

大容量輸出ポンプ水車の現地運転特性

Field Test Results of Large Capacity Pump-Turbines to U.S.A.

Hitachi received orders in 1969 for large capacity pump turbines for delivery to the Ludington and Blenheim-Gilboa power stations, U.S.A. These huge pump turbines have already been installed at site and put in commercial operation this year after satisfactory field tests. This report gives the details of the field tests.

高瀬光雄* *Mitsuo Takase*
 高木宣輔* *Nobuho Takagi*
 桑原尚夫* *Takao Kuwabara*
 鎌田 勉* *Tsutomu Kamata*

1 緒 言

最近のアメリカ向け大容量輸出ポンプ水車として注目されているラディングトン、ブレンハイム・ギルボア両揚水発電所納めポンプ水車合計10台は、順次現地据付け、調整試験が進み、今年にはいってあいついで顧客引渡しが完了し、営業運転にはいっている。これら両発電所および納入主機の概要については、すでに文献¹⁾で紹介済みであるが、特にラディングトン用ポンプ水車は、その単機容量、形状ともに従来の実績をはるかに上回り、各所に新設計、新製作法を取り入れた記録品であり、またブレンハイム・ギルボア用ポンプ水車も

表1 ポンプ水車仕様比較表 ラディングトン用ポンプ水車は単機容量、寸法ともに世界最大である。

Table 1 Specification of Pump-Turbines

発 電 所 名		LUDINGTON	BLENHEIM-GILBOA
顧 客 名		Consumers Power Company & Detroit Edison Company	PASNY (Power Authority of the State of New York)
コ ン サ ル タ ン ト		EBASCO	UHL. HALL. & RICH
台 数		6	4
回 転 速 度		rpm	rpm
		112.5	257
水 車 運 転	最 大 出 力	kW	343,000
	最 高 落 差	m	107.7
	最 低 落 差	m	87.2
	比 速 度	m-kW	190
ポ ン プ 運 転	最 高 揚 程	m	113.6
	最 低 揚 程	m	93
	最 大 揚 水 量	m ³ /s	314
寸 法	最 大 径	mm	8,375
	分 割 数	個	2
構 造	材 質	—	普通鋼, ステンレス肉盛
	構 造	—	溶 接
	主 軸 径	mm	2,000
	主 軸 長	mm	9,000
ほ か	軸 構 造	—	溶 接 発電電動機と一体
	ケ ー シ ン グ	—	—
	入 口 径	mm	7,320
	最 大 幅	mm	22,200
材 質	—	—	60HT
	—	—	60HT
	—	—	現地溶接
構 造	—	—	現地溶接
	—	—	—
	—	—	—



図1 アメリカ、ラディングトン発電所全景 水車運転中の発電所航空写真である。左手の上部貯水池は人工湖、右手下部貯水池はミシガン湖をそのまま使っているものである。

Fig. 1 Panoramic View of the Pumped Storage Project

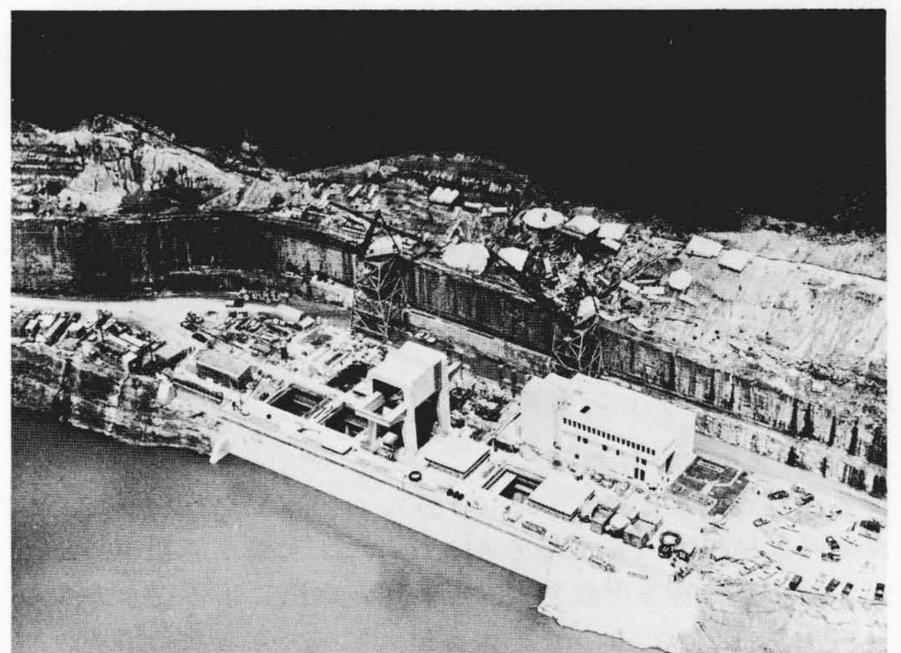


図2 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所全景 写真より半地下式発電所であることがわかる。

Fig. 2 Panoramic View of the Power House

* 日立製作所日立工場

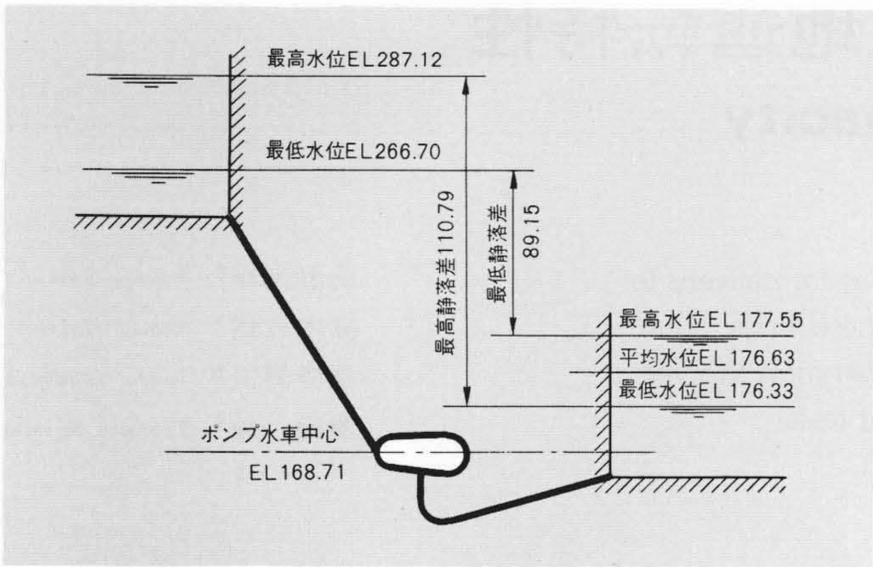


図3 アメリカ、ラディングトン発電所水位仕様 上・下貯水池の水位差を示す。

Fig.3 Head Variation in LUDINGTON Pumped Storage Power House

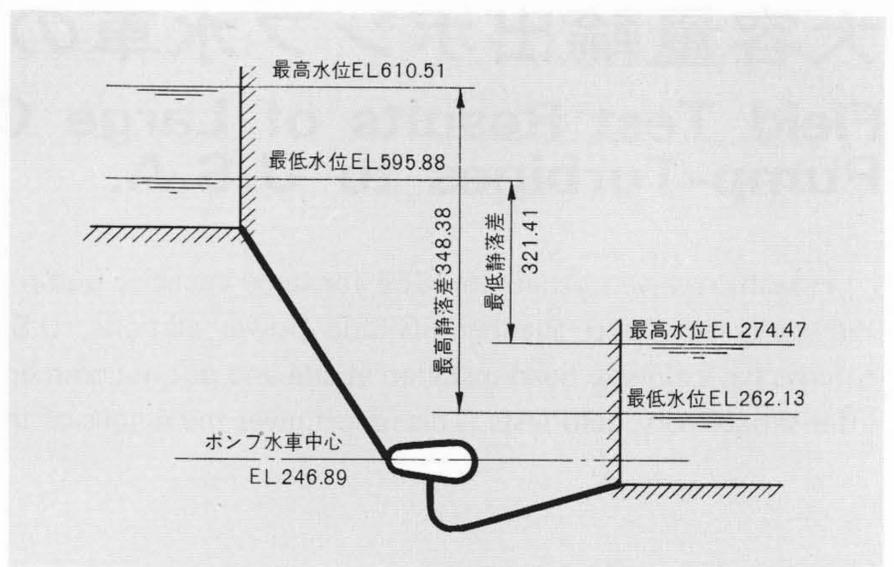


図4 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所水位仕様 上・下貯水池の水位差を示す。

Fig.4 Head Variation in BLENHEIM-GILBOA Power House

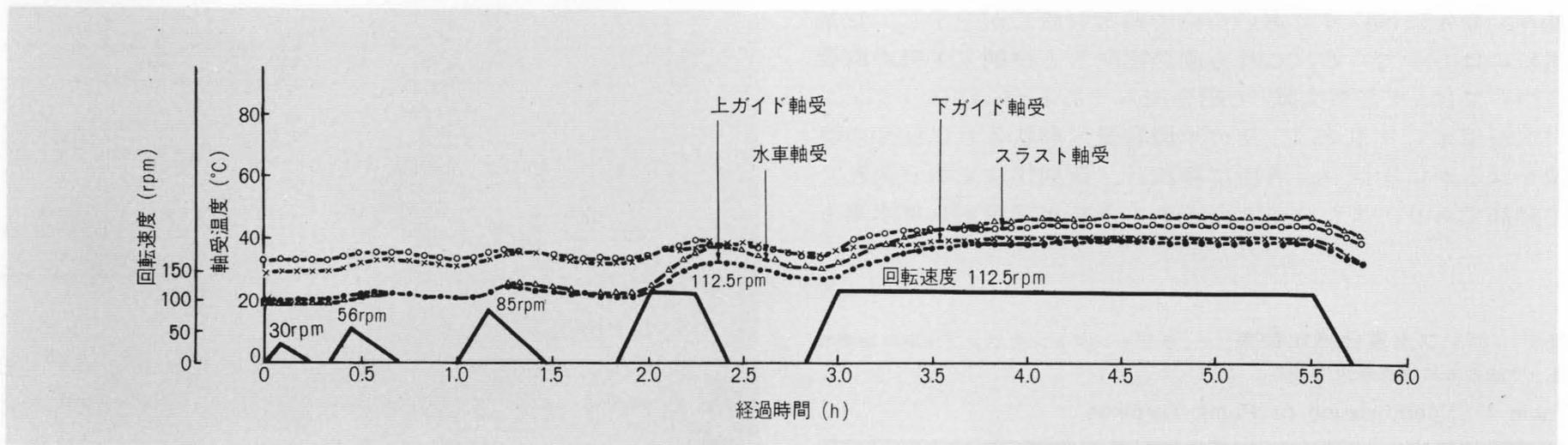


図5 アメリカ、ラディングトン発電所メタルならし運転結果(揚水方向) 間欠運転方法を採用したメタルならし運転結果を示す。定格回転速度に上昇後、約4時間で各部の温度がほとんど安定した。

Fig.5 LUDINGTON Results of Bearing Run In Pumping Mode

高落差大容量機としての記録品である。これらの現地運転状態は、きわめて良好で顧客の好評を得ている。

図1, 2は両発電所の全景を、表1は両発電所用ポンプ水車の仕様を、さらに図3, 4は水位仕様を示すものである。

ここでは、これら両発電所用ポンプ水車の現地調整試験結果を取りまとめて報告する。現地調整試験項目は、アメリカをはじめ諸輸出国の場合、一般的に必要な最小限にとどめる傾向にあるので、本稿で報告できる試験項目についても少ないと思われるが、関係各位の参考になれば幸いである。

2 ラディングトン発電所

2.1 メタルならし運転

各種調整試験に先だち、メタルならし運転を行なった。本発電所は純揚水式発電所であるため、まず揚水運転が必要となるので水面押下げ状態で、始動用電動機による揚水方向のメタルならしを行なった。大容量大形機であるため慎重を期し、図5に示すような間欠的な回転速度制御を行ない最後に2.5時間の定格回転を持続したが、各メタルとも異常なく安定したメタル温度を示した。

水車方向のメタルならしは、揚水運転によって上部貯水池に充水された水により、無負荷運転を行ない実施したが、揚水方向と同じく異常のないことが確認された。

2.2 初充水試験

本発電所は純揚水式発電所であり、機器の有水試験前には、上部貯水池は全く貯水されていないため、まず揚水運転により上部貯水池を充水する必要があった。このいわゆる初充水は、冷却水用給水ポンプを利用し鉄管を保証最低水位より約8m下がり(静落差81.2m)まで充水し、その後ポンプ水車により揚水を行なう方法を採用した。上部貯水池の取水口付近の土木上の粘土強度に不安があったため、ポンプ水車による揚水は、案内羽根開度を極端に絞った状態で行なわれた。この保証外極低揚程の案内羽根開度絞り運転は、ポンプ水車にとって最も過酷な運転状態であり、揚水開始時は、表2に示すように水圧振動に比べ構造振動、特にドラフトパイプマンホール部の振動が異常に大きく測定された。この振動は、ランナベーンのポンプ入口側に発生するキャビテーションに起因するものであり、ドラフトパイプ部に空気を給入することで、このキャビテーションによる衝撃波を和らげ水圧振動、構造振動を小さくすることが可能との判断で給気を行なった。その結果は、表2の給気ありの欄に示すように、大幅に構造振動を押えることができ、揚水運転時の案内羽根開度絞り運転においては給気効果が顕著であることが実証できた。なお表2において、ほぼ適正開度である50%開度の運転状態はきわめて良好であるが、これは空気を給入した効果というより

表2 アメリカ, ラディングトン発電所初充水試験結果 保証外極低揚程時の構造, 水圧振動を示すもので, 案内羽根開度を大幅に絞ると振動が大きいが, ここへ給気を行なうと静かになる。

Table 2 LUDINGTON Operating Results in Initial Filling

項目	単位	試験結果					
静落差	m	81.2					
案内羽根開度	%	15		20		50(≒適正開度)	
発電電動機入力	MW	260		280		333	
給気(ドラフトパイプ部)	—	なし	あり	なし	あり	あり	
構造振動 (全振幅)	水車主軸振れ	mm	max 0.51	max 0.51	max 0.51	max 0.51	max 0.20
	ドラフトパイプマンホール	μ	max 1,600	max 600	max 1,600	max 800	max 100
	主軸受カバー	μ	max 600	max 380	max 800	max 420	max 130
水圧振動 (全振幅)	ケーシング	m	18	24	—	22	3
	ドラフトパイプ	m	15	22	—	16	5
運転状態総合判断	—	悪し	やや悪し	悪し	やや悪し	良好	

表3 アメリカ, ラディングトン発電所ポンプ運転結果 適正案内羽根開度における構造, 水圧振動を示す。

Table 3 LUDINGTON Operating Results In Pumping Mode

項目	単位	運転結果	
全揚程	m	95	113
構造振動 (全振幅)	水車主軸振れ	mm	0.16
	主軸受カバー	μ	60
水圧振動 (全振幅)	ケーシング	m	2.5
	ドラフトパイプ	m	4.5

は,むしろ最大効率運転点近くであり,キャビテーションの発生が少ない運転状態であるためと考えられる。このことは主軸振れが極端に小さくなっていることから判断できる。以上のように空気を給入することで,保証外極低揚程から,保証最低水位より3m上りの水位まで連続揚水を行ない,無事初充水試験を終了させることができた。

2.3 揚水運転

適正開度における運転状態は表3に示すように,95~113mの全揚程範囲にわたり良好であったが,最高揚程付近において,キャビテーションによって多少構造振動,水圧振動が大きくなることが認められた。

揚水起動についても,最高揚程付近で多少構造振動,水圧振動が大きくなるが,最低・基準揚程付近では,非常に円滑な起動が可能であることが確認された。

2.4 水車運転

起動・停止・負荷運転ともに全運転範囲にわたって,運転状態は良好であることが確認された。

表4は最高落差付近における構造振動測定値を示すものである。最大出力運転においては,きわめて良好な運転である。また約40%部分負荷時において振動の増加が多少認められたが,流量0.43m³/s程度の給気をドラフトパイプ部に行なうことにより,構造振動値をさらに軽減することが可能であることが確認された。

2.5 負荷しゃ断・入力しゃ断試験

模型試験によって得られた完全特性に基づき,実物における負荷しゃ断,入力しゃ断時の案内羽根閉鎖仕様をあらかじめ電子計算機により求め,現地試験に臨んだ。

現地試験の結果は,図6,7に示すように,きわめてよく計算結果と合致した。

図8は,負荷しゃ断時における各号機ごとの水圧上昇値を

表4 アメリカ, ラディングトン発電所水車運転結果 最高落差における構造振動を示す。比較的振動の大きい軽負荷時でも,運転は静粛である。

Table 4 LUDINGTON Operating Results In Generating Mode

項目	単位	運転結果		
有効落差	m	107		
発電電動機出力	MW	130		320
給気	—	なし	あり	なし
構造振動 (全振幅)	水車主軸振れ	mm	0.40	0.42
	主軸受カバー	μ	150	70

電子計算結果と比較したものである。これによると各しゃ断落差の補正を行なうと,概略計算値を中心として±2%の誤差範囲に入り,多台数同一仕様ポンプ水車間の,特性もよく合っていることがわかる。

3 ブレンハイム・ギルボア発電所

3.1 長時間空転試験

初充水試験をひかえ,各種リレーチェックおよび同期投入試験に伴い,水面押下げ状態で,起動用電動機による揚水方向の連続6時間にわたる空転試験を実施した。この試験は,

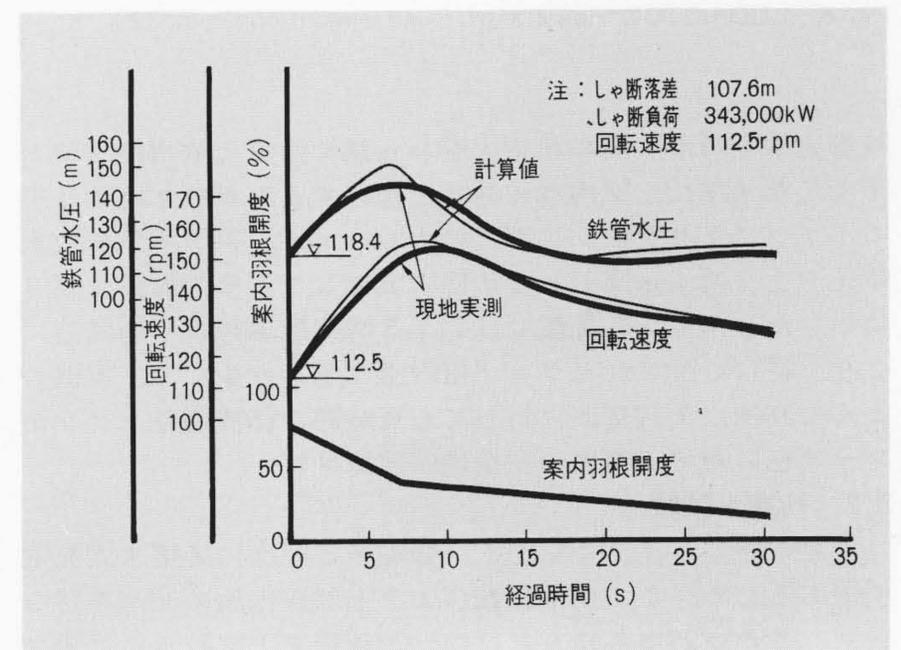


図6 アメリカ, ラディングトン発電所負荷しゃ断試験結果 (1) 電子計算機による計算結果と実測値がきわめてよく合致している。

Fig. 6 LUDINGTON Results of Load Rejection Test (1)

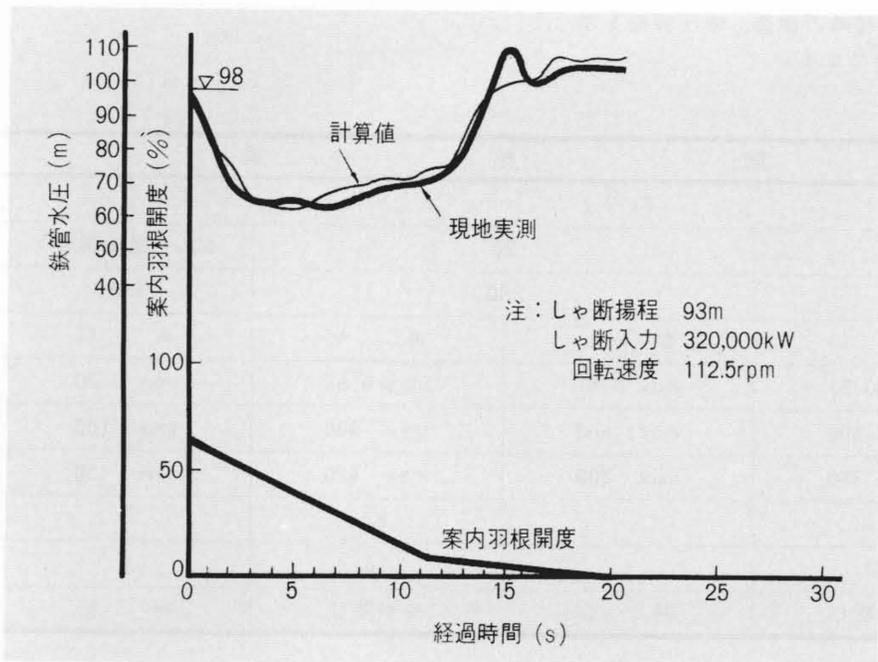


図7 アメリカ、ラディングトン発電所入力しゃ断試験結果 電子計算機による計算結果と実測値がきわめてよく合致している。

Fig. 7 LUDINGTON Results of Input Rejection Test

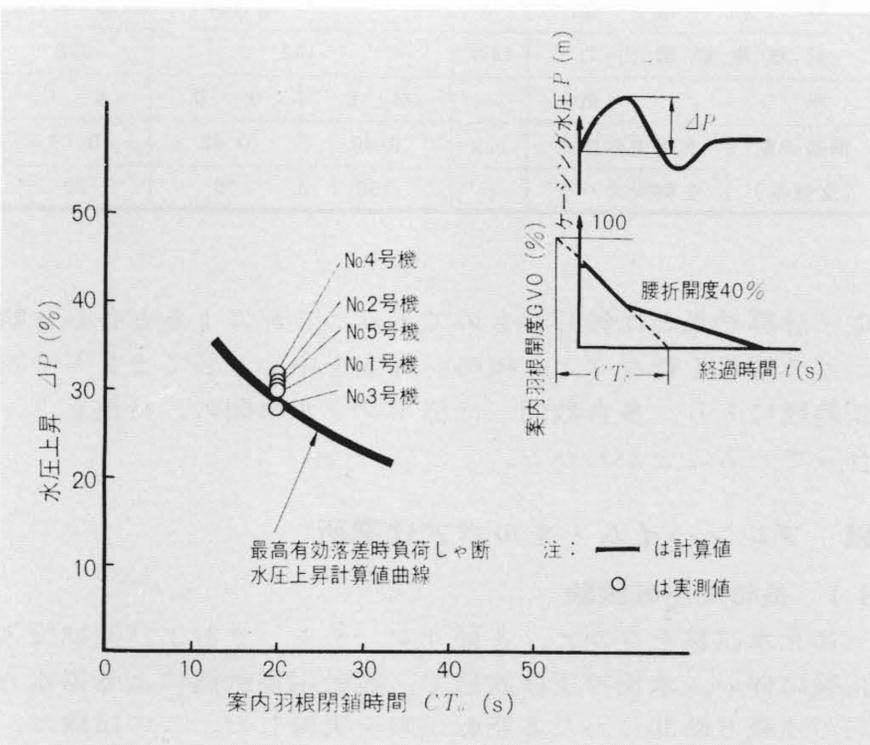


図8 アメリカ、ラディングトン発電所負荷しゃ断試験結果 (2) 同一仕様のポンプ水車の負荷しゃ断結果はよく一致している。

Fig. 8 LUDINGTON Results of Load Rejection Test (2)

鉄管充水を行なう前の状態すなわち鉄管水位と放水路水位が平衡した状態で、案内羽根漏水を補給するため放水路より専用ポンプによりケーシングに給水し、ケーシング水圧を放水路圧力より約4m高くした状態で実施した。その結果は図9に示したように、各部温度は約1.5時間経過後に平衡状態になり、特に心配されたランナ室内温度上昇も少なく、本機のような高速、大容量機に対しても長時間の待機運転、コンデンサ運転に対する機器の安全性が確認された。

3.2 初充水試験

本発電所も、ラディングトン発電所と同様に純揚水式発電所であるため、まず揚水運転により上部貯水池の充水を行なった。このいわゆる初充水試験は、鉄管を上部貯水池にすでにたまっていた雨水により、静落差310mが得られるまで湛(たん)水した後ポンプ水車主機により揚水するものである。本発電所においては、ラディングトン発電所と違って案内羽根

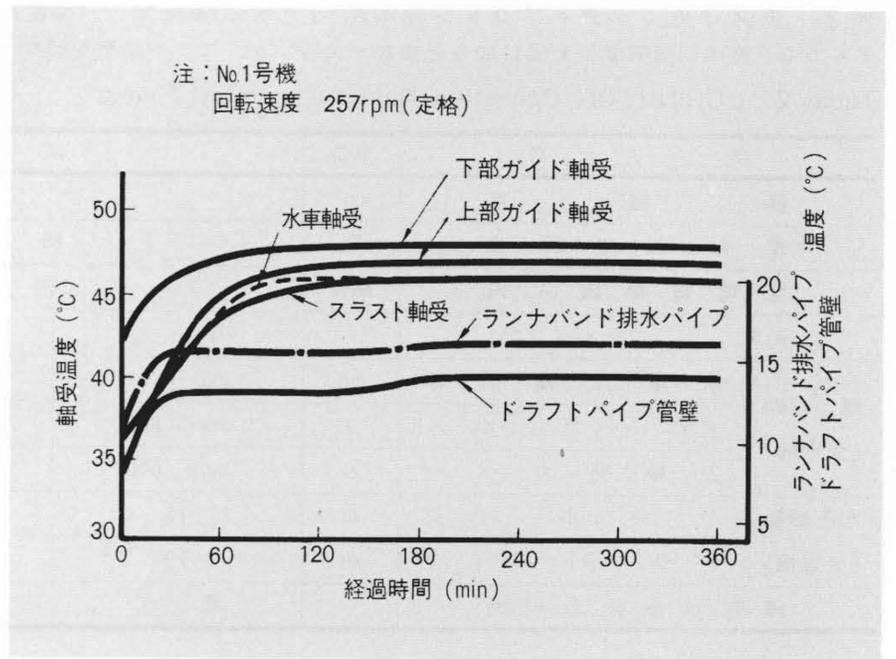


図9 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所長時間空転試験結果(揚水方向) ドラフトパイプ内水面押下げ状態で長時間の空転を行なっても各部温度は1.5時間で平衡となり安定する。

Fig. 9 BLENHEIM-GILBOA Operating Results of Heat Run Test (Pumping Mode)

表5 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所初充水試験結果 保証外極低揚程時の構造振動を示す。

Table 5 BLENHEIM-GILBOA Operating Results In Initial Filling

項	目	単位	試験結果	
静	落差	m	310 → 330	
案内	羽根開度	%	74	
発電	電動機入力	MW	310 → 305	
給	気	—	なし	
構造振動 (全振幅)	水車主軸振れ	mm	0.13~0.17	
	水車上カバー	V	μ	30~80
H		μ	10~30	
運転状態総合判断			—	良好

開度を絞る必要がなく、約15%オーバロードに相当するほぼ適正開度に近い開度で揚水運転が可能であったので、表5に示すように給気を必要としないきわめて良好な運転状態であった。

初充水開始時静落差310mから約22時間連続揚水を行ない、保証最低静落差より10m上がりの静落差330mまで揚水し、無事初充水試験を終了した。

3.3 揚水運転

最低揚程付近における適正開度揚水運転の運転状態は、表6に示すように良好であることが確認された。なお、揚水起動時のプライミング確立時間が多少長い(排気弁開より63PR確立まで約4分かかる)が、この間異常振動、騒音は認められず、また発電所運用上も特に支障のないことが確認された。

3.4 水車運転

起動、停止、負荷運転ともに全範囲にわたって、運転状態は良好であることが確認された。表7はその運転結果を示すもので、部分負荷時においても、空気を給入せずに十分安全な運転が可能であることが認められた。

3.5 水車運転時水圧推力特性

図10は水車運転無負荷時の水圧推力測定結果を示すもので、水車起動後約30%回転速度に達するまで、多少上向きの推力が発生する。定常運転および負荷しゃ断時の過速度時においても設計許容値に対し、十分低い値であることが確認された。

表6 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所揚水運転結果
低揚程運転時の構造振動、騒音を示す。

Table 6 BLENHEIM-GILBOA Operating Results In Pumping Mode

項目		単位	運転結果	
静落差		m	327	329
発電電動機入力		MW	305	294
案内羽根開度		%	78	75
構造振動 (全振幅)	上カバー	V	μ	—
		H	μ	—
	主軸振れ	mm	0.15	0.15
騒音	水車ピット内	dB	113.5	112.5
	ドラフト監査路	dB	109	—
号機 No.		—	1	
試験月日		—	昭和48年6月25日	昭和48年6月30日

表7 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所水車運転結果
中落差水車運転時の構造振動・騒音を示す。

Table 7 BLENHEIM-GILBOA Operating Results In Generating Mode

項目		単位	運転結果							
静落差		m	330	330	330	330	336	336	336	
発電電動機出力		MW	0	44	225	248	3.6	54	265	
案内羽根開度		%	12	19	69.5	78.3	12	23	90	
構造振動 (全振幅)	上カバー	V	μ	40~50	40~80	15~21	25~65	25~40	35~60	50~150
		H	μ	8~12	10~18	5	15~40	5~12	10~20	20~70
	主軸振れ	mm	0.17	0.12	0.13	0.13	0.18	0.20	0.18	
騒音	水車ピット内	dB	109	109	110	110	—	—	—	
	ドラフト監査路	dB	—	—	—	—	—	—	—	
号機 No.		—	1			2				
試験月日		—	昭和48年6月28日			昭和48年8月8日				

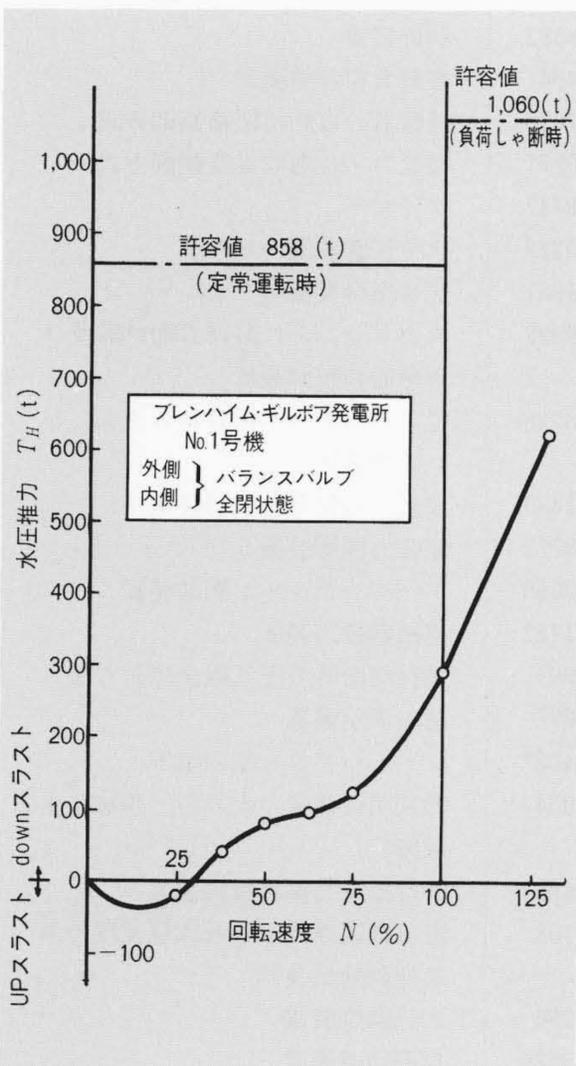


図10 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所水車無負荷運転時水圧推力測定結果
起動直後にわずかの上向きの水圧推力が発生する。

Fig. 10 BLENHEIM-GILBOA Measured Results of Hydraulic Thrust

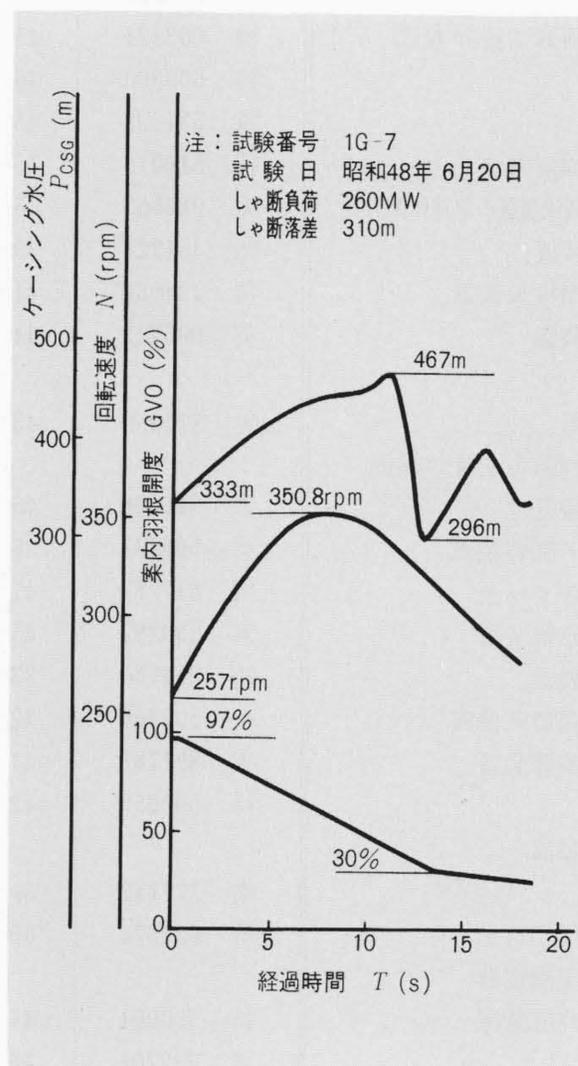


図11 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所負荷しゃ断試験結果
最低落差における負荷しゃ断結果を示す。

Fig. 11 BLENHEIM-GILBOA Results of Load Rejection Test

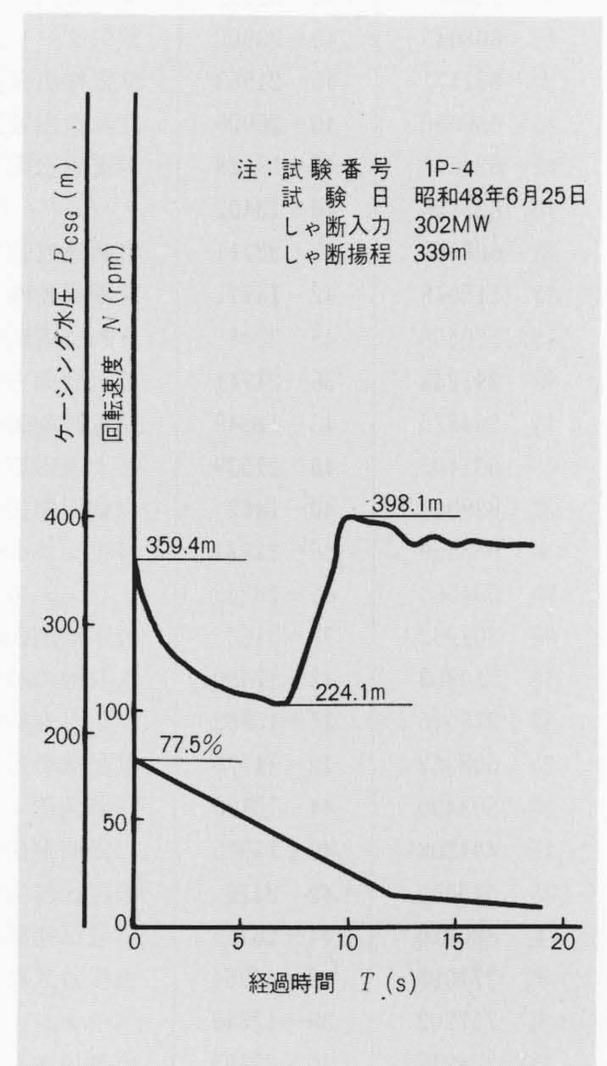


図12 アメリカ、ブレンハイム・ギルボア発電所入力しゃ断試験結果
中揚程揚水運転中の入力しゃ断結果を示す。

Fig. 12 BLENHEIM-GILBOA Results of Input Rejection Test

3.6 負荷しゃ断・入力しゃ断

図11, 12は低落差時の負荷しゃ断, 入力しゃ断試験結果を示すものである。本発電所においては, 案内羽根閉鎖時間を入力しゃ断時および負荷しゃ断時ともに同一とするよう顧客の要求があったが, いずれもしゃ断結果は良好で設計許容値内にはいつている。

4 結 言

以上, ラディングトンおよびブレンハイム・ギルボア発電所用ポンプ水車の現地運転結果につき概要を述べた。両発電所ともに6台および4台と多台数の大容量ポンプ水車であり,

各号機間の特性, 性能の合致性その他につき貴重な設計指針が得られた。

アメリカにおいても電力需要の要請がきびしく, 当初予定していた試験項目を省略して営業運転に入れるなどの事情もあり, 十分な試験結果を記載できなかったが, 本稿が少しでも関係各位のご参考になれば幸いと考えるものである。

参考文献

- (1) 高瀬光雄ほか:「最近のアメリカ向け大容量ポンプ水車および発電電動機」日立評論 53, 182 (昭46-2)

特許と新案

日立製作所では所有している全部の特許・実用新案を全て有償開放しております。

このリストには、日立製作所所有の特許・実用新案で、日立製作所が実際に使用したものの中から、選んで掲載いたしました。

なお、照会・実施のご希望のございます場合は右記までご連絡願います。

問合先：国内関係・日立製作所特許部特許営業グループ

海外関係・日立製作所国際事業部欧米部

電話：(03) 270-2111 (大代表)

住所：〒100 東京都千代田区大手町2-6-2 (日本ビル)

■ 制御器

登録番号	公告番号	名 称	登録番号	公告番号	名 称
実 900970	44-22037	位置検出装置	特 579227	45-1122	FETソースホロア回路
特 608045	45-33602	蒸気タービン制御切替弁方式	特 603721	45-29682	制御装置
実 931171	45-21963	位置検出装置	特 609800	45-7464	自動負荷調整装置
特 636660	46-26006	故障検出装置	特 531393	43-12056	遮断器の自動再閉路制御方式
特 629557	46-19828	発電用水流量測定方法	特 616013	45-20771	熱延コイル巻取温度制御方式
特 625728	46-13402	タービンバイパス減圧装置の急速作動方式	実 946063	46-12147	タイマー
特 606062	45-32111	自動速度調整装置	特 451224	39-30212	水位制御装置
特 515048	42-14771	同期電動機同期投入装置	特 494082	41-21851	速度指令装置
特 580406	45-3348	自動負荷制御装置	実 896953	44-19922	火力プラントにおける加熱器及び再熱器の制御装置
特 297248	36-21941	選択制御方式	実 877382	43-28728	電気ガバナートにおけるダンピング切換装置
特 564825	43-12849	発電機制御装置	実 946008	46-11430	遠隔伝送信号の表示装置
特 631493	46-21539	吊上電磁石の制御方法及び装置	実 566937	36-28712	定張力制御装置
実 829048	40-1462	自動同期投入装置	実 817787	41-12658	テーパテンション制御装置
実 955569	46-22971	静止レオナード制御装置	実 939292	45-31722	遮断器投入装置
特 594563	45-13245	トランジスタスイッチ	特 251280	33-9909	素材切断時の圧延機急停止方法
特 301962	37-3163	故障選別表示警報装置	特 502460	42-8977	遠方表示装置
特 510803	42-17430	巻取機の制御装置	実 891787	44-14027	シートパイラー制御装置
特 278046	35-15962	定張力巻取制御補償装置	特 500259	42-5054	同期閉合装置の大めの三角波発生回路
特 508362	42-14778	電動機の手動速度制御装置	実 777142	39-36865	瞬時停電自動再投入装置
特 563495	44-13183	制御装置	特 620574	46-8168	電気式調速機用負荷調整装置の落巻変動補償装置
特 461208	40-11975	自動同期閉合装置	特 550964	44-3296	水位調整装置
特 546502	42-3416	電圧比較回路	実 932704	45-23689	自動制御装置
実 880476	44-2816	信号伝送回路	特 633505	45-19749	デジタルデータ作成方式
実 771095	39-33954	無接点式微速度継電器	特 606064	45-34653	サンプルホルダー
実 757703	39-17342	トランジスタ時限装置	特 588114	45-11929	キャリヤリレー方式
特 474917	40-27783	自動揃速装置			
特 522895	43-3201	間歇制御用発振器			
特 450253	40-1630	自動同期化用揃速装置			
実 868564	43-20474	同期検出装置			
特 410877	38-4224	可逆巻取機の自動減速装置			

■ 制御および保護装置

登録番号	公告番号	名 称	登録番号	公告番号	名 称
特 542756	43-5327	自励式励磁装置	特 264375	35-2969	接地保護継電装置
特 506426	42-12182	方向比較搬送保護継電方式	特 303731	37-2934	パイロットワイヤ保護継電装置
特 520888	43-849	搬送保護継電方式	特 584236	45-7270	変化率変化量リレー
特 552149	44-3925	搬送保護継電装置	特 481613	41-7654	比例限時距離継電器
特 564808	42-14412	表示線保護継電装置	特 481618	41-8089	保護継電装置
実 606069	45-31801	電気機器雑音防止装置	特 579220	45-2935	保護継電方式
実 620611	46-6224	遅延継電装置	特 533883	43-4886	保護継電装置
特 622529	46-11698	低周波同期起動方式の同期外れ検出装置	特 430476	39-4579	静止型継電回路
特 533887	43-17329	静止形保護継電器	特 404078	37-13223	遠方制御装置における選択方式