

電源開発株式会社松島火力発電所向け

# 556MVAタービン発電機の完成

## 556MVA Turbine Generator for Matsushima Thermal Power Station of Electric Power Development Co., Ltd.

電源開発株式会社松島火力発電所用1号機として納入された556MVAタービン発電機は、信頼性、運用性、経済性、保守性などの面から、多様化しつつある要求にこたえるため各種の改善新技術が盛り込まれている。この中でも、特に固定子巻線、固定子鉄心端部や界磁巻線あるいはスリップリングの冷却法の改善により、従来構造に比較して温度上昇は大幅に下がり、また温度分布も均一化することができたこと、更に軸系設計時の入念な振動解析をはじめとする各種の低振動化技術の採用によって、現地でのバランス工程を大幅に詰めることができたこと、あるいは将来の中間負荷火力機運用や高速再閉路の運用に備えて採用された最新技術、大容量機としては国内で初めて採用した静止形励磁方式の現地試験結果などについて紹介する。

花田 剛\* Tsuyoshi Hanada  
大井 征雄\*\* Masao Ooi  
牧野 祐治\*\* Yūji Makino  
丸井 信行\*\* Nobuyuki Marui  
万城 実\*\*\* Minoru Banjō

### 1 緒 言

最近の電力事情を取り巻く環境は、脱石油化という背景から石炭燃焼火力の見直し、LNG(液化天然ガス)発電の推進、あるいは原子力発電プラントへの利用依存度の増進など急激に変容化しつつある。このような情勢の中で大形火力プラントは、その運用上、従来のベース負荷運転から中間負荷火力としての頻繁な起動、停止や負荷調整を行なう必要が生じてきており、また、系統の大規模化とあいまって安定して電力を供給できるように系統安定度向上や高速再閉路の運用という、系統側からの要求も加わってきている。これらに加えて、発電所建設用地の入手難や省資源の観点から、各機器の効率、従来機の高い水準を保ちながらしかも無駄を省いた小形で軽量の構造を指向しなければならない。以上述べたよう

に機器への要求が多様化してきているので、いっそう高い信頼性も求められるようになっていくとともに、保守のしやすい構造への配慮も忘れられてはならない。大容量の火力プラントを取り巻くこのような背景の中で、電源開発株式会社松島火力発電所(以下、松島火力発電所と略す。)1号機は、国内初の大容量石炭燃焼火力発電プラントとして1981年1月から営業運転に入って以来、好調な運転を継続しているが、これに用いられている556MVAタービン発電機は、上述した種々の要求を満たした新技術を適用した大容量火力用発電機として画期的なものであり、従来の500MW級火力用タービン発電機に比べ、数多くの新技術が取り入れられている。以下、これらの特徴を中心に紹介する。

表1 松島火力発電所1号機発電機の特徴 最近の電力事情を背景として、本発電機は運用性、信頼性、経済性、保守性などに対する要求が多様化しており、これにこたえるために各種の新技術が採用されている。

区 分	No.	技 術 的 特 徴	効 果	運用性の向上	経済性の向上	信頼性の向上	高効率の維持	保守性の向上
一 般	1	水素ガス圧4atgの採用	冷却性能向上	—	○	○	—	—
固 定 子 巻 線	2	片道流直接水冷却方式	冷却性能向上	○	○	○	○	—
	3	スーパーハイレジンコイル絶縁 (耐ヒートサイクル絶縁)	中間負荷運転に有効	○	—	○	—	—
固 定 子 鉄 心	4	鉄心端部冷却方式改善	冷却性能向上	○	○	○	—	—
	5	鉄心端部磁界の解析	損失低減、冷却性能向上	○	—	○	○	—
回 転 子	6	2段調質シャフトの採用	} 高速再閉路対策として } 有効	○	—	○	—	—
	7	シャフト段付部R(半径)の増大						
	8	耐ヒートサイクル形回転子巻線絶縁	中間負荷運転に有効	○	—	○	—	—
	9	空隙バッドリングの採用	冷却性能向上	○	—	○	—	—
	10	3次モード振動の解析	} ● 現地バランス調整作 業の簡略化 ● 安定な運転の保証	—	○	○	—	—
	11	通電バランス装置によるサーマルバランスの採用						
12	ベクトル振れ差直結法による振動低減化							
スリッ プ リ ン グ	13	定圧形ブラシ保持器の採用	保守の軽減	—	—	○	—	○
	14	ブラシ保持器の最適冷却配置	冷却性能向上	○	—	○	—	—
軸 受	15	オイルリフト付構造	低速時の油膜厚み確保	○	—	○	—	—
励磁方式	16	静止形サイリスタ分巻自励励磁方式の採用	● 速応性改善 ● 発電機架台寸法減少	○	○	○	○	○

\* 電源開発株式会社火力部火力発電課課長 \*\* 日立製作所日立工場 \*\*\* 日立製作所大みか工場

## 2 松島火力発電所用556MVAタービン発電機の特徴

本発電機の特徴を列挙すると、下記のように要約される。

- (1) 固定子巻線、鉄心端部、回転子巻線あるいはスリップリングなどの重要部品の温度を低減し、また温度分布も均一化することにより、信頼性の向上を図っていること。
- (2) 将来の運用に備えて、中間負荷火力機として、また高速再閉路対策としての耐力増強が図られていること。
- (3) 現地での立上げ前のバランス調整作業を容易にし、また運用後も安定した運転を継続できるように振動を低減するため、蓄積された種々の技術を採用したこと。
- (4) 系統の安定度増強を目的とし、また発電機架台の寸法低減をもねらった、静止形サイリスタ分巻自励励磁方式を採用したこと。

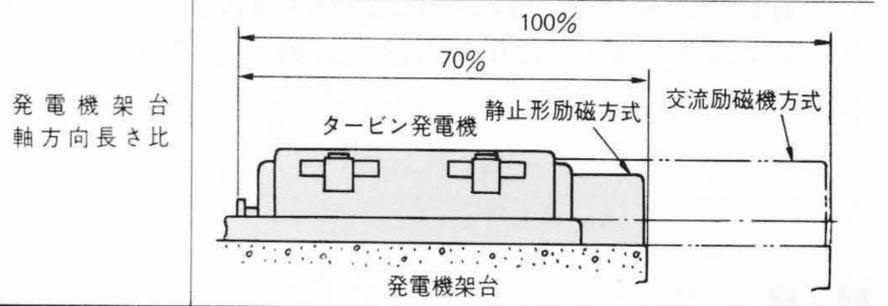
などであるが、その他適用されている諸技術をまとめて表1に示す。これらの技術を適用した本発電機は、今後の大容量火力用発電機のモデル設計の一つとなるものであり、以下に詳述する。

## 3 発電機仕様と基本設計諸元

本稿で紹介する556MVAタービン発電機の主な仕様と設計諸元を表2に、また、従来の500MW級タービン発電機との仕様比較も同表に示す。ここでは、特に水素ガス圧4atgの採用、静止形サイリスタ分巻自励励磁方式の採用、発電機架台の縮小が特徴的なこととして挙げられる。従来機に比べ、水素ガス圧を3atgから4atgに上げて、冷却効果の増大を図り(表1中の1及び表2)、更に詳しく後述するように、固定子巻線、固定子鉄心端部、回転子巻線の温度分布の低減と均一化を図ることによって、全体としてバランスのとれた設計となっている(表1中の2、4及び9)。このため、電気装荷を高くとることができ、その分だけ機器の軽量化が可能となった。発電機の据付架台面積は静止形励磁装置採用の効果も加わって大幅に低減されており(表2)、建屋寸法も含めてその経済的効果は大きいといえる。

表2 500MW級タービン発電機仕様比較表 従来形の500MW機に比較し、水素ガス圧4atgを採用しコンパクト化を図るとともに、静止形サイリスタ自励励磁方式の採用とあいまって、発電機架台は大幅に縮小された。

発電所	松島火力発電所	先行類似発電所	
ユニット名	1	3	
ボイラ燃料	石炭	石油	
定格	容量	556,000kVA	560,000kVA
	力率	0.9(Lagging)	0.9(Lagging)
	出力	500,400kW	504,000kW
	電圧	22,000V	22,000V
	相数	3	3
	周波数	60Hz	60Hz
	回転数	3,600rpm	3,600rpm
	水素ガス圧	4.0atg	3.0atg
短絡比	0.58	0.58	
励磁装置	静止形サイリスタ分巻自励方式	直結形交流励磁機方式	
励磁電圧	500V	440V	
	0.7	1.0	



## 4 発電機の構造

発電機の基本構造は、固定子巻線が直接水冷却方式を、回転子巻線及び鉄心は、内部に封入された水素ガスによる直接冷却方式を採用しているが、これらは、従来機の実績に裏付けされた高い信頼性をもった技術に基づいているものである。

### 4.1 固定子

固定子巻線は温度低減に効果大の片道流直接水冷却構造を採用し、熱履歴に対する余裕を十分取るように配慮している(表1中の2)。また、用いられているエポキシワニス含浸絶

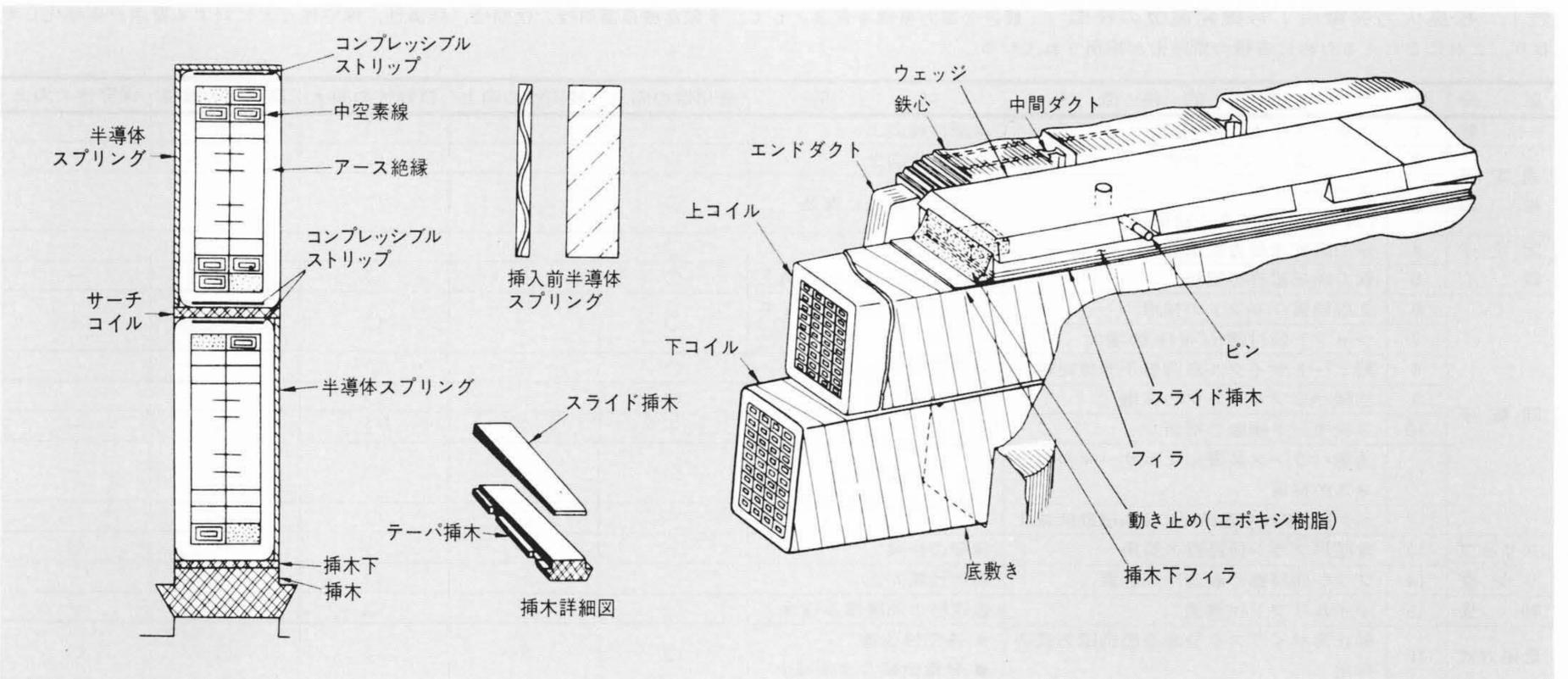


図1 固定子コイルのロット内固定法 スロット内のコイルは、互いに電磁力による圧迫反発力を受け振動しようとする。これを許すと静電気を帯びて、いわゆるバイブレーションスパークによる絶縁損傷を招きかねない。そこで、スロット内コイルが電磁力によっても振動しないように、しっかり固定させる構造が採用されている。

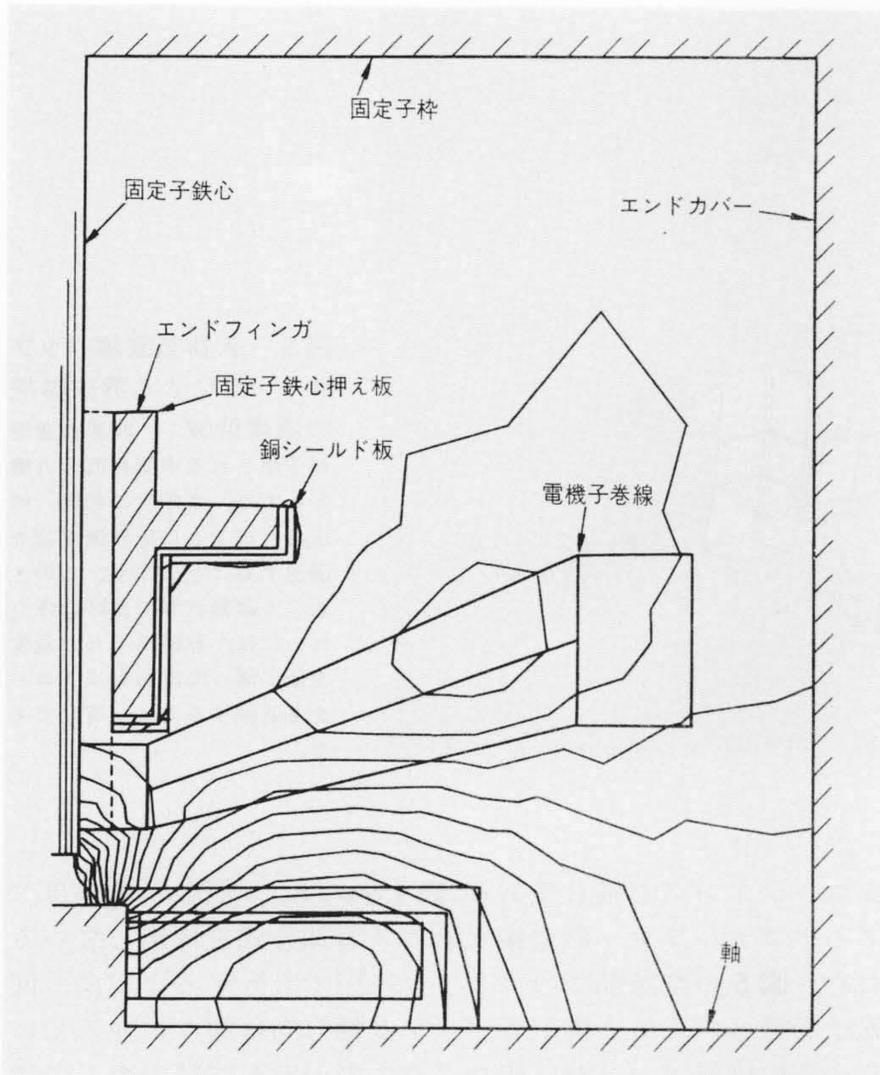


図2 鉄心端部の磁束分布 鉄心端部のFEM(有限要素法)による詳細な電磁界解析は、漂遊負荷損を低減する最適構造決定に用いられている。

縁高圧コイルは、多くの実績に裏付けされた耐熱履歴性の高いものであり(表1中の3), その構成は図1に示すように、スロット内では確実にスロット壁との接触を保つように半導体スプリングによる振動防止を図り、いわゆるバイブレーションスパikingによる絶縁の損傷を防ぐように留意している。また、コイルエンド部は、熱伸縮に対して柔軟に対処できるようにスライド構造が採用されている。固定子鉄心は、高品質低損失けい素鋼板の採用により鉄損の軽減を図っている。鉄心端部は、階段状に空隙を広くするような構造として、軸方向磁速が鉄心端部に集中して入り込まないように配慮されている。FEM(有限要素法)による綿密な鉄心端部電磁界解析を行ない、漂遊負荷損を低減できる最適な構造を選び(表1中の5), 損失の増加を極力抑える構造とすることができた。図2にその解析例を示す。これに加えて、体格の軽量化に伴う機械損の低減効果、鉄損の低減効果などにより、電気装荷の増加による損失増加分を吸収し、発電機としての効率を非常に高いものにすることができた。更に、端部の冷却法にも工夫が加えられた結果、鉄心端部の温度上昇も図3に見るとおり従来機に比較して大幅に下がり、温度分布も均一にすることができた。

#### 4.2 回転子

回転子シャフトは、中間負荷火力向け発電機のような頻繁な起動、停止を行なう場合、起動のたびごとに予熱が必要であってはならないので、軸材には遷移温度の十分に低い靱性の高いNi-Mo-V鋼が選ばれている。更に、図4(a), (b)に示すようにシャフト鍛造材調質時の温度に若干の差を与える、い

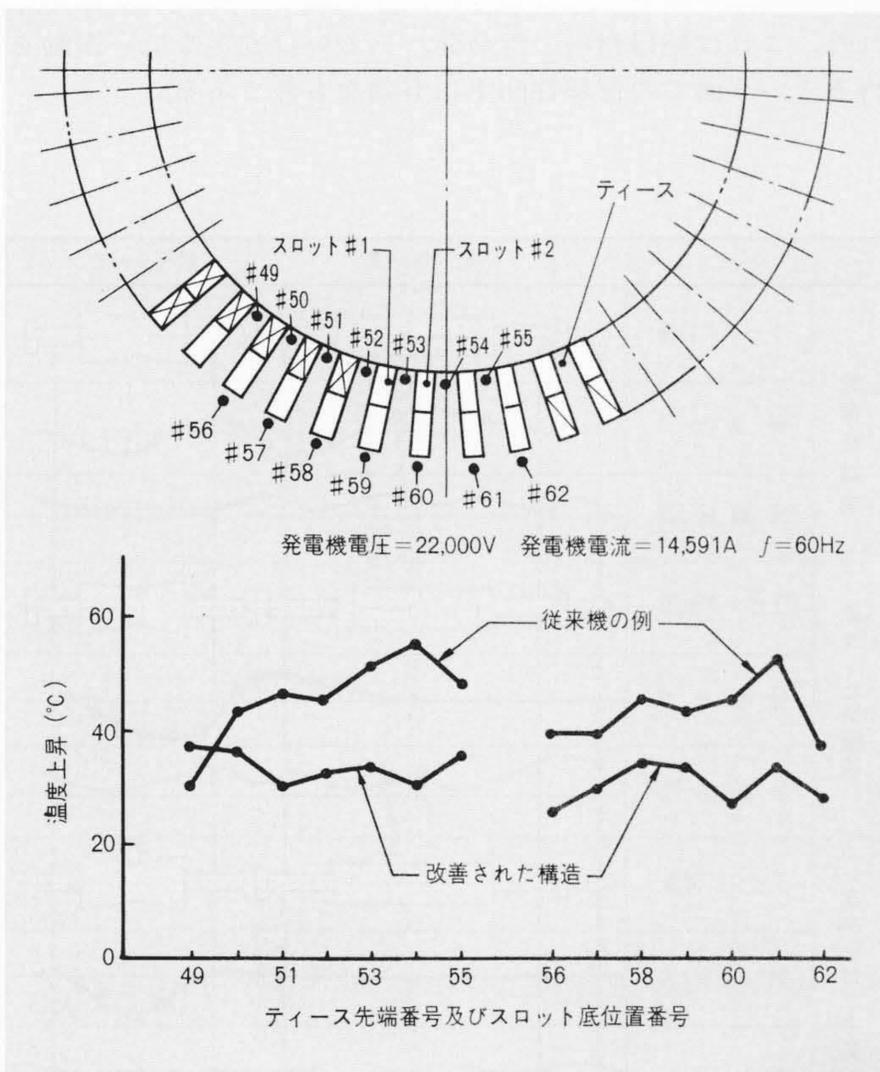


図3 鉄心端部の温度分布 鉄心端部の冷却構造の改善によって、従来機に比較して温度分布が一様になり、局部的に高いところが無くなった。また、温度も平均で約15℃下がっている。これは特に進相運転時に対する余裕が増すという点で、信頼性が向上するものである。

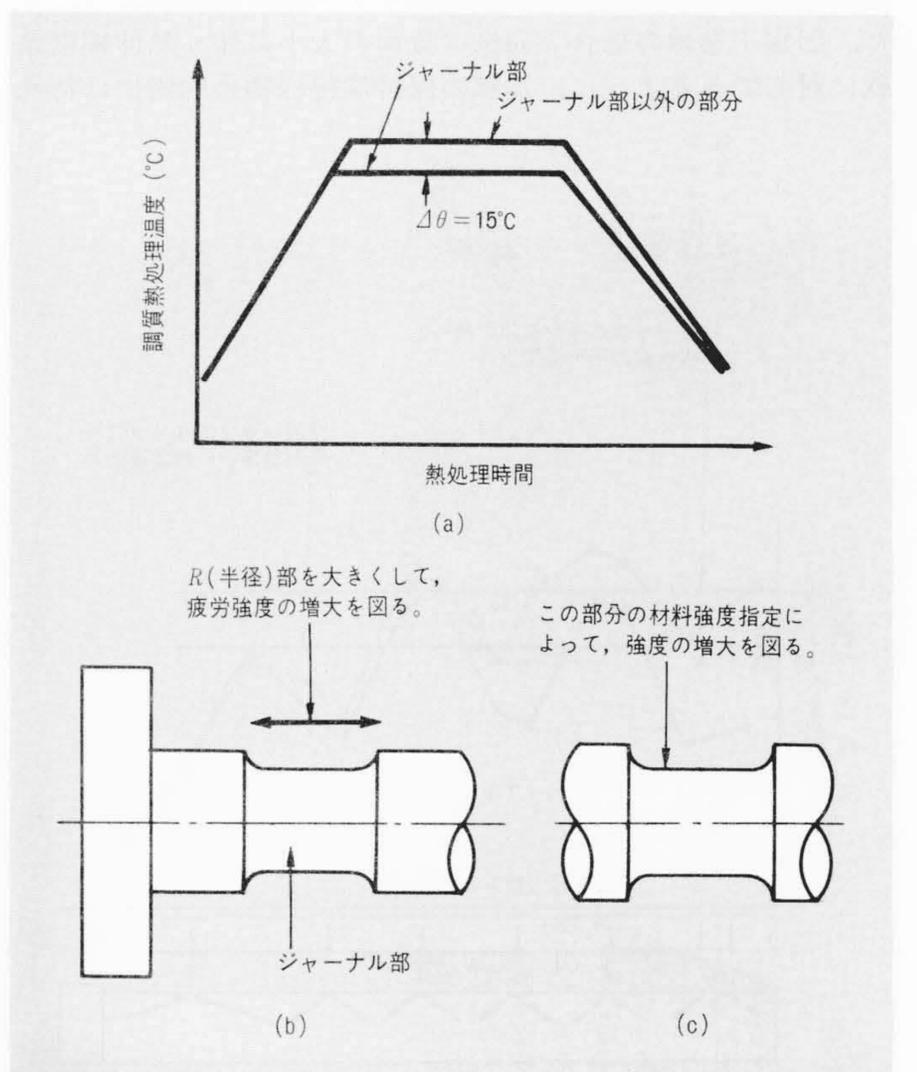


図4 再閉路耐力向上策 将来の運用に備えてジャーナルの強度を高めるため、調質焼戻し工程の際、ジャーナル部の焼き戻し温度を、ロータ素材胴部よりも15℃低い温度とする2段調質を実施した。またジャーナル部段付半径を大きくすることにより、応力集中を緩和し、軸系の疲労強度の向上にも努めた(c図)。軸系許容トルクで約10%、再閉路許容回数で約80%向上させた[(a), (b)図]。

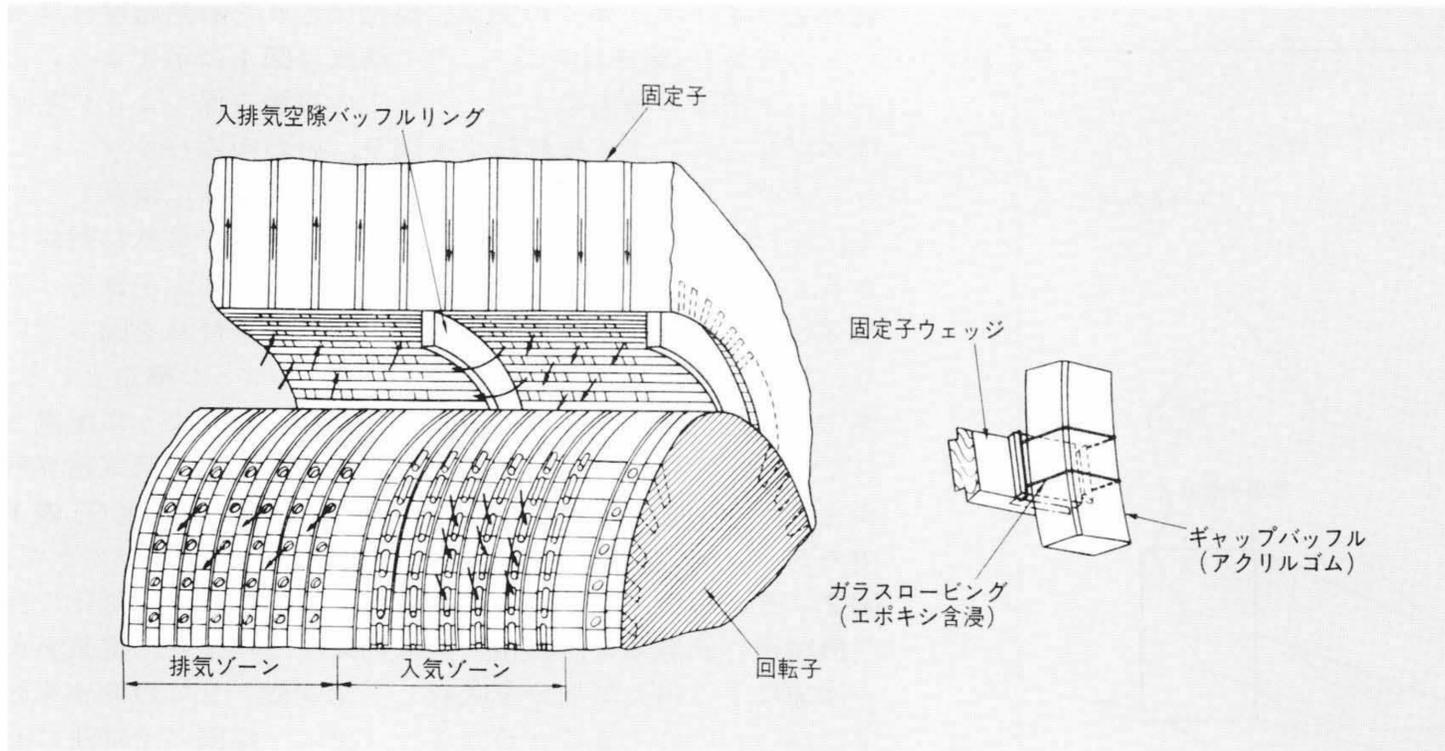


図5 入排気空隙バッフルリングによる界磁巻線の温度低減 将来の運用が予想される中間負荷火力機としては、多頻度の起動、停止のたびごとに危険速度域を通過することになる。このときにも振動状態を良好に保つためには、界磁コイルの温度を低く保って熱振動ストロークを低減することが有効である。

わゆる2段調質技術の採用によってジャーナル部の強度増大に努め(表1中の6)、また同図(c)に示すように軸段付部の半径を大きくすることによる疲労強度の増大などが図られている(表1中の7)。これは、将来、高速再閉路を実施した場合に予想される過大軸トルクに対しても、十分耐えられるように軸の信頼性増大をねらったもので、厳密な非破壊検査により有害な欠陥の内在しないことが確認されたうえで、使用されている。

界磁巻線は銀入り銅としてクリープ強度を高め、絶縁物も耐摩耗性の高いエポキシ樹脂含浸ガラス繊維積層板とし、また、固定子巻線の場合と同様に負荷の大小に伴う熱伸縮に柔軟に対応できるように、端部の保持環絶縁物の内側には特殊

なコーティングを施してある(表1中の8)。回転子巻線は、ダイアゴナルフロー形直接水素ガス冷却方式を採用しているため、図5の空隙部でのガスフロー図でも分かるように、回転子巻線への入気と排気各ゾーンが軸方向に順々に並んでいる。この排気ゾーンから出た温ガスの一部が空隙を介して隣り合う入気ゾーンに回り込むのを防ぐため、入排気ゾーンの境界部の固定子内周側に、同図に示すような空隙バッフルリングが設けられている。工場での確認試験の結果、従来の不付機に比較して界磁巻線の温度上昇は、図6に示すような分布となり、予想されたとおり約20%低減できることが確認された。これは絶縁材料の寿命面、あるいは安定な低い振動を得るといった面での信頼性向上に有効なものである。

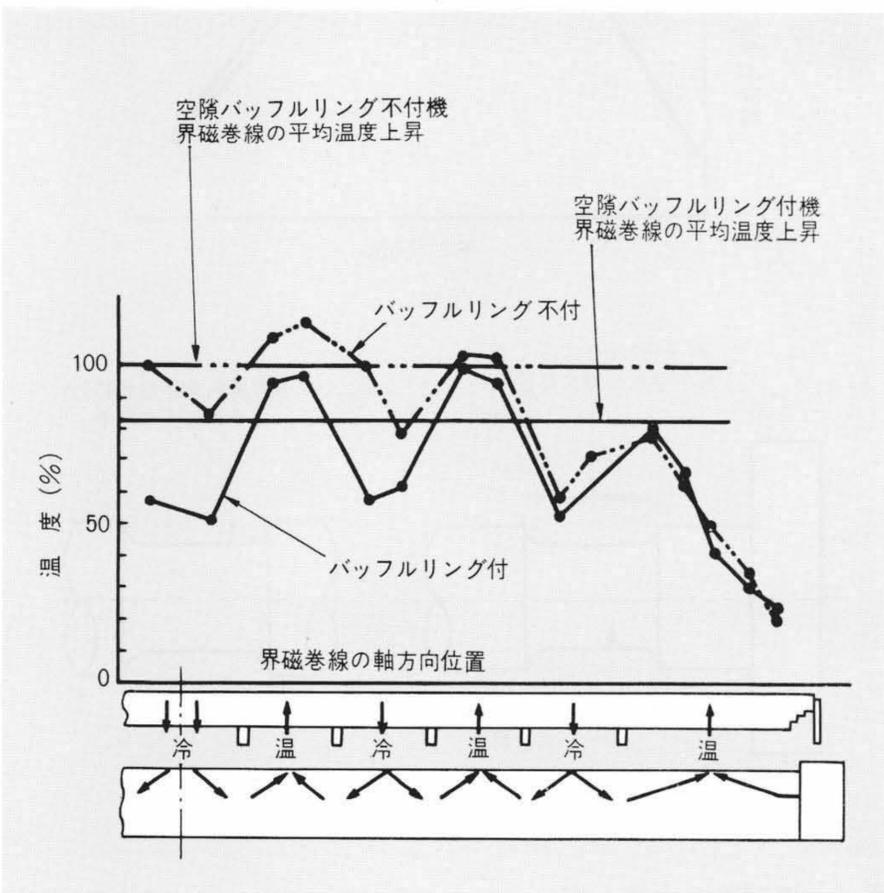


図6 界磁巻線の軸方向温度分布 空隙バッフルリングは、界磁巻線温度上昇を約20%低減する効果がある。これは界磁巻線の熱伸び量の低減に結び付くため、熱履歴耐力を増大する効果がある。同時に、熱的不平衡に起因する熱振動の低減にも寄与するところが大きい。

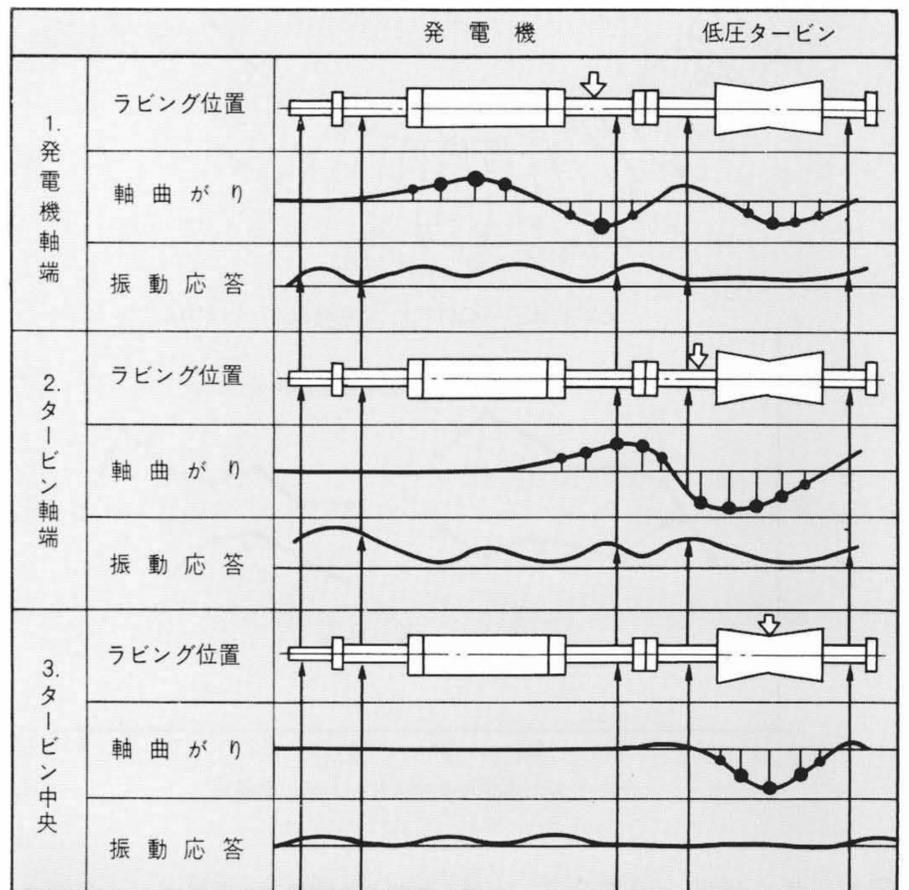
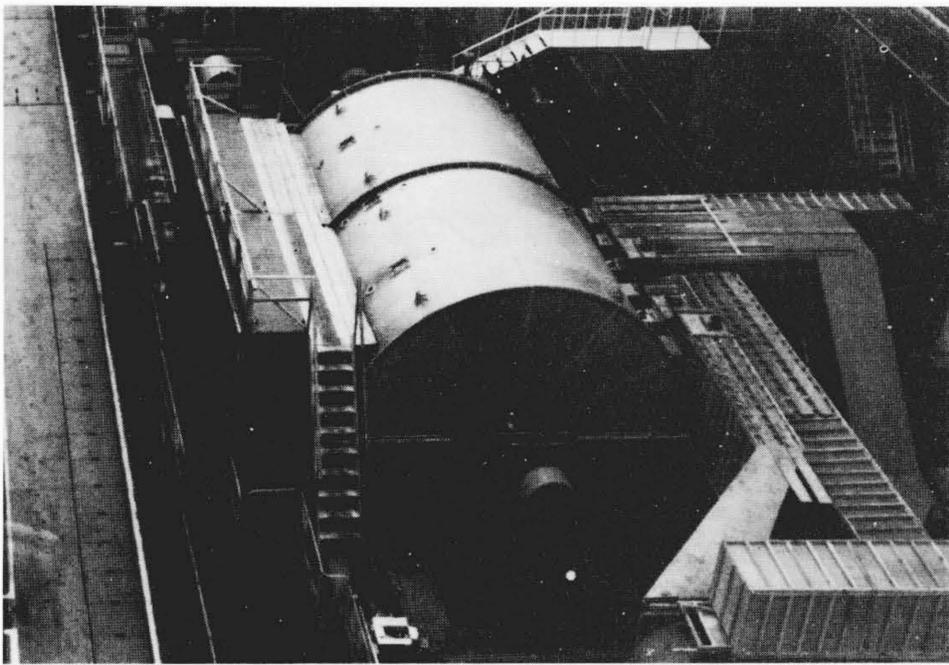
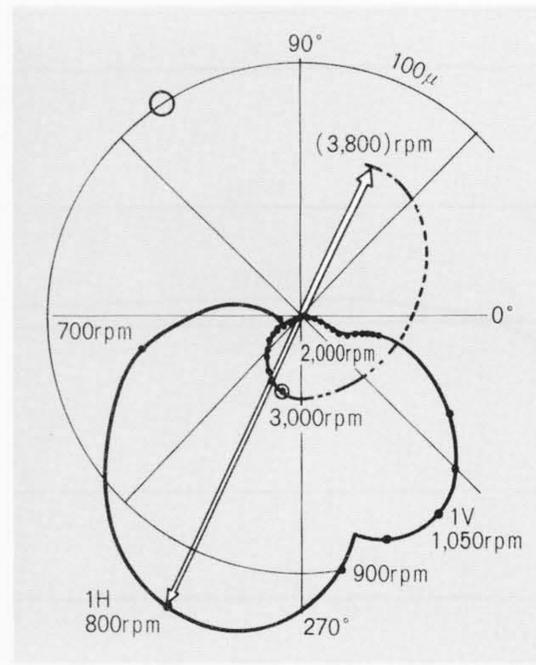


図7 3次モードの振動応答計算 3次モードの振動に対し、振動感度の低い軸形状を得るために、コンピュータを使った危険速度計算と振動応答計算が行われた。



(a) フルアンペア通電バランス装置



(b) 危険速度・定格回転の通電バランスによる通電ベクトル軌跡

図8 フルアンペア通電バランス装置  
現地定格運転時と同じ界磁巻線温度を実現するもので、計測設備として振動モード計測用光学式振動計、回転子表面測定用サーモカメラ、回転子表面撮影用ストロボカメラなどを備えている。本装置を使用することによって、発電機回転子のあらゆる速度での多点振動モードをも測定できるようになったので、振動設計上で果たした役割は大きい。

### 4.3 軸振動の低減

タービン発電機の信頼性向上の一環として発達してきた低振動化技術が採用されている。すなわち、現地直結後の立上げ、あるいは運転に入ってから振動要因と考えられている3次モードの振動に対して振動感度の鈍い構造を得るために、軸設計の段階で図7に示すように、種々な位置での不平衡荷重に対する軸曲がりのモードや、振動応答などを含めてコンピュータを用いた振動解析を実施し(表1中の10)、従来機に対し振動感度の改善を目指した。また、前に触れた負荷の変動に起因する熱振動ストロークを軽減するための空隙バブルリングの採用に代表される設計上の工夫に加えて、工場での現地状態を再現した条件での最新のバランス技術による最適バランス状態の追求が行われた(表1中の11)。これは、現地での起動、停止時の速度上昇、下降の間に危険速度を通過するとき、あるいは負荷の変化に対しても安定した低い振動状態を維持できるように細心のバランス管理を行なったものであり、日立製作所が最近新設したフルアンペア通電バランス装置を用いて行なわれたものである。従来は固定子の中に回転子を組み込んで行なう無負荷電圧発生試験や、三相短絡試験でも現地全負荷時の70%以下の界磁電流しか通電できないという状況があった。図8に示す本装置は、全体が非磁性材で作られている特殊なケーシング中に入れ、スリップリングを通じて界磁電流を流すことにより、工場での現地全負荷と同じ界磁巻線温度が得られ、この状態で危険速度を含めて、各速度域での振動状態を各種の監視装置を用いて観測することが可能となったものであるが、本発電機用回転子は、この装置を用いて危険速度領域でも通電して、振動状態を拡大して観測する、いわゆる拡大感度試験を実施して、最適バランス状態を得るように努めた。更に、現地でのタービンとの直結でも、タービンのHIT特性と発電機の負荷ストロークが打ち消し合う方向に軸を直結するベクトル振れ差直結法の採用によって直結した結果、新たに生ずる振動要因の軽減にも努めている(表1の12)。この結果、現地立上げ時のバランス調整作業も、従来機に比較して飛躍的に改善されたことが実証できた。

### 4.4 その他

大容量機になると、界磁電流も増え比例してブラシの数も増す。したがって、スリップリング上に配置されるブラシは、数十個にも上り、その冷却を十分に良くするようにしないと、

ブラシの摩耗の促進、あるいはスリップリング部温度過大に起因する軸振動の発生などを引き起こす。本発電機ではブラシの温度が安定して低く保たれるように、効果的な冷却を得るような最適配置の技術を確立した(表1の14)。また、ブラシホルダも保守が一段と簡略化されたブラシ圧力調整不要の定圧ばねを用いたブラシホルダを採用している(表1の13)。図9に、この定圧形ブラシホルダを示す。更に、低速運転時の軸受潤滑油の油膜厚みを確保するために、オイルリフト付構造としてメタルバビットの長寿命化を図っている(表1の15)。

### 5 静止形サイリスタ分巻自励励磁方式の採用

火力発電プラントの大容量化、発電所の立地条件、あるいは系統の長大化が進むにつれて、安定度増強の観点から静止サイリスタ方式採用への機運が高まりつつある。また、従来形回転励磁機方式に比較して、振動に対する配慮が不要であり、軸長が短くなることによって発電機架台構造も短くなるなど建屋計画へのメリットもあり、また保守も比較的容易であるなどの長点を併有するために、外国でも大容量機に静止サイリスタ方式を採用しつつあるが、国内では今回初めて大容量火力発電プラントに採用された(表1の16)。このため

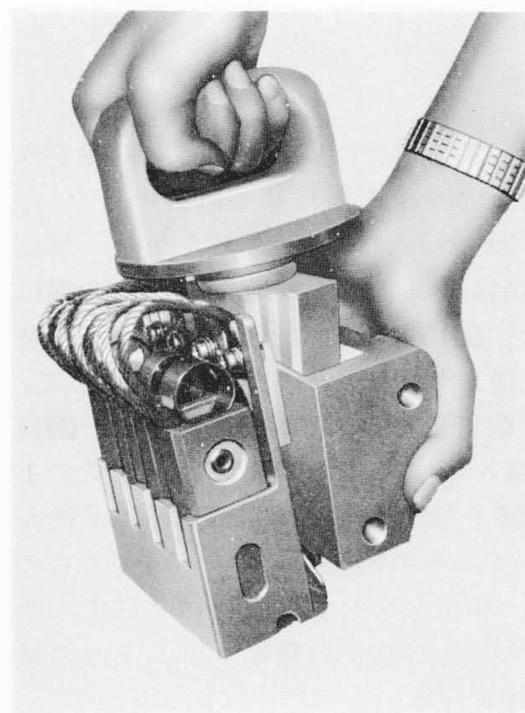


図9 定圧形ブラシホルダ 保守が容易で、しかもそのブラシ圧力は定圧ばねを使用しているので、運転中に一定に保たれる。また、圧力調整作業も不要となる。

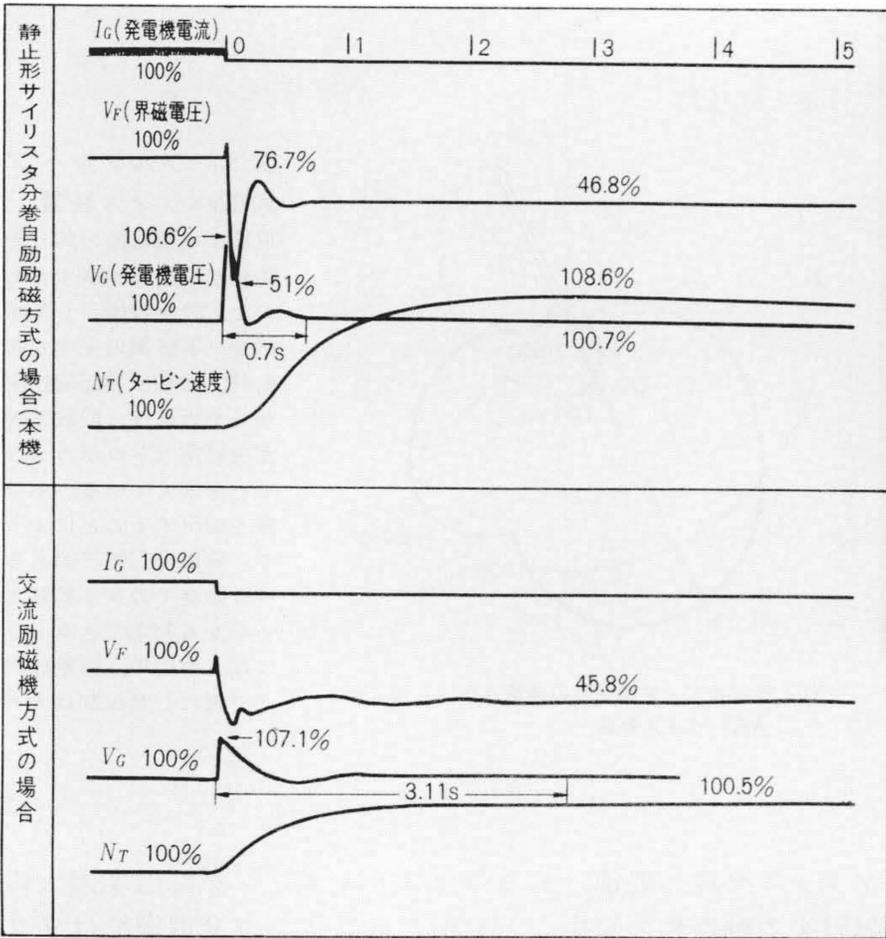


図10 全負荷遮断時の電圧応答特性 静止形励磁方式のほうが交流励磁機方式に比べ約4.5倍応答が速い。

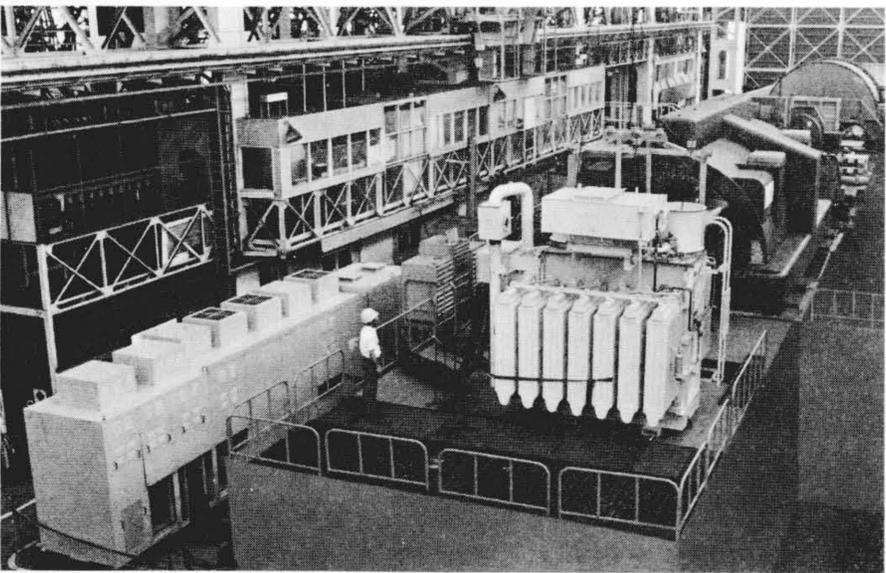
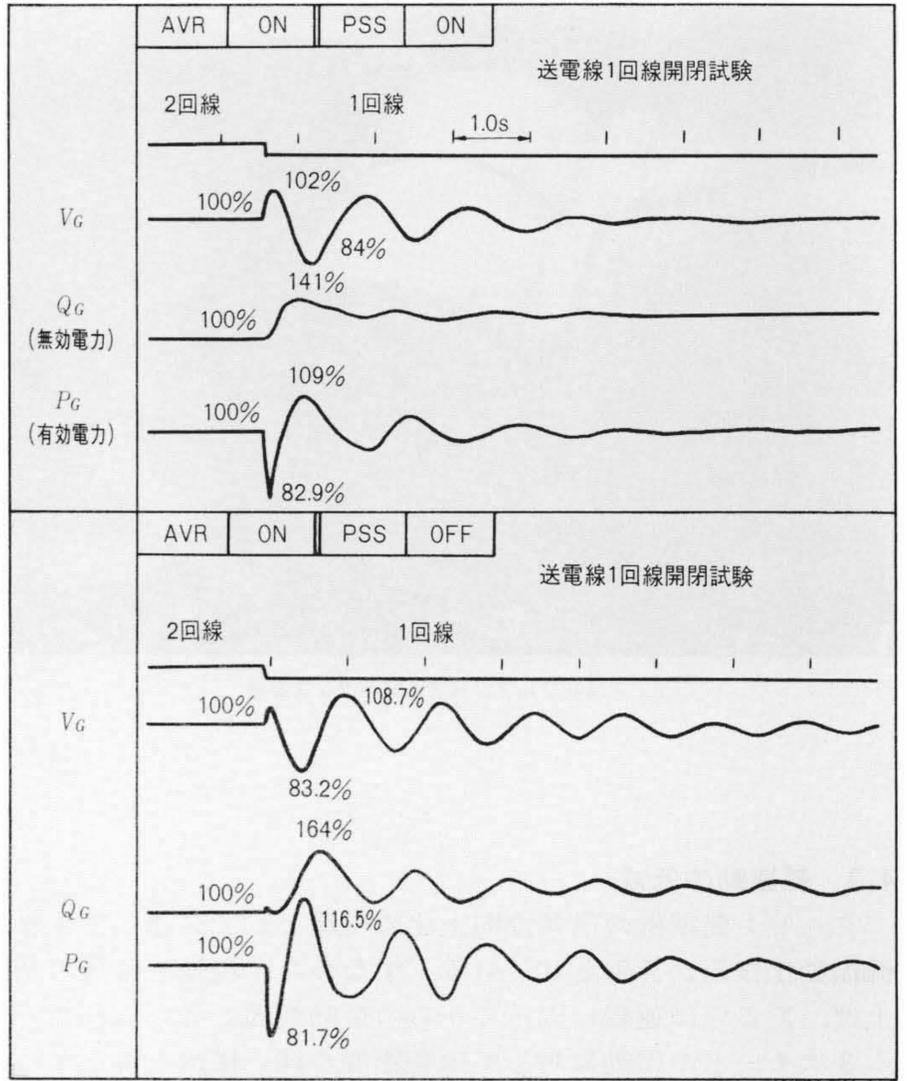


図11 サイリスタ静止形励磁装置の工場組合せ試験 大容量火カプラントへ最初のサイリスタ分巻自励励磁品の採用のため、特に入念を期して異例ながら発電機、サイリスタトランス、界磁スイッチキュービクル及びAVR(自動電圧調整器)キュービクルを一箇所(日立製作所工場)に集めて、組合せ試験を行なったものである。

あり異例ではあるが、現地搬入前に工場発電機、励磁トランス、サイリスタ励磁装置などを組み合わせて試験を行ない、励磁系のシステムとしての性能及び信頼性をあらかじめ確認し入念を期した。結果的には工場試験、現地試験とも順調に所期の性能を達成できた。図10は現地での100%負荷遮断時の電圧応答を示すもので、従来の回転形励磁装置と比較して、速度で約4.5倍と著しく改善されることが実証できた。図11に工場での組み合わせ試験を示す。また、図12は現地での1回線系統遮断試験時の応答を示すもので、PSS(電力系統安定化装置)との併用によって、その特性がいわゆる優れたものになることが確認できた。本プラントでの成功によって、今後の大容量火力発電プラント及び原子力発電プラントへの積極的採用が進むものと期待される。



注：略語説明 AVR(自動電圧調整器), PSS(パワーシステム スタビライザ)  
 図12 1系統遮断試験時の応答 PSS付機は、系統じょう乱に対しても速く整定することが分かる。

6 結 言

松島火力発電所1号機用の発電機は、最近の電力事情の急変に起因して派生した多様な要求を満たすために開発され、実証されてきた種々の新技術が適用されており、今後の大容量火力発電所用タービン発電機のモデルともいふべき位置にあることを個々の技術的特徴の概要を例示しながら紹介した。この中で、特に回転子表面の通風改善、シャフトのジャーナル部の強度を増す2段調質技術の採用、固定子鉄心端部の冷却法改善及び綿密な磁界解析の結果、発電機の設計をバランスの良いものにすることができたこと、また、振動低減のための最新技術を適用した結果、現地立上げ前のバランス調整を簡略化できたこと、更に、大容量機への静止形サイリスタ分巻自励励磁方式採用の成功が、性能、建屋寸法及び保守の各面で優れていることを実証したことになり、今後の主流になるであろうとの見通しを得たこと、などを中心に記述した。本プラントの成功を基礎として、今後とも各電力会社の協力を得て、大容量火力用タービン発電機の信頼性をいっそう高いものとするため努力する考えである。

参考文献

- 1) 川村, 外: タービン発電機の新技術, 日立評論, 60, 11, 799~804(昭53-11)
- 2) 実松, 外: 最近における大容量タービン発電機の新技術, 日立評論, 62, 4, 268~272(昭55-4)
- 3) 渡辺, 外: 大容量タービン発電機の軸振動に関する最近の進歩, 日立評論, 59, 12, 977~982(昭52-12)