

## 中部電力(株)奥美濃発電所ポンプ水車の現地試験

### Field Test Results of High-Speed, Large-Capacity Pump-Turbines at Okumino Power Station of Chubu Electric Power Co., Inc.

佐藤 晋作  
S.Sato

廣田 達也  
T.Hirota

国内最高速度、大容量のポンプ水車を備えた、中部電力(株)奥美濃発電所の1号機~4号機が完成し、1994年7月に1,2号機の営業運転開始、3,4号機は1995年3月に営業運転を開始した。当社はこの発電所にポンプ水車、入口弁および関連の補機類一式を納入した。このポンプ水車は、基準有効落差485.75mで水車出力259MW、ポンプとしては最高揚程536.1mをもち、このクラスのポンプ水車では国内最高の回転速度 $514\text{ min}^{-1}$ を誇る機械である。

4台同時負荷遮断試験、効率測定、調相運転試験、ランナ実働応力測定などの特殊現地試験を行い、保証値を満たしていることを確認するとともに設計どおりの高信頼性のポンプ水車であることが確認された。

Units No.1 to No.4 of the Okumino Power Station of Chubu Electric Power Co., Inc. have commenced operation. This pumped-storage power station is equipped with four high-speed, large-capacity reversible pump-turbines.

These reversible pump-turbines have a speed of  $514\text{ min}^{-1}$ , the highest speed in Japan, an output of 259 MW at the rated net head of 485.75 m, and a maximum pumping head of 536.1 m.

The high-reliability performance of these pump-turbines was proved through commissioning tests.

#### 1 まえがき

1995年3月、中部電力(株)奥美濃発電所の3・4号機が営業運転に入り、奥美濃発電所の第1期に位置づけられる1~4号機が完成した。奥美濃発電所は、大容量機では国内最高速度を誇る $514\text{ min}^{-1}$ の回転速度をもつポンプ水車を備えた発電出力1,000MWの純揚水発電所として完成したものである。

高速、高落差化に対応するため、構造強度上の検討はもちろんのこと、特に高速で水中で回転するランナの信頼性が重要となるが、この発電所のポンプ水車ランナは、世界をリードする当社のランナ振動低減技術を用いて、模型検証試験を含めて低振動応力ランナの設計、製作を行った。また、ランナ材料についても素材から一貫した品質体制のもと、高品質ランナの製作を行った。

さらに、奥美濃発電所の第2期に位置づけられる5,6号機の将来可変速化計画に対応し、1~6号機互換性のある同一設計による可変速対応可能なポンプ水車を設計、製作した。

図1にポンプ水車ランナの外観を示す。

高速化に伴い安定した調相運転も重要な技術であるが、特に発電から発電調相への切換え時に円滑に水面押下げが行えることが重要となる。そこで、有水試験の段階では円滑に発

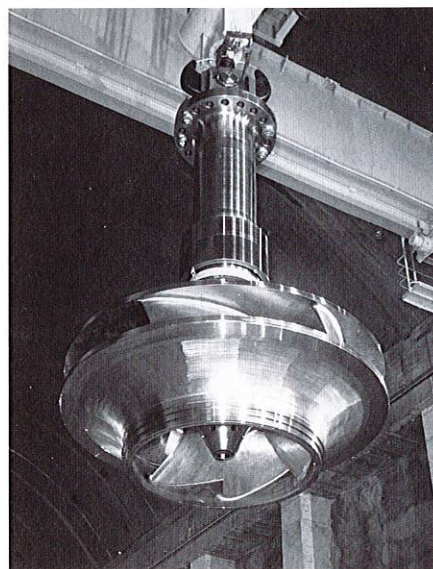


図1. 奥美濃機ポンプ水車ランナ 現地ポンプ水車ランナ吊込み状態を示す。

Pump-turbine runner for pumped storage at Okumino Power Station

電から発電調相に移行できることを確認した。

また、この発電所の特長としては、国内では初めての複雑な上流側1条4分岐系の水路を備え、かつ下流側サージタンクを省略した記録的な放水路長をもつ水路構成であるが、負

荷および入力遮断時での安定した過渡制御を行うため、設計段階から綿密なコンピュータ解析を実施し、ガイドベーン制御方法など十分な事前検討を行った。

このように記録の高速、大容量ポンプ水車の納入に際し、数々の設計検証を行い、設計、製作を行ったが、現地有水試験で、効率測定、振動測定、特殊条件での遮断試験、調相運転試験、ランナ実働応力測定などの数々の特殊試験を行い、高落差、高速ポンプ水車として優れた信頼性、性能をもつことが検証されたので、その試験結果について紹介する。

## 2 ポンプ水車要項

奥美濃発電所のポンプ水車は、高速、高落差、大容量機であり、特に国内では、前述のとおり最高速度を誇るポンプ水車である。

ポンプ水車の基本要項を以下に示す。

型式	立軸単輪単流うず巻フランシス型ポンプ水車
水車	有効落差 基準 485.75 m
	水車出力 基準落差時 259,000 kW
	回転速度 514 min <sup>-1</sup>
	比速度 114.7 m-kw
ポンプ	全揚程 最高 536.1 m
	揚水量 最低揚程時 50.3 m <sup>3</sup> /s
	最大軸入力 270,000 kW
	回転速度 514 min <sup>-1</sup>
	比速度 35.2 m-m <sup>3</sup> /s

## 3 ポンプ水車現地試験結果

### 3.1 水力特性

ポンプ水車の効率特性については、2号機を用いて熱力学法により測定を行った。熱力学法による効率測定は、東京電力(株)今市発電所<sup>(1)</sup>に引き続き正式に実施したものである。

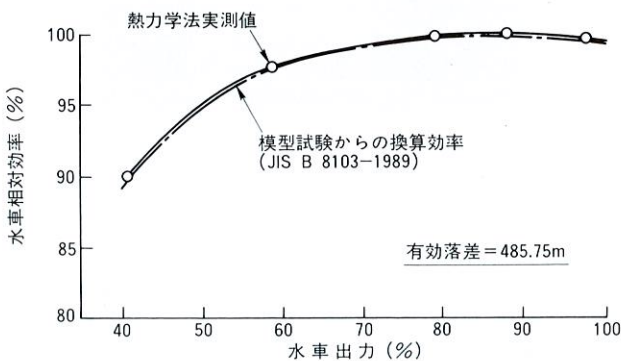


図2. 水車効率測定結果 基準有効落差時における効率であり、模型試験結果とよく一致している。

Results of pump-turbine operating efficiency measurement

図2に水車運転時の効率測定結果を示す。図では、あらかじめ実施した相似模型試験結果からの換算効率も併せて示す。

最大出力側から部分負荷まで、模型換算効率とほぼ同じ特性となった。

ポンプ効率については、揚程範囲にわたり模型換算効率よりも若干高めとなったが、傾向はよく一致している。また、水車の出力開度特性も模型換算特性とほぼ同じ結果となり、ポンプの軸入力特性は、模型換算値よりも小さめとなったが、やはり傾向はよく一致している。

水車運転時およびポンプ効率とも、設計、性能模型試験どおりの性能を実機でも備えていることが確認された。

### 3.2 運転特性

発電、揚水各運転時のポンプ水車軸振れ、ポンプ水車振動(上カバー)および各部の水圧脈動の変化を図3に示す。

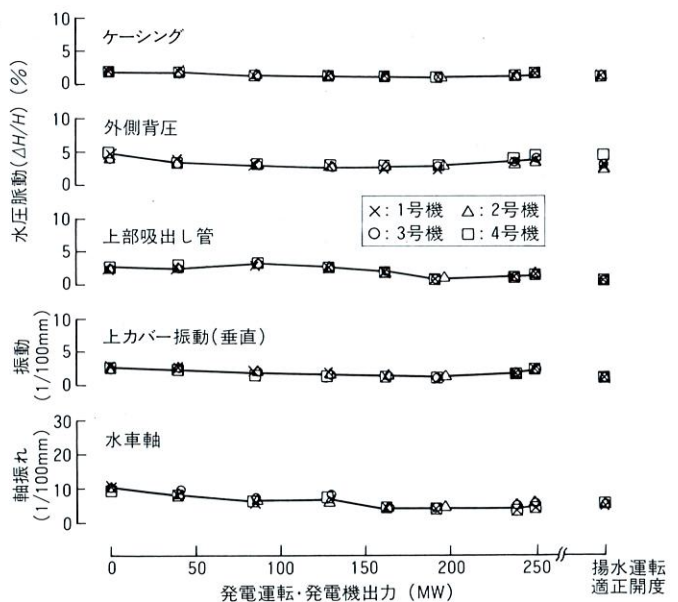


図3. 運転特性 出力・適正開度試験におけるデータであり、各部の運転特性は安定しており、号機間のばらつきもほとんどない。

Pressure fluctuation, head cover vibration and shaft vibration of pump-turbines

今回の奥美濃発電所のポンプ水車も豊富な高落差ポンプ水車の実績を反映させ、各号機間のばらつきもない安定した運転特性をもっており、特に振動、軸振れについては、従来の500 m級のポンプ水車と比較しても十分小さいものであり、高信頼性のある機械であることが実証された。

### 3.3 遮断特性

1~4号機の水路は1条の導水路に上部サージタンクを備え、さらに順次F型の形状に分岐して4台のポンプ水車に接続し、放水路側は隣接する2台ずつが合流して2条の放水路で下池に接続する国内では初めての複雑な1条4分岐水路

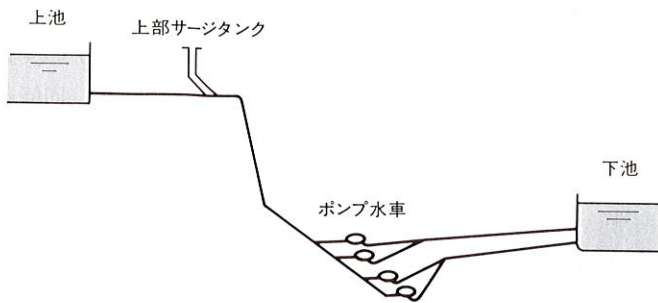


図4. 水路系 下部サージタンクを省略した記録的長放水路をもつ国内初の鉄管側4分岐水路である。

Pipeline layout

表1. 長大放水路の例  
Example of longest tailrace tunnel

発電所	全長(m)	内径(m)	$LV(m^2/s)$
沼原	498	3.7	2,650
新豊根	341	9.3	1,980
新高瀬	315	6.4	1,640
奥清津	402	5.2	2,490
奥美濃	663	5.5	3,490

$$LV = \text{全長(m)} \times \text{流速量(m/s)}$$

系である。図4に水路系の概略を示す。

また、放水路側は合流後の放水路長が600mを超え、最長の放水路長では800mを超える長放水路でありながら、下部サージタンクを省略した記録的なものである。表1に長大放水路の例を示す。

このように前例のない複雑な水路であることから、遮断時に安定した過渡制御を行うため、設計段階から綿密なコンピュータ解析を実施した。特に、下部サージタンクを省略した放水路側の水圧変動を円滑に制御する観点から、負荷遮断時のガイドベーン閉鎖速度については十分に検討を行った。

また、きわめてまれなケースであるが、主変圧器が故障した場合に隣接する2台ずつのポンプ水車が2組の群として、特定の時間間隔でずれ負荷遮断(保護としては非常停止)すると、放水路側の水圧変動が厳しくなることが事前の解析で明らかとなった。そこで、このような2台群のずれ負荷遮断時でも安全に制御できるように、先行2台の負荷遮断が発生した場合、残り2台の運転中のガイドベーンを制御する特殊な保護方法も採用した。

4台同時負荷遮断については、基本的な遮断特性として、号機間のばらつきもほとんどなく、水圧変動、速度変動とも保証値内に収まることを確認した。

また、1, 2号機が先行負荷遮断で非常停止するとともに、運転継続中の3, 4号機のガイドベーンも制御を行い、数秒後に3, 4号機も負荷遮断で非常停止する2台群ずれ遮断において、この場合1, 2号機間と3, 4号機間の放水路側

の水圧干渉により、後続負荷遮断機の吸出し管水圧変動が厳しくなるが、水圧降下による水柱分離の発生などもなく安全に制御できることを確認した。

なお、ポンプ運転時の4台同時入力遮断でも、各号機間のばらつき、水圧変動の異常などがなく安定した過渡特性である。

### 3.4 調相運転

調相運転のポイントは文献<sup>(1)</sup>に示しているが、この発電所のポンプ水車のように高速機となると、特に発電から発電調相への切り換え時に円滑に水面押下げが行えることも重要である。すなわち、発電から発電調相に切り換わる場合は、発電方向にランナが水中締切回転状態となっているところに水面押下げ空気をランナ周りに給気するため、ランナの高速回転による遠心力、吸出し管内の二次流れなどにより円滑な水面押下げが難しくなり、特に吸出し管内の圧力(押し込み圧力)が高いほどきびしくなる傾向がある。そこで、有水試験の段階ではランナ室からの排水、給気の制御方法にも注意を行い、最高押し込み圧力条件においても円滑に発電から発電調相に移行できることを確認した。

図5は、揚水、発電各方向それぞれの2台同時連続調相試験におけるランナ室周りからの排水管の温度、および冷却水温(吸出し管内の水温)の変化を示す。排水管ルートとしては、20DG1ルートと、20DG2ルートと称される2種類の排水管ルートがあり、20DG1ルートはランナ下方の下カバーからの排水、20DG2ルートはランナとガイドベーン間の下部シートライナからの排水ルートであり、温度上昇は安定したものである。

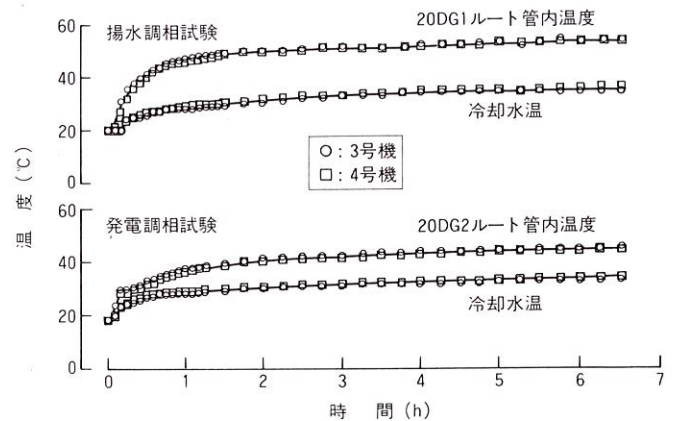


図5. 調相試験結果 揚水、発電方向とも2台同時連続調相運転試験であり、安定した特性である。

Temperature during condenser operation in pump-turbine direction

### 3.5 ランナの実働応力測定

特殊試験として、3号機によりランナの実働応力測定を実施した。この発電所用のランナも高信頼性を確保するため

に、実落差模型試験によってランナ振動特性を事前に把握し、実物ランナにその結果を反映させた。すなわち、当社独自のランナ制振技術を適用して奥美濃発電所向けとして最適なランナ形状を選定した。ランナ実働応力試験結果から、変動応力レベルは事前に実落差・実揚程模型試験検証などでの予想どおりに低く、疲労強度に対しても十分な余裕があることを確認した。

この試験で、ランナは設計どおりの高信頼性のあるものであることが検証された。

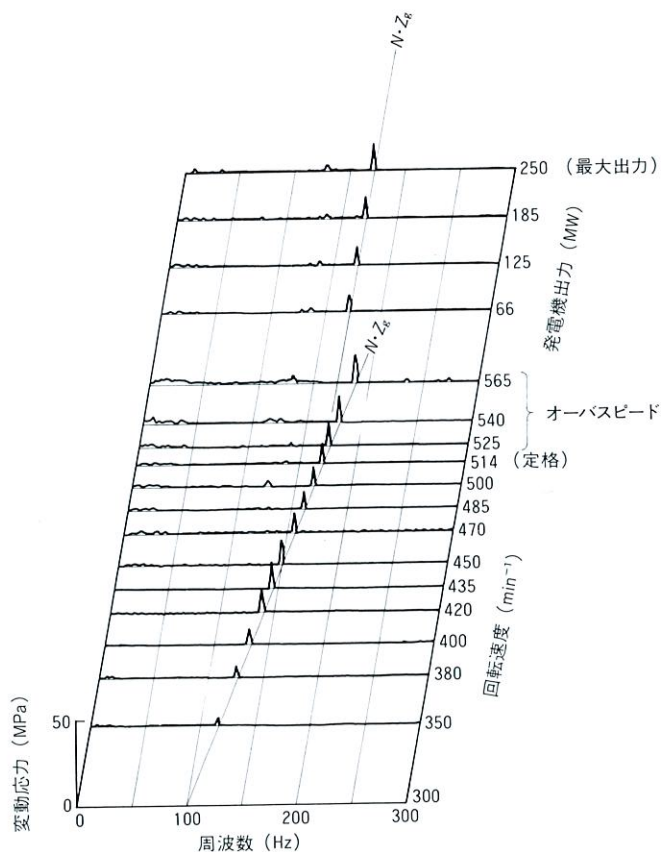


図6. ランナ応力測定結果 発電方向の回転速度上昇、オーバースピードおよび発電負荷運転時の変動応力の周波数分析例である。

Frequency analysis of working stress on runner during turbine operation

図6はランナクラウン側羽根根入口先端付根部の変動応力周波数成分を運転条件ごとに表したものである。ランナの変動応力はこの部位が最大となり、周波数成分としては、回転速度成分( $N$ )×ガイドベーン枚数( $Z_g$ )が卓越している。

#### 4 あとがき

以上、奥美濃発電所のポンプ水車の現地試験結果について概要を述べた。

数々の現地特殊試験を通し、奥美濃発電所の記録的な高速、大容量ポンプ水車の高信頼性が実証された。

奥美濃発電所のポンプ水車は、前述のとおり記録的な高落差、高速大容量機であり、この記録品の設計、製作、現地試験によって培われた技術は、さらに高落差、高速、大容量の揚水発電機器の実現に生かしていく。

#### 謝辞

機器の製作および試験にあたり、終始適切なお指導とごべんたつをいただいた中部電力(株)の関係各位のご厚意に深く感謝するしだいである。

#### 文献

- (1) 星野文秀, 他: 東京電力(株)今市発電所ポンプ水車・発電電動機の現地試験, 東芝レビュー, 47, 11, pp.887-890(1992)



佐藤 晋作 Shinsaku Sato

1978年入社。水車、ポンプ水車の水力設計に従事。現在、京浜事業所水力機器部主査。  
Keihin Product Operations



廣田 達也 Tatsuya Hirota

1982年入社。水力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、電力事業部水力プラント技術部主査。  
Power Systems Div.