

ベネズエラ電力公社・グリ発電所納

297,000 HP (218,500 kW) フランシス水車

297,000 HP (218,500 kW) Francis Turbines Supplied to Guri Power Station,
Corporación Venezolana de Guayana, Republic of Venezuela

伊藤 栄 郎* 清水 義 男* 五十嵐 勇*
Hideo Itô Yoshio Shimizu Isamu Igarashi
細 貝 隆* 桑 原 尚 夫*
Takashi Hosogai Takao Kuwabara

要 旨

南アメリカ、ベネズエラは現在オリノコ川の支流であるカロニ川の開発を遂行中で、その最大開発地点となるグリ発電所用 297,000 HP (218,500 kW) フランシス水車および補機 3 台を日立製作所が受注し、このほど現地へ納入、目下据付中である。本水車はわが国で製作された水車としては屈指の容量のものである。本文はこの大容量機的设计製作に当たっての内容を紹介したものである。

1. 緒 言

ベネズエラではカロニ川およびグアヤナ地方の開発を推進中で、政府機関 Corporación Venezolana de Guayana (CVG) が特に Electrificación del Caroni C. A. (EDELCA) を設けてカロニ川電源開発を強力に実施している現状にある。日立製作所では昭和 38 年 12 月 CVG のコン

サルティング・エンジニアであるアメリカの Harza Engineering 社を通じ、本開発計画の最大目的である、グリ発電所用 297,000 HP (218,500 kW) フランシス水車および補機 3 台を受注し、昭和 40 年 10 月に 1 台目を工場完成して以来 3 台目まで、すべて完成、現地納入し、据付けも開始された。

本水車は、わが国ですでに製作完成された水車として最大出力機であるばかりでなく、世界屈指の大容量機である。以下本水車および補機類の設計製作の概要について紹介する。

2. グリ発電所の概要

2.1 カロニ川開発計画の概要⁽¹⁾⁻⁽³⁾

ベネズエラの中央部を流れるオリノコ川の支流であるカロニ川の開発計画は、1955 年より始められ、本計画の第一歩として、オリノコ川との合流地点付近に、現有出力 370 MW を有するマカガ発電所が 1961 年に完成され、年間 100 万トンの生産能力を有する製鉄所が稼働している。グリ発電所は、このマカガ発電所の上流 95 km の地点に、1959 年に CVG のコンサルタントである Harza Engineering 社が調査を始め、1963 年 9 月に工事が開始された。本発電所の建設は、アメリカの Kaiser Engineering & Constructors, Inc. を主とした数社の合同資本による Consorcio de Guri が担当しており、取りあえず現在進行中の第一期工事の総投資額は 1 億 3,700 万米ドル (約 493 億円)、うち 8,500 万米ドル (約 306 億円) は世界銀行が融資すると報ぜられている。

グリ発電所は最終発電量 600 万 kW として計画され、その電力需

* 日立製作所日立工場



図 1 発電所位置図

表 1 大容量日立フランシス水車

納 先	発電所名	出力 (kW)	落差 (m)	回転数 (rpm)	台 数	運転開始
ベネズエラ	グ リ	218,500	115	128.6	3	据 付 中
オーストラリア	マーレイ 2	161,000	290	333	4	据 付 中
ガ ー ナ	アコソソボ	158,000	69	115.4	4	1965
電 源 開 発	御 母 衣	137,500	200	225	2	1960
イ ン ド	バ ー ク ラ	112,000	156	167	5	1960
イ ラ ン	デズ(パーラビ)	103,900	180	250	3	{2 台-1961 2 台-製作中
電 源 開 発	佐 久 間	100,000	135	167/200	2	1955
U. S. A.	ク リ ヤ ー ク	89,500	204	225	2	1963
タ イ	パミフオール	86,500	123.2	150	5	{2 台-1961 4 台-製作中
中 国	松 花 江	85,000	69	125	2	1943

要と呼応して三期に分けて建設される予定である。第一期工事は高さ 348 ft (108 m)、貯水量 1,435 万エーカー・フィート (177 億 m³)、利用可能貯水量 957 万エーカー・フィート (118 億 m³) のダム、放流路、および水車発電機 10 台分 (176 万 kW) の発電所建屋を含み、1976 年ないし 1981 年完成の予定である。ただし現在は第一期工事の一部として 3 台分 527,250 kW を進行中であり、1967 年に最初の発電開始が期待されている。

第二期工事は 1974 年より開始しダムを 82 ft (25 m) かさ上げし、利用可能貯水量を 2,500 万エーカー・フィート (310 億 m³) にするとともにダム足下に建屋を増築し発電量を 300 万 kW に増加し、引続き第三期工事でダムをさらに 75 ft (23 m) かさ上げし、同時に発電所を延長して総出力 600 万 kW にする計画とされている。最終完工は西暦 2000 年以後にも達する、膨大かつ遠大な計画である。発電された電力は、首都カラカス周辺の中央部、プエルト・ラ・クルス

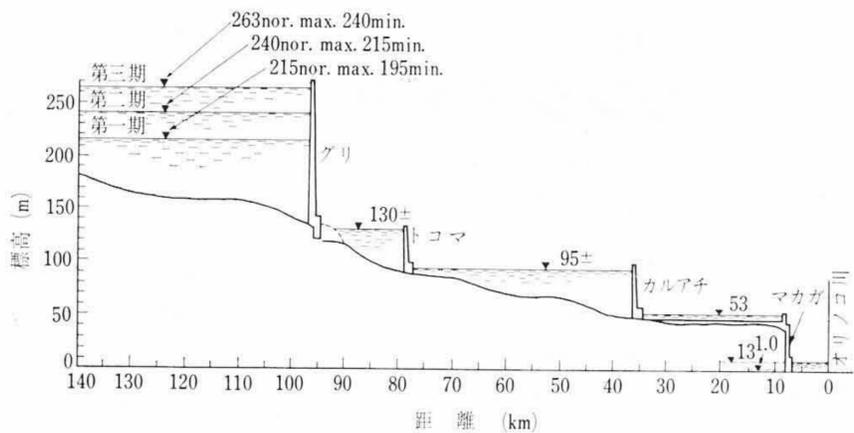


図2 カロニ川開発計画プロフィール

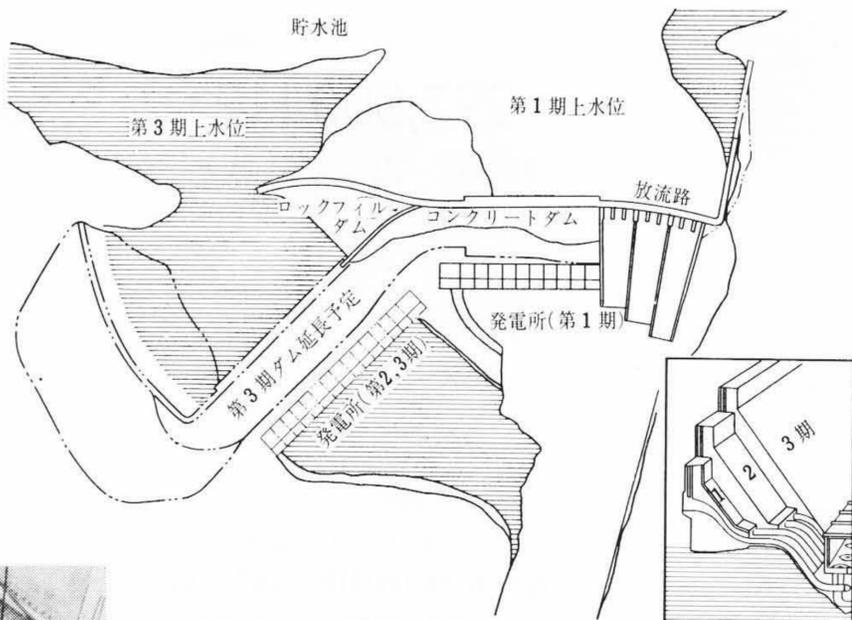


図3 発電所付近図

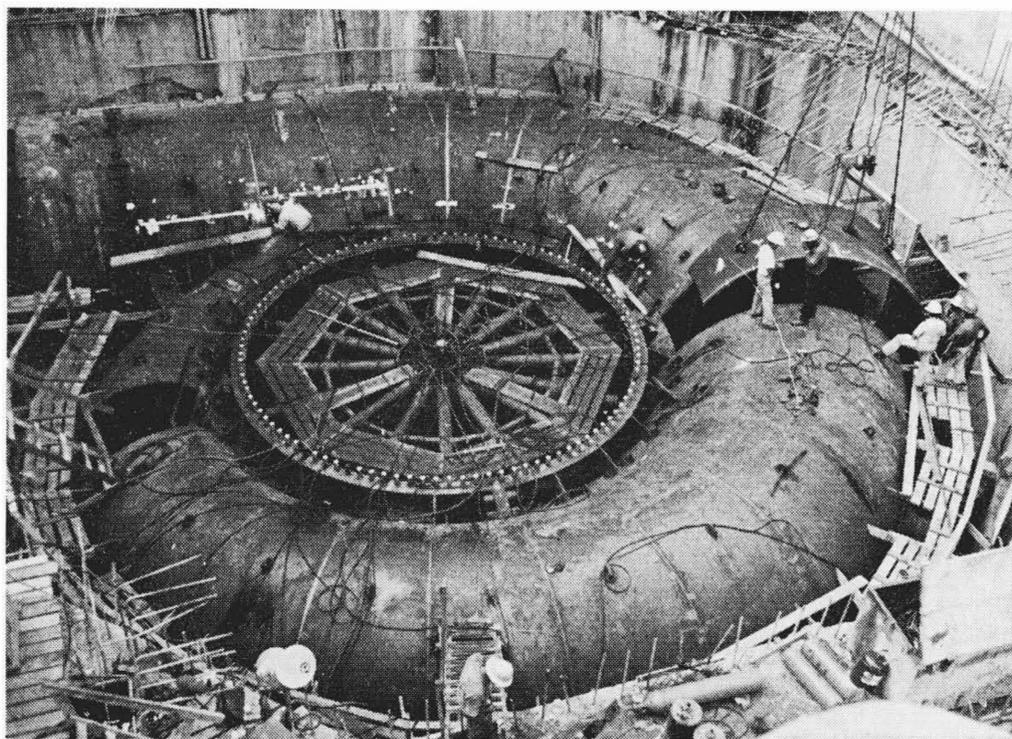


図4 ケーシング据付中の現地

市周辺の東部地帯、グアヤナ地方の三地方に送電され、この低コスト電力が、製鉄、化学工業、アルミニウム工業など豊富な鉱物および石油資源を利用した近代工業の発展に資すると期待されている。

カロニ川下流の開発は、図2に示すように前述のマカガ、グリの間二発電所間にトコマおよびカルアチ両発電所の開発地点を有し、本計画が完成すれば総出力14,000 MWになる予定である。

2.2 グリ発電所の概要

重力式コンクリートダムは、わが国の佐久間発電所の約50倍の貯水量を有しその規模の雄大さが伺い知られる。図3は発電所付近の全体配置図である。

日立製作所は、第一期計画10台のうち、今回建設される3台の水車本体、调速機、自動制御装置および油圧機器一式を製作するもので、これに直結される発電機は、アメリカの Westinghouse Electric International Co. で製作されている。発電機は、185 MVA、力率95%、18,000 V、128.6 rpm (60c/s) で、EL. 126.000 で、水車、発電機軸が直結される。両軸は、発電機製作者側工場、直結リーマ通しおよび振れ見が行なわれるので、水車軸はいったんアメリカのメリーランドにある同工場へ送付された。

発電所内配置は、図5,6に示すとおりで、今回は3台なるも、第一期計画の残り7台を増設するために、高さ19 m、長さ80 mの建屋が建設されることとなっている。

水車中心標高は、EL. 120.000 で、水車発電機の据付方式は、図5に示すように準パーレル形が採用されている。

上水位、下水位および有効落差の変化状況は次のとおりである。

	第一期計画	第二期計画	第三期計画
上 水 位			
最高(洪水時)	EL. 219.500	EL. 244.500	EL. 264.000
基準	EL. 215.000	EL. 240.000	EL. 263.000
最低	EL. 195.000	EL. 215.000	EL. 240.000
放 水 位			
最高(洪水時)	EL. 148.000	EL. 148.000	EL. 148.000
最大水量時	EL. 125.000	EL. 127.500	EL. 130.000
最低運転時	EL. 122.500	EL. 124.000	EL. 125.500
有効落差 最高	92 m	115 m	136 m
平均	85 m	105 m	119 m
最低	70 m	87 m	109 m

このように有効落差が大幅に変化するもので、ランナは第一、二期用と第三期用で、別のものが使用される計画となっており、水車はそのいずれをも投入し得るような寸法とされた。また、機械部分の耐圧は第三期の運転条件でも安全となるよう設計されている。

機器は水車軸を除きすべて、オリノコ川をさかのぼった河港マタンサスまたはサンフェリックス港で陸揚げされ、道路輸送された。

3. 297,000 HP 水車

3.1 水車仕様

水車出力	最高落差時制限出力	297,000 MHP (218,500 kW)
	基準落差時全開出力	245,000 MHP (180,200 kW)
	最低落差時全開出力	154,000 MHP (113,200 kW)
落 差	最高落差	115 m
	基準落差	92 m
	最低落差	70 m
水 量	最高落差制限出力時	207.5 m ³ /s
	基準落差全開出力時	215.5 m ³ /s
	最低落差全開出力時	183.0 m ³ /s
回 転 数		128.6 rpm
比 速 度		191.6 (m-kW)
形 式		VF-1RS (立軸フランス水車)
台 数		3台
回 転 方 向		時計方向 (上から見て)

3.2 水車の特性

水車の特性は主として模型試験により決定されることとなっており、効率、出力、キャビテーション、無拘束速度、水力推力などの確認試験が行なわれた。現地試験ではインデックステスト法だけが

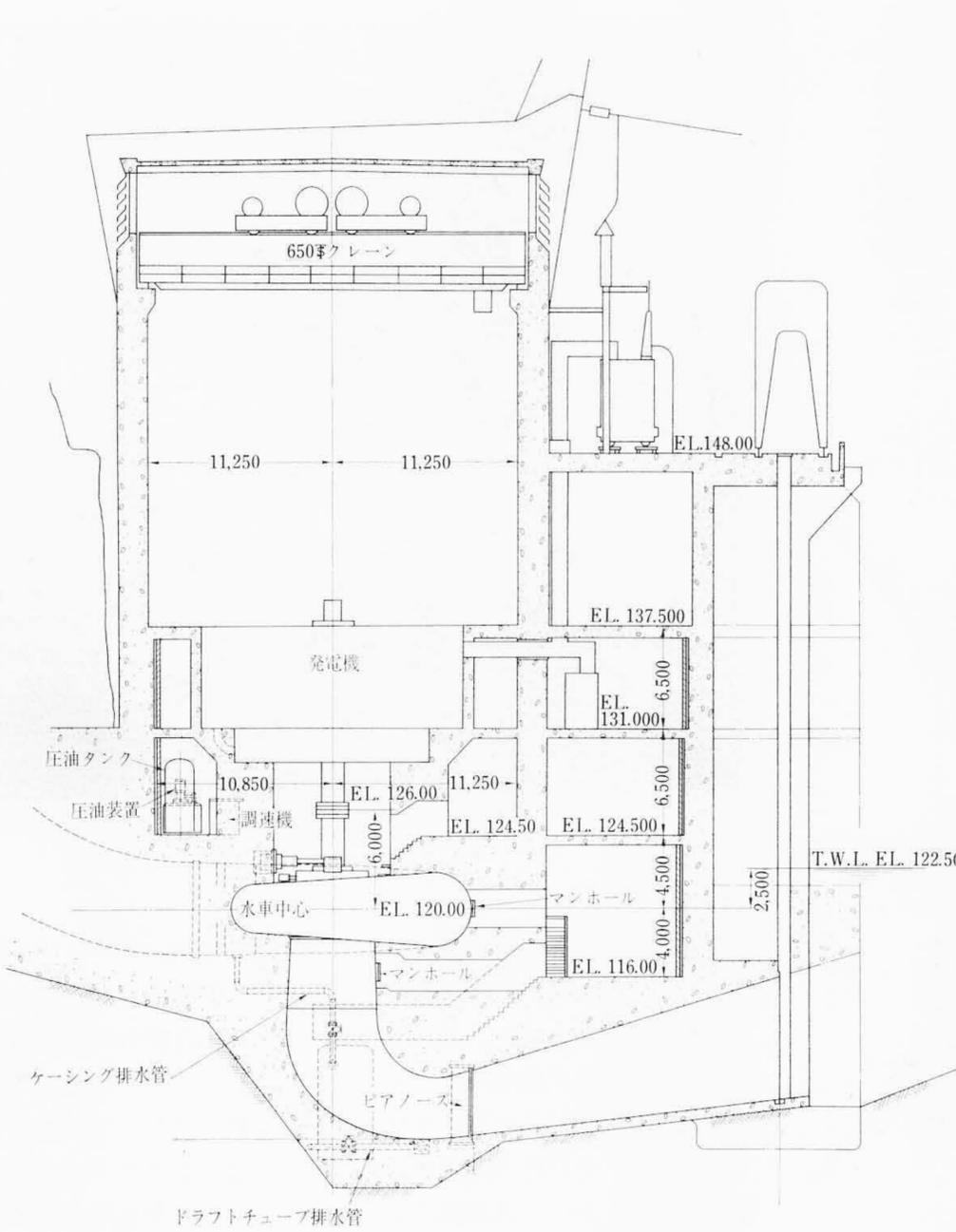


図5 据付断面図

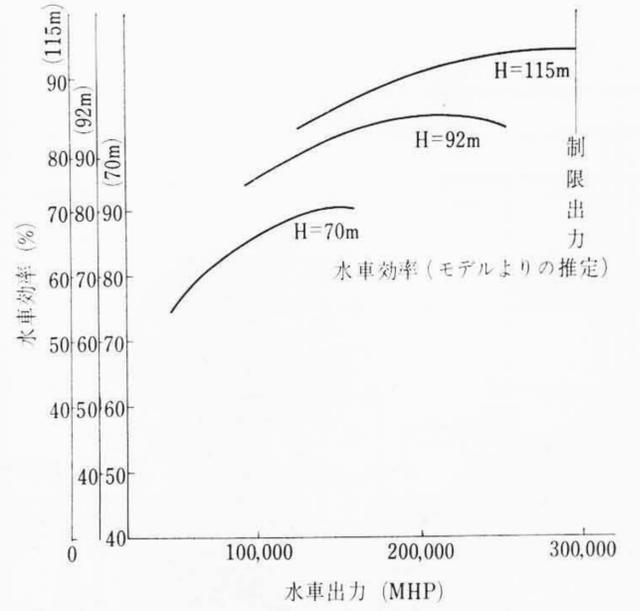


図7(a) 水車予想効率曲線

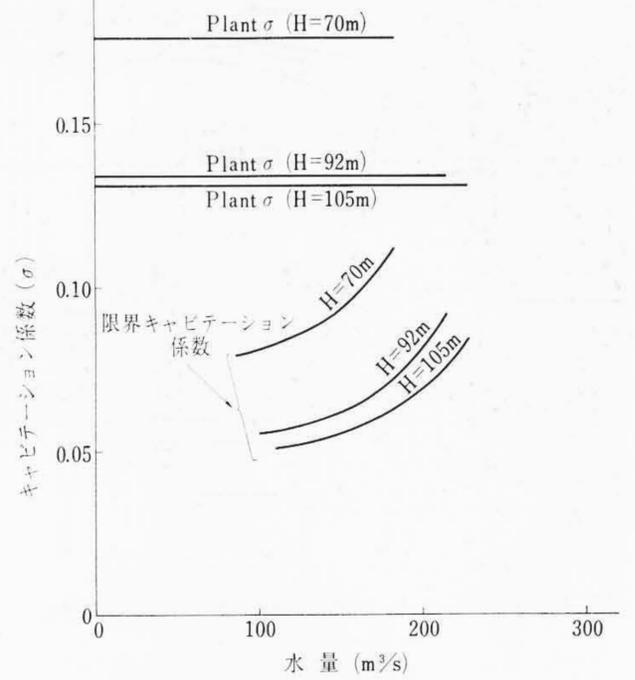


図7(b) キャビテーション性能曲線

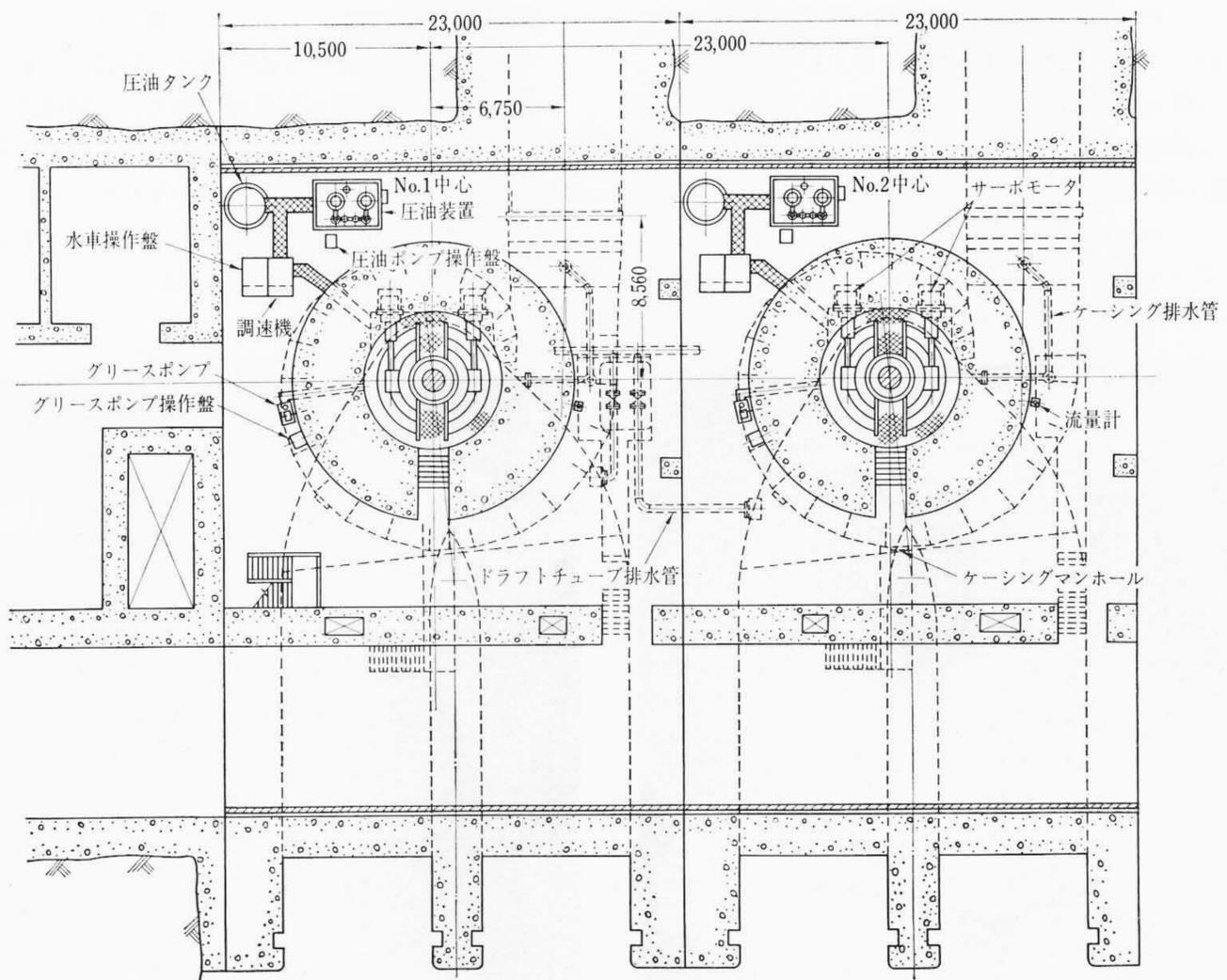


図6 据付平面図

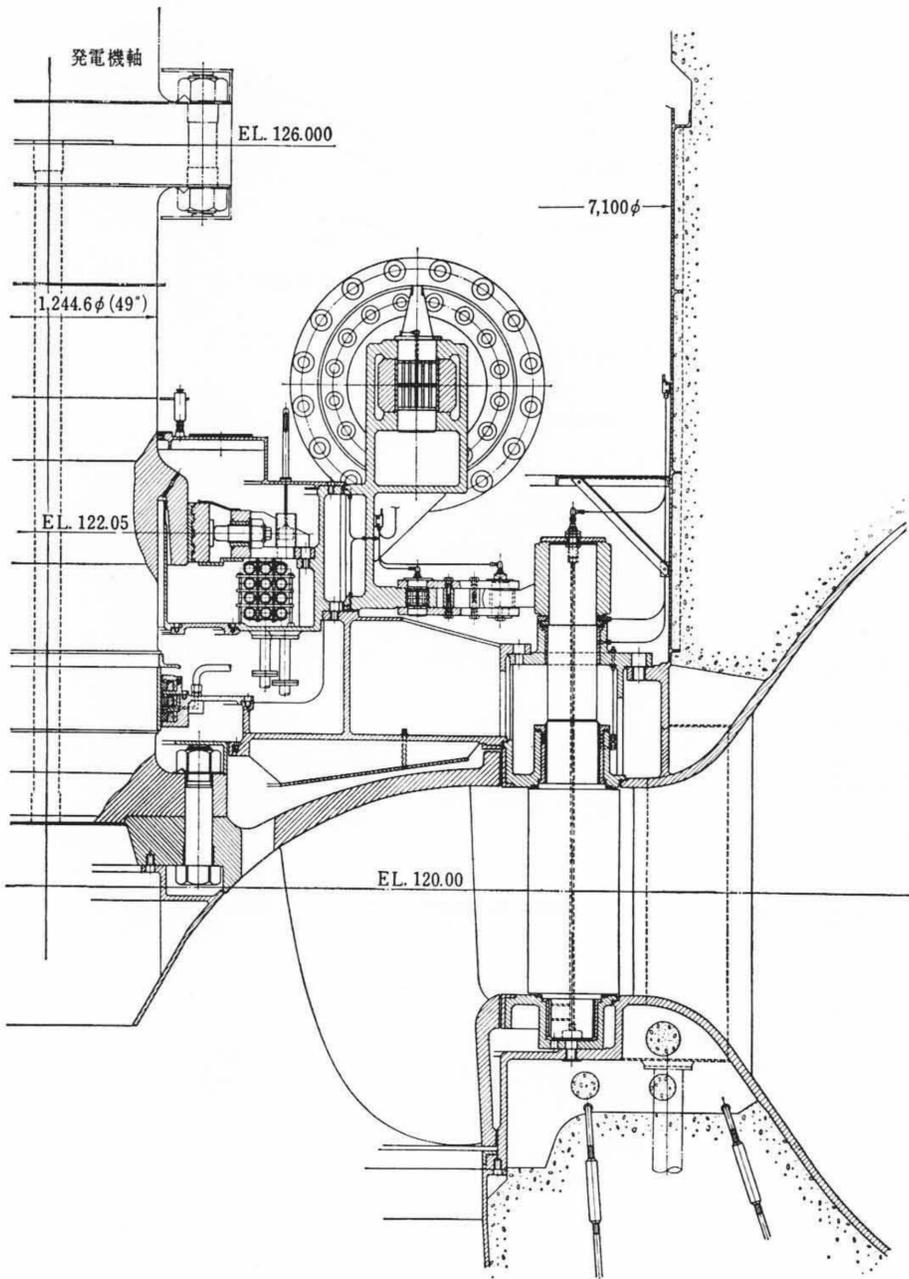


図8 水車構造図

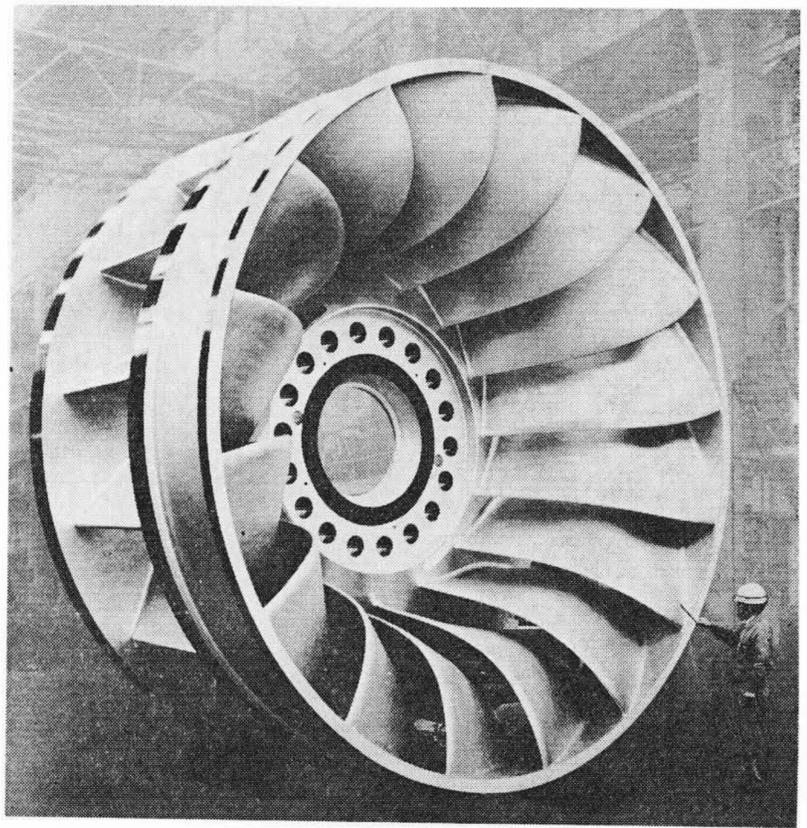


図10 工場完成したランナ

ている。

水車構造は、寸法的に本水車より大きいガーナ、アコソボ発電所用 158,200 kW 大容量水車と大差なく、形態のきわめて大きい中落差品であるので、設計に当たっては特別な検討が加えられた。主軸受は日立標準のセグメント形、ガイドベーン軸受は3軸受方式が採用されている。また本河川には鉄バクテリアが棲息しているので、その侵食対策として、ランナなどをステンレス鋳鋼製とするとともに、流水面にはビニールアルミニウム系の特殊塗装を施している。図8は水車構造図、図9は工場組立完成した水車本体である。

3.3.1 ランナ

最大外径 5.2 m の 13% クロームステンレス鋼一体鋳造品で、重量は 50 トンを越え、ステンレス鋼一体鋳造のフランス水車ランナとしては、海外にも例をみない記録品である。今回納入したランナは第二期計画まで使用するため、仕様はすべて第二期計画を基として第一、第二期で最も効率よく使用できるように設計されている。なお第三期では、新設計されたランナに取り換えられる予定である。主軸との結合は、リーマボルト方式でランナライナは設置されない。図10は工場完成したランナである。

行なわれることとなっている。図7は模型試験結果の一例を示したものである。

キャビテーションに対しては、運転後1年間の許容ピッチング量として 35 kg またはランナ羽根厚み 15% の減少として規定され、この間の運転条件は規定最大出力以上で 50 時間以上、規定最小負荷以下で 800 時間以上運転しない場合のみと厳格に定められている。

3.3 水車の構造上の特長

本水車は、アメリカのコンサルティング・エンジニアを通して行っているので、仕様書はアメリカ的内容が折り込まれており、主要材料は ASTM 規格、許容応力、溶接構造の主体は ASME 規格が適用され

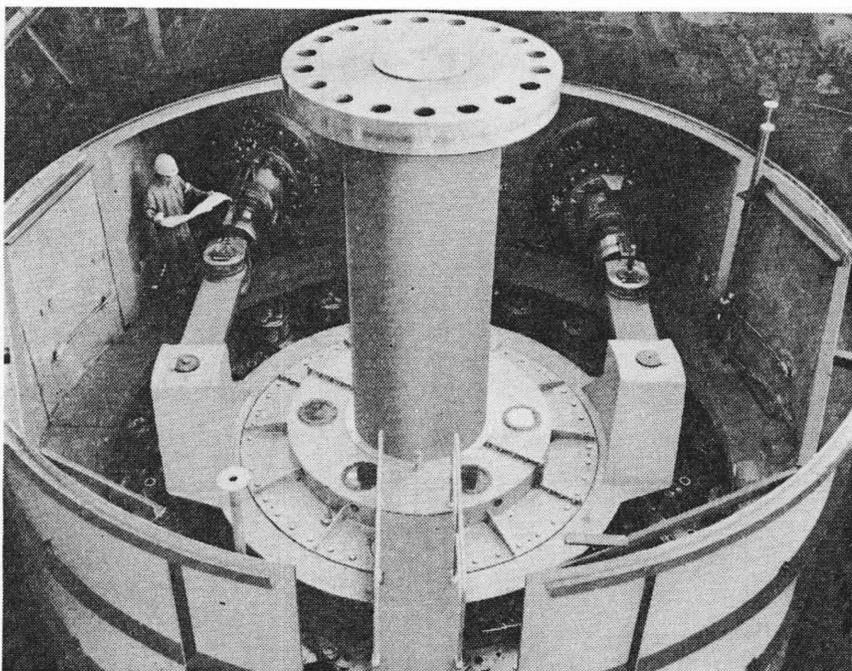


図9 工場組立完成した水車

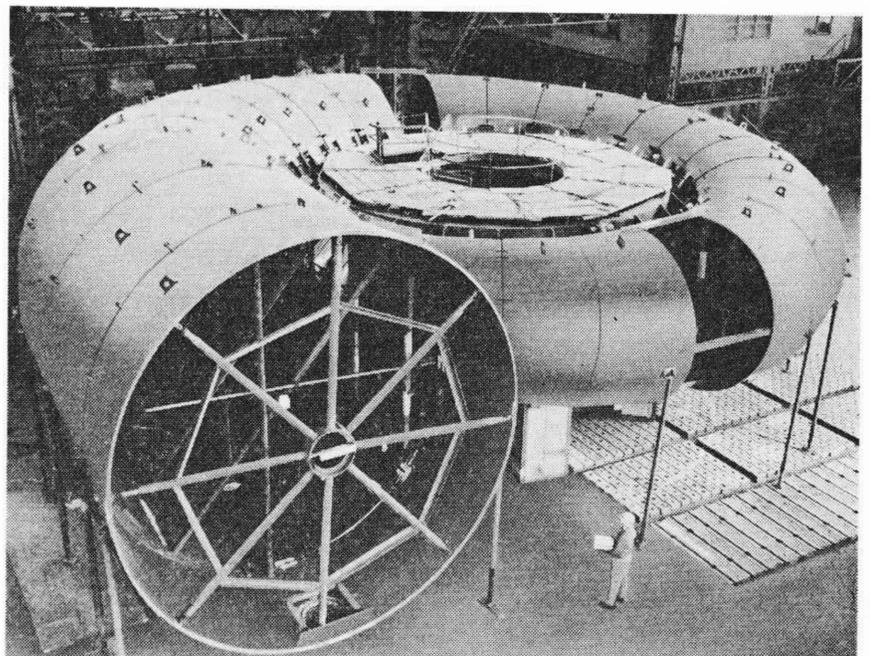


図11 工場組立完成したケーシング

3.3.2 スピードリングおよびケーシング

スピードリングは、4分割の鋼板溶接フランジ構造で、入口径5.7 mのケーシングは、25分割にて納入し現地で溶接される。据付および溶接作業は日立の指導員の監督のもとに、据付業者が請負っており、特に周継手にはすべてX線試験が実施される。スピードリング、ケーシングともすべて工場で仮組立を行ない合せマークを付けて納入した。

設計水圧は、第三期計画の圧力17 kg/cm²で、現地据付後、設計水圧と同じ17 kg/cm²で水圧試験が行なわれる。なおケーシング据付に際してはケーシング内部に14 kg/cm²の水圧をかけた状態でコンクリートを打設する方法が採用されることになっている。入口弁は設置されない。図11は工場組立完成したケーシングである。

3.3.3 主軸および主軸受

主軸は、軸端径49インチ(1,244.6φ)、軸長5.6 mで、上端フランジ寸法はASA規格B49.1-1947により決定されている。工場単独にNEMA規格により振れ見を行ない、発電機メーカーの工場へ送って直結リーマ通しおよび直結振れ見が行なわれる。また水車軸と発電機軸結合に使用するリーマボルト、ナット、カバーなどはすべて発電機メーカーで納入することになっている。

主軸受は、数多くの運転実績のある日立セグメント軸受方式が採用された。この方式によれば水車発電機の芯出しが容易で据付工程を短縮することができる。また保守点検ならびに組立分解が容易にできる。保護装置として、温度継電器、温度計などを備えている。

3.3.4 ガイドベーンおよび操作機構

ガイドベーンは、普通鋼製で、3軸受方式が採用されレバーを分解することなく、シェブロンパッキングの取換ができる構造である。ガイドベーン推力軸受は薄い調整板により上下方向の調整を行なう方式である。

サーボモータは、動作油圧25 kg/cm²で設計され、ピットライナに直接取り付けられ、操作推力はピットライナを介してコンクリートに伝達される構造である。

ガイドベーン操作機構は、集中グリース給油装置で給油され、また弱点ピン切断時水車を停止することなく切断したレバーを一時的にロックし、ピンを取り換えることのできるレバー調整装置を備えている。

3.3.5 主軸封水装置

封水装置は、常時清水、長期間停止後の起動時のみグリースを注入する3段分割パッキング構造で、パッキングの最下段は濁水用として帆布をフラン樹脂で処理成形したパッキングを、第2,3段めには、清水用として炭素焼成後、真空炉中でフラン樹脂を含浸させたカーボンパッキングを使用した。これらパッキングの材質は土砂の摩耗に対する耐久性および潤滑性ももっとも問題となるところであるが、研究の結果開発し良好な実績を得ているこれらの組合せを採用したものである。

3.3.6 上下カバーおよびライナ類

上、下カバーとも鋼板溶接構造で、上カバーは内、外に分割されている。ガイドベーンピッチ径より外側は17.0 kg/cm²、ピッチ径よりランナ封水部までは、その圧力の70%すなわち11.9 kg/cm²、封水部より内側はEL. 148.000に相当する背圧(2.8 kg/cm²)がかかるとして設計された。ライナ類は13Cr鋼板製で、ガイドベーンに接する部分はあらかじめ切断されたセグメントを個々にはり付ける方式が採用された。

3.3.7 ドラフトチューブライナ

ドラフトチューブライナは、28分割の鋼板現地溶接構造で、ピ

アノーズも同時に納入された。

4. 制御装置

制御装置は水車の速度制御、起動、停止などをつかさどる調速機とそのパワーソースである圧油を供給する圧油装置およびこれら機器とコントロールルーム間のシーケンス制御を行なう運転制御装置の三つに大別できる。機器の仕様はおもにアメリカ規格によっている。本発電所は高温多湿で種々の細菌が繁殖する特殊な条件下に建設されるため、機器のかび止め、さび止め、輸送方法などについては特に配慮された。本発電機器はおもに単独送電で運転され、しかもかなり激しい負荷変動が予想される。このため系統の安定性を確保するため制御装置には綿密な検討研究がなされた。

4.1 圧油装置

集油槽とその上に配置される先行、後行二つのポンプセット、アンローダ、安全弁のほか別置される圧油槽より構成される。圧油ポンプは電動機直結駆動の立軸スクルーポンプで吐出圧力25 kg/cm²、吐出量800 l/min、回転数1,800 rpmである。二つのポンプはエシェロンコントロール方式で運転され、先行は23.5 kg/cm²でオンロード、25 kg/cm²でアンロードするのに対し、後行は23 kg/cm²でオンロード、24.5 kg/cm²でアンロードする。空気の補給は別置された空気圧縮機から行なわれ油面の制御には手動操作方式が採用されている。油面が規定値以下になった場合は圧油槽の外部に装着された浮子式の最低油面検出器が動作して自動閉鎖弁を閉鎖して圧油槽と主サーボモータ供給管路を遮断し圧縮空気の流失を防いでいる。圧油槽内の圧力が規定値以上になった場合は空気安全弁が動作し、規定値以下になったときは油圧開閉器63 QGP 2が働き警報回路が生き、さらに低下すれば油圧開閉器63 QGP 3によってシャットダウンソレノイドが付勢される。

4.2 調速機

日立CB形機械式調速機が使用されている。この調速機の骨子は速度調速機として構成されており、速度検出部、増幅部、復元部、制御部の四つに大別できる。速度検出部はPMG、アクチュエーターモータスピーダより成り、増幅部は一次配圧弁、バルブサーボモータ、二次配圧弁、主サーボモータで、復元部はバルブサーボモータレタン機構、主サーボレタン機構、速度調定率調整装置、ダッシュポットでそれぞれ構成される。制御部は速度調整装置、負荷制限装置、急停止装置などで構成される。図12はこれらの機器を内蔵したガバナキャビネットの外観写真である。キャビネットの前面板には圧力計、開度指示計、回転計などの指示計や速度調整、負荷制限、速度垂下率調整などのコントロールハンドルが付いている。図13は本調速機の内部を示したものである。なお特長は次のとおりである。

(1) フライボールスピーダと一次配圧弁が一体構造に設計されており、スピーダの変位が直接一次配圧弁のバルブシートに伝えられるためスピーダ、一次配圧弁別置形にみられるような両者間のレバー機構のロスモーションを省くことができ感度が落ちることがない。またレバー機構に必然的に伴う摩耗による感度低下もない。

(2) 一次配圧弁とバルブサーボモータの圧油回路に直列に負荷制限バルブを設けこれによって油圧によりバルブサーボモータの動作を制限しガイドベーン開度を制限する方式が採用されている。この方式では従来の機械的に一次配圧弁位置を制限する方式に比べてレバー機構に無理な力がかからず、負荷制限バルブの位置も一次配圧弁と切り離して配置できるためレバー機構が簡単となる。またこの方式では一次配圧弁、負荷制限バルブの二つのコントロールバルブが独立にサーボモータの閉動作に対し優先性を

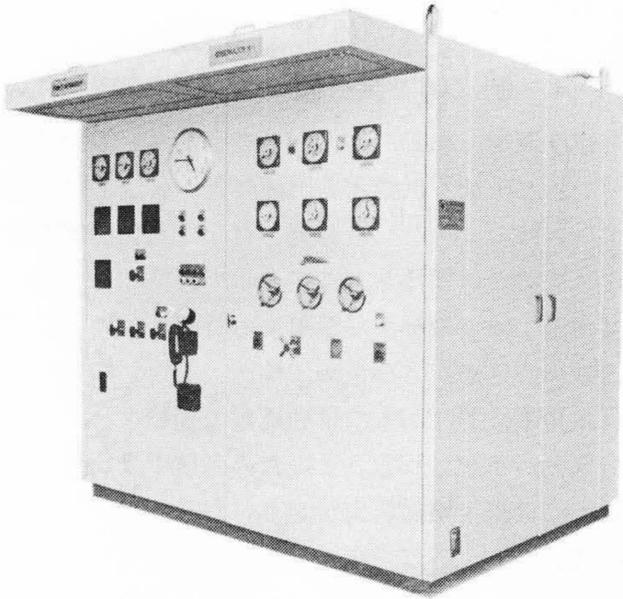


図12 調速機盤

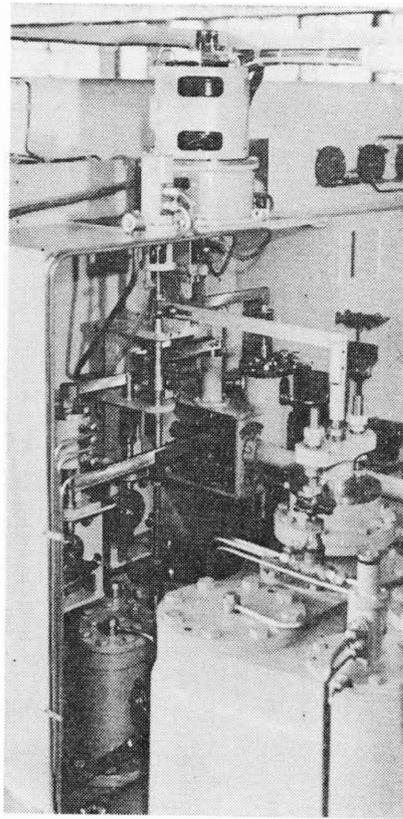


図13 調速機内部

もっている。このためどちらか一方のバルブが故障しても他方のバルブによって全閉できるという保証があり安全性が高い。

(3) ガバナ特性を下記のように広範囲に調整できる。

- | | |
|-------------------------|----------|
| (イ) 一次配圧弁と二次配圧弁間のレバーゲイン | 5~30倍 |
| (ロ) 速度調定率 | 0~5% |
| (ハ) 速度調整 | -15~+10% |
| (ニ) ダッシュポット利得 | 0~90% |
| (ホ) ダッシュポット時定数 | 0~50秒 |
| (ヘ) ダッシュポット入力ピストンの活殺装置 | 0~100% |
- (これは負荷の大きさに応じダッシュポットを活殺させるもの)
- (ト) ダッシュポット出力ピストンのストローク制限 6段階
(出力ピストンの位置に関連させバイパスさせることにより油圧的にストロークを制限するもの)

(4) 補助配圧弁運転中でも二次配圧弁運転中と同様無負荷開度急閉装置や全負荷遮断装置は有効でこれらの装置を操作するソレノイドバルブを介して非常停止ができる。

(5) 種々の補助機器の追加が容易である。

(6) 全部品がコード番号のもとに標準化されており部品の再注文が容易である。

(7) 高感度調速機で主サーボモータまでの不動帯 0.02% 以下, 10% 負荷遮断時の主サーボモータまでの不動時間 0.25 秒以下である。

上記性能は立合検査において確認されたものである。

4.3 水車運転制御装置

本発電所の運転制御装置は、前項記載の日立C B形調速機盤と併置される水車制御盤に内蔵され、そのおもなものは下記により構成される。

(a) 水車シャットダウン装置

使用目的に応じた日立独自の設計による複式電磁弁と盤面に取

り付けられた電磁リセットコントロールスイッチより構成される。

水車起動に当たり、電磁リセットコントロールスイッチを「リセット」の位置にセットしておき、かつ主機起動の条件が満足されていると、複式電磁弁の一方の起動用電磁石が付勢し、水車を起動する。かくして、主機運転中、主機停止を要する事故が発生すると、電磁リセットコントロールスイッチの電磁石が付勢して、複式電磁弁の他の一方のシャットダウン用電磁石が付勢して主機を早急に停止させる。

(b) パーシャルシャットダウン装置

単式電磁弁と無負荷制限用切換弁より成り、パーシャルシャットダウンの条件により単式電磁弁用電磁石が付勢して、切換弁を介して案内羽根をスピード・ノーロード開度に絞り、水車を無負荷運転にする。

(c) 発電機制動装置

単式電磁弁およびタイマを含む電気制御装置より成り、主機回転が約50%に降下すると、速度開閉器を通して単式電磁弁が付勢し、1分間ON, 1分間OFFの間けつ的ブレーキが3回働く。その後タイマ制御により連続的ブレーキに変わり主機を全停する。主機全停すると、タイマによりブレーキ回路が次期起動にそなえて開路されブレーキを解除する。

また、水車制御盤盤面には、水車および発電機各軸受温度を表示する警報接点付の温度計や、ケーシング水圧、ランナ測圧を表示する圧力計や連成計が取り付けられ、これら各計器の直読を容易にするため、調速機盤および制御盤上部にキャノピーライトが設けられている。

5. 結 言

日立製作所は、記録的大容量機である297,000 HP フランス水車および制御装置3台を製作し、ベネズエラ電力公社・グリ発電所に納入した。

前述のように、ベネズエラは豊富な地下資源に恵まれており、これらの開発は低廉な電力の供給に依存している。豊富な天然ガス、石油などを利用した火力発電所と比較しても、なお経済的な電力設備としてグリ発電所が計画されたので、本発電所の完成は、世界でも屈指の大容量水力発電所として業界の注目をあびるであろう。

日立製作所がこれら画期的な大工事の一翼をにない得たことに大きな誇りを感じるものである。

参 考 文 献

- (1) Water Power "The River Caroni Project" Oct. 1962
- (2) Water Power "The Guri Project" K. E. Sorensen & D. P. Roberts, March, 1965
- (3) Power Engineering "Guri Project on the Caroni River" June, 1964. K. E. Sorensen & D. P. Roberts