

インド、パンジャブ州バークラ発電所納 150,000 HP フランシス水車

The 150,000 HP Francis Turbines to the Bhakra Power Station, Punjab, INDIA

深 栖 俊 一* 外 岡 英 徳*
Shun'ichi Fukasu Hidenori Tonooka

内 容 梗 概

インド、パンジャブ州政府納、バークラ発電所用水車5台は昭和31年始め受注されたが、5台のケーシングは現地据付も無事完了し、ほとんどの部品は現地に到着して組立をまっている現状である。本水車の容量は150,000 HP (112,000 kW) でわが国最大の佐久間発電所の容量を約1割上まわる。本水車はインドに対する最初の輸出品であるために、その設計製作には特別な注意がはらわれた。

本稿には大容量フランシス水車としての特長および輸出品としての特殊性について述べた。

1. 緒 言

「バークラダム計画はいまだかつていずれの国でも例のないほど非常に困難なまた巨大な工事であって、インドの進歩の象徴であり、われわれはこれを建設していることを最大の誇りとしている。」

とはインドのネール首相の言葉である。インドは国家的開発事業として主都ニューデリーの北方約250マイルにあってインダス河の上流ストレージ河をせき止めるバークラダムの建設を計画し、今や着々と工事は進められている。このダムは灌漑を主目的とするものではあるが工業国としての発展を目ざし150,000 HPの水車10台の設置が計画され、第1期工事としてその内の5台の製作、据付が進められている。

本発電所機器の発注に当っては、世界各国の有力メーカーに引合が出され、入札により国際的なはげしい競争のすえ水車5台を日立製作所が受注することができた。しかし発電機は英国のメーカーが受注し、日立製作所の水車に英国の発電機が直結されることとなっている。

本水車の容量は昭和31年運転を開始したわが国最大容量の佐久間発電所用100,000 kW水車を容量および寸法でもさらに上まわるものである。将来さらに5台の増設が完了すれば発電所総出力は1,120 MWとなり、記録的な大発電所の完成をみるわけである。

2. バークラダム

バークラダムが建設されると、長さ約90kmの湖ができ、その総貯水容量は約90億立方メートルというわが国最大の佐久間ダムの約30倍の膨大な貯水量をもつことになる。このうち約71億立方メートルが灌漑と発電に利用される。

このダムは直線重力式のコンクリートダムでインド最大のものであり、建設費は約450億円といわれている。その大きさをわが国最大の佐久間ダムと比較すると第1

* 日立製作所日立工場

表のようになる。またバークラダムの概略寸法を次に示す。

第1表 バークラダムと佐久間ダムの比較

	バークラダム	佐久間ダム
型 式	直線重力式	直線重力式
総貯水量	9,130,000,000m ³	326,000,000m ³
有効貯水量	7,070,000,000m ³	205,000,000m ³
湛水面積	164km ²	7.15km ²
湛水延長	90km	32.8km

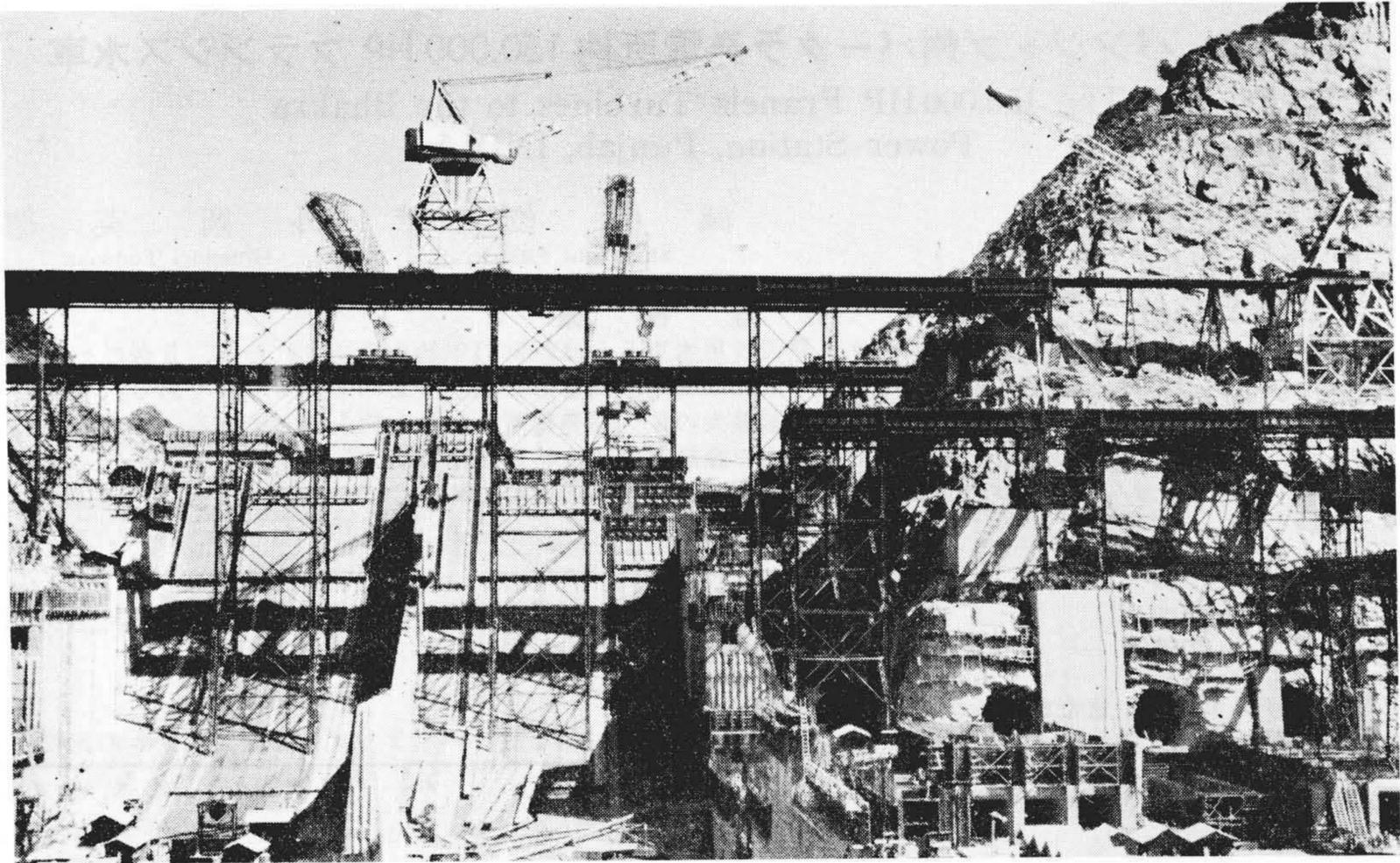


●…開発計画地点を示す。

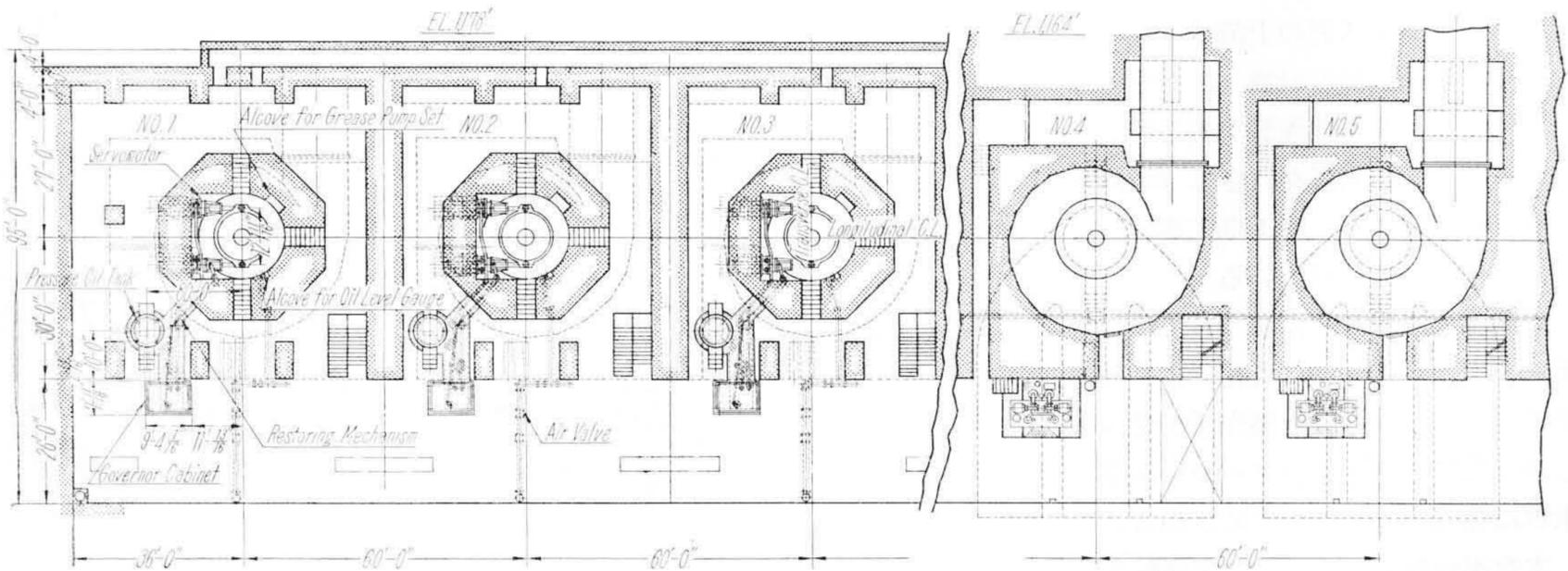
- | | |
|-------------------|-----------------|
| 1. Bhakra | 9. Durgapur |
| 2. Nangal I | 10. Hirakud I |
| 3. Nangal II | 11. Hirakud II |
| 4. Tilaiya | 12. Trombay |
| 5. Konar | 13. Koyna |
| 6. Bokaro (Steam) | 14. Sharavati |
| 7. Maithon | 15. Tungabhadra |
| 8. Panchet Hill | 16. Gandhisagar |

太字は日立水車の納入地点を示す

第1図 インド国内主要水力開発地点略図



第2図 バークラダム建設状況 (右方は建設中の発電所建家)



第3図 バークラ発電所据付平面図

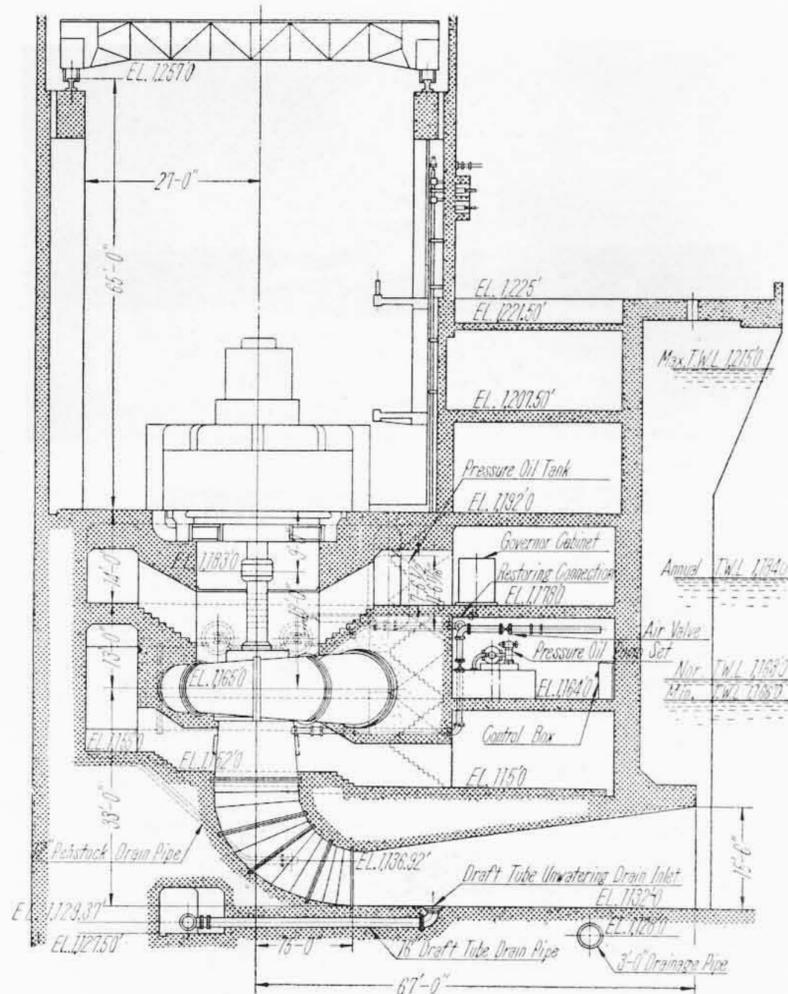
第2表 インド向日立水車仕様一覧表

発電所	最大出力 (kW)	最高落差 (m)	回転数 (rpm)	型式	台数	運転開始 (予定)
Bhakra	112,000	156	167	F S S-V	5	1959
Munirabad (Tungabhadra Project)	9,340	23.5	214	P M S-V	2	1960
Ganguwal (Nangal Project)	29,840	32.8	167	P F S-V	1	1960
Kotla (Nangal Project)	29,840	32.8	167	P F S-V	1	1960
Hirakud No. 1	38,800	36.3	150	P M S-V	1	1961
Gandhisagar (Chambal Project)	25,400	45.5	187.5	F S S-V	1	1961

底部の長さ: 100 m (325 ft)
 頂上の長さ: 9.15 m (30 ft)
 底部の厚さ: 190 m (625 ft)
 頂部の標高: 519 m (1,700 ft)
 総掘さく量: 4,200,000 m³ (147,700,000 ft³)
 総コンクリート量: 4,060,000 m³ (143,100,000 ft³)
 セメント所要量: 800,000 t
 骨材所要量: 8,900,000 t
 総鉄筋量: 100,000 t

高さ: 232 m (760 ft)
 頂上の長さ: 519 m (1,700 ft)

第1図にインドにおける主要水力開発地点を示し、第2表にこれらの地点に納入される日立水車の一覧表を示す。



第4図 バークラ発電所据付断面図

3. バークラ発電所の概要

バークラ第一発電所 (Bhakra Power Plant No. 1) はストレージ河左岸に位置し、発電所建家は大体ダムと平行している。右岸にはバークラ第二発電所としてさらに 150,000 HP 水車が5台設置される予定である。

第2図はダムの建設状況である。

水車中心標高は1,165 ft (355m) で、各水車にはおのおの別個の鉄管によって水が導かれ、鉄管の長さは約 225 m、鉄管内径は約 180 in (4.57m) である。

5台の水車は第3図のように、河側から順に No. 1, 2, 3, 4, 5 号機が据付けられ、4号機と5号機の間主搬入口が設けられている。建家の幅は約 25 m、長さ約 113 m で比較的余裕のある機器配置がとられている。水車発電機の据付方式はバーレル型で第4図に示すように EL 1,183 ft において水車軸と発電機軸が直結される。

上水位および放水位の変化状況は下記のとおりである。

上水位	最高 (計画洪水量)	1,685.00 ft
	通常最高	1,680.00 ft
	平均	1,540.00 ft
	最低	1,440.00 ft
放水位	最高 (計画洪水量)	1,215.00 ft
	年間最高	1,184.00 ft
	基準	1,168.00 ft
	最低	1,166.00 ft

バークラ発電所はインドでも比較的北部に位するが、それでも夏季の最高気温は 1958年の例をとっても 46°C、日光の直射箇所では 54°C、河川水温の最高は 30°C に達する。

所内電源は三相 400V、単相 230V、50 Hz と、直流 220V が準備されているが、三相 220V の電源が得られぬことが日本国内と異なり、三相電源を必要とする電動機類はすべて 400V 用として製作する必要がある。

4. 150,000 HP 水車の仕様

水車の容量は最初の計画では 125,000 HP であったが、発電機容量に相応せしめるため、基準落差 400 ft (122m) において 150,000 HP (112,000 kW) と決定された。発電機は力率 0.9 において 100,000 kVA の定格であるが、15%の過負荷可能という仕様になっているためである。水車に与えられる落差は最高 512 ft (156 m) であるため水車は 200,000 HP 程度の容量を有するが、発電機容量に従い、最大 150,000 HP に制限される。

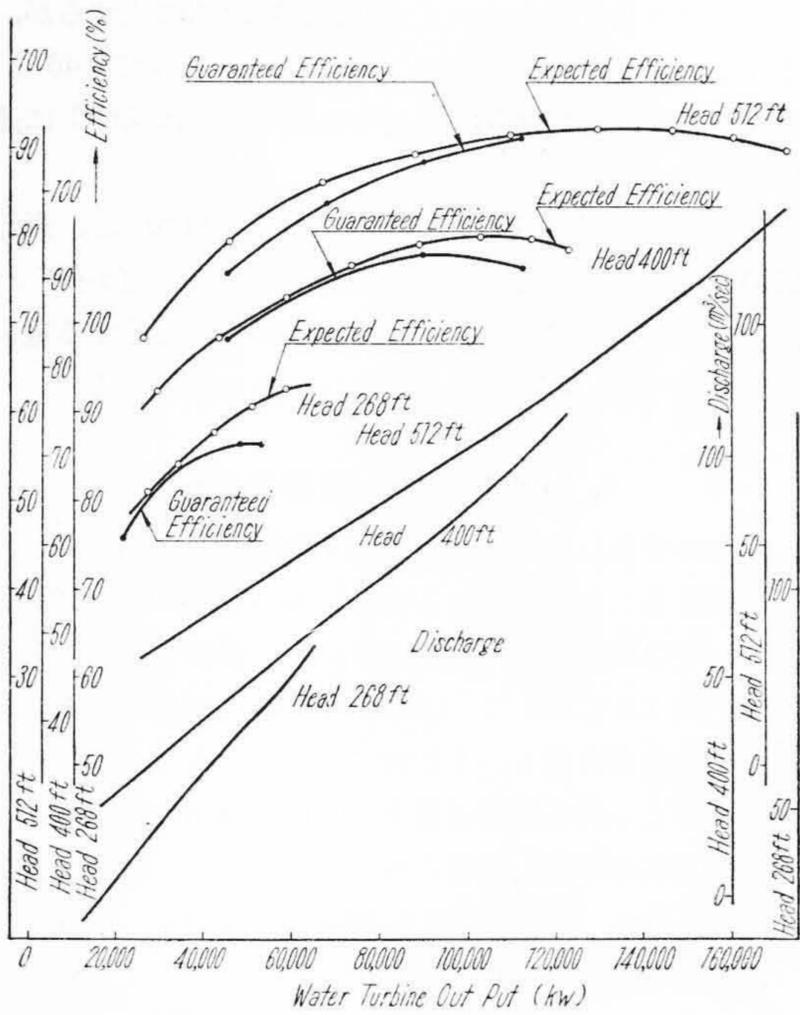
以下仕様の概略を述べる。

有効落差	最高	512 ft (156 m)
	基準	400 ft (122 m)
	最低	268 ft (81.7 m)
	平均	370 ft (113 m)
出力	制限最大	150,000 HP (112,000 kW)
流量	最大	3,610 ft ³ /s (102.3 m ³ /s)
		(ただし 400 ft 落差において)
回転数		166.7 rpm (50 Hz)
特有速度		140.5 (m-kW)
型式		FSS-V 5台
回転方向		発電機側よりみて時計方向
最大速度変動率		35 %
水圧上昇率		35 %
無拘束速度	最高落差にて	338 rpm
発電機所要回転部フライホイールモーメント		GD ² = 10,200 t-m ²
		(WR ² = 63,000,000 lb-ft ²)

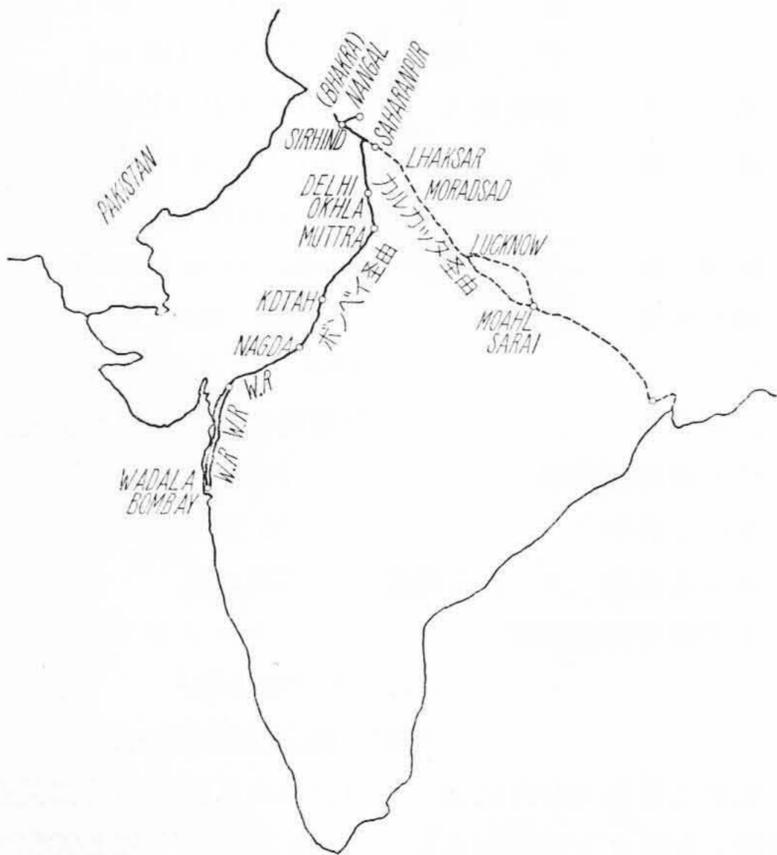
水車は落差 400 ft において 125,000 HP 出力時に最高効率となるように設計され、この時の保証効率は 93% であり、現地における効率試験は双方了解の上ギブソン法によって行われる予定である。

5. 模型試験

水車の落差変動範囲が最高 512 ft (156 m) から最低 268 ft (81.7 m) までの広範囲にわたるため、模型試験は効率、キャビテーション試験ともに綿密に実施され、得られたその優秀な成績から実物水車の良好な運転結果が期待されている。第5図に効率試験結果を示す。



第5図 水車性能曲線

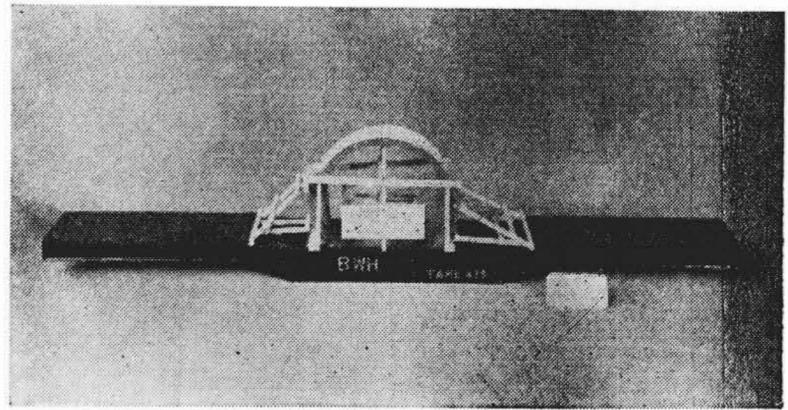


第6図 インド国内における輸送経路

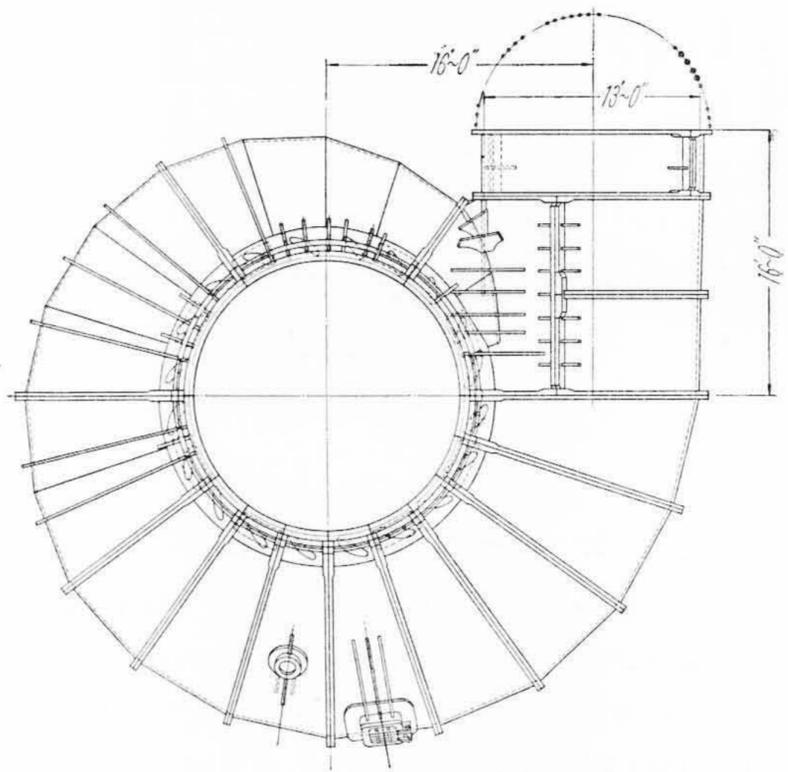
なおこれらの試験にはインド政府の検査官が来日して試験に立会った。

6. 渦巻ケーシングの設計および製作

渦巻ケーシングの設計上最も問題となったのは、インド国内の輸送限界が明確でなく、いかなる分割方法によるのが最良かという方針がなかなかたたなかったことで



第7図 ケーシング輸送調査模型



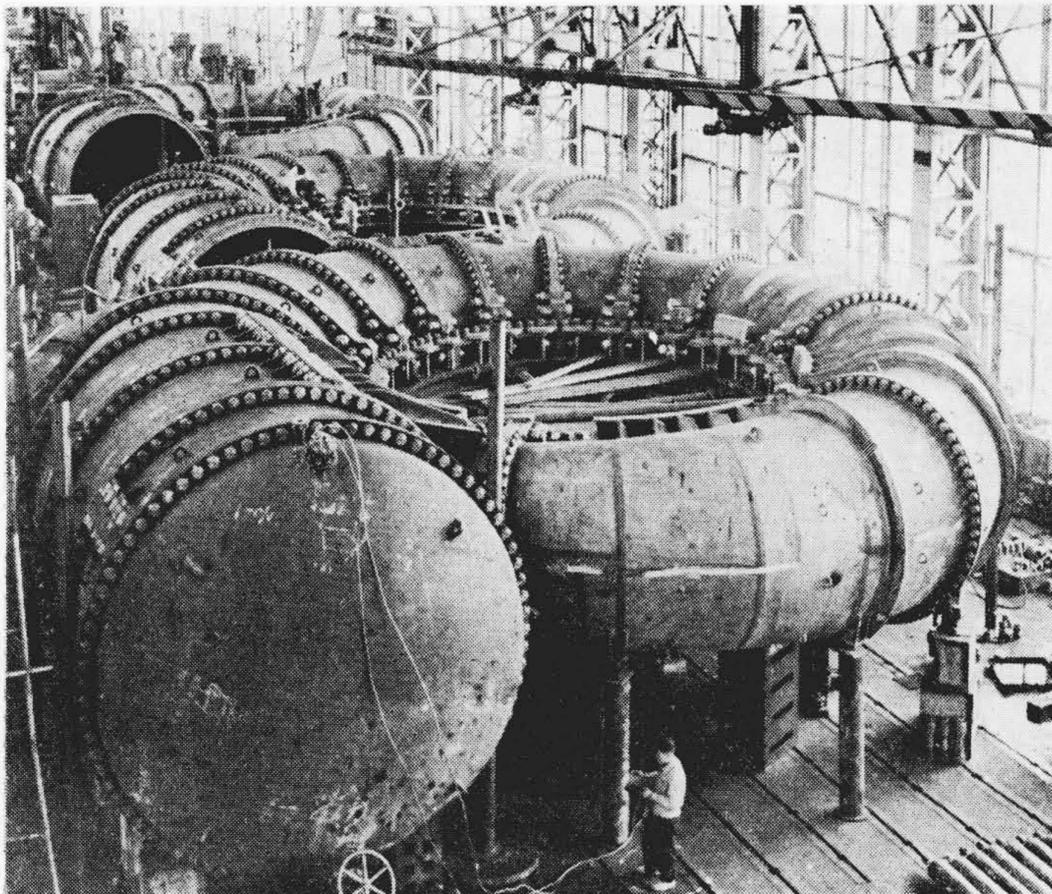
第8図 渦巻ケーシング平面図

ある。輸送経路もボンベイに陸あげするかカルカッタにするか種々検討されたが、結局航路は多少延びても、陸あげ設備がととのい、かつ陸上輸送の容易なボンベイ経路がえられた。しかしこの経路にしても、正確な輸送限界をしらべるためには Western Railway, Central Railway, Northern Railway と三つの鉄道の手を経ねばならず、それぞれの鉄道のもっている特殊貨車の調査も行い、特に問題となる部分についてはモデルを作って輸送の可否を調べ万全を期した。第6図はボンベイ港から据付現地までの輸送経路を示し、第7図は分割されたケーシングの輸送調査に使ったモデルである。

ケーシングの入口径は約4 m、佐久間発電所のケーシング入口径3.7 mに比し約1割大きく、しかも最高水圧は 290 lb/in² (20.7 kg/cm²) に及ぶので、その設計製作にはあらゆる角度からの検討が加えられた。ケーシング胴板材質は JIS SB 46 B を採用し、その最大板厚は 42 mmである。

スピードリングも鋼板熔接製で、ケーシング胴板と熔接により接続されている。内側の機械加工部の径は最大約6 mに及び、精密な機械加工がなされた。

ケーシング、スピードリングの分割方法は数案について検討の結果第8図に示すように16分割とした。ケーシング、スピードリングはすべてフランジ接続でボルト締めされるため5台のケーシングの機械加工は非常に大きな作業量となったが、担当者の非常な苦心の結果すべて自家工場作業で特別な段取りで行い、きわめて短期間にりっぱな成績で完成することができた。また工場において31 kg/cm²の水圧試験を行った後、各仕上面には鋼板の保護カバーを付するなど、遠路の輸送および積替などを考え細心の注意がはらわれた。第9図は工場にお



第9図 渦巻ケーシング水圧試験状況

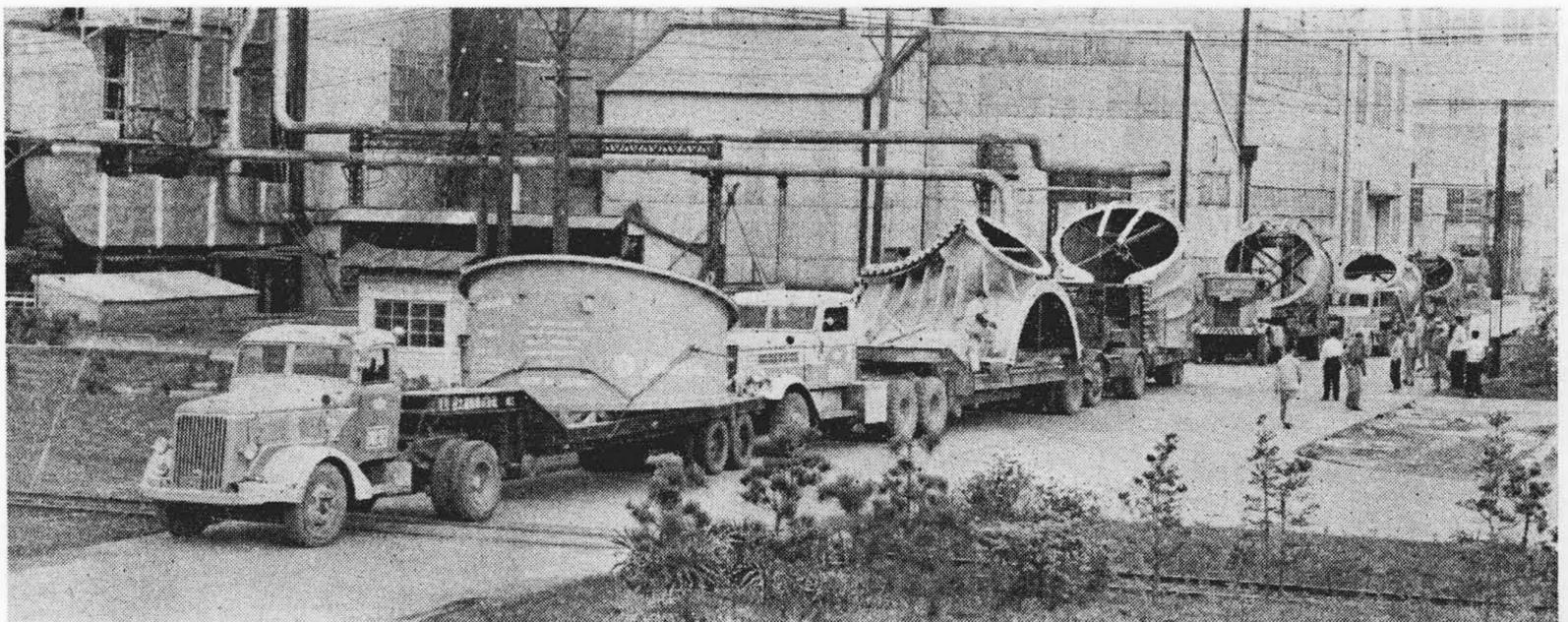
ける水圧試験の状況、第10図は工場発送状況、また第11図はボンベイ港に陸揚げされて貨車につまれ、現地に向うところを示す。

ケーシングは目下現地において順次据付中であるが、現地においてすでに5台全部21 kg/cm²の水圧試験が無事終了したと報告されている。

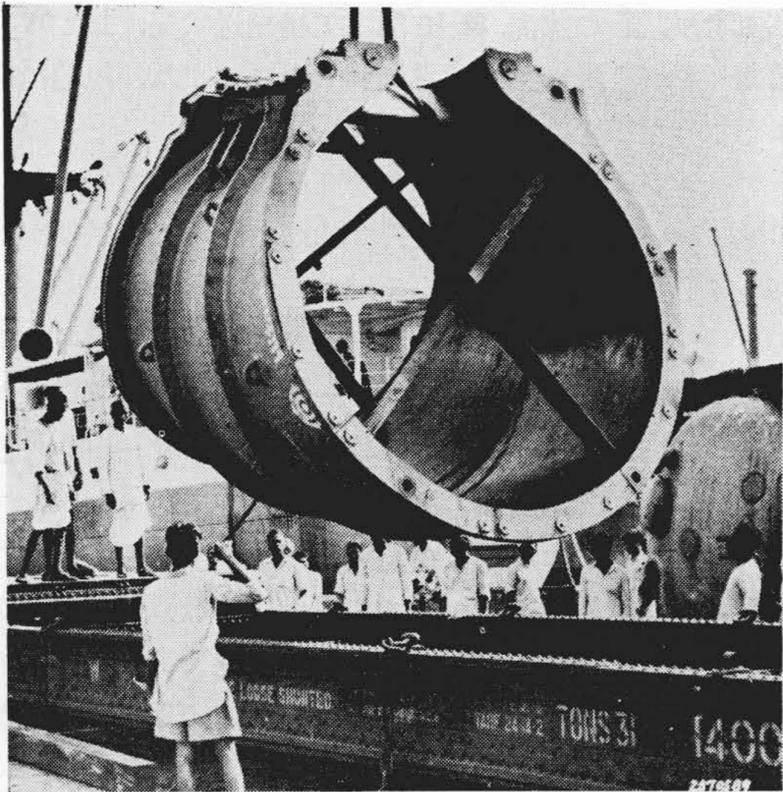
ケーシングのコンクリート埋込み施行につき、インド側では最初プリパクトコンクリートの使用、あるいはケーシング内部に水圧をかけた状態でコンクリートを打設してゆく案など米国流の例にならう意向であったが、スピードリング部にかかる荷重およびその基礎の重要性などを考慮し、結局はわが国で大型品に一般に採用されているルーフィングをケーシング上面に巻く方式が技術的にまさっていることが認められ、岩綿板がルーフィングとして採用されることになった。

7. 水車構造上の特長

水車の主要構造は佐久間発電所納水車と大差なく、主軸受の構造およびシーリングボックスなど、日立の標準方式がとり入れられている。しかしガイドベーン軸受はいわゆる3軸受方式を採用し、パッキングはガイドベーンレバーをぬかずに取りかえることが可能である。またセグメント軸受も冷却水温が日本国内に比し著しく高くなることを考慮し冷却管面積を特に大きくしてある。第12図は水車構造断面図で、また第13図は工場組立状況の写真であるが、ケーシングスピードリングは先発されたため雇装置を用いて組立てられている。以下各部の特



第10図 ケーシング工場発送状況



第 11 図 ポンベイ港にて貨車につみ込まれる分割されたケーシング

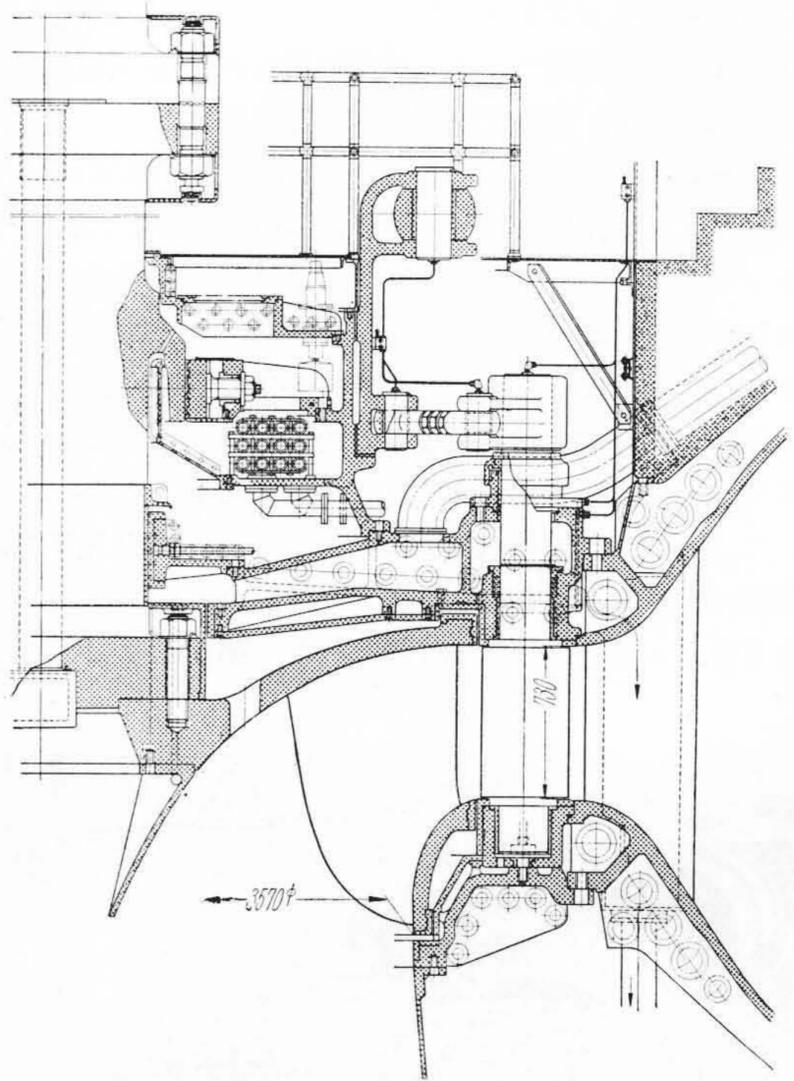
長について述べる。

7.1 水車主軸

発電機が英国製であるため、発電機と直接結合される主軸については特に多くの打合せを必要とした。

主軸の寸法は軸端径 965 mm、軸長は 5.5 m、重量は約 35 t で鍛鋼製である。

水車と発電機の製作者が異なる場合、主軸合せ目のリーマー通し作業および責任区分は複雑である。最初 BDDD (Bhakra Dam Designs Directorate の略で技術部門を担当している機関) 側の計画では発電機軸を日立製作所に送り、日立製作所で水車軸と合わせてリーマー通しを行い、現地に発送する予定であったが、発電機製作者とインド側との契約にてこのことは困難となり、結局日立製作所から合せ目の治具を送り、これに合わせて発電機側の下孔をあけて発電機軸を現地に送り、現地



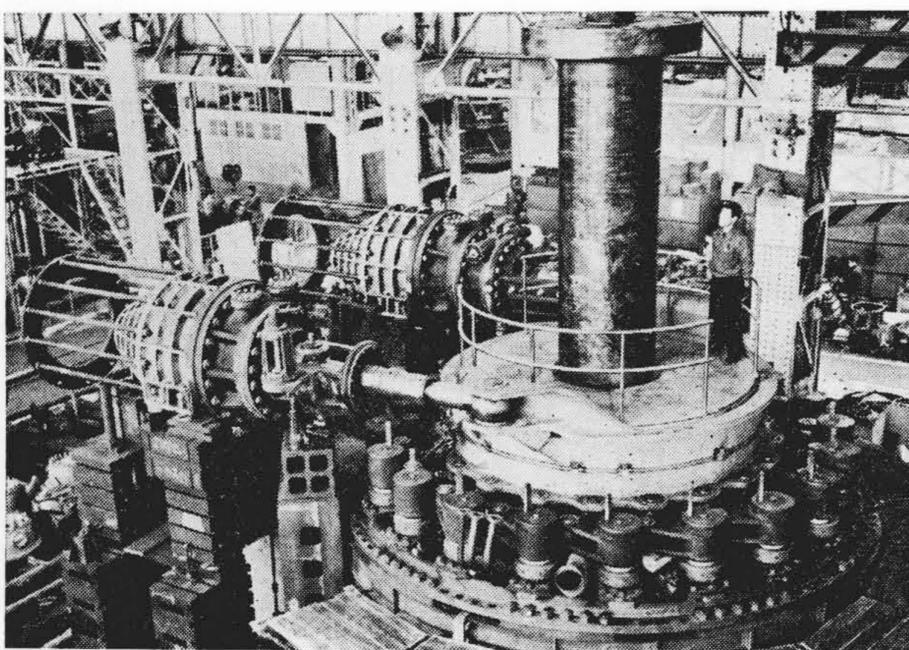
第 12 図 水 車 構 造 図

において合わせてリーマー通しを行うことに決定した。

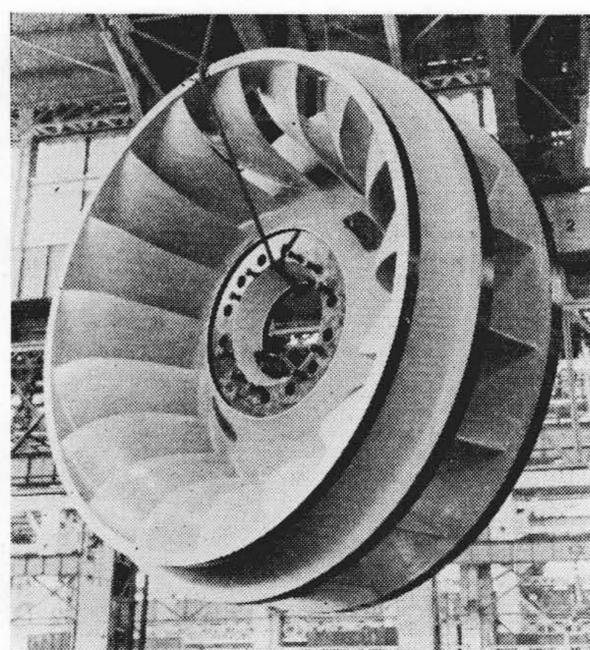
7.2 ランナ

水車の主要部品であるランナの重量は 30 t をこえ、外径は約 4.16 m である。

ランナとして最も重要視されるのはいうまでもなく効率であるが、ランナの耐久度ならびに運転状況を左右するキャビテーション性能もまた重大な要素である。本発電所に限らず、最近の外国仕様書中にはこのキャビテーション潰蝕量に対し保証値を明示しているものが多く



第 13 図 水車本体内工場組立



第 14 図 ランナ

パークラでは1年間の潰蝕量が 500 in^3 ($\approx 6.4 \text{ kg}$) 以下たると規定されている。この数値は米国規格 NEMA に準拠しているようである。第14図は仕上完成せるランナを示す。

7.3 ガイドベーン関係

ガイドベーンの軸受配置はいわゆる3軸受方式が採用されており、ガイドベーンパッキングはガイドベーンレバーをはずすことなしに、二つ割のグランドを取り除くことにより取りかえることが可能である。パッキングの材質は人造ゴムを使用し、耐久度をますよう考慮した。

ガイドベーンの材質は普通鋳鋼製であるが羽根両端面および相隣るガイドベーンと接する部分は不銹鋼の熔接肉盛がほどこしてある。なお、ガイドベーン上下の間隙を調整するためにスピンドル上部に調整可能の推力軸受をもっており、また操作機構の保護として設けてある弱点ピンが切断したとき、ガイドベーン羽根がランナ羽根入口部に当たることを防ぐためガイドベーンレバー部に調整可能のストッパーがつけられている。

7.4 ライナ類

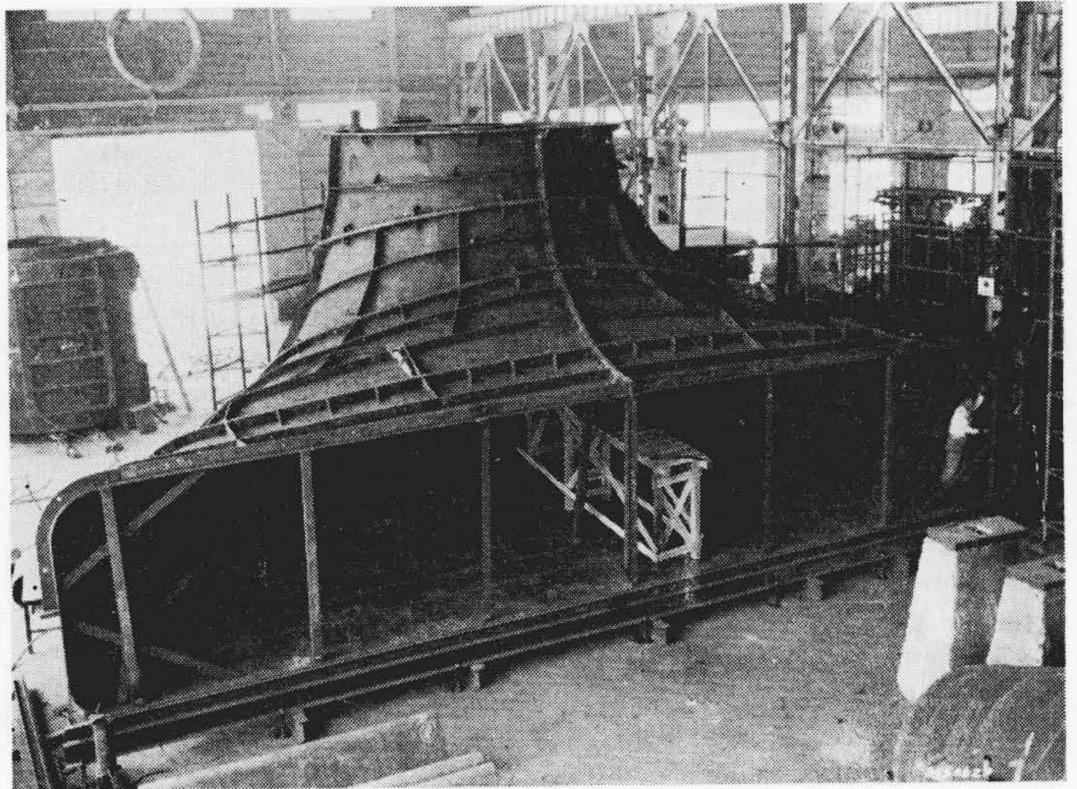
水車の上カバー、下カバーなどには高炭素鋼のライナを摩耗に対する保護としてビス止めしてある。またランナライナ、シャフトスリーブは13%クロムのライナを使用している。高炭素鋼の材質はJIS規格のS45Cであるが、これは米国規格SAE 1045に相当し、熱処理によりブリネル硬度200~220とした。

ライナ材としてS45Cを使用するに当り、S45C同志の熔接性およびS45Cと13Cr鋼の熔接性をしらべるために種々の熔接試験を実施した。その結果かかる炭素含有量の高い材質でも特別な作業方法をとることにより熔接作業が可能となった。また熔接部の硬度を平均化せしめるための種々の研究が行われ、きわめて満足すべき結果をうることができた。

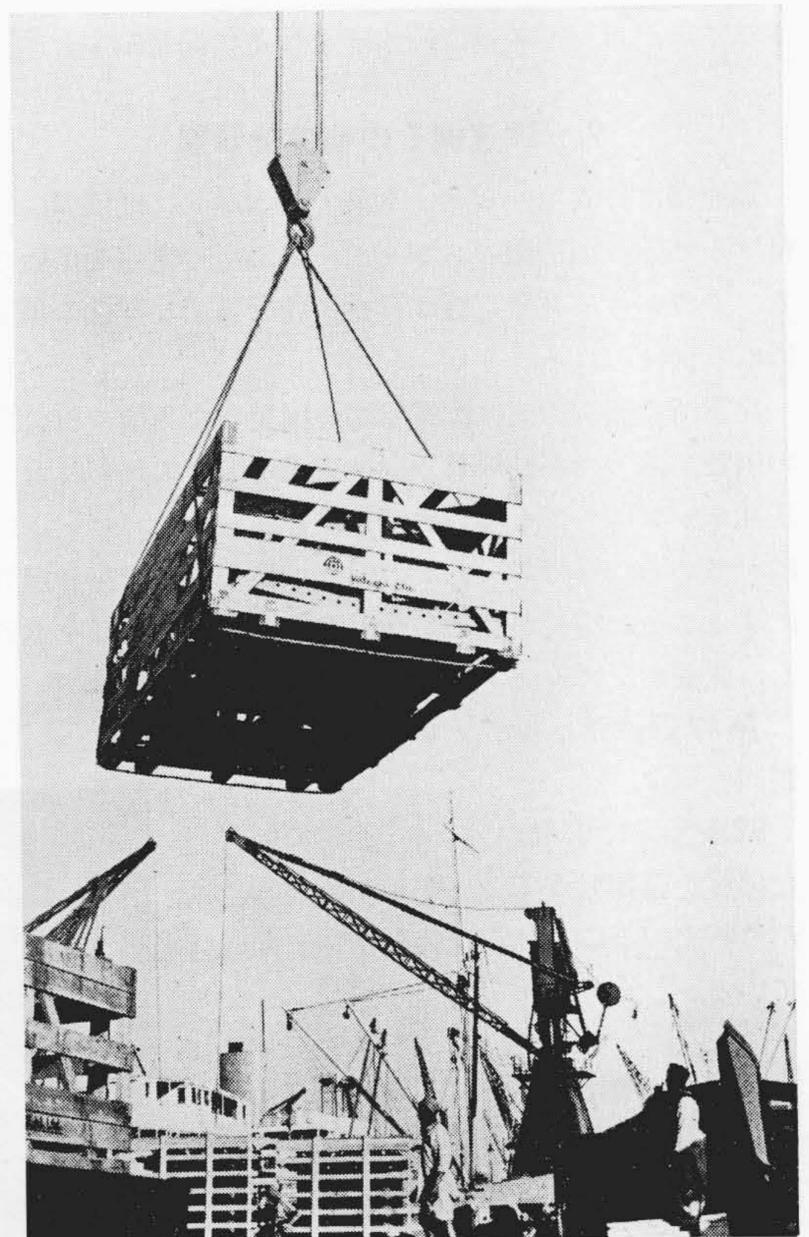
8. 吸 出 管

ドラフトチューブは水車中心から15ftの範囲まで鋼板製ライナで内張りされた。吸出管ライナはすべてフランジにより接続され、輸送上の荷造寸法を考慮し20分割されている。吸出管は出口幅が約15mに及ぶため、2本のピアを有し、このピアの先端にはおのおの1個のピアノーズを有するがこのピアノーズは鋳鋼にて製作し、680tの荷重に耐えるような構造となっている。

吸出管ライナの外面はコンクリートとの接着を考慮し塗装を施さぬのが原則であるが、海上輸送中錆の生ずる

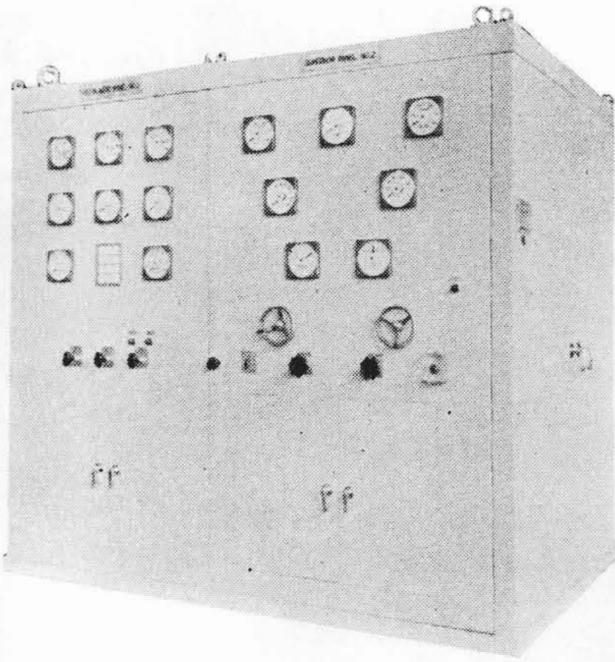


第15図 吸出管工場組立



第16図 箱づめされたドラフトチューブライナのボンベイ港陸あげ

ことを懸念し、アスファルトペイント塗装を施し、すべて箱づめにして発送した。この外部塗装は現地で完全



第17図 キャビネット型調速機

におとしてコンクリート施行された。第15図は工場組立てせるときの写真で、第16図は箱づめされたドラフトライナがボンベイ港に陸あげされる状況を示す。

9. 調速機その他の補器類

調速機は日立キャビネット型で、油ポンプは別個に据付けられる。調速機のスピード駆動用の電源を供給するアクチュエータ発電機は日立製作所製で発電機の頂部に取り付けられる。

発電所の制御方式は配電盤が外国製のため種々打合上の困難があったが結局日立標準方式がとり入れられた。圧油ポンプにしても最初は調速機と同じキャビネット内におさめる仕様であったが、保守点検が不便であり別置にすることの特長が認められ、調速機には計器盤を並置し、圧油ポンプセットは別置されることになった。

第17図はキャビネット型調速機の外觀図を示す。

調速機は工場試験の結果、非常に優秀な感度を発揮しうることが確かめられ、かつ将来 AFC 運転が可能な構造となっている。

10. 輸出品としての特長

パークラ水車は海外において多数の水車製作者間の競争入札の結果受注したという点で、今後の日立製作所としてのみならず日本製品として輸出振興に大きな基礎をきずき得たものと考えられる。しかしかかる記録的輸出品を製作する過程には、いわゆる常識というものが通用せず、すべてが理論的にまた事務的に処理

されねばならず関係者の苦心は並大底ではなかった。

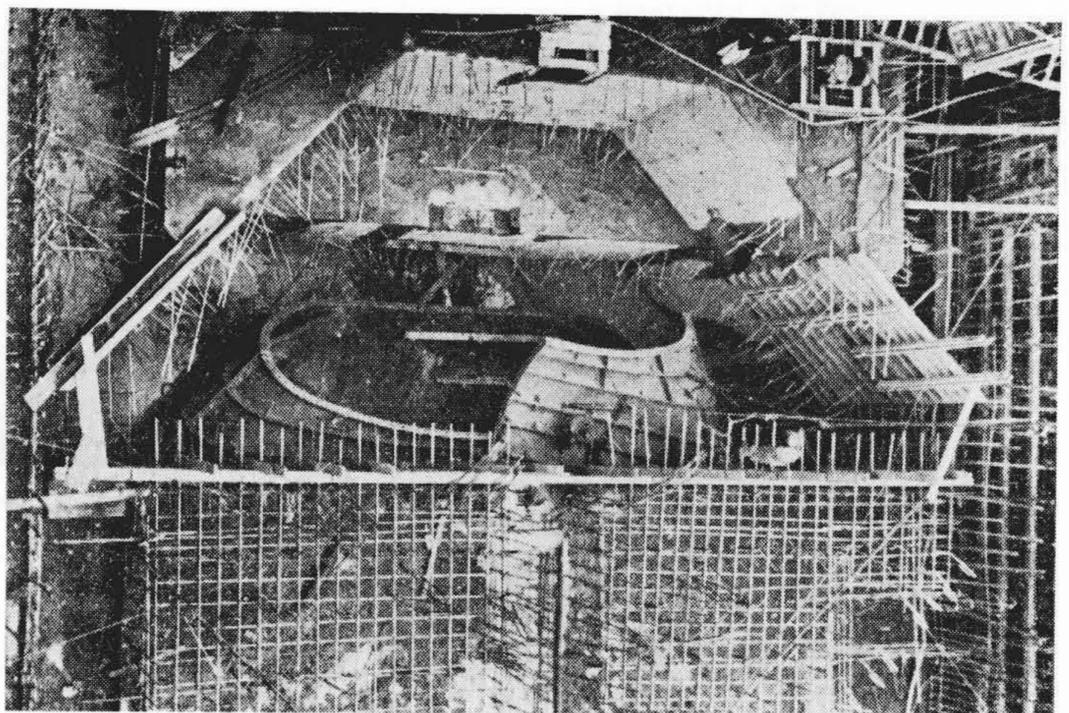
また外国の発電所の多くがそうであるように、発電所機器のおのおのが入札によって決められたため、発電機は英国に、配電盤は伊国に、起重機はユーゴスラビヤ製と、国際色豊かな発電所であり、水車の各部を設計する上にはこれら諸外国の機器の仕様を熟知せねばならぬことはもちろん、簡単な仕様の変更でさえも複雑な交渉過程をたどる必要が生じた。

BDDD 側で出した仕様書は、機器を外国から輸入するという前提にたって作られたものであり、細部にわたるまで詳細に仕様を規定した比較的完全なものであるが、その内容は米国の規準に準拠せるものである。したがって日立製作所として最良の製品を製作せんがためには十分日本の技術を理解してもらった上で種々の修正が必要であった。

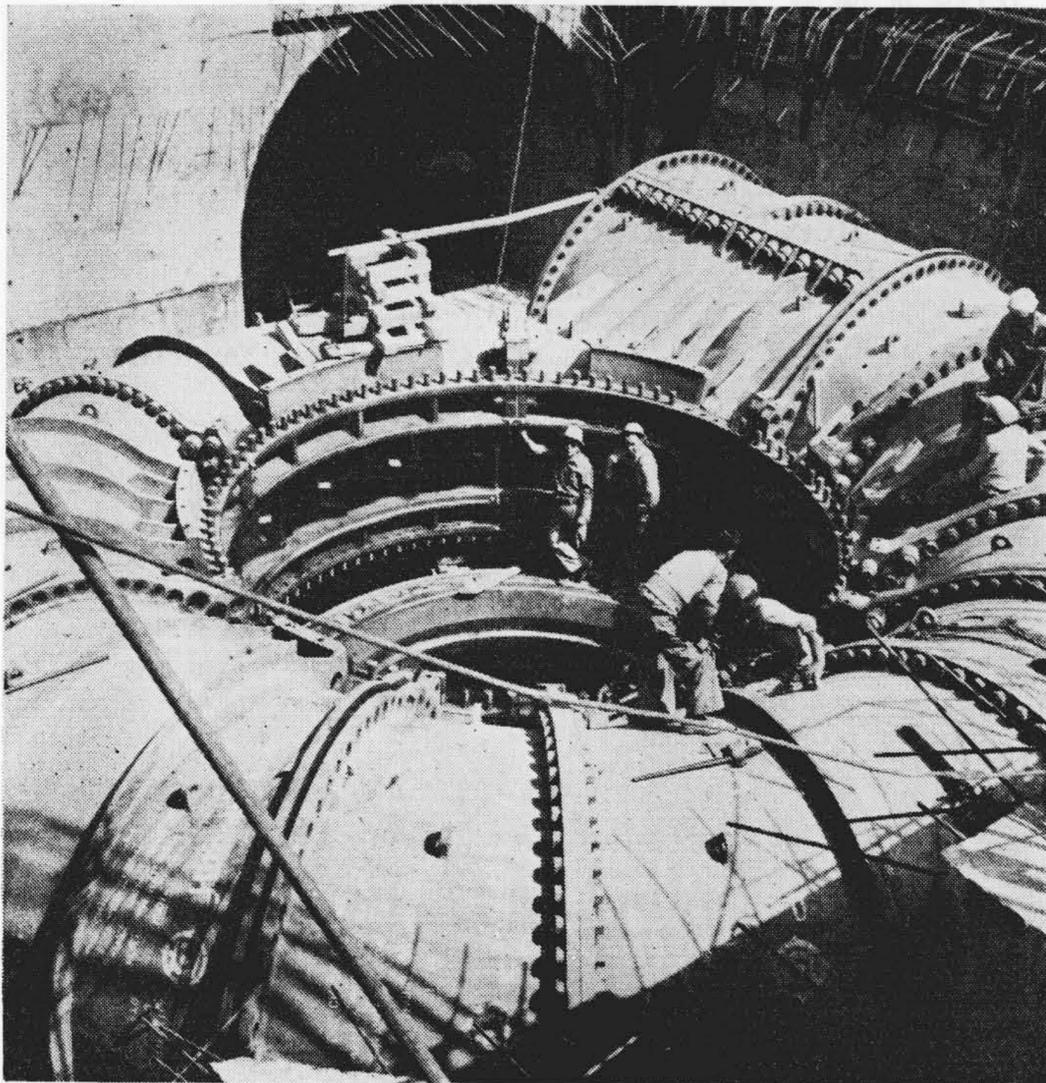
かかる大容量機を製作する上に最も重要な輸送限界にしても仕様書上一応84"×170"×長さという数値はあげられているが、ワイドゲージの採用されているインド鉄道において、かかる細長い断面のみが規定されるというのも不合理であり、結局輸送上、限界が懸念される部品についてはすべて図面を作成して各鉄道の承認をとるという手数を要した。

しかし上記のごとき種々の困難はあっても、記録的輸出品を製作することにより将来の輸出の基礎をかため得て、パークラ水車以後第1表に示したように次々とインドにおける代表的発電所用水車の受注をみる事ができた。

また渦巻ケーシングが現地に到着して組立てられた結果、各ピース、ピースの寸法が正確で設計ならびに機械加工の優秀さはインド以外の外国技術者からも驚異的であるとの評を受けている。



第18図 ドラフトチューブの据付状況



第19図 渦巻ケーシングの据付状況

吸出管ライナの据付にしても、土木関係の米国技術者の指導のもとにコンクリート打設作業に細心の注意がはらわれライナ裏面に完全にコンクリートが接するまでグラウト作業が行われたとのことである。

第18図はドラフトライナの据付作業、第19図はケーシングの現地組立状況の写真である。

12. 結 言

5台の水車の大部分の部品はすでに現地に到着し、酷暑をおかして日立製作所から派遣された指導員の指導のもとに据付作業が進められている。昭和33年10月には建家にクレーンも据付かりいよいよ水車本体の組立が開始されるが、1号機の発電開始は昭和34年秋になる見込みである。

インドは現在第二次5箇年計画の実行に努力を集中している。しかし電力開発においては主要な機器類はほとんどすべて輸入によらねばならぬ現状である。従

来これらの機器の大部分は欧米から輸入されたものであったがこの前轍をやぶり日立製作所がパークラ用水車を納入したという意義は誠に大きく、種々の部品が現地に到着するにつれ日本の技術に対する信頼度も高まり、インド国内に占める日本技術の役割も本水車の輸出によって一段と高められたと信ずる。パークラダム工事の完成とともに、これらの水車が優秀の成績をもって運転に入ることを期待してやまない次第である。

11. 現 地 据 付

各機器の据付は州政府の手によって着々進行しており日立製作所からは指導員が派遣されている。すでに5台分のドラフトチューブは据付を完了し、ケーシングも全部現地における水圧試験を終了した。

インド側も据付工事を慎重に行うため、多くの必要工具を日立製作所より購入し、能率よく工事を進めている。

Vol. 20	日 立	No. 10
目 次		
◎電 化 へ の 夢.....松山 ^{ミキ} 樹子	◎モ ビ ー ル ク レ ー ン の 活 躍	
◎ト ラ ン ジ ス タ の え ら び 方	◎安 全 な 清 浄 装 置	
◎船 橋 の ヘ ル ス セ ン タ ー	◎明 日 へ の 道 標	
◎日 曜 大 工	◎日 立 だ よ り	
◎きれいな鉄板はどうしてできるか	◎金 属 を 診 断 す る レ ン ト ゲ ン	
◎脚光をあびる日立ディーゼル機関車	◎暮 し の 科 学	
◎ショールーム (ミッション)	◎新 し い 照 明 施 設	
◎新しい建築材料 (サンプルート)		

誌 代 1 冊 〆 60 (〒 16)

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振替口座東京 71824 番
 取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振替口座東京 20018 番