

東北電力株式会社

沼沢沼揚水発電所用 21,000kW ポンプの
現地試験に就いて

阿部元志* 寺前博**

The Results of Field Test of the 21,000 kW Pumps for the Numazawa-numa
Pumped Storage Power Station, Tohoku Electric Power Co.By Motoshi Abe
Tohoku Electric Power Co.,
Hiroshi Teramae
Kameari Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

As reported in previous issues, the Numazawa-numa Pumped Storage Power Station has started in commercial operation late in last year, and continued in satisfactory service for over one year.

Recently, the writers have carried out a field test which yielded the following results:

- (1) The pumps in commercial operation have satisfied the rated specifications concerning total head, quantity and power requirement, providing a good efficiency.
- (2) The maximum pressure rise in delivery pipe due to water hammering caused by sudden power failure, never exceeded 30% of normal running pressure.
- (3) The pumps are maintained in satisfactory condition for operation against cavitation.

〔I〕 緒 言

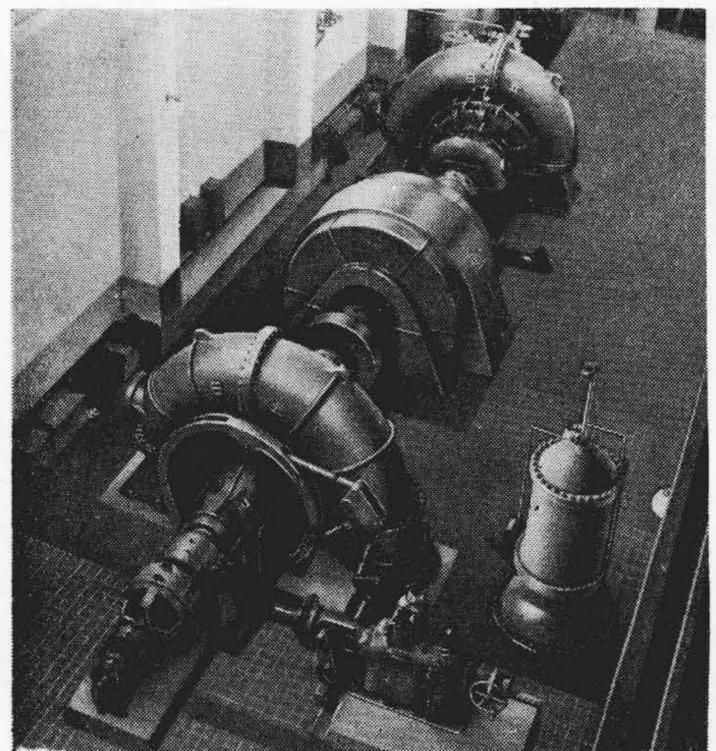
我国電源の宝庫只見川筋に昭和24年春着工以来、世界でも屈指の大規模なものとして注目を浴びていた沼沢沼揚水発電所は東北電力株式会社並びに日立製作所の総合技術の妙を發揮して完成され、昨昭和27年11月監督官庁の検査官による官庁試験を恙なく終了して、営業運転に入った。本年の春の豊水期に沼沢沼に揚水し、今や満々たる水を湛えて渇水期の電力不足に備えている。

本発電所の水車、発電機、ポンプ並びに附属設備等に就いては本誌その他に既に報告^{(1)~(8)}され、又ポンプのキャビテーション及びウォーターハンマ等の研究に就いても既に発表されている^{(9)~(12)}。

本文に於ては本ポンプの現地試験と半箇年の使用実績に就いて紹介せんとするものである。

* 東北電力株式会社

** 日立製作所亀有工場



第1図 沼沢沼揚水発電所の水車並びにポンプの外観
Fig. 1. Pump and Water Turbine Installed in Numazawa-numa Pumped Storage Power Station

第 1 表 沼沢沼揚水発電所用ポンプの仕様概要

Table 1. Specifications of Pumps for Numazawa-numa Pumped Storage Power Station

型式 横軸複吸込 2 段タービンポンプ

	総揚程 (m)	揚水量 (m ³ /sec)	所要動力 (kW)
最高揚程	226.2	6.95	19,000
基準揚程	211.0	7.90	20,000
最低揚程	194.8	8.85	21,000

回転数 500 r.p.m.

〔II〕 仕様の概要

沼沢沼揚水発電所は福島県大沼郡沼沢村に設置され、豊水期又は出水時に只見川の水を約 220 m の高地にある沼沢沼に汲み上げ、渇水期又はピーク負荷時の補給電力を発電する目的で計画されたものである。第 1 図に示すように手前から水車、発電機及びポンプが一軸上に横に直結されている。発電時には通常ポンプを切り放して運転する。揚水時には水車を連結したまゝで運転し、圧縮空気により水車内部の水を排除して空転する。ポンプの原動機としては発電機をそのまま同期電動機として用い、起動時は水車で運転し、同期速度に達してから電動機に負荷を移すのである。

制御方式は順序制御器による「一人制御方式」を採用

して、運転操作の簡単且つ確実を計っている⁽³⁾。

本ポンプの仕様点は第 1 表の如くで、3 点が与えられている。

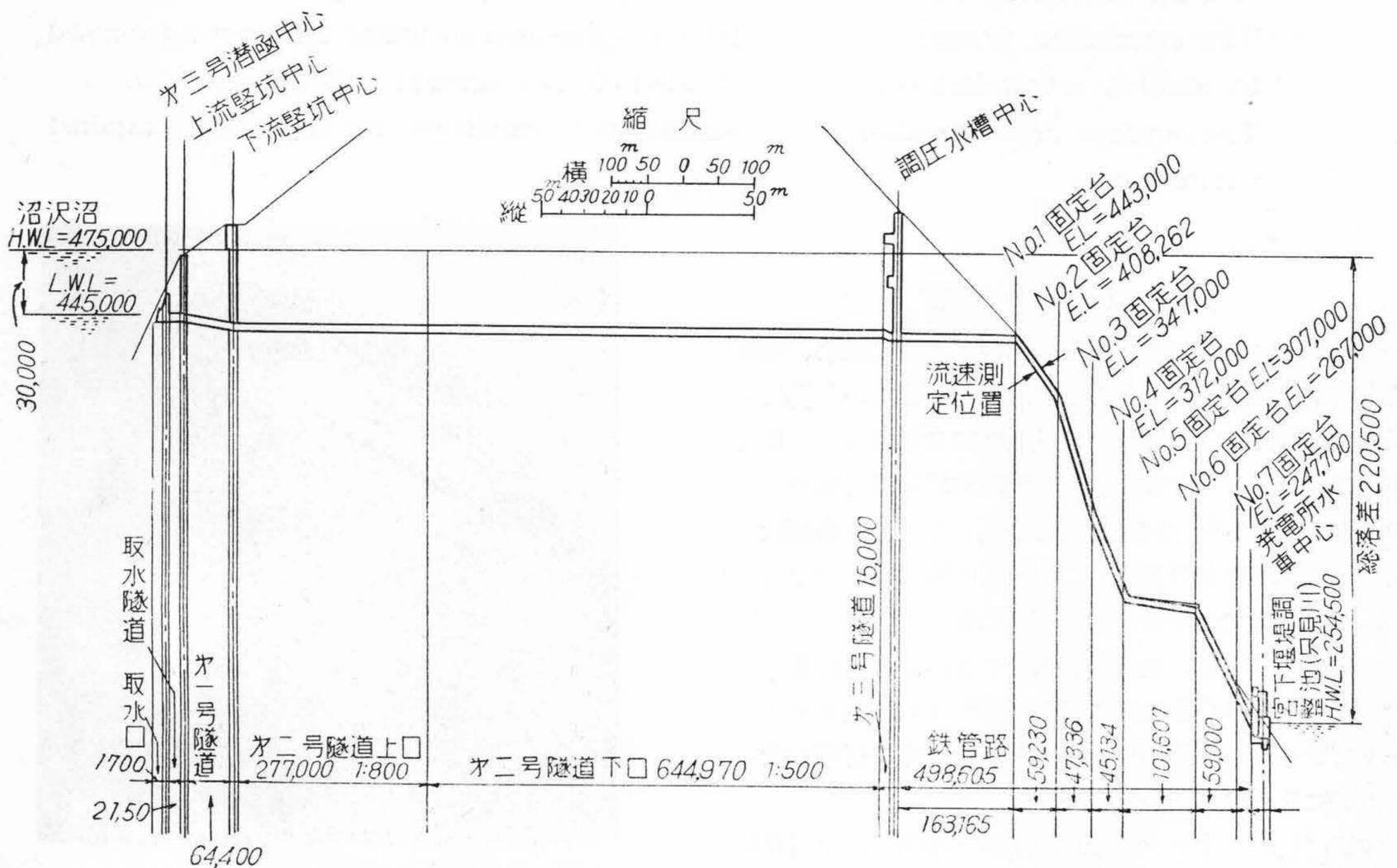
本発電所には 2 組の水車、発電機及びポンプが設置されている。その構造の詳細に就いては既説の他の文献を参照されたい^{(1)~(8)}。

〔III〕 ポンプの性能試験

性能試験は昨秋実施した。性能試験は吐出弁（ニードル弁）の開度を種々変えて、その時の吐出圧力、吸込圧力、水量、回転数、電動機入力等を計測して行つた。これらの測定値から総揚程、軸動力、ポンプ効率等を算出して、その性能曲線を求めた。

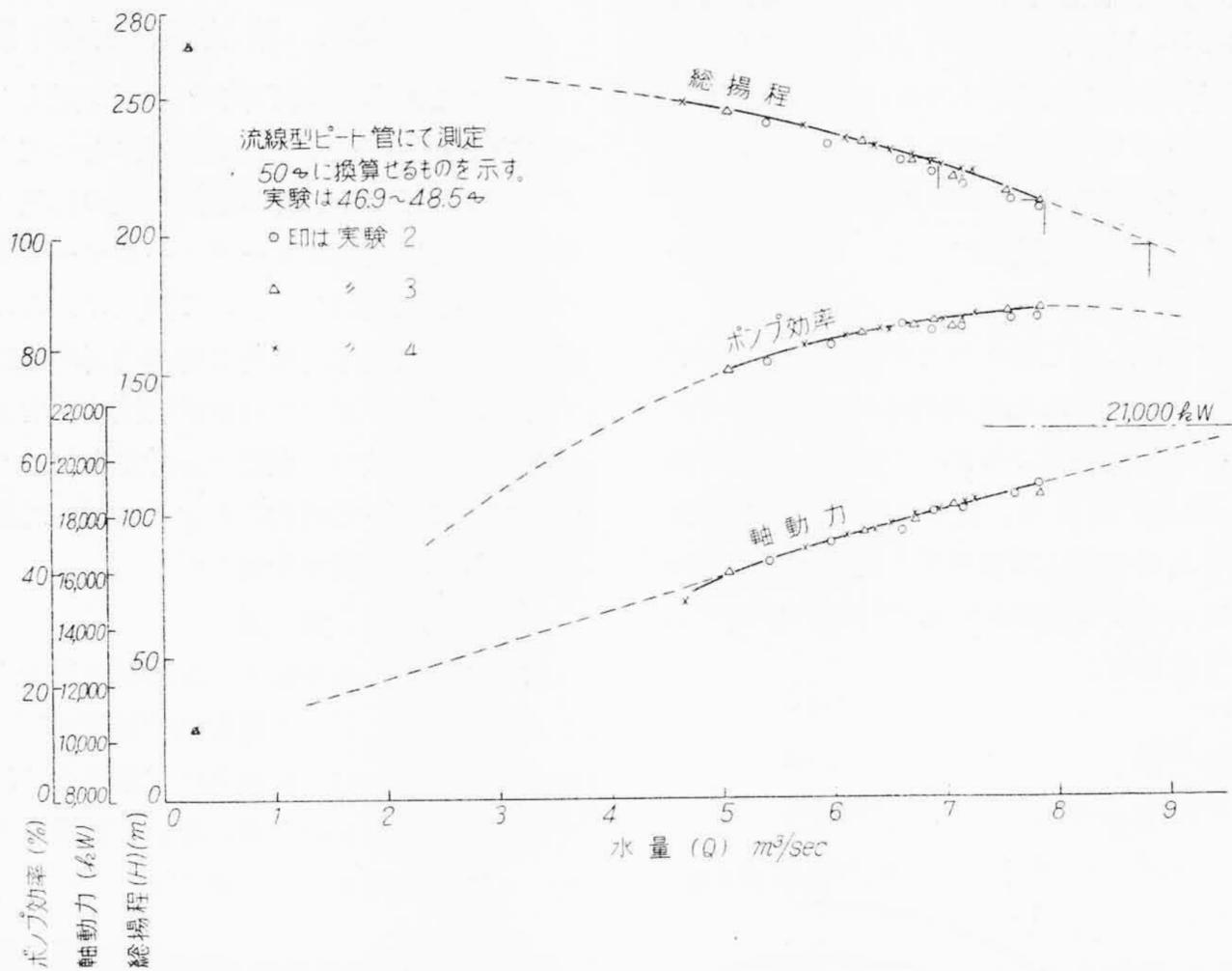
(1) 水量測定法

従来水力発電所の水車のように大きな水量の測定に就いては塩水速度法、ギブソン法、ピトー管法、ベルマウス法等色々な方法が行われており、その場所に即応した方法が使われて来ている。しかし何れも一長一短あり、実際の水量の絶対値は仲々把握し難い現状である。今回の沼沢沼発電所のポンプの揚水量の測定は東北大学沼知教授の研究試作された流線型ピトー管で同教授等の手に依つて行われた⁽¹³⁾。このピトー管を第 2 図の水路縦断面図中に示すように水圧鉄管上部の鉄管弁の下流で管路の直線部の略々中央に設置した。



第 2 図 水路縦断面図

Fig. 2. Sketch of Longitudinal Section of Water Channel



第3図 No. 1. ポンプの特性曲線
 Fig. 3. Characteristic Curves of No. 1 Pump Installed in Numazawa-numa Pumped Storage Power Plant

第2表 電動機の効率
 Table 2 Efficiency of Motor

負荷 (%)	83.5	81.2	80.0	78.5	70.0
周波数 (Hz)	48	48	48	48	48
効率 (%)	97.96	97.93	97.88	97.85	97.68

第1号ポンプでは流線型ピトー管を用いて揚水量を測定したが、第2号ポンプの揚水量は比較のため東北電力株式会社備付のHK式ピトー管によつて略々同じ地点にて測定した。

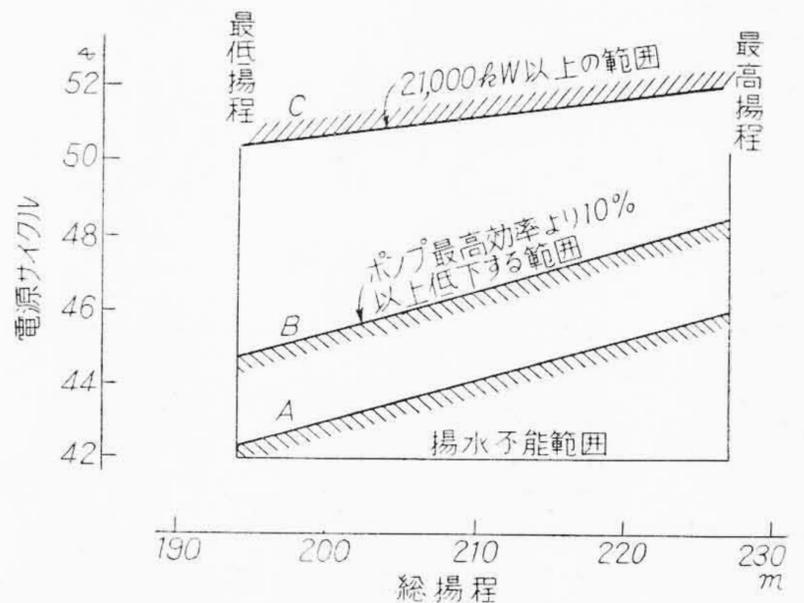
(2) 試験結果

流線型ピトー管で水量を測定した第1号ポンプの特性曲線は第3図の通りであつた。試験当日の電源は46.9~48.5Hzであつたのを50Hzに換算して示してある。電動機の効率は工場試験時のデータを基にして今回の試験条件のものに各損失を算出して求めたものである。第2表にその一部を示してある。

(3) 試験結果の検討

第3図から判るように流線型ピトー管で厳密正確に測つた水量より求めたポンプの最高効率は86.0%であつた。HK型ピトー管で第2号ポンプの揚水量を求めた場合の最高効率も86%弱で略々同値であつた。

又第3図から判るように所期の3仕様点は略々完全に満足している。



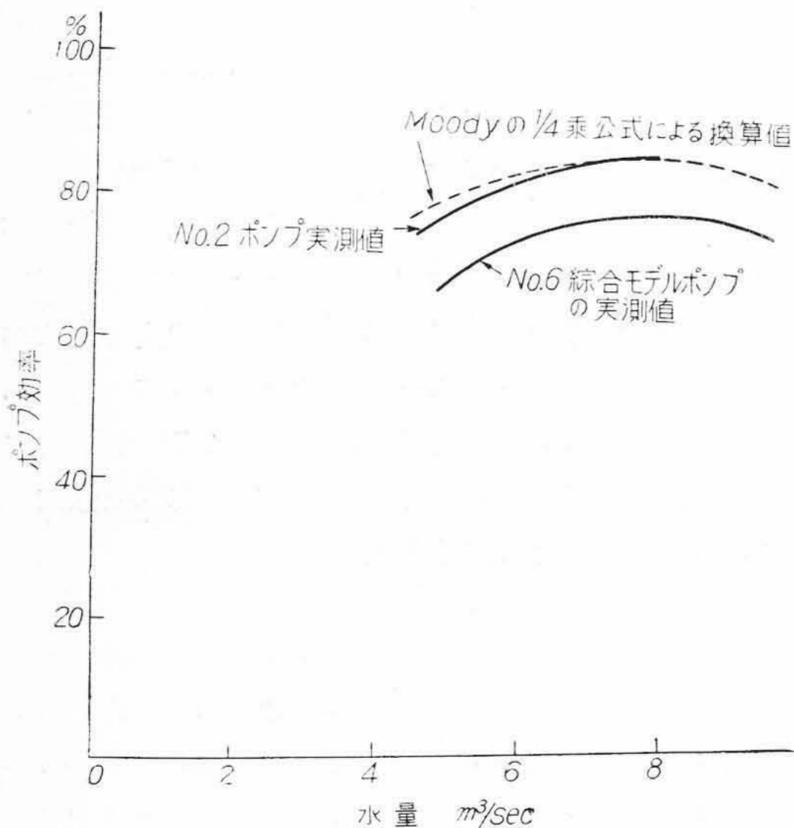
第4図 ポンプの運転可能範囲
 Fig. 4. Economical Running Range of Pump

次に又所要動力も定格の21,000 kWを超えていない。以上で本ポンプは完全に仕様を満足していることが確認された。

電源サイクルが我国の電力事情では異常に低下することがあるので、安全に運転出来る限度を第3図の特性曲線より求めて見ると第4図のようになる。横軸に総揚程を採り、縦軸に電源サイクルを採つてある。A線より以下の範囲のサイクルでは揚水不可能である。ポンプ効率が最高効率より10%以上低い値に低下すると経済的に見て一応不利と考えるとB線以下のサイクルでの揚水運

転は不経済となる。最低総揚程にては 45 \sim まで、最高総揚程にては 48.5 \sim 以下に電源サイクルが低下した場合はポンプの運転は不利になることを示している。又C線はポンプ軸動力が 21,000 kW になる状態を示している。この同期電動機の定格が 21,000 kW であるからこのC線以上のサイクルでは過負荷になることを示している。

日立製作所亀有工場に於て第 6 号モデルポンプ (モデル比 1/5.88) によつて得られた最高効率は 77.3% であつた。Moody の 1/4 乗公式でモデルの効率を実物の効率へ換算すると 85.3% となる。従つて実測値の 86.0% に略々近い。部分負荷の時は水車の例と同様に Moody の 1/4 乗公式ではかなりの誤差がある⁽¹⁴⁾。これを図で示すと第 5 図のようになる。



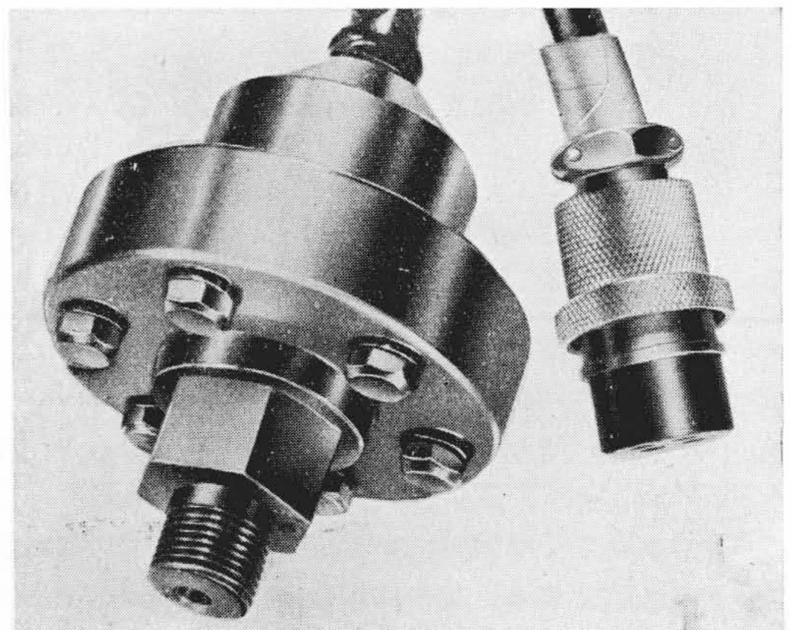
第 5 図 ポンプ効率
Fig. 5. Pump Efficiency

〔IV〕 動力遮断試験

ポンプで揚水中に何等かの原因で動力が遮断された場合は吐出弁(ニードル弁)は油圧によつて自動的に閉じるようになってゐる。弁の閉鎖速度の如何によつては吐出管路に激しい所謂ウォーターハンマー現象を起し、管路の破裂する危険がある。この防止のための弁の閉じ方に就いては日立製作所亀有工場水力研究室にてモデルポンプを用いてこのポンプの全般特性曲線を求め、Peabody の計算方式に倣つて厳密なる計算を行つた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この計算結果に基いて実物のポンプに就いて動力遮断試験の安全を期して試験を実施した。

(1) 試験方法

ポンプにて揚水運転中に保護継電器を人為的に作動せしめて、それによつて電動機の電源を切つて遮断試験を行つた。吐出弁が一定速度にて閉鎖する場合と二段速度で閉鎖する場合との両者に就いて試験を行つた。前者に就いての実験結果は既に報告されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

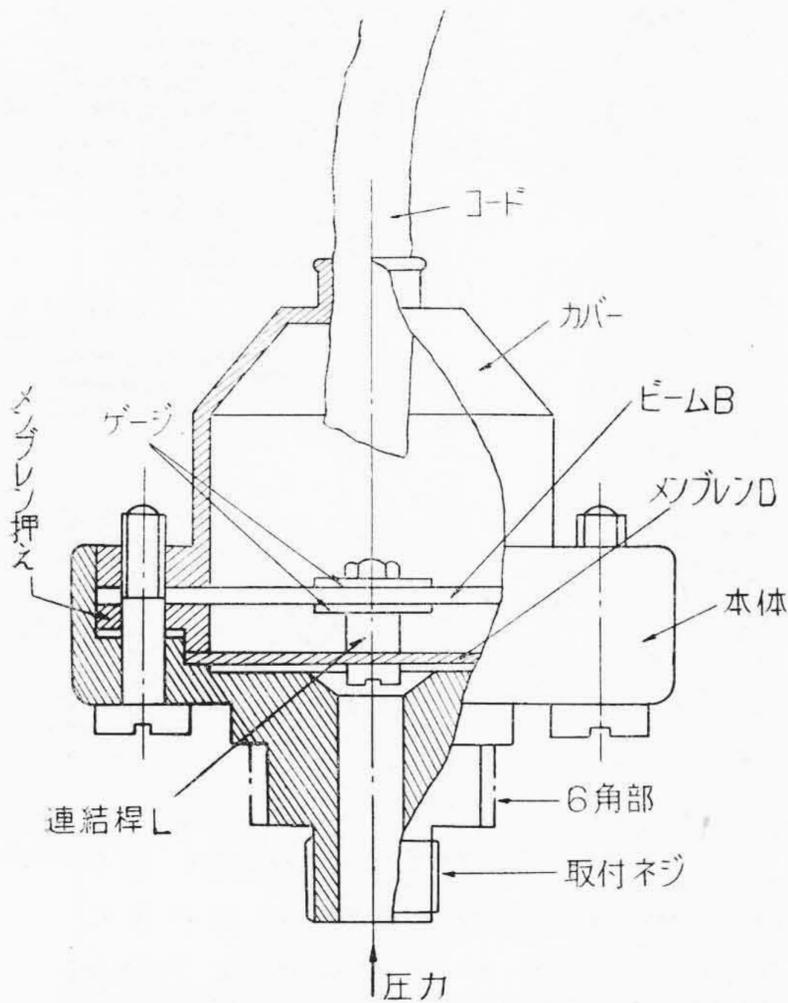


第 6 図 圧力計
Fig. 6. Pressure Cell

第 3 表 電力遮断試験のオッシログラフ測定に使用した機器
Table 3. Apparatus Used in Taking Oscillograph of Power Breaking Test

測定項目	測定機器	オッシログラム上の附号	測定箇所
ポンプ軸回転数	D.C. 発電機	N	ポンプ軸からベルト掛にて駆動
吐出鉄管内の水圧	抵抗線歪計式圧力計	P	吐出鉄管
ニードル弁のストローク	抵抗線摺動式	S	ニードル弁の主軸端
ニードル弁 { 背圧側油圧 油圧ピストン { 圧力側油圧	抵抗線歪計式圧力計	P ₀	ニードル弁の油圧ピストンのシリンダ壁
	抵抗線歪計式圧力計	P _b	ニードル弁の油圧ピストンのシリンダ壁
騒音	OSA 指示騒音計	Noise	ポンプの反カップリング側から 1m 離れた点
電流	C.T.	M	電動機の導線から (電力遮断時を示す)
ポンプ回転マーク	永久磁石法	R	ポンプの軸端のキーの直上に設置す

電磁オッシログラフ: 八要素用オッシログラフ (三栄測器製)
抵抗線歪計: 共和無線製 DPM-3B



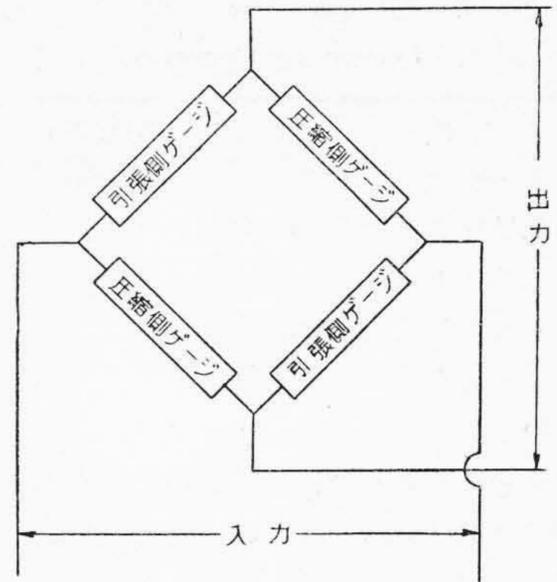
第7図 圧力計の構造説明図
Fig. 7. Construction of Pressure Cell

ウォーターハンマの過渡現象の観測には電磁オシログラフを使用した。

(2) 測定方法

オシログラフで測定するに当つて使用した機器は第3表に一覧表で示してある。表中にある圧力測定の抵抗線歪計式圧力計とは今回の試験に当つて日立製作所亀有工場にて特に試作したものである。

この圧力計の外観は第6図の如くでその内部構造は第7図に示す。第7図にて周囲をケースに固定した円形受圧板Dと両端がケースに固定され中央に歪計ケー

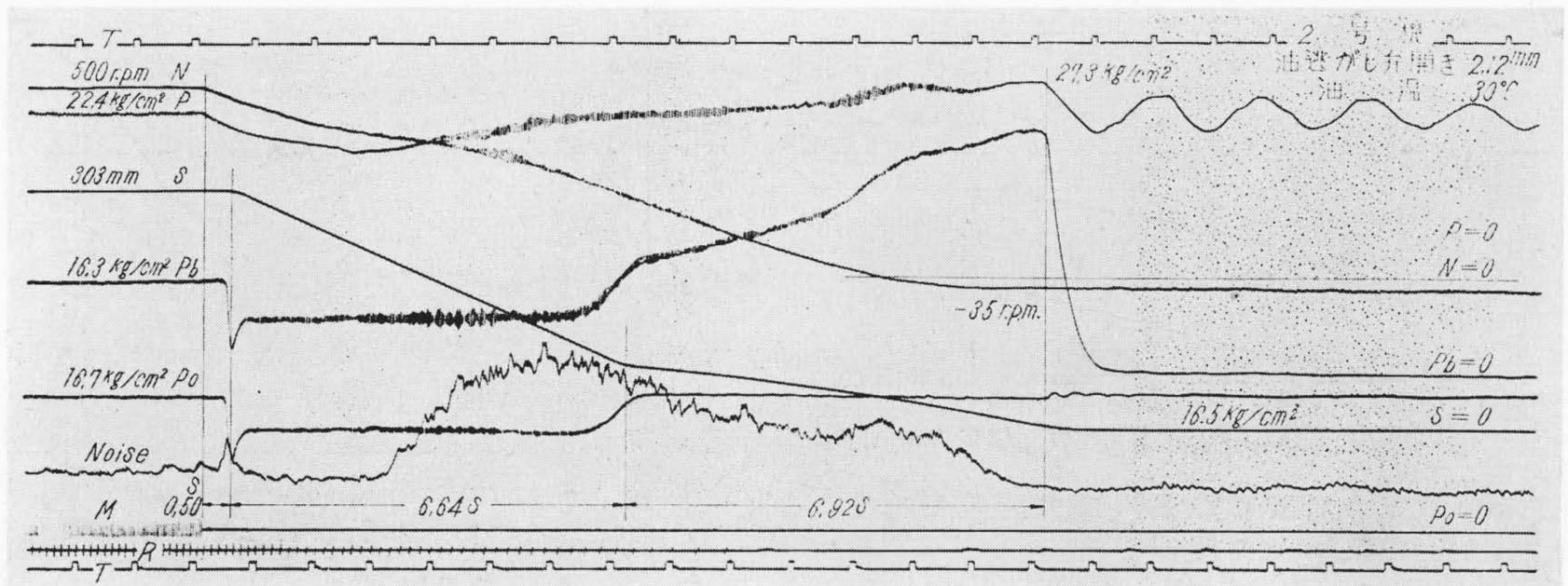


第8図 ブリッジ
Fig. 8. Bridge

を接着したビームB及び受圧板中心の変位をビームに伝えるためのロッドLとから成立っている。即ちロッドLは受圧板Dの中心とビームBの中心を連結し、測定圧に比例してビームの中心を押し上げ、ビームはそのため曲げ歪を受ける。これに接着されたゲージの電気抵抗は圧力に比例して変化する。ゲージは第8図に示すようにブリッジにして出力を増幅してオシログラフに入れている。ビームの材質は Ni-Cr 鋼を使用し、受圧板は磷青銅である。この圧力計の繰返し精度及びヒステリシスは最大目盛(この場合 40 kg/cm^2)で $\pm 0.3\%$ 以内であり、又直線性は $\pm 0.5\%$ 以内であつた。固有振動数は $4,000 \sim 5,000 \text{ sec}$ 程度であつた。

(3) 測定結果

動力が遮断されて吐出弁が二段速度で自動的に閉鎖される場合のオシログラムの一例を第9図に示してある。第9図のオシログラムの測定時の運転の主要条件は第4表(次頁参照)の通りである。この時第2号ポンプのみを遮断し、第1号のポンプは揚水運転を続けてい



第9図 動力遮断時のオシログラム
Fig. 9. Oscillogram at Sudden Power Failure

第 4 表 運 転 条 件
Table 4. Operating Condition

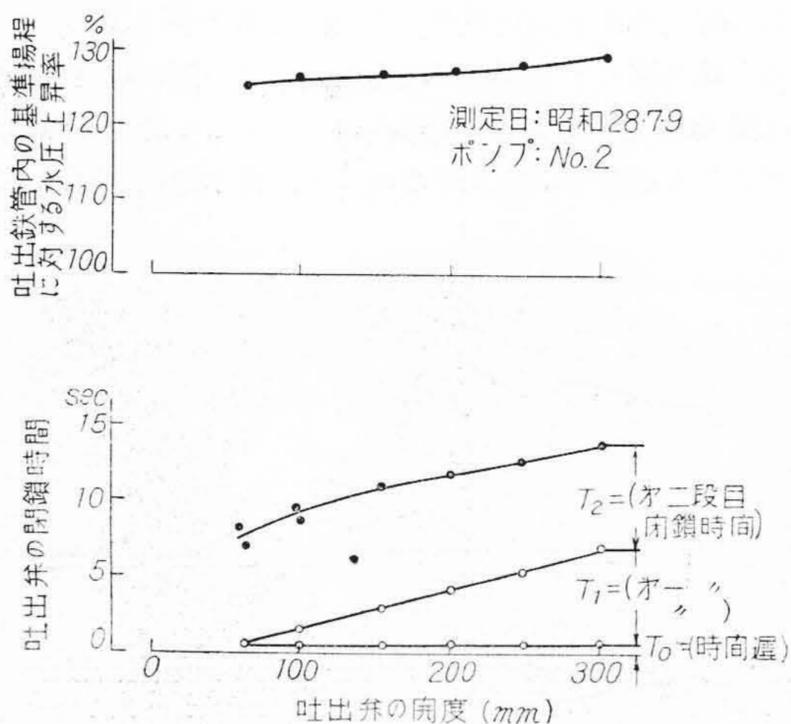
沼 沢 沼 水 位 (m)	470.005
只 見 川 水 位 (m)	254.200
ポ ン プ 吸 込 圧 力 (kg/cm ²)	0.350
サ イ ク ル (sec)	50.0
ニ ー ド ル 弁 の 開 度 (mm)	303

る場合である。

このオッシログラムから吐出圧力Pは運転中 22.4 kg/cm² であつたのが、電力遮断後 14.06 sec で吐出弁は閉鎖してウォーターハンマ現象によつて最高圧力は 27.3 kg/cm² に到達する。従つて、圧力上昇は 22% である。電力遮断後 11.30 sec でポンプ軸は正転から逆転に移るが、逆転の最大回転数は 35 r.p.m. であるに過ぎない。

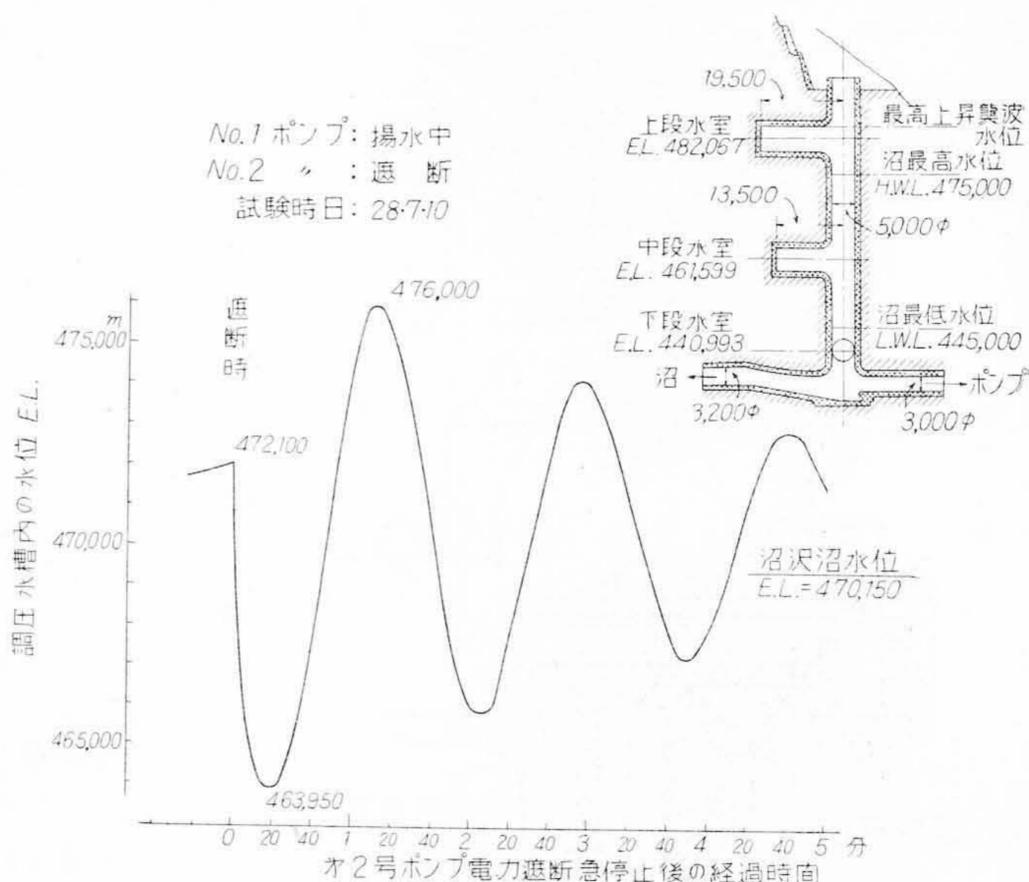
吐出弁の開度を種々変えた時の吐出管内の水圧上昇率及び吐出弁の閉鎖時間の関係は第 10 図に示すようになった。吐出弁の如何なる開度の時に当つても電力遮断時のウォーターハンマ現象による最大圧力上昇率は基準揚程に対して 30% 以内で計算値と略々一致することが認められ、且つ全く安心して運転出来ることが認められた訳である。

尚遮断試験時に於ける調圧水槽 (第 2 図参照) の水面の変動はその一例を第 11 図に示すような経過をとつてい



第 10 図 電力遮断時の最大圧力上昇と吐出弁開度との関係

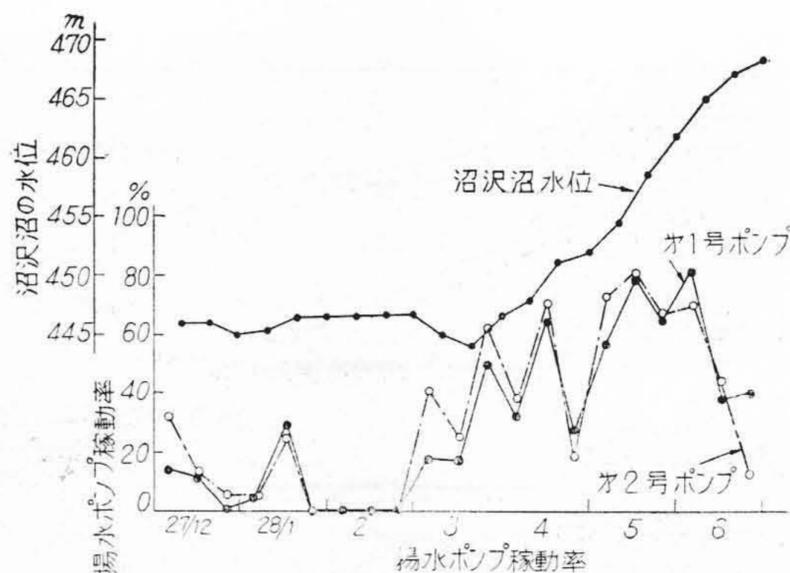
Fig. 10. Relation between Maximum Pressure Rise and Opening of Needle Valve at Sudden Power Failure



第 11 図 電力遮断時の調整水槽内の水位の変化
Fig. 11. Oscillation of Water Level at Surge Tank at Sudden Power Failure

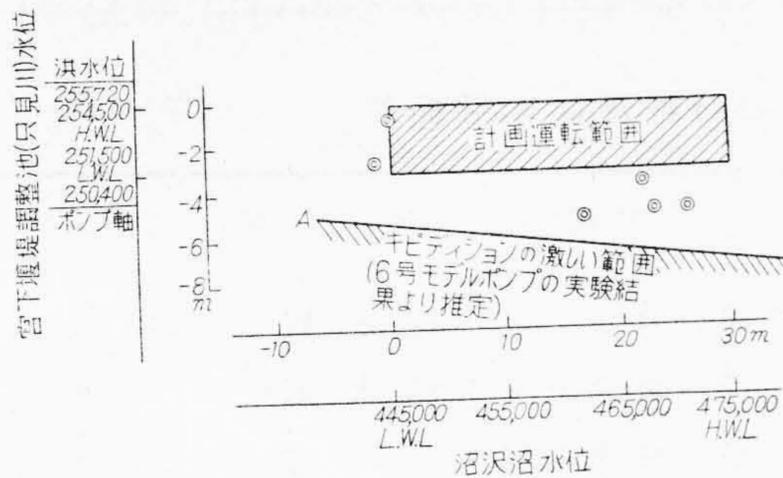
〔V〕 使用実績

本ポンプは所期の性能を有し、且つ安全確実に運転出来ることは前記の諸試験から明らかになつた。27年11月官庁の立会試験終了後直ちに営業運転を開始した。約半箇年の使用実績を図示すると第 12 図のようになる。横軸に年月の旬間を採り縦軸に沼沢沼の水位 (海拔) と揚水ポンプ箇々の稼働率を採つてある (稼働率とは旬間の総時間に対する運転時間の比率である)。27年12月上旬より28年1月中旬までは既に渇水期ではあつたが、非尖頭時の夜半に揚水し、夕方の尖頭時に発電運転するのに活



第 12 図 揚水ポンプの各旬間の稼働率と沼沢沼水位の変化

Fig. 12. Running Rate and Water Level of Numazawa-numa Lake



第13図 実物ポンプのキャビテーション安全度確認運転結果 (昭和28年1月~7月間の運転日誌)
Fig. 13. Test Result of Cavitation-Free Range of Pump

躍したのである。3月上旬より豊水期に入ると共に連続揚水運転を開始し、沼の水位が急速に上昇した。ポンプ1台で1hrに沼の水位は略々1cm程上る。

本ポンプのキャビテーションに就いては、日立製作所亀有工場内のモデル実験によつて、計画仕様範囲では安全なることが確認されていることは既に報告されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

半箇年間の運転期間中異常に只見川の水位を下流の堰堤によつて低下させて運転したことが数次に亘つてある。それらの諸点を打点すると第13図のようになる。図にて横軸に沼沢沼の水位をとり、縦軸に只見川の水位を採つてある。斜線の四角の範囲は計画運転範囲である。A直線より下方の範囲はモデルポンプの実験結果より推定したキャビテーションの激しくなる範囲である。この図から H.W.L. より測つて -5m までの範囲までは著しいキャビテーション現象なしに運転出来ることが確認されている。

〔VI〕 結 言

東北電力株式会社と日立製作所がその技術の総力を結集して完成した沼沢沼揚水発電所は昨秋より揚水運転が行われ、今や沼沢沼に揚水し満々たる水を湛えるに至り、冬の渇水期の電力不足に備えている。この揚水ポンプに就いては日立製作所亀有工場にてモデルポンプを用いて各種の研究が行われたが、現地にてこれ又各種の試験を実施した。この両者を比較することが出来た。この試験結果から次の事が結論としていいうる。

(1) H-Q 曲線は仕様の3点を略々完全に通り、予期

の成績を収め又所要動力にも余裕のあることが判つた。

(第3図)

(2) 最大効率モデルポンプの効率から Moody の 1/4 乗公式で換算して略々一致することが判つた。

(第5図)

(3) 動力遮断試験を実施して、ウォーターハンマによる最大圧力上昇率は 130% 以下にあることが確められた。

(第10図)

(4) サイクルが低下した時の運転可能範囲を推定することが出来た。

(第4図)

(5) 吐出弁の閉鎖速度を二段速度に調整した時は動力遮断時に逆転を最小限に留めることが出来ることが確認された。

(第9図)

(6) 規定の運転範囲は勿論、それより更に約 2m 大きい吸込高さの所 (即ち只見川の水位のかなり低い所) まで著しいキャビテーションなしに運転出来ることが確められた。

(第13図)

本現地試験を遂行するに当り終始変らぬ御協力を得た東北電力株式会社の関係各位及び日立製作所の関係各位に深甚なる謝意を表す。

尚性能試験の最大難点の水量測定には東北大学沼知教授を始め高速力学研究所の各位が流線型ピトー管を短時日の間に試作研究され、且つ測定に当られたことに対しては厚く御礼申上げる次第である

参 考 文 献

- (1) 清野、戸田、北見、早川：日立評論 33 9 p. 799~803 (昭 26-9)
- (2) 深栖、鮎沢、菊池、長尾：日立評論 34 5 p. 637~648 (昭 27-5)
- (3) 森井：日立評論 34 5 p. 649~654 (昭 27-5)
- (4) 館内：日立評論 35 4 p. 627~632 (昭 28-4)
- (5) 本多：日立評論 35 4 p. 633~639 (昭 28-4)
- (6) 白川：電力 37 1 p. 15~24 (昭 28-1)
- (7) 阿部：電気学会誌 73 779 p. 824 (昭 28-8)
- (8) 本多：電力 37 8 p. 643 (昭 28-8)
- (9) 横山：日立評論 35 5 p. 785~792 (昭 28-5)
- (10) 横山：日本機械学会誌 56 412 p. 332 (昭 28-5)
- (11) 小堀：日立評論 35 6 p. 919~928 (昭 28-6)
- (12) 小堀：日本機械学会誌 56 413 p. 479 (昭 28-6)
- (13) 沼知、安部、その他：日本機械学会第 30 定期総講演会にて講演 (昭 28-4-4)
- (14) 山崎：日立評論 29 5 p. 129~133 (昭 22-12)

特 許 月 報

最近登録された日立製作所の特許及び実用新案

(その2)

(第30頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	工場別	氏 名	登録年月日
実用新案	405943	車 輛 用 車 軸 受 金 止 め 装 置	日立工場	坂 本 繁 三	28. 9. 18
"	405944	小 型 電 気 連 結 環 調 節 装 置	日立工場	坂 本 繁 三	"
"	405945	押 釦 開 閉 器	日立工場	小 池 吉 男	"
"	405946	着 床 整 準 装 置	日立工場	小 池 吉 男	"
"	405947	押 釦 開 閉 器 鎖 錠 装 置	日立工場	横 山 二 義 郎 次	"
"	405959	高 速 度 接 点 開 閉 装 置	日立工場	甲 賀 正 三	"
"	405982	温 度 計 等 の 感 温 部	日立工場	中 塚 勝 一	"
"	405988	整 流 器 冷 却 フ ァ ン 作 動 表 示 装 置	日立工場	佐 藤 克 夫 宏	"
"	405990	双 型 開 閉 器 取 付 装 置	日立工場	河 合 留 八	"
"	405991	接 触 片 台 の 枠 上 取 付 装 置	日立工場	滑 川 留 八 清 八	"
"	405992	回 転 締 付 型 断 路 器 導 双 鎖 錠 装 置	日立工場	河 村 節 夫 彰	"
"	405993	回 転 締 付 型 断 路 器 導 双	日立工場	立 川 竹 男 雄 明	"
"	405994	油 入 開 閉 器 の 挾 接 接 触 部	日立工場	金 井 好 延	"
"	405995	回 転 締 付 型 断 路 器	日立工場	滑 川 清	"
"	405998	電 路 遮 断 器 の 電 弧 樋	日立工場	滑 川 清	"
"	406002	枠 取 付 型 電 磁 接 触 器 の 取 付 枠 組	日立工場	白 土 忠 武 治 夫	"
"	406003	碍 子 型 遮 断 器	日立工場	滑 川 清	"
"	405979	膜 板 弁	笠戸工場	福 田 博	"
"	405981	移 送 装 置 を 有 す る パ イ プ 水 圧 試 験 台	笠戸工場	大 橋 剛	"
"	405915	走 行 機 体 の 危 険 信 号 装 置	亀有工場	大 山 昇 勇 崎	"
"	405941	溝 車	亀有工場	安 河 内 春 雄	"
"	405989	針 弁 の 振 動 防 止 装 置	亀有工場	田 中 栄 吉	"
"	405999	天 井 走 行 起 重 機 の 走 行 装 置	亀有工場	林 文 哉	"
"	406008	ケ ー ブ ル 起 重 機 に 於 け る ボ タ ン ロ ー プ 用 ボ タ ン	亀有工場	大 西 昇	"
"	406009	起 重 機 の 橋 形 ガ ー ダ ー 延 長 装 置	亀有工場	平 栗 保 平	"
"	406012	マ ン ト ロ リ ー 横 行 車 輪 軸 受 調 整 速 置	亀有工場	井 上 忠 雄	"
"	406013	ケ ー ブ ル 起 重 機 の ボ タ ン ロ ー プ 用 ボ タ ン	亀有工場	松 崎 直 忠	"
実用新案	406014	旋 回 起 重 機 の 旋 回 装 置	亀有工場	真 砂 幸 男	28. 9. 18

(第62頁へ続く)