

上野尻発電所納 21,000 kW カプラン水車ならびに 21,000 kVA 交流発電機について

21,000 kW Kaplan Turbine and 21,000 kVA A. C. Generator Supplied to the Kaminojiri Power Plant

横井 信安* 浅利 政基* 大越 健児*
Nobuyasu Yokoi Masaki Asari Kenji Okoshi

内 容 梗 概

水車は東洋最大のランナを有する記録的大形水車であって、構造的にも鋼板熔接構造を広く使用したほか、各部の構造にも細心の注意が払われている。また巨大なランナブレードの加工に電気式の拡大倣い装置を有する専用の倣い加工機械を使用するなど、加工の面にも新しい工夫がなされた。

発電機は日立製作所が今まで製作したものの中で、回転数が最も低く、きわめて径の大きいものである。回転子は傘形構造とするとともに、シャフト、シャフトカラー、輻鉄をそれぞれボルト締めする方式とするなど、種々斬新な設計が行われた。工場試験において、無拘束速度における回転部の応力測定を行い、回転部の機械的安全度が十分大であることを実証することができた。

分なる検討を加え、きわめて性能の優秀な信頼度の高い機械とすることを期した。

1. 緒 言

日立製作所は、さきに東北電力株式会社の只見川水力開発計画の一環として片門発電所用 22,500 kW カプラン水車 2 台および本名発電所用 30,000 kW カプラン水車 2 台(増設機 1 台を現在製作中)を製作納入し、すでに好調な運転を続けているが、今回さらに阿賀野川水系、阿賀野川に建設される上野尻発電所用として 21,000 kW カプラン水車および交流発電機 3 台を製作納入した。

本発電所は片門発電所および本名発電所と同様堰堤式の発電所であり、ランナ直径が 5,150 mm で東洋における最大寸法の記録品として製作され、3 台とも好調に運転を開始したものである。

上野尻発電所用カプラン水車は上述のように形態が非常に大きいため、その設計、製作にあたってはあらゆる点に十分考慮が払われた、すなわち本水車の性能は工場内の水力実験室において、慎重な模型試験を施行してその優秀性を確認するとともに、各部の構造および使用材料に関しても種々検討を加え完璧を期し、特に構造に関しては広範囲にわたる全鋼板熔接構造を採用するなど、新しい構想が織り込まれている。

また、この水車に直結される発電機は、回転数が 115 rpm で、きわめて低いため、外径が非常に大きく、傘形構造を採用するに最も適したものである。製作にあたっては、豊富な経験を生かすとともに、各部の構造につき十

* 日立製作所日立工場

2. 計 画 概 要

(1) 位置

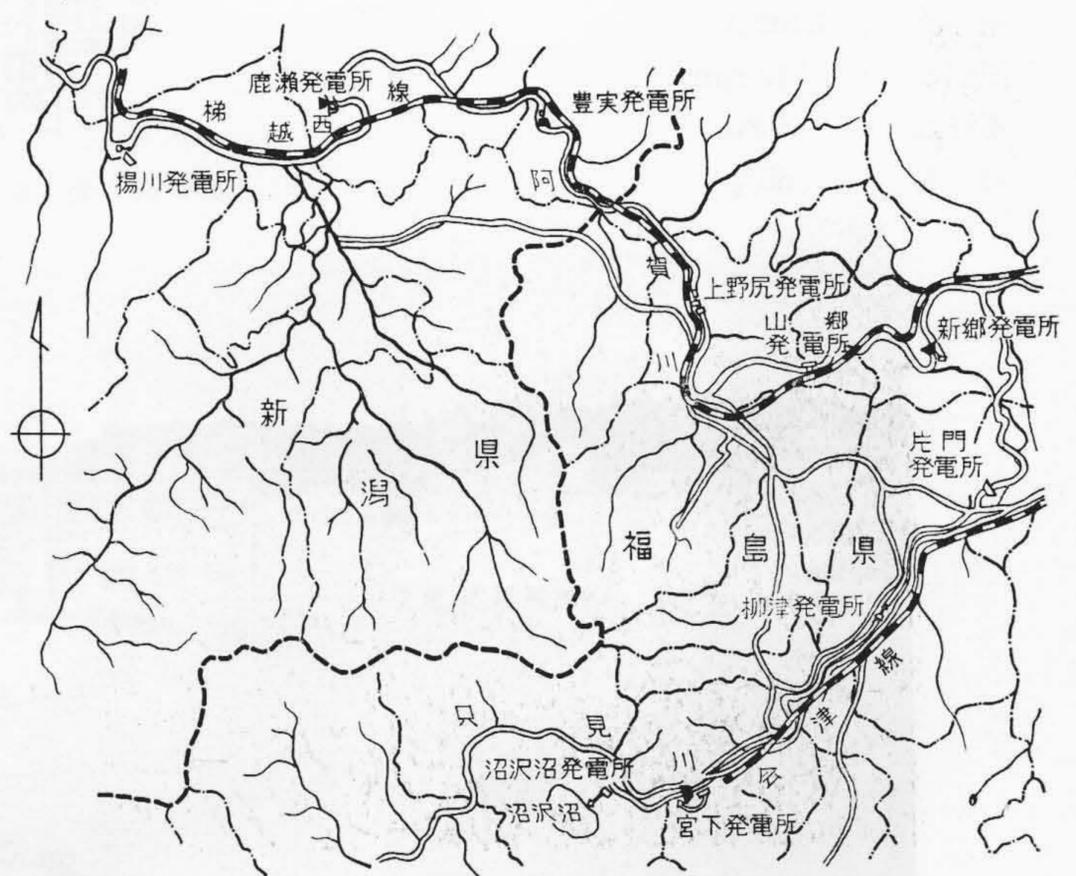
福島県耶麻郡西会津町新郷大字豊州

(2) 取水河川名

阿賀野川水系、阿賀野川

(3) 堰堤

形式	重力式溢流形「コンクリート」製
高さ	20.5 m
堰長	194 m



第1図 発電所位置図

溢流部門扉 高さ 7.8 m
幅 12 m
ローラゲート 8門

(4) 調整池

湛水面積 1,449,000 m²
有効貯水量 2,802,000 m³
利用水深 2.0 m

(5) 使用水量有効落差および発電力

	使用水量	有効落差	発電力
最大	430 m ³ /s	14.10 m	52,000 kW
常時尖頭	320 m ³ /s	13.49 m	37,000 kW
常時	92.9 m ³ /s	14.66 m	11,500 kW

(6) 水車仕様

形式 PMS-V (立軸半渦巻形カプラン水車)

最大出力 21,000 kW
有効落差 最高 15.1 m
基準 14.1 m
最低 12.1 m

最大水量 160 m³/s
回転数 115 rpm
特有速度 582 (m-kW)
台数 3台

(7) 発電機仕様

形式 VEFKW-RD (傘形閉鎖風道循環形, 空気冷却器付, 凸極回転界磁式, 制動巻線付)

容量 21,000 kVA
電圧 11,000 V
電流 1,102 A
回転数 115 rpm
周波数 50~
力率 85%

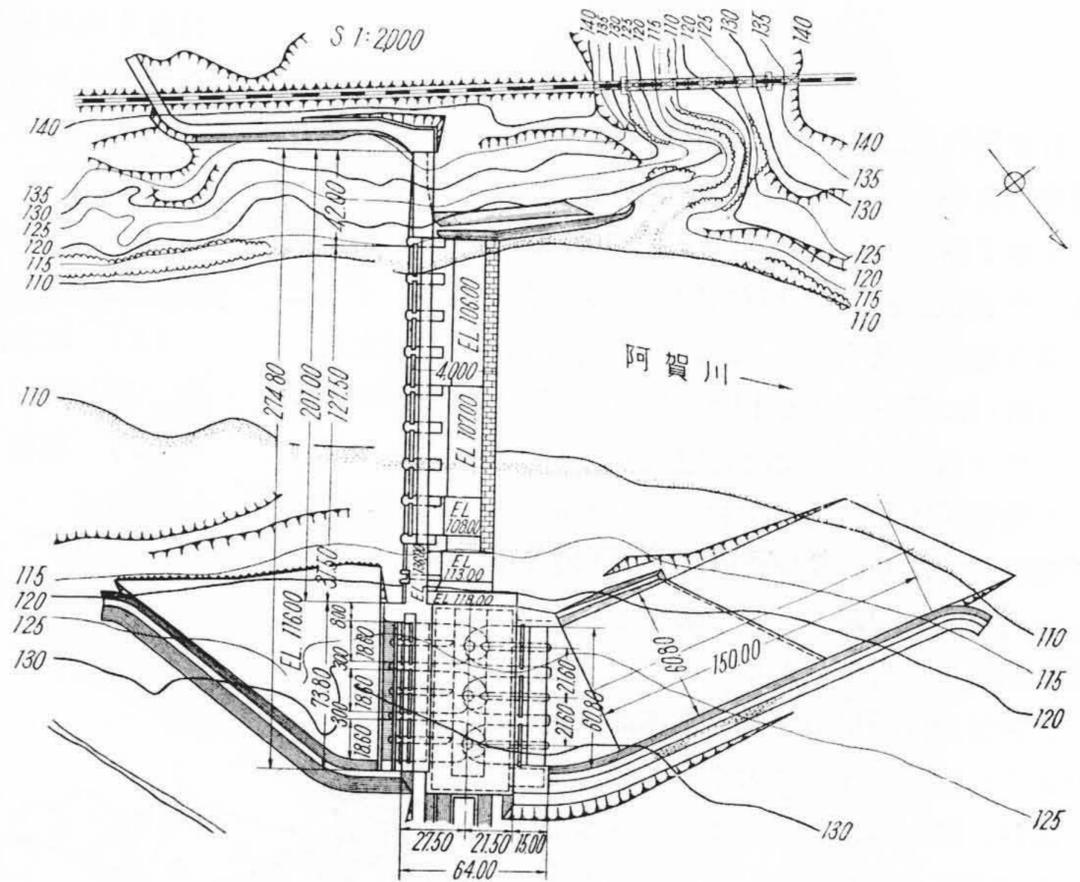
なお, 周波数が10%低下しても 21,000 kVA, 11,000V, 力率 95% で連続運転可能である。

(8) 励磁機

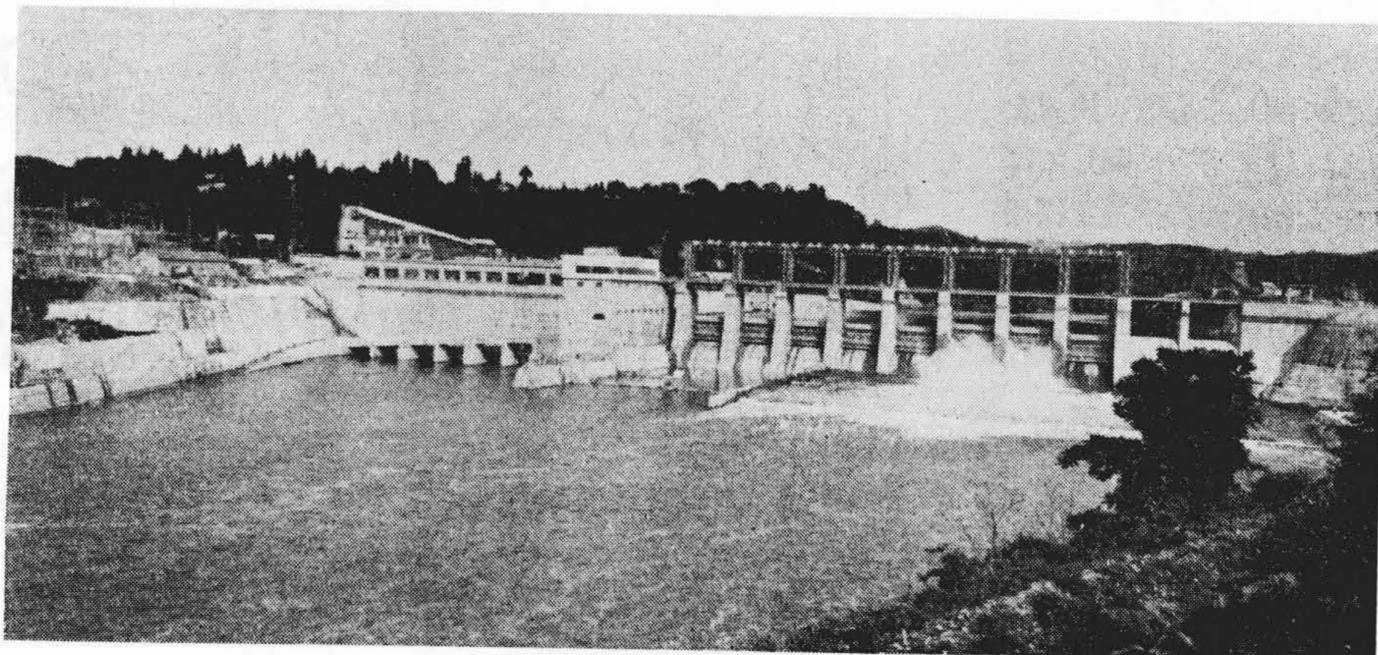
主励磁機 220 kW, 16極, 220V
副励磁機 15 kW, 10極, 110V

3. 建家配置

上野尻発電所は第2図および第3図に示すように, 堰堤式の発電所であって据付方式は第4図および第5図に示すように単床, パール方式を採用し, 调速機盤, 水車操作盤および圧油装置などの補機関係は放水路側に集中設置して, 建家幅および水車の中心距離を極力減少するようにした。



第2図 発電所付近平面図



第3図 上野尻発電所全景

4. 21,000 kW カプラン水車

4.1 模型試験

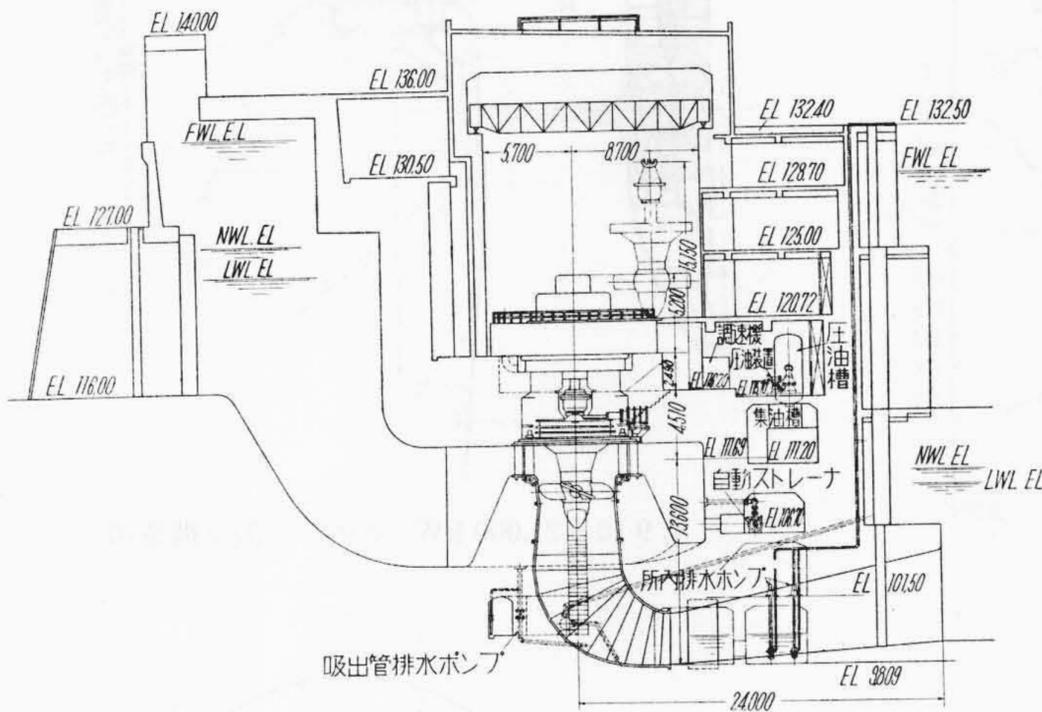
本水車は実物製作に先立って模型による効率試験ならびに空洞現象試験が慎重に行われた。今回の模型試験は広範囲の全鋼板熔接構造を採用するに当り水車内側カバーの流水面形状によってその効率特性ならびにキャビテーション性能がいかに影響されるかを確認するために2種類の内側カバーを試作し比較試験を行うなど慎重な模型試験が行われ好成績を収めることができた。

4.2 現地効率試験

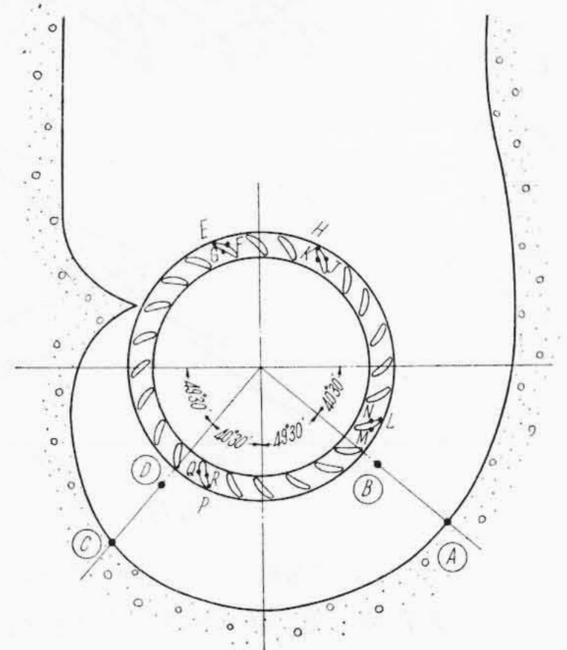
第1号ならびに第2号水車は通水後カレントメータ法およびインデックス試験を併用して現地効率試験を行っ

た。この水車には第6図に示すようにウインター・ケネディ法の測圧タップ (A~D) とベック法の測圧タップ (E~R) の両方が備えられているが、ベック法による測圧タップはガイドベーンの開度により特性に変化を生ずることが確認されたため、ウインター・ケネディ法のみが採用された。

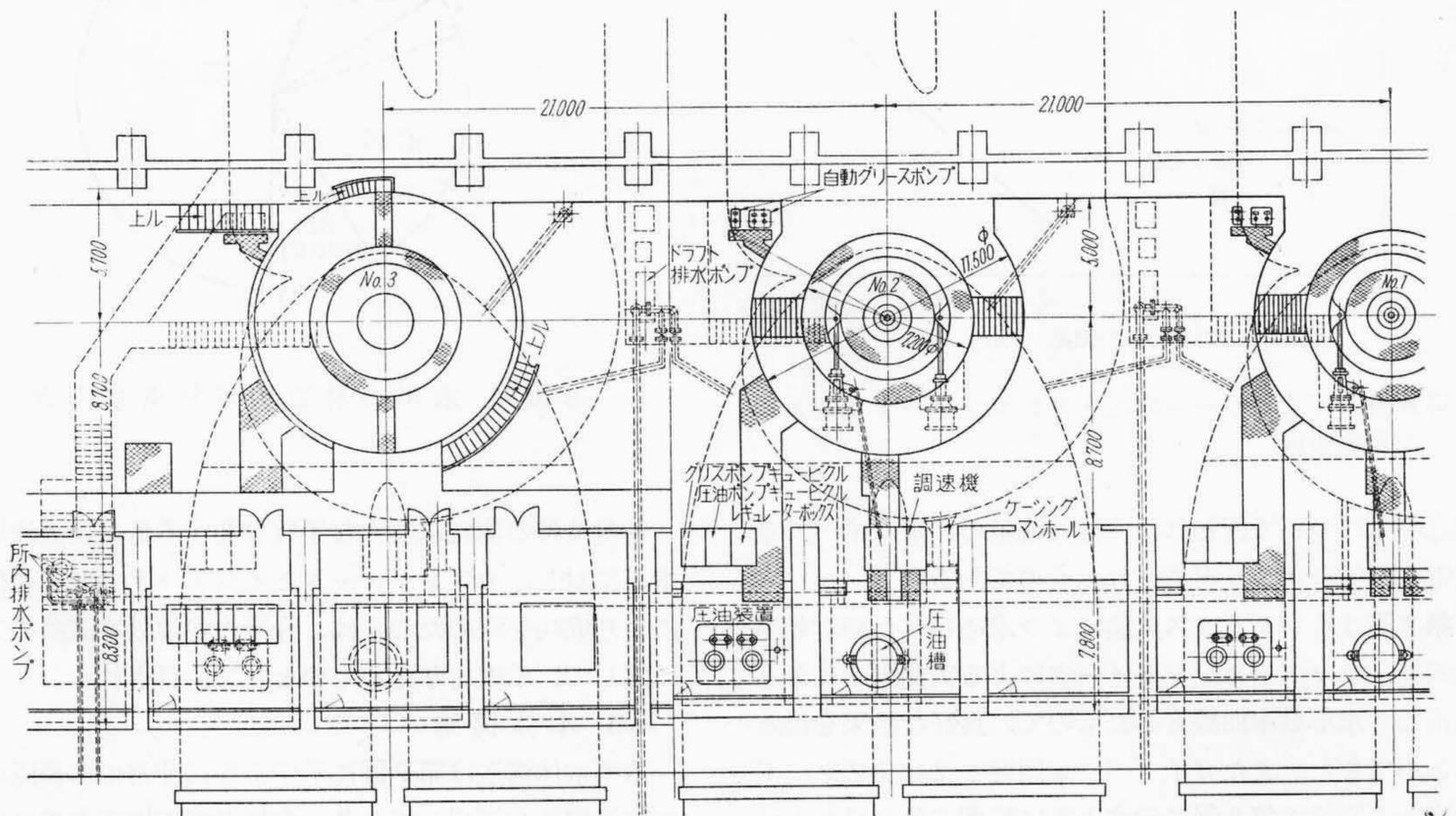
絶対流量の測定は、取水口ゲート部においてセンタピヤによって分けられている2個の取水口のおのおのを支持枠に取り付けた15個のオットーカレントメータを垂直方向に10個の位置、150点で測定し、片側の測定が終わったならば他の側に移し結局300点の測定を行った。カレントメータによる測定は1号機に対して出力約8,000 kW、2号機に対して出力約8,000kW および10,000 kW



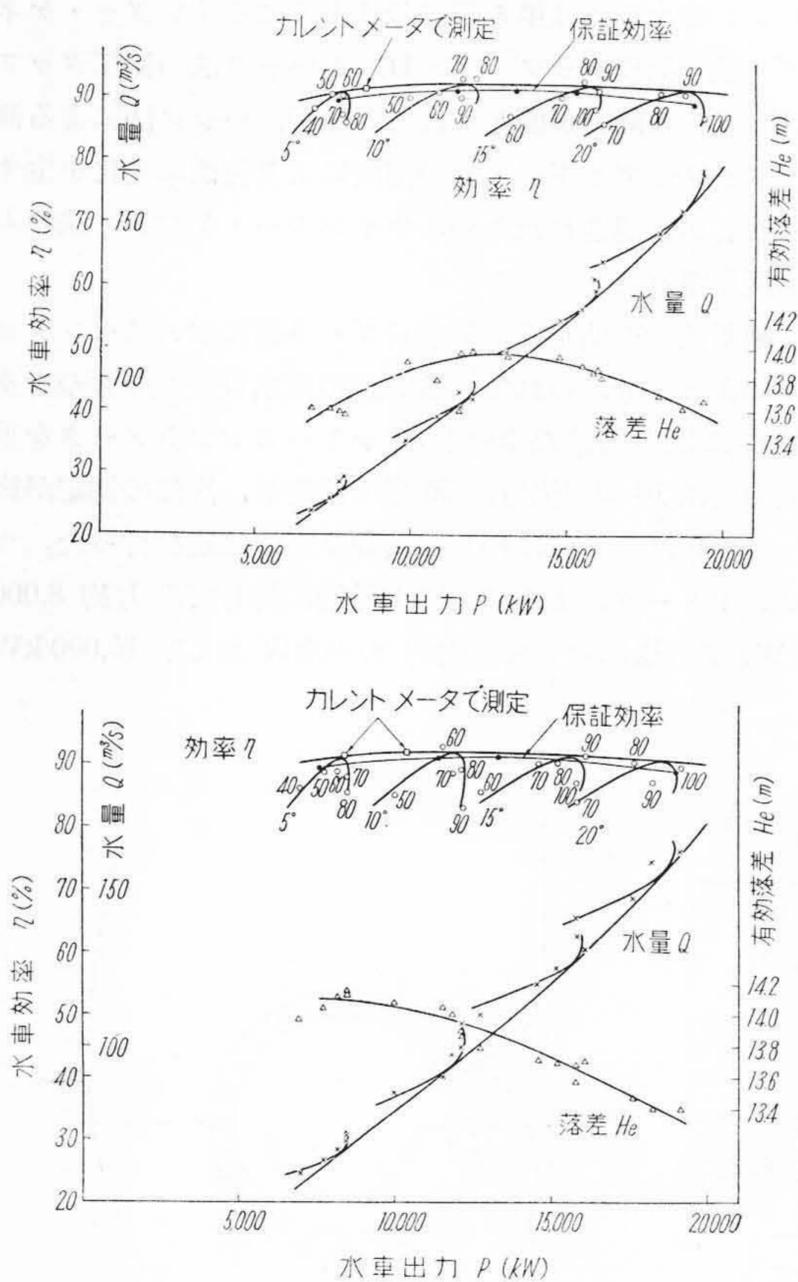
第4図 据付断面図



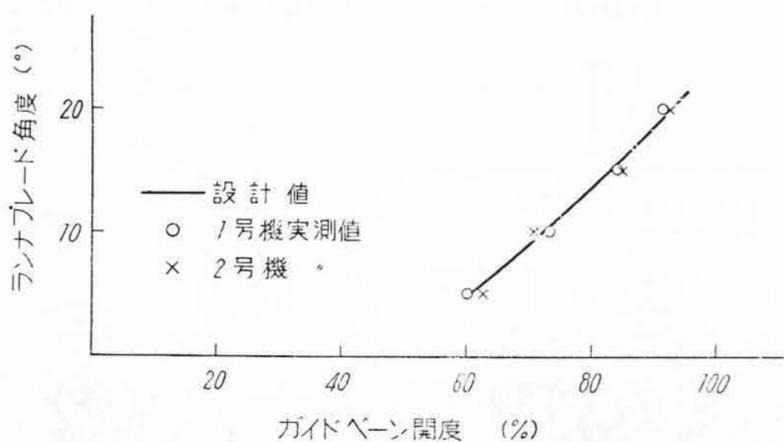
第6図 インデックス試験用測圧タップ配置図



第5図 据付面図



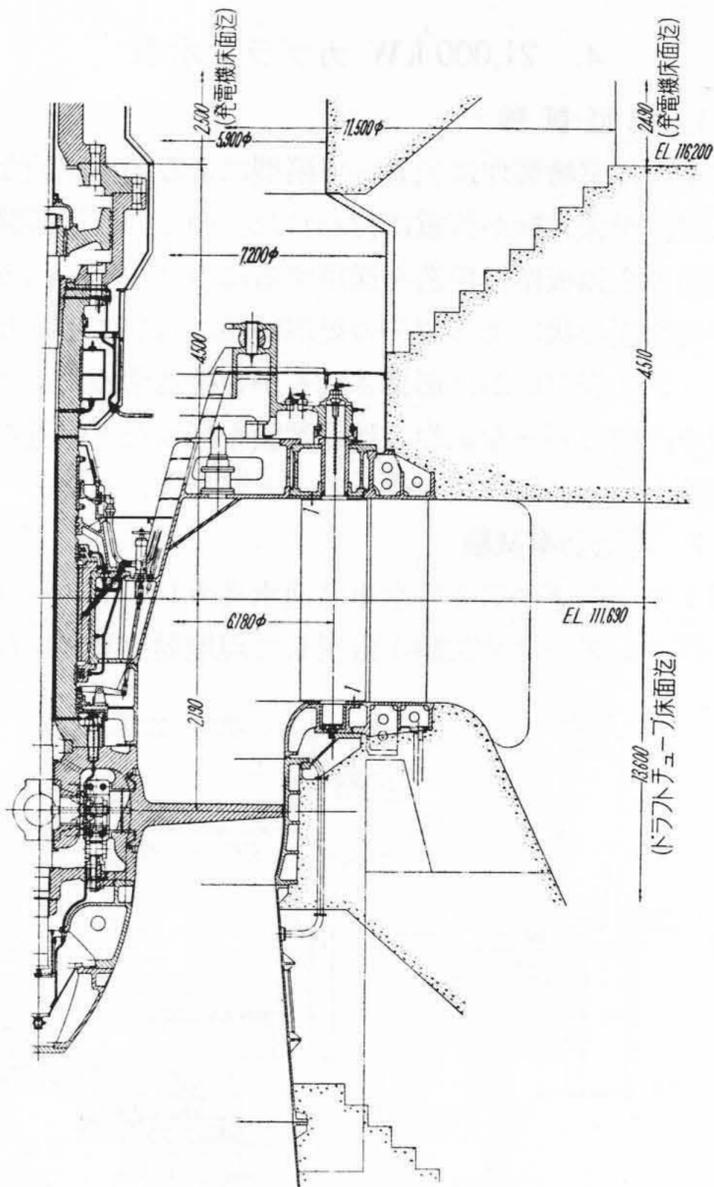
第7図 水車効率試験結果



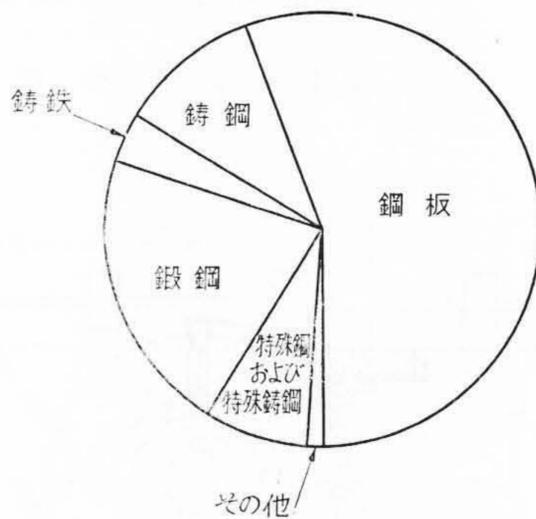
第8図 ガイドベーン開度とランナブレード角度との関係曲線

の点のみについて行われた。絶対流量の測定はすべて東北電力関係者により実施されたものである。

第7図はインデックス試験により求められた相対効率曲線を、オートカレントメータによる実測効率により補正して水車効率曲線としたもので、良好な結果を得ることができた。またガイドベーン開度とランナブレード角度との関係は第8図に示すように模型試験結果とよく一致する結果を示した。



第9図 21,000 kW カプラン水車構造図

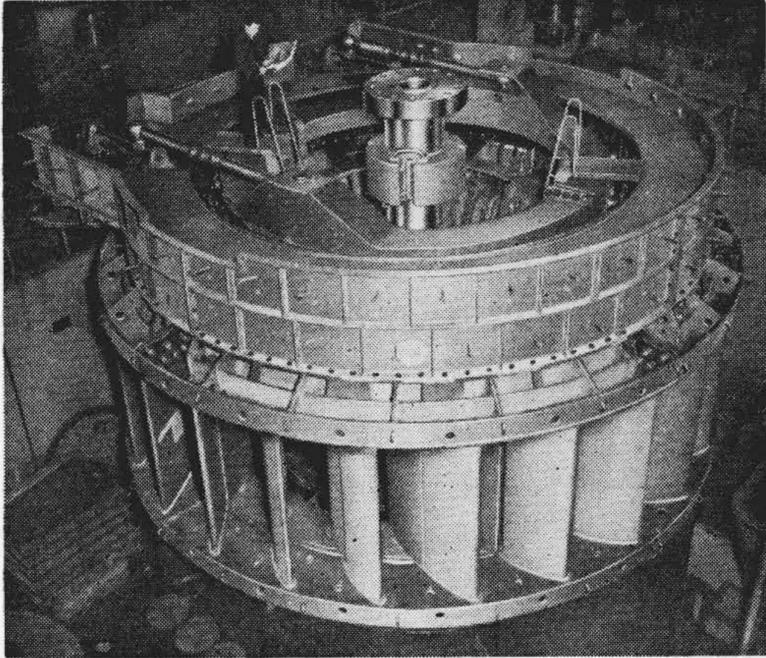


第10図 水車の材質別素材重量割合

絶対流量の測定に莫大な手数を要する低落差大流量の水車に対し、カレントメータとインデックス試験の併用により成功を取めたことは、今後の現地効率試験の方法に関して、示唆を与えるものとして注目される。

4.3 本体構造

水車本体構造は第9図に示すように非常に広範囲の鋼板溶接構造を採用しており、今後の溶接構造の設計ならびに製作の基礎となる多くの資料をうる事ができた。



第11図 21,000 kW カプラン水車工場内組立状況

第10図は本水車の材質別の重量比を示したものである。以下構造上の主要点について述べる。第11図は水車の工場内組立状況を示す。

4.3.1 ランナ

ランナは東洋最大の直径 5,150 mm の5枚羽根ランナであって、ランナの重量は 50 t に達する。ランナブレードは 13Cr 鋳鋼製、ランナボスは Cr-Mo 鋳鋼製であるが、この巨大なランナを製作するにはあらゆる点に苦心が払われている。模型試験においては4枚羽根および5枚羽根の両種のランナが試作され、比較検討の結果5枚羽根が採用されたが、このことはブレードの寸法を小さくして製作を有利にする意味においても有効であった。

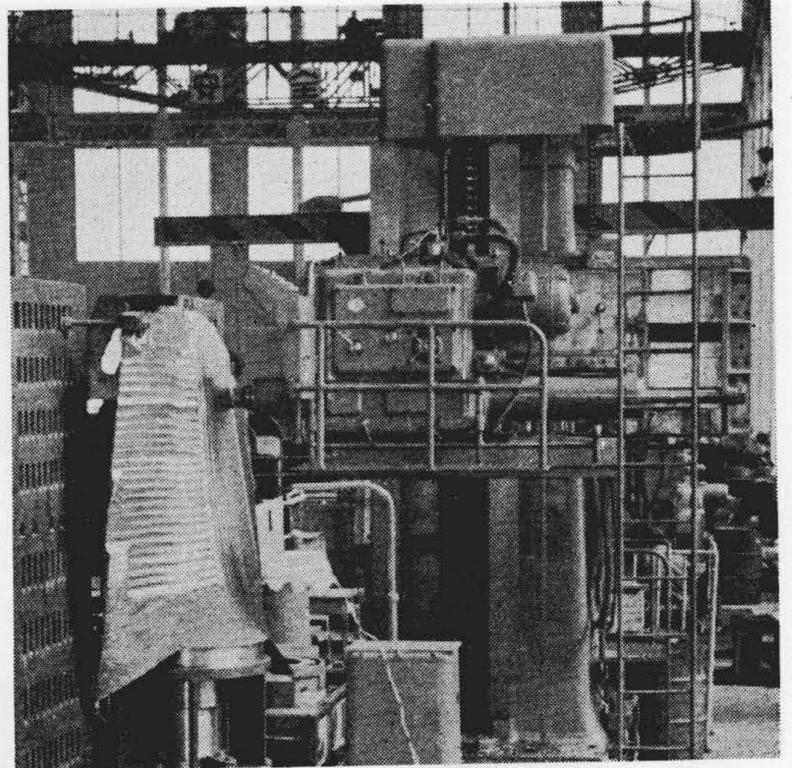
このように大形のランナブレードの翼面を正確に加工することは相当に困難な問題であるが、このランナブレードは電気式拡大倣い装置を有する専用の倣い横軸ボール盤を使用して機械加工を行うことにより好結果をうることができた。第12図は機械加工中のランナブレード、第13図はランナの操作試験状況、第14図は現地のランナ投入の状況を示す。

4.3.2 吸出管

吸出管は入口から屈曲部の終りまでと、センターピヤの先端部は鋼板製ライナによって保護されている。第15図は吸出管ライナの製作状況であり輸送の関係上21分割されてフランジ接手によって組み立てられている。入口径 5,400 mm, 出口幅 15,700 mm, 出口高さ 3,150 mm の大きなものである。

4.3.3 スピードリングおよびケーシング

スピードリングは全鋼板熔接構造を採用して製作され、最大外径 8,300 mm 高さ約 3,200 mm の大形のものであり輸送の関係上四つ割りとしてある。ステイバーは24枚で、うち4枚にはベック法による流量測定



第12図 ランナブレード倣い削り作業状況

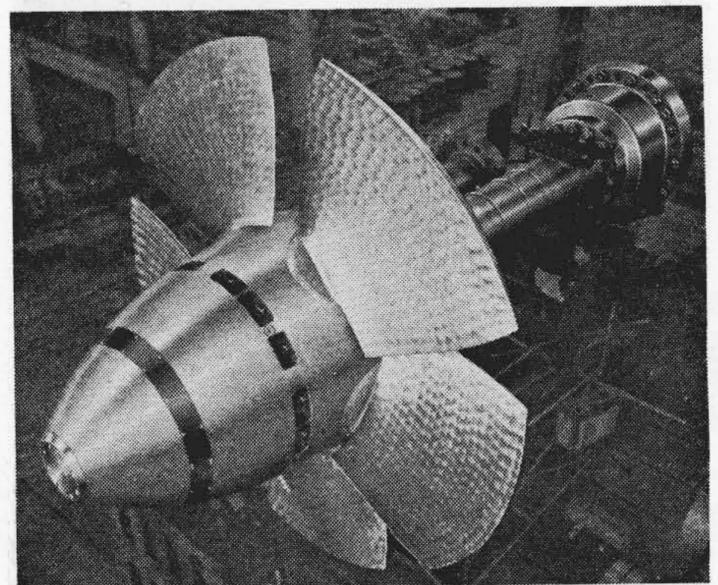
用の測圧孔が設けられ、銅管によってバーレル内部に導かれている。また上部にはガイドベーン用サーボモータの据付台が設けられている。第16図は工場内完成状況を示す。

ケーシングは半渦巻形コンクリート製で巻終部分およびマンホール部分は鋼板製ライナによって保護されており、ウィンター・ケネディ法による流量測定用の測圧孔を備えている。

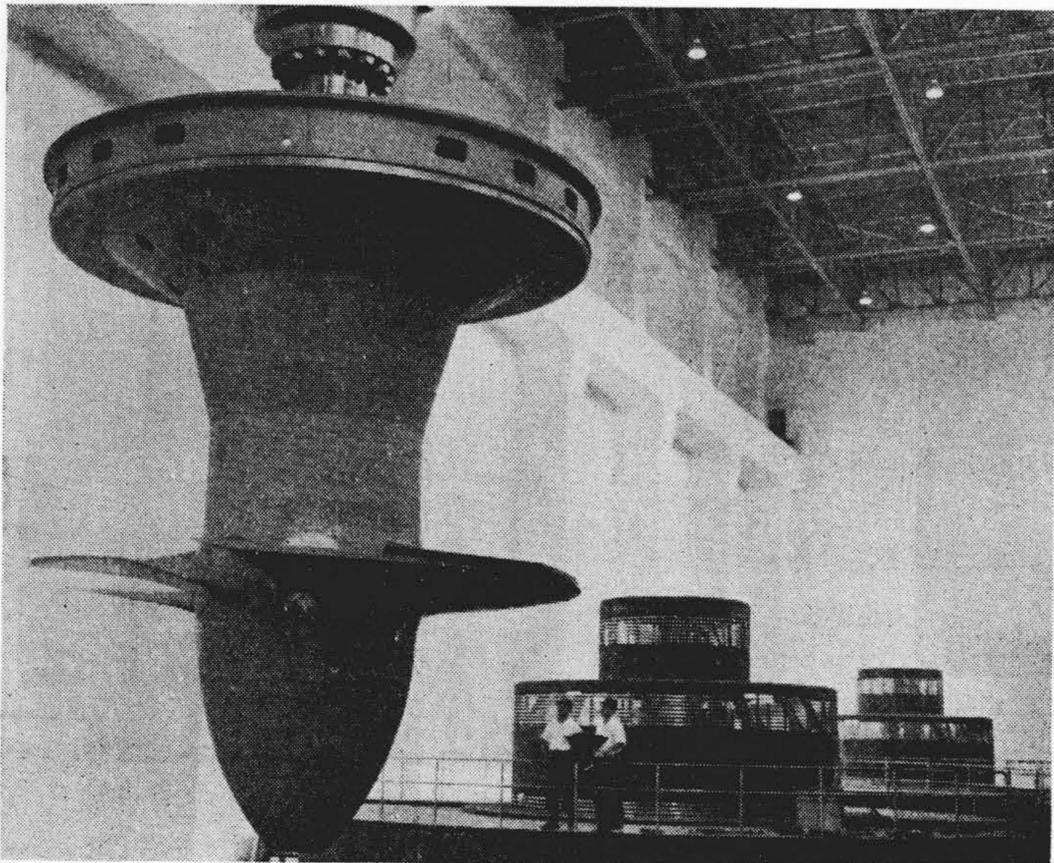
4.3.4 ガイドベーン

ガイドベーン枚数は24枚で、軸部と一体鋳造の鋳鋼製であり下部軸表面は不銹鋼の熔接肉盛を行っている。ガイドベーンの上下間隙を均一にするために水車カバー上に間隙調整装置を設け自由に調整できるようになっている。ガイドベーン軸受、ガイドベーンレバー、リンク類の摺動部は自動グリース給油装置によって自動的に潤滑される。

4.3.5 ディスチャージリング



第13図 ランナ工場内操作試験状況

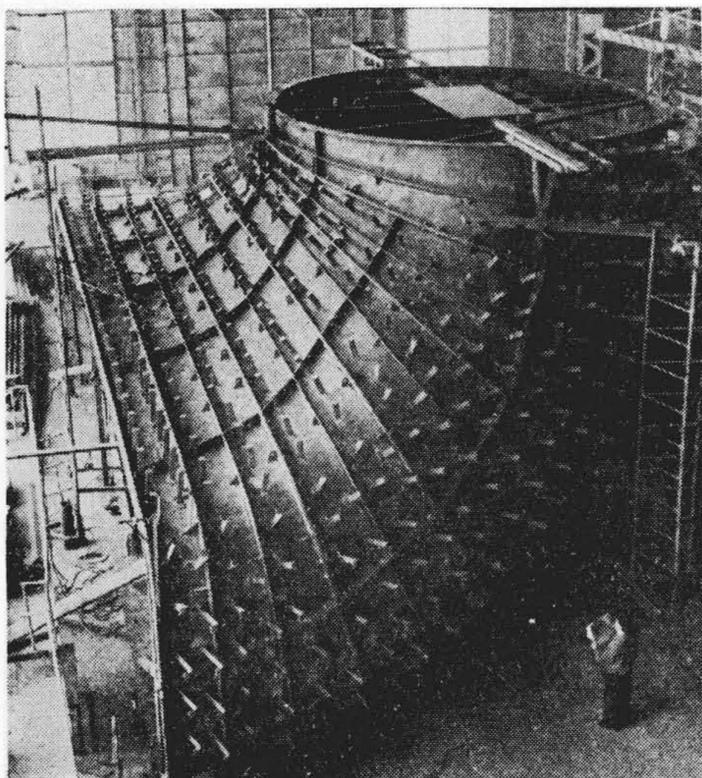


第14図 ランナ現地投入状況

径 5,700 mm 高さ約 1,350 mm の大形のものであり、二つ割りとしてある。流水面には不銹鋼を板張り溶接して流水中の土砂による摩耗ならびに空洞現象発生による腐蝕に対する耐久性を増大せしめた。

4.3.6 水車カバー類

水車上カバーは外側と内側とに分かれており、いずれも全鋼板溶接構造を採用して製作され、設計にあたっては実物大の模型を製作し強度ならびに構造上の検討を行ったものである。特に内側カバーの形状については前述のように模型試験により効率特性に悪影響のないことも確認して決定した。内側カバーには主軸受



第15図 吸出管ランナ工場内組立状況

台を設け水車と発電機を切り離した場合に水車回転部を支持されるようになっており、このため水車の組立分解には便利である。またダッシュポット付空気弁を設け、負荷の急激な変動の場合にランナ上部に自動的に空気を吸込ませて真空の発生を軽減し、振動の原因を除くようにしてある。第17図は工場完成状況を示す。

4.3.7 主軸受

主軸受はグリース潤滑方式を採用し、軸受の上部および下部には特殊パッキングを設けグリース消費量の軽減を計るとともに軸受部を保護している。主軸受の軸受合金部には軸受冷却用の冷却水管が埋込まれており、軸受外周の封水による冷却作用との両方を併用することにより軸受の冷却作用に

十分の余裕をもたせてある。

4.4 制御装置

4.4.1 圧油装置

単位方式であって常用、予備各1台の 60 kW 電動機直結のスクリーポンプを使用している。

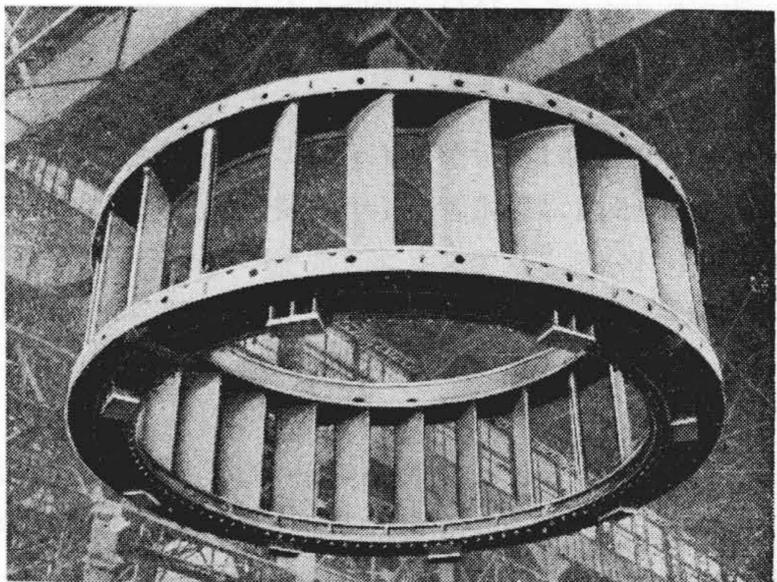
圧油ポンプは常用油圧 $21 \text{ kg/cm}^2 \sim 19.5 \text{ kg/cm}^2$ 、送油量 900 l/min 、回転数 960 rpm である。

4.4.2 自動グリース給油装置

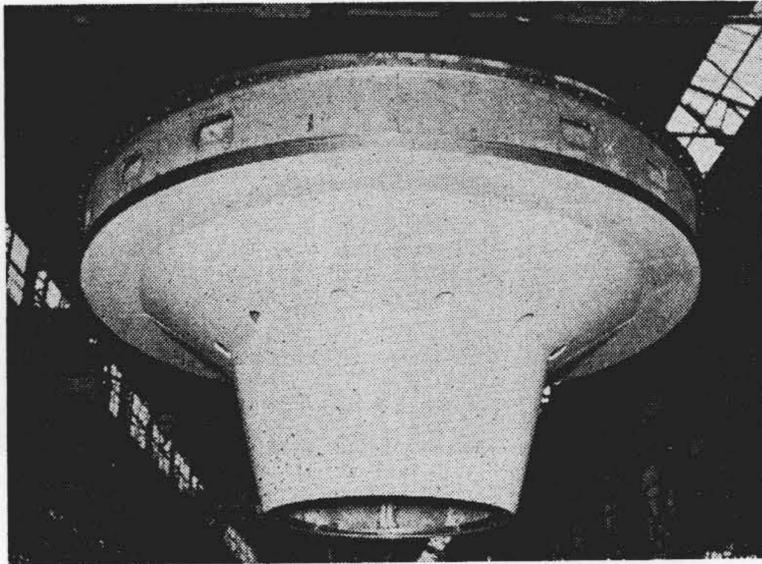
圧油装置と同じく単位方式である。グリースポンプは主軸受用として常用1台、予備1台の電動機直結式のもの、ガイドベーン用として常用は電動機直結式を予備として手動式のもの各1台、合計4台を備えている。

4.4.3 電気式調速機

本発電所に使用された調速機は電気式調速機である。電気式調速機は電氣的に周波数変化を検出し、増



第16図 スピードリング工場内完成状況



第 17 図 内側カバー工場内完成状況

幅、饋還を行う調速機で、従来の調速機より一段と向上した高性能なものである。ただし配圧弁からサーボモータに至る油圧操作機構は単なる増幅伝達装置であるので従来の機械式のものと同じものを使用している。

電気式調速機は電気部分を内蔵するレギュレータキュービクルと主として機械部分を内蔵するアクチュエータキャビネットの二つに大別され、レギュレータキュービクルは圧油ポンプならびにグリースポンプ用キュービクルと並べて水車室に設置され、アクチュエータキャビネットは水車操作盤と並べて水車室に設置されている。

第 18 図はレギュレータキュービクルの内部構造を示し、第 19 図はアクチュエータキャビネットの外観を示す。

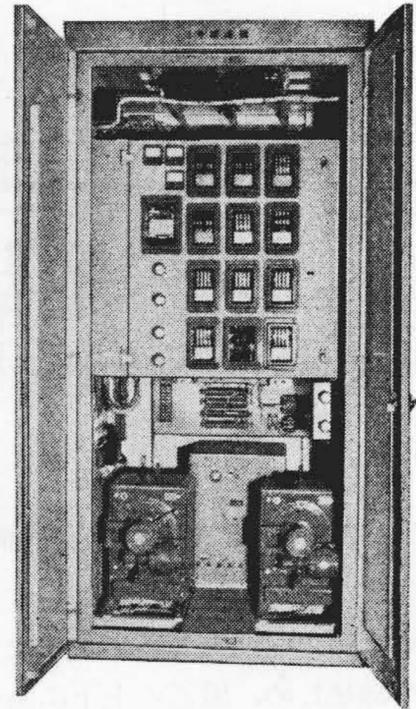
以上述べた電気式調速機は新設発電所用としては最初の製品である。

落差の変動に応じてランナブレード角度とガイドベーン開度の関係を調整していかなる落差の場合にも最良の効率を保持するための水位連動装置はアクチュエータキャビネット内に収められている。取水口水面および放水路水面の昇降による水圧の変化を検出して取水口水面と放水路水面との間の落差に相当する位置にカム軸を移動させ、各落差に相当する位置のカムのプロフィールをその落差の場合の最高効率が現出される関係を与えるように立体的な連動カムを使用している。

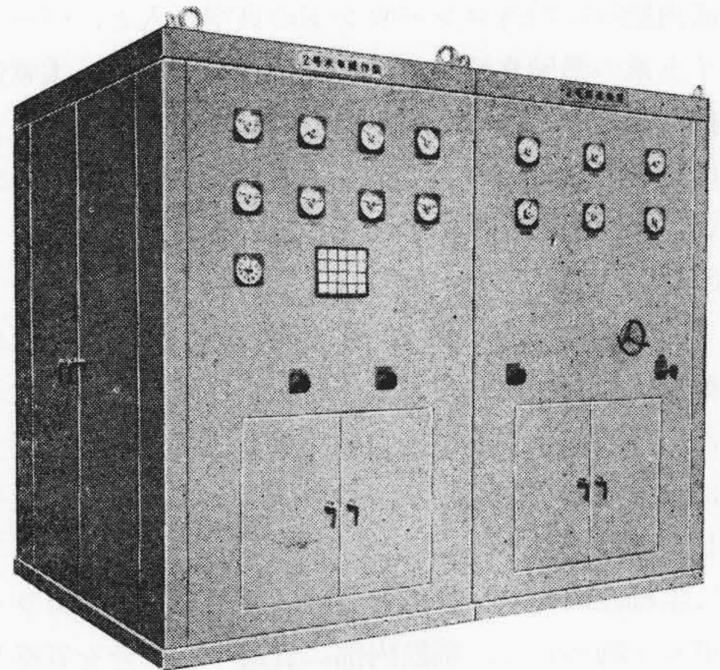
5. 21,000 kVA 交流発電機

5.1 発電機構造

この発電機は、前に製作した、東北電力、片門発電所納 24,000 kVA、125 rpm の発電機よりさらに一段と回転数が低く、今まで製作したもののうちで最も低速のものである。日立製作所は、昭和 26 年、蘭越発電所納 7,000 kVA、167 rpm の発電機に、初めて傘形構造を採



第 18 図 レギュレータキュービクル内部



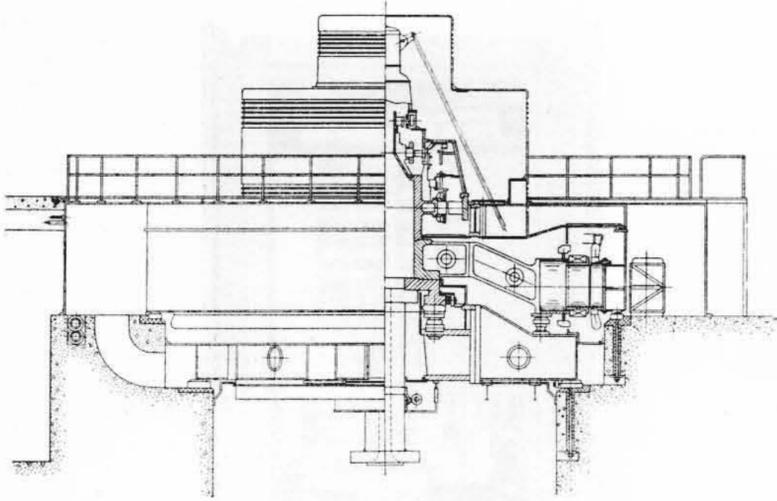
第 19 図 電気式調速機盤（アクチュエータキャビネット）および水車操作盤外観

用して以来、数多くの傘形交流発電機を製作しており、本機においてもこれらの経験と実績をもとにして、傘形構造を採用することにより、経済的でしかも信頼度の高い機械を製作した。

第 21 図に工場で組立を完了した外観を示す。一見して明らかのように、低速度であるため、径がきわめて大きく積厚の小さい、非常に扁平なものとなっている。風道の外径は 11 m にも達し、佐久間発電所納の 93,000 kVA 発電機と同じで、非常に大きなものである。以下各部分につき構造の大略を記述する。

5.1.1 固定子

固定子枠は鋼板溶接構造で、輸送上 4 個に分割している。短絡時の最大回転力に耐えるよう、また振動など発生することのないよう、十分なる剛性をもたせている。固定子枠外周には、対称に 8 個の空気冷却器を



第 20 図 21,000 kVA 交流発電機構造図

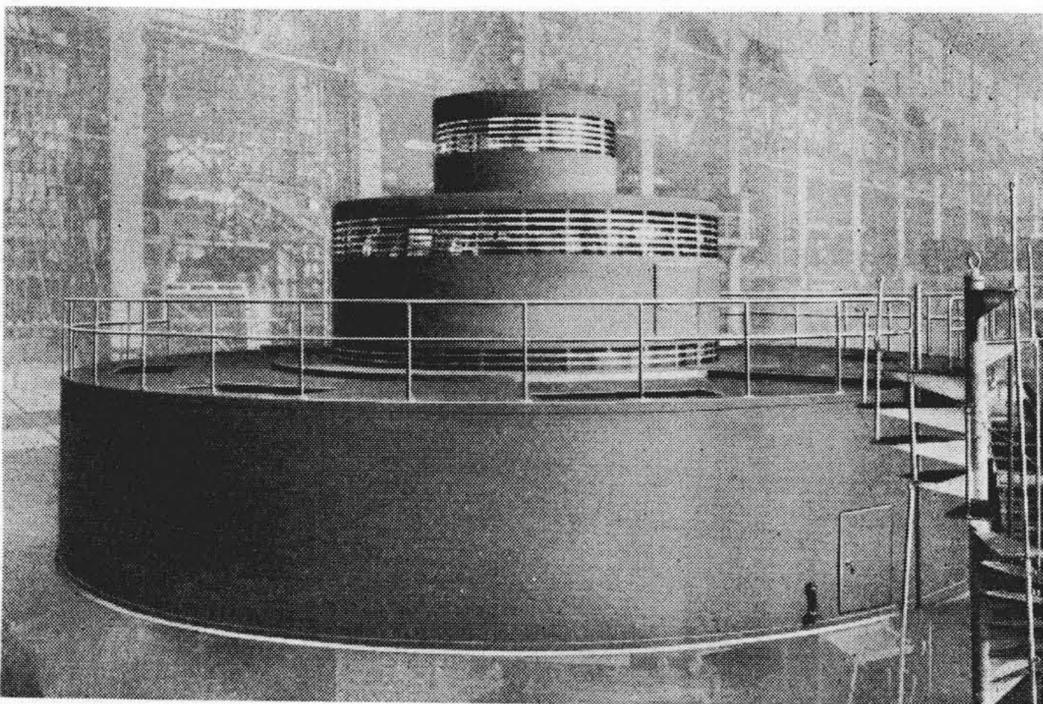
配置し、固定子鉄心の通風ダクトを通して出てくる熱風を有効に冷却せしめ、風道の上下にある通風孔を通してふたたび機内に風を循環せしめている。

固定子線輪は、二層重ね巻とし、B種絶縁である。溝内絶縁は特殊コンパウンドの真空圧入と、ベークライト系の熱硬化性ワニスの焼付とを併用し、柔軟性を持たせるとともに、高温でも変形を起さないよう完全に整形されている。コイルは溝外で完全な転位を行い、渦流損失を極力少なくしている。

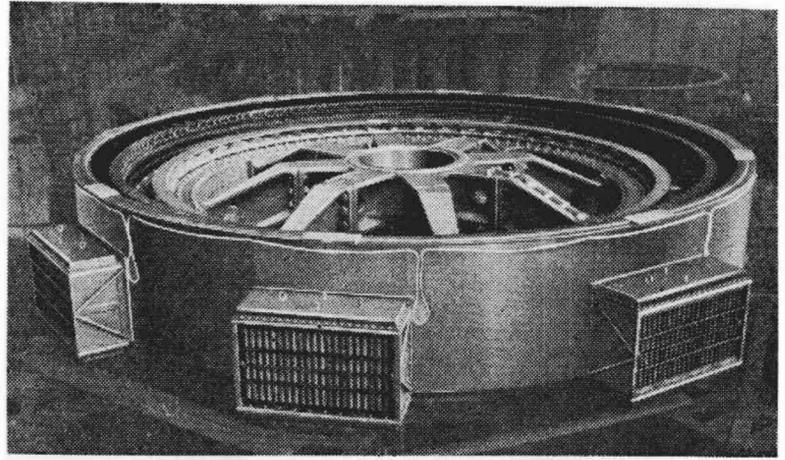
5.1.2 回転子

回転子の構造は第 20 図で明らかなように完全なる傘形構造を採用している。回転子の径が非常に大きいので、回転子下部に推力軸受および案内軸受を配するに十分なる空間があり、傘形構造とすることに最も適した機械である。

主軸は両フランジ形とし、上面をシャフトカラーにボルト締めして、輻鉄内部に貫通する部分を省略している（新案 401955）。またシャフトカラーと主軸とは輻鉄に締付ボルトにより強固に固定してある。本方式を採用することにより、主軸の長さが短縮されるとと



第 21 図 21,000 kVA 交流発電機



第 22 図 固定子および回転子

もに、回転子の分解、組立および推力軸受の調整などが著しく容易になっている⁽¹⁾。

継鉄は良質の鋼板を扇形状に打抜き、これを合理的に積み重ね、リーマールボルトで強固に締付けるセグメント形積層継鉄を採用した。カプラン水車の高無拘束速度（規定速度の 270%）にも十分耐えるよう特に考慮してある。中央部にはセグメント鋼板の配列をかえることにより、数列の通風孔を設け回転子および固定子の冷却効果をよくしている。第 22 図は固定子に回転子を組み込んだときの外観である。

5.1.3 その他

推力軸受にはピボット式の日立セグメンタルスラストベアリングを採用した。調整ボルトは油槽の下部で外部から調整が可能である。調整ボルトは水車および発電機の回転部分全重量およびカプラン水車の大きな水圧荷重を支持するため、形状、材質ともに十分考慮を払っている。軸受は油自蔵形とし、油槽内には冷却蛇管を設け冷却水を通じて油を冷却せしめる方式である。下部ブラケットは、推力軸受にかかる全垂直荷重によって、異常な撓みを生ずることのないよう、きわめて強固な構造となっている。放射状に出たアーム

は、コンクリート・バーレルに埋込んであるベースに基礎ボルトで固定される。案内軸受は日立セグメント式案内軸受とし、推力軸受と同一油槽内に設け、シャフトカラーの外周を支える構造としている。メタル支えを介して、下部ブラケットの継鉄内に高く突出している部分により強固に支持され、不平衡磁力、遠心力の不平衡力などによる横荷重を十分支持するような構造となっている。メタル支えはリング状にしているので運転時温度変化によりギャップの変化することが少なく、調整は確実に行うことができる。

上部ブラケットは鋼板溶接製で、従

来の構造となんら変りはないが、傘形であるため横荷重は全然受けず、単に励磁機の固定子そのほかの垂直荷重のみ支持すればよい。励磁機は発電機上部に直結される。

本機の調速機は、前述のように電気式調速機であるので、その電源となる調速機用発電機の周波数は、主機の回転に完全に追従することが要求される。このため調速機用発電機の回転子を、副励磁機軸に直接とりつける構造としている。この調速機用発電機の上部には、カプラン水車用の圧油導入装置が取り付けられている。

発電機の風道より上面に突出する部分、すなわち励磁機、調速機用発電機、圧油導入装置には、第 21 図にみられるように美しいカバーを設け、発電機全体の外観をきわめて優美なものとした。カバーには適当な通風孔を設け、励磁機などが加熱されることのないよう考慮した。

軸電流防止は傘形機であるため非常に簡単で、発電機としては上部に案内軸受なきため軸電流回路を形成せず不要で、水車圧油導入装置部において絶縁板を挿入し行っているのみである。

発電機の風道内には、空気冷却器の間に除湿器を設

け、空気湿度を露点以下に下げようとしている。これらの除湿器には排水管を連結し、風道外部に排水できる構造となっている。

5.2 工場試験

工場内で仮組立ての上各種の試験を行ったが、温度上昇試験、能率試験を初め、電氣的機械的諸特性につききわめて満足すべき結果が得られた。回転子の無拘束速度試験においては、回転子各部の応力を測定し、設計値とよく合致する結果を得て回転子の機械的安全度が十分大であることを実証することができた。

6. 結 言

上野尻発電所用 21,000kW カプラン水車および 21,000 kVA 交流発電機の概略について述べたが本水車は従来に例のない広範囲の鋼板熔接構造を採用した東洋において最大形態の記録品であり、また短期間の据付工事により 3 台とも好調に運転を開始したものである。終りに本水車ならびに発電機の計画に種々御尽力を賜った東北電力株式会社各位に厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 深栖, 高橋, 菊地, 長尾: 日立評論 35, 1541 (昭 28-11)



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その1)

区 別	登録番号	名 称	工場 別	氏 名	登録年月日
特 許	245637	高 圧 電 機 子 巻 線 の 絶 縁 再 生 法	日立工場	磯部昭二 金沢朝久	33. 9. 20
"	245636	負 荷 時 電 圧 位 相 調 整 変 圧 器	国分工場	福田寿一 福谷義健 栗田健太郎	"
"	245643	自 動 電 圧 調 整 制 御 方 式	国分工場	斎藤武	"
"	246352	高 速 度 再 投 入 遮 断 器 制 御 装 置	国分工場	滑川清	33. 10. 21
"	246353	ラ ッ プ 形 台 碍 子 内 部 異 状 検 出 装 置	国分工場	藪野亥石	"
"	246354	三 相 誘 導 電 圧 調 整 器	国分工場	中村熊次郎	"
"	246358	移 動 吊 手 装 置 を 有 す る 自 動 階 段	国分工場	上田光男 神峰次郎	"
"	245646	水 封 式 遮 封 装 置 を 設 け た 加 熱 炉	笠戸工場	山本一男 松本憲治	33. 9. 20
"	245635	過 負 荷 防 止 装 置	亀有工場	木暮健三郎 近藤澄雄	"
"	245638	自 動 変 速 装 置	亀有工場	渡部富治	"
"	245639	自 動 変 速 装 置	亀有工場	渡部富治	"
"	245644	多 索 巻 上 装 置 に お け る 張 力 調 整 装 置	亀有工場	井上啓	"
"	245645	回 転 ポ ケ ッ ト 形 粒 体 水 力 輸 送 装 置	亀有工場	保延誠三 細田益	"
"	245647	固 粒 体 の 流 体 輸 送 装 置 の 停 電 時 の 保 安 装 置	亀有工場	保延誠三 細田益	"
特 許	246348	パ ワ シ ョ ベ ル 系 掘 削 機 の 内 燃 機 関 制 御 用 レ バー装置	亀有工場	久保沢稔	33. 10. 21

(第15頁へ続く)