東北電力株式会社茂庭発電所納

1,570 kW 筒 形 水 車 お よ び 発 電 機

1,570 kW Tubular Turbine and Generator Delivered to the Moniwa Power Plant, Tohoku Electric Power Co., Inc.

横 井 信 安* Nobuyasu Yokoi

大越健児* 斎藤 Kenji Ōkoshi Takes

藤 武**
Takeshi Saitō

内 容 梗 概

東北電力株式会社茂庭発電所納 1,570 kW 筒形水車および発電機は日立製作所としては最初の筒形水車である。形式の選定にあたっては直結形、増速形の経済比較を詳細に行なった結果、直結形の採用が決定された。

水車は入口管よりドラフトパイプまでを完全な露出構造とし、水車および発電機の据付を土木工事と関係なく施行することを可能ならしめたため、据付期間を従来の水車の半分以下に切り詰めることができた。水車ランナ、ガイドベーン、そのほか水車効率に影響を及ぼす部分の形状は詳細な模型試験の結果定められ、現地試験の結果もきわめて優秀な成績を示した。

発電機としては誘導発電機が採用され、発電機外部を流れる水により直接ステータを冷却するとともに、発電機支持ステーを空気冷却器として利用して空気循環によりロータ冷却を行っている。コイルの絶縁については特に耐湿性を考慮して SLS ワニスを使用している。水車および発電機の回転部は2個の案内軸受、1個の推力軸受で支持される簡潔な構造で保守を容易にしている。

制御装置としては誘導発電機の採用と相まって極力簡略化された方式が採用された。誘導機の系統投入時に生ずる各種の問題については交流計算盤により検討を行なった。系統がそれほど強くないので発電機投入時のすべりを正確に検出する必要があり、系統側電圧と発電機に取り付けられたパイロット発電機電圧との周波数差を検出して、自動的に発電機を系統に投入するすべり検出器が使用された。

1. 緒 言

わが国においては数年前より低落差地点の開発に適した水車として筒形水車が注目せられるようになったが、現状では筒形水車による本格的な低落差発電所の開発に先だって、小容量の筒形水車がパイロットプラントとして製作されつつある段階にある。これらのパイロットプラントとしては老朽化した既設水車の改造計画、あるいは新設発電所の放水路付近のわずかな落差を利用するものが主体となっており、容量的にも 2,000 kW 以下の小容量のものがほとんどである。

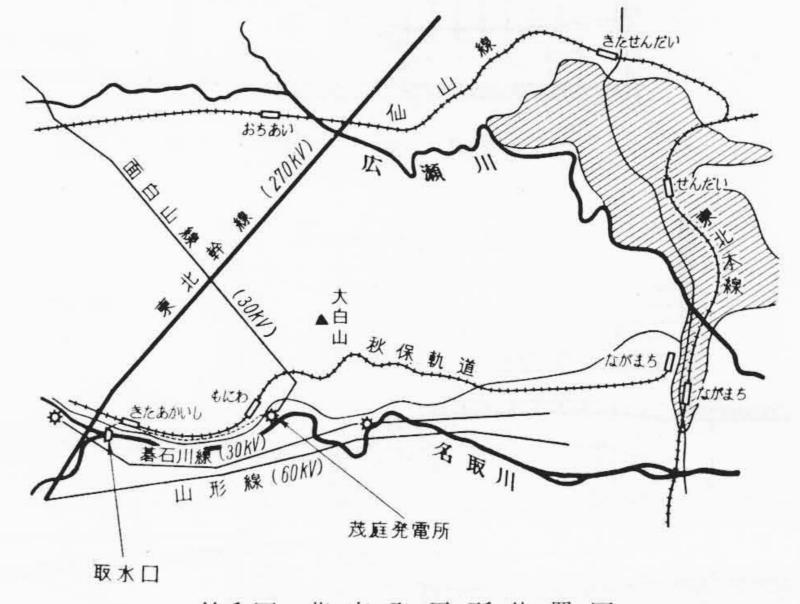
日立製作所では第1号の筒形水車として東北電力株式会社茂庭発電所納 1,570 kW 水車を完成し、これに引き続き中国電力株式会社小坂部調整池発電所納 550 kW および神奈川県電気局黒川発電所納 860 kW 水車を製作中であり、筒形水車の実用化に対する技術上の問題点はすでに解決されている。以下茂庭発電所納 1,570 kW 筒形水車の概略につき述べることにする。

2. 発電所の概要

茂庭発電所は仙台市郊外を流れる名取川の水を利用する自流式発電所であって、39年前に建設されたものであるが、永年使用による機器の老朽化によって数年前より既設2台のうち1台は運転不能となり、ほかの1台も振動が大きく運転の継続が危険視されていたものである。既設機はそれぞれ最大出力970kWおよび485kWの立軸フランシス水車各1台およびこれに直結される同期発電機であるが、改造計画では2台の既設機の代りに1台の筒形水車および発電機が採用されることになった。発電所設備の概要は次に示すとおりである。

(1) 発電力,使用水量および有効落差

発電力使用水量有効落差最大1,400 kW10.3 m³/s16.67 m



第1図 茂庭発電所位置図

第1表 既設機,新設機仕様比較表

		既 割	幾機	新 設 機	
	形式	立軸フランシス	立軸フランシス	横 軸 筒 形	
水	出 力 (kW)	970	485	1,570	
	回転数 (rpm)	429	375	429	
車	台 数	1	1	1	
	製 作 者	エッシャウイス	日 立	日 攻	
発電機	形式	立軸開放形同期機	立軸開放形同期機	横軸誘導機	
	容 量 (kVA)	1,050	650	1,450 k W	
	電 圧 (kW)	11	11	3.3	
	周波数 (~)	50	50	50	
	台 数	1	1	1	
	製作者	ウエスチングハウス	日 立	日 立	

常時 450 kW 3.5 m³/s 17.8 m

(2) 水車仕様

形 式 HK-IRT (TMM-H)

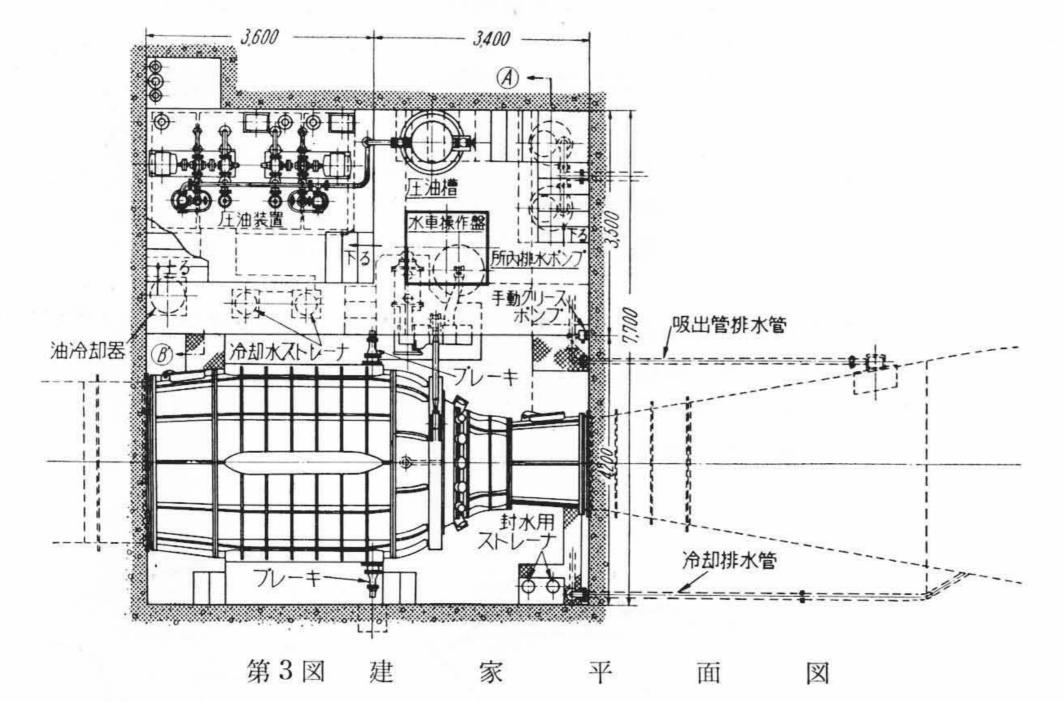
筒形水車)

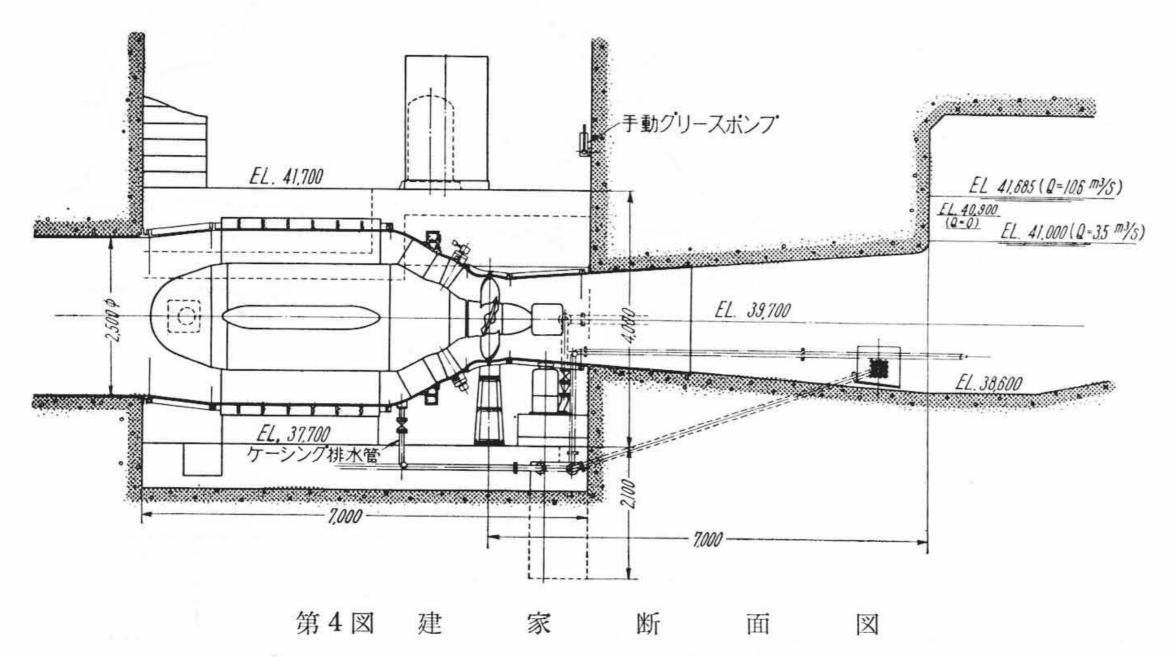
(横軸可動翼

最 大 出 力 1,570 kW

^{*} 日立製作所日立工場

^{**} 日立製作所国分工場





有 落 16.7 m 差 効 水 量 $10.6 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ 回転数 (同期速度) 429 rpm 比 速 度 $500 \ (m-kW)$ 発電機仕様 (3)形 式 TFCL-W (全閉形水冷式かご形誘導 発電機) 出 $1,450 \,\mathrm{kW}$ 最 大 力 電 圧 3,300 V 回転数 (同期速度) 429 rpm 周 波 $50\sim$ 数 極 14 数

力 率 0.82

第1表に既設機と今回納入された筒形 水車および発電機の仕様比較を示す。

3. 建 家 配 置

建家は第2~4図に示すように半地下式であって、既設の水槽に設けられた取水口と水車ケーシングとはきわめて短いペンストックにより結ばれる。また水車の吸出し管出口から下流の放水路は既設一号機の放水路を利用しているが、放水路が割合に長いため吸出し管出口部にはサージチャンバーが設けられている。

水車および発電機は建家の上流側の壁面より下流側の壁面までの間完全に露出されており、据付は水車ケーシングを所定の位置に置き、入口管およびドラフトパイプをそれぞれペンストック出口および吸出し管入口部の伸縮継手と接続するだけであり、据付期間の短縮および機器の保守にきわめて有利である。

補機の構造配置については建家面積を 極力切り詰めるよう考慮されている。

4. 水車および発電機の形式 の選定

筒形水車の形式の選定の上で特に重要なのは直結形あるいは増速形のいずれを採用するかということである。本水車についても計画当初よりいずれの形式が有利であるか詳細に検討されたが、発電機として誘導形が採用されることになり、このため直結形の場合発電機の GD² が小さいことによる速度上昇が大きくなることも実際上なんら差しつかえないことが確認されたので、それ以外のすべての点で有利な直結形の採用が決定された。

増速形を採用した場合,発電機重量が 軽減されることおよび発電機効率の上昇 する利点はあるが,これらは水車と発電 機の中間に設けられる増速装置の重量お よび効率により相殺される。

第2表に直結形および増速形の仕様比 較を示す。

5. 1,570 kW 筒形水車

5.1 模型試験

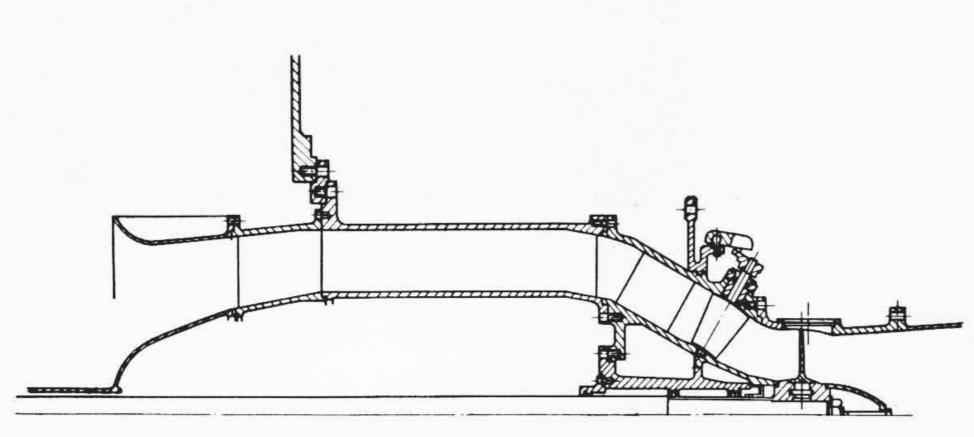
模型試験は新しく設けられた効率,キャビテーション試験共用設備により行われた。模型水車には直径 350 mm のランナを使用し,効率およびキャビテーション試験共用とし,ケーシング入口から吸出管出口までを実物水車と完全な相似に製作された。

効率およびキャビテーション試験は従来一般にはそれぞれ尺度比の異なる2セットの模型水車を使用して実施するのが通例であるが、今回は水車の落差がそれほど高くなく、模型水車がある程度大形であってもキャビテーション試験に要するポンプあるいは動力計の容量はそれほど大きくならないので、効率、キャビテーション共

用として計画した。効率、キャビテーション試験用の模型水車を共 用することの有利なことは説明するまでもないが、この場合問題と なるのは模型水車のランナ直径をどの程度の大きさに選定するかと いうことである。今回行なわれた試験では効率試験の測定精度を確 保し、かつキャビテーション試験に要する動力を極力少なくすると

第2表 直結案增速案仕様比較

		案		直 結 式	増 速 式
	形	式	(1 W)	HK-IRS (TMM-H)	HK-1RS (TMM-GH)
水車	Ш	力	(kW)	1,570	1,570
	落	差	(m)	16.7	16.7
	水	量	(m^2/s)	10.6	10.6
	回転	数	(rpm)	429	420
	特 有 返		(m-kW)	500	490
	吸出高(ラン	ナ中心より	(m)	-1.5	-1.5
増	形	式			一段遊星歯車式
速	増 速	比			2.38
増速装置	伝 達 重	力 力	(kW)		1,550
	形	式		TFCW-K	TFCW-K
発	容	量	(kW)	1,450	1,450
	電	圧	(V)	3,300	3,300
電	周 波	数	(c/s)	50	50
	回転	数	(rpm)	429	1,000
機	極	数		14	6
	カ	率		0.82	0.90
	水車効率	(最大出力	 5時)(%)	90.2	90.2
	增速装置効率(最大出力時)(%)			98.0	
	発電機効率	(最大出力	 为時)(%)	94.9	95.7
	総合効率	(最大出力		85.6	84.6
	本体製重		(%)	100	99



第5図 模型筒形水車構造図

いう両方の見地より検討した結果, 350 mm のランナ直径が採用されることになった。第5図に模型水車の断面図を示す。

5.2 現地効率試験

現地効率試験はペンストック内カレントメータ法により行なわれた。内径 2,500mm のペンストックに対し 21 点法が採用された。試験結果は第6図に示すように保証効率を優に上回る好成績を示している。

5.3 水車本体構造

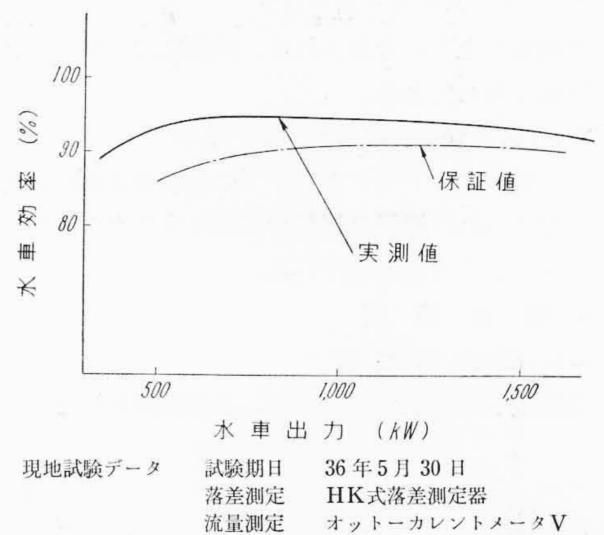
水車本体構造は第7図に示すように水車および発電機の回転部を 2個の案内軸受および1個の推力軸受で支持したきわめて簡潔な構 造である。第8図は水車および発電機の外観を示す。

5.3.1 ラ ン ナ

ランナは直径 1,300 mm の 5 枚羽根である。ランナブレードおよびランナボスはともに 13 Cr 鋳鋼製である。保守を簡易化するためボス内加圧方式は採用せず、ブレードステム部パッキングを外部水圧にも耐える構造とし、ボス内にボス油を封入した。ランナサーボモータはランナボス上部にランナボスと一体構造として設けられ、水車構造を簡略化するのに役だっている。

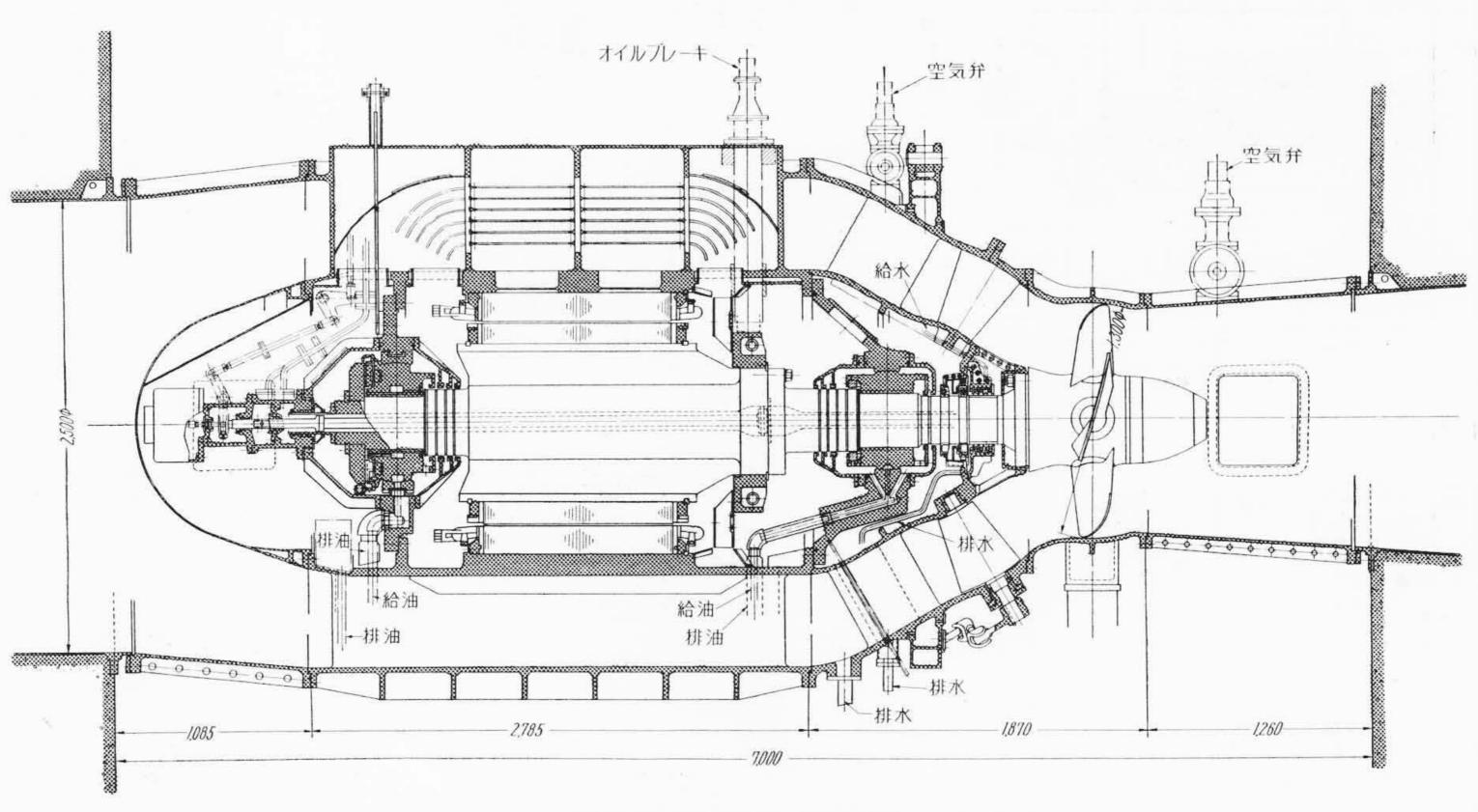
5.3.2 ケーシング

ケーシング外筒は内径 2,700 mm, 長さ 2,785 mm の円筒形で



流量測定 オットーカレントメータV カレントメータ取付位置 水圧鉄管 出力測定 標準携帯三相電力計

第6図 1,570 kW 筒形水車現地効率試験結果



第7図 1,570kW 筒形水車および1,450kW 誘導発電機構造図

全熔接構造である。ケーシング内方には4本のステーを介して発 電機が支持される。このステーは発電機冷却用の空気の循環の通 路となるとともに、また給排水、給排油、各種リード線などの通 路としても使用される。

ケーシング胴には両側に各2個の据付用座が設けられ、構器の 全荷重および水圧荷重を支持する構造となっており、ケーシング 外側は完全に露出されている。

ケーシングの上流側は入口管に下流側はステーリングに接続され,入口管およびステーリングを取りはずすことによりケーシングをそのままの位置に置いたままで発電機を分解することが可能である。

5.3.3 ステーリング

ケーシングの下流側に連なる内外2個のリングおよびその間をつなぐ8枚のステーベーンとより成り,鋳鋼製である。内リングは主軸のシーリングボックスを支持し,ステーベーンは内部を中空としてシーリングボックスよりの漏水の通路としてある。

5.3.4 ガイドベーン

ガイドベーンは鋳鋼製で16枚より成り、ランナの上流側に円すい面上に配置される。ガイドベーンの分解を便ならしめるためガイドベーン外側ステムを支持するリングはステム用ブッシュの位置で上流側および下流側に分割される構造となっている。

5.3.5 ディスチャージリング

鋳鋼製で上下に分割される。内面には 18-8 ステンレス鋼の肉 盛熔接を施してある。

5.3.6 入口管およびドラフトパイプ

入口管およびドラフトパイプの建家壁面側にはそれぞれ伸縮継 手が設けられ、機器の据付を容易にするとともに、分解作業を容 易にするよう考慮されている。

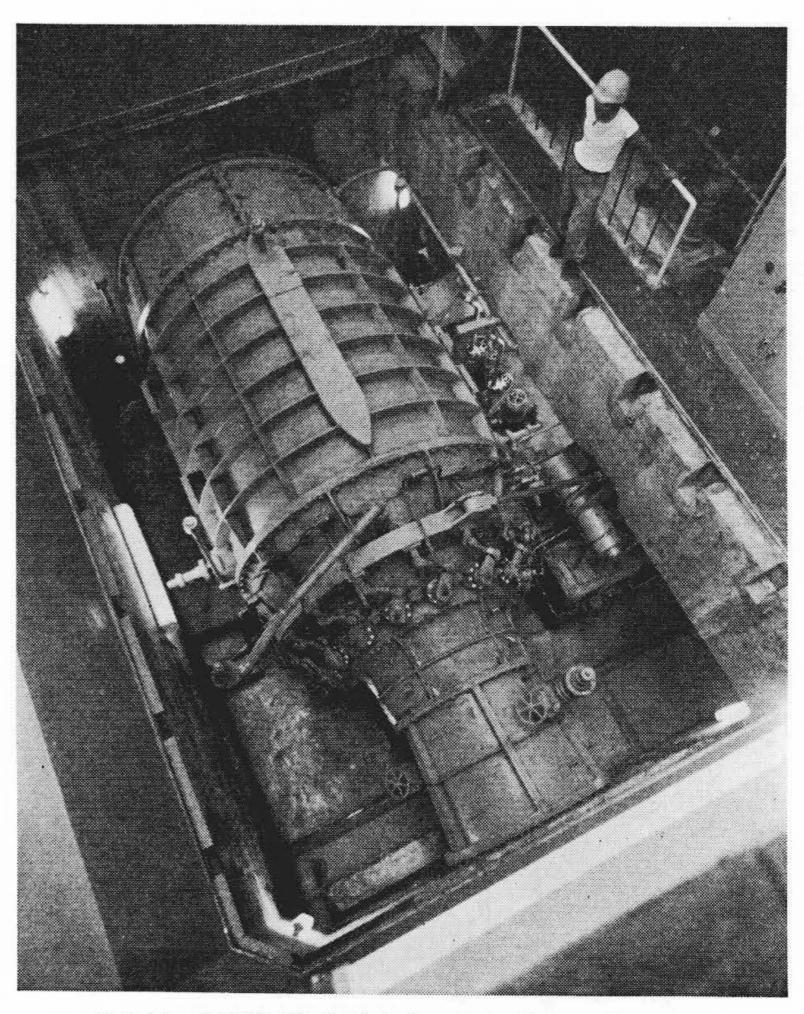
5.4 制 御 装 置

5.4.1 出力調整器

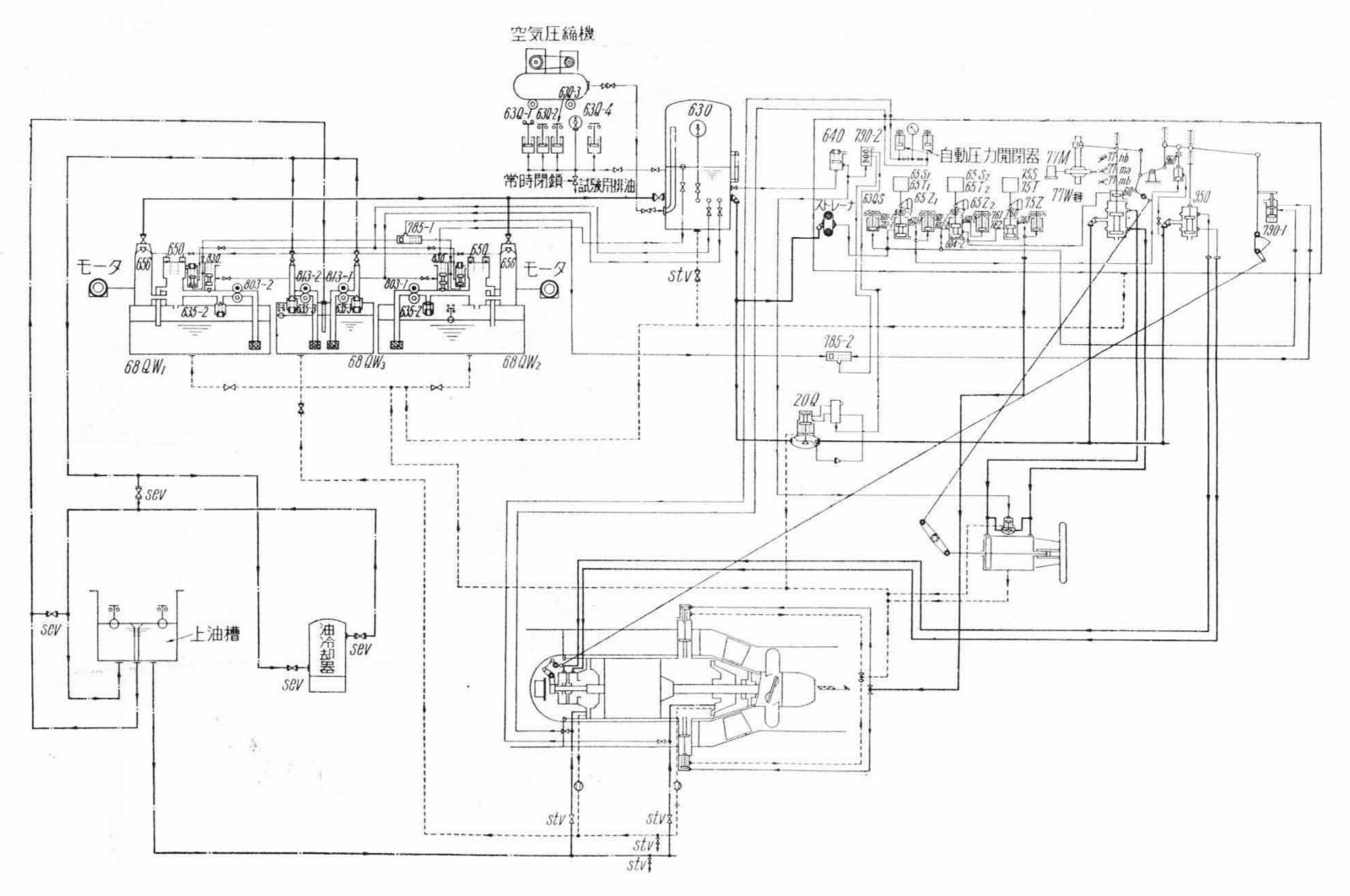
発電機が誘導機であるため,水車制御装置としてはスピーダを

有せず、単にガイドベーンの開度の調整およびガイドベーン開度 に応じてランナブレード角度の調整を行うだけである。

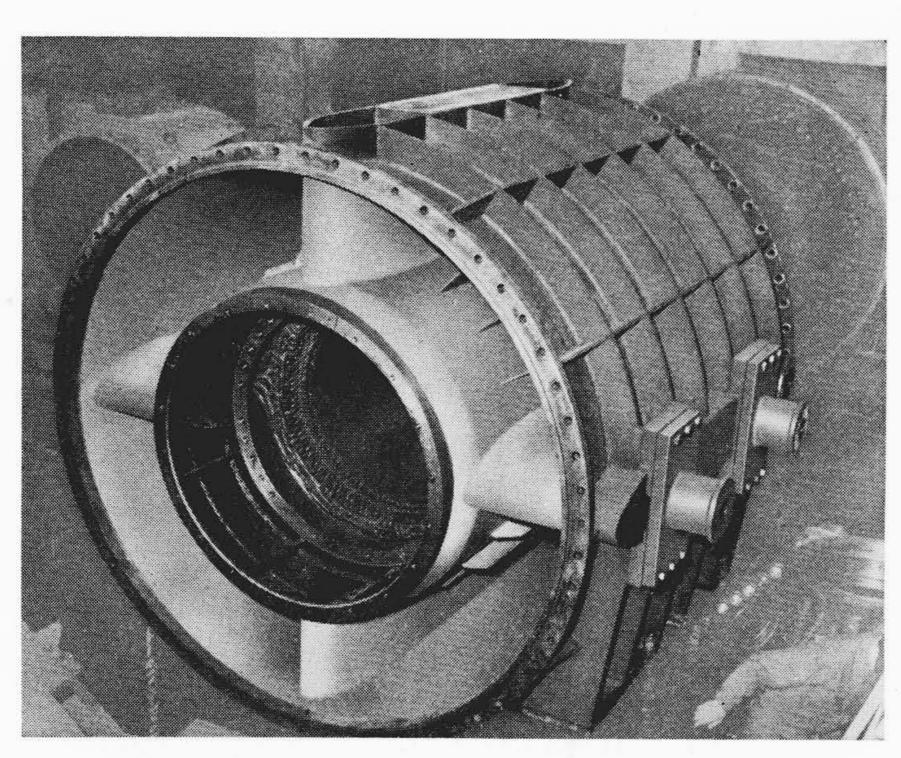
ガイドベーンサーボモータには閉方向に作用する重錘を有し, 油圧喪失時には自動的にガイドベーンを閉鎖する構造となってい る。第9図に自動操作系統図を示す。



第8図 1,570 kW 筒形水車および 1,450 kW 発電機



第9図 茂庭発電所自動操作系統図



第 10 図 1,450 kW 誘導発電機固定子

5.4.2 圧 油 装 置

圧油装置は M-M 式で圧油ポンプと潤滑油ポンプとを串形に連結してモータ駆動としている。圧油ポンプは油圧 21 kg/m^2 , 送油量 100 l/min, 潤滑油ポンプは油圧 2 kg/m^2 , 送油量 100 l/min である。

6. 1,450 kW 誘導発電機

6.1 発電機の構造

全閉形水冷式かご形誘導発電機である。

6.1.1 固 定 子

固定子わくは水車のケーシングと一体構造となっている。すなわち、ケーシングの内筒が固定子わくとなり、その内側に直接固定子鉄心を積重ね、両側をエンドプレートで固定した構造である。固定子鉄心には、ハイライトコアを使用し、コア一枚ごとにその両面とも完全にワニス焼付を施し、鉄損を減少させている。固定子は外被により直接冷却されるため、熱伝導を良好にする目的で鉄心と外被の間の間げきを極力少なくする必要がある。本機は特殊の方法によりこの問題が解決されている。

固定子コイルの耐湿構造については、特に考慮を払い、耐湿性のすぐれた SLS コイルを用いると同時に、接続部にはすぐれた耐湿性をもつ新絶縁法が開発され、使用されている。

固定子の外被が直接冷却されているため、内面に露を結びやすいが、この露が滴下しコイルにかかるおそれある部分には保護として2重壁を設け、露は固定子わく内周に沿って下部に落ち、コイルにかかることのないよう考慮されている(第10図)。

6.1.2 回 転 子

回転子はかご形回転子である。回転子導体には硬銅バーを使用し、これを半閉形スロットにそう入し、固定した構造である。回転子導体両端には銅のエンドリングをロー付し、外周にバインド線を巻き、水車の無拘束速度(256%、1,100 rpm)にも十分耐える強度を持たせている。

回転子鉄心はセグメント形で製作された。鉄心はスパイダに埋込まれたキーにより固定されている。過速度において十分シーゾニングを行ない、運転中鉄心がゆるまぬよう考慮されている。

なお回転子には、発電機内部に冷却風を循環させるための自己ファンおよび油圧ブレーキをかけるためのブレーキリングを取り付けてある(第11図)。

6.1.3 軸 受

反水車側軸受には、水車側の推力 (19.2 トン) を支持する 推力軸受が付属されている。この推力軸受は自動調心形推力 軸受で、第12図のような構造のものを採用した。調整が不 要で、組立が容易であり、かつすぐれた性能を持っている。

水車停止時,定常運転時とは逆方向に生じる逆推力を支持 するため,逆推力軸受を反水車側軸受メタルの側面に設けて ある。

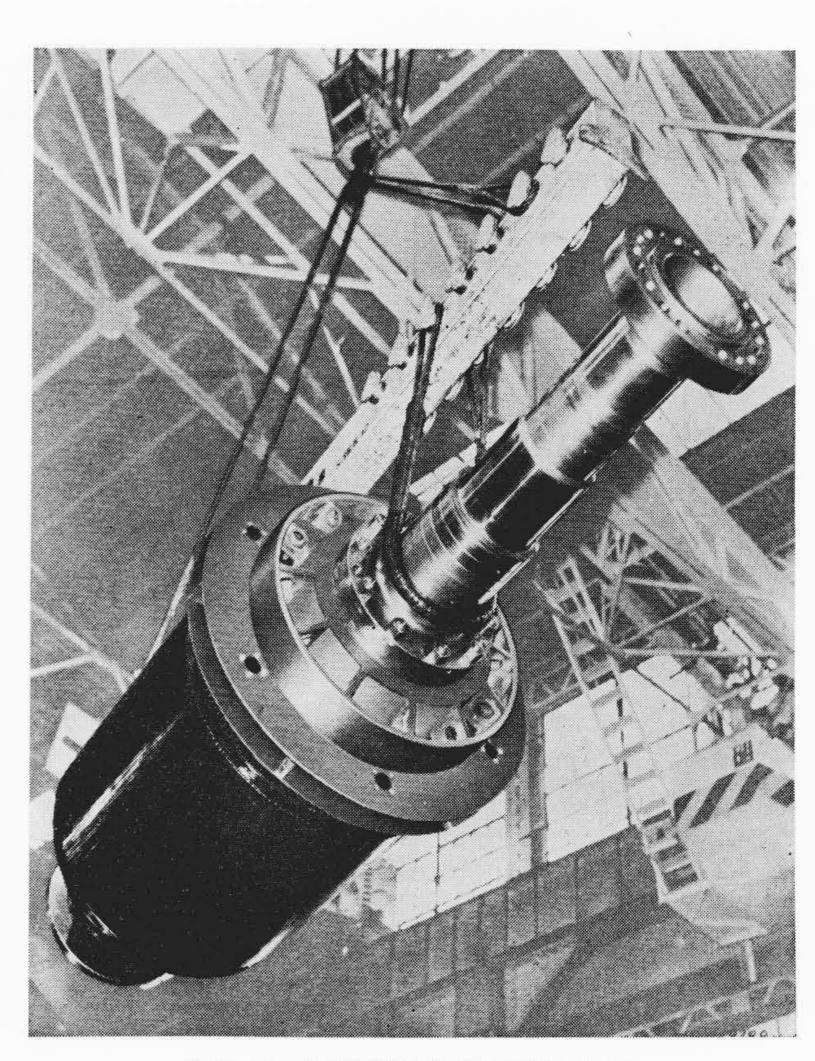
この軸受はいわゆるテーパランド式であり、調整が不要である。

軸受メタルとエンドブラケットとの間は,フェノール積層 板により絶縁され,軸電流を防止している。

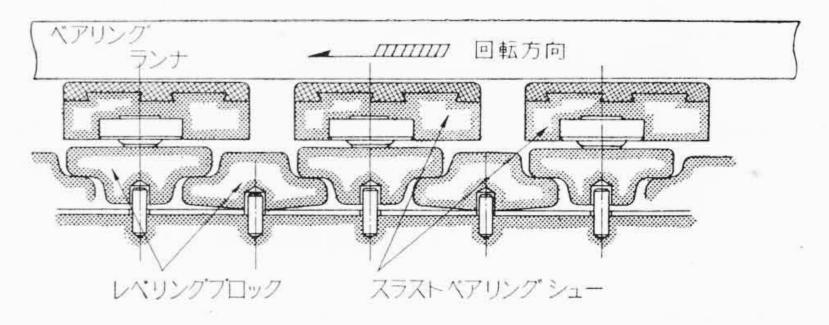
水車側軸受は,通常の横軸電機用軸受となんら変るところ はない。

軸受の潤滑にはすべて油強制循環方式を採用した。反水車側軸受は、一つの軸受ハウジング内に主軸受、推力軸受および 逆推力軸受の三つの軸受が設けてあり、潤滑油はそれぞれの 軸受に必要量だけ流れるよう調整できるようになっている。

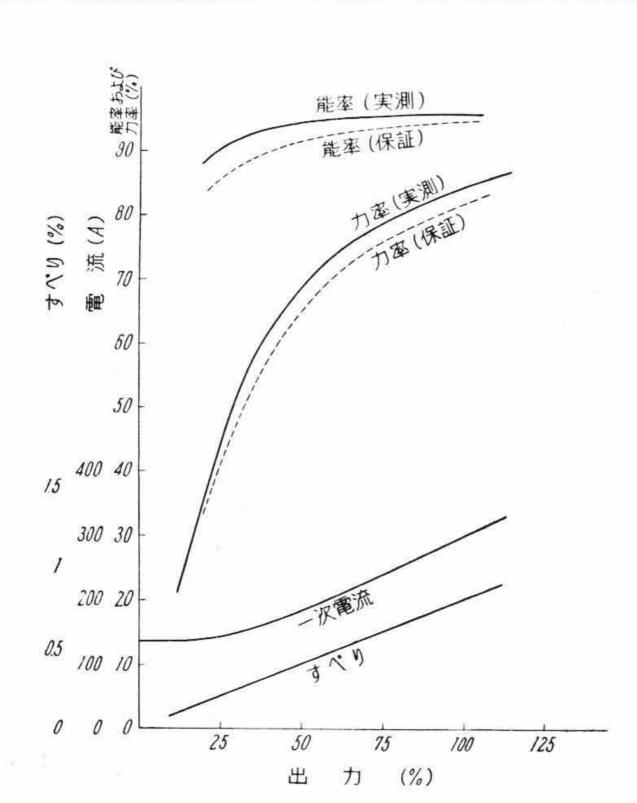
軸受よりの漏油に対しては,発電機が水中形であるため, 万全を期しラビリンス,パッキングを2~3重にも設け油漏れを 防止している。



第 11 図 1,450 kW 誘導発電機回転子



第12図 推力軸受構造説明図

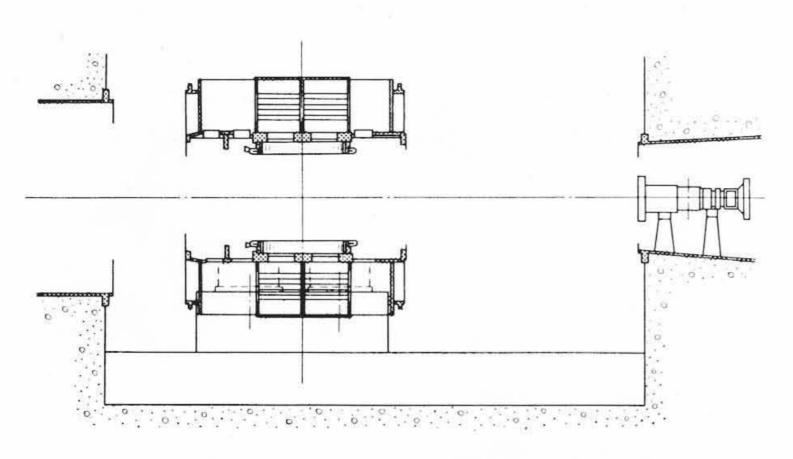


第 13 図 1,450 kW 誘導発電機特性曲線

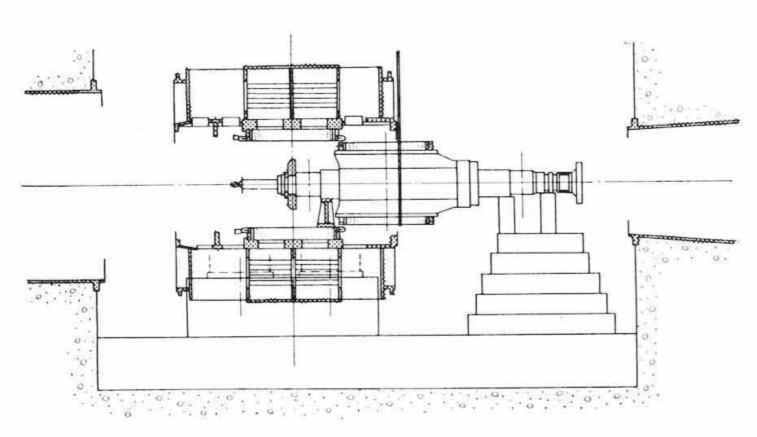
6.1.4 そ の 他

(1) 制動装置

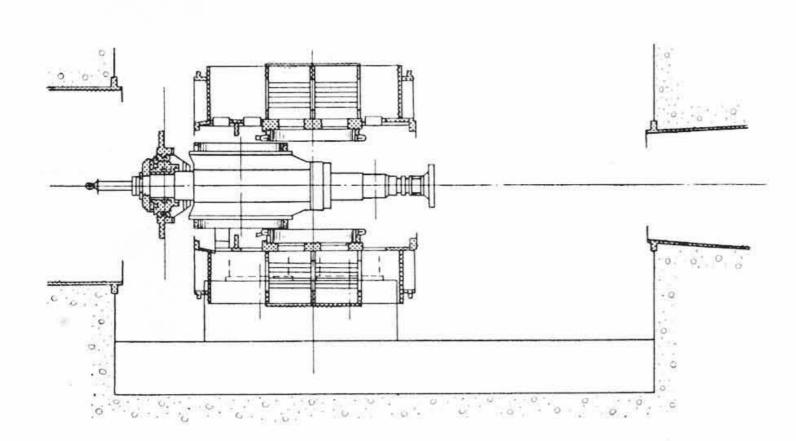
油圧ブレーキを使用し、回転子に取り付けたブレーキリングに



(1) 水車ケーシングを所定位置に置く



(2) 発電機ロータをつり水車軸と結合の上下流側よりステータ内につり込む



(3) 発電機ロータを上流側に送って上流側案内軸受および推力軸受を組立てる

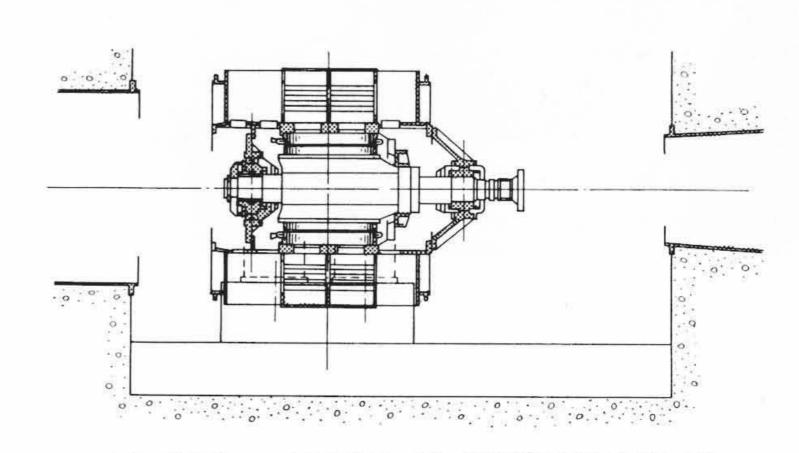
機械的にブレーキをかける構造となっている。

ブレーキシューはケーシング外部から取りはずし,取替えできるようになっている(実用新案出願中)。

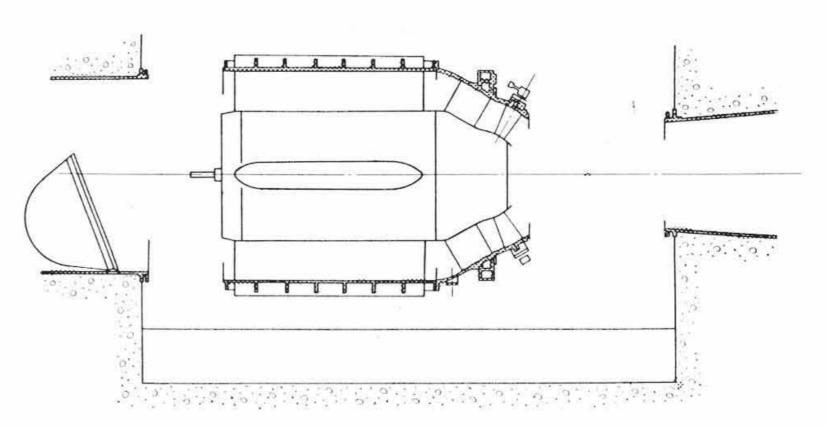
このブレーキは、漏水により回転子が低速度で回転を続けることを防止するために使用するもので、ごく低速度よりブレーキをかけるようにしてある。

(2) 振動測定装置

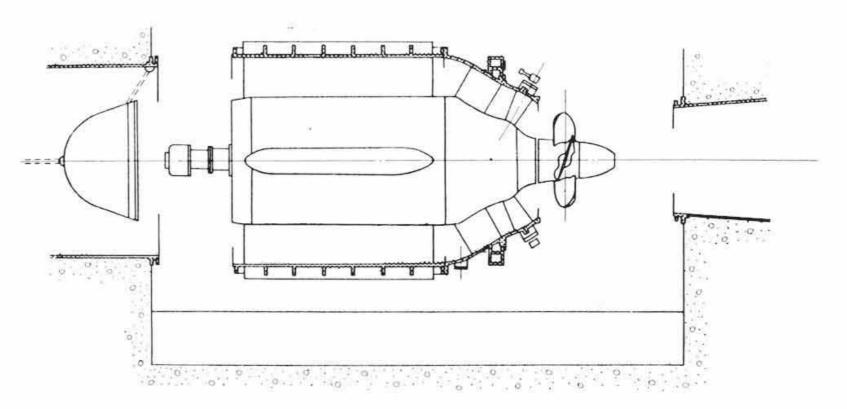
ステーを通して、エンドブラケットの振動を外部から測定できるよう、振動測定器が取り付けられている。ケーシング外部から随意にエンドブラケットの振動測定ができ、きわめて便利である。



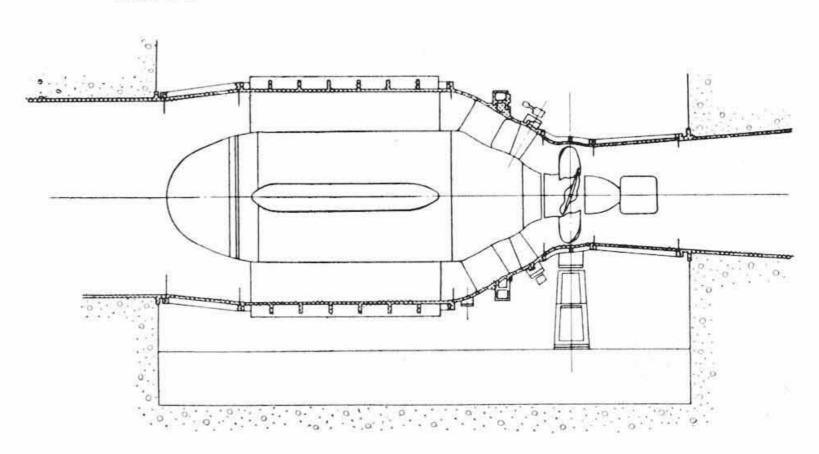
(4) 発電機ロータを所定位置に戻して下流側案内軸受を組立てる



(5) 水車ステイリングおよびガイドベーン回りを組立てる



(6) 水車ランナ取付後,主軸シーリングボックスを組立てる,圧油導入装置を 組立てる



(7) ボンネットを取付け入口管を取付ける,ディスチャージリング,ドラフト パイプを取付ける

第 14 図 筒 形 水 車 組 立 順 序 説 明 図

(3) スペースヒータ

発電機停止時,固定子コイルの表面などに露を結ぶのを防ぐため,内部にスペースヒータを取り付け停止中固定子コイルを露を 結ばぬ温度に保持する。

6.2 発電機の冷却方式

本機は前にも述べてあるとおり全閉形水冷式で,固定子は主として固定子わく外周の水流で直接冷却する一方,回転子に取り付けたファンにより発電機内部に風を循環させ,固定子コイルニンドおよび回転子を主としてこの風により冷却する方式である。風の循環通路としては,固定子わくとケーシング外筒とを結ぶ4本のステーを利用している。ステーの内部に薄い銅板を軸方向に数枚取り付け空気冷却器の役目を持たせている。

6.3 試 験 成 績

発電機は工場内で完全に組み立て,一般的特性試験を行なうとと もに駆動電動機を直結して試験を行なった。

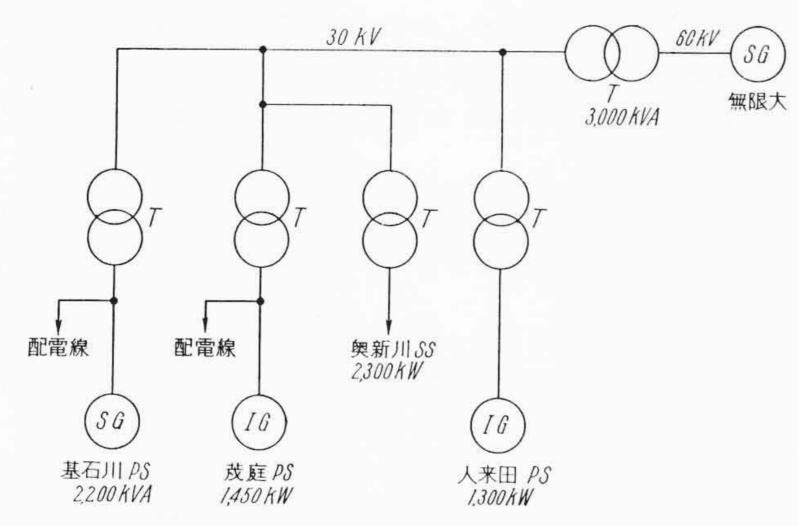
この試験結果を**第13**図に示す。効率,力率とも保証値を十分上回わる好結果が得られている。

また無拘束速度 (256%, 1,100 rpm) で 10 分間運転し、なんら異常ないことを確認した。

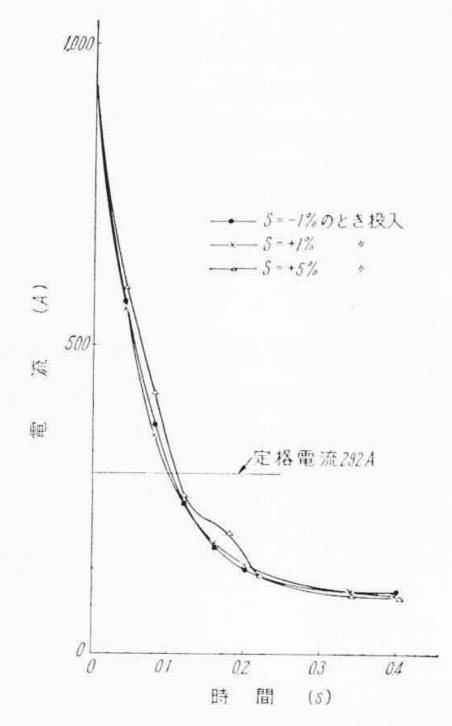
現地における軸受部の振動は 3/1,000 mm 程度で、運転状況はき わめて静かである。

7. 水車および発電機の据付方法

水車および発電機の構造はすでに述べたように極力簡潔で据付,



第15図 茂庭発電所の系統構成



第16図 茂庭発電所電流変動曲線 (計算值)

保守ともに容易なように考慮されている。本水車の据付上のおもな特長は単にケーシングを所定の位置に置き、ケーシングの上流側および下流側をそれぞれペンストックおよび吸出し管に接続するだけで完了するため、水車の据付にほとんど土木作業を要しない点にある。

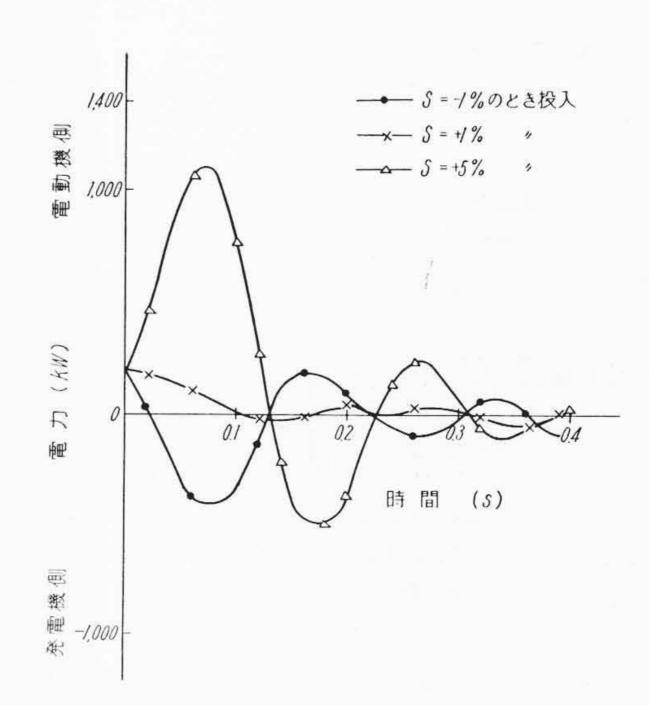
このため水車の据付期間はきわめて短縮され、本水車の場合水車本体の工場発送より通水まで1箇月を要しなかった。このような据付方式を採用するためには、水車本体の現地到着前にペンストックの下流端および吸出し管の上流端部の接続フランジおよびケーシング据付用のベースをあらかじめ埋め込んで置く必要がある。この作業は各フランジの位置を正確に測定して調整すること、およびテムプレートを使用してベースの位置を決定することなどの方式の採用により満足な結果が得られた。第14回は水車および発電機の組立順序を図示したものである。

8. 制 御 装 置

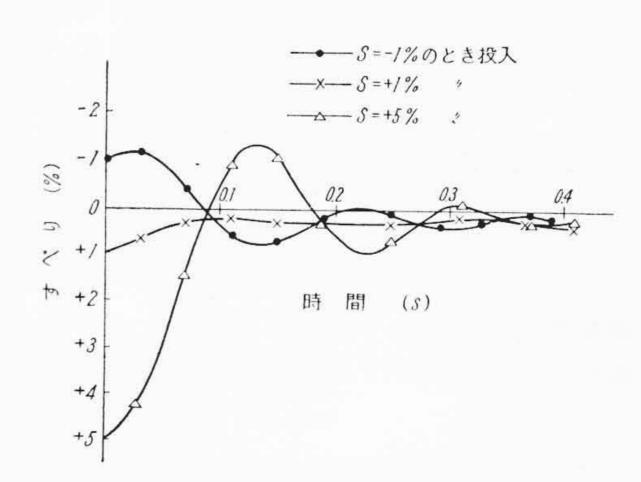
筒形水車と誘導発電機を組み合わせる方式の発電所制御装置は、 設備が簡単で、運転保守の容易であることが最大の特長であるが、 同時に主機の特異性に適した安全確実なものとしなければならない。

8.1 制御上の特異点

(1) 筒形水車: 筒形水車はカラプン水車の一変形であるから その制御方式は従来のカプラン水車と本質的な違いはない。しか し誘導発電機式であるから負荷制御のための調速機は不用で、単 なる出力調整器が設けられるが、これは速度制御能力がないから 起動時は負荷制限器により水入力を調整して速度を制御しなけれ ばならない。



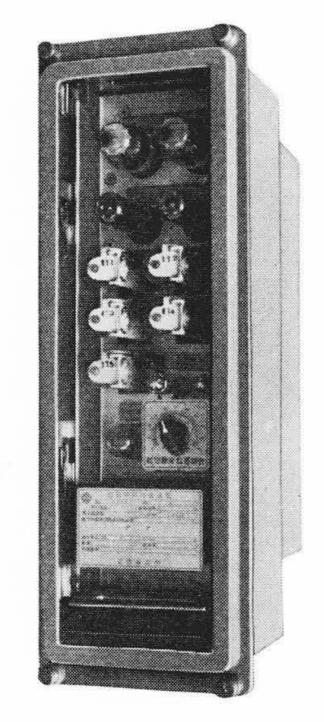
第17図 茂庭発電所電力変動曲線(計算值)



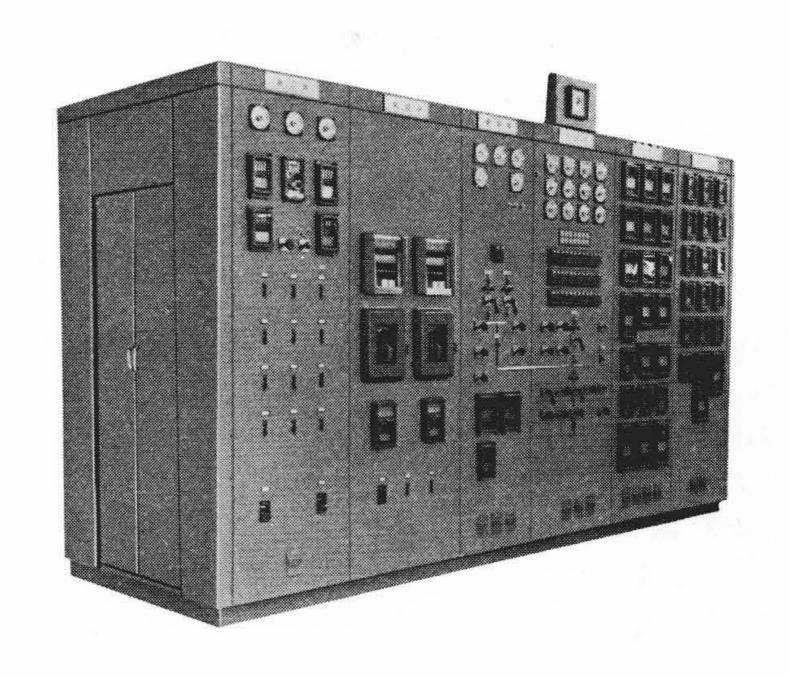
第18図 茂庭発電所すべり変動曲線 (計算値)

昭和36年12月

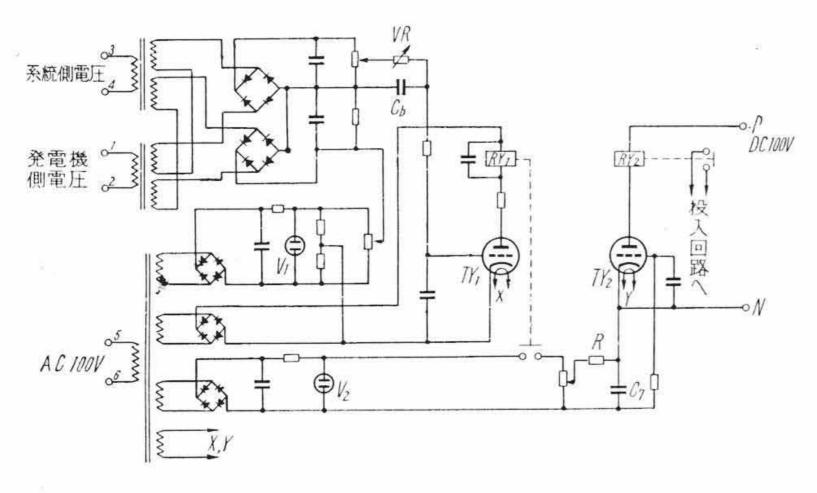




第21図 VSDF形すべり検出器



第22図 茂庭発電所配電盤



第20図 すべり検出器原理図

誘導発電機: 誘導発電機は励磁装置が不用で同期化の手 数もいらない点簡単で良いが,並列投入時の突入電流が大きく, また常時系統から励磁電流をとるので線路力率を悪くし、電圧制 御の役にたたないなど欠点もあるので, 起動および運転中の系統 に及ぼす影響について十分検討しておく必要がある。茂庭発電所 の場合は系統容量が小さく,近くに既設の誘導発電機もあってか なり条件が悪いので、第15図に示す実際の系統構成についてあ らかじめ交流計算盤による詳細な計算を行なって、起動時および 定常時とも安定に運転できることを確かめた。第16~18図にそ の計算結果を示す。並列投入時の突入電流はすべりにはほとんど 関係なく定格の約3~4倍に達するが、減衰が早く 0.1 秒程度で 定格以下となるので問題ない。電力動揺は投入時のすべりが数% 以下であれば特に問題はないが、同期速度のやや下で投入すれば 最も早く動揺がおさまる。また誘導発電機のトルクは同期速度付 近で急変し、同期速度より大きいところで投入すると逸走するお それがあるので, 投入時のすべりは正確に検出する必要がある。 運転中の系統電圧降下は数%以下で実用上支障なく,また茂庭発 電所における力率補償によっても電圧降下の改善はほとんど期待 できないことがわかったので、力率補償用蓄電器は設けないこと になった。

8.2 運転制御方式

第19回に単線接続図を示す。本発電所は一人制御方式である

が、主制御開閉器は「運転」、「停止」の2位置のみとし、操作および制御回路を極力簡素化している。

- (1) 起動: 主制御開閉器 1を「運転」とすれば、案内羽根およびランナブレードを起動開度まで開き、水車を起動させる。速度約 20% となれば案内羽根を無負荷開度まで閉じ、ランナブレードもそれに応じた開度となる。かくて速度は円滑に上昇し、同期速度近くとなればすべり検出器により、すべり一定値以下なることを検出し並列投入する。このすべり検出器は系統側電圧とパイロット発電機電圧との周波数差により動作するもので、整定は0.5~2% 可調整である。 第 20 図 にその原理図、第 21 図 に外観を示す。
- (2) 負荷: 並列後負荷制限器により任意に負荷をとる。また FDN 形電気式水位調整器を設けており,河川流量に応じた負荷を とることもできる。
- (3) 停止: 1を「停止」とすれば負荷制限器により案内羽根は閉じ、無負荷となれば解列して案内羽根は全閉する。同時にランナブレードは強制的に開き水中における抵抗力により停止する。しかし安全のため停止中は常に発電機に制動をかけることにしている。また発電機は外被水冷式で停止中湿度が高まるので、制動をかけると同時にスペースヒータを生かすことにした。

8.3 保護装置および配電盤

保護装置としては誘導発電機の逸走防止のため、低電圧継電器および過電流継電器を設けているほか、一般の水力発電所と大差ないが、簡単のため事故停止は非常停止のみとしている。 第22回 に配電盤の外観を示す。本発電所は夜間無人となるので、記録温度計、記録積算電力計を設けて保守の便を図っている。

9. 結 言

以上,日立製作所最初の筒形水車である茂庭発電所納 1,570 kW 筒形水車,発電機ならびに制御装置の概略について述べた。

筒形水車は試験的な段階を経て低落差地点開発用として本格的に 採用される機運となりつつあるが、このときにあたって本稿が関係 各位にいくぶんでも参考となれば幸甚である。