

# 高性能・高信頼性を追求するポンプ水車の最新技術

Advanced Technologies Aimed at Realizing Pump-Turbines with Higher Performance and Higher Reliability

篠原 朗  
A. Shinohara

松本 貴与志  
K. Matsumoto

内田 邦治  
K. Uchida

機器のコストを含めた揚水発電所の建設費低減のため、ポンプ水車は高落差化とともに高速化の傾向にある。当社は、世界最高揚程のブルガリア チャイラ揚水発電所向けポンプ水車をはじめ数々の高落差ポンプ水車を設計・製作しており、世界有数の実績をもっている。これらにより確立した技術を基盤としてさらなる高性能・高信頼性のポンプ水車の実現のため、流れ解析技術、調相運転関連技術、ランナの非破壊検査技術、ポンプ水車の新設計構造など、最先端の技術を開発し続けている。

To establish economical pumped-storage power stations—that is, to lower the construction costs including machinery costs—the current trend in pump-turbines is toward increases in both operating head and rotation speed.

Toshiba has extensive experience in the design and manufacturing of high-head pump-turbines, including the world's highest operating head machine for the Chaira pumped-storage in Bulgaria. In addition to the enhancement of technologies through this experience, Toshiba continues the development of advanced technologies to realize pump-turbines with higher performance and higher reliability.

This paper introduces flow analysis technology, condenser operation technology, nondestructive testing methods, and a newly designed pump-turbine construction as some of Toshiba's advanced technologies for higher head and higher speed pump-turbines.

## 1 まえがき

揚水発電所の経済性追求の一貫として、ポンプ水車の高落差化の傾向<sup>(1)</sup>が進んでおり、今後計画されている地点も500 m級以上の高落差機が多い(図1)。また、近年はこの傾向に加えて機器サイズの小型化および高効率化を図るため、定格回転速度の高速度化が指向されている。

500 m級以上の高落差ポンプ水車は高い比速度(回転速度×出力<sup>1/2</sup>/落差<sup>5/4</sup>)を確保するほうが効率が高くなるため、従来実績よりも高い回転速度を採用することが重要なポイントとなっている。一方、高速度化を進めると部分負荷時の水圧脈動の増大や吸出し高さの増加などが懸念されるため、従来の性能模型試験による検証に加え、最新の流れ解析技術を駆使してキャビテーション性能や流れ損失の検証、流路形状の適正化が図られている。近年、計算機の飛躍的向上と数値解析技術の進展は目覚ましく、従来の模型試験結果をベースとした水車の流体設計開発にも流れ解析技術が利用され、開発プロセスのなかで重要な位置を占めるようになってきている。

揚水発電所においては、上述の高性能化のニーズのほか、電力系統の安定化を図るためにポンプ水車を使用した調相運転のニーズが高い。特に、高落差、高速化に伴い、吸出し管の押し込み水圧が高くなることから、これに対して、信頼性の高い調相運転技術の開発が要求されている。

また、高落差、高速度化においては、高圧・高速水流が

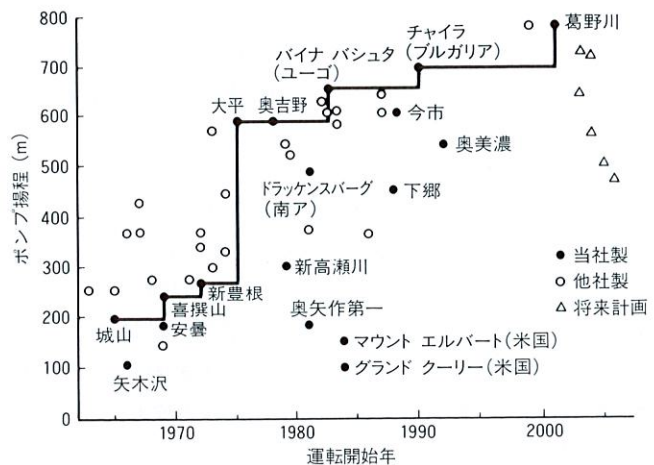


図1. 単段ポンプ水車の高落差化の推移 チャイラ揚水発電所以降も葛野川揚水発電所をはじめ500 m級以上の高落差の揚水発電所が数々計画されている。

Increase in head of single-stage pump-turbines

作用して水圧加振力が増大し、水圧脈動やランナ振動の増大を考慮する必要がある。これらに対応してさらに信頼性の高いポンプ水車を実現させるため、従来の実落差模型試験による事前検証のほか、ランナの非破壊検査方法の開発やポンプ水車の新設計構造の検討も実施している。

ここでは、上述のような技術動向のもと、当社が開発、確立してきた新技術の一端を紹介する。



## 2 流れ解析技術

現在の流れ解析技術は、比較的単純なモデルでは実在の流れを完全にシミュレーションできるレベルに達しつつある。しかし、設計開発では、エンジニアリングワークステーション (EWS) などで設計計算として許容する時間で実行できる非粘性のオイラー法解析<sup>(2)</sup>と粘性解析が実用的に適用されている。オイラー法解析は、ランナなどの圧力分布や流れのようすを比較的短時間に十分な精度で予測でき、能率的な形状の最適化を必要とする設計計算では有用である。一方、圧力損失を直接的に評価する場合や流れの剥(はく)離をある程度考慮した流れを予測するためには粘性解析が必要である。

ここでは、ポンプ水車の特性および性能の改善に流れ解析技術を適用した事例を紹介する。

### 2.1 キャビテーション特性の改善

500 m 級高落差ポンプ水車ランナに三次元オイラー法解析を適用し、揚水運転時のポンプ入口のキャビテーション特性を改善した<sup>(2)</sup>。

図2は、流れ解析に用いたランナのメッシュ分割を示す。キャビテーションは羽根面の最低圧力部が水蒸気圧に達したときに初生するため、解析による羽根面の圧力分布からキャビテーションの発生限界を表す初生キャビテーション係数が求められる。

図3は、従来設計のランナと流れ解析によって最適化した新設計ランナについて、運転全揚程に対する初生キャビテーション係数の変化を示す。また、同図には、流れ解析と模型試験で目視で求めた初生キャビテーション係数をそれぞれ示した。従来設計のランナは、設計点から離れて羽根入口に対する流入角度が増加すると羽根先端部で急激に圧力が低下し、キャビテーション性能を悪化させている。新設計ランナは、先端部で急激な圧力低下が起きにくいように流れ解析を用いて先端形状をチューニングしたもので、

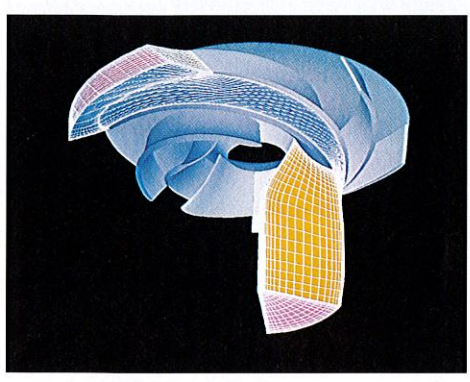


図2. 流れ解析モデル ランナの羽根1ピッチ間を細かいメッシュ(差分格子点 約45,000点)に分割し、流れ解析を行う。  
Flow analysis model of pump-turbine runner

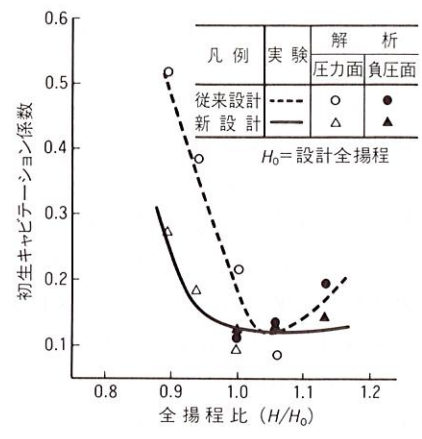


図3. 揚水運転時のランナ初生キャビテーション係数の比較 新設計(流れ解析)ランナはキャビテーション性能が大幅に改善され、解析結果は模型試験結果ともよく一致している。

Comparison of incipient cavitation coefficients of two runners in pump operation

高揚程および低揚程側ともにキャビテーション性能が大幅に改善されている。また、流れ解析結果と試験結果はよく一致していることがわかる。

### 2.2 性能改善

図4は、500 m 級ポンプ水車の高速化を目的に、オイラー

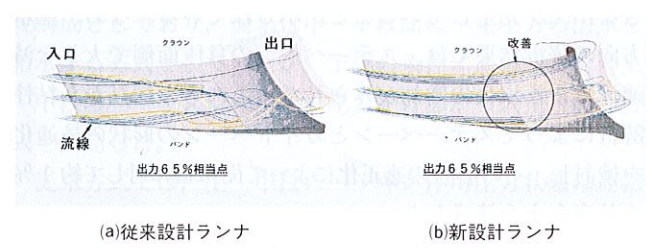


図4. ランナ内のフローパターンの比較(65%発電負荷) 従来の設計ランナで見られる流れの偏りが新設計ランナでは緩和されている。

Comparison of flow patterns of two runners at 65% partial-load turbine operation

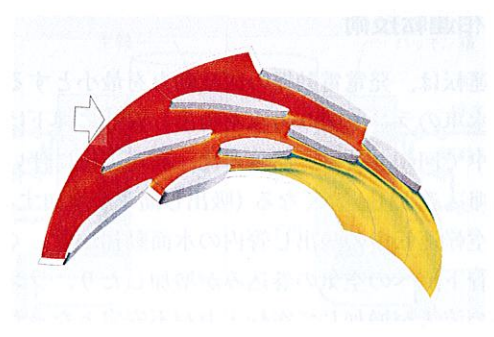


図5. ステーベーン、ガイドベーン流路の全圧分布(発電方向) 暖色系から寒色系への変化は流れの損失によって全圧が低下することを表し、ガイドベーン後流部でその低下が大きい。

Total pressure distribution around stay and guide vanes in turbine direction



法流れ解析を適用して発電方向部分負荷運転時の流れを改善した結果を示す<sup>(3)</sup>。

従来設計ランナでは、部分負荷運転時にクラウン側からバンド側へ流れが大きく偏り、ランナ出口での旋回流れによる強い吸出し管のホワールが発生する。新設計ランナでは、その流れの偏りが大きく緩和され比較的均一な流れとなっている。二つのランナについて模型試験で吸出し管の水圧脈動を計測した結果、新設計ランナの水圧脈動は65%負荷以下で従来設計ランナと比較して大幅に小さくなり、同時に部分負荷の効率も向上した。

次に粘性解析の適用事例を以下に述べる。ポンプ水車の効率は、ステーベーン、ガイドベーン、ランナなどで発生する水力損失、ランナシール部の漏れ損失、ランナの背面の円板摩擦損失などが影響し、それらの損失低減の検討では粘性流れ解析が適用されている。特に高落差のポンプ水車では、ステーベーンとガイドベーンで発生する損失が比較的大きく、ステーベーンとガイドベーンの損失低減が効率向上に対するポイントの一つである<sup>(4)</sup>。

図5は、500m級機の発電方向について従来設計のステーベーン、ガイドベーンの三次元粘性流れ解析を行い、その結果としてベーン中央高さ断面の全圧分布を示した。暖色系から寒色系に変化するにつれて流れの損失によって全圧が低下することを表しており、ガイドベーンの後流部で大きな損失が発生していることが示されている。なお、揚水方向の解析結果では、ステーベーンの負圧面側で大きな減速流による損失の増加がみられた。これらの知見から粘性解析によってステーベーンとガイドベーンの形状の最適化を検討し、その形状の適正化によって従来機に対して約1%の効率向上を達成した。

上述のように、流れ解析技術は模型試験では困難であった三次元の複雑な流動メカニズムの理解を助け、今後ますます、水車およびポンプ水車の流体設計の開発ツールとしてその重要性を増していくと思われる。

### 3 調相運転技術

調相運転は、発電電動機の回転動力を最小とするため、ポンプ水車のランナ周りの水を吸出し管部に押下げてランナを空中で回転させる。高落差化、高速化に伴い、吸出し管の押し込み水圧が高くなる(吸出し高さが増加することから、空転運転中の吸出し管内の水面動揺が激しくなり、吸出し管下流への空気の巻き込みが増加したり、ランナ内への水滴の流入が増加して空転入力不安定となったり、振動発生などの原因となる。

そこで、今後の吸出し高さの増加に対して、信頼性の高い調相運転技術の開発を行っている。

#### 3.1 模型調相試験装置

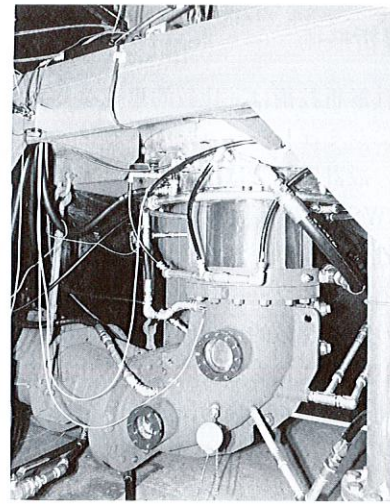


図6. 模型調相試験装置 水面押下げ運転時の吸出し管内の水の挙動が把握できる。

Pump-turbine model test stand for condenser operation

吸出し管内の水の挙動を把握するため、図6に示す模型調相試験装置を開発した。

吸出し高さが増加すると、ランナ回転による遠心風圧力の影響により、水面動揺現象は従来考えられなかった竜巻状の状態となり、吸出し管内に強い二次流れが発生する。この高圧空気と水の挙動を示すパラメータとして、密度比補正フルード数  $F_d$  がある。

$$F_d = \sqrt{\rho_a / (\rho_w - \rho_a)} \times (U_e \sqrt{g \cdot D_e}) \quad (1)$$

$\rho_a$  : 高圧空気の密度                       $\rho_w$  : 水の密度  
 $U_e$  : ランナ出口部の周速度               $g$  : 重力加速度  
 $D_e$  : ランナ出口径

$F_d$  が大きくなるほど吸出し管内の水面動揺現象が激しくなる。従来の  $F_d$  は1.4程度以下であったが、今後は高落差化、高速化の傾向に伴う吸出し高さの増加により、 $F_d$  が1.5以上の揚水発電所の計画が増加する。この試験装置は十分大きい  $F_d$  の範囲まで運転できる専用のものであり、 $F_d$  を実物と一致させた条件下で、空転入力、漏気量特性の検証が可能である。これにより、最適な吸出し管形状、水面押下げ位置、制御配管構成を決定することができる。

#### 3.2 漏気量低減技術

ランナを揚水方向に回転させる調相運転時は、ランナの強い遠心風圧作用で、吸出し管内の二次流れによる水面動揺が特に激しくなり、吸出し管下流に空気が巻き込まれやすい。この下方に流下する空気を減少させるには、吸出し管円すい管部を長くし、吸出し管エルボと押下げ水面位置を離すことが考えられるが、吸出し管高さが大きくなるために土木コスト上不利となる。そこで、吸出し管高さをそれほど大きくしなくても安定した漏気特性をもつ、すなわ



ち従来の設計に対して漏気特性を改善した吸出し管形状を開発した。これは、吸出し管の断面形状およびエルボ部の長手方向形状について十分な考察を加えたものである。600 m 級高落差ポンプ水車の試設計例では、従来設計の吸出し管の高さに対して 10% 程度高さを低くすることができる。また、この改善型吸出し管の通常運転時の効率特性などは、従来設計と同等以上である。

#### 4 超音波探傷技術

高落差ポンプ水車ランナの羽根先端領域は高い負荷応力を受けるため、有害な欠陥が残存しないように的確な検査を実施する必要がある。従来、各種の非破壊検査を用いて高応力部の健全性を確認しているが、特に表面近くに埋没した表層欠陥については放射線透過試験の適用が難しく、綿密な超音波探傷試験を実施している。

一般に、超音波探傷試験は検査員の技量、集中力や判断力に負うところが多く、長時間の作業に伴い体力と神経を相当に消耗させる。このような状況を改善し、より高い信頼性を確保するため、検査員の能力に負うところを極力低減させた超音波探傷データ自動収集・評価システムを開発した。このシステムは、三次元位置探知器、超音波相受信器、コントロールボックスなどで構成されている。ランナの羽根面は、複雑な三次元曲面形状であるために機械化された自動探傷が困難であり、手探傷によるシステムを採用した。このため、三次元曲面形状の試験面へ任意に追従探傷できるように、6 自由度をもつ超音波探触子位置検知器を開発した。また、欠陥評価に必要なデータを効率よく収集、保存する各種フィルタ機能をもつ信号処理器を開発し、全体をコンパクト化して狭隘(あい)部での作業性を向上させた。このシステムの特長の一つは多方向から入射した超音

波を総合的に評価できる点にあり、鑄造欠陥のように傾きなど欠陥性状が不特定な場合でも欠陥分布状況を漏れなく把握できる。また、探触子走査の完了範囲と欠陥検出位置を常時モニタできるようにして確実な探傷を達成している。

ランナ羽根先端部のモックアップ試験体に人工欠陥を導入し、この装置で探傷した結果を図 7 に示す。この結果は曲面部に導入された欠陥も正確に画像化でき、欠陥の長さおよび深さ寸法も的確に検出できることを示している。また、得られた探傷結果は非常に微細な欠陥まで検出できるため、データ処理を施すことにより真に有害な欠陥だけを抽出し、適切な欠陥除去と補修を可能としている。

#### 5 ポンプ水車構造

高落差化、高速化に対応した高信頼のポンプ水車を確保するため、その構造面においても設計上の配慮を実施している。以下にその一例を紹介する。

##### 5.1 圧力調整方式主軸封水装置

ポンプ水車の主軸封水装置は高速・高落差化に伴い封水条件が過酷化し、パッキン摺(しゅう)動面周速は 25 m/s を超え、封水圧力は常時でも 1 MPa 以上で、過渡時には 2 MPa に達するまでになっている。構造的には圧力条件の厳しい上方向は 2 段(上・中段)、下方向を 1 段(下段)の 3 段構成としており、従来は中・下段間に一定圧力の清水を給水する方式としていたが、上記の条件に適應するため上・中段のパッキンに作用する圧力を外部から調整可能な方式を開発した。

従来方式では、上・中段のパッキン作用圧力状態は運転後の摺動面漏水状況などで左右され必ずしも均等に各段で分担されることにはならない。特に、高周速・高圧力の条件下ではこのばらつきが大きくなると最終的には 1 段だけで圧力を分担するに至り、漏水量過小・発熱・異常摩耗を生じさせることもある。これに対し図 8 に示す新方式は、

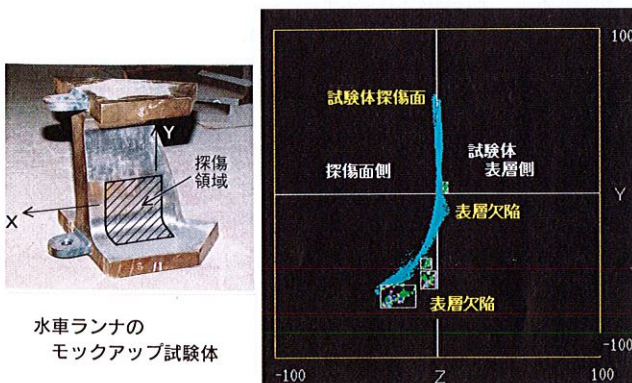


図 7. モックアップ水車ランナの探傷結果例 ランナ羽根付根部に内在させた欠陥が的確に検出され、欠陥の位置と寸法が羽根形状と関連づけて表示される。

Result of inspecting mock-up runner blade incorporating embedded artificial defects

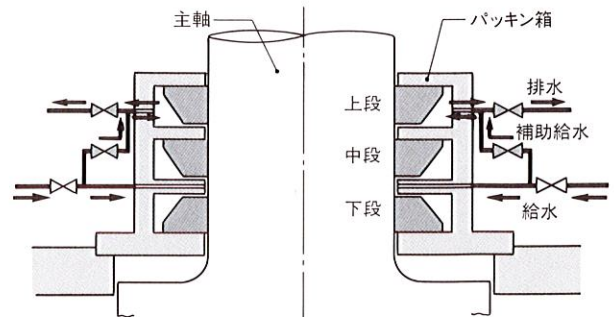


図 8. 圧力調整方式主軸封水装置 排水ルートおよび補助給水ルートを設けることにより上・中段パッキンの作用圧力を均等に調整できるようになっている。

Water-pressure-controllable packing box



上・中段間に新たに排水ルートおよび補助給水ルートを設け、運転後の圧力分担状況により排水あるいは追加給水させる。これにより、摺動面の漏水状況にかかわらず上・中段のバックシン作用圧力の適切な調整が可能となり、高圧・高周速条件下においても安定した封水性能が得られる。

### 5.2 上カバーリブ付き配管

ポンプ水車は多数の制御配管をもち、その約30%が上カバー内を通っている。これらの配管は、主機運転による振動の影響を受けやすく、配管サポートを設けて剛性を高めるよう配慮している。しかし、実際には上カバー内のスペースの関係で、サポートの設置に苦慮してきた。

そこで、上カバー内に放射状に設置された縦リブを利用して、リブ両側に配管を約1/2に切断して溶接取付けする構造を開発した(図9)。この構造では、上カバー振動と同相で振動し、振動の位相がずれたり振動が増幅することがないために疲労破壊を防止でき、配管サポートは不要となる。また、リブ両側に直接取付けているためリブ間のスペースが従来構造よりも広く取れる。

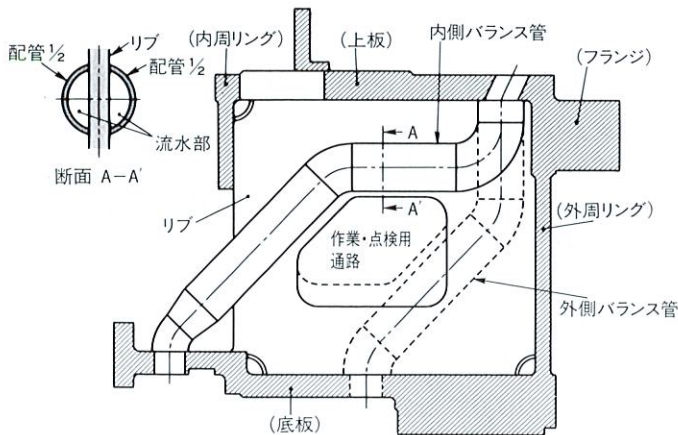


図9. 上カバーリブ付き配管 200 Aの配管6本(内側、外側バランス管)をリブ付き配管で製作した。

Piping integrated with head cover ribs

## 6 あとがき

当社は、現在運転中の世界最高揚程のブルガリア チャイラ揚水発電所(揚程701 m, 単機出力216 MW)向けポンプ水車(日本機械学会技術賞受賞)をはじめとする高落差機や、近年の傾向である高速度化を指向した奥美濃揚水発電所(揚程536 m, 単機出力259 MW)向けポンプ水車を設計・製作し、ポンプ水車の分野で世界有数の実績をあげている。

これらの実績技術に加え、ここで紹介したような高性能、高信頼性を追求した最新の技術を今後とも維持・発展させ、これから計画される高落差、高速度のポンプ水車をもつ揚水発電所の建設に大きく貢献したいと考えている。

## 文献

- (1) 市川健太郎, 他: 高落差・大容量化する水車およびポンプ水車の技術動向, 東芝レビュー, 43, 12, pp.970-973 (1988)
- (2) 鈴木敏暁, 他: ポンプ水車における初生キャビテーション特性の改善, ターボ機械協会講演論文集(1994-10月)
- (3) T. Nakamura, et al: Study on High Speed and High Head Reversible Pump-Turbine, Proc. of 18th IAHR Symposium, Valencia (1996)
- (4) 島田尚子, 他: 水車ステーベーン・ガイドベーンの損失予測, 日本機械学会講演論文集(1995-8月)

### 篠原 朗 Akira Shinohara



電力事業部水力プラント技術部グループ長。  
水力発電プラントのエンジニアリング業務に従事。  
Power Systems Div.

### 松本 貴与志 Kiyoshi Matsumoto



重電技術研究所回転機器開発部グループ長。  
ポンプ水車などの流体設計, 模型開発に従事。日本機械学会会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.

### 内田 邦治 Kuniharu Uchida



京浜事業所水力機器部参事。  
非破壊検査技術の開発および水車部品材料の評価に従事。  
日本機械学会, 溶接学会会員。  
Keihin Product Operations