

発電機及び発電電動機に関する最近の技術進歩

Recent Developments in AC Generators and Generator-Motors

水力発電所の主機である発電機及び発電電動機は、省エネルギー時代に入り、いっそうの高効率と高信頼性が要求されており、このため新冷却方式、新構造などの面で技術進歩がなされている。また、それらの性能、信頼性が各種のモデルや試験装置で確認されている。ここでは、最近の高速大容量機に適用されているこれらの技術進歩の例と実機への適用結果、また最近需要が増えつつあるバルブ形発電機の技術動向も併せて述べる。

鈴木 登* Noboru Suzuki

丹羽貞彦* Sadahiko Niwa

1 緒言

小資源国である我が国で、国産でかつクリーンな水力は重要なエネルギー資源である。

技術革新の目覚ましい我が国の実情からみると水力発電機器は、飛躍的な進歩は目立たない面もあるが、エポキシコイルの実用化など地道な開発進歩が積み重ねられ、また電子計算機を用いた各種の解析法が開発され、各種大形試験装置による性能、構造面での信頼性確認が行なわれるようになった結果、超高速大容量機や、最近のエネルギー事情に沿った低落差用大容量バルブ形発電機などが製作、運転されるに至っている。

ここでは、高速大容量機に用いられる最新技術の一端について述べ、かつ実機への適用結果を紹介し参考に供する。

また、我が国でも急速に需要が高まりつつあるバルブ形発電機の分野での最近の実績についても触れる。

2 大容量高速形発電機における最近の技術動向

最近は応力解析及びその計算手法が進み、より精密化しておりまた、構造、寸法、応力及びその発生状況、疲労限界、材質などを考慮した上で材料に許容される欠陥寸法を設計段階で決めて検査判定基準にしており、加えて、より高信頼均質化された材料が入手できるようになった現在、回転体の安全率は材料の降伏点に対し従来の1.5から1.3に低減しても十分信頼性は確保でき、実際に採用されてきた。また、ロータリムに発生する応力は、最大値、平均値、局部応力分布など考慮の上適切な材質を選定すべきであるが、その破壊応力としては、ロータリムの平均応力が材料の引張り強さを超えたとき、材料が破壊に至ることを日立製作所では縮小モデル回転破壊試験機で確認している。次に大容量化、高速度化に伴う技術課題の主なものとして、発電機の通風冷却、回転体の強度及び軸受の高荷重化について述べる。

2.1 通風冷却

通風冷却に関する問題としては、高速機では、回転子径が比較的小さくロータリム内にラジアル通風ダクトを設けることができなため、回転子磁極間のアキシャル通風による必要があり、その場合、固定子内部を通る冷却風の分布や通風損失などの通風特性を把握する必要がある。

これを解明するため、図1に示すように寸法縮尺比を $\frac{1}{3}$ とした固定子、回転子を共に水槽中に設置し、流体的に相似回転速度で試験して各部の圧力、流速及び損失を測定する水流

モデル試験により特性を確認している。図2に試験結果の一例を示す。

2.2 回転体の強度

次に回転体の強度の問題としては、高速化に伴い磁極1個当たりの遠心力が増大するので、磁極とロータリムの結合構造として従来のタブテール方式に替わり、磁極1個に2個のTテールをもつ複列Tテール構造などの適用が必要になってくることである。これに関しては、磁極が薄鋼板を積層し、所要面圧で締め付けて使用するため、そのような積層構造での強度を確認しておくことが必要である。

図3に実物大積層磁極Tテールの引張り試験結果を、また

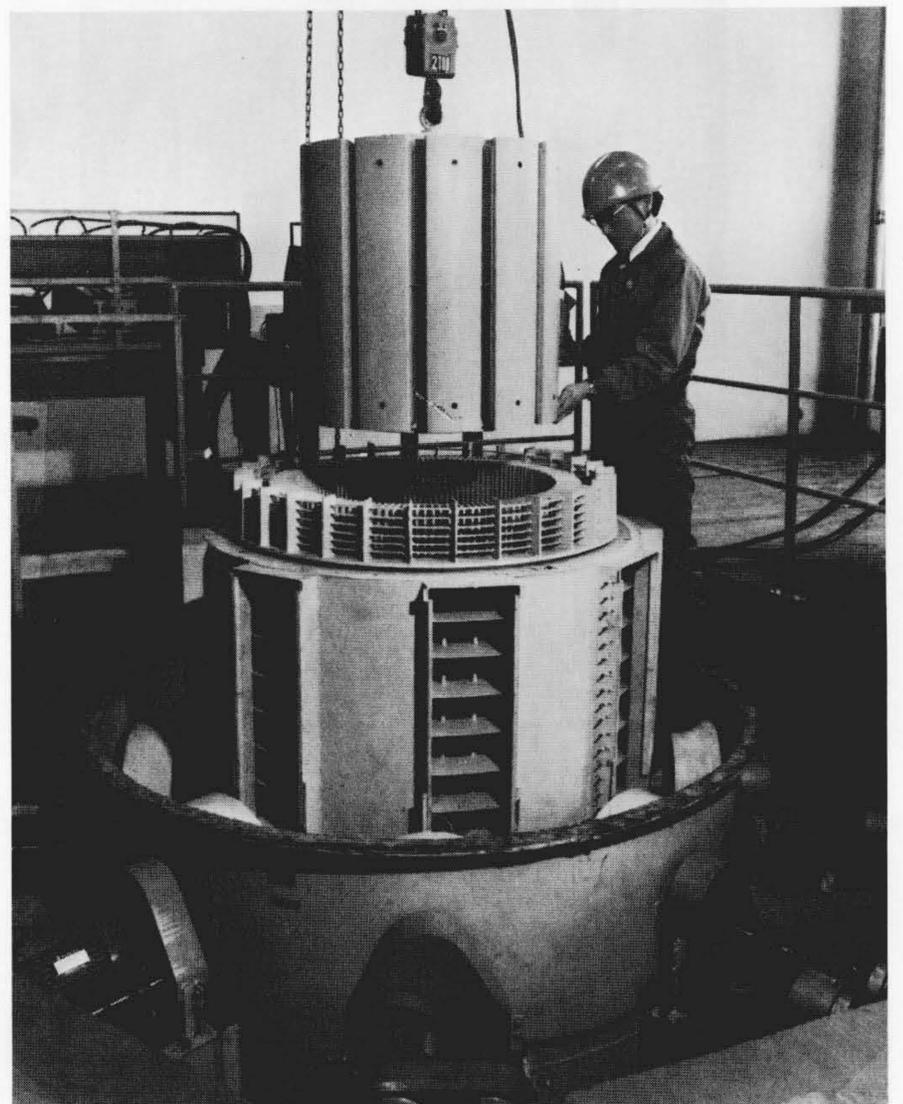


図1 大容量超高速機の $\frac{1}{3}$ 縮尺水流モデル 400MVA×600rpm級機の $\frac{1}{3}$ 縮尺水流モデルを示す。

* 日立製作所日立工場

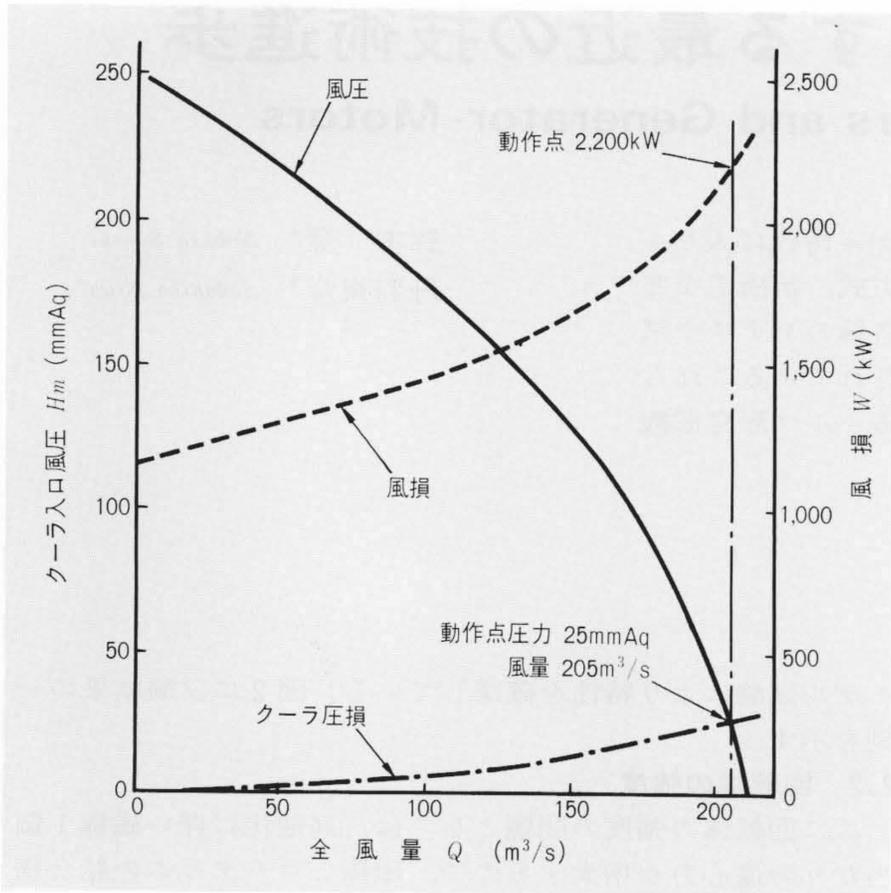
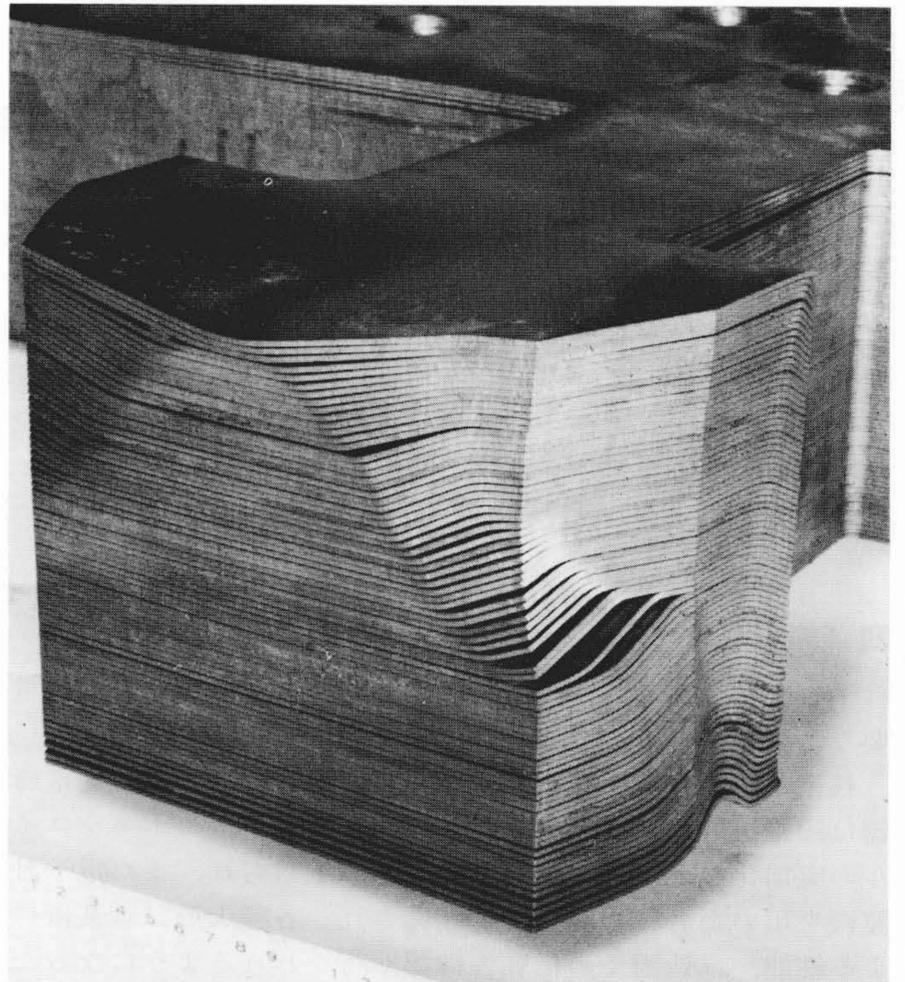


図2 大容量超高速機の水モデル試験結果 $\frac{1}{5}$ 縮尺水モデル試験結果から得られた400MVA×600rpm級機の通風特性を示す。



(a) 試験片取付状況

(b) 変形状況(板厚1.6mmモデル)

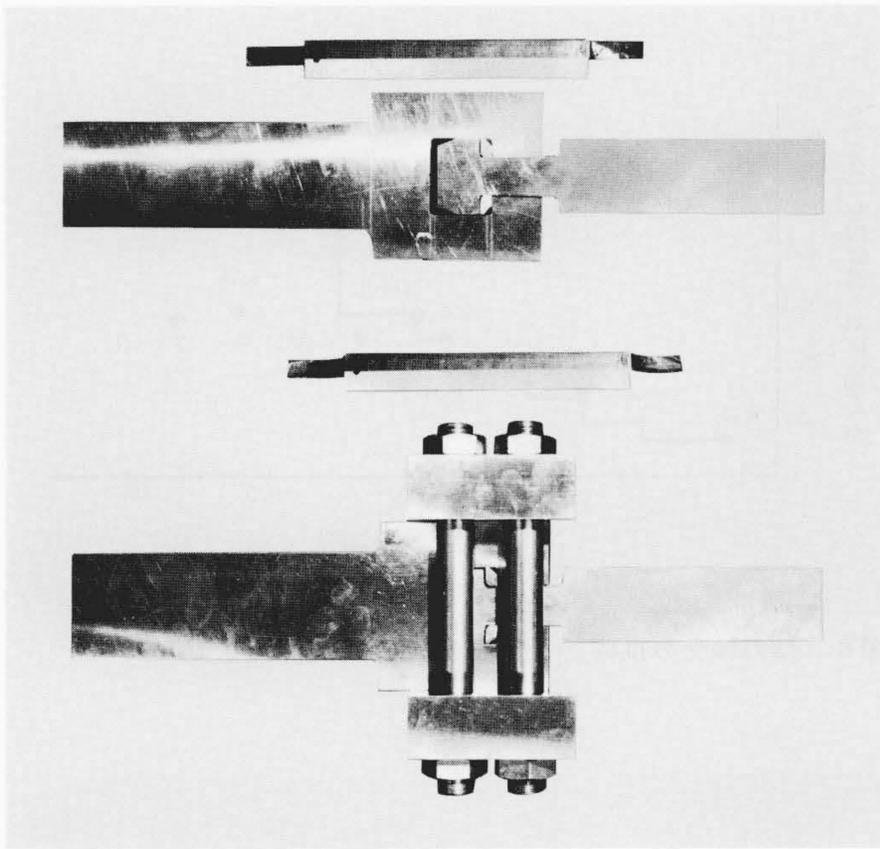
図3 大容量超高速機の実物大磁極強度試験 1,200t引張り試験機による実物大磁極Tテールモデル試験状況を示す。

図4に $\frac{1}{5}$ 縮小ソリッドTテールモデルによる疲労試験結果の一例を示す。これらの試験結果により、積層Tテールの崩壊強度は材料の降伏点にはほぼ一致すること、また、低サイクル疲労については十分な強度が得られることが確認できた。

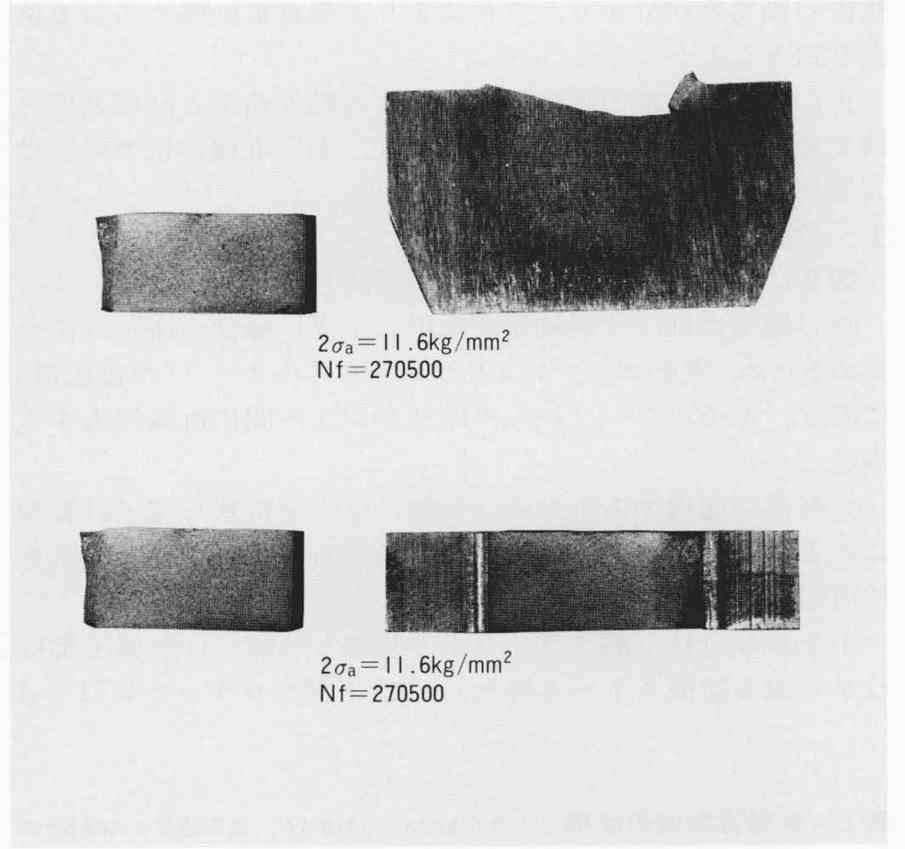
更に、ダブルテールと複列Tテールの中間強度をもつものとして、ダイヤモンドテールを開発済みである。ダイヤモンドテールは、ダブルテール方式と類似の経済性をもっており、かつ座屈強度がダブルテールの150%以上期待できるので、300MVA以上、400~500rpmクラスの発電機に最も適している。

2.3 軸受の高荷重化

大容量化に伴うもう一つの技術課題として、スラスト軸受の高荷重化がある。特に高荷重、高速用としては、二層式スラスト軸受、直接水冷却軸受などを開発し、縮小モデルによる特性の把握と実機への適用を図ってきた。一方、単機容量の増大に伴い工場での組立、回転テストは困難になってきている。これらを考慮すると、工場で実機大の軸受を実負荷試験できれば、軸受信頼性の確認は一挙に解決できる。日立製作所の4,000tスラスト軸受試験設備は、これに対処するもので、



(a) 試験片取付状況



(b) 破断状況

図4 1/4縮尺磁極Tテール疲労試験結果 ソリッドモデルによる疲労試験状況と疲労破断状況の一例を示す。

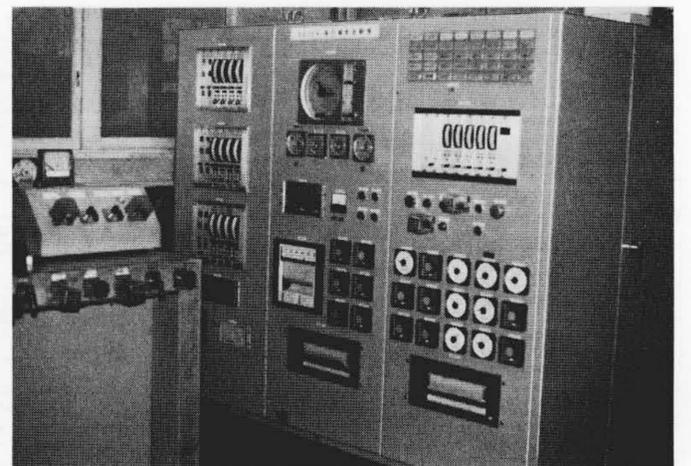
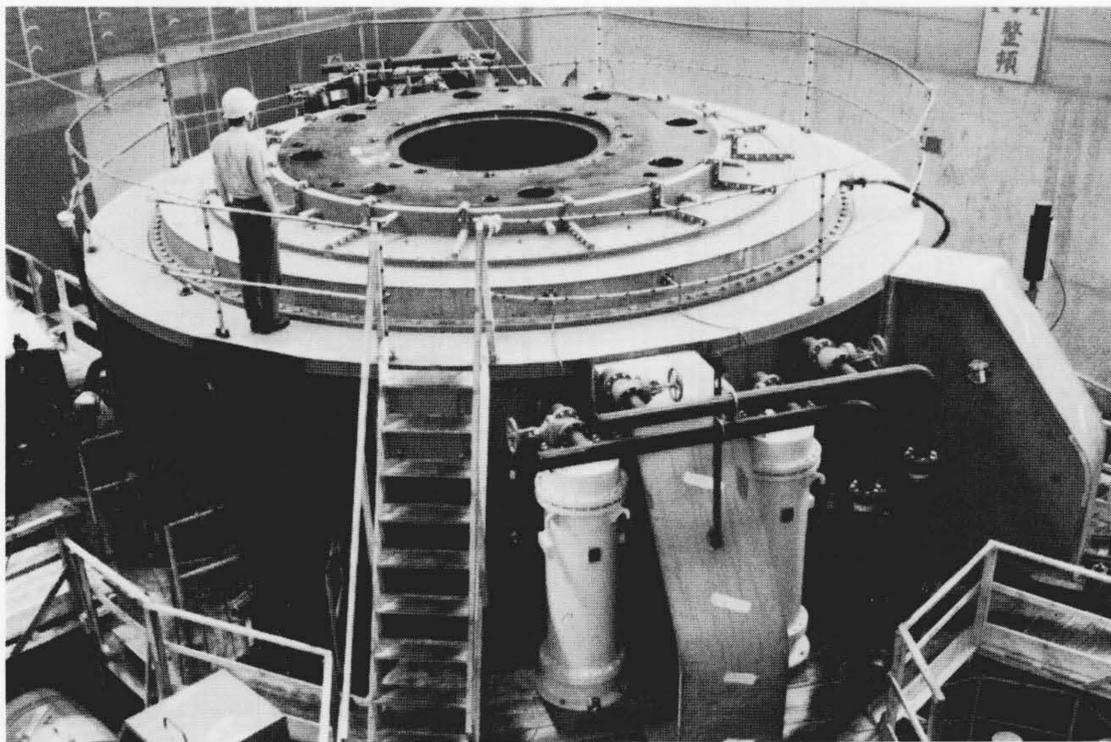


図5 4,000tスラスト軸受試験装置 4,000t軸受試験装置による試験状況(左)と試験盤(上)を示す。

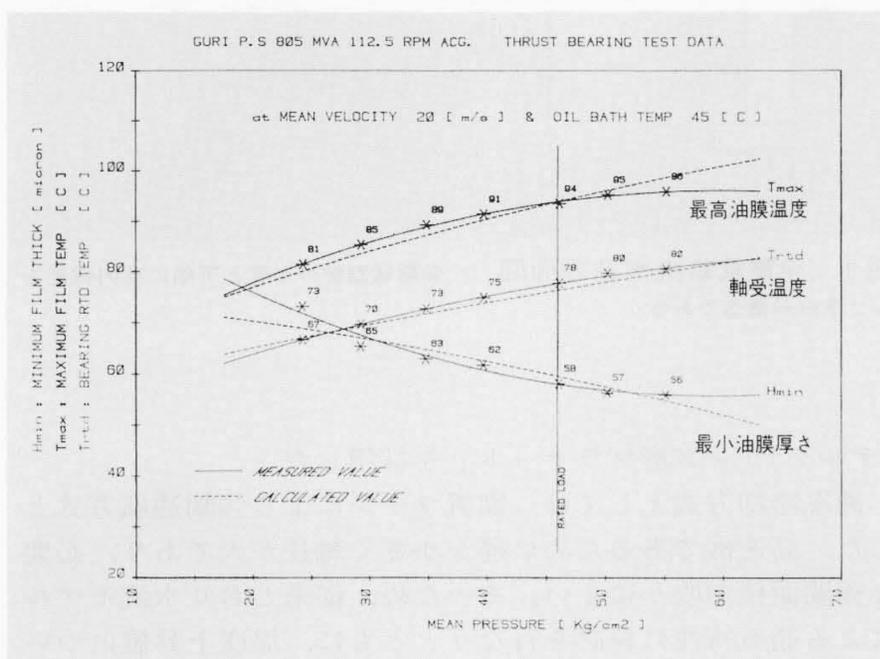


図6 805MVA機の実物軸受試験結果 4,000tスラスト軸受試験装置による試験結果の一例を示す。

これまで805MVA×112.5rpm発電機用2,667t二層式スラスト軸受の実物軸受, 316MVA×400rpm発電電動機用1,270t二層式スラスト軸受の実物大モデルなど, 多くのモデルについて実際と同一回転速度, 同一荷重で, 過渡現象をも含めて試験し特性を確認することができた。

図5に4,000tスラスト軸受試験装置による805MVA×112.5rpm発電機用軸受の試験状況を, 図6にその試験結果の一例を示す。定格軸受荷重2,667t, 平均面圧46kg/cm²に対し, 最大3,500t, 平均面圧60kg/cm²まで試験し, 設計特性と一致することを確かめている。

3 最近の発電電動機の構造, 通風

ここでは, 東京電力株式会社玉原発電所納めの発電電動機について紹介する。

表1に, その発電電動機の仕様を示す。また図7は, 水車発電機の推移を発電機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)の大小で, 発電機製作の

技術的難易度が分かり、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。

また図8は、推力軸受の推移を推力軸受荷重と回転速度の積で表示したものである。これより、本発電機の推力軸受は大形高速軸受となっているのが分かる。

(1) 設計・製作上考慮した事項

図9に、本発電電動機の構造断面図を示す。

推力軸受には、二層軸受を採用し、更に軸受の冷却効果を高めるため、電動ポンプにより温油をオイルクーラ(外部設置)に導き、オイルクーラからの冷油をシュー間に直接送入する構造とした。

大容量高速機であるため、振動には十分留意し電子計算機による精密解析の上、従来から実績のある次のような構造を採用した。

すなわち、(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テーを挿入し、(2)下部ブラケットには「Δ

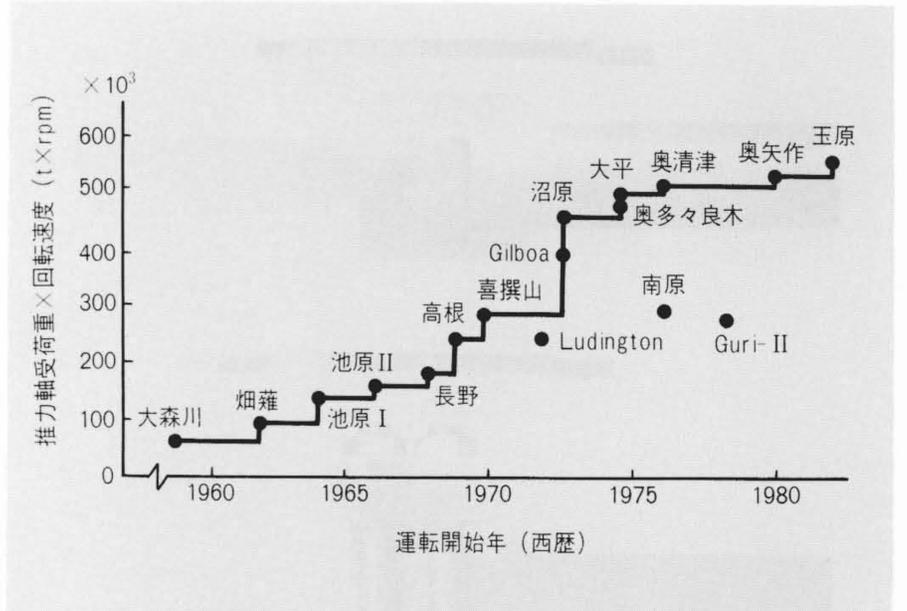


図8 推力軸受の推移 推力軸受の大形化の傾向を示す。

表1 発電電動機の仕様 出力335MVA/310MW, 回転速度が429rpmの高速大容量機である。

項目	仕様
形式	立て軸回転界磁準傘形 強制通風閉鎖風道循環形
出力	335MVA/310MW
回転速度	429rpm
極数	14
周波数	50Hz
電圧	13.2kV
電流	14,652/14,652A
力率	0.9(遅れ)/0.95(遅れ)
短絡比	0.8(発電機で)
CD ² (慣性モーメント)	6,600t・m ²
無拘束速度	145%
最大速度変動率	40%
推力軸受荷重	1,262t
励磁器	サイリスタ
始動方式	サイリスタ始動方式 (同期始動方式)

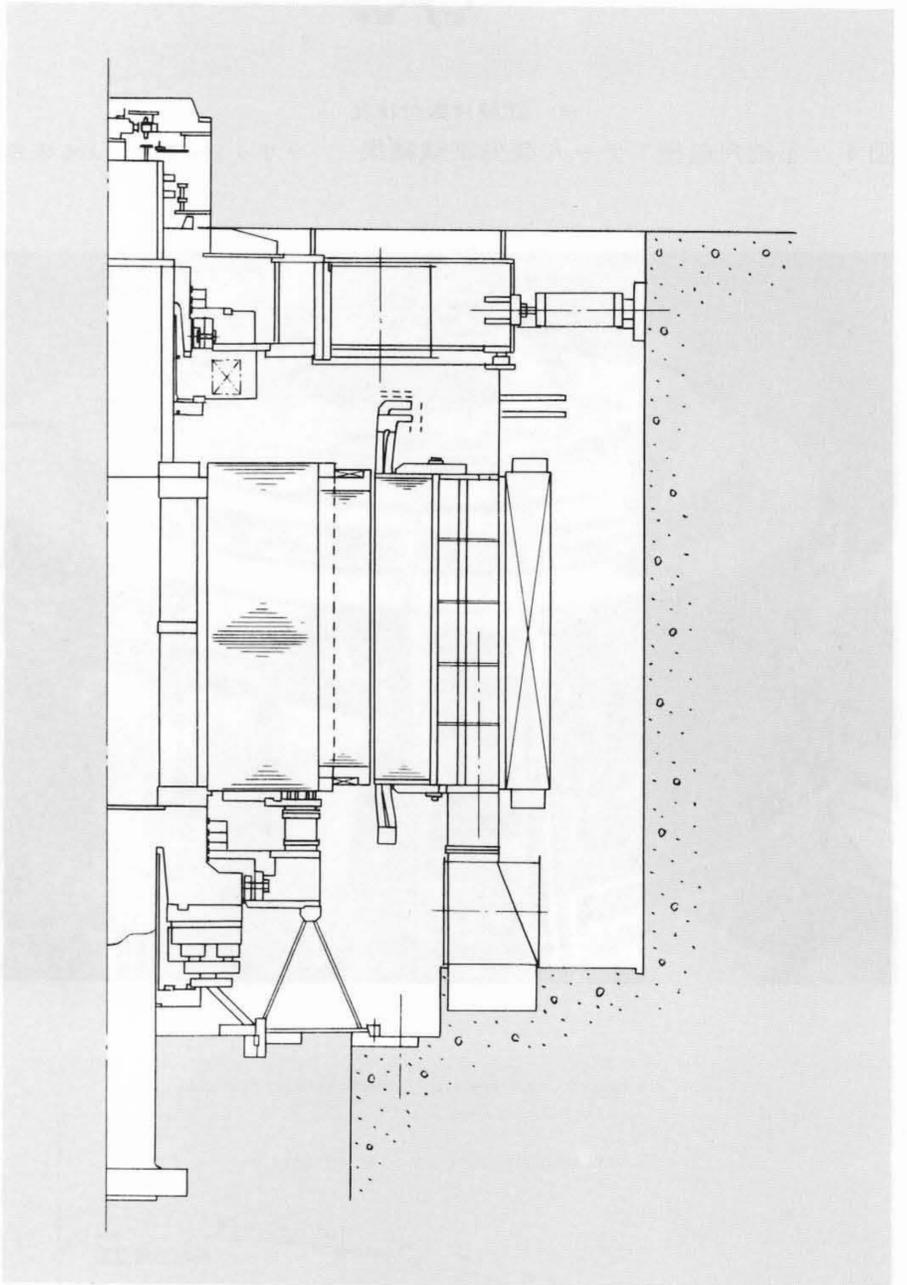


図9 発電電動機構造断面図 発電電動機の上部和下部に案内軸受をもつ準傘形構造である。

(デルタ)リング形ブラケット」を採用した。

通風冷却方式としては、別置ファンによる強制通風方式とした。高速機であるために径が小さく軸長が大であり、必要な極間面積が取りにくい。そのため、従来どおり水流モデルによる通風特性の検討を行なうとともに、温度上昇値についての詳細な検討を行ない万全を期した。

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

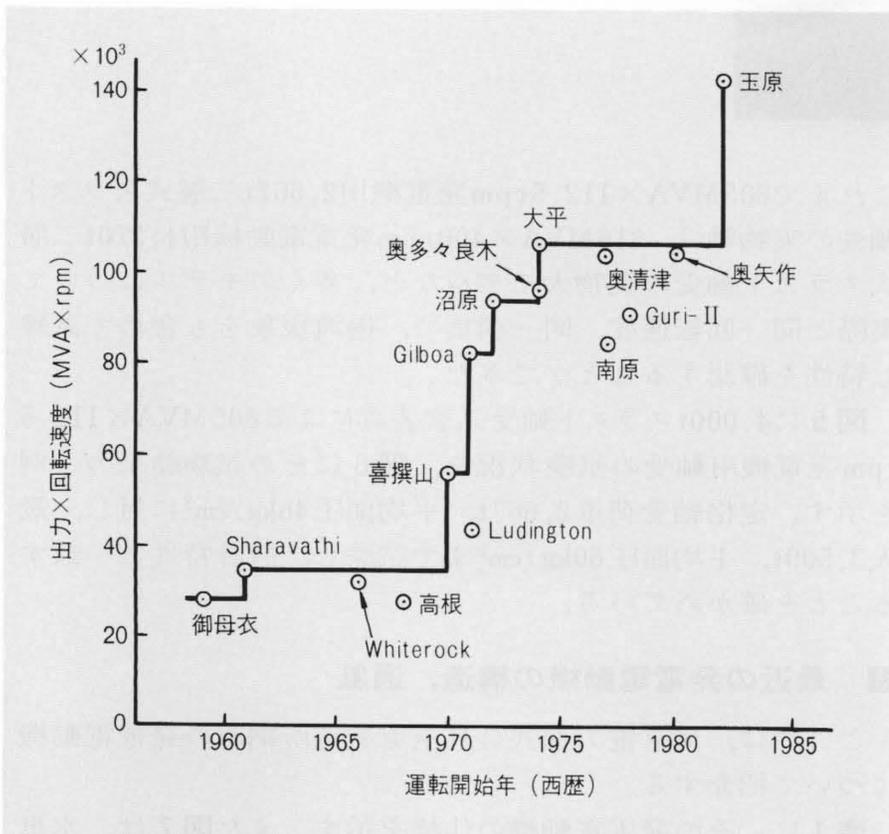


図7 発電機の推移 出力×回転速度の大小は、発電機製作の技術的難易度を示す。

表2 発電電動機の試験結果 工場及び現地での試験結果を示す。

試験項目		実測値	備考	
界磁電流 (A)	無負荷	700	発電機にて	
	三相短絡	870		
	定格力率	1,450		
短絡比		0.81	—	
電圧変動率 (%)	力率 1.0	25	—	
	定格力率	34		
リアクタンス (%)	X_d	124	発電機容量ベース	
	X_d'	36		
	X_d''	25		
	X_2	21		
	X_0	10		
温度 (°C)	巻線 (上昇値)	固定子	61.5	発電機定格負荷時 発電機定格力率時
		回転子	54.4	
	軸受	スラストメタル	54	
		上部ガイドメタル	42	
		下部ガイドメタル	45	
給水	9			
振動	上部ブラケット (μ)	27	—	
	下部ブラケット (μ)	20		
	コレクタリング ($\frac{1}{100}$ mm)	12		
	発電機主軸 ($\frac{1}{100}$ mm)	11		
はずみ車効果 ($t \cdot m^2$)		6,836	—	

用し、強度的に十分安全なものとした。また、コイルを強大な遠心力に耐える安全なものとするため、磁極を傾斜面をもつ鉄心(くら形構造)で構成させ、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。更に、磁極のロータリムへの取付形状には、ダブテールとTテールの間に位置付けられる新形ダイヤモンドテールを採用し、強度の向上を図った。

(2) 試験結果と検討

表2は、工場及び現地での試験結果をまとめて示したものである。

これにより、本発電電動機が良好な特性を示すことが確認された。

4 バルブ形水車発電機

このたび、米国アイダホ・ホールズ発電所及びペルトンダム発電所に、バルブ形水車発電機を納入した。

前者は昭和57年4月、後者は同年6月に運開しており、以来順調な運転を続けている。

(1) 発電機仕様

両発電所の発電機仕様は、表3に示すとおりである。

(2) 構造

図10、11にそれぞれの発電機の構造断面図を示す。

固定子外壁は、水圧の加わる薄肉圧力容器であり、各部にリブを設け、必要な強度を確保している。

回転子は、ロータリムを兼ねるスパイダに磁極がボルト締めされる構造であり、下流側のみに回転子ファン、上流側にブレーキリングが取り付けられている。

スラスト軸受には、順方向スラスト用と逆方向スラスト用の2種類のものがあり、また案内軸受には、水車部案内軸受と発電機部軸受の二軸受方式を採用している。

更に、軸受はスパイダを抜くことなく、水車側から保守・点検のため分解できる構造としている。

通風冷却方式は、ブロワを使った強制通風方式である。

ブロワにより押し込まれた冷却空気は、一部はロータリム通風穴から、また一部はスパイダを通して下流側ファンから

表3 発電機の仕様 発電機の仕様を示す。

項目	納先		備考
	アイダホ・ホールズ	ペルトンダム	
形式	横軸回転界磁形 強制通風閉鎖風道循環形		—
出力	8,900kVA	(23,100kVA) 21,000kVA	小括弧内は過負荷定格
回転速度	94.74rpm	112.5rpm	—
極数	76	64	—
周波数	60Hz	60Hz	—
電圧	4,160V	6,900V	—
電流	1,235A	(1,933A) 1,757A	—
力率	0.9	0.9	—
短絡比	1.1	1.0	—
GD^2	602t·m ²	1,096t·m ²	—
無拘束速度	253%	293%	—
推力軸受荷重	順方向	140t	—
	逆方向	169t	
絶縁種別	F	F	—
励磁器	サイリスタ	サイリスタ	—

固定子に入り、その後固定子枠の通風穴を経て再びブロワに戻る。

通風回路は、油、カーボン粉などが機内に入らないような閉鎖構造としている。このため、圧油導入装置部、スリップリング部は、発電機運転中でも常に保守・点検できるようになっている。

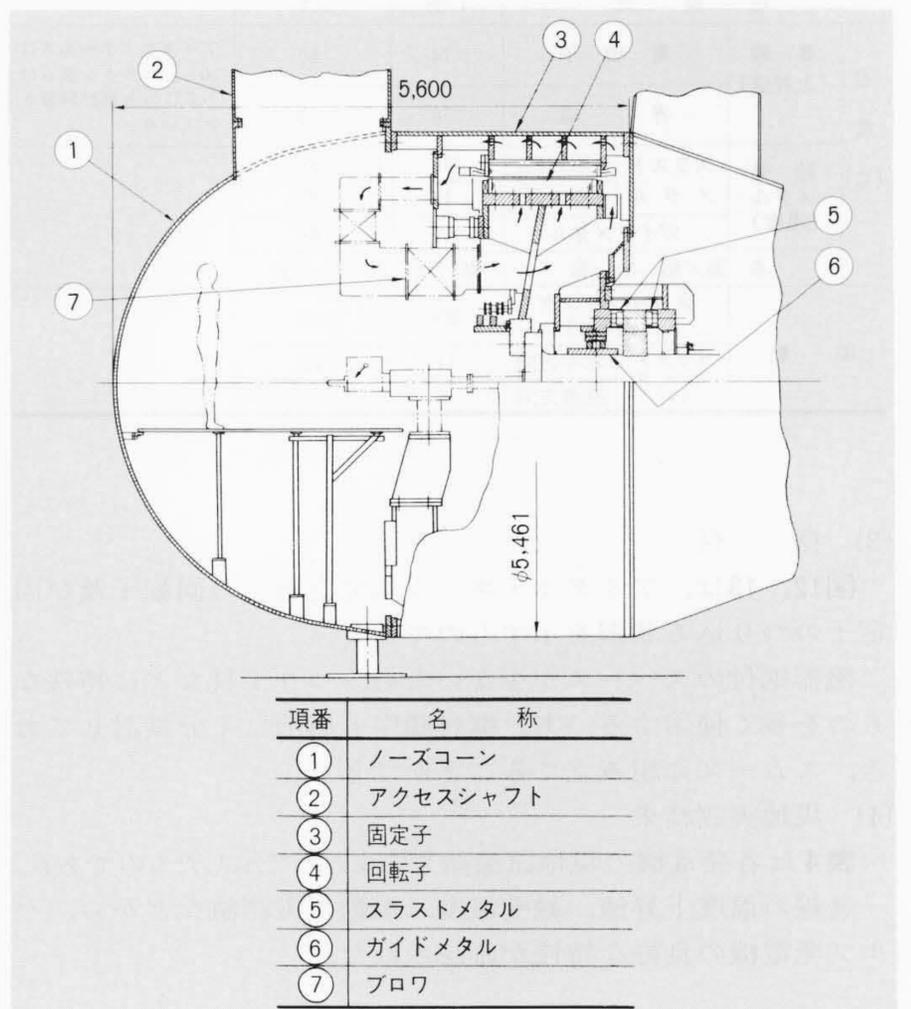


図10 米国アイダホ・ホールズ発電所納め発電機構造断面図
ブロワによる強制通風方式である。

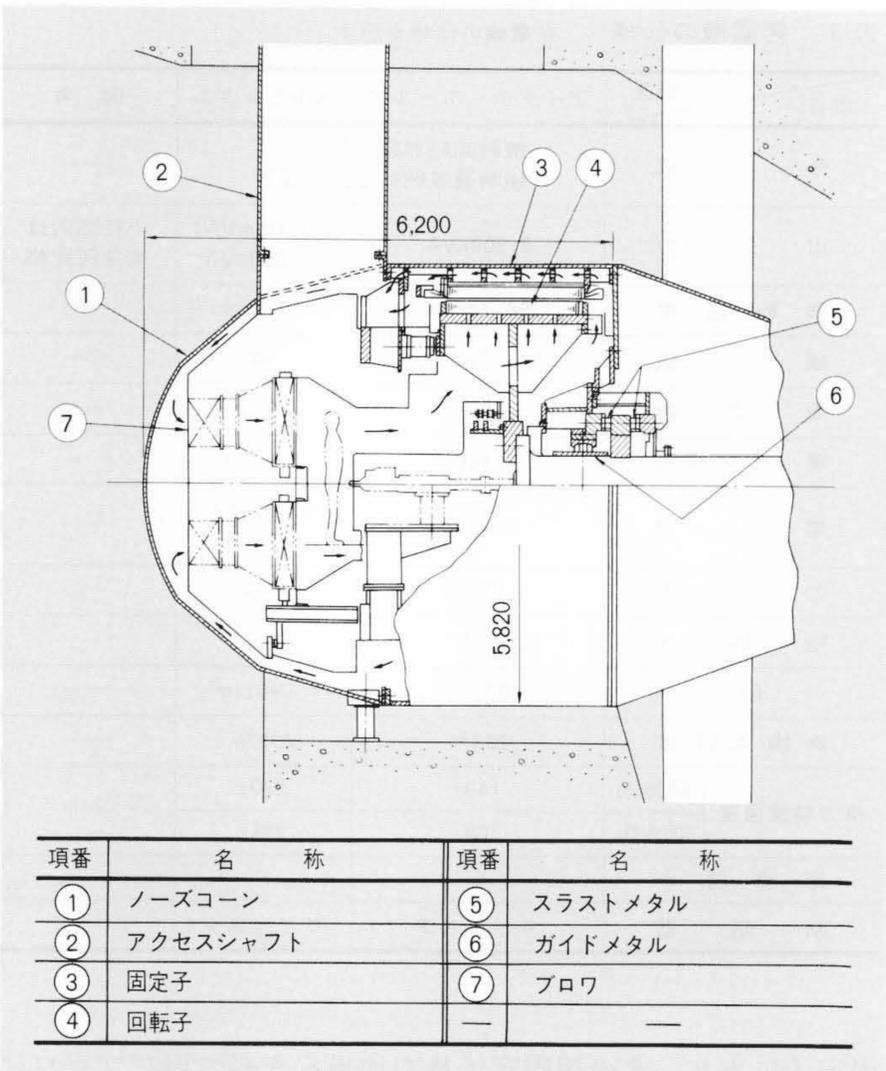


図11 ペルトンダム発電所納め発電機構造断面図 ブロウにより、ノーズコーンの先端まで冷却空気をまわす強制通風方式である。

表4 発電機の現地試験結果 現地での試験結果を示す。

試 験 項 目		アイダホ ホールズ	ペルトンダム	備 考	
界磁電流 (A)	無 負 荷 時	285	588	—	
	三 相 短 絡 時	205	420		
	定 格 力 率 時	472	992		
短 絡 比		1.39	1.4	—	
温 度 (°C)	巻 線 (上昇値)	電 機 子	74	80	アイダホ・ホールズは 80°C、ペルトンダムは 100°Cの上昇が許容さ れている。
		界 磁	78	73	
軸 受 メタル (温度)	スラスト メタル	順方向	48	52	—
		逆方向	47	47	
	ガイドメタル	40	46		
油 温/給 水 温		40/18	41/10		
振 動	スリップリング (mm)		20	19	—
	スラスト タンク (μ)	水平方向	11	23	
		垂直方向	6	8	

(3) 据 付

図12, 13は、アイダホ・ホールズ発電所での回転子及び固定子のつり込み状況を示すものである。

機器据付のスペースが少ないため、つり工具などに特殊なものを多く使用する一方、据付順序も事前に十分検討しておき、スムーズに組み立てることができた。

(4) 現地実測結果

表4は各発電機の現地試験結果をまとめて示したものである。巻線の温度上昇値、軸受温度、振動の実測値などから、バルブ発電機の良い特性が確認された。

5 結 言

以上、発電機及び発電電動機での最近の技術進歩と適用例



図12 回転子のつり込み 現地での回転子つり込み状態を示す

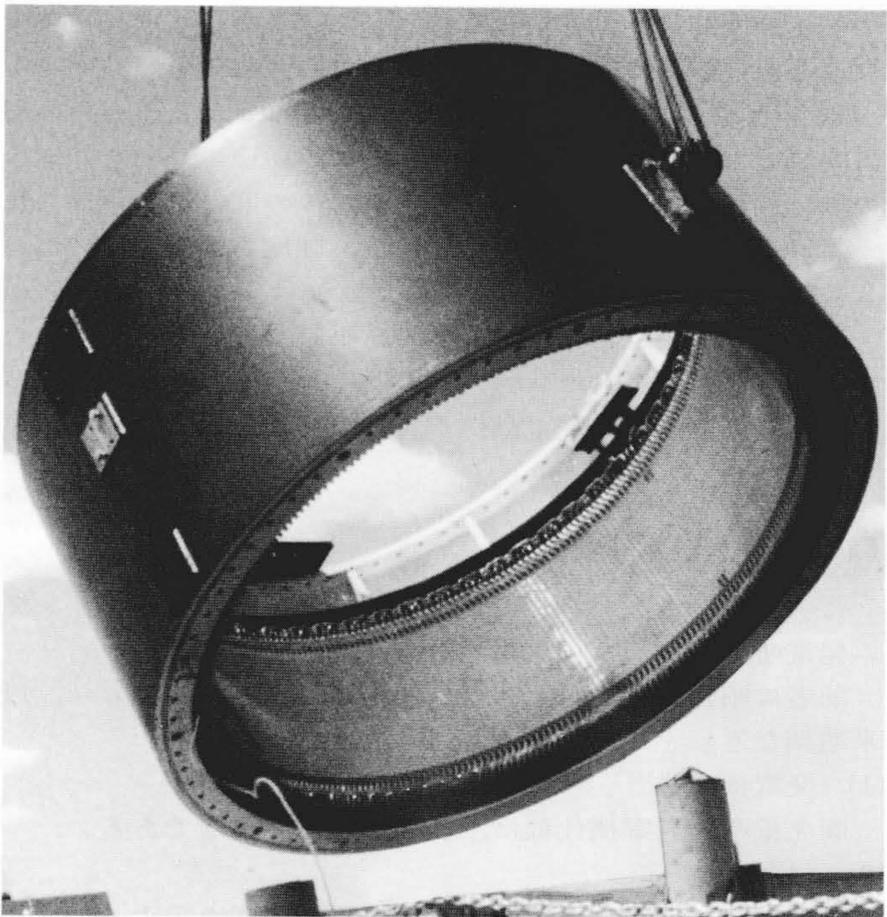


図13 固定子つり込み 現地での固定子つり込み状態を示す。

について述べたが、今後ますます高速大容量化する揚水用発電電動機、また水力再開発の分野で増加しつつあるバルブ形発電機の大容量化に対応して、更に合理的な設計、信頼性のいっそうの向上を図ってゆくことが重要であり、これらの点で本稿が読者各位の御参考になれば幸いである。

最後に、以上の技術進歩については各電力会社殿の御指導によるところが大であり、関係各位に対し厚く御礼を申し上げる次第である。

参考文献

1) N. Suzuki, et al.: Latest Technology for Hydrogenerators, Hitachi Review Vol. 28 No.4, 183~188 (1979-8)