

電源開発株式会社 沼原発電所納

1 段 500 m 高落差ポンプ水車および発電電動機

Pump-turbines of 500-meter Head and Generators-motor
for Numappara Power Station

田 高 稔 康*	長 沼 進**
Toshiyasu Takô	Susumu Naganuma
谷 越 敏 彦**	山 部 正 博***
Toshihiko Tanikoshi	Masahiro Yamabe

要 旨

沼原発電所用揚水主機は、1段で528 m という高落差ポンプ水車と、375 rpm という高速発電電動機で、これらを設置することにより3台で675,000 kW の発電所出力を発生する世界最初の高落差大容量機である。本稿では、現在着々と進行しつつある沼原発電所の建設概要と、種々研究開発された成果および現在設計製作中の主機の概要について紹介する。

1. 緒 言

大容量火力、原子力発電所の増加に伴ってそのピーク供給機能と追従性が良く、しかも経済的な揚水発電所の出現が要望されている。ここに高落差化し、大容量化する意義がある。本沼原発電所は、総出力675,000 kW、落差、揚程は500 m、528 m と高く、世界的な記録品であり、そのうえ世界最初の高落差大容量発電所である。本稿においては沼原発電所計画の概要と、高落差大容量ポンプ水車および発電電動機の研究開発のおもな点と、現在設計製作中の主機の概要を紹介する。

2. 沼原発電所計画の概要

この沼原発電所計画は、東地域中心部での最初の大規模揚水発電所として東地域の電源配置の適正化に、また電力の大需要地である首都圏への電力供給に大いに貢献することが期待されている。さらに総合開発事業にも参加して地域社会の発展に貢献し、いっそう開発効果を高めるように配慮されている。上池を設ける沼原地区は日光国立公園特別地域にはいっており、かつ、林野庁で実施している明治100年記念事業「国民の森」のなかに位置している。したがって、自然景観の保全、風致の維持については特に慎重な配慮がなされ、工作物の位置、形状などについては自然景観を、そこなわないように考えられている。

2.1 発電計画の概要

沼原地点は図1に示すように栃木県黒磯市に所在し、那珂川上流深山地点に那須野原開拓建設事業の一環として農林省が建設中の深山貯水池を下池とし、これから至近距離にある那須岳西麓(ろく)の沼原に上池を設け、この間の落差約500 m を利用して675,000 kW の最大出力を得る純揚水式発電計画であり、昭和48年5月を1号機の運開とし続いて2号、3号の建設を行なうものである。この計画は電力需給、上池容量の地形地質上の制約、ピーク運転継続時間、主要機器の製作、経済性、そのほか多方面から慎重に検討のうえ決定されたもので、図2は計画の一般図である。

2.2 発電所の仕様

上 池

ダム位置	栃木県那須郡黒磯市大字板室字白湯山
満水位標高	1,238.00 m
利用水深	40.00 m

* 電源開発株式会社
** 日立製作所日立工場
*** 日立製作所日立研究所

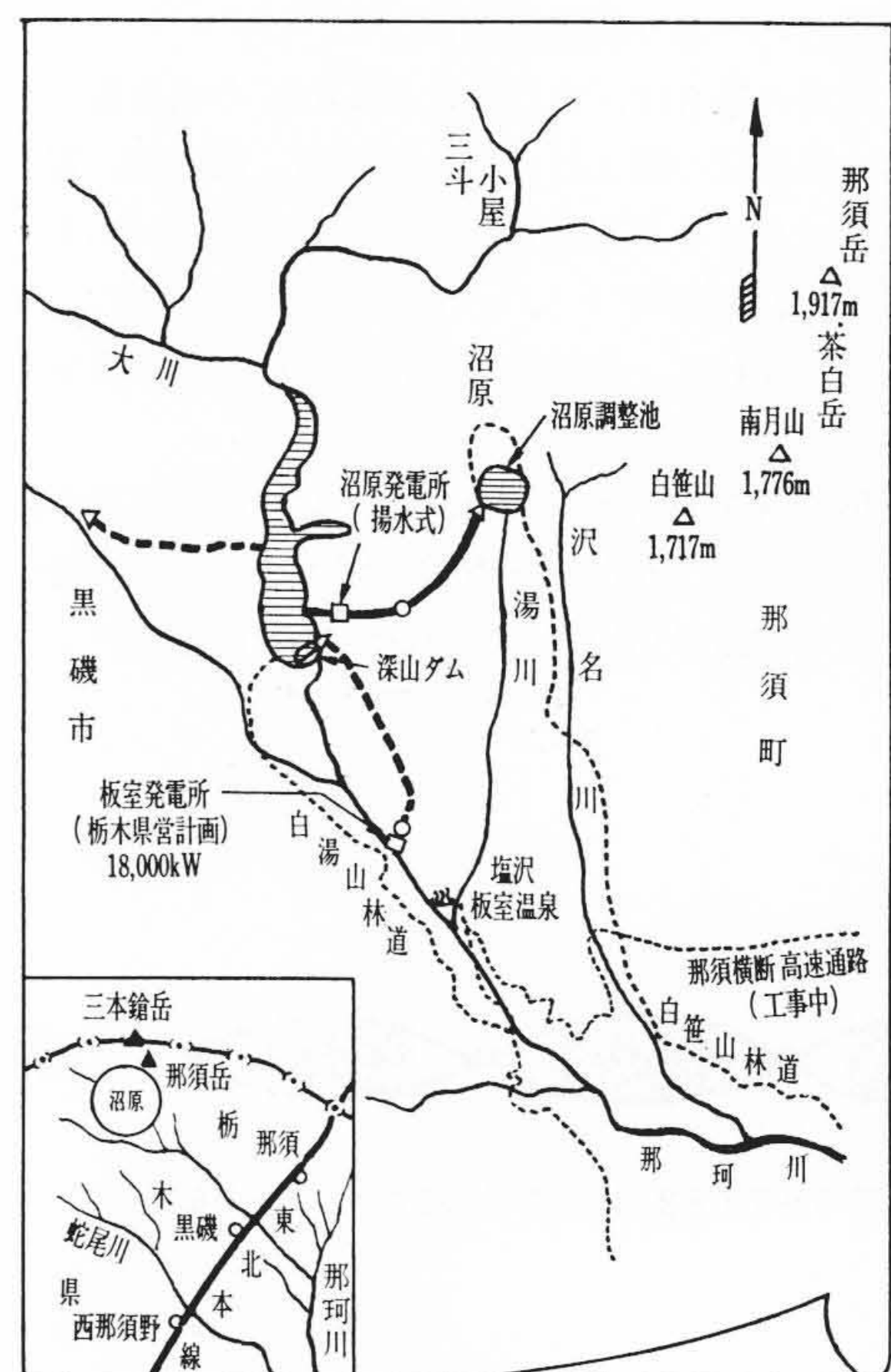


図1 沼原発電所計画概要図

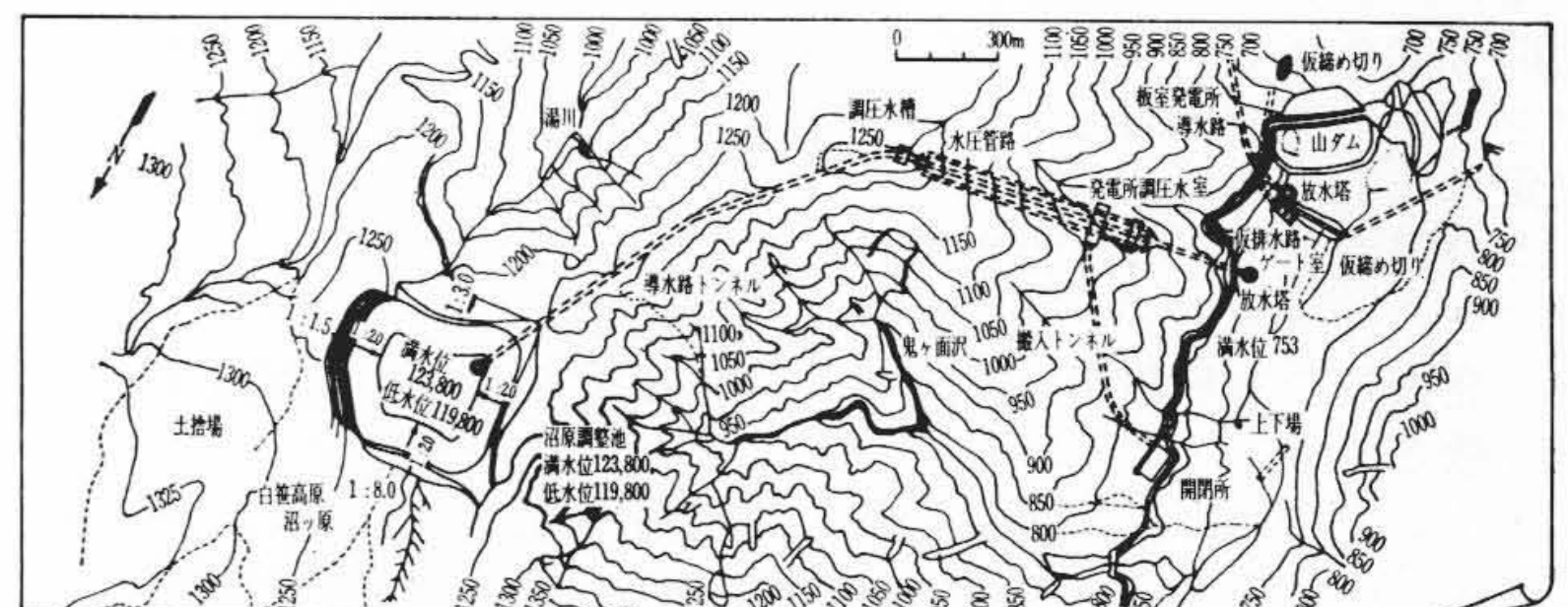


図2 沼原発電所計画一般図(平面図)

有効貯水量	$4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$
-------	-------------------------------

下 池

ダム位置	栃木県那須郡黒磯市大字板室字白湯山
満水位標高	753.00 m
利用水深	32.00 m
有効貯水量	$20.9 \times 10^6 \text{ m}^3$

落差出力

最大有効落差 500 m (最高揚程 528 m)
 発電所出力 675,000 kW (3 台総計)

2.3 主要構造物

ダム

形 式 表面しゃ水壁フィルタイプダム
 堤 高 29 m
 堤 長 1,593 m

導水路

形 式 円形断面圧力トンネル
 条 数 1 条
 内 径×延長 6.3 m×1,447 m

調圧水槽(そう)

形 式 制水孔水室形調圧水槽

水圧管路

形 式 埋設水圧管路
 条 数 3 条
 内 径 3.6~2.6 m
 延 長 807.705 m (1, 3 号)
 796.576 m (2 号)

発電所

形 式 地下式
 寸 法 幅 20.00×高さ 40.00×長さ 88.50 (m)

放水路

形 式 円形圧力トンネル
 条 数 3 条
 内 径 3.7 m
 延 長 507.00 m
 調節機構 スライドゲート

3. ポンプ水車

沼原発電所の最大の特徴は、最高揚程 528 m に及ぶポンプ水車であり、従来世界的通念としてのポンプ水車は 400~450 m が技術的限界とされ、これ以上の揚水にはタンデム式が採用されるか、または 2 段ポンプ水車の構想であるが、いずれも経済的にまたは技術的に困難視され、採用の気運にないようである。したがって、さらに経済性のすぐれた揚水発電を開発するには、1 段ポンプ水車の高落差大容量化が要望される。わが国での記録は関西電力株式会社喜撰山発電所の最高揚程 230 m (水車出力 240,000 kW) が運転中のものであり、国外ではスペインのビラリノ発電所の最高揚程 402 m (水車出力 128,000 kW) がある。500 m 級のポンプ水車については、従来の実績を大幅に上回る落差であるため、特性、製作技術上の問題、運転上の問題などを検討する必要がある。図 3 は揚程の年度別推移を示したものである。

3.1 検討内容およびおもな模型試験

世界最初の 500 m 級大容量ポンプ水車については、電源開発株式会社と共同研究により進められ、それぞれ下記の問題点に対し研究検討が行なわれた。

- (1) ポンプ水車の特性
- (2) ポンプ水車の構造と強度
- (3) 実揚程模型試験

ポンプ水車の特性については、低比速度ポンプ水車の効率特性の改善を行なうとともに、キャビテーション性能の良いランナを開発することを主眼とした。ポンプ水車の構造と強度に対しては、高落差大容量機としてのランナ、ケーシング、ガイドベーン、カバーなどを主眼として検討を加えたものである。実揚程試験においては、

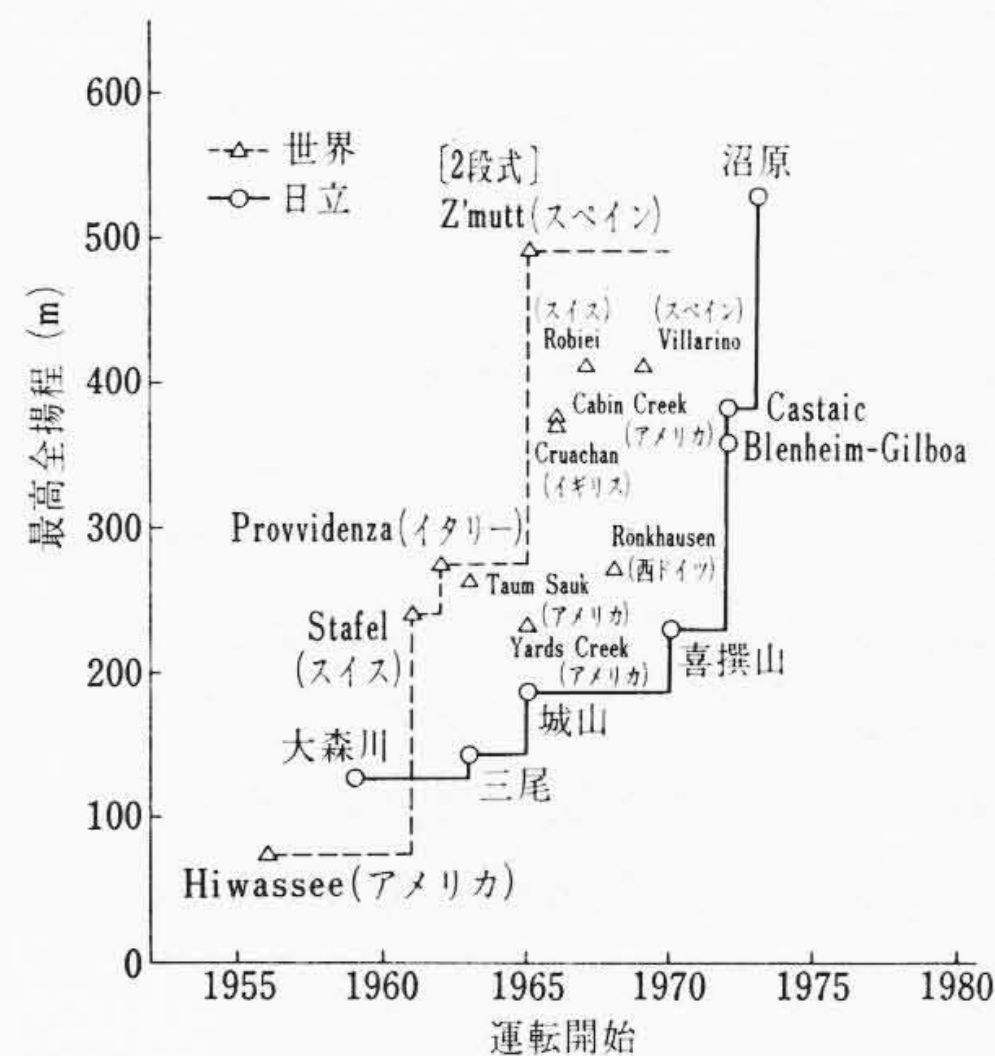


図 3 揚程対年度別推移の一例

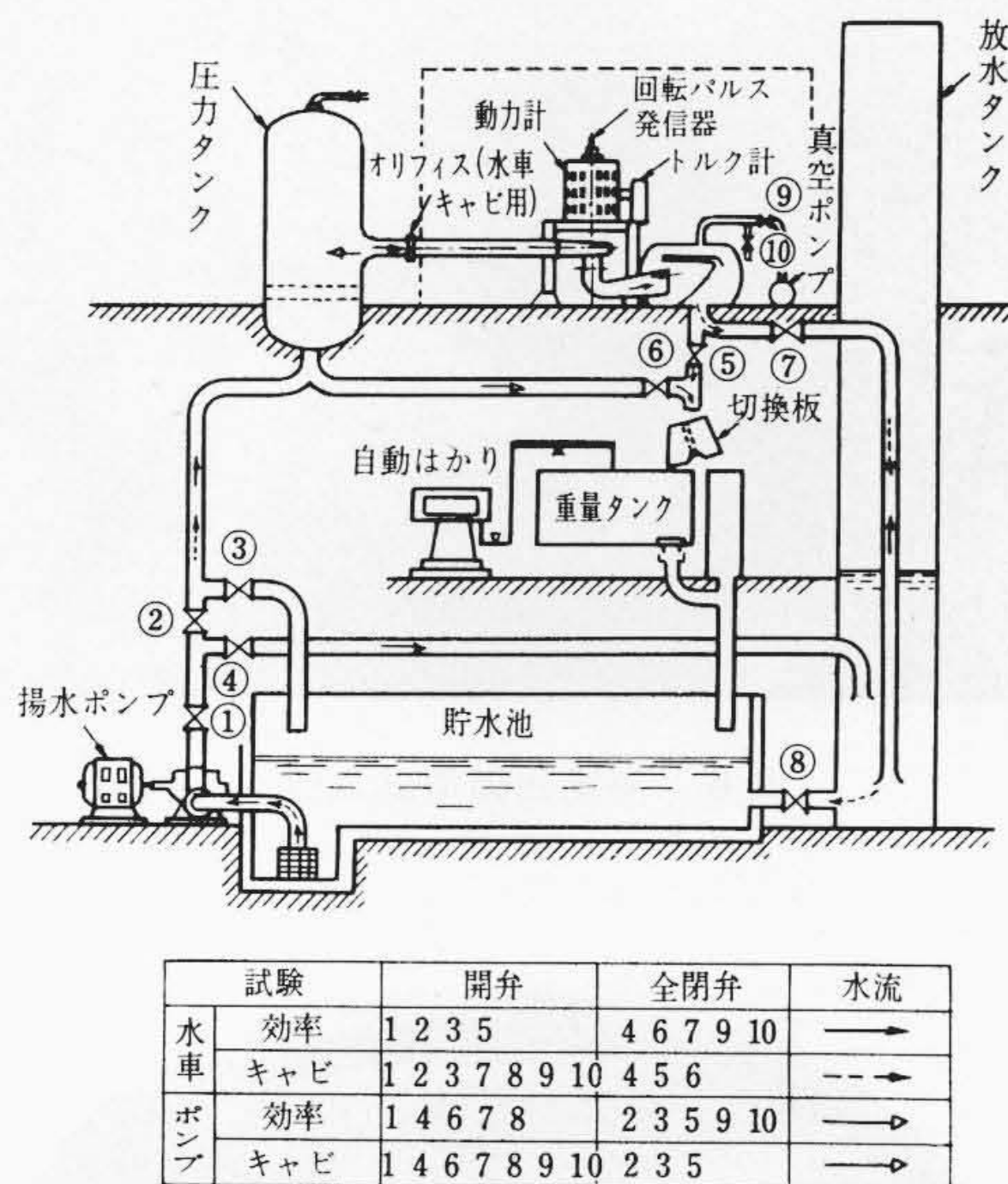


図 4 試験装置の概略図

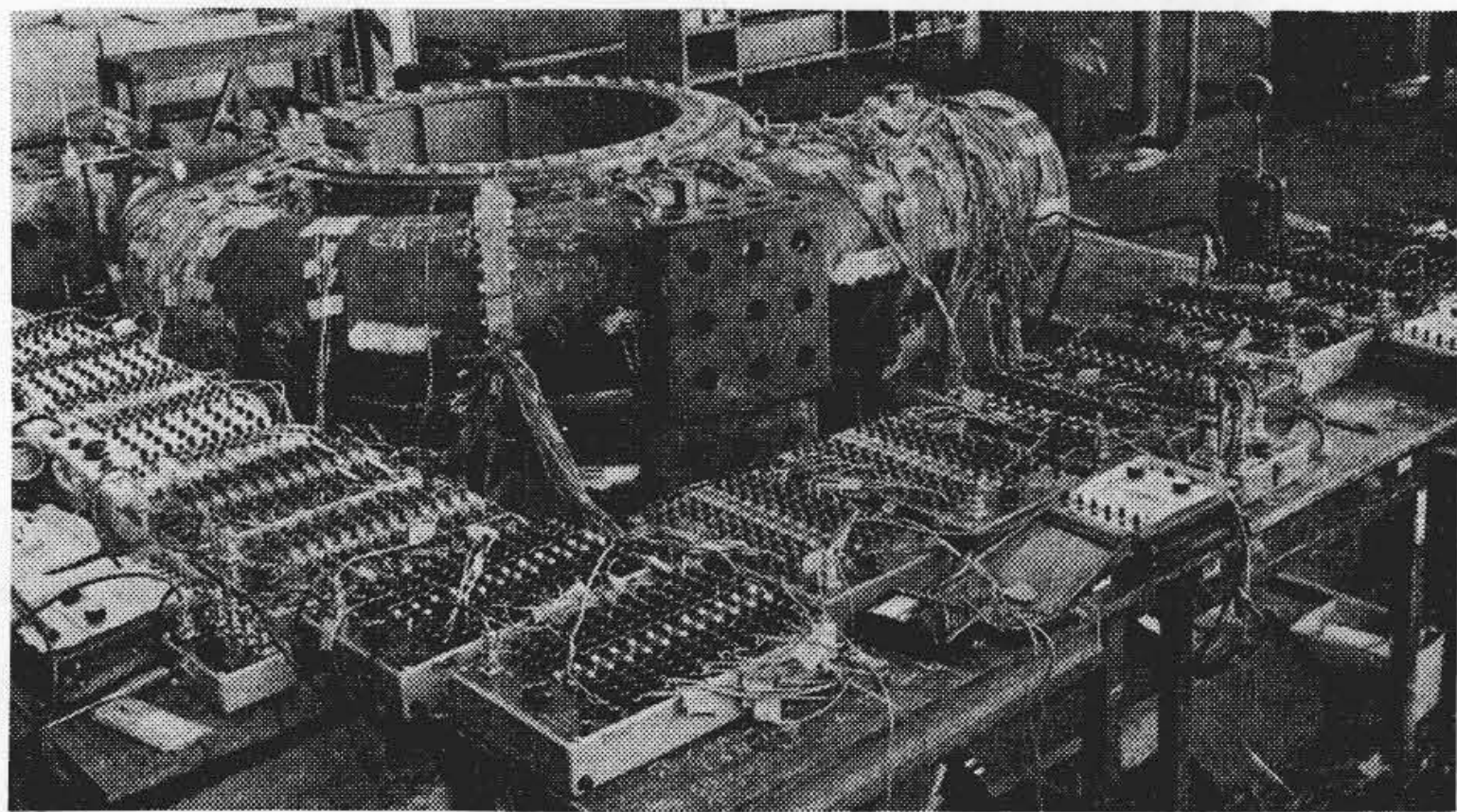


図 5 相似モデルケーシング応力測定状況

実際に 500 m 以上の揚水を行なって各部の水圧脈動の様相を確認して実機の製作の可否を決めることにした。図 4 は供試模型試験装置の概略図を、図 5 は相似モデルケーシングの応力測定状況を示したものである。

次に実揚程模型試験の結果について述べる。揚程 528 m の揚水発電所を計画するにあたって、1 段ポンプ水車の適用が可能か否かを確認し、同時に運転時の水圧脈動を実測して、ランナ、ガイドベーンなどの疲労強度に対する検討を行なう必要がある。さらに水力学上理論的には吸い込み高さを揚程に見合うだけの値を与えれば揚水

は可能ではあるが、實際上模型によってどれだけの吸い込み高さを与えればよいかを確認する必要がある。したがってランナの外周周速を実物と同一にとって水力学上実機の運転状態を知るため、1/20の模型を使用し運転を行ない、各部の水圧脈動を測定し実機運転の信頼性を確認した。図6は模型試験装置である。本装置は実物と同様に立て軸機で時計方向に水車運転、逆回転してポンプ運転を行なうような構造としたものである。ランナ径は実機の約1/20であるため模型の回転速度は実機回転速度375 rpmの20倍となり7,500 rpmである。この速度で運転することにより実揚程が得られる。そこで、1,500 kW 駆動用電動機3,000 rpmに対し増速歯車を設置し、ワードレオナード装置により駆動用電動機の回転速度を制御するこ

ととした。このようにポンプと水車を別個に試験することにより水圧脈動などについてもそれぞれ実機推定をより確度の高いものとすることができたと考えている。図7は模型ランナ、図8はポンプ運転中を、図9はポンプ運転中の各部の水圧脈動を示している。図10は吸込高さによって各部の水圧脈動がどのような影響を受けるかを示したもので、臨界吸込高さに対してどの程度の余裕をとるべきかの点についての貴重なデータを得た。一方、水車運転においては振幅の最大はランナとガイドベーンの間でポンプ運転時と同様な傾向

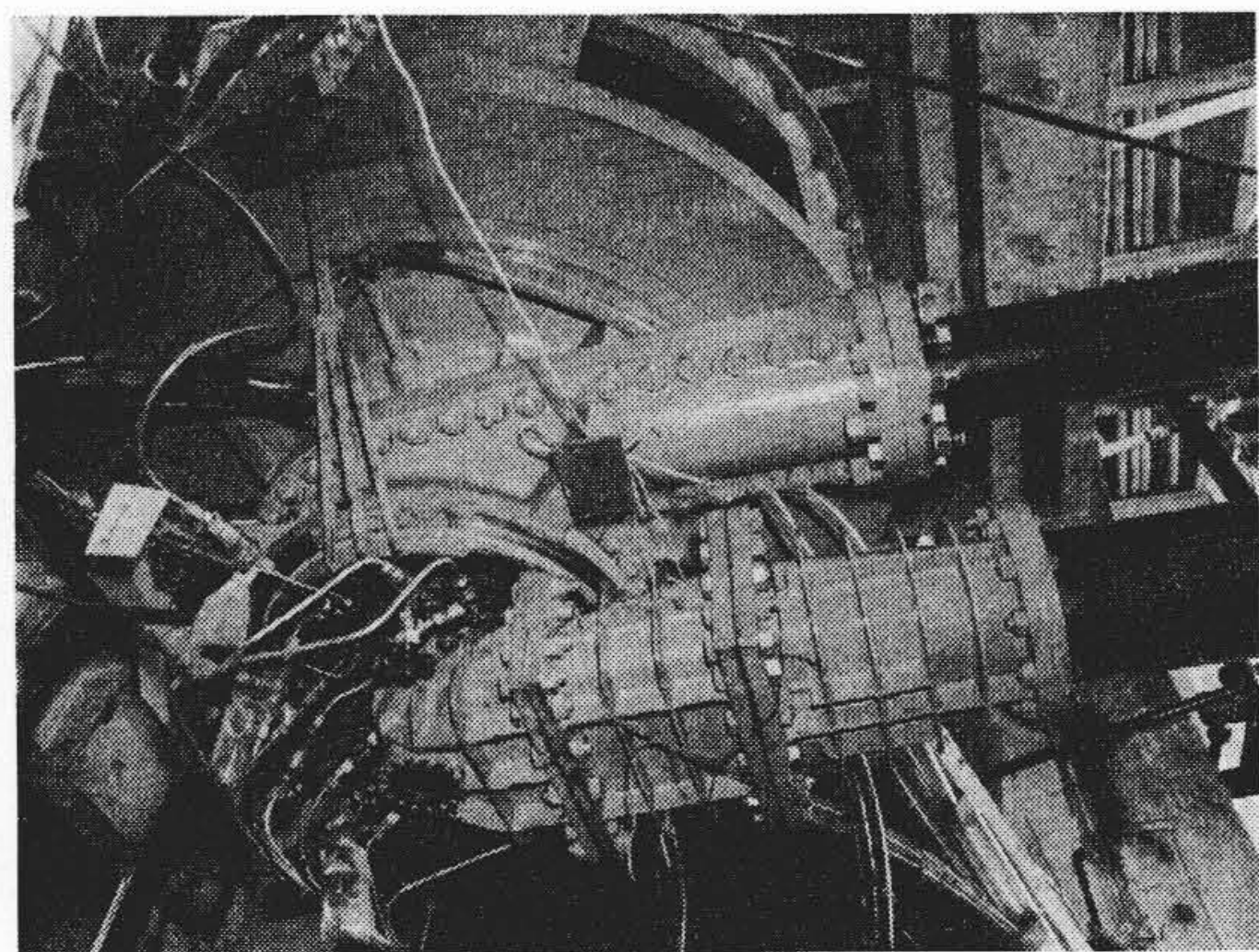


図6 実揚程模型試験装置

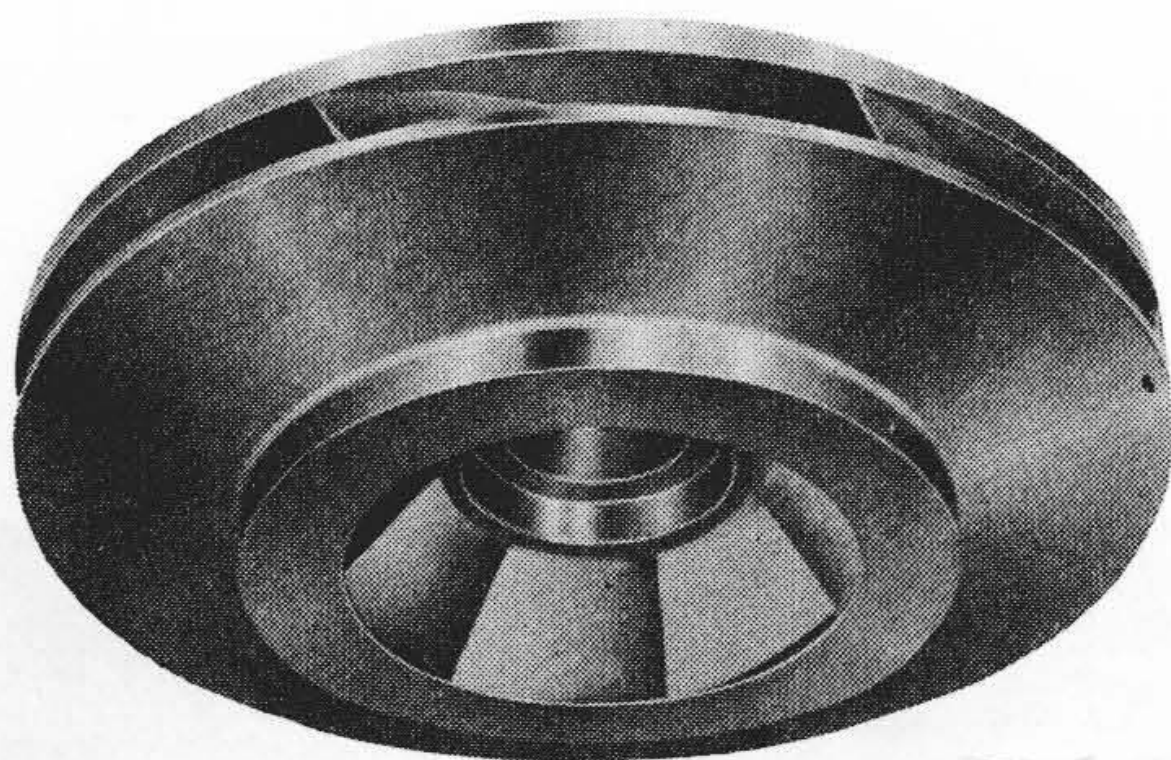


図7 実揚程試験用模型ランナ

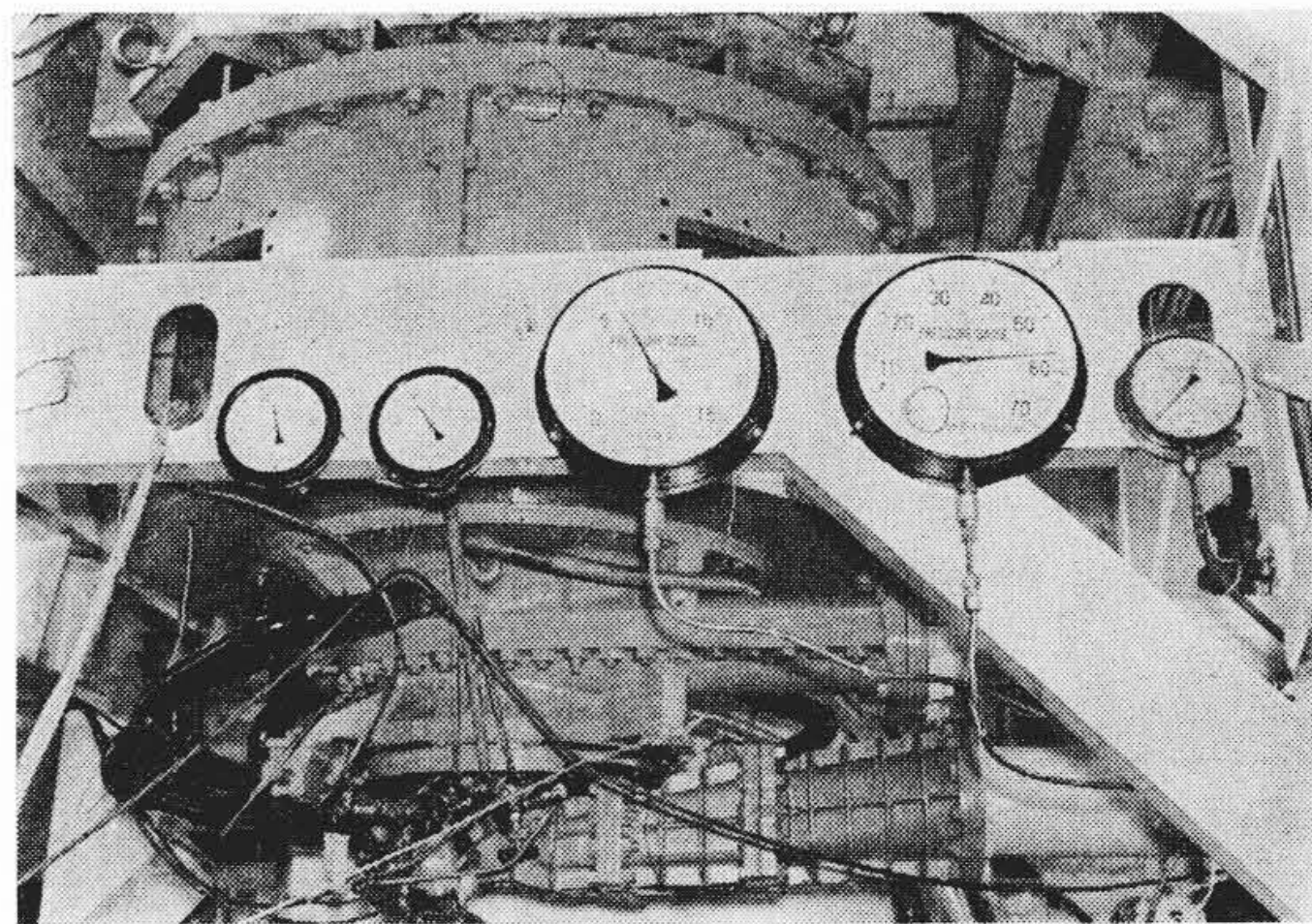


図8 実揚程模型試験中

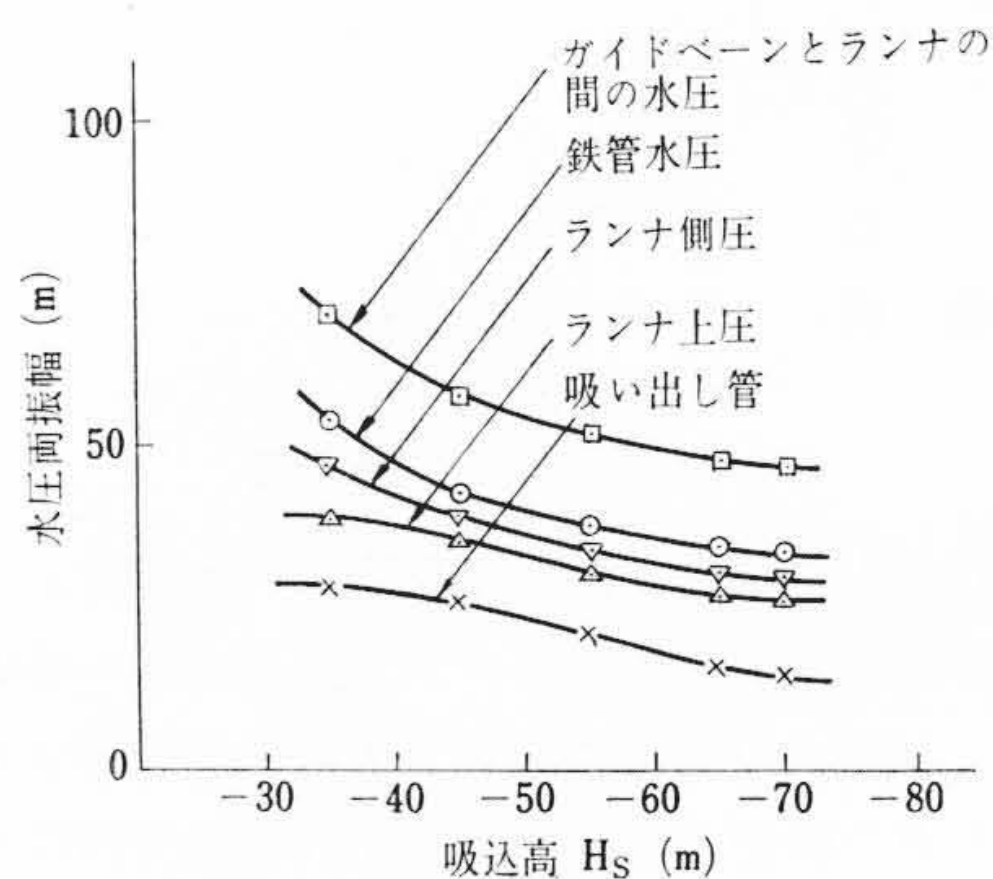


図10 実揚程試験中における模型ポンプ水車の各部圧力変動振幅例

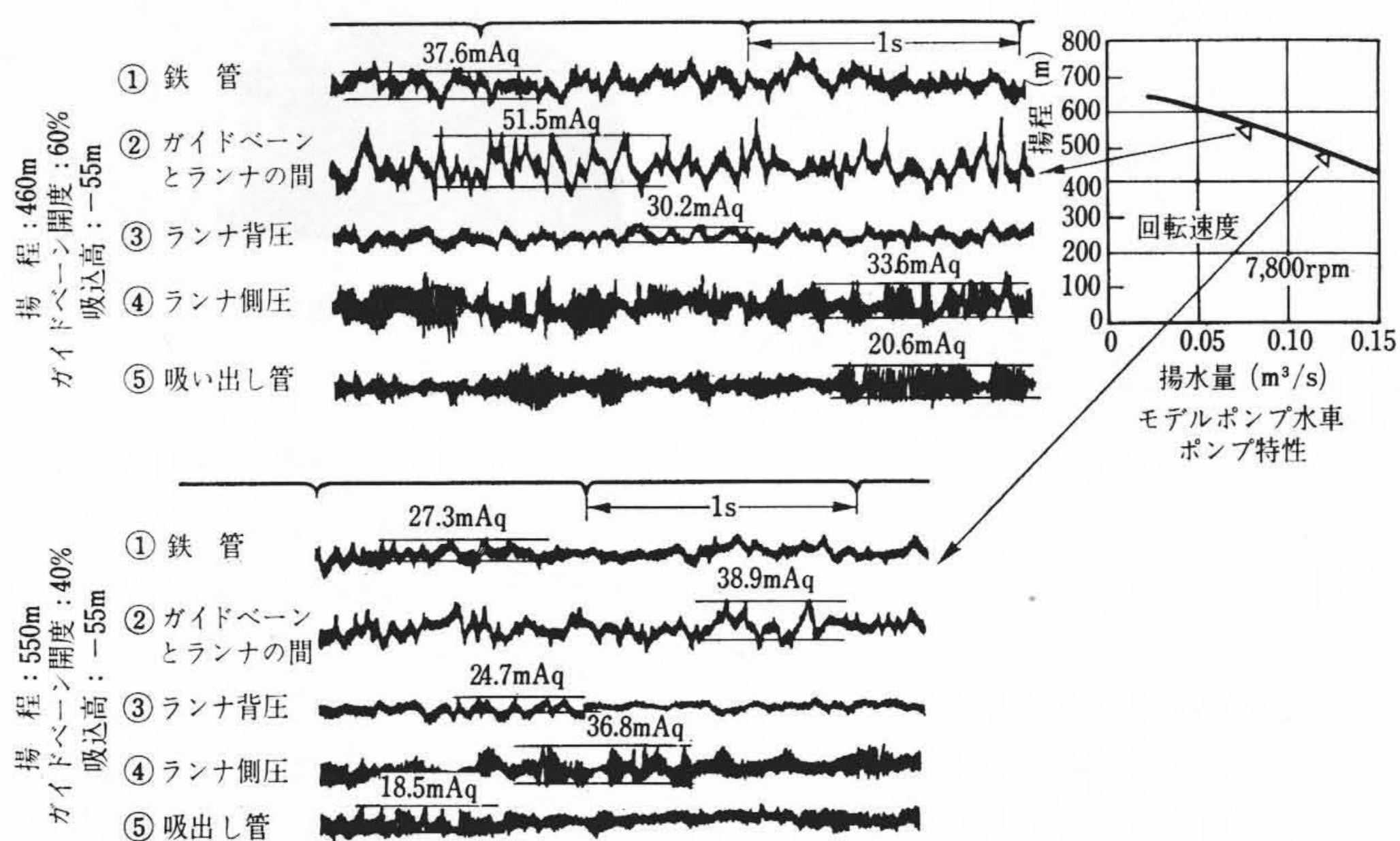


図9 実揚程ポンプ運転中の各部水圧脈動の一例

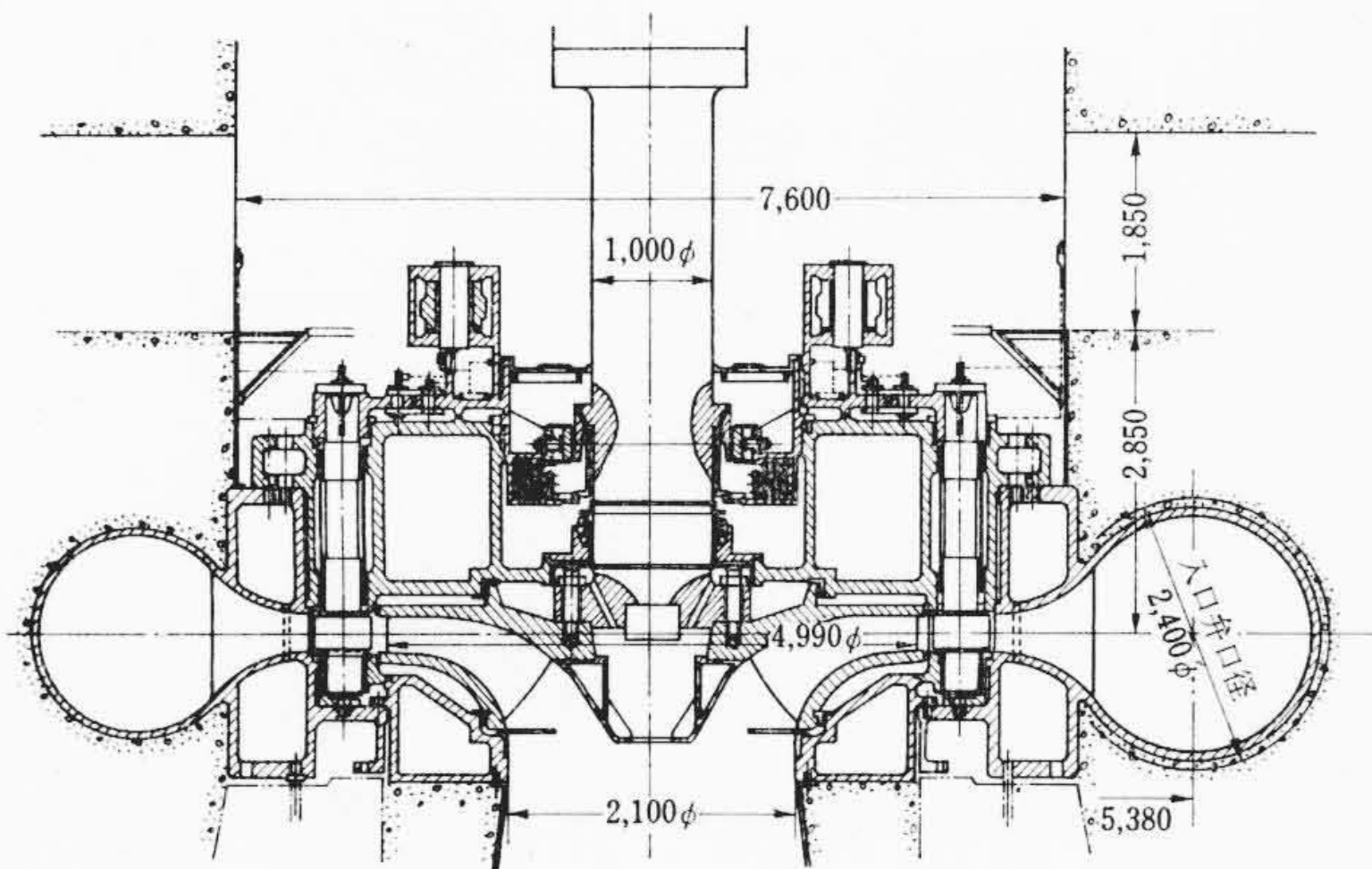


図 11 ポンプ水車概略構造図

を示している。各吸込高さ -40 m から -60 m 程度まで変えた試験の各部水圧振幅の傾向はポンプ運転時ほど大きな変化を示していない。これは吸込高さはやはりポンプ運転状態で決められることを意味し、普通模型キャビテーション試験結果と同じ傾向を示しているものといえる。

3.2 実物ポンプ水車仕様

3.2.1 水車仕様

最大出力	230,000 kW
有効落差	500 m (最高)
	422 m (最低)
最大流量	57.5 m ³ /s
回転速度	375 rpm (時計方向)

3.2.2 ポンプ仕様

最大軸入力	250,000 kW
全揚程	528 m (最高)
	458 m (最低)
揚水量	50 m ³ /s 以下
回転速度	375 rpm (反時計方向)
台数	3 台

3.3 実物ポンプ水車の概要

前述したように模型試験は多岐にわたり詳細に検討され、その結果によって現在設計中である。その内容の一部を述べる。図 11 はポンプ水車の概略構造図を示すものである。

3.3.1 ランナ

ポンプ水車の生命であるランナの最大外径は約 5 m で、13Cr 高 Ni 鋳鋼一体製であり、羽根枚数は 7 枚、製品重量は約 50 t である。輸送は現地までトレーラによって輸送する計画であり、製作においてもランナ呑口幅が小さいため慎重な製作工程を立てて行なうよう計画されている。

3.3.2 ケーシング、スピードリングおよび主弁

ケーシング入口径は 2,400 mmφ で、高抗張力鋼が採用され、構造としては、スピードリングを含めて 6 分割であり、現地において溶接を行なう現地溶接構造が採用されている。なお現地において水圧試験が実施される計画である。主弁はロータリ形であり、鉄管弁がないためこの主弁が鉄管側の水をシャ断する重要な役割を有している。

3.3.3 上下カバー

上カバーは強大な水圧力に耐えるため、その高さも高くじゅうぶんな剛性をもたせたものとし、4 分割としてピット内で分割して分解組立てを行なうものとし、ガイドベーンに接する面には、ポンプ起動時水面押下げの状態での漏水防止用としてパッキンが

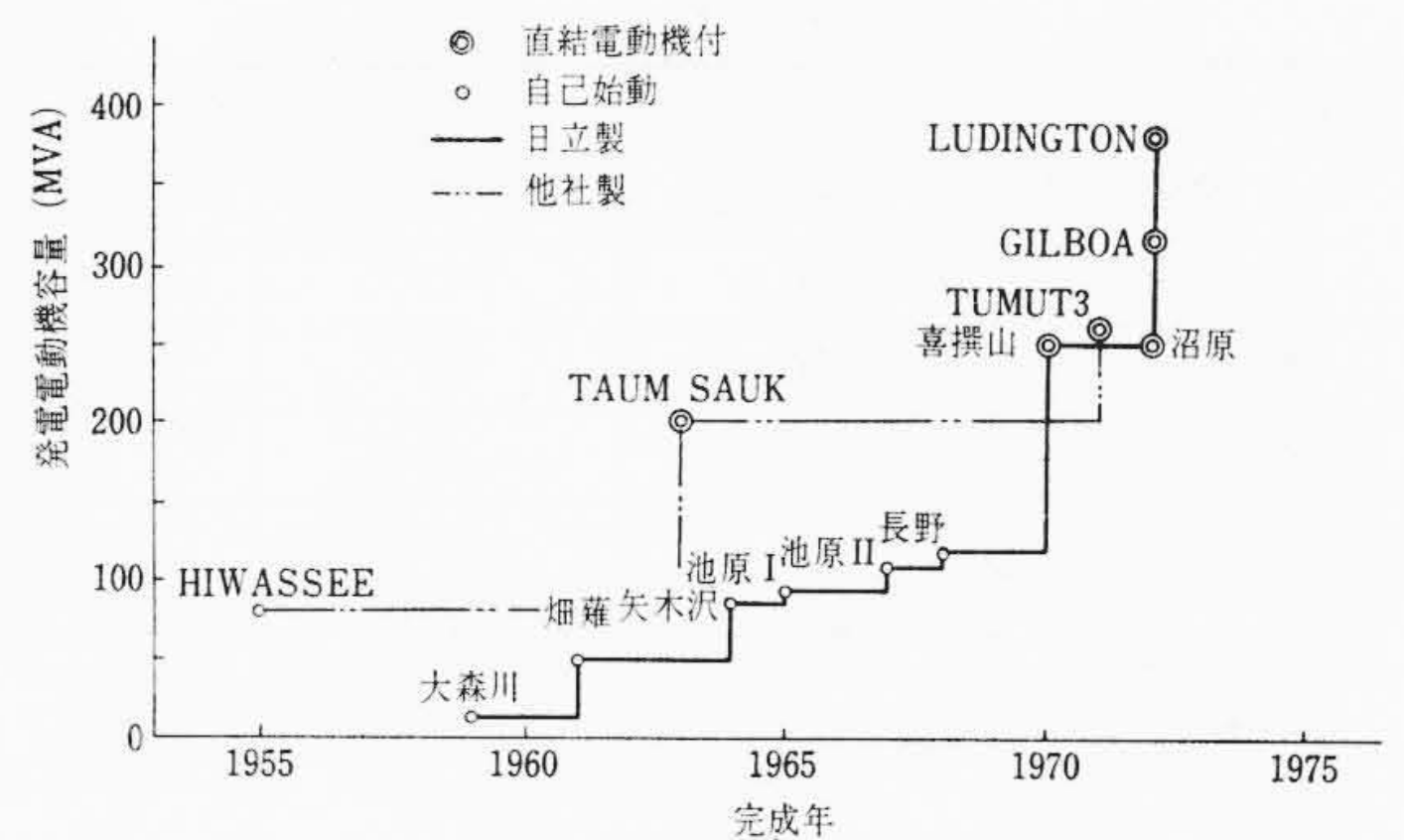


図 12 発電電動機単機容量推移

設けられる。なお、下カバーは 2 分割とし、剛性に対しては特別な考慮を払って鉄筋やコンクリートにてじゅうぶん押えつける構造を採用する予定である。漏水パッキンは下カバーにも設置される。

3.3.4 そのほか補機関係

- (1) 调速機油圧は 50 kg/cm² が採用される。
- (2) 水面押下げ装置は 75 kg/cm² の圧力とし、建屋スペースの点も考慮して決められそれぞれ下記のような仕様である。
コンプレッサ 75 kg/cm² × 5.5 m³/min × 3 台
レシーバ 75 kg/cm² × 4.8 m³ × 6 個
- (3) 主弁は水圧操作方式である。
- (4) 初期ポンプ運転前に鉄管内あるいは上池への充水装置として 20 m³/min × 495 m × 2,200 kW × 1 台が設置される。

4. 発電電動機

揚水発電所の開発ピッチは図 12 にみられるように急しゅんな単機容量の増加をみせており、開発地点の関係から高速化の傾向が顕著である。高速大容量機の開発にあたり解決しなければならない問題として

- (1) 冷却機構の改善
- (2) 高荷重推力軸受の開発とその冷却機構の改善
- (3) 振動
- (4) 高速に耐える回転子の構造
- (5) 始動方式

などがある。

冷却機構としては軸方向鉄心厚さが長くなるために極間入口部風速が高くなり、圧力損失が大きく冷却に必要な風量が得がたくなる。このため他力通風、水素冷却および水冷却方式がクローズアップしてきているが、保守点検および GD² の制限などより他力通風方式が望ましい。

揚水発電所の特質上、ポンプ水車の水圧スラストが通常の発電機に比べて大きくなるので軸受の変形を小さくして油膜形成を容易にし、また発生損失をすみやかに外部に持ち去るように冷却構造の改善が必要である。高速大容量の振動は軸の剛性、案内軸受部の剛性およびこれらの支持部の剛性などを総合的に検討する必要がある。回転子の構造に対しては使用材料強度、輸送制限および振動についても考慮しなければならない。始動方式としては直結電動機始動が最も一般的であるが、設置機器台数が 2 台以上になるときは同期始動も有利な場合がある。以下、電源開発株式会社沼原発電所納め 250 MVA, 375 rpm 機を中心に最近の大容量機について述べる。

4.1 仕様

仕様一覧を表 1 に示す。図 13 は単機容量—速度の関係を示したものである。この図よりわかるように沼原発電所は世界的な高速大

表 1 発電電動機仕様 (いずれも製作中)

仕 様	納入先	沼 原	GILBOA	LUDINGTON
容 量 (MVA/MW)		250/250	320/315	388/388
電 圧 (kV)		16.5	17	20
極 数		16	28	64
周 波 数 (Hz)		50	60	60
回 転 速 度 (rpm)		375	257	112.5
力 率		0.95/1.0	0.9/1.0	0.85/0.85
形 式		準 か さ 形	準 か さ 形	準 か さ 形
台 数		3	4	6

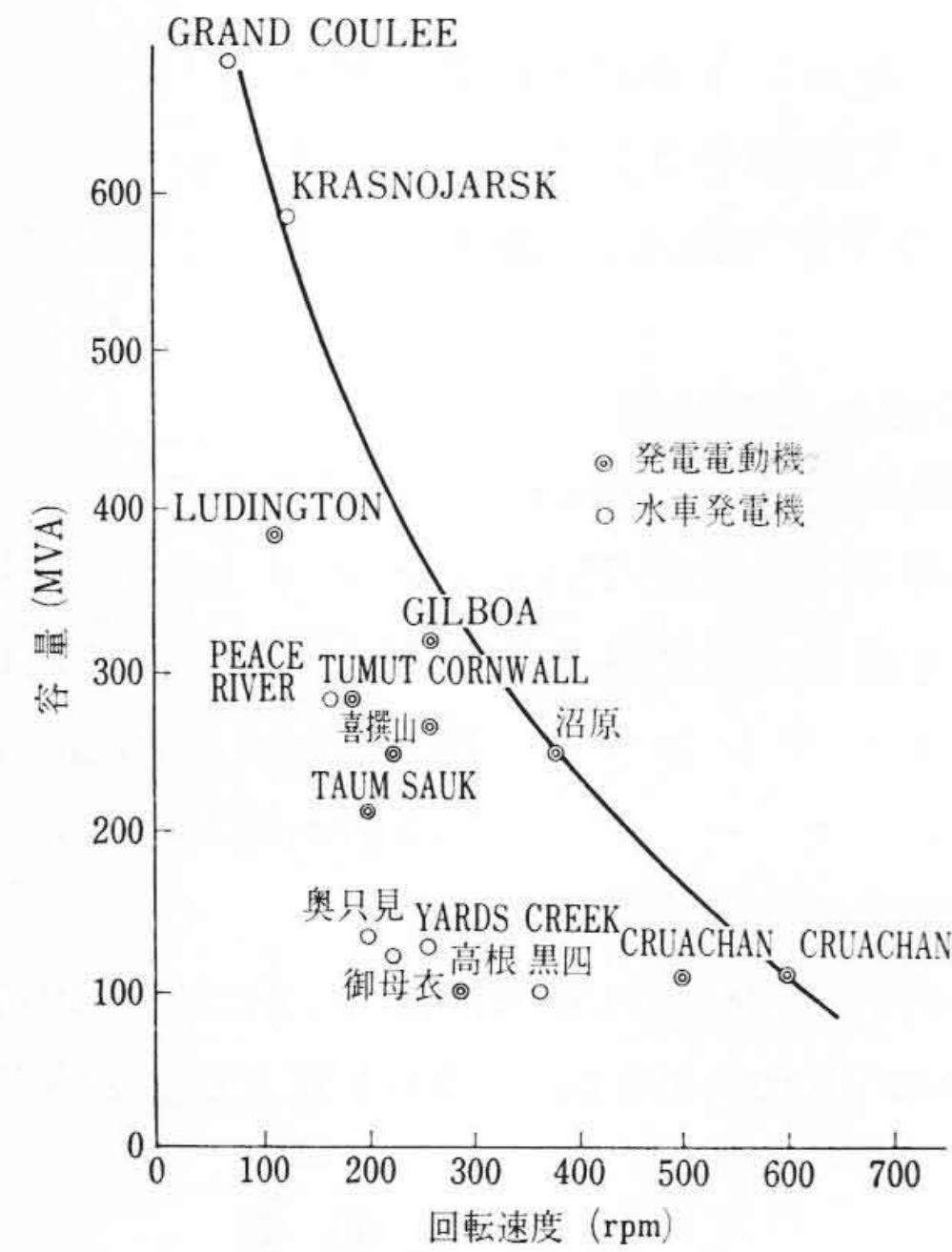


図 13 単機容量-回転速度

容量機で構造上幾つの特長を有している。

4.2 構造上の特長

4.2.1 冷却方式

高速機であるため軸方向鉄心積厚が大きく、従来のように回転子に可逆用ラジアルファンを設けただけではじゅうぶんな通風量が確保できないので回転子にファンを設けず、吸込形の別置軸流送風機による他力通風方式としている。回転子のファン作用に関してはレイノルズ数を合わせた水流モデルによって確認することになっている。別置ファンは回転子のファン作用と直列運転となるため、その動作風量や風圧を適当に選定しておく必要がある。

4.2.2 推力軸受

推力軸受の荷重は、発電電動機の高速度大容量化とともに図 14 に示すように急ピッチで増加の傾向にあり、推力軸受の荷重×回転速度の値も図 15 のように増加しており、軸受の荷重バランスの向上と潤滑特性の改善およびこれの効果的な冷却がぜひ必要である。沼原発電所では、日立製作所独得のピボットスプリング形推力軸受を採用し、荷重バランスとテイルティン効果の向上を図っている。また冷却はセルフポンプ方式で効率の良い外部冷却器でじゅうぶん冷やされた油を軸受シェアー間に送油する構造としてある。回転部のしゅう動面の機械精度の向上と熱変形を少なくするためにベアリングランナを付けない構造である。

4.2.3 防振構造

本機は準かさ形構造で案内軸受が回転子の上下に配置されており、上部案内軸受の上に始動用電動機が直結されている。励磁は別置サイリスタ方式であるので上部には集電環が設けてある。電

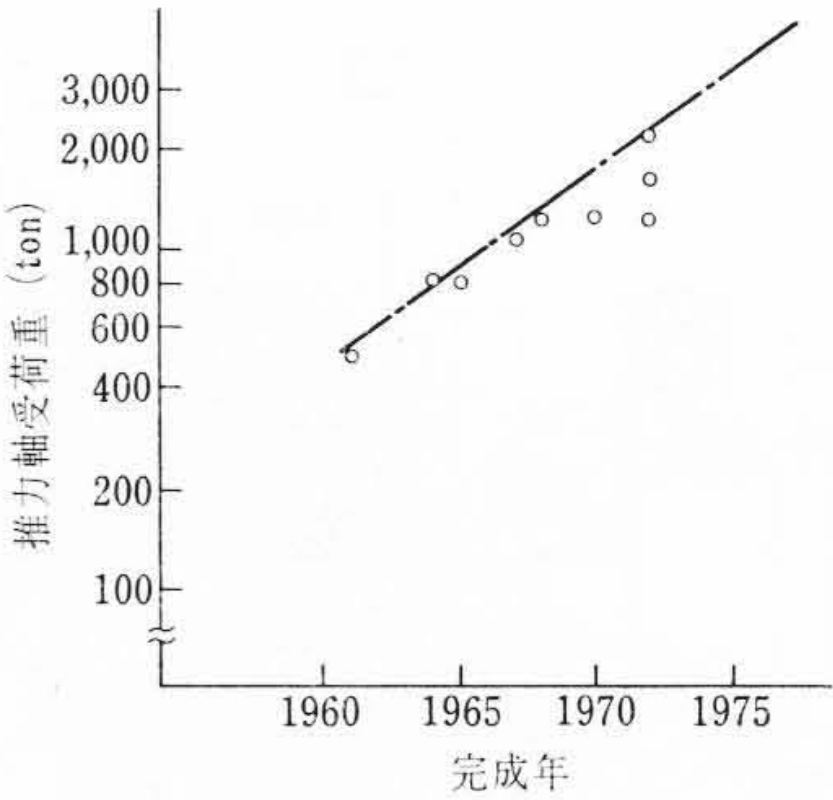


図 14 発電電動機の推力軸受荷重

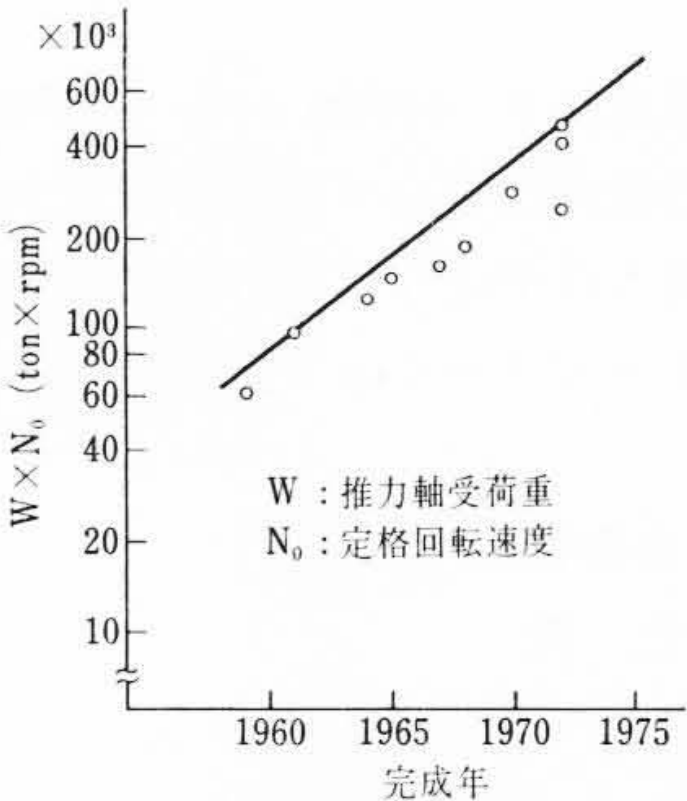


図 15 発電電動機の軸受荷重×回転速度

子計算機による詳細検討結果、上部と下部案内軸受の剛性を従来の機械より相当増加させる必要があるのでブラケットの構造とその防振機構に留意した。

4.2.4 回転子の構造

輸送制限上、回転子リムは積層方式が採用されるが、極数が少ない(たとえば 16 極)ときは、通常の構造では積層リム方式が困難であるため、特殊な積層方式をとることにした。磁極間からの通風のほかに回転子内側からの通風を行なうために回転子リムにはダクトを設けている。

4.2.5 推力軸受用ブラケット

高荷重高速推力軸受であるため発生損失が大きい。冷却水の断水や過速度条件における軸受保護上油槽内の油量を大きくしておく必要があるが、機内スペースがごく限られたものになるため、従来のブラケットの構造ではこれを満足させることができない。このため本機では特殊なトラス構造のブラケットを考案し採用している(特許申請中)。

4.2.6 短絡比

高速機、すなわち磁極数の少ない発電機では毎極あたりの電機子反作用が大きく、回転子コイルで負担すべきアンペアターンが増加し、機器の体格決定上の大きな要素となるので、運転条件上許容される範囲内で小さくすることが望ましい。本機は 0.9 で計画している。

4.2.7 始動方式

沼原発電所は 3 台設置されるが、このうち 2 台は直結電動機始動で、ほかの 1 台は前記 2 台のいずれかによる同期始動方式を採用している。

4.3 高速大容量機の重量

一般に低速機の場合、同一 kVA であれば回転速度を上げれば発電

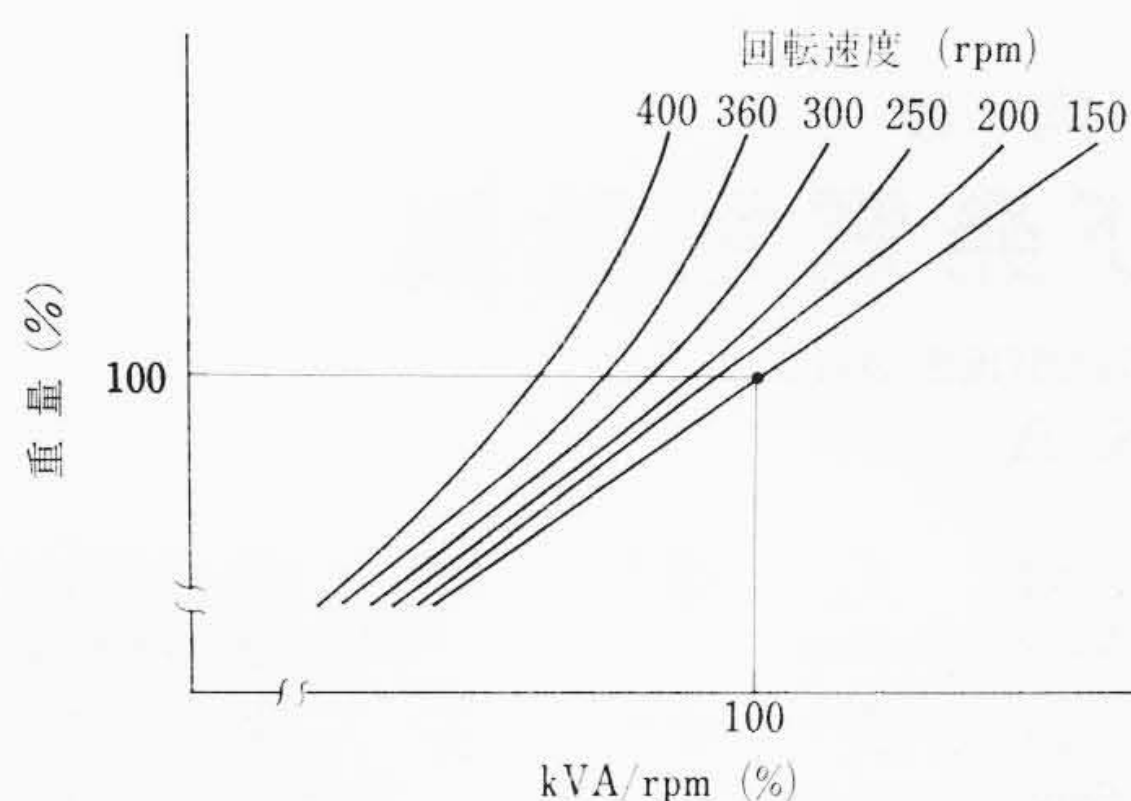


図 16 発電電動機重量

機重量が減少するが、回転速度が高く容量が大きくなると、リミットマシンに近づくので設計製作上の自由度が少なくなり、機器の重量は低速機のように回転速度を上げて減少せず逆に重くなる傾向を示す。この傾向の試算の結果の一例を示したのが図 16 である。電気的特性上必要な $D^2 L_c$ は (kVA/rpm) に比例しており次式で表わされる。

$$D^2 L_c \propto \frac{1}{(B_{ga})(AC)} \cdot \frac{\text{kVA}}{\text{rpm}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 D ：固定子鉄心内径

L_c ：固定子鉄心積厚

B_{ga} ：平均空隙(げき)密度

AC ：アンペアコンダクタ

kVA：定格出力

rpm：定格回転速度

また固定子鉄心積厚 L_c は (1) 式より B_{ga} , AC を一定として

$$L_c \propto \text{kVA} \cdot \text{rpm} / v^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

v ：回転子周速

高速機では各部の遠心力が大きくなるため回転子周速をある値以下に押える必要があり、 v を一定にすると固定子鉄心積厚が $\text{kVA} \times \text{rpm}$ にほぼ比例して増加する。このため通風上の困難が増すうえに、振動の見地より各部の剛性を増す必要があり、重量が増大する

傾向を持つ。また、大きい遠心力に対する各部の応力を許容値以内に収めるためにも重量が増加する傾向を持つ。

一方、一極あたりの磁束量 ϕ は

$$\phi \propto \frac{\text{kVA}}{f \cdot AC \cdot D} \quad \dots\dots\dots (3)$$

f ：定格周波数

で表わされ、回転速度に直接的には関係ないため固定子鉄心重量は kVA/AC にほぼ比例することになり、回転速度を上げて重量は減らず、限界設計に近づく冷却と振動の見地よりむしろ重量が増加する傾向にある。このように高速大容量機ではある限度以上に回転速度を上げるとかえって重量が増加する傾向を示すことになる。

5. 結 言

本稿においては、主として沼原発電所の計画概要と、研究開発の結果について述べ、加えて現在設計中の主機についての一部を述べたが、発電所の主機製作が完了、据付運転開始したあかつきには、さらに詳細な紹介をすることができると考えている。世界最初の 500 m 高落差大容量機の運開は昭和 48 年 5 月であり、あらゆる角度より検討研究を行なって製作される本発電所の運転は世界の注目の的となっており、電力業界に対して今後の発展を促す重要な計画であるため、関係者協力してこれが達成に努力していく所存である。

本発電所の開発に対して、電源開発株式会社の幹部をはじめ、関係者各位の有益な指針とご指導を仰いだことに対し感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 桑原進：高落差大容量揚水発電所用機器について 電気学会 1969 年 10 月
- (2) 田高稔康, 岩崎暁：世界最高落差に似む沼原発電所計画の概要 オーム 1969 年 4 月号
- (3) 外岡英徳, 西政隆, 北野豊：1 段 500 m 級高落差大容量ポンプ水車および高速大容量発電電動機の開発 電気評論 1969 年 10 月号
- (4) 長沼進, 井上久男：飛躍する揚水発電用ポンプ水車の技術的焦点