UDC 621.313.322-81:621.322.22

東京電力・川崎火力5号機の発電機

中　田　隆　康*
Takayasu Nakata

Generator for the No. 5 Unit of Kawasaki Thermal Power Station, Tokyo Electric Power Co.

Synopsis

The 224 MVA turbo-generator was completed successfully for Messrs. Tokyo Electric Power Co. as the No. 5 unit of Kawasaki Thermal Power Station by Siemens-Schuckert Werke AG, one of the top makers in Europe, and began commercial running recently. It is worthy to notice that the latest technique of European industry has entered into the Japanese thermal power station for the first time.

This paper features excellent merits of this generator for your information.

I. まえがき

わが国のタービン発電機の出力は近年飛躍的に増大してきたが，これらは主として米国系の技術の流れにそったものであることはよく知られているところである．米国においては 1935 年に水素冷却が本格的に採用されて以来，タービン発電機は大容量化の途をたどってきた．これは米国の経済力，国情あるいは火力に対する高い依存度により加速されたものであるが，米国をこの分野での指導的地位につかせるにいたった．そこでわが国では戦後の火力発電所建設に当たってはまず米国から1号機を輸入するという方策が採られてきたので米国系技術が広くゆきわたる結果となったものである．しかしながら一方欧州においても 1950 年ごろより水素冷却が本格的に実用化されるにおよび，技術水準も著しく進歩し，以来10 数年をへた今日では米国のそれに匹敵する技術を擁するにいたっている．このような情勢を考えると，わが国においても，わが国の国情に最も適合した経済的なものが要求される現在，国情や電力事情のにかよった欧州系技術に注目する必要が痛感される。

このような時期に当たり，欧州技術の一方の代表である当社の提携する西独シーメンス社が初めての欧州系技術によるタービン発電機を東京電力・川崎火力発電所第5号機として納入し，成功裡に試験を終了し営業運転の運びとなり，各方面の注目をあびているのは，わが国のこの方面の技術にとって意義あることと思われる．本稿ではこの新らしい発電機についてその特長を浮彫りにし，各位の参考に供したいと考える。

* 川崎工場回転機部

II. 発電機仕様

発電機および励磁機の仕様は次のとおりである。

主発電機：

形　式	横置円筒回転界磁水素冷却形
出　力	水素圧力 3 kg/cm² g において 224,000kVA 水素圧力 2.6 kg/cm² g において 206,000kVA 水素圧力 2 kg/cm² g において 175,000kVA 水素圧力 1 kg/cm² g において 115,000kVA
力　率	0.85
電　圧	12,000 V
回転数	3,000 rpm
周波数	50 ~
冷　却	固定子　間接水素冷却 回転子　直接水素冷却
接続法	二重星形
接地方式	三次側抵抗器付計器用変圧器接地
励磁方式	直結励磁機方式

主励磁機：

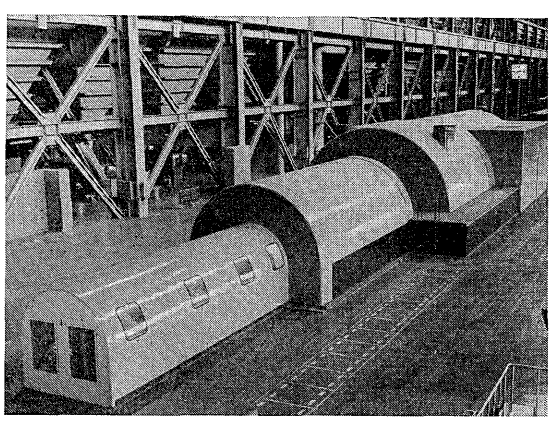
形　式	直流分巻発電機
出　力	1,100 kW　連続 1,525 kW　2 min 2,500 kW　10 sec
電　圧	425 V　連続 500 V　2 min

640V　10 sec
電　流　2,600A　連続
3,050A　2 min
3,900A　10 sec
回転数　1,050 rpm
駆動方式　減速歯車を介して主発電機に直結

副励磁機：

形　式　交流同期発電機
出　力　13kVA
電　圧　400V
力　率　0.5
周波数　52.5%
回転数　1,050 rpm

第1図は本機の外観である。



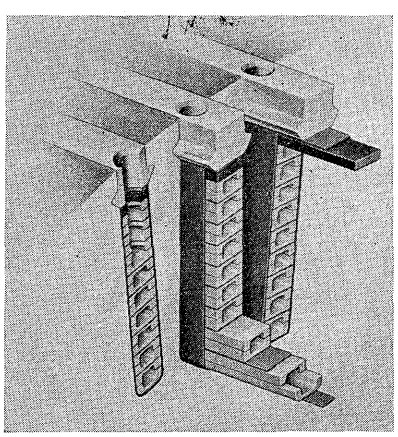
第1図　発電機外観
Fig. 1. Outer view of the generator

III. 冷却方式

タービン発電機の進歩はその冷却方式の進歩とみることができるほど，冷却の問題はタービン発電機にとって重要である．冷却媒体として水素ガスを利用する水素冷却は間接冷却および直接冷却に大別されるが，具体的には冷却媒体の通路の構成法，形状あるいは流通方法などに種々の相異なったそれぞれ特長ある方式のものが行なわれている．ある容量の発電機の計画に当たってはこれら種々の方式を経済的に，また機能的に有利なように組合せて，その発電機に適合した最適冷却方式を採用することが必要である。

川崎火力第5号発電機の冷却方式は比較的低電圧の固定子巻線に対しては間接水素冷却，回転子巻線に対しては軸方向直接水素冷却が採用されている．一般に回転電気機械では極数が少ないほど回転子巻線を収容する空間が少なく，全機械の寸法は回転子により規定される傾向がある．タービン発電機にもそのことがあてはまり，短絡比が小さく選ばれているので回転子の負担は軽減されているにもかかわらず，固定子に比べると回転子がなお苦しい状態にある．そこで機械全体のバランスをとる上で固定子は間接冷却のままにして回転子のみを直接冷却とする方式の有利な範囲が当然存在する．この範囲は125MVAから250MVA程度までで川崎火力第5号機はちょうどその適用範囲に入っており，この冷却方式が採用された。

第2図はこの方式の回転子の断面である．導体はU字形断面のものを二つ重ね合せて1ターンを形成し，導体の中に矩形断面の冷却孔を作っている．水素ガスは回転子巻線のコイルエンド側面に設けたガス導入開口部から導体内の通風孔に導入され軸方向に回転子中央部まで導体を直接冷却する．回転子の中央部には排気用のラジアル方向穴が開いており水素ガスはそこからエアギャップへ放出される．固定子が間接冷却であるから通風用に特に高圧のコンプレッサを設ける必要はなく構造も複雑化しない。



第2図　回転子巻線
Fig. 2. Rotor coil

IV. 構　造

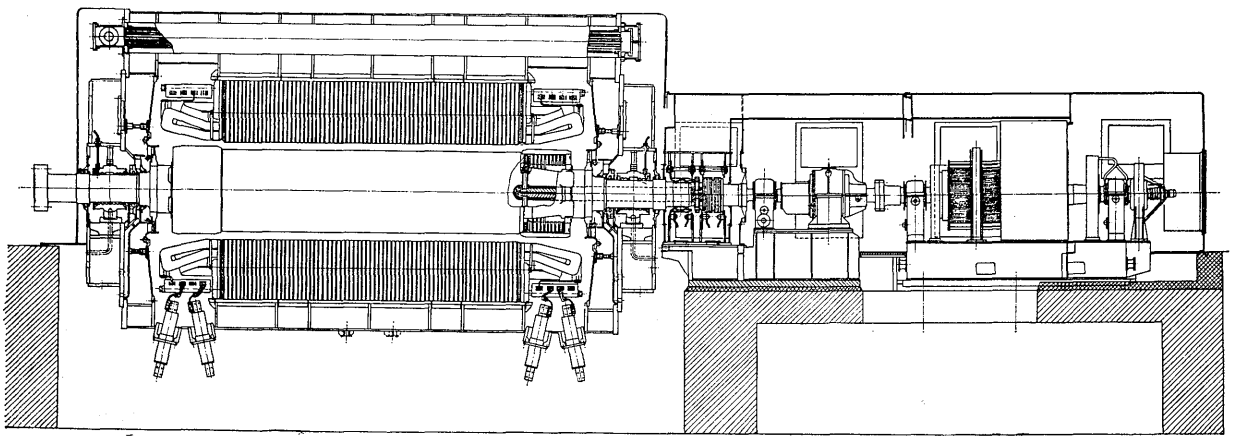
第3図に本機の断面図を示す。

1. 固定子

固定子わくは鋼板溶接構造の耐爆形である．水素気密を要求される部分の溶接は充分な検査を行なって欠陥を除き，万一のガス爆発にそなえて10気圧の水圧試験を行なった．多数の中間板は振動と強度を充分考慮して配置され，同時に固定子通風のための仕切板をかねている。

固定子わく上部には4個の冷却器が軸方向に配置され，機内を循環する水素ガスを冷却している。

鉄心は固定子わく内周部にとりつけられたダブテール形キーによって加熱圧縮を繰返しながら支持積層され，均等，強固な積層を図っている。

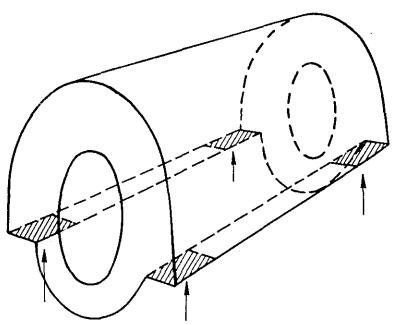


第3図 発 電 機 断 面 図
Fig. 3. Sectional view of generator

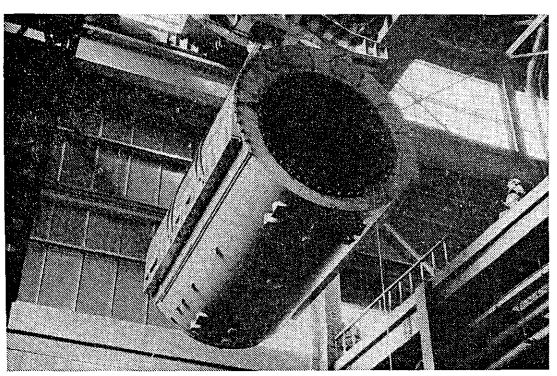
固定子巻線は素線をレーベル転位したギッタ導体が用いられ，コイルエンド漏れ磁束による素線電圧の不平衡を防ぐよう特殊な結線方法を採用している．コイルエンドは強固に固定されて短絡時の大きな電気力に安全に耐えることができる。

各相巻線の端部は接続リング導体をへて，貫通導体により発電機底部より機外に引き出される．貫通導体は安全性が重視される部品であるから負荷試験，短絡試験，気密耐圧試験など入念な部品試験を行なっている。

本機の大きな特長の一つとして固定子の基礎への支持方法があげられる．これは四隅支持法と名づけられるものであって，固定子の基礎台床への据えつけ部を第4図のごとく四隅のみに限定することにより，鉄心が固定子わくに通常の方法で固定された構造であっても，鉄心振動の基礎への伝達が実用上充分に軽減されている。第5図は据えつけのため，つりあげられた固定子である。



第4図 固 定 子 四 隅 支 持 法
Fig. 4. 4 corners support method for stator



第5図 固 定 子
Fig. 5. Stator

2. 回 転 子

回転子軸はニッケル・クロム・モリブデン鋼の一体鍛造品が使用されている．材料は真空鋳造法によって脱ガスされ，適切な鍛造と熱処理を行なうとともに遷移温度を低くし，残留応力を小さくすることに積極的な努力を払って機械の安全性をさらに向上させている。

巻線導体は大きな熱応力を生ずるため匍匐現象によって変形を生じ，層間短絡をおこす危険があるから匍匐限度が普通の銅に比べてはるかに高い銀入銅を使用し，端部を絶縁間隔片によって確実に固定している．巻線は溝内に特殊黄銅のくさびによって押えられる．このくさびは磁極中心部に設けられた銅製ダンパ導体とともにダンパ巻線の役目もかね，逆相負荷の負担能力を向上させている．巻線端の保持環は回転子軸と同様に高い機械的強度が要求され，同時に損失軽減のため非磁性にする必要があるので冷間加工された高合金非磁性鋼が使用されている。

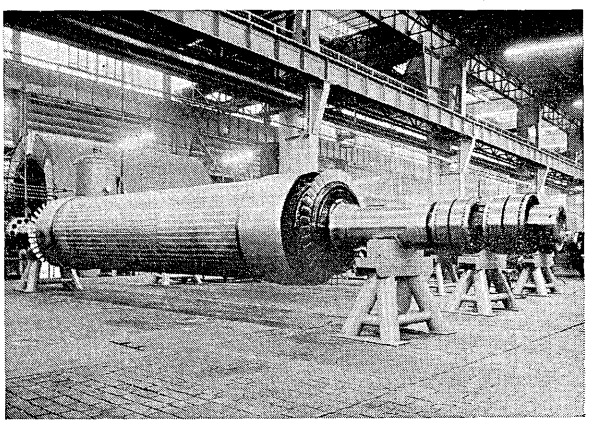
スリップリングは保守点検の便を図って軸受外部の空気中におかれ，回転子巻線との接続リードは機内ガスの気密を保持するため特別な考慮が払われている。すなわち，リードバーを軸中心に貫通させ，巻線端とスリップリングにおいて半径方向にスタッドを配置しておのおの

接続する．リードバー貫通穴端部は気密構造とし，巻線側およびスリップリング側の接続スタッドは軸に対して耐熱ゴムパッキンによってシールされるので，これらパッキンが同時に不良とならない限り気密が保持され，信頼性が倍加されている。

この回転子は危険速度が運転速度よりも低いいわゆるたわみ軸として設計されている．危険速度の設定は，適正な軸受配置によって良好な振動特性を求めるべく軸受油膜のばね定数と減衰係数，ブラケットのばね定数などの支持条件を実験的に確かめて導入し，きわめて厳密に行なわれている．他方，製造段階においては，たわみ軸であることから多面バランスをとり，さらに巻線に加熱，過速回転を繰り返して絶縁物の枯れを固定するなどして，バランシグ作業に入念慎重を期している。

据えつけ状態における振動状況は後章に記すとおりであるが，きわめて良好なものといえよう。

第6図は完成した回転子を示す。



第6図　回　転　子
Fig. 6.　Rotor

3. 軸　　受

軸受メタルは強制油循環方式により潤滑冷却され，始動用圧油供給装置をそなえている．ブラケットから絶縁物を介して球面座によって支持されるので，自動調心作用をもつとともに軸電流による軸受の損傷が防止される。

軸受メタル内面の形状は二円弧軸受の一種であって，オイルホワール防止軸受として考案されたトラークシュピーゲルを採用している。

ブラケットは鋼板溶接構造とし，回転子をささえ，同時に固定子わくとともに気密圧力容器を形成するものであるから，箱形構造として充分なこわさとをもたせている．また，ブラケットは分解組立の必要から水平方向に二分割されるが，この分割面と固定子わくへのとりつけ面には連続したパッキン溝が加工されており，組立後　溝にコンパウンドパッキンが封入され，完全な気密とりつけが行なわれる。

4. 水素ガス冷却器

前述のごとく冷却器は軸方向に4個設けられているが相当長いものとなるので振動，熱膨張および組立の容易さに対する考慮が必要である．冷却管群は2本組の特殊プレートフィン付管を採用し，管の曲がりこわさを著しく増して振動に対して有利にするとともに，プレートフィンの特長を生かして確実，容易な管の固定を行なっている。

フローティングサイドはゴムのダイアフラムにより気密保持を行ない，万一ダイアフラムに気密不良を生じても直接ガスもれの原因とならぬよう保護カバが設けられている．冷却器の組立分解を容易にするため，その側板にはローラが設けられ，固定子わくから冷却器を容易に引き抜くことができ，また冷却管の清掃は取付部の気密には無関係に機内にガスを充てんしたまま行なうことができる。

5. 水素ガス制御装置

この装置は発電機内に水素ガスを封入し，ガスの純度低下，漏えいを監視補償し，水素ガスの充てん，排出に際して爆発の危険のないよう保護する。

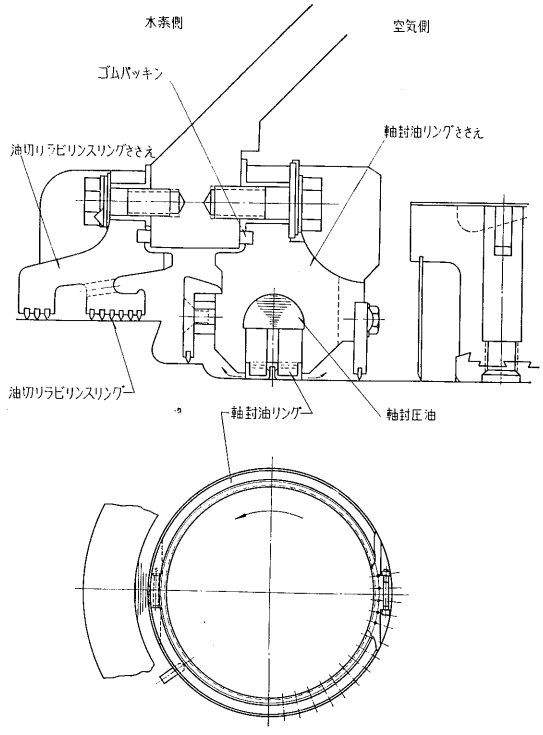
機内に水素ガスを封入するに先立って，まず炭酸ガスがボンベから気化器をへて発電機下部の撒布管より機内に充てんされる．熱線形ガス純度計により排出ガスの純度を測定し，炭酸ガスの純度が一定値以上になったならば水素ガスをボンベから減圧弁を介して発電機上部の撒布管から機内に封入する．純度計により排出ガスの純度を測定し水素置換の完了を確認したならば，減圧弁の設定により規定の機内圧力に昇圧し，以後水素の漏えいは自動的に補給されて圧力低下を防いでいる。

機内湿度制御のためにシリカゲルを用いたガス乾燥機がそなえられシリカゲルの再生は付属のヒータにより簡単に行なうことができる。

ガスの純度，圧力の低下およびガス温度の上昇に対する警報装置が設けられ，各計器，バルブ類は一つの操作盤に組み込まれている。

6. 軸封装置と軸封油供給装置

機内の水素ガスが軸を貫通して機外へもれるのを防ぐためブラケットに軸封装置が設けられる．構造図を第7図に示す．軸封装置は軸との間に狭いすきまをもったリングをおき，このすきまに機内ガスよりも高い圧力をもった油を圧送して，空気と水素との間をしゃ断する．機内の水素圧力によってリングが空気側に押しつけられ，



第7図 軸 封 装 置
Fig. 7. Shaft sealing

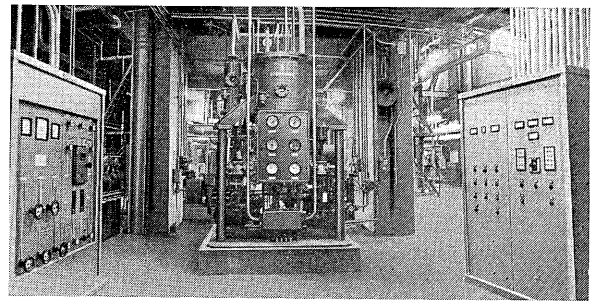
リングの自由な動きが拘束されてリングや軸の局部加熱を生じ，リングの局部加熱や焼損の原因となるので空気側に圧油を供給して機内圧と大気圧の圧力差を補償する。

軸封装置のリングはシール効果をあげるために軸とのすきまをできるだけ狭くする必要がある．したがって，リングは加熱による熱変形が均等に行なわれ，焼損の原因とならぬような構造にすることが重要である．このため，内面に白色合金を鋳込んだ鋼製リングが採用されている。

軸封油は機外に設けられた軸封油供給装置から供給され油圧はダイヤフラム式の差圧調整弁によって機内圧に対して常に 1 kg/cm² 高い差圧をもつよう調整している。

軸封油の供給が一瞬たりとも断えぬよう軸封油ポンプに予備を設けるほか，軸封油系統はタービン制御油系統に常用と別の差圧調整弁を介して結合されており，常用，予備の軸封油ポンプが故障した場合には自動的にタービン制御油系統から軸封部に油が供給され，さらに，その系統の差圧調整弁が故障した場合は手動により給油可能になっている。

事故を未然に防ぐよう軸封油供給系統にある各種タンク油面の高低，油温，油圧，真空度に対する警報装置が設けられ，これらの警報装置，各種タンクバルブ類は操作しやすい一つのセットにまとめられ，前記の水素ガス



第8図 ガス制御装置（左），軸封油供給装置（中央）および警報装置（右）
Fig. 8. Gas controller (left), shaft seal oil supply device (center) and alarm device (right)

制御装置とともに発電機床下に配置されている．第8図はそれらの配置状況を示す。

V. 励 磁 機

川崎火力第5号機は回転子巻線の冷却に直接水素冷却を採用している関係で励磁電流および励磁容量は比較的大きくなっている．これを供給する励磁機は減速歯車を介して主発電機に直結されている．大形のタービン発電機の励磁電力の供給方法で最も重要な問題は信頼度である．本機で採用されている方式では励磁に供給されるエネルギーは発電機，およびタービンの慣性エネルギーでささえられるので，系統擾乱の著しい場合にもタービン発電機の励磁は確保でき，速応励磁なども有効に行なわれるので，充分の信頼性を得ることができる．速応性もタービン発電機の安定運転に充分なものが得られ，しかも調整簡単で経済的である．また減速歯車も長い運転実績を持っており充分な信頼性を持って使用できる。

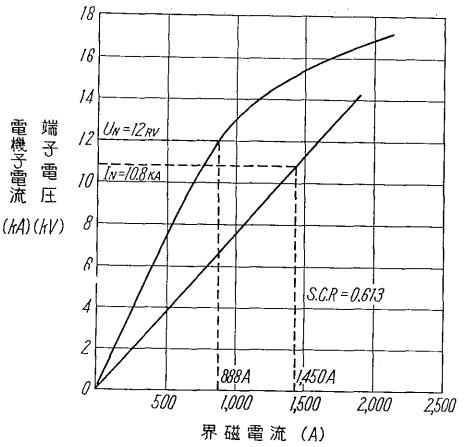
本機の励磁機に採用されている AVR 制御装置は別に詳述されるのでそれにゆずるが，制御用電源として交流発電機よりなる副励磁機をそなえている。

スリップリング，主・副励磁機は共通のカバで覆われている．カバにはブラシの点検取換を容易にするため点検窓をつけ，内部には照明がつけられている．またカバの移動を考慮して手動操作のオイルジャッキにより車輪を介して持ちあげ容易にスライドできるよう設計している。

VI. 試 験 結 果

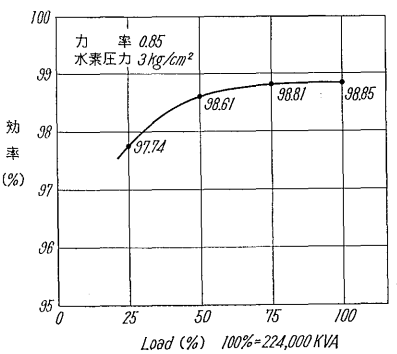
1. 特性曲線および効率曲線

第9図は本発電機の無負荷飽和曲線および三相短絡曲線である．これによれば短絡比は 224 MVA で 0.613 である．第10図は水素圧力 3 kg/cm²，力率 0.85（遅れ）定格電圧における効率曲線である。



第9図　無負荷飽和曲線および三相短絡曲線

Fig. 9. No load saturation curve and 3ϕ short-circuit curve

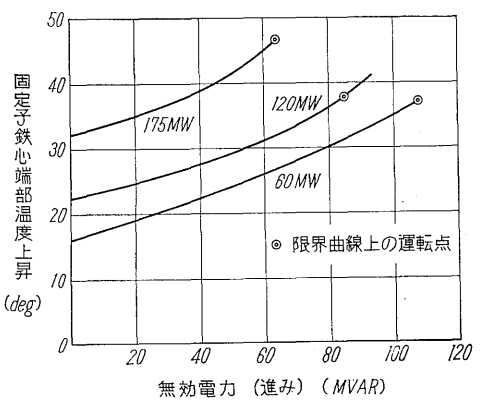


第10図　効率曲線

Fig. 10. Efficiency curve

2. 進相運転試験

近年では系統構成，負荷構成の変化で電圧調整のためタービン発電機の進相運転に対する要求が生じてきた．タービン発電機の進相運転では，固定子鉄心端部の温度上昇の問題と安定度の問題があるので発電機の進相運転許容限界曲線で規定された範囲内で，このような問題なしに運転が保証される必要があるので充分の試験を行なった．その結果が第 11 図である．ここに示した固定子鉄心端部の温度上昇はサーモカップルを取り付けて測定したものであるが，一番高い場合でも 47° 程度で運転に何等危険のないことが判明した。



第11図　進相運転時固定子鉄心端部温度上昇

Fig. 11. Temperature rise in end portion of stator core at leading power factor operation

またこの試験の際に内部位相角の測定を行なったが進相運転限界での運転では内部位相角が 66° まで開くが，きわめて安定で，別の論文で紹介する AVR，および低励磁保護方式などの効果もあいまって，安定度の問題に対する不安もまったくないことが確認された。

3. 振　　動

発電機本体の軸受振幅値(片振幅)は次のとおりであった．ただし，測定時の出力は 224MVA 回転速度は 3,000 rpm である。

タービン側軸受

水平方向：2.2 μ，上下方向：3.3 μ，軸方向：1.2 μ

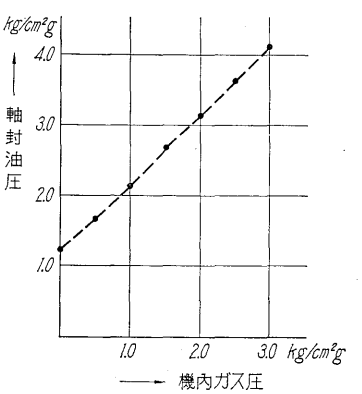
励磁機側軸受

水平方向：1.2 μ，上下方向：1.6 μ，軸方向：0.6 μ

この数値は大形高速機のものとしてきわめて優秀なもので，回転子の製作，バランス調整技術の秀でていることを示すとともに前述の固定子四隅支持法は充分にその効果を発揮していることがわかる。

4. 軸封油圧特性と水素ガス消費量

機内ガス圧と軸封油圧の関係は第 12 図に示すとおりで広い範囲のガス圧に対してすぐれた動作特性をもっている．消費量は 機内ガス圧 3 kg/cm²g で運転中の水素ガス 160 l/h (3.8 m³/day) で保証値を大幅に下回る良好な成績であった。



第12図　軸封油供給用差圧調整弁の特性曲線

Fig. 12. Characteristic curve differential pressure regulator for seal oil supply device

VII. あ と が き

本稿においては東京電力・川崎 5 号機として納入されたシーメンス製大形タービン発電機の特長と試験結果について述べた．運転成績の優秀さ，取い扱りの容易さからきわめて好評裡に営業運転中であり，当社としても喜ばしい限りであるが欧州系技術の優秀さをこの機械のみにとどめず，できるだけ広範囲の機械に適用することにより日本の火力発電事業の発展の一助となることを祈ってやまない．なお本機の組立試験にご協力頂いた東京電力の関係各位に感謝の意を表する。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。