UDC 621.224.3+621.313.322

インド「ウェスタン ヤムナ キャナル」並びに「ロワー メトゥール」水力発電プロジェクト向けバルブ水車・発電機

Bulb Turbines and Generators for "Western Yamuna Canal" and "Lower Mettur" Hydro Electric Projects, India

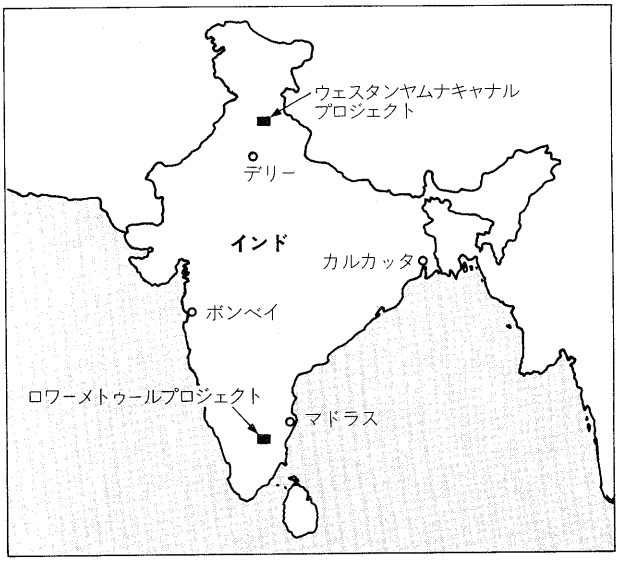
田村 明弘 * Akihiro Tamura・高橋 正己 ** Masami Takahashi・矢野 公惟 ** Masanobu Yano
加藤 哲 *** Satoshi Katô・堀江 芳昭 *** Yoshiaki Horie

I. まえがき

最近の急激な石油価格の高騰に伴い，自国産エネルギーの活用策の一つとして，従来あまり利用されていなかった超低落差水力エネルギーの，バルブ水車による開発が世界的に注目を浴びている。

慢性的な電力不足に悩むインドにおいても，その解消策の一環として水力開発が急ピッチで進められている。同国は雨季と乾季に年間が二分される上，比較的平たんな乾燥地帯を多く有するため，ごくわずかなこう配しかないかんがい用水路が各所に設けられているので，これを利用したバルブ水車による超低落差水力開発に特に大きな期待が寄せられている。

以下に，富士電機で現在，主要機器の設計製作を鋭意進めているインド最初の本格的超低落差水力開発である「ハリヤナ州電力局・ウェスタンヤムナキャナル水力発



第1図 プロジェクトの位置
Fig. 1. Location of projects

第1表 水車・発電機主要仕様一覧表
Table 1. Main specifications of turbine and generator

プロジェクト名		ウェスタンヤムナキャナル	ロワーメトゥール
台数		8台（4発電所分）	8台（4発電所分）
水車	形式	横軸円筒形可動羽根プロペラ水車（バルブ水車）	
	出力 (kW)	9,350(最大)/7,310(定格)	17,200(最大)/15,600(定格)
	落差 (m)	12.8(最大)/12(定格)	7.65(最大)/6.5(定格)
	流量 (m^3/s)	75(最大)	271(最大)
	定格回転速度 (rpm)	187.5	75
	比速度 (m·kW)	716.5	902.5
	ランナ入口径 (mm)	3,150	6,250
	最大水圧 (m)	17.5	11.25
	最大速度上昇率 (%)	45	40
発電機	形式	横軸全閉内冷三相交流同期発電機（空気冷却器付）	
	出力 (kVA)	10,440(最大)/8,889(定格)	18,333(最大)/16,667(定格)
	定格電圧 (kV)	6.6	6.6
	定格周波数 (Hz)	50	50
	定格回転速度 (rpm)	187.5	75
	定格力率	0.9(遅れ)	0.9(遅れ)
	固定子枠外径 (mm)	3,500	7,200
	励磁方式	静止形サイリスタ方式	静止形サイリスタ方式

* 電力プラント事業本部 水力プラント統括部 プラント部 ** 電力プラント事業本部 水力プラント統括部 設計部
*** 電力プラント事業本部 回転機設計部

電プロジェクト（Haryana State Electricity Board, Western Yamuna Canal Hydro Electric Project)」，並びに「タミールナドゥ州電力局・ロワーメトゥール水力発電プロジェクト（Tamil Nadu Electricity Board, Lower Mettur Hydro Electric Project)」の概要と同計画に設備されるバルブ水車・発電機について紹介する。

第１図に両水力発電計画の位置を示す。また，第１表に水車・発電機の主な仕様を示す。

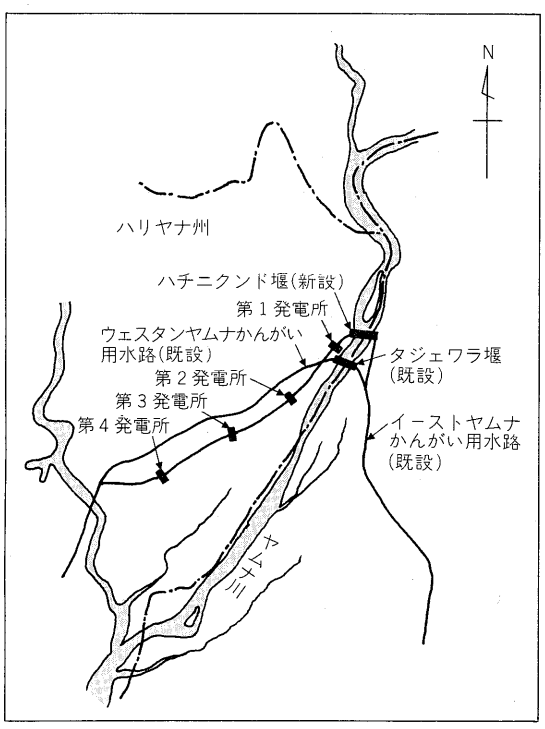
II. ウェスタンヤムナキャナル水力発電プロジェクト

1. プロジェクト概要

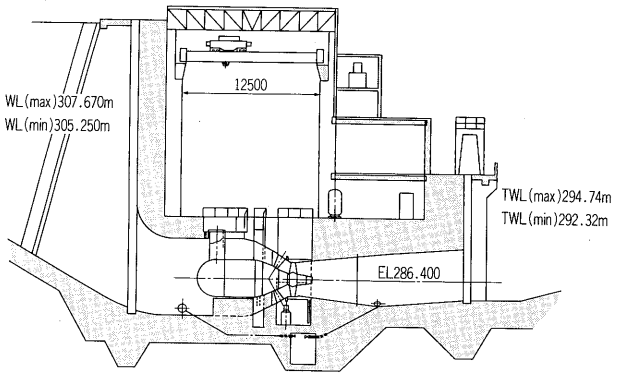
本プロジェクトはインドの首都・デリーの北約215kmに位置し，ガンジス川最大の支流であるヤムナ川の豊富な水量を利用するもので，第Ｉ期及び第II期工事から成る。

第Ｉ期工事は，ヤムナ川から取水している既設ウェスタンヤムナかんがい用水路に併行して発電専用水路を建設し，既設タジェワラ堰と約18km下流タドゥプール地点との間に得られる約38mの落差を利用するもので，同水路上にほぼ等分に三つの堰を設け，各堰に同一仕様の８MWバルブ水車・発電機を２基ずつ備える発電所（第２，第３，第４）を併設し，合計出力48MW（８MW×２×３）の発電を行うものである。

第II期工事は，既設タジワラ堰の上流約４kmのハチニクンドウ地点に新設される堰とタジェワラ地点との間に発電・かんがい兼用水路を設け，この間の落差約10mを利用する第１発電所に，第Ｉ期工事と同仕様のバルブ水車・発電機を２基設置するものである。



第２図　プロジェクト概要図
Fig. 2. Outline of project



第３図　第３発電所建家縦断面図
Fig. 3. Section of power house No. 3

第２図に本プロジェクトの概要図を，第３図に発電所の縦断面図を示す。なお，発生した電力は主要変圧器にて66kVに昇圧の後，新設の送電線により近隣の既設変電所へ供給される。

本プロジェクトは砂地地帯に建設されるため，浸透による水の逸失を防止するため，発電用水路には全面コンクリートタイルが張りつめられる。また，発電所建家は砂の上に浮動させる特殊構造が採用されている。

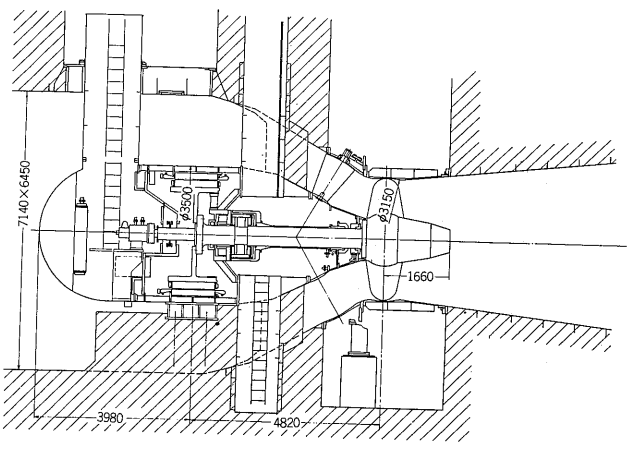
2. 水車・発電機の構造と特長

バルブ水車・発電機では特に水車と発電機との協調が重要であり，あたかも一つの機械として扱うことが強く要求される。本機の場合にも当然のこととして，最終仕様の決定までには水車・発電機の共通項も含めて種々検討が行われた。

以下，これらの検討結果の一部について述べる。第４図に水車・発電機の組立断面図を示す。

1) GD^2 と速度変動率

一般にバルブ水車・発電機においては，水車効率との兼合いから決まる流路条件の制約により，発電機の外径



第４図　水車・発電機組立断面図
Fig. 4. Section of turbine and generator

は小さく選定される。このため回転子が所有するGD^2は，おのずと小さくなり，したがって速度変動率は60％程度の高い値が採用されるのが普通である。

しかしながら，本機の場合，接続される系統条件から175 t·m² 以上のGD^2が必要と判断されたため，水車効率を損なうことなく，すなわち発電機外径を抑えながらこの要求を満たすべく，通常設計より外径が大きい鉄心寸法が採用された。

この結果，最大速度変動率は45％という低い値が採用された。

2）　バルブの支持構造

発電機を収納するバルブは水車ケーシングに設けられた上下2本のステーベーンと発電機固定子枠下部に設けられたピアーにより支持される。

バルブには水推力，発電機短絡トルク，自重，浮力，運転中の振動力，発電機部分の熱膨張など，種々の荷重が作用する。軸方向の水推力は水車ステーベーンにより支持され，発電機短絡トルクは発電機ピアーと水車ステーベーンで分担して支持されている。

このため，発電機固定子枠とピアーの間は軸方向だけ変位自由な構造とし，ステーベーンの変形及び固定子枠の熱膨張に追従できる構造としている。

3）　軸受数と配置

本機の軸受数並びに配置は，軸たわみ，危険速度，保守性などを考慮して2軸受とし，発電機の回転子がオーバハングする方式を採用している。

スラスト軸受は発電機側ガイド軸受に併設され，大きな水スラスト荷重を支えるため，軸受荷重の均一を図る必要がある。このため，軸受支え部の変位を配慮して剛性の大きい内側ケーシングにより支持している。

潤滑には，水車軸受とも共用の上部潤滑油タンクを用いた強制給油方式を採用している。

4）　水車の構造

水車ケーシングは円すい形をした内外ケーシングから構成され，両者は上下2本のステーベーンにより接続されている。ケーシングは5分割して輸送され，現地溶接にて一体に組み立てられる。バルブに作用する水推力や短絡トルクの一部は，内側ケーシング，ステーベーンを介して発電所基礎コンクリートに伝達される。

ステーベーン内は空洞で，水車・発電機の各軸受の組立分解点検通路や配線，配管の布設スペースとして利用される。

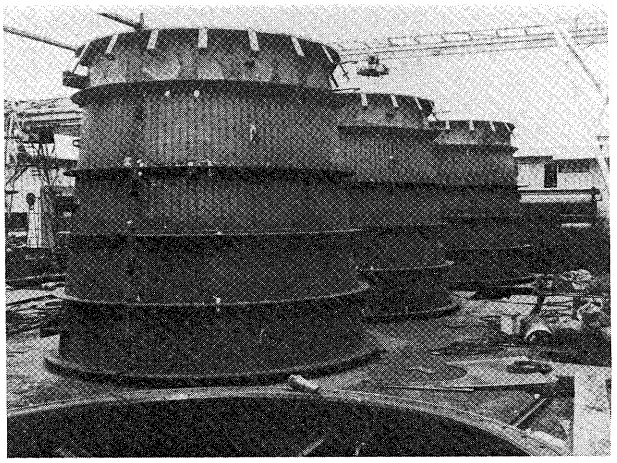
円すい形の吸出し管ライナは鋼板溶接構造で，流速5 m/s の所までライナが供給されている。

ガイドベーンは鋳鋼製で，要部は18-8ステンレス鋼が肉盛され，円すい状に16枚配列されている。

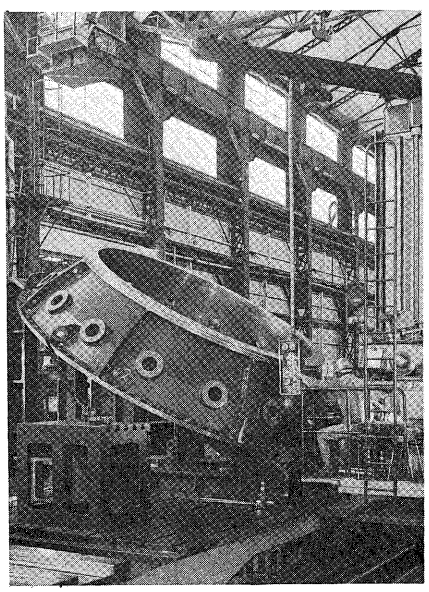
バルブ水車の場合，水中に設置されるバルブ部分は，運転中軸方向に大きな変位を伴う。バルブが軸方向に変位してもガイドベーンの円滑な動作に支障のないよう，ガイドベーンの軸受には球面軸受を採用している。

ガイドベーン開閉機構の各軸受は，保守の簡易化のためすべて固体潤滑剤埋込形の無給油軸受が使用されている。ガイドベーンの間隙調整には偏心ピンが使用され，ガイドベーンリンクには弱点リンクを使用，異常時の検出のためリンク破断警報装置が備えられている。

ガイドベーンは油圧開閉式サーボモータにて操作され，油圧喪失時にはガイドリングに設けられた重錘により自動閉鎖できる構造としている。



第5図　工場で仮組立された吸出し管
Fig. 5.　Draft tube liners, trial-assembled at shop



第6図　機械加工中の外側ガイドベーンリング
Fig. 6.　Outer guide vane ring under machining

ガイドリングは，ボールベアリングを使用した特殊軸受により支持されている。

水車軸受は円筒形軸受である。ランナがオーバハングして設置されるので，主軸の傾きに伴う軸受の片当りを防ぐため，軸受も追従して傾くよう軸受支持方法に特別な考慮がされている。

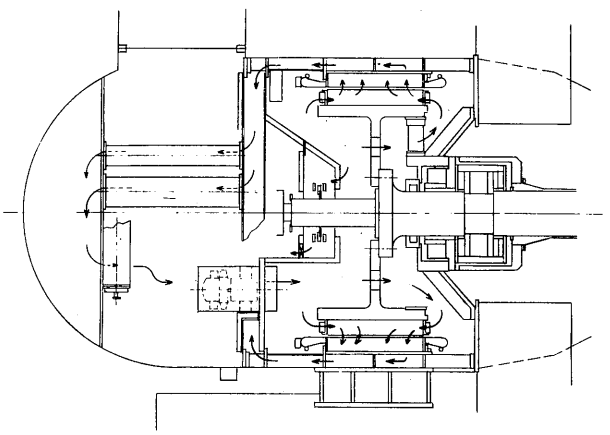
主軸封水装置は，自己調整能力を持ち，富士電機で多くの製作実績のある端面シール式カーボンパッキン装置を使用している。

ランナは直径3.15mの13%クロム高ニッケルステンレス鋼製の4枚羽根構造である。ランナサーボモータはランナボス内に設置され，ピストンが固定されてシリンダが動く方式である。

ランナサーボモータの操作油は，発電機上流端に設けられた圧油導入装置から主軸の中に設置された圧油導入管を通って供給される。

5） 発電機の構造

発電機の通風冷却は，第7図に示すように強制両通風方式が採用されている。強制ファンにより押し込まれた冷却空気は，一部は直接上流側の極間から，また一部は回転子センタを通り下流側の極間から固定子に入り，固定子枠から通風ダクトにより冷却器の取り付いているトップカバーに導かれる。スリップリングの冷却には本体冷却用空気の一部をスリップリング室へ引き入れ，フィルタを通した後，本体回路に戻している。



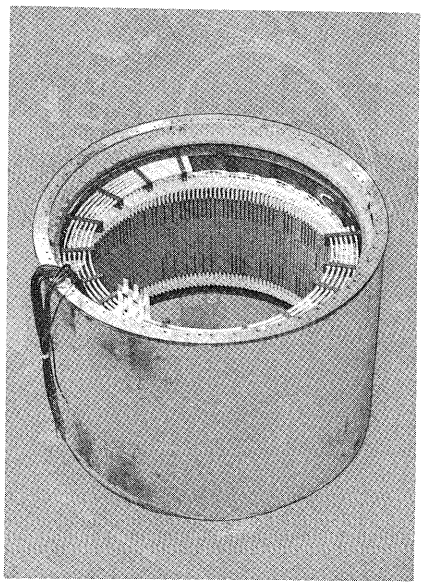
第7図　発電機の通風冷却方式
Fig. 7. Cooling system of generator

固定子は鉄心，コイル共工場で一体に組み立てられ，一体で出荷される。固定子巻線の絶縁にはエポキシレジンを主体にした全含浸絶縁方式（Fレジン/G絶縁）を採用している。この方式では，巻線及び鉄心全体が一体で真空含浸，硬化されるので絶縁性能が向上する上，機械的にも非常に堅牢なものとなり，更に鉄心とコイルの間にも樹脂が充てんされるので熱伝導が良くなるなどの特長を有している。

回転子は磁極，回転子センタからなり，主軸にオーバハングしている。磁極はセンタにボルトにより取り付けられ，工場にて一体にして出荷される。

回転子センタ内径側には，漏水トルクに対し十分な容量のブレーキが設けられている。

ブレーキはメンテナンス時にはジャッキにも使用できる構造としている。固定子コイル及び回転子磁極は，回転子を分解することなく修理あるいは取替えができる構造としている。

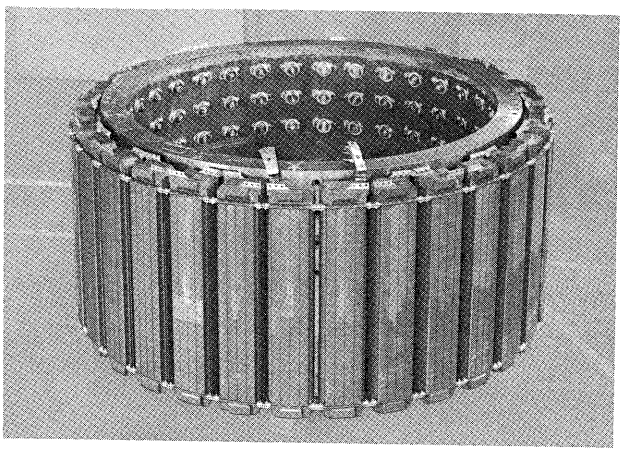


第8図　製作中の発電機固定子
Fig. 8. Generator stator under manufacturing

また，主要部品は上下流側の点検シャフトから配管，配線などを取り外すことなく外部へ取り出すことができるように部品の分割数，点検シャフトの寸法に考慮が払われている。

水中に設置されるバルブ水車・発電機においては，漏水対策が重要な課題である。

本機は固定子枠を一体構造として，バルブの分割面を少なくするとともに，分割面フランジにはOリングを二重にしている。更に，二重のOリング間にもう一つの溝を設け，漏水検知と万一の漏水検出時には特殊パッキンを封入することにより，水密性のバックアップができるように考慮されている。また，トップカバー最下部には漏水や異常結露水を予知し，排出する装置と停止時の機内結露を防止するため除湿機を設置している。



第9図　工場仮組立中の回転子
Fig. 9. Shop assembly of rotor

III. ロワーメトゥール水力発電プロジェクト（タミールナドゥ州電気局）

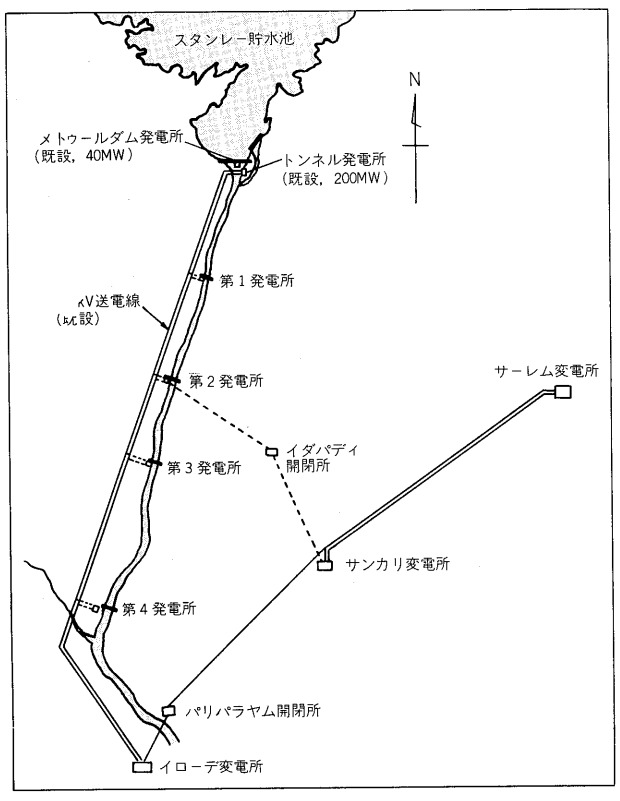
1. プロジェクト概要

本プロジェクトは，南インドのタミールナドゥ州の西部，サレム地区に位置し，カウベリー川の上流に設けられているメトゥールダム直下にある既設発電所放水口と下流ブハバニ地点との約45kmの間に得られる約36mの落差を発電に利用するもので，同河川上にほぼ等分に四つの堰を設け，各堰に同一仕様の15MWバルブ水車・・発電機2基を収納する発電所を併設，合計出力120MW（15MW×2×4）の発電を行うものである。

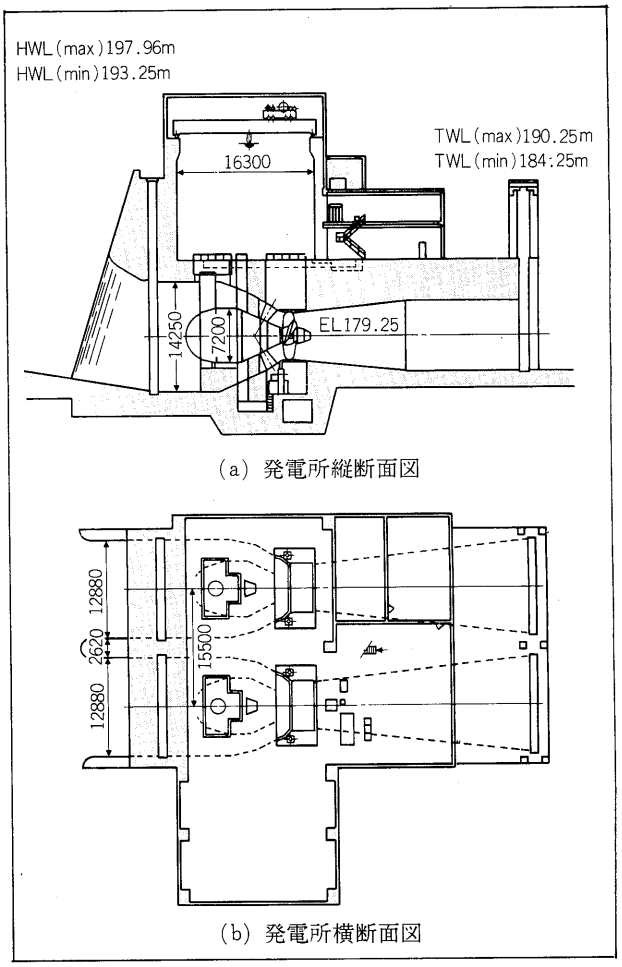
また，このプロジェクトが建設される地域においては，乾季には発電に利用できる水量がほとんど得られない。このため，一部の水車・発電機については，水路内を抜水した上で発電機を調相機として運転することにより，送電系統の力率改善，更には電圧・周波数の安定化に寄与させるものである。

なお発生した電力は，各発電所の主要変圧器により昇圧され，既設110kV送電線によるほか，新設の110kV送電線により近隣の変電所へ供給される。

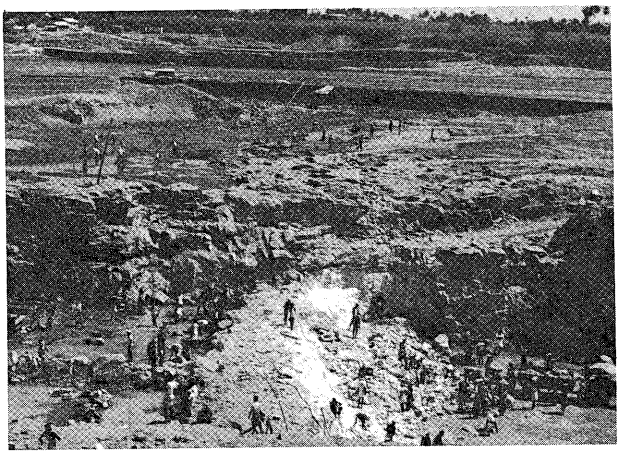
第10図に本プロジェクトの概要図を，第11図に発電所の縦断面図と平面図を示す。第12図は第3発電所の掘削状況を示す。



第10図 プロジェクト概要
Fig. 10. Outline of project



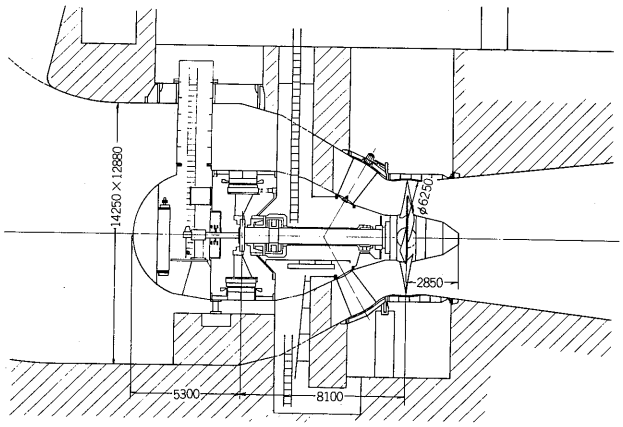
第11図 第1発電所縦断面・平面図
Fig. 11. Section and plan of power house No. 1



第12図　掘削工事中の第3発電所
Fig. 12.　Excavation work at power house No. 3

2. 水車・発電機の構造と特長

本機は，基本的には前掲のウェスタンヤムナキャナルプロジェクト，あるいは別掲（本誌12～17ページ）の佐久間第二発電所向けバルブ水車・発電機と同構造であるが，記録的大形機であるため，強度・変形量などのほか，特に据付，保守の容易さにも配慮して設計・製作が進められている。第13図に水車・発電機の断面図を示す。



第13図　水車・発電機組立断面図
Fig. 13.　Section of turbine and generator

以下に，本機の前述2プロジェクト向け主機と大きく異なる点や特長について主なものを紹介する。

1）　最大速度変動率

安定度解析の結果に基づき，GD^2=2,500 t·m² 以上，$X'd$=30％以下の特性が要求されたため，最大速度変動率は必然的に40％というバルブ水車・発電機では異例に低い値が採用された。

2）　バルブの支持方式

支持方式は，ウェスタンヤムナキャナルプロジェクトの場合と同じく，上下2本のステーベーンによっているが，本機は超低落差・超大形機であるため，バルブ各部の変位量はおのずと大きくなる。このため，発電機には，下部の支持台のほかに水平方向の「振止め」を設けるとともに，これらは流水方向並びに回転方向の変位に対して追従できる構造が採用されている。また，これらの変位に対して，ガイドベーン軸受にも同じ目的の対応策が施されている。

3）　オイルリフタ

軸受潤滑は，上部潤滑油タンクによる強制給油方式であるが，超大形機であるため，始動・停止時に使用するオイルリフタポンプが併設されている。なお軸受は，このオイルリフタポンプが故障した場合でも，安全に停止できる容量を有している。

4）　水車

ランナは直径6.25 m の13％クロム高ニッケルステンレス鋼製の4枚羽根構造である。本機は超低落差機であるため，第2表に示すとおり，4枚羽根と3枚羽根の両ランナについて検討されたが，現時点では世界的に3枚羽根ランナの稼動実績が無いことなどから，最終的に4枚羽根ランナが採用された。なお今後は，本プロジェクトのような超低落差地点においては，3枚羽根ランナが採用されると思われる。

水車の外側ケーシングは8分割して出荷され，現地において溶接並びにフランジ接続により一体に組み立てられる。内側ケーシングは2分割フランジ接続構造である。また，ステーベーンと外側ケーシングとは現地において溶接により一体化される。

第2表　ランナ羽根枚数による比較
Table 2.　Comparison by runner blade numbers

ランナ羽根枚数	4	3
ランナ入口径（mm）	6,250	6,000
回転速度（rpm）	75	83.3
吸出し高さ（m）（水車中心基準）	−5.0	−7.0
最高効率比（発電機効率含む）	1.0	0.993
水車・発電機重量比	1.0	0.93

ハッチ及びハッチ枠は，従来，一次コンクリートを製品寸法より十分大きくブロックアウトし，このピットに吊り込んだハッチ・ハッチ枠を種々の方法で支持・固定したのち，周囲の二次コンクリートを打設，埋設していた。本プロジェクトにおいては，ハッチ及び枠を一次コンクリートに支持させ，ハッチの据付がより簡単に行える方式を採用した。

ガイドベーンには鋼板溶接構造が採用されている。低落差・大容量機においては，立軸機でも溶接構造が採用されるが，バルブ水車のように複雑な形状を有するガイドベーンに対しても溶接構造が有利であり，溶接化による品質の向上（鋳造品に対して），及びハンドリングの容易さ（重量軽減による）を図っている。

5）　発電機

固定子枠は，輸送限界から2分割にて出荷され，現地にてフランジにより一体とした後，合せ目外周をシール溶接される。

固定子鉄心は，現地積層により継目なしの一体リング構造とし，ダブテールキーにより固定子枠に取り付けられる。

固定子巻線には，集成マイカとエポキシ樹脂を主体としたプリプレグ材料を用いた富士電機標準のFレジン/S絶縁を採用している。

回転子センタは，鋼板溶接構造とし，主軸にオーバハングして取り付けられる。

ヨークには薄板積層構造を採用し，通風ダクトを備えることにより冷却効果の向上を図っている。ヨークは焼ばめにより回転子センタに取り付けられ，部材に繰返し応力が働かないように配慮されている。

磁極は薄板積層構造であり，ダブテールキーによりヨークに取り付けられる。

また，乾季に要求されている調相機運転の始動方式は，主要変圧器の中間タップを利用した半電圧自己始動であ

るため，ダンパ巻線は始動時の熱的・機械的ストレスを考慮した構造としている。

ブレーキは回転子の下流側に設置され，漏水トルクに対して十分な容量としている。大形機のブレーキ位置は比較的自由に選定できるが，バルブ内の保守性を考慮して，より広い保守スペースが確保できるよう選定されている。

IV. あとがき

以上，インドにおける最初の本格的超低落差水力発電計画の概要について紹介した。これらの完成により，インド経済の発展に微力ながら寄与できることを誇りとするとともに，今後，当然推進されるであろう各国の超低落差水力開発に，本稿が少しでも参考になれば幸いである。

最近公告になった富士出願

〔特　許〕

公告番号	名称	発明者
特公昭57- 5985	往復直線運動機構	三好　紀臣 鶴岡　亨彦
特公昭57- 6026	冷凍冷蔵ショーケース設備の除霜運転方法	中島　和平
特公昭57- 6061	アンモニア性窒素分析装置	田沼　良平
特公昭57- 6213	多極形の回路しゃ断器	吉川　閤 白井　武司
特公昭57- 6353	直流電動機の回生制動方式	沢　邦彦 木下　繁則 皆元　正博
特公昭57- 6354	直流電動機の制御装置	長谷川和彦 小林　浩二
特公昭57- 6669	燃料電池の運転方法	田島　博之 丸山　晋一
特公昭57- 6693	半導体装置の表面処理方法	佐賀　操
特公昭57- 6769	パッファ形ガスしゃ断器	岩田　浩一 福岡　雅志
特公昭57- 7362	移動物体の監視装置	仲村敬二郎
特公昭57- 7446	絶縁スペーサおよびその製造方法	児玉　孝亮
特公昭57- 7562	オゾン発生装置	児玉　孝亮 田部井幸一
特公昭57- 7805	パイプ曲げ装置	富永満五郎
特公昭57- 8510	自動販売機におけるフリーベンド制御装置	川出　一男 海野　覚 城田　一弥
特公昭57- 9005	センタ測定装置	小平　俊実
特公昭57- 9030	移動方向判別回路	川田　真園
特公昭57- 9115	交通流の渋滞状況判別方式	立松　治 大塚　敬 竹山　良雄
特公昭57- 9169	ガス吹付けしゃ断器	西条　喜一
特公昭57- 9303	同期整流器	杉田　勉 瀧川　智博
特公昭57- 9309	高電圧他励変換装置の制御方法	原　力 皆元　正博 土屋　俊克 元吉　攻
特公昭57- 9313	変換装置	木下　繁則
特公昭57- 9319	直流電動機制御装置	畔上　栄輔 石田　紘一 鯉江　和裕
特公昭57- 9694	半導体用吹き付けマスク	中田　和夫
特公昭57-10263	誘導加熱による鉄筋コンクリートの破壊方法およびその装置	十河　吉昭
特公昭57-10320	ガス配給制御装置	安東　伸彦
特公昭57-10668	他励式逆変換装置の無効電力制御方式	穴原　良司 鈴木　幹二
特公昭57-10669	他励式逆変換装置の低無効電力化装置	穴原　良司 鈴木　幹二
特公昭57-10671	無整流子電動機の回生制動制御装置	沢　邦彦 藤原　喜隆

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。