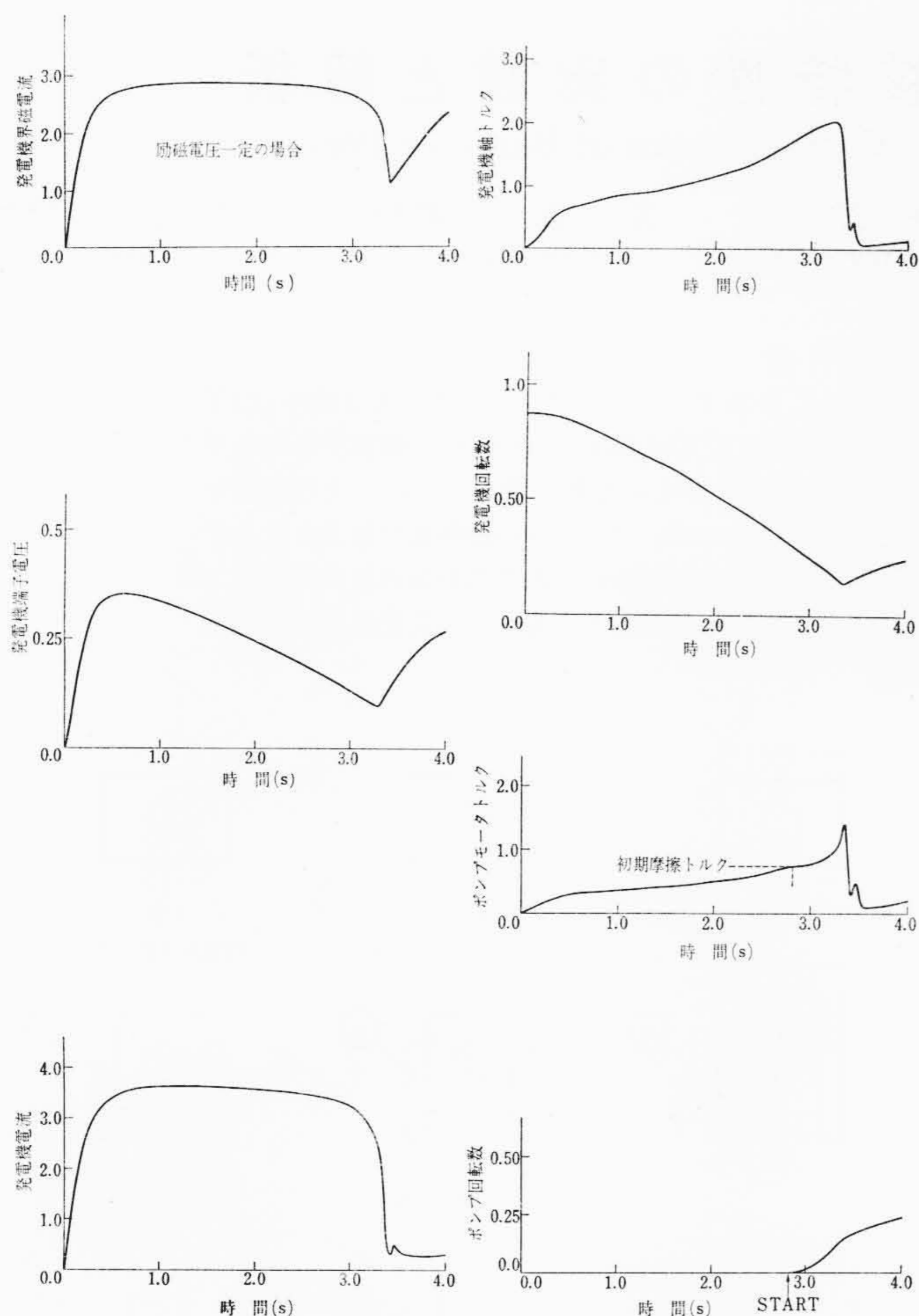


図 11 再循環ポンプの起動

電圧が印加され電流が流れはじめても発電機の手数は所要の周波数になるまで低下せず、ポンプを起動できないことになる。したがって最適なすくい管位置とまた必要な発電機の励磁が存在するはずで、モデル装置につき実測と計算の結果をまとめたのが図 10 である。

また 3,500 HP 級の MG セットにつき起動の過渡状態を計算した結果が図 11 であり、発電機の界磁しゃ断器が投入されてから数秒後にポンプは起動し、そのとき発電機の回転数が定格の 1/4 程度にま

表 3 再循環ポンプの起動

| 起動手順 (図 2 参照) | |
|---------------|--|
| 1. | 手動 |
| 2. | タコメータよりのフィードバックは不動作 |
| 3. | 信号発生器よりの信号によりすくい管は 50% 程度に設定 |
| 4. | フィードバックは関数発生器からのみ |
| 5. | MGセットの IM の 52 を投入 |
| 6. | AUX 電源生きる (AUTO) |
| 7. | ACG の界磁しゃ断器 41 がはいる (AUTO) |
| 8. | 同時にフィードバックはタコメータからに切換える (AUTO) |
| 9. | 同時に信号発生器からの信号は切れ、20% 速度設定となる (AUTO) |
| 10. | ポンプが起動する |
| 11. | ポンプの差圧が 5 PSI 以上あるか否かのチェック(ポンプ起動確認) (AUTO) |
| 12. | EX 電源が AUX. → ACG 自動式に移行 (AUTO) |
| 13. | ポンプバイパス弁閉、出口弁全開 |
| 14. | 昇速 |

で低下するという例が示されている。

これらの結果から島根 1 号機においてはポンプの起動手順は表 3 のように定められた。

5. 結 言

以上に BWR 用再循環ポンプ流量制御と、電源 MG セットの特長を述べた。

流体継手を利用することにより 100% から 20% もの広い速度制御を連続無段階に安定に行なうことができ、所定の速度応答特性を得た。また起動容量の大きいポンプ用電動機を低周波より起動することができる。

中国電力株式会社島根原子力プラント 1 号機用 MG セットは流体継手をも含めてすべて日立製作所製であり、3 次にあたる先行試験および電子計算機による解析の結果設計製作され、工場試験においてもその性能がじゅうぶんに確認された。また長期寿命試験にてもその信頼性が実証された。

最後に本機種の開発にあたりご指導、ご協力をたまわった中国電力株式会社の各位をはじめ、ご協力いただいた関係者各位に対し深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 柏原、滝：日立評論 53, 535 (昭 46-6)
- (2) 江幡：“原子力発電プラントの出力制御—BWR—” 原子力工業 Vol. 14, No. 12, p. 51~55
- (3) 関：“ボイラ給水ポンプ用流体継手” 火力発電 Vol. 17, No. 12 p, 1,008~1,014
- (4) 畑：日立評論 47, 1239 (昭 40-7)