

関西電力株式会社奥多々良木発電所納め

320MVA/314MW 発電電動機

Shop Completion of 320MVA/314MW Generator/ Motors for Okutataragi Power Station, Kansai Electric Power Co.

320 MVA/314 MW generator/motors for delivery to Kansai Electric Power Co. have been completed recently at the Hitachi Works and are undergoing installation at site to become record making high speed large capacity units with Japan’s largest unit capacity. They are designed in a semi-umbrella type provided with a vibration-absorbent stay and “Δ” ring thrust bracket, which allows them to show high rigidity against vibrations. As to the bearings for these unusually large machines Hitachi carried out an extensive research and repeated trial manufacture, and finally succeeded in developing a high speed heavy load thrust bearing. Also, for the sake of complete ventilation the units are provided with forced ventilating fans at their upper and lower parts.

This article introduces these design features and some of the results of factory tests.

谷越 敏彦* Toshihiko Tanikoshi
実松 俊弘* Toshihiro Sanematsu

1 緒 言

火力、原子力発電所の増加に伴って、ピーク機能と追従性のすぐれた揚水発電所の建設が各所で進められているが、関西電力株式会社奥多々良木発電所（以下、奥多々良木発電所と略す）は京阪神圏への電力供給、特にピーク供給力および瞬時予備力を確保するため関西電力株式会社により計画され

た大容量揚水発電所であり、発電電動機は単機容量320MVA、300rpmという記録的な高速大容量機4台より成っている。このうち1号機は昭和48年5月に工場試験を完了し、2号機とともに49年夏の運転開始を目ざして現地据付け中である。

2 発電電動機の概要

発電電動機のおもな仕様は表1に示すとおりである。また図1はわが国の揚水発電電動機の単機容量の推移を示したものであり、年度とともに単機容量が急増している傾向を知ることができる。

奥多々良木発電所発電電動機の最もきわだった特徴は単機容量が320 MVA/314MWという大容量であるにもかかわらず、回転速度が300 rpm と高いために軸長の長い機械となっていることである。これは図2の発電電動機の全体構造図に見られるとおりである。機械全体の配置は上部から(1)始動電動機コレクタリング、(2)発電電動機コレクタリング、(3)始動電動機、(4)上部案内軸受、(5)発電電動機本体、(6)下部案内軸受、(7)推力軸受の順になっており、準かさ形構造である。上部案内軸受と始動電動機の位置関係は、振動に対する詳細な検討結果により決定したものである。

3 設計製作上考慮した事項

3.1 通風冷却および温度上昇

本機は従来の機械に比較して固定子の積厚が大きく、また固定子の内径は小さいため、必要な極間通風面積がとりにくく通風抵抗が大きいので、自己ファンだけでは必要通風量を確保することが困難と予想された。これを解決するために、高速機用水流モデルを製作して試験を行なった結果、強制ファンが必要であることが判明し、その仕様を決定した。また温度上昇は、熱的等価回路を詳細にネットワークとして作製、

表1 発電電動機のおもな仕様 大容量(320MVA)かつ高速(300rpm)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	320MVA/314MW
回 転 速 度	300rpm
極 数	24
周 波 数	60Hz
電 圧	18kV
電 流	10,260/10,290 A
力 率	0.95/1.0 (ただし、発電機出力286MWにおいて0.9)
短 絡 比	0.8
GD ²	12,000t・m ²
無 拘 束 速 度	140%
最大速度変動率	38.5%
推力軸受荷重	1,560t
絶 縁 種 別	B
励 磁 機	サイリスタ
始 動 方 式	直結誘導電動機始動

* 日立製作所日立工場

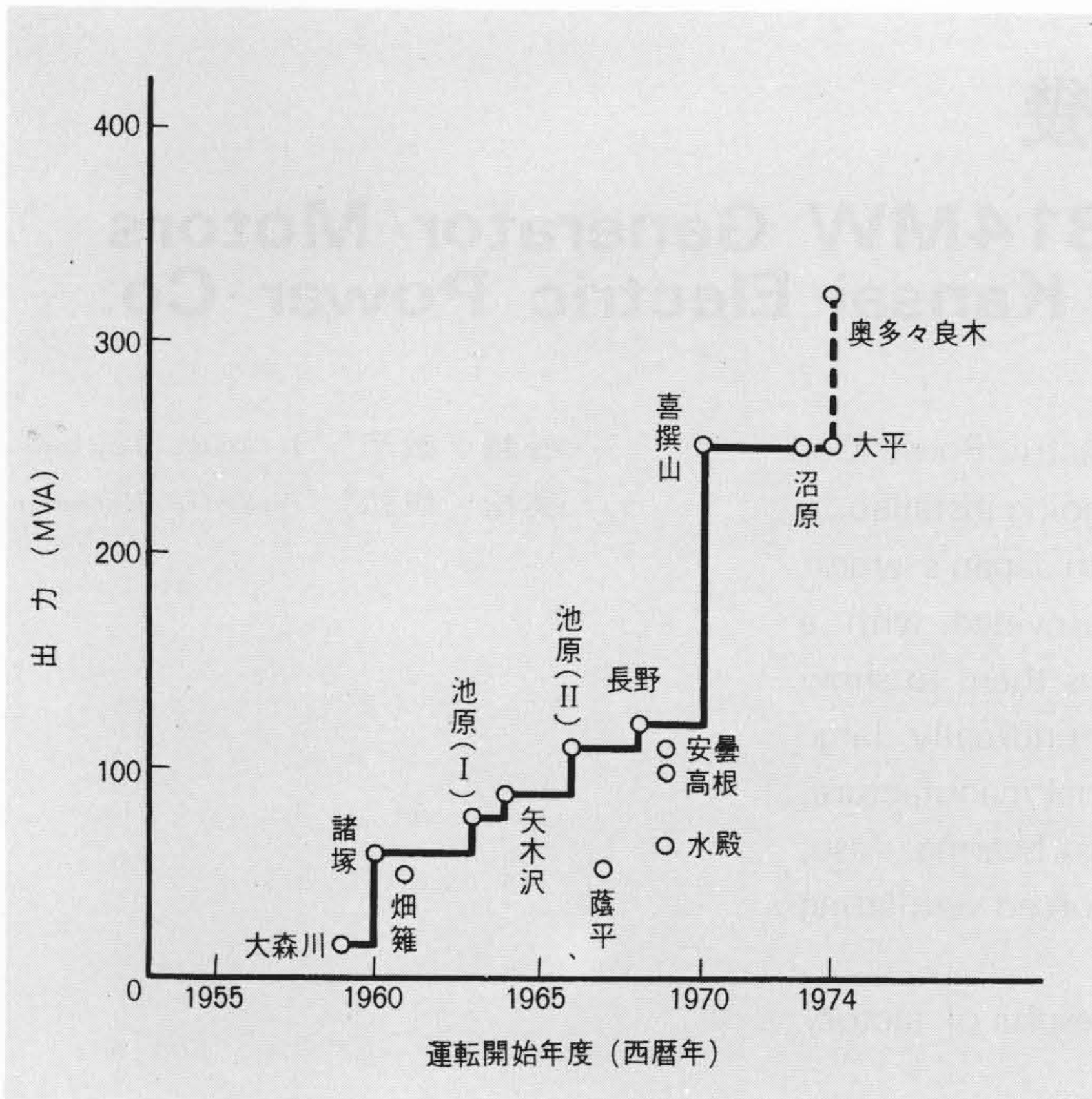
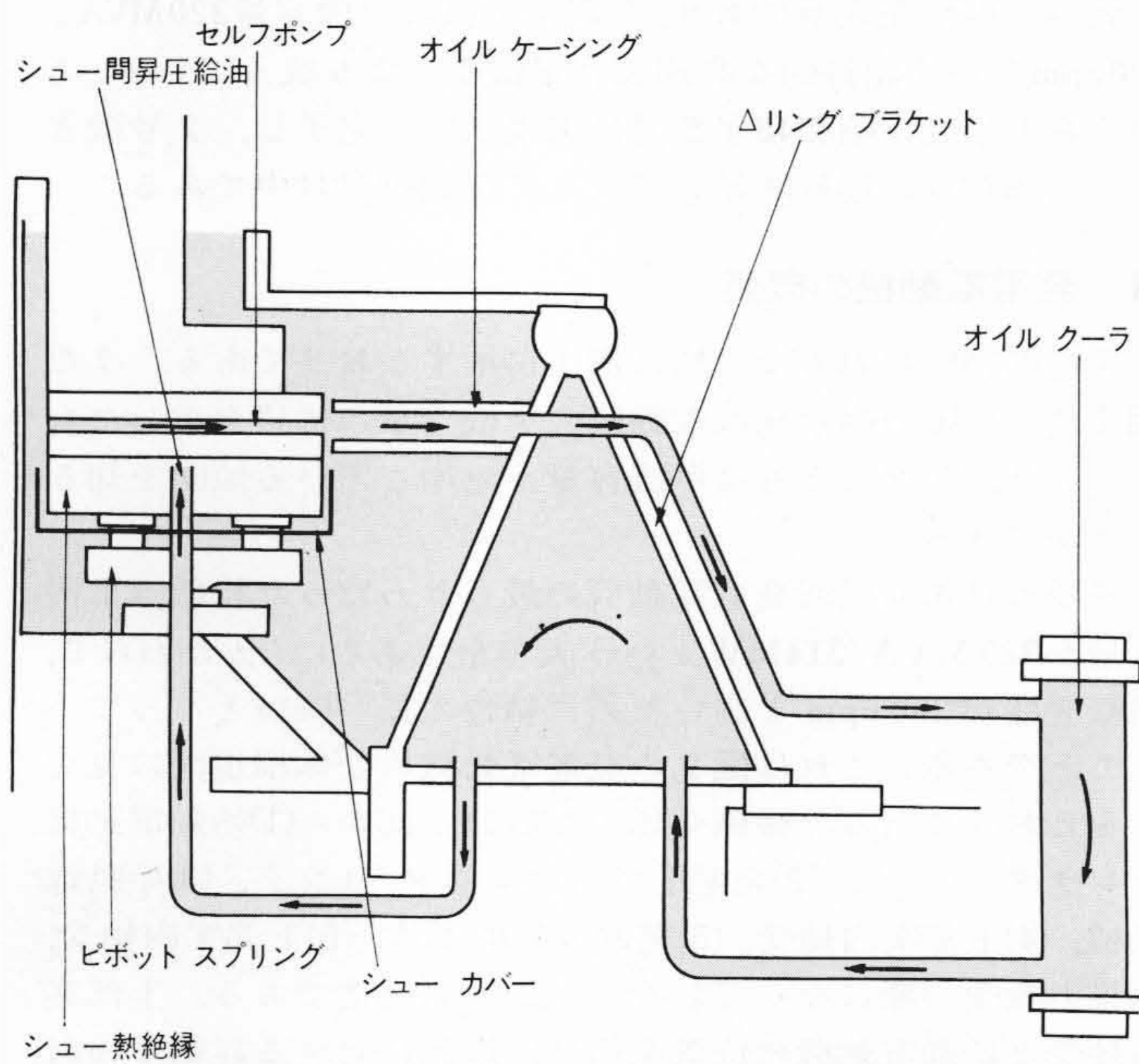


図1 わが国の揚水発電電動機の単機容量の推移 単機容量
320MVAは、国内最大容量機である。

Fig.1 Unit Capacity of Generator/Motors in Japan



シュー熱絶縁

図3 推力軸受の構成 ピボット スプリングは荷重分担の均一化、シュー熱絶縁はシュー変形防止、シュー間昇圧給油およびセルフポンプは冷却の向上を目的とする。

Fig.3 Thrust Bearing Equipment

上記の冷却風を考慮して解析して万全を期した。空気冷却器1台を除外しても支障なく運転できるように設計してある。

3.2 推力軸受および冷却装置

推力軸受装置の構成は図3に示すとおりである。セルフポンプにより温油を吐出して外部のオイルクーラに導き、クーラからの冷油を「Δ(デルタ)リング形ブラケット」を介し

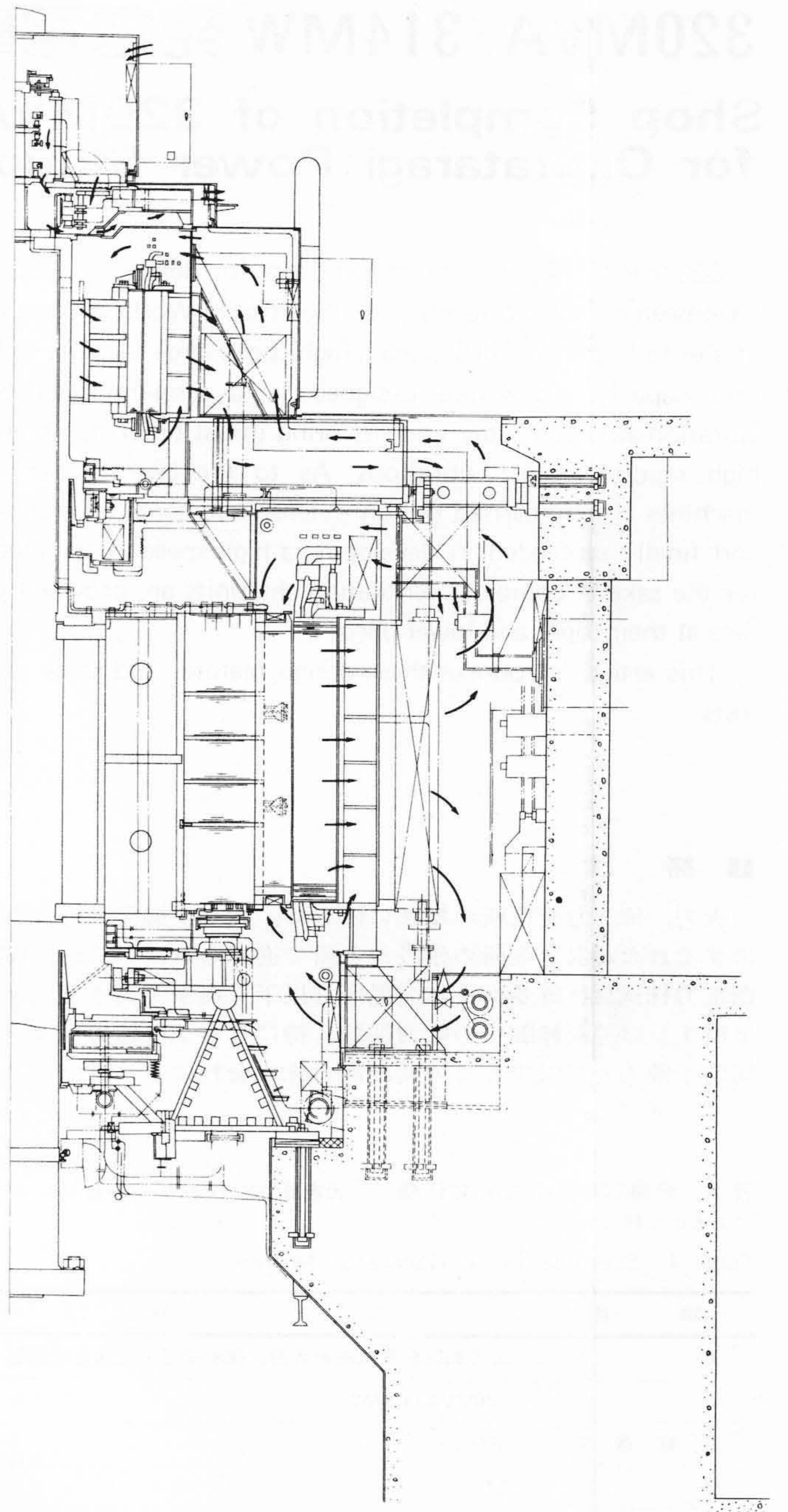


図2 発電電動機の全体構造図 発電電動機本体の下に案内軸受を配した準かさ形構造である。

Fig.2 Construction of Generator/Motor

てシュー間に直接給油する方式とした。この推力軸受には四つの特徴があるが、そのうちの2点はピボット スプリングおよびシューの熱絶縁である。日立ピボット スプリング式スラスト軸受は運転時におけるシュー厚さ方向の温度こう配によって生ずる熱変形を荷重変形で補償し全体として変形を防止するとともに可撓(とう)性により各パッドの荷重分担を均一

にする支持方式であるが、これに加えてシュウ裏面および側面を耐油性ゴムでおおうことによってシュウの温度こう配を少なくし熱変形を防止するのがシュウ熱絶縁方式である。このため荷重変形による補償の度合いを少なくでき、始動から停止までのすべての運転領域でシュウ変形の変化を少なくでき安定した油膜を形成できる利点があり、特に熱的に過酷な条件となる本機のような大形高速軸受に効果がある。残る二つの特徴は、セルフポンプとシュウ間昇圧給油であり、これらはシュウの冷却向上を目的とするものである。この方式は軸受シュウ全体を油流しゃ板でおおい、シュウ間にセルフポンプ→オイルクーラからの冷油を直接に昇圧給油する方式で

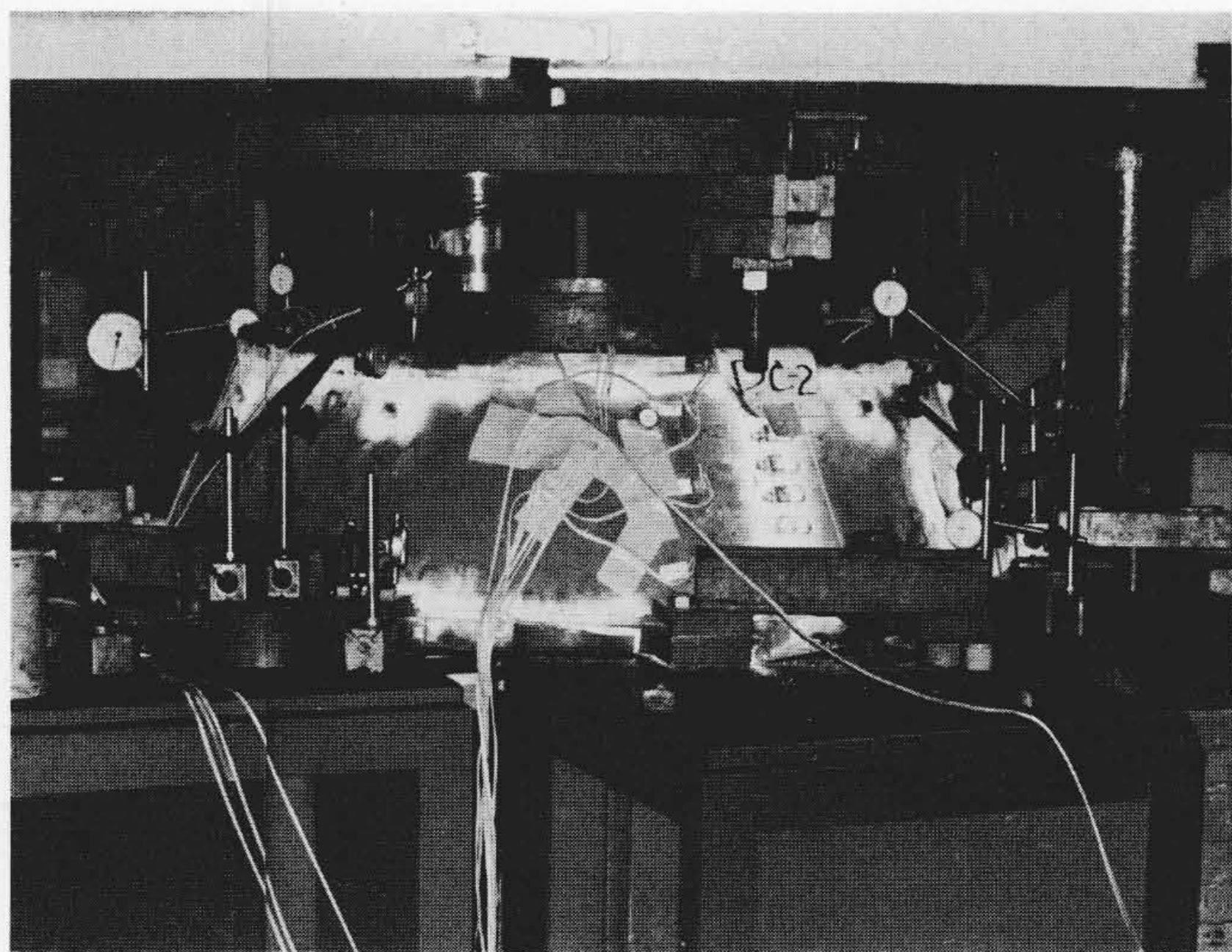


図4 「Δリング ブラケット」モデル試験 たわみ、応力およびオイルリーク試験を行った。

Fig. 4 Model Test of "Δ Ring Bracket"

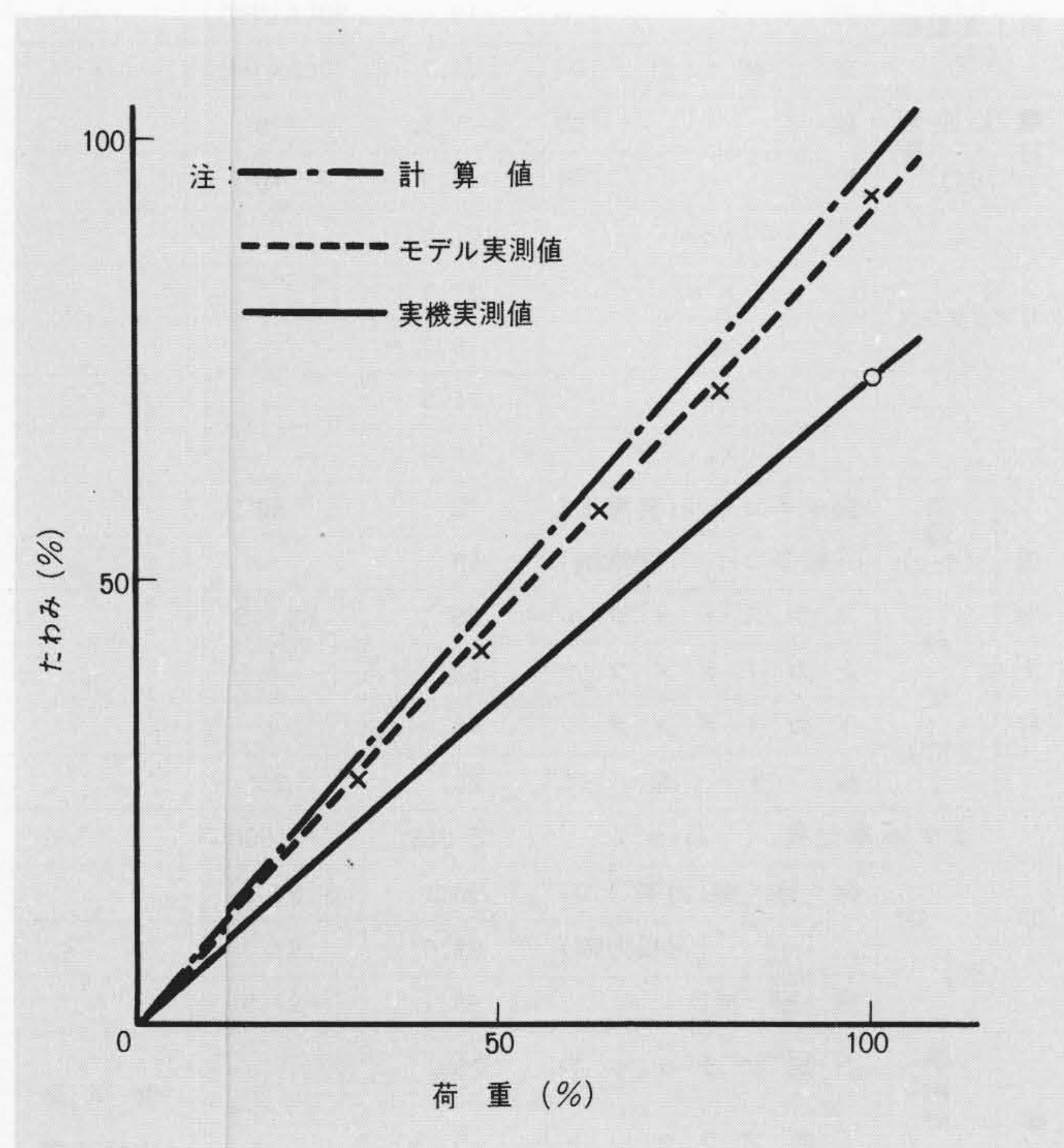


図5 「Δリング ブラケット」のたわみ試験結果 計算値とモデル実測値および実機実測値はほぼ合っている。

Fig. 5 Test Result of "Δ Ring Bracket" Deflection

あり、軸受ランナ面が直接冷油によって冷却されるためランナ面の熱い油膜境界層の温度が低下し、摺(しゅう)動面に冷油が送り込まれるため、厚い油膜が形成されて摺動面内の油膜圧力分布が改善され、局所的な温度上昇が防止できる。さらに油流しゃ板内の油圧が若干高くなるため、シュウ間の油流攪拌(かくはん)による気泡(ほう)の発生が抑制され、また油流しゃ板により外部から軸受まわりへの気泡浸入がないため冷却がよくなり摺動面内の油膜温度上昇が低下するという利点がある。

なお、構造上は、推力軸受シュウの点検、取はずしを簡単にできるようにしたことが特徴である。

3.3 振動および支持部の剛性

大形高速機であるために、振動に対しては十分な検討を加えた。上部の支持部には8本のブラケットアームそれぞれと基礎との間に金属圧縮ばねから成る防振ステーをそう入し、その剛性は振動の抑制と熱伸びを吸収できる適正なものとした。下部の支持部には日立製作所で開発した「Δリング形ブラケット」を採用している。このブラケットは輸送上の制限から2分割構造になっているが、鉄製の縮小モデルを製作して、強度と剛性の実験を行なうとともに、リング内部に油圧をかけて分割部からのオイルリークの有無を検査し、安全性を確認している。図4はこの鉄製モデルを用いた試験を示したものである。また図5はモデル試験結果の一例を実機の実測値と比較して示したものである。

3.4 回転子

スパイダにはボスリング上に8本のアームを設け、各アーム間を軸方向中心部にて、中間リングで結ぶ高速形構造としてある。ロータリムには高抗張力鋼から成るセグメントリムを使用し、無拘束速度や負荷しゃ断時の過速度に対して十分安全なものとした。図6は工場組立中の回転子を示すものである。

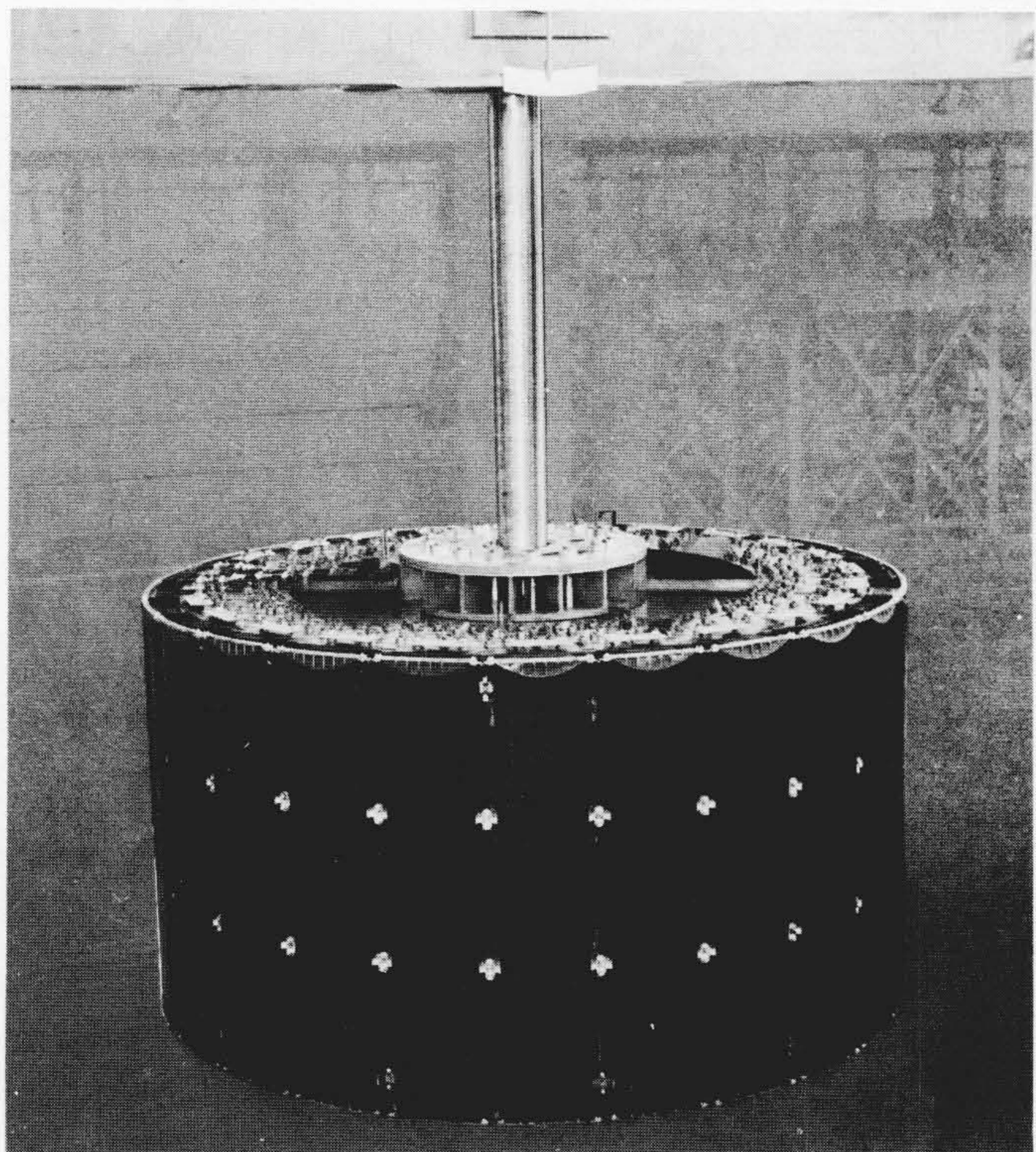


図6 回転子組立 回転子を一体つりするところを示す。

Fig. 6 Rotor Assembly

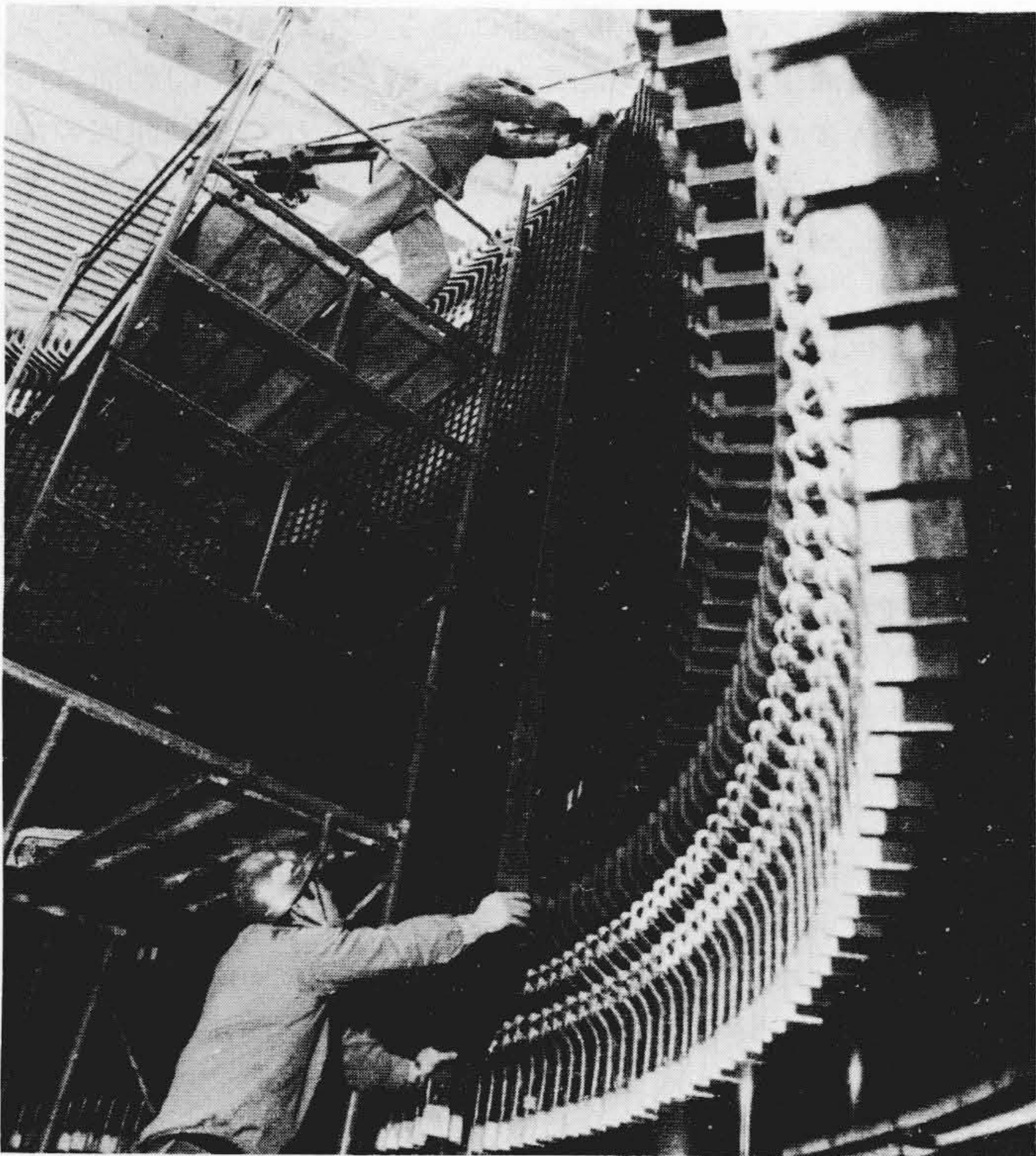


図7 固定子コイル組立 固定子コイルはワンターン コイルで、本図はコイル入れ作業中を示す。

Fig.7 Stator Coil Assembly

3.5 固定子

固定子わくは輸送上の制限から8分割とし、固定子コイルやコアの重量、礎気吸引力をささえ、振動や短絡時のトルクに対しても十分安全なものとしている。固定子ベースは8個のブロックベースから成り、ベースとベースの間には8個の強制ファンを設置した。なお固定子わくの上にも8個の強制ファンを設置し、機械全体の通風効果を上げるようにした。また固定子コイルにはヒートサイクルによる熱劣化特性、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エポキシレジン絶縁方式を適用している。図7は工場組立中の固定子コイルを示すものである。

3.6 付属機器

スラスト軸受用オイルリフト装置としては、常用油ポンプと予備用油ポンプを設置し、両者の自動切換えができるようにしてある。

強制ファンは主発電電動機の始動準備で運転を開始し、このファンの運転を主機始動のインターロックとしている。また主発電電動機の停止指令後一定時限にてファンの運転も停止できるようにしてある。本機の場合は始動用電動機にも強制ファン4台を設置してあるが、このファンは主機始動中のみ運転し、制御法は上記の主機用ファンと同様である。

4 工場試験結果

工場でのおもな試験結果は表2に示すとおりである。

4.1 コイル温度上昇

強制ファンの効果は、たとえば表2の巻線温度上昇実測側でもわかるように、十分に確認することができたが、さらにファンが1～2台停止したとき、通風量および温度上昇がどう変わるかを実測した例を図8に示した。ファン16台中の2台を停止した場合、通風量の減少は約6%、固定子コイル温

度上昇の増大は約3deg、回転子コイルでは約1～2degという結果になり、当初予想したとおりファン全台運転時の温度上昇値に押えるための負荷制限はわずかでよいということがわかった。

4.2 推力軸受装置

推力軸受試験は荷重が現地スラスト荷重とほぼ等価となるようにスラストメタル14個の内8個を用いて試験した。図9は現地状態を模擬するために給水温度を変えて軸受温度を測定した結果を示している。また図10は軸受冷却水断水試験結果である。冷却水を断水したまま発電電動機を定格回転速度で5分間運転し、引き続き断水状態のまま停止したものである。同図より軸受温度は断水によっていったん上昇し始めるが、回転速度の低下によって軸受損失が減少するために温度は下降ないし飽和の状態となり、停止後一定の状態に落ち着くことがわかる。

なお、以上のほかに過速度における軸受の特性試験や、10rpmの回転速度での30分間運転試験などを行ない、いずれの試験でも軸受が安全であることを確認することができた。

図11はセルフポンプ吐出量の実測値を計算値と対比したものである。

表2 工場試験成績 試験結果はいずれも良好であった。

Table.2 Shop Test Result

試 験 項 目		実 測 値	保 証 値	備 考	
界 磁 電 流 (A)	無 負 荷	765			
	三 相 短 絡(発電機)	930			
	” (電動機)	933			
	力 率 1.0(発電機)	1,204			
	” (電動機)	1,207			
	定 格 力 率(発電機)	1,456			
短 絡 比		0.823	0.8	発電機にて	
電圧変動率 (%)	力 率 1.0	19.1	30(AVR付)	”	
	定 格 力 率	24.7	30(AVR付)	”	
電 圧 波 形 狂 い 率 (%)	線 間	1.85	5		
	相 間	3.9	10		
リアクタンス (%)	X _d	121.4			
	X' _d	27.7			
	X" _d	18.7			
	X ₂	21.5			
	X ₀	11.8			
温 度 上 昇	巻 線 (deg)	固定子コイル(発電機)	70	80	
		回転子コイル(発電機)	53	”	
	軸 受 (°C)	ス ラ ス ト メ タ ル	65	65 + 5	
		上 ガ イ ド メ タ ル	52	”	
		下 ガ イ ド メ タ ル	45	”	
		給 水 温 度	25	25	
		はずみ車効果 (t-m ²)		13,285	12,000
効 率 (%)	発 電 機(力率 1.0)	98.1	97.9		
	” (定格力率)	98.0	97.7		
	電 動 機(”)	98.1	97.9		
振 動	固 定 部 (μ)	上 部 ブ ラ ケ ッ ト	25	無 負 荷 定 格 速 度 発 電 方 向 運 転 時	
		下 部 ブ ラ ケ ッ ト	5		
	回 軸 転 部 振 (1/100mm)	コ レ ク タ リ ン グ	12		
		カ ッ プ リ ン グ	8		

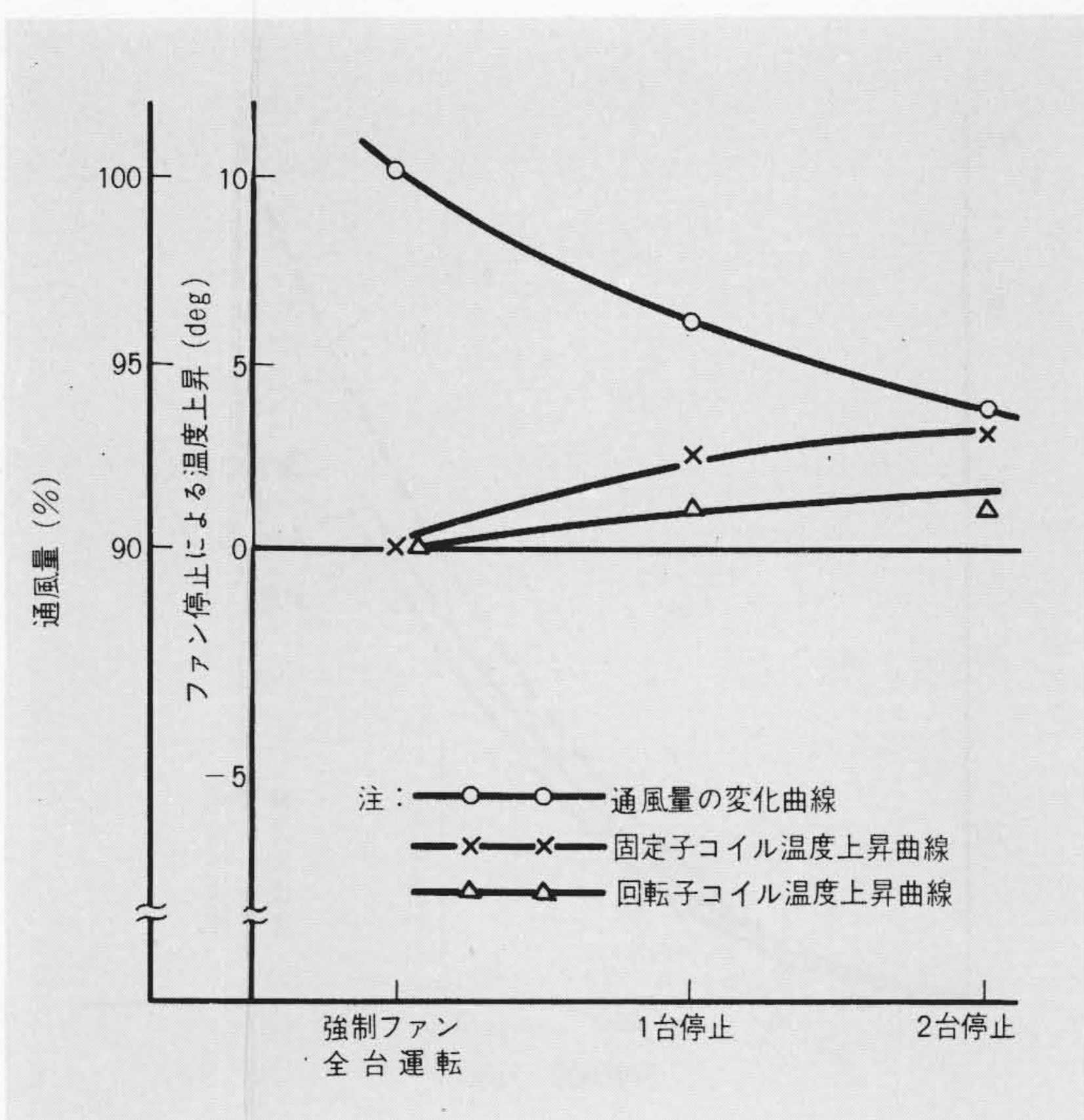


図8 強制ファン停止時の通風量と温度上昇 ファン2台停止時の固定子コイル温度上昇は約3 degである。

Fig. 8 Ventilation and Temperature Rise when Cooling Fans Stop

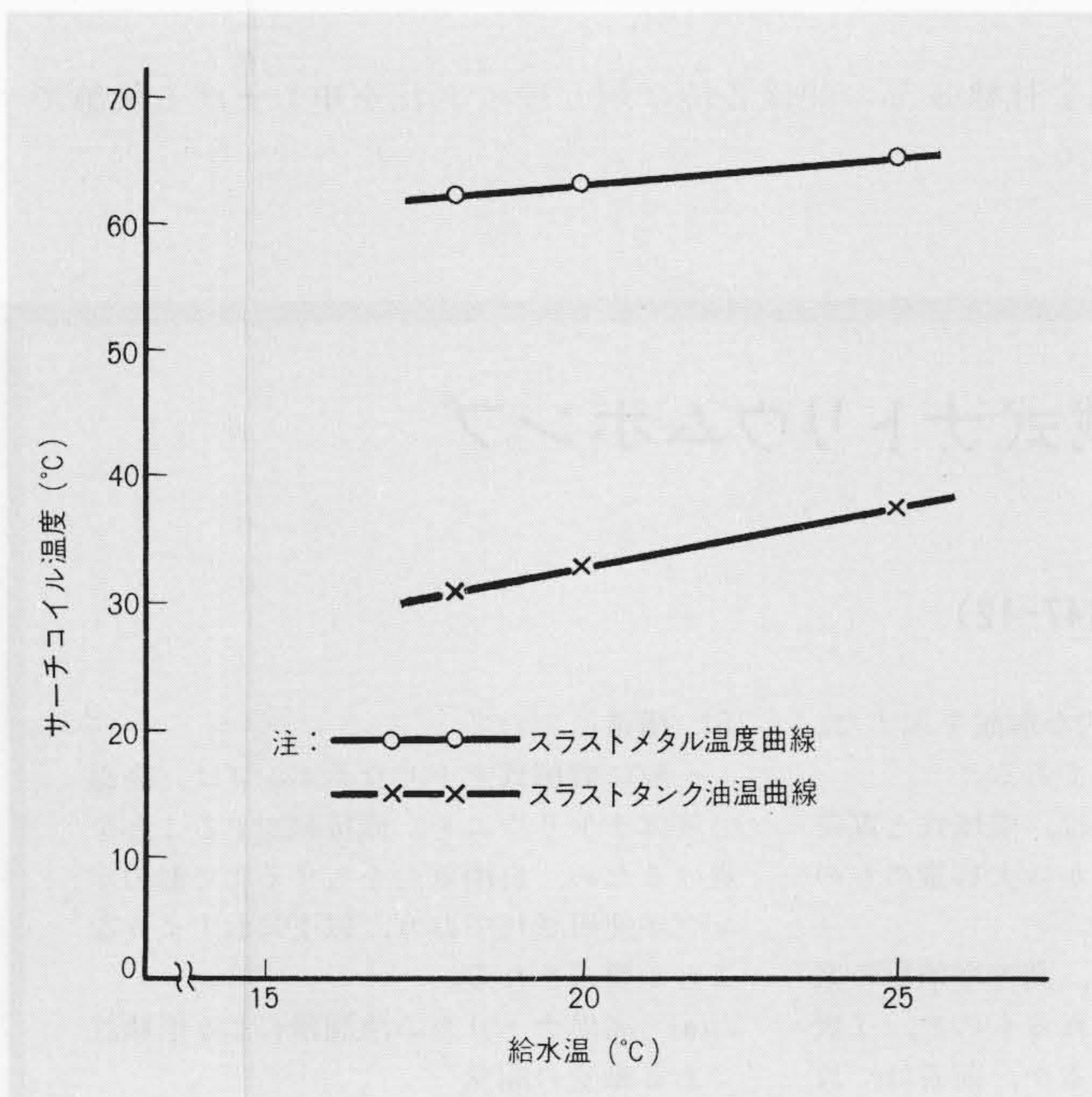


図9 給水温度に対するスラストメタルの温度特性 水温が5 deg上昇すると、メタル温度は約2 deg上昇する。

Fig. 9 Thrust Bearing Temperature vs. Cooling Water Temperature

4.3 ロータリムの応力

本機は高速大容量機であるうえに、無拘束速度と最大過速度がきわめて近いので、回転部の強度は特に念入りに設計したが、応力計算を確認するために最も高い応力となるロータリムについて、FMストレインメータによる応力測定を行った。ロータリムの内周側に図12に示す位置にストレインゲージを取り付け、これを固定部で受信して測定した結果は図13に示すとおりである。同図にみられるように実測値

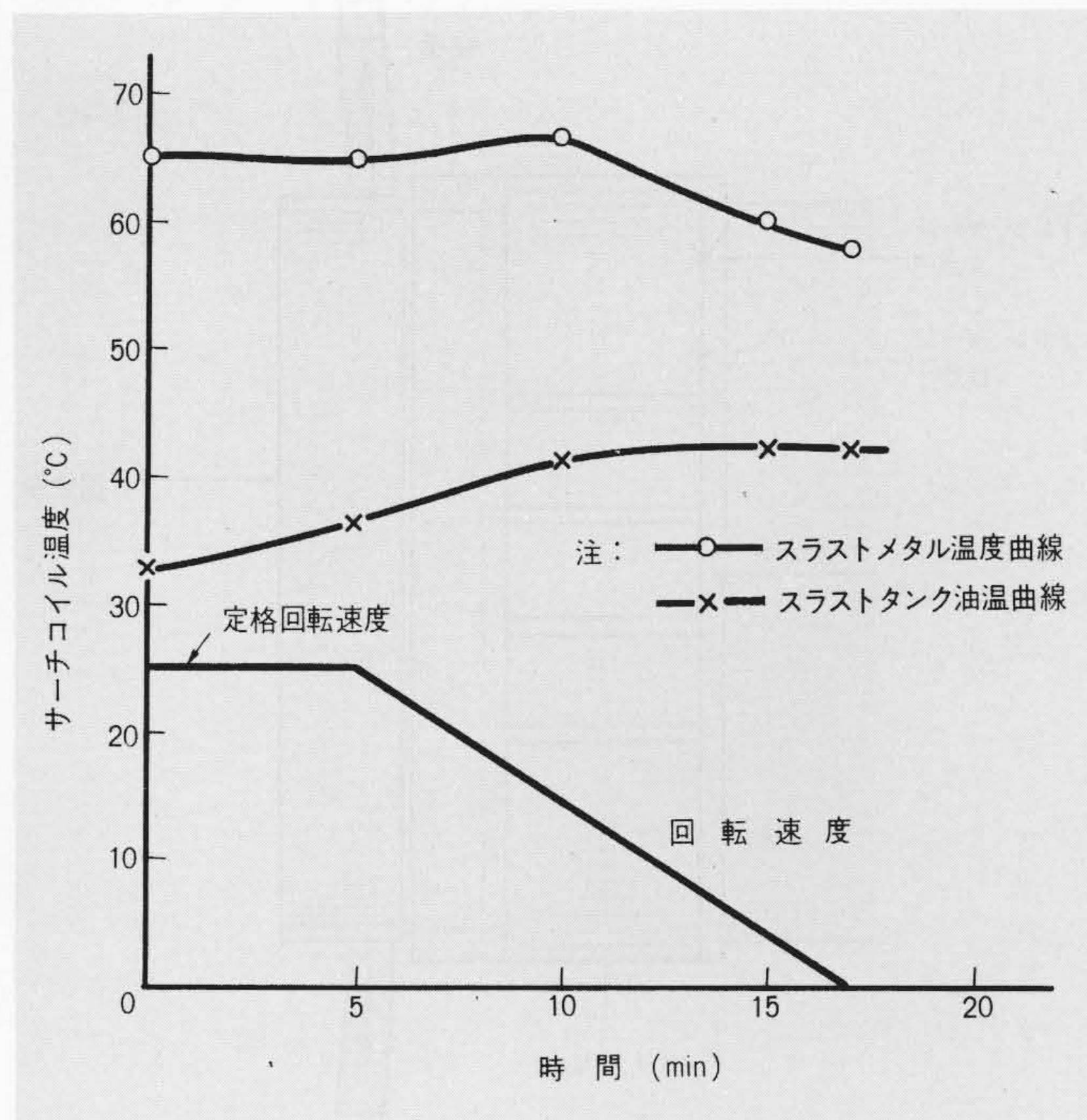


図10 軸受冷却水断水試験 断水時には普通停止を行なっても支障ないことが確認できた。

Fig. 10 Suspension Test of Bearing Cooling Water

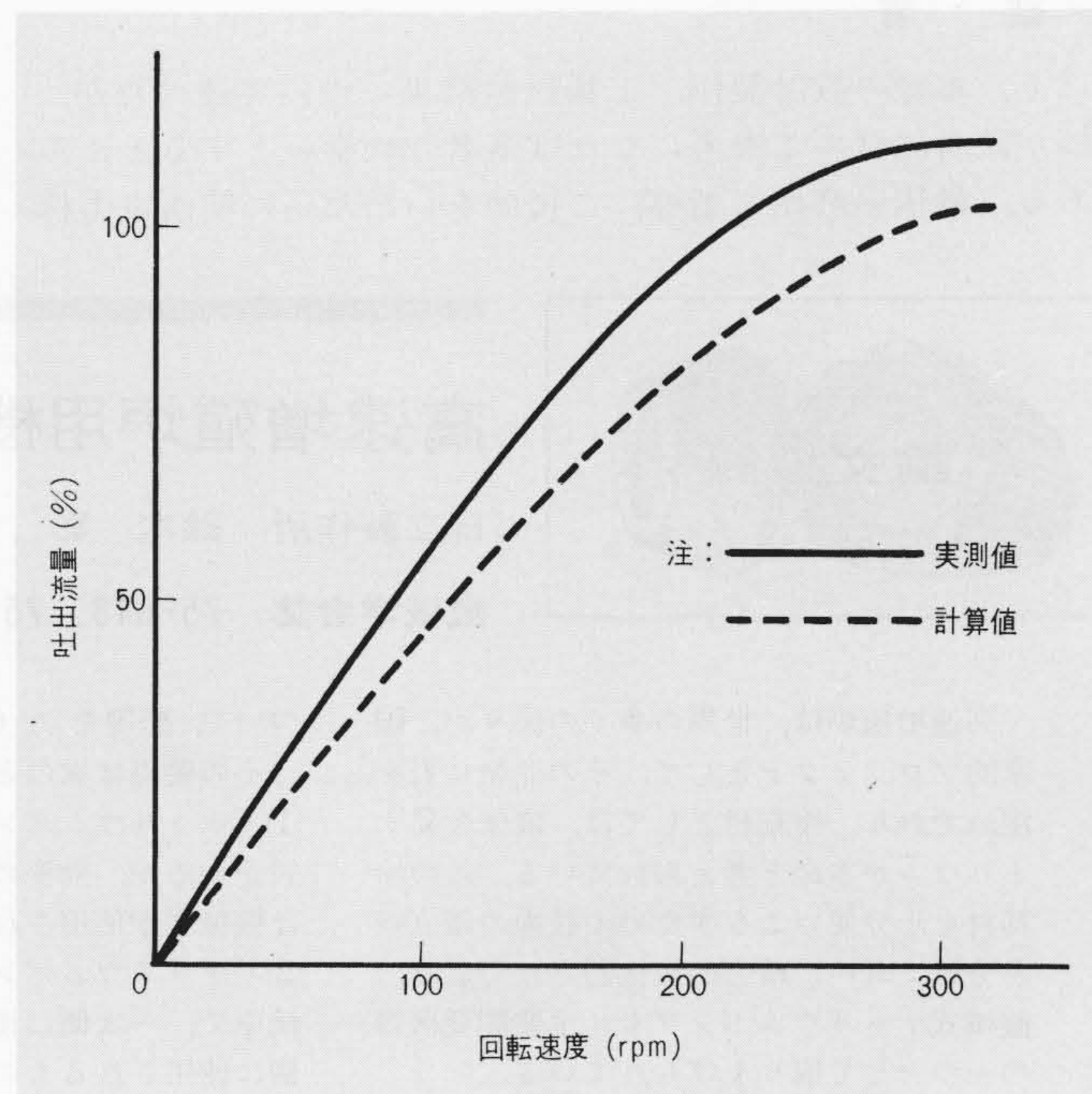


図11 セルフポンプ吐出量 回転方向は発電機、電動機いずれでも同一の特性が得られることを確認した。

Fig. 11 Effective Oil Flow Rate of Self Pump

と計算値はよく一致している。

4.4 振動

振動測定結果の一例は表2に示すとおりであるが、本機は現地で最終的に取り付けられるべき上部エンドブラケットの防振ステーの代わりに三角状の鉄製補強を取り付け運転しているので、上部支持部の剛性が現地予定値より低いものになっている。

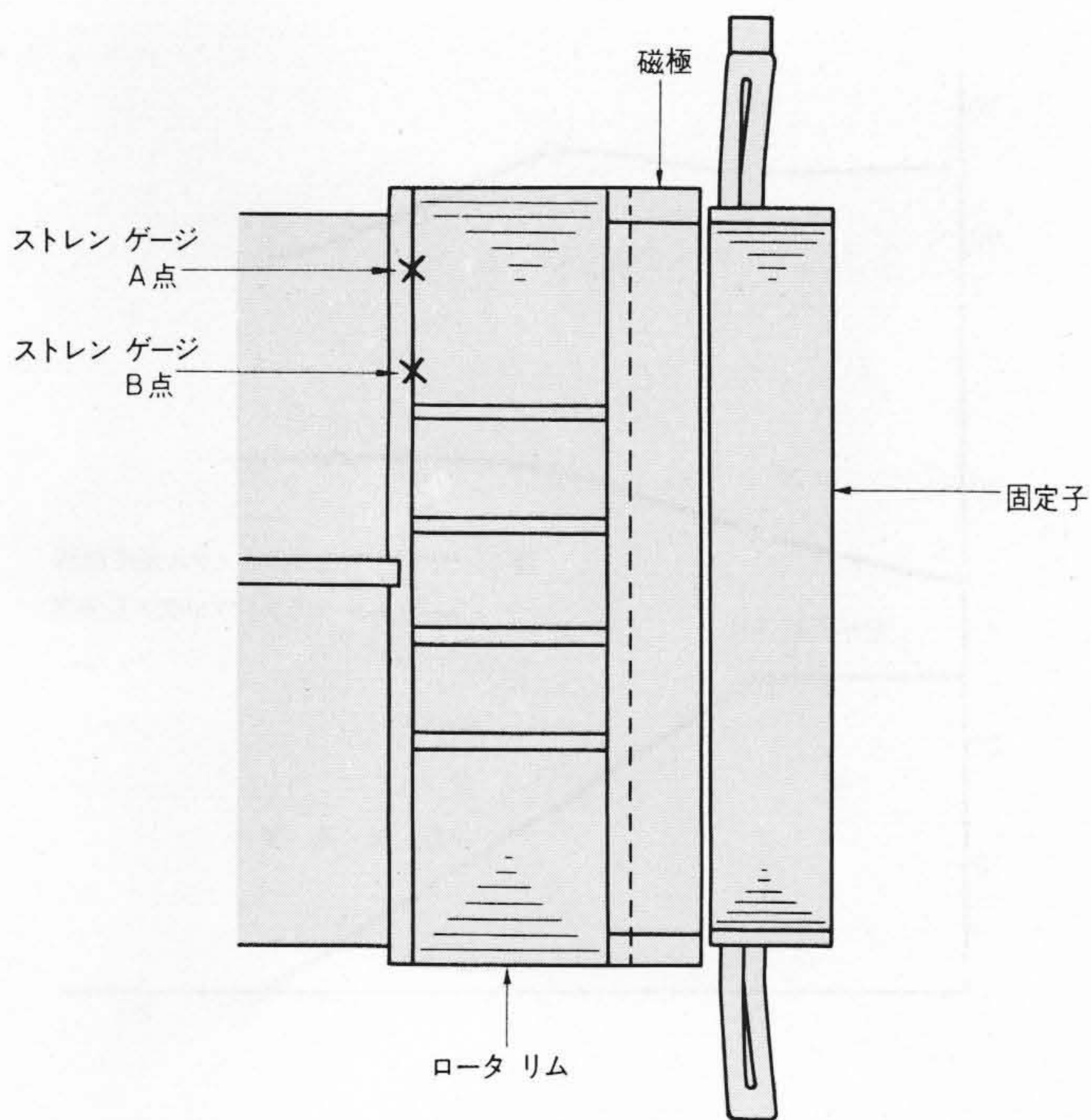


図12 ロータリム応力の測定 本図に示す位置で、FMストレインメータにより測定した。

Fig. 12 Stress Measurement of Rotor Rim

5 結 言

以上、本機的设计製作、工場試験結果について述べたが、本稿が読者諸賢のご参考になれば筆者らの幸いとすところである。最後に終始ご指導、ご援助をいただいた関西電力株

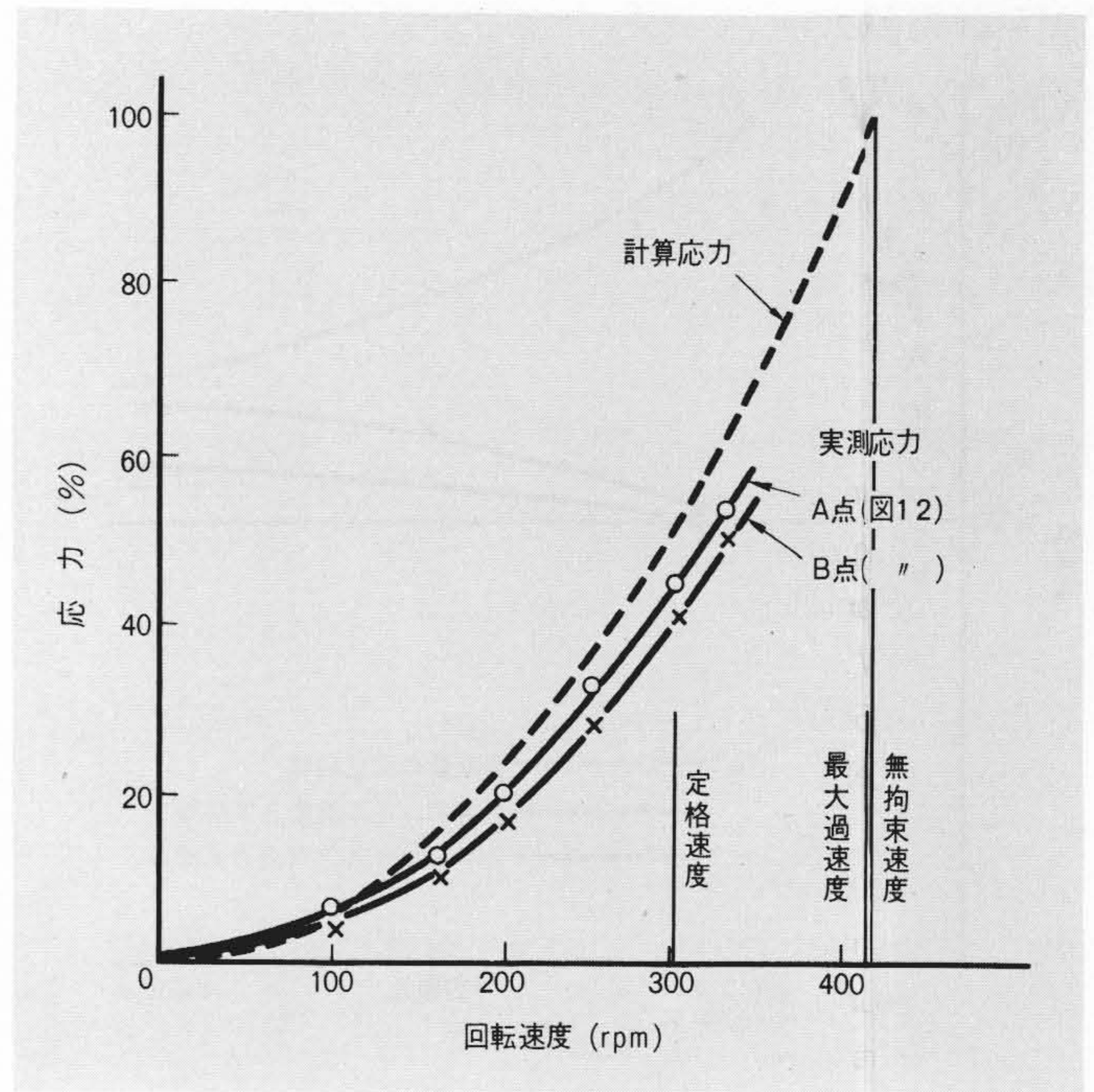


図13 ロータリム内周の応力 計算値と実測値はよく一致している。

Fig. 13 Stress at Bore Surface of Rotor Rim



高速増殖炉用機械式ナトリウムポンプ

日立製作所 鈴木 彰

機械学会誌 75-648, 75 (昭47-12)

高速増殖炉は、世界の多くの国々が、国家的プロジェクトとして、その開発に力を注いでおり、冷却材としては、液体金属ナトリウムが本命と考えられている。この冷却材を十分使いこなすための技術の確立が各分野において精力的に検討されており、機械式ナトリウムポンプも、主要開発機器の一つとして取り上げられている。

機械式ナトリウムポンプは、高温で、活性な液体金属ナトリウムを取り扱うため、材料、構造、運転、保守などの面から見て従来のポンプには見られなかった多くの特殊な考慮を払う必要がある。また、高速増殖炉に使用されるナトリウムポンプは、系統上の位置、設置の場所、設置の方式、構造上の工夫などの観点から分類することができるが、それぞれに対して、特殊な要求や、多くの利害得失を含むものである。これらの分類に対応して、機械式ナトリウムポンプについて、系統上との関連における諸問題、ならびにポンプ固有の問題などに

ついて、整理をし、概念的な解説を加えた。その要点は次のとおりである。

- (1) ナトリウムポンプには、機械式と電磁式があるが、効率の関係から大容量のものは機械式が使用される。
- (2) ナトリウムポンプは、高速増殖炉の系統中で、一次側に使用されるものと、二次側に使用されるものがあるが、前者は、放射線しゃへい部を設けてその対策を行なう必要がある。
- (3) ナトリウムポンプは、熱交換器の上流側に設置する場合と下流側に設置する場合では、設計温度が異なり、NPSH（正味正吸込水頭）運転動力、熱衝撃条件、材質選定、各機器の設計圧力などに影響を及ぼす。
- (4) ナトリウムポンプは、系統の配管の途中に設けられるループ形と、炉心、熱交換器、ポンプを、ともに巨大な容器内に収納するタンク形があり、それぞれ利害得失を有し、プラント全体の経済性の観点から、十分よく検討する必要がある。

(5) 構造について

一般に機械式ナトリウムポンプは、高温の液体ナトリウムを、直接軸封することを避けるため、自由液面を有する立て形のポンプが使用されており、以下に示すようなことが要求される。

- (a) 高温ナトリウム液潤滑による信頼性ある軸受の開発
 - (b) 活性のナトリウムを空気としゃ断するために不活性ガスで自由液面をカバーするので、ガスシールのための信頼性ある軸封の開発
 - (c) 保守点検上の問題として、分解時のナトリウムの付着防止に対する考慮。
 - (d) 高温、活性ナトリウムを取り扱うポンプとして、熱応力、熱衝撃、耐食などに関する構造材質に関する考慮
 - (e) プラントの安全運転との関連における駆動方式、慣性停止時間の検討
- など、検討すべき問題は多いが、実用化を目ざして精力的研究が実施されている。