

電源開発株式会社沼原発電所用

250MVA/250MW 発電電動機

250MVA/250MW Generator/Motors for Numappara Power Station of Electric Power Development Co., Ltd.

With a record making unit capacity of 250 MVA, 375 rpm these generator/ motors are in satisfactory commercial operation at the Numappara Power Station. They feature the use of a large size thrust bearing with extremely large peripheral speed and load as well as the adoption of long shaft construction meeting high operating speed. This construction has been made possible after solving various problems concerning vibration, ventilation, starting method, etc. which are non-existent in the conventional types. This article deals with these problems from the standpoint of design and manufacturing. Some of the test results are also given.

田高稔康* Toshiyasu Takô
谷越敏彦** Toshihiko Tanikoshi
実松俊弘** Toshihiro Sanematsu

1 緒 言

電源開発株式会社沼原発電所(以下、沼原発電所と略す)は、近年の大容量火力、原子力発電所の開発に伴って、首都圏への電力供給、特にピーク供給力および瞬時予備力を確保するために建設された最大出力675MWの発電所であり、発電電動機は単機容量250MVA、375rpmという記録的な高速大容量機3台より成っている。本発電電動機の完成に至るまでには多くの試作研究、検討を重ね慎重に設計製作した結果、工場における回転試験も良好な成績を収めることができ、現地においても1号機が昭和48年6月30日、2号機が同7月30日に営業運転を開始した。また3号機も48年11月末には営業運転が開始される予定である。

2 発電電動機の概要

表1は沼原発電所の発電電動機のおもな仕様を示すものである。また図1は揚水発電電動機の推移を発電機の出力と回転速度の積で表示したものである。一般に(出力)×(回転速度)の大小は、発電機製作の技術的困難度を示すものと考えられ、これにより本発電電動機の占める位置を知ることができるであろう。

また推力軸受は荷重、平均周速ともに非常に大きな大形高速軸受となっており、本機の特徴の中でも特筆すべきものである。その占める位置は図2に示すとおりである。また高速機であるために軸長の大きい機械となっており、このために振動、通風など、従来の機械になかった問題についての考慮

表1 発電電動機の仕様 単機容量が250MVA/250MWで、16極という小極数の高速機であるのが特徴である。

Table 1 Specification of Generator/Motors

項 目	仕 様
形 式	立て軸回転界磁準かさ形 強制通風閉鎖風道循環形
出 力	250MVA/250MW
回 転 速 度	375rpm
極 数	16
周 波 数	50Hz
電 圧	16.5kV
電 流	8,750/8,965A
力 率	0.95(遅れ)/1.0
短 絡 比	0.9 (JECマージン付) (発電機にて)
G D ²	6,500 t-m ²
無 拘 束 速 度	140 %
最大速度変動率	40 %
推力軸受荷重	1,207 t
絶 縁 種 別	B
励 磁 機	サイリスタ
始 動 方 式	1, 3号機 直結誘導電動機始動 2号機 同期始動

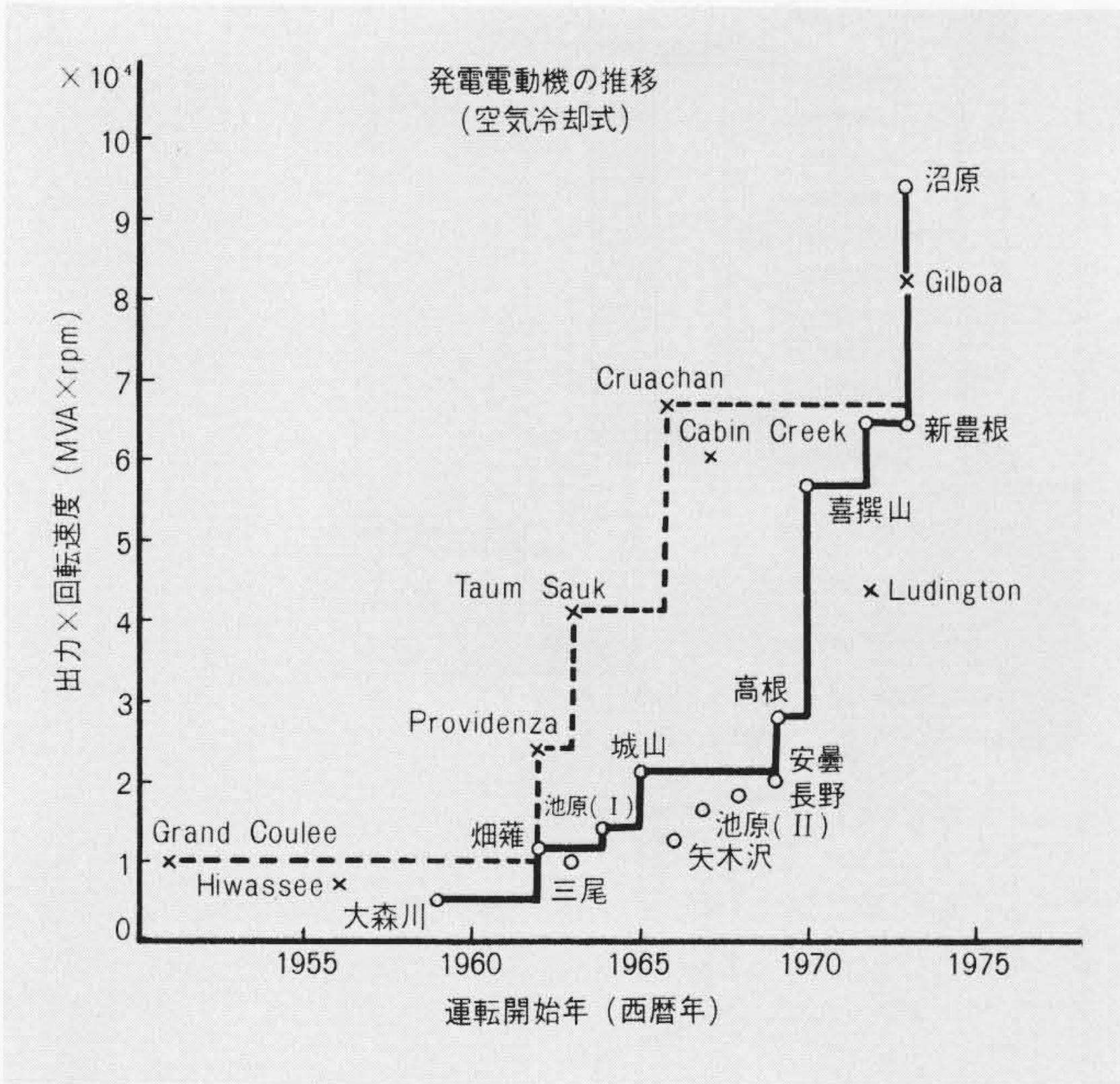


図1 発電電動機の推移 出力×回転速度の大小は発電機製作の技術的困難度を示す。

Fig. 1 Tendency of Generator/Motor Output and Speed

* 電源開発株式会社 ** 日立製作所日立工場

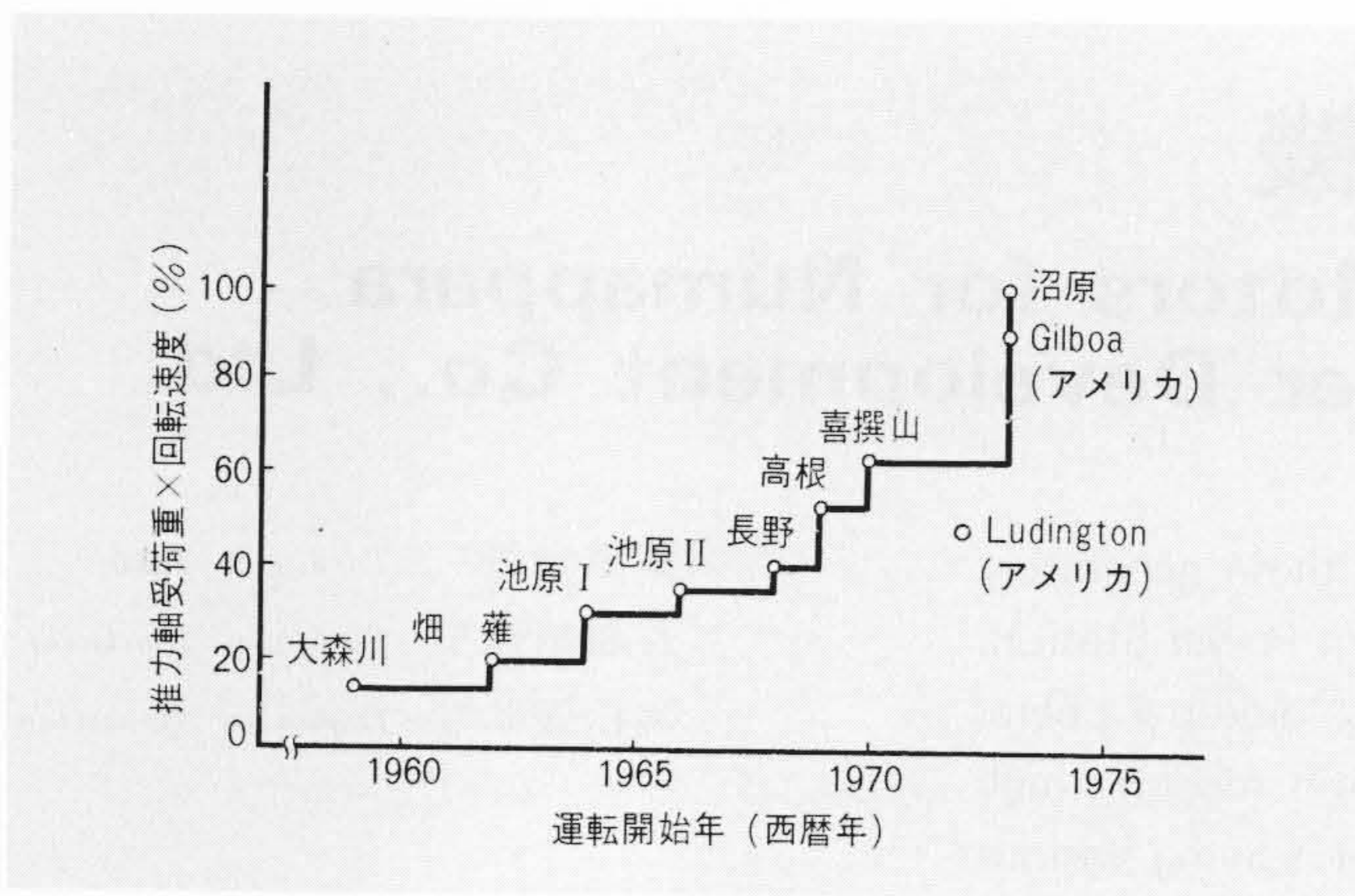


図2 推力軸受の推移 推力軸受の大形化の傾向を示す。

Fig. 2 Tendency of Thrust Bearing

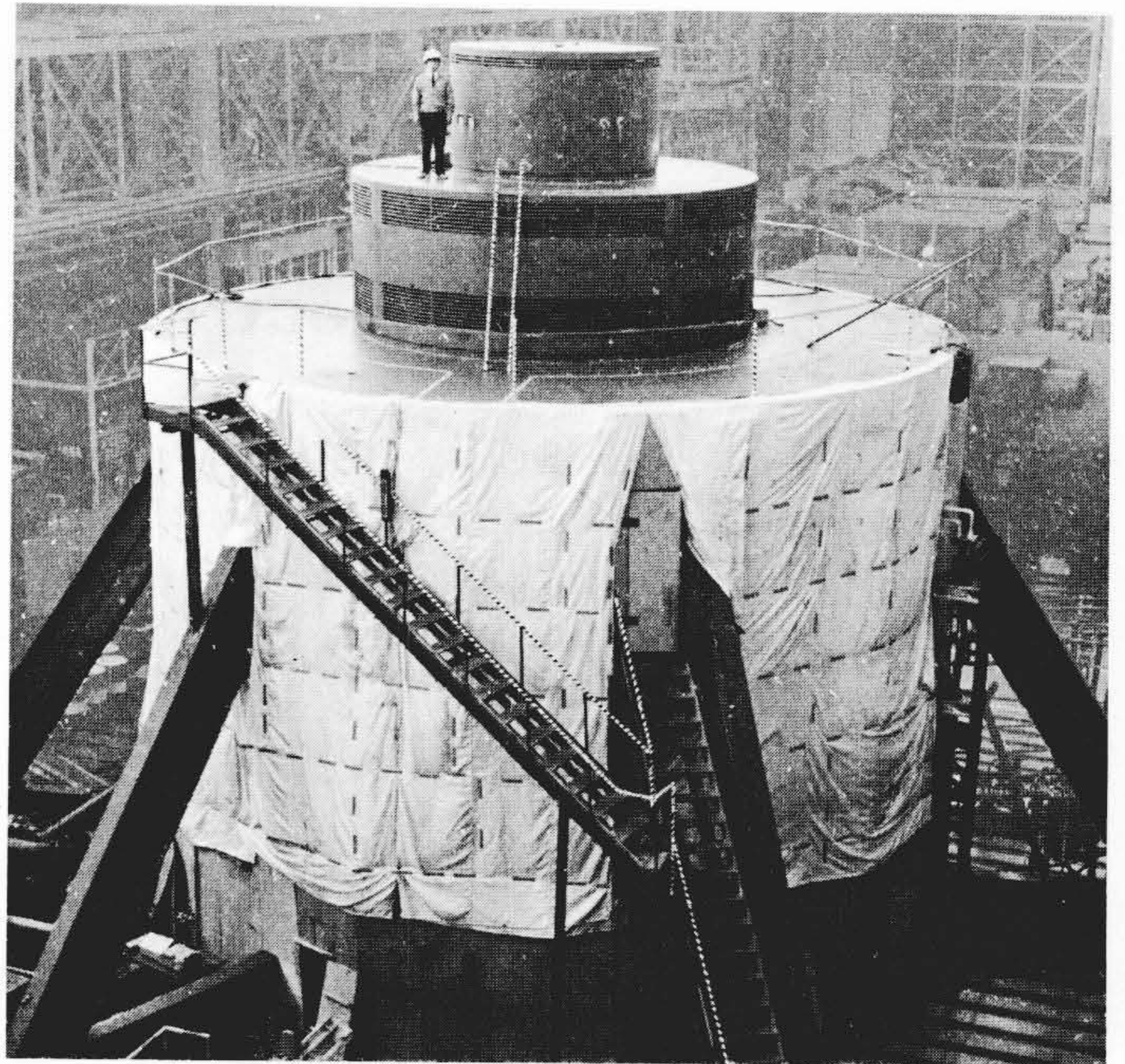


図4 工場回転試験時の発電電動機 本機は現地で最終的に取り付けるべき上部ブラケットの防振スーの代わりに、工場試験では、三角状の鉄製補強を取り付けて運転した。

Fig. 4 Generator/Motor Under Shop Testing

を払わなければならなかった。図3は発電電動機の全体構造図、図4は工場回転試験時の発電電動機の外観を示すものである。

3 設計製作上考慮した事項

3.1 推力軸受

実機の設計に先だち、軸受試験機でモデルシュウの実験を行ない、油膜厚さ、温度、圧力など各種特性を測定し、シュウの形状、員数、配置などを検討した。軸受の支持方式はピボットスプリング方式とし、板状ばねでシュウを2点支持してシュウの径方向熱変形が圧力変形で補償されるようにしている。またばねに所要のたわみを与えて、シュウどおしの荷重分担の均一化を図った。また軸受の冷却効果を高めるため、冷却方式はセルフポンプにより温油を外部に設けたオイルクーラに導き、オイルクーラからの冷油をシュウ間に直接送入する構造とした。また本機は高速でベアリングランナの周速が大きいので、油槽(そう)の設計には特に慎重を期しセルフポンプの冷却系統も含めた軸受油槽の油流モデルを製作して、冷却効果、油流の検討を行なっている。特にセルフポンプに関しては、吐出圧—流量、吐出圧—回転速度、流量—回転速度など各種のデータを実測し設計計算との照合を行なった。

3.2 振動

高速機であるために、振動には十分留意し、危険速度の検討のみならずポンプ水車側からの過渡的な衝撃力や、衝撃モーメント⁽¹⁾に対する応答についても電子計算機による精密な解析を行ない、さらに上下方向の振動についても十分検討のうえ回転部の剛性、支持部の剛性を決定した。振動計算の例は図5、6(水車側からの衝撃力に対する各部の応答)に示すとおりである。

特に(1)上部ブラケットと基礎との間には金属圧縮ばねから成る防振スーをそう入し、(2)下部ブラケットには断面が三角形の「Δ(デルタ)リング形ブラケット」を初めて採用し、強度、剛性の改善を図った。「Δリング形ブラケット」の採用にあたっては、プラスチックおよび鉄製の縮小モデルを製作

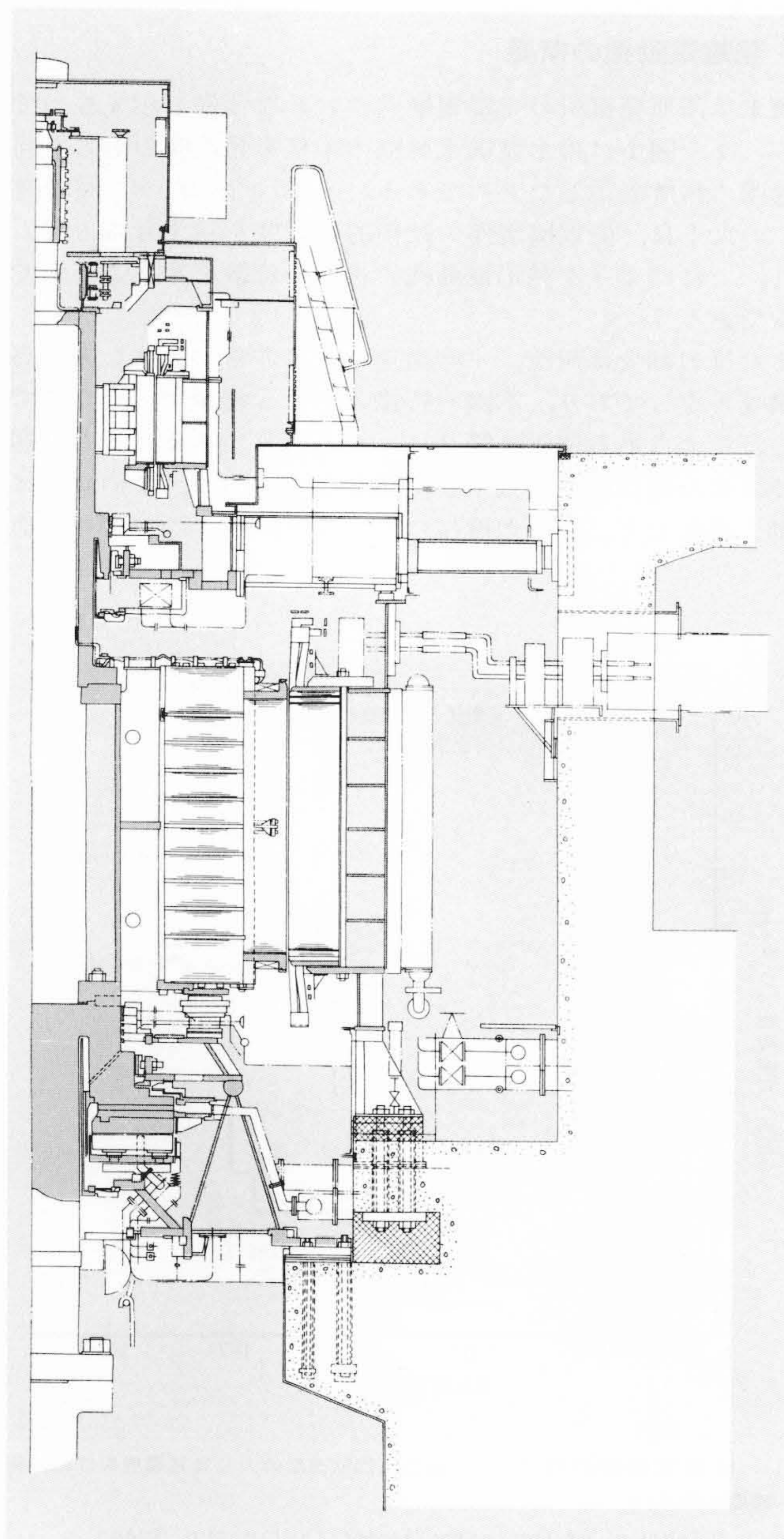


図3 発電電動機の全体構造図 発電電動機の上部和下部に案内軸受を有する準かさ形構造である。

Fig. 3 Construction of Generator/Motor

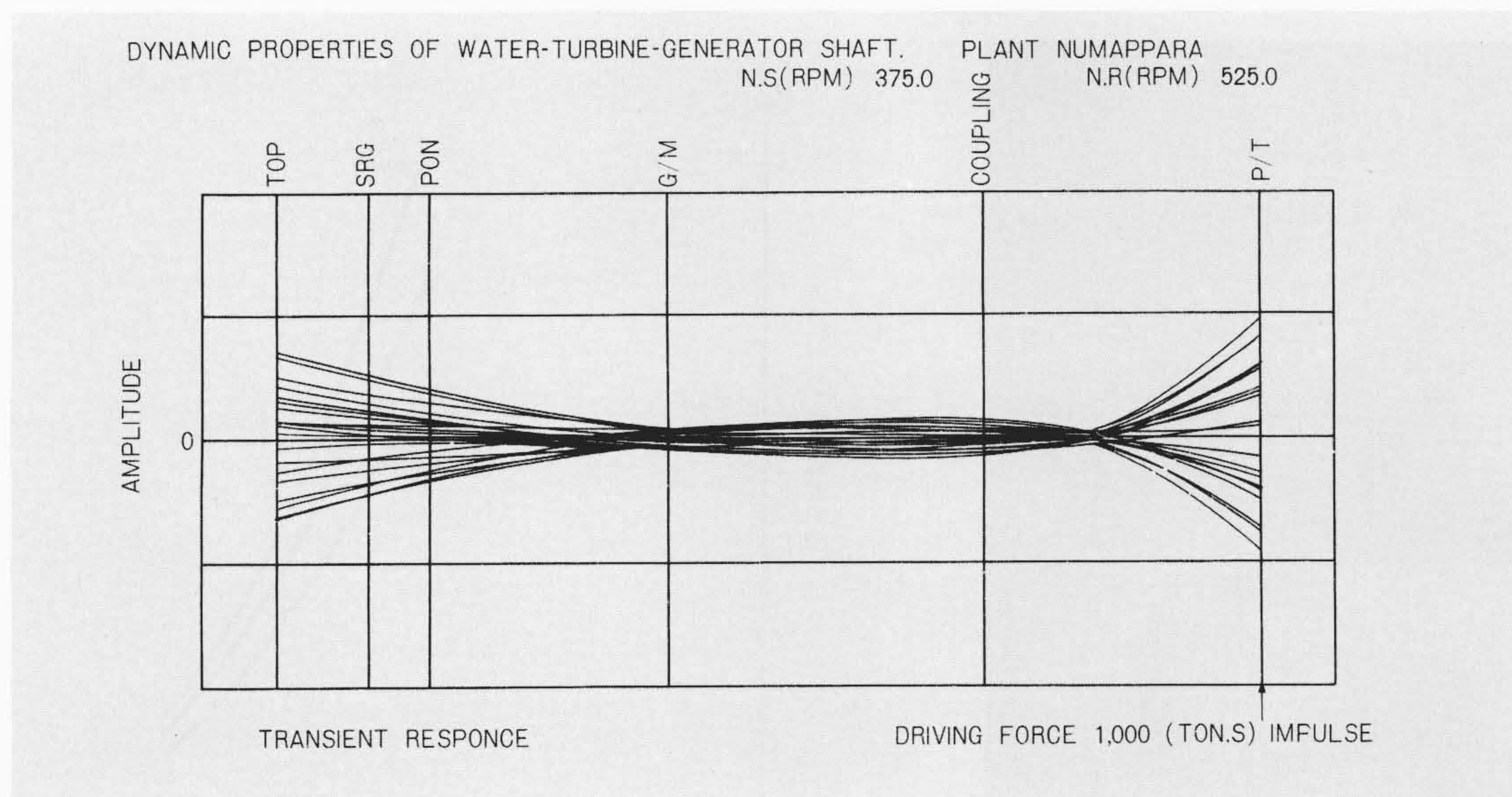


図5 水車側からの衝撃力に対する軸系の振動応答(1) 水車ランナ部に衝撃力が加わったときの軸系の振動モードを示す。

Fig. 5 Vibration mode Due to Impulse Force at Pump/Turbine Runner

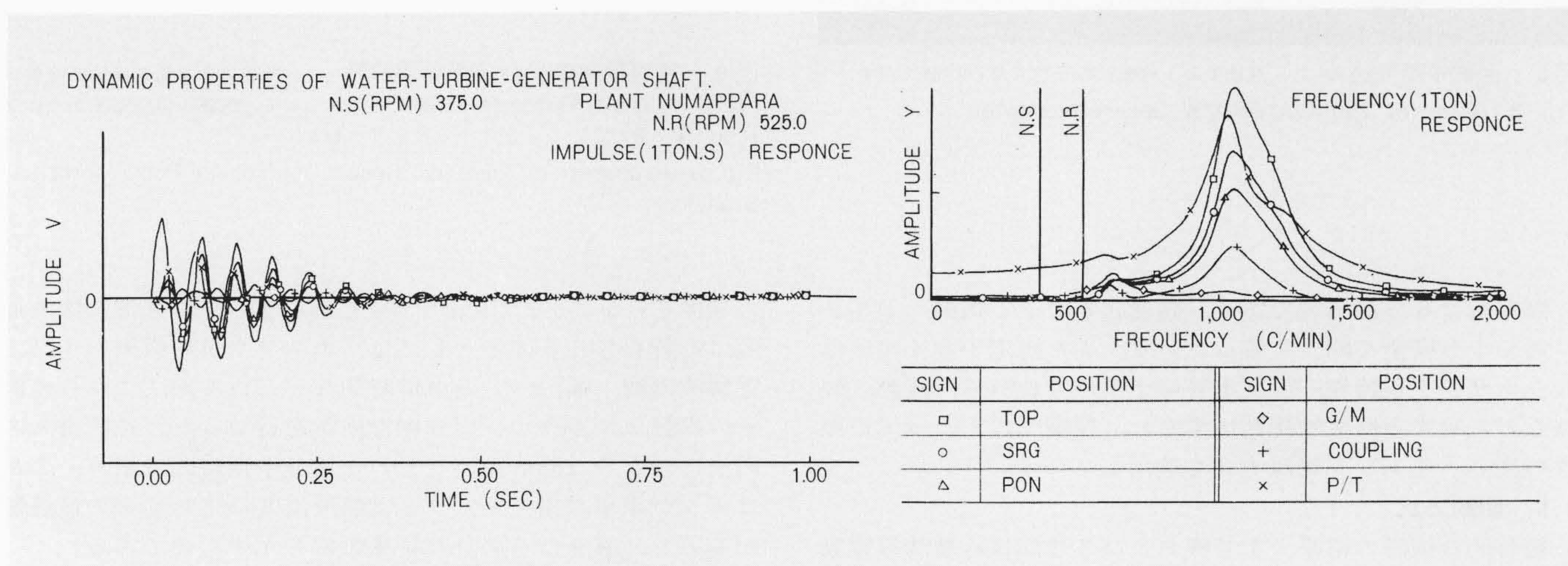


図6 水車側からの衝撃力に対する軸系の振動応答(2) 発電電動機軸系各部の振幅-時間特性、周波数応答を示す。

Fig. 6 Damping Characteristics and Frequency Response of Various Parts of Shaft System

して荷重試験を行ない、強度、剛性の確認をしている。図7は実機の「△リング形ブラケット」完成品である。

3.3 通風冷却および温度上昇

高速機であるために径が小さく軸長が大であり、損失に見合う極間通風面積が取りにくい。この点を解決するため、実機の1/3縮尺の水流モデルを製作して通風特性の検討を行なったが、本機のような高速機では従来の回転子につけた自冷ファンだけでは必要通風量を確保することはできないことがわかり、この結果より強制通風ファンの仕様を決定した。また温度上昇については上記の通風を十分考慮して、詳細な検討を行ない万全を期した。

3.4 回転子その他

ロータリムには高抗張力鋼から成るセグメントリムを採用し、無拘束速度や負荷しゃ断時の過速度に対しても十分安全なものとした。また磁極はコイルを高速回転による強大な遠心力に耐える安全なものとするため、傾斜面を有する鉄心で構成し、コイルにかかる遠心力の周方向成分を理論的にゼロとした。図8は現地における回転子つり込みの状態を示すものである。

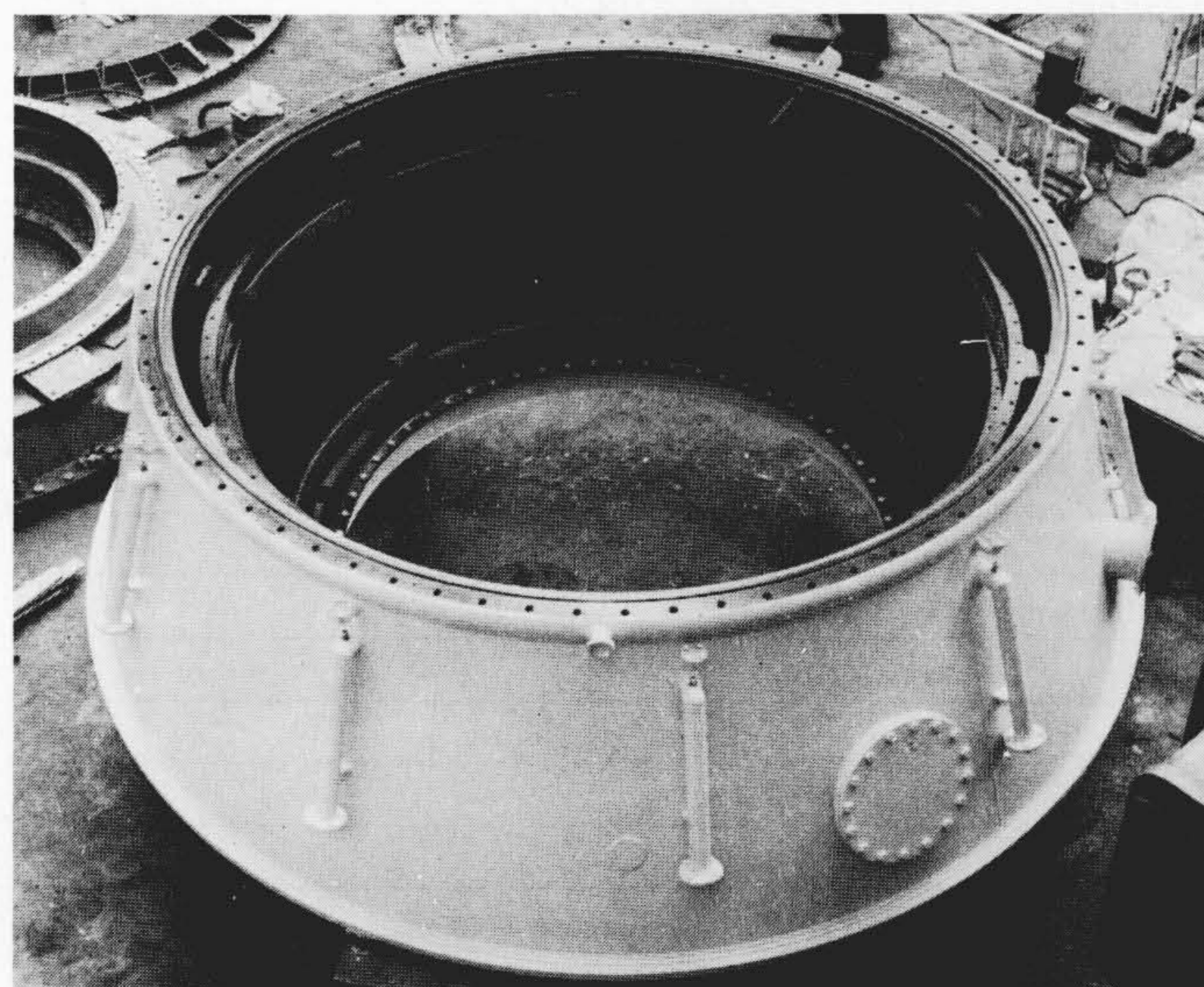


図7 「△リング形スラストブラケット」 高速機に必要な剛性と強度を持ち、軸受の冷却に必要な油量を確保できる新形ブラケットである。

Fig. 7 “△-Ring” Thrust Bracket

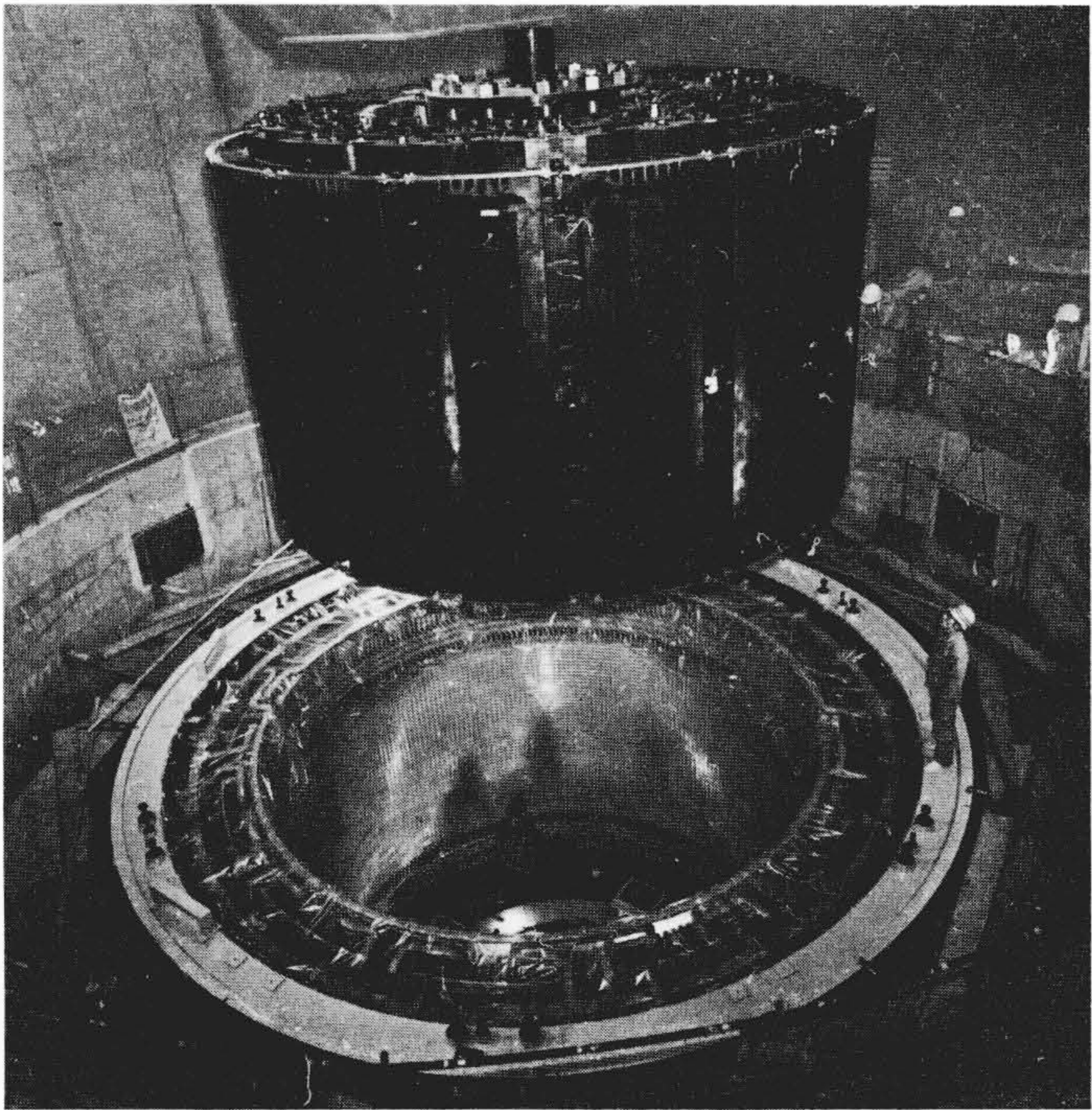


図8 回転子つり込み 現地での1号機回転子つり込み状態を示す。
Fig. 8 Rotor of 250MVA/250MW Generator /Motor

固定子は6分割構造であり、高速回転による振動、トルクに対し十分安全な剛性を持っている。また固定子コイルにはヒートサイクル特性、温度上昇による熱劣化特性、振動、短絡などに対する機械的特性にすぐれ、長期間にわたって信頼性の高いハイレジン絶縁方式を適用している。

3.5 始動方式

総合的な検討の結果、1号機および3号機は直結誘導電動機始動方式、2号機は1号機または3号機を発電機として用いた同期始動方式とした。

始動用誘導電動機の仕様は表2に示すとおりである。誘導電動機の同期速度は発電電動機の定格速度 375rpmより高い 429rpmとしたが、この方式の成否は系統併入時に誘導電動機

表2 始動用誘導電動機仕様 発電電動機が16極であるのに対して、誘導電動機は14極となっている。

Table 2 Specification of Pony Motors

項 目	仕 様
出 力	17,600kW
同 期 速 度	429 rpm
定 格 速 度	375 rpm
極 数	14
電 圧	6 kV
電 流	2,200 A
定 格	15分
加 速 時 間	6.5 分
冷 却 方 式	開放自冷形
制 御 定 数	主機励磁印加速度 0.95p.u.
	揃速準備開始速度 0.99p.u.
	揃速準備後の液体抵抗制御放置時間 0 s

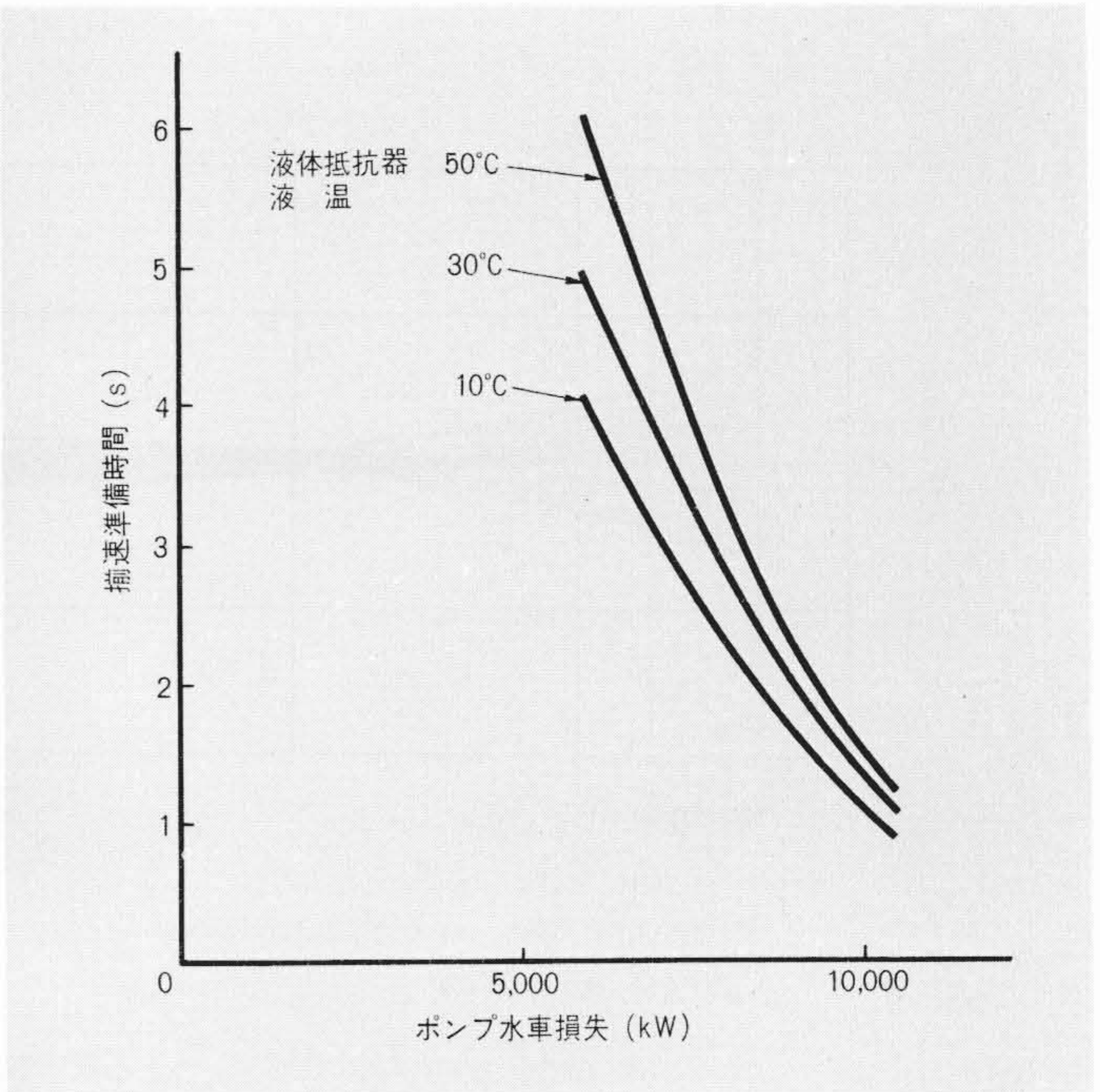


図9 誘導電動機始動揃速準備時間 揃速に入る前の段階で液体抵抗器の抵抗値をある時間だけ一定速度で大きくして、揃速にはいつてからの抵抗値の操作量を小さくしようとするものである。

Fig. 9 Preparation Time for Speed Control in Pony Motor Start

の速度をいかにうまく制御するかにかかっている⁽²⁾。電動機の速度に影響を与える因子としては、ポンプ水車の損失トルク、電解液温度、揃(せん)速準備時間などがあるが、これらの因子の影響につき一つ一つ詳細な検討を行なった。系統併入を円滑に行なうために重要なものが揃速準備時間であり、これはポンプ水車の損失トルクと電解液温度に応じてその最適値が変わる。図9はその計算結果の例を示すものである。

また同期始動については東京電力株式会社水殿発電所などにおける実績があるが、これらは比較的落差差ポンプ水車⁽³⁾であったために、水車の発生するトルクの速度に対する特性が平坦(たん)であって、加速途中の案内羽根開度も一定としてよく、制御が比較的容易であったが、沼原発電所の場合は

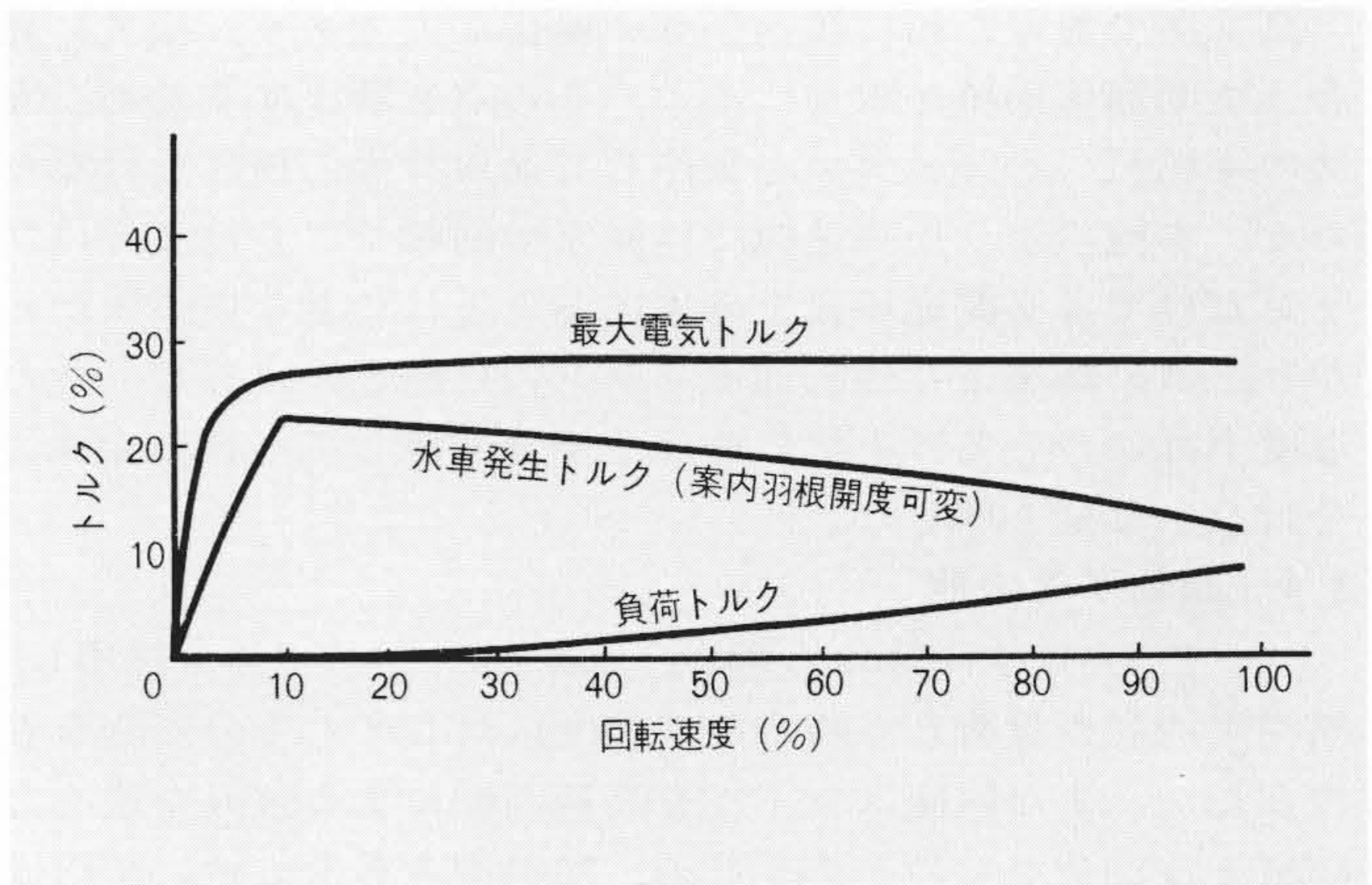


図10 同期始動トルク特性 同期始動が可能なるためには、最大電気トルクと損失トルクの間に水車発生トルクがくるように案内羽根の開度を制御しなければならない。

Fig. 10 Torque Characteristic Curves for Synchronous Starting

落差が大きく、速度に対する水車トルクの変化が非常に大きい
ために、案内羽根の開度を加速途中でも変える方式を採用
した。この場合、水車のトルクは落差によって変化すること
を考え、全運転条件での落差変動をすべてカバーできるように
案内羽根の制御を行なった。図10は、水車トルク、発電機
トルクおよび損失トルクの関係の一例を示すものである。

4 試験結果と検討

工場および現地での試験結果をまとめて示したのが表3で
ある。

4.1 推力軸受

推力軸受は前述のように、これまでに前例のない高速大荷
重軸受であるが、結果は表3に示すようにきわめて良好であ
る。また通常の温度試験のほかに始動から定格運転、負荷し
ゃ断、入力しゅ断、停止に至るまでの軸受の詳細な挙動を実
測して、過酷な運転にも十分耐えうる良好な軸受であることを
実際に確認した。

発電電動機をオイルリフトの油圧確立を条件にして始動し、
定格速度に達した後15分でオイルリフトを停止している。こ
れは定格速度に到達後10~15分で軸受の温度、油膜厚さなど
が一定値に落ち着くという試験結果でその妥当性が裏付けら
れた。また発電電動機停止時には停止操作し95%速度になっ
たとき、オイルリフト運転を開始し停止確認後1分でオイル
リフトを停止している。これも減速中にオイルリフトが動作
していれば軸受の状態が主機停止直後にはほとんど旧の状態
に復するという試験結果で、その妥当性が裏付けられている。
したがって、停止後の再始動までの時間についても、オイル

表3 発電電動機の試験結果 工場および現地での試験結果を示す。

Table 3 Test Result of Generator/Motor

試 験 項 目			実 測 値	備 考
界 磁 電 流 (A)		無 負 荷	640	発 電 機 に て
		三 相 短 絡	810	
		定 格 力 率	1,249	
短 絡 比			0.79	
電 圧 変 動 率 (%)		力 率 1.0	22.5	発 電 機 に て
		定 格 力 率	27.8	
リ ア ク タ ン ス (%)		X_d	126.6	発 電 機 容 量 ベ ー ス
		X_d'	29.2	
		X_d''	18.6	
		X_2	17.5	
		X_0	9.4	
温 度	巻 線 (deg)	固 定 子	75	電 動 機 定 格 負 荷 時 発 電 機 定 格 力 率 時
		回 転 子	78.5	
度	軸 受 (° C)	スラストメタル	56	—
		上部ガイドメタル	58	
		下部ガイドメタル	55	
		給 水	18	
振 動		上部ブラケット(μ)	26	—
		下部ブラケット(μ)	23	
		コレクタリング(100mm)	7	
		発 電 機 主 軸(100mm)	8	
		水 車 主 軸(100mm)	9	
始 動 時 間		誘導電動機始動	6.0	—
		同 期 始 動	2.5	
は ず み 車 効 果 (t - m ²)			6,746	—

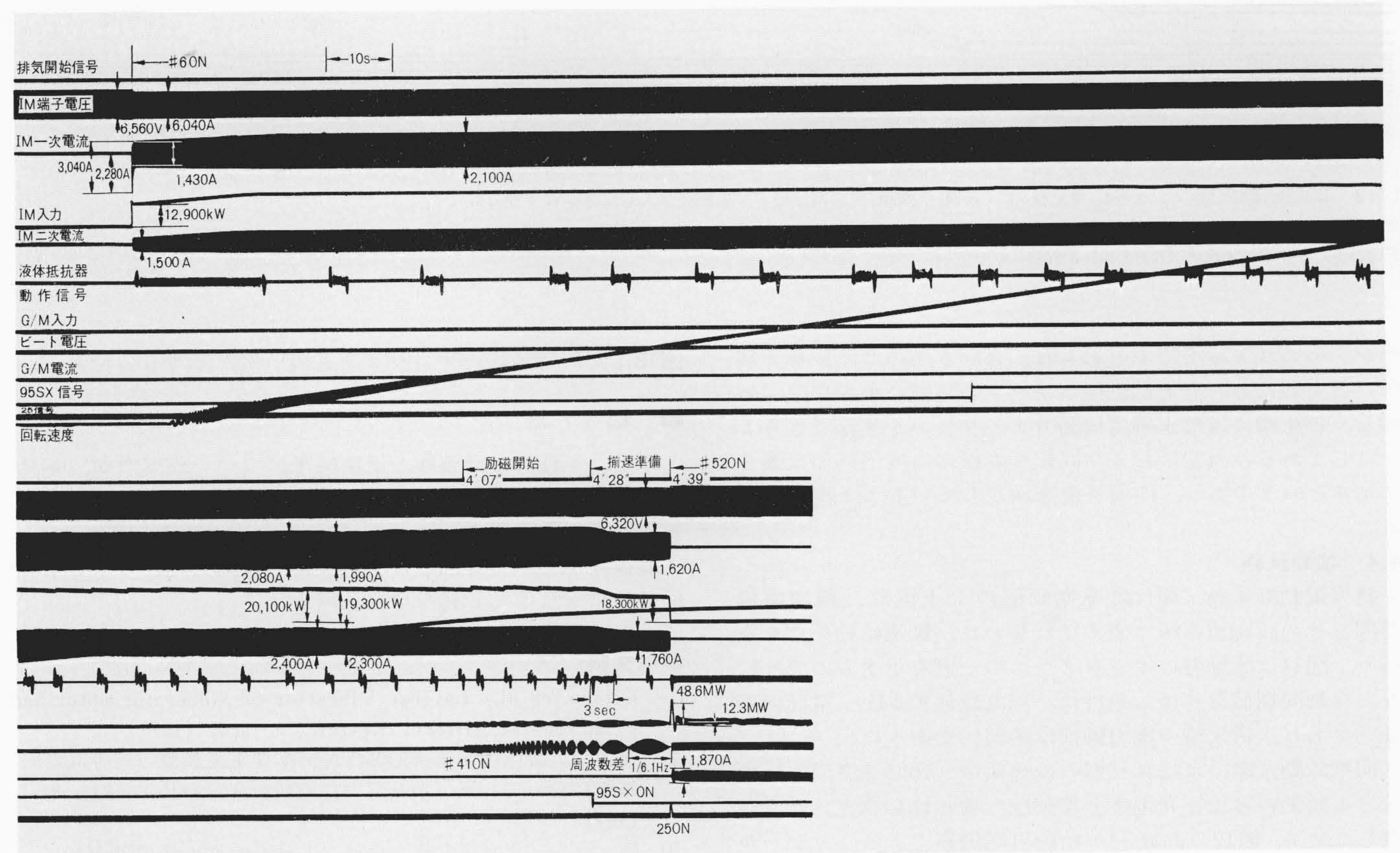


図11 誘導電動機始動試験 1号発電電動機を誘導電動機で始動して、系統併入を行なった例を示す。

Fig. 11 Pony Motor Starting Test

リフトを用いて停止、始動するかぎり、停止直後の再始動も問題ないと考えられる。

4.2 振 動

各部の振動測定結果は表3に示すとおりであり、運転上の問題はない。振動の加振源には回転体の不平衡重量によるもの、磁気不平衡によるものおよびポンプ水車側からの水理的なものなどがあるが、回転体の不平衡重量に対しては入念にバランスをとることにより、この影響は最小限に押えられた。また磁気不平衡に対しては軸受支持系の剛性と関連して案内軸受のギャップを適正に選ぶことにより、案内軸受の温度を高めることなくこの影響を押えることができ、電圧を発生しても振動は増大しないことを確認した。一方、ポンプ水車側からの加振力はその周波数成分も多種多様で不規則であり、水車と発電機の総合系につき検討した。その結果、振動を小さく押えることができ、上部の防振ステー、下部の「Δリングブラケット」の効果を確認することができたと言える。

4.3 通風冷却および温度上昇

本機の冷却用ファンは、発電機の上部および下部にそれぞれ6個配置されており、ファンの電源の結線は上下各1個ず

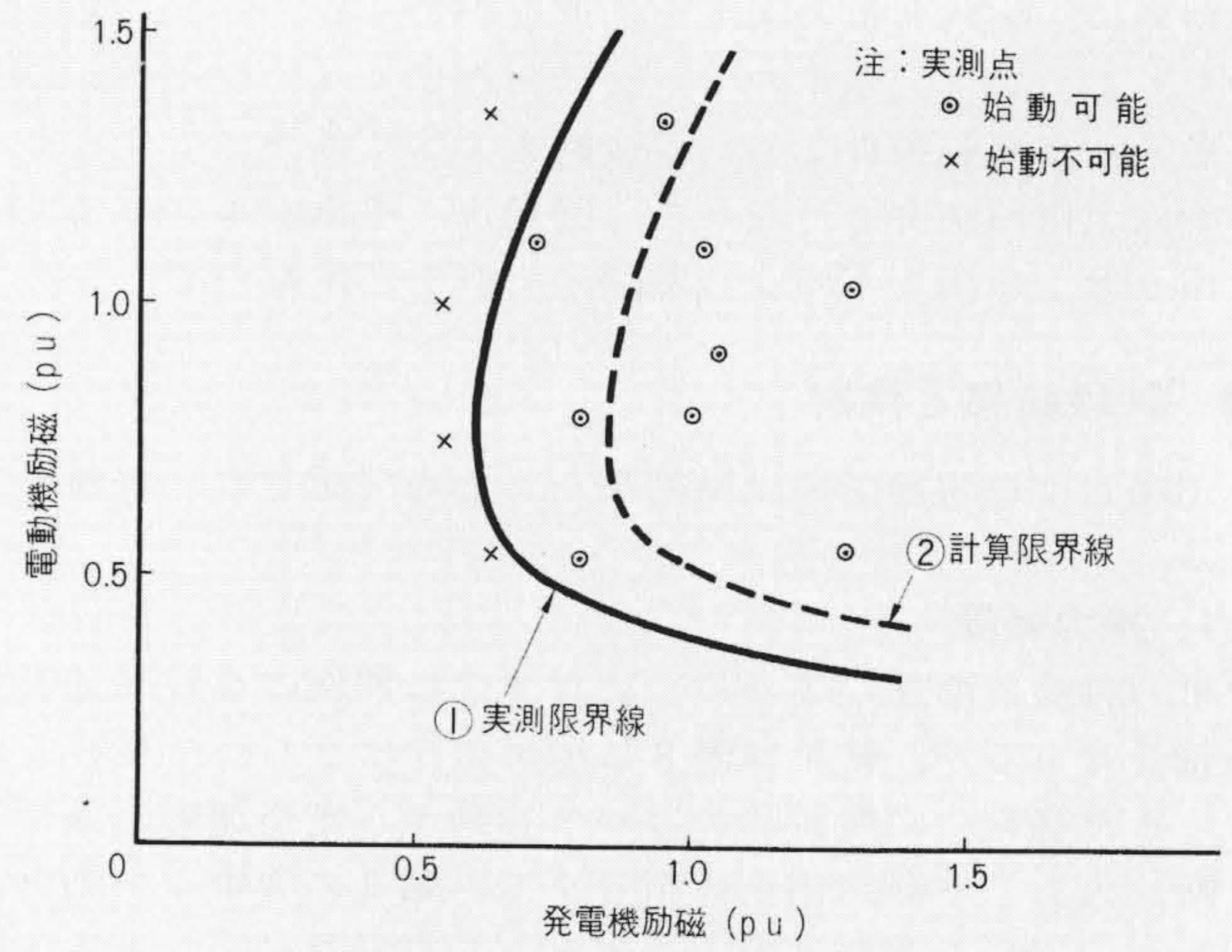


図12 低速領域での始動可非特性 発電機および電動機の励磁量の大きさによって同期始動の可否が決定される。

Fig. 12 Excitation limit of Synchronous Starting

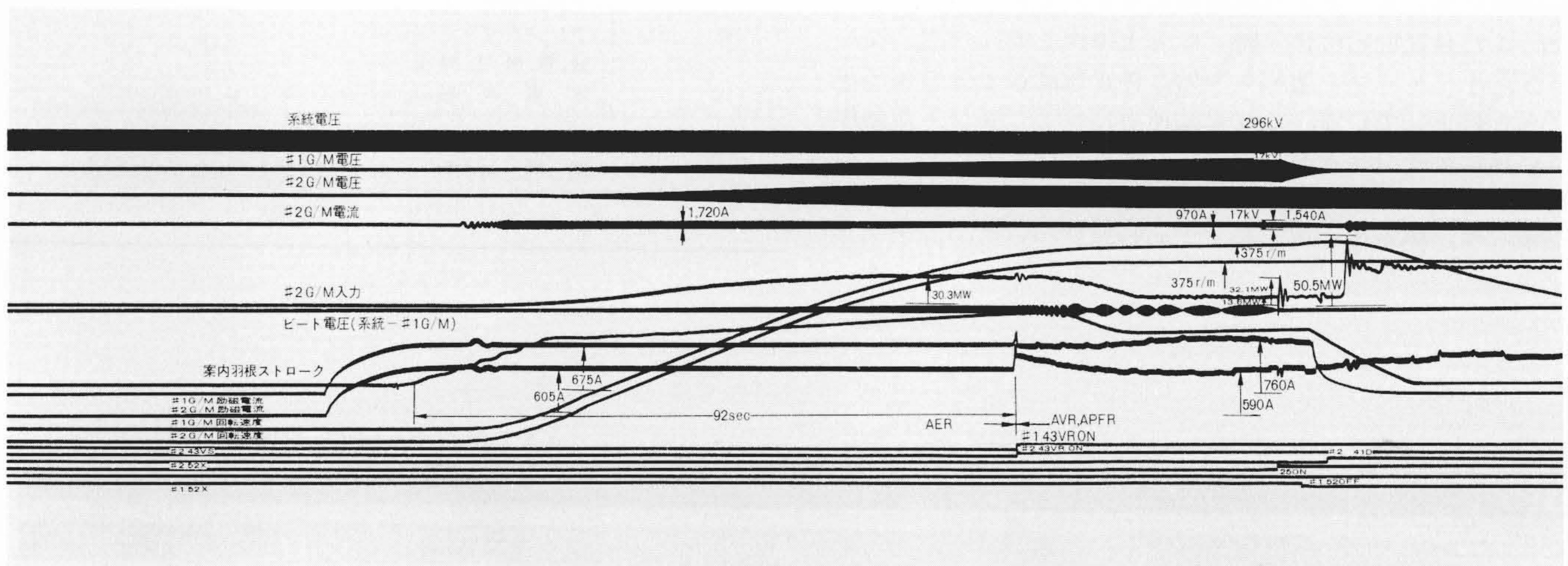


図13 同期始動試験 2号機(電動機)を1号機(発電機)で同期始動し、系統に併入したオシログラムの例を示す。

Fig.13 Synchronous Starting Test

つが一つのスイッチにまとめられ、合計6個のスイッチで制御が行なわれる。発電電動機はファンの運転を条件にして始動し、停止時には停止確認後30分までファンが運転できるようにしてある。固定子および回転子巻線の温度上昇値は表3に示すとおりであり、所要性能を満足していることが確認された。

4.4 始動試験

誘導電動機始動試験は誘導電動機の一次電流、揃速準備時間などの設定値を種々変えて行なわれ、最適始動条件を求めた。図11は始動時のオシログラムの一例を示すものである。なお自動同期装置の併入条件は、周波数偏差 $\frac{1}{4}$ Hz、電圧偏差5%であり、併入時の電力動揺は約25%であった。

同期始動試験では始動初期の低速領域(10%速度以下)における始動の可否を発電機と電動機の励磁比を変化させて測定した結果、図12の曲線①が始動可能限界であることがわかった。同図より始動可能領域は計算値より実測値のほうが拡大されており、計算値で検討しておけば問題ないことがわかる。

図13は同期始動時のオシログラムの一例を示すものである。

5 結 言

以上、本機の設計製作、試験結果について述べたが、本発電所で得られた成果は揚水発電所の発展に一エポックを画するものと考えられる。

最後に本計画に参加され、ご援助、ご協力をいただいた関係各位に対し厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) Kitano, et al.: Lateral Vibration of Generator-motor and Pump-turbine, Hitachi Review 20, 320, (1971)
- (2) 永田:「喜撰山発電所250MVA/MW 発電電動機の誘導電動機始動について」電気学会電力技術研究会資料ET-71-8, (1971)
- (3) 篠, 鈴木:「東京電力株式会社水殿発電所納め65,000kVA/63,000kW 発電電動機同期始動試験」日立評論 55, 326, (昭48-4)