

既設揚水発電所ポンプ水車のリニューアル

Refurbishment of Existing Pump-Turbines in Aging Pumped Storage Power Plants

松本 貴與志

MATSUMOTO Kiyoshi

杉下 懐夫

SUGISHITA Kaneo

手塚 光太郎

TEZUKA Kotaro

揚水発電所は電力需要変動に対する即応性と電力貯蔵機能を備えた発電システムであり、この特長を生かして多くの揚水発電所が電力システムの効率運用に寄与している。現在稼働している揚水発電所のなかには、運転開始以来長期間が経過しているものも多いが、最新のポンプ水車性能向上技術を用いて改修することにより、運用効率を向上し、更に電力システムへの貢献度を高めることができる。

Pumped storage power plants can accumulate electricity and respond rapidly to the demands of the electric grid system. They have therefore played an important role in the stable operation of the electric grid system. However, some of these plants have been in operation for many years since their commissioning. Such aging plants can be refurbished using recently developed hydraulic design technology, thereby improving their hydraulic performance and contributing to the optimal operation of the electric grid system.

1 まえがき

揚水発電所は、電力需要変動に対して深夜電力を利用して下部の貯水池から上部の貯水池に水をくみ上げ、この貯水を利用して昼間のピーク負荷対応として発電するシステムであり、この電力貯蔵機能と電力需要変動に対する即応性という特長を生かして、電力システムの効率運用のために多くの揚水発電所が稼働している。

既設揚水発電所のなかには、運転開始以来、長期間が経過しているものも多し。これらに適用されているポンプ水車は、建設当時の最新技術により設計・製作されたものであるが、ポンプ水車の性能開発技術は着実な進歩を遂げてきており、現在の最新技術⁽¹⁾の適用により、既設揚水発電所を大幅に高性能化することが可能となっている。特に揚水発電所は、経済性の観点から大容量化されており、既設設備の性能向上はエネルギーの有効活用への効果も大きい。

ここでは、最近の既設揚水発電所更新の事例を通じて、ポンプ水車性能向上技術とランナ製造技術について述べる。

2 ポンプ水車の性能向上

既設機の性能向上では、既設機の性能診断や運転の状況を十分把握したうえで新ランナの性能開発目標を定め、流れ解析を用いた新ランナの設計最適化を行う。また、その後、既設相似模型により新ランナの性能検証並びに更なる特性の最適化を行い、その結果に基づき実機ランナを製作

する。

以下、関西電力(株)喜撰山発電所と東京電力(株)安曇発電所のランナ更新に適用した事例について述べる。

2.1 喜撰山発電所ポンプ水車

喜撰山発電所ポンプ水車1号機(最高全揚程230m、最大出力240MW、回転速度 225 min^{-1})は、1970年当時、世界最大容量の揚水発電所として建設され、以来30年あまりを経て、2002年3月にランナ更新を実施した。この発電所の最近の運用状況は、部分負荷側の130M~170MWの範囲での運転頻度が高くなっており、またランナ点検の際に、ポンプ吸込み側の羽根圧力面上にキャビテーションによる壊食が発生していることが確認されている。そこで、新ランナ開発のポイントは次のようにした。

- (1) 羽根全体形状を適正化し、羽根面圧力変化の一様化による損失低減とバンド側(外周側)への偏流の抑制を狙うとともに、設計流量を水車部分負荷運転側へ移して部分負荷効率の向上を図る。
- (2) ポンプ入口先端形状に流入方向の変化による影響を緩和する形状を採用して、キャビテーション特性の改善を図る。

これによる効率の向上は、年間発電量を1%以上増加させることを目標とした。なお、この改修工事ではランナ以外の静止流路は既設をそのまま流用するため、設計上の制約として、ランナ外径(=5,740mm)、出口径(=3,496mm)などの主要寸法は既設ランナと同一とした。また、羽根枚数も既設ランナと同一の6枚とした。

流れ解析は、水車やポンプ水車への適用実績の多いk-乱流モデルを適用した定常解析を行った。ステーベン・ガイドベーン流路側とランナ側を個別に解き、上流側の解析結果を下流側の境界条件に適用した。

水車最高落差時の最大出力点近傍におけるランナ羽根負圧面の圧力分布の等高線を図1に示す。既設ランナでは、ランナ出口バンド側で圧力変化が一様になっていない領域が見られるほか、等高線の粗密の変化がやや不均一になっている。これに対して、新ランナではこれらの傾向が抑制されており、良好な羽根形状にあることが示されている。

ポンプ入口キャビテーションについては、既設ランナの流れ解析から、実機で壊食されている部位に局所的な圧力低下が発生していることが確認されているため、新ランナではポンプ入口羽根角度分布の適正化と羽根先端形状の鈍頭化によって、羽根先端の局所的な圧力降下を緩和し、実機運転時のキャビテーションの発生を抑制した。

上記設計に基づいて既設の流路と相似なモデルを製作し、モデル試験を実施した。水車運転でのモデル試験結果を既設ランナと比較して図2に示す。新ランナは水車・ポンプ効率ともに運転範囲全域において既設ランナを上回った。特に水車部分負荷領域では、大幅な効率向上が達成されている。これらの効率向上によって年間発電量は1.7%増加する結果が得られ、目標を大幅にクリアした。ポンプ入口キャビテーションについても詳細に発生状況を観察し、流れ解析結果と同様に、運転範囲全域においてキャビテーションが発生しないことが確認された。

新ランナを適用した実機ポンプ水車の現地効率試験結果を図3に示す。現地試験では、モデル試験からJSME(日本機械学会)-S-008(1999)の厳密換算法を用いて換算した実物性能を多少上回る結果が得られているが、それらは比較的良好に一致している。また、ケーシング、吸出し管とも部分負荷

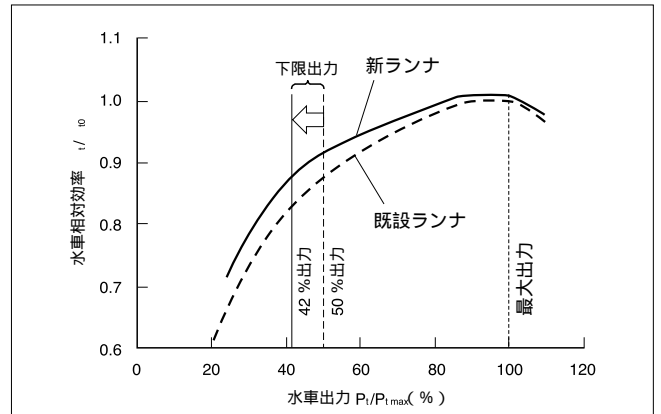
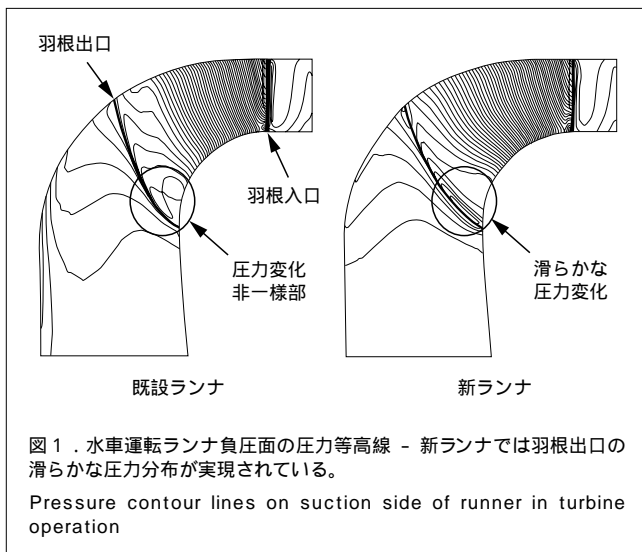


図2. モデル試験による水車性能の比較 - 新ランナは大幅な効率向上を示している。

Comparison of turbine performance in model tests

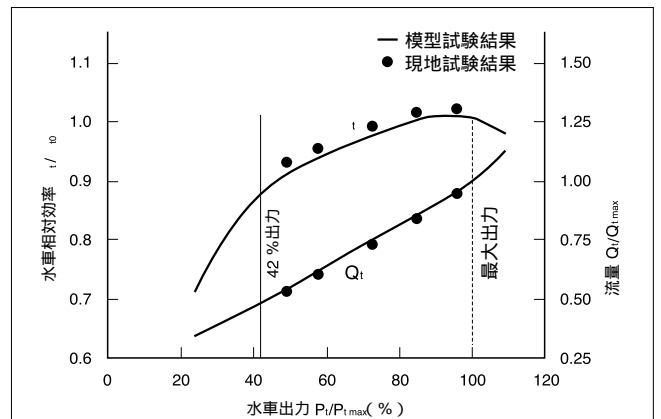


図3. 現地試験による水車効率測定結果 - 現地試験で、モデル試験の結果とよく一致し、目標性能をクリアしていることを確認した。

Turbine efficiency measured in on-site test

での水圧脈動が大幅に低減されており、モデル試験結果から予測した下限出力でも、ホワールの振れ回りによる吸出し管内の騒音は比較的小さく、運転状態に問題がないことが確認された。

2.2 安曇発電所ポンプ水車

安曇発電所ポンプ水車3・4号機(最高全揚程138.2m,最大出力108.5MW,回転速度187.5min⁻¹)は、前述の喜撰山発電所ポンプ水車と同程度の比速度で、羽根枚数も同じく6枚である。ランナ外径は5,280mmであるが、輸送上の制限から2分割構造をとっている。この発電所は、変落差比(最高全揚程/最低有効落差)が1.83ときわめて大きいという特徴がある。そのため、既設ランナでは、水車低落差領域で発生するランナ入口の流れの乱れによる振動増大などの運用上の問題があった。そこで、既設のガイドベーン枚数20枚との羽根枚数の組合せを考慮して、4+4スプリッターランナ(長翼4枚,短翼4枚)を開発して安曇発電所向け新ランナに

適用した。スプリッターランナは、長い通常羽根（長翼）の間に、長翼とは設計が異なる短い羽根（短翼）を周方向に交互に配置したものである（図4）。スプリッターランナは、短翼による長翼流路間の整流効果と、ランナ入口部を多翼化したことによるランナ入口部の翼負荷の減少によって、部分負荷や低落差領域で発生するランナ内の二次流れの損失と不安定流れを抑制し、変落差や変流量などの性能特性を向上させることが可能である。更に、スプリッターランナは多翼構造によって固有振動数が増加するため、定格回転速度以下では共振点は現れず、また静的剛性も高くなるため、強度や振動面でも高い信頼性を備えている。

安曇発電所向けスプリッターランナに関しても、流れ解析によるランナ設計の最適化を行い、模型試験で効率やキャビテーション、水圧脈動などの性能特性を確認した。既設ランナとスプリッターランナの水車低落差運転での流れ解析結果を図5に示す。既設ランナでは羽根圧力面クラウン側で流れの剥離はくりが生じた不安定な流れとなっているのに対して、スプリッターランナには大規模な剥離は見られない。これは、多翼化による相対的な翼負荷の減少に加えて、ポンプ出口のスリップの減少に合わせて羽根入口角度を既設ランナより

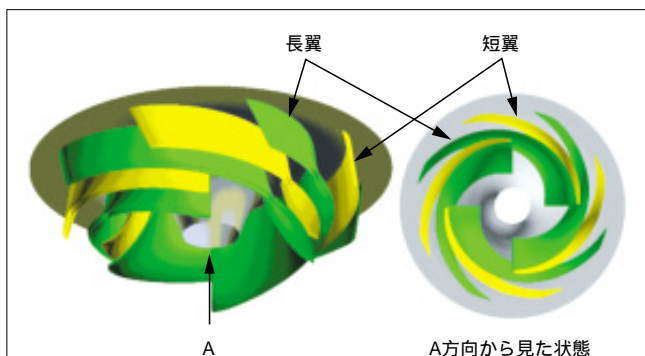


図4．4 + 4 スプリッターランナ - 4枚の長翼とその流路間に短翼4枚を交互に配置した新型高性能ランナである。
Splitter runner with 4+4 blades

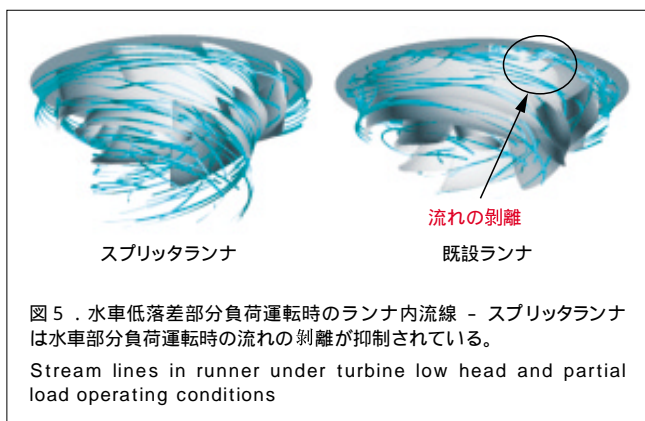


図5．水車低落差部分負荷運転時のランナ内流れ - スプリッターランナは水車部分負荷運転時の流れの剥離が抑制されている。
Stream lines in runner under turbine low head and partial load operating conditions

も小さくすることができるため、部分負荷での流れ角度と羽根角度との差を小さくできることも要因として挙げられる。一般に低落差運転では、前記の角度差が拡大することにより特性が悪化するが、スプリッターランナでは幅広い落差変化幅に耐えて良好な運転が可能である。

模型試験結果のうち、水車運転時の水圧脈動特性について、既設ランナとスプリッターランナの比較を図6に示す。既設ランナでは、実機の振動・騒音などの運転状況から、下限運転は61%出力に制限されているが、スプリッターランナは47%まで許容下限出力を下げることが可能となった。また、流れ解析で予測されたとおり、スプリッターランナのポンプ入口キャビテーション性能の向上も模型試験で検証され、部分負荷特性の向上と合わせて、既設ランナに対して運転範囲の大幅な拡大が達成された。なお、現在、実機ランナを製作中で、2003年からスプリッターランナによる運用が開始される。

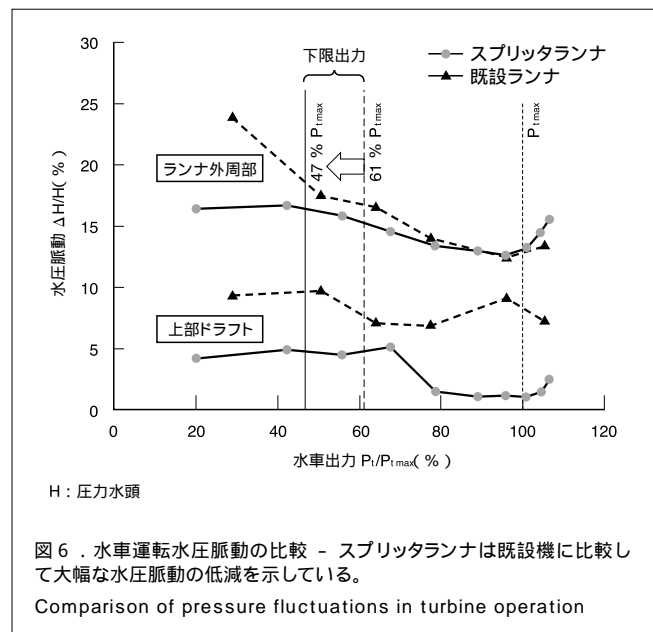


図6．水車運転水圧脈動の比較 - スプリッターランナは既設機に比較して大幅な水圧脈動の低減を示している。

Comparison of pressure fluctuations in turbine operation

3 溶接構造ランナ

両発電所とも実機ランナは、最近の製造技術の進歩を取り入れた溶接構造で、材質は水車及びポンプ水車ランナに広く適用しているキャビテーション壊食に強く、溶接性にも優れたステンレス鋼鋳鋼品SCS6を用いている。

一般にポンプ水車の溶接構造ランナの場合は、クラウン、バンド、羽根は各々単体で鋳造され、溶接前に機械加工される。三次元形状の羽根面はNC(数値制御)機で加工するが、枚数が少なく1枚の長さ長いポンプ水車の羽根は、複数の部分に分割して鋳造することが多い。

図7は工場組立中の喜撰山発電所向けランナで、羽根とクラウンの溶接を終了した状態を示す。また、最新の溶接口

ボットを用いてクラウンと羽根を溶接している安曇発電所向けランナを図8に示す。この溶接口ボットは、CAD/CAM技術を最大限に活用したもので、3軸マニピュレータ、ターンテーブルと6軸多関節ロボットで構成されており、高度な溶接線テーシング機能とセンシング機能を持ち、最大100tの重量のランナまで連続自動溶接ができる。

こうした溶接構造ランナは、従来の一体鋳造ランナと比較して次のような特長を持つ。

- (1) 一体鋳造と溶接構造のいずれも、規格で定められた形状精度を満足するように製造するため、製造方法により形状精度や基本的な性能が変わることはない。ただし、一体鋳造ランナのクラウンとバンドの流水面は、鋳造後、グラインダーで最終形状に整形されるのに対して、溶接構造ランナの流水面は溶接前に機械加工される。このため、流水面のうねりや、羽根ごとの形状・寸法のばらつきは一体鋳造ランナより少なくなる。その結果、溶接構造ランナでは、効率及びキャビテーション特性などをより設計特性に近づけることができ、安定した性能

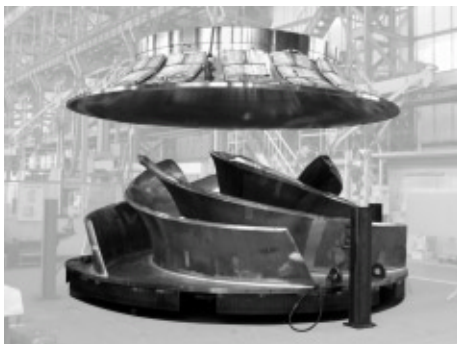


図7．喜撰山発電所向けランナ - クラウンと羽根の溶接終了後、バンド組立て中の状態を示す。

Prototype runner for Kisenyama Pumped Storage Power Plant

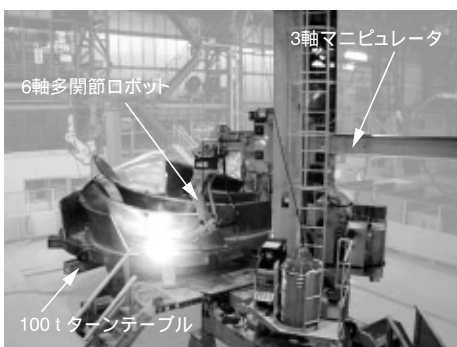


図8．溶接ロボットと安曇発電所向けランナ - 溶接口ボットを用いてクラウンと羽根を溶接している。

Automatic welding robot and prototype runner for Azumi Pumped Storage Power Plant

を得ることができる。

- (2) 高性能な溶接口ボットを用いることにより、ランナの羽根間の狭いスペースでも、環境の影響を受けることなく、長時間安定した品質で連続溶接が可能となる。

なお、溶接構造ランナの品質に関しては、必要最小限の入熱で溶接完了するように、応力レベルに応じた溶接施工方法を選択し、熱変形を抑制するとともに、溶接後に入念な非破壊検査を実施し、欠陥を除去する。最終的には、適切な応力除去焼なましを実施し残留応力を除去する。これらの施策により、最終的には一体鋳造ランナと同等以上の品質が確保される。このように、今後の水車及びポンプ水車のランナは、溶接口ボットによる自動溶接を大幅に取り入れた溶接構造ランナが主流になる。

4 あとがき

最近のポンプ水車ランナの性能開発技術や製造技術を利用して既設揚水発電所をリニューアルし、大幅な効率向上を達成した例について述べた。これらの技術により、エネルギーの有効活用が図られるものと確信している。

謝辞

ランナ更新にあたり、ご支援、ご指導いただいた関西電力(株)並びに東京電力(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文献

- (1) 山形一郎,ほか.進化する揚水発電.東芝レビュー.54,12,1999,p.34-39.
- (2) 垣内 隆,ほか.“ランナ更新による既設ポンプ水車の性能向上”.ターボ機械協会講演論文集.2002,p.61-66.
- (3) 田口 忠,ほか.ポンプ水車スプリットランナの開発.ターボ機械協会.29-12,2001,p.736-744.



松本 貴與志 MATSUMOTO Kiyoshi

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 回転機器開発部主幹。水車・ポンプ水車の性能開発に従事。日本機械学会,ターボ機械協会会員。

Power and industrial Systems Research and Development Center



杉下 懐夫 SUGISHITA Kaneo

電力システム社 京浜事業所 原動機部主幹。水車・ポンプ水車の水力設計・ランナ設計に従事。日本機械学会,ターボ機械協会会員。

Keihin Product Operations



手塚 光太郎 TEZUKA Kotaro

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 回転機器開発部。水車・ポンプ水車の流体解析・性能開発に従事。日本機械学会,ターボ機械協会会員。

Power and industrial Systems Research and Development Center